

Introduction

Si la conception de nouveaux produits passe par la vérification de leur résistance aux sollicitations mécaniques en terme de chargement statique, elle doit aussi considérer le phénomène de fatigue, au caractère de plus en plus dominant lorsque les chargements sont variables. Dans un contexte de forte compétition économique et de respect de l'environnement, la réduction de matière première, et des coûts en général, devient aujourd'hui le principal critère dans la recherche d'une solution mécanique et technique, avec son incidence sur l'environnement. A cahier des charges constant voire plus exigeant, comme c'est souvent le cas, l'allègement des structures métalliques, du fait de la réduction de matière première mise en jeu, conduit à une augmentation des niveaux de contraintes, ce qui se traduit par une recrudescence des problèmes de rupture par fatigue. Citons à titre d'exemple le secteur des transports et plus particulièrement celui de l'industrie automobile où l'allègement est devenu un leitmotiv pour plusieurs raisons. La concurrence oblige les constructeurs à être compétitifs en terme de prix, d'encombrement, de consommation, de fiabilité et d'équipements embarqués sur les véhicules. Ainsi le moindre gain de poids se traduit par une diminution des coûts de matière, une réduction de la consommation ou encore un gain d'espace et donc une possibilité d'accroître l'ergonomie du véhicule. Cependant le dimensionnement en fatigue n'est pas la préoccupation du seul secteur automobile, car la diminution des épaisseurs se convertit directement en une réduction des coûts plus ou moins marquée selon les catégories de matériaux mises en jeu.

Il est nécessaire de prendre en compte le phénomène de fatigue afin de garantir la fiabilité et la sécurité d'un composant dès sa phase de conception. La tendance est aujourd'hui à une diminution du nombre d'essais en service des nouvelles solutions. La démarche classique, une fois la phase de conception d'un nouveau produit achevée, consiste à réaliser un prototype. Ce dernier est ensuite validé en endurance par les essais sur banc ou in situ. Si la solution ne répond pas au cahier des charges en terme de durée de vie, l'analyse de la fissuration par fatigue entraîne alors un remaniement de la conception et aboutit à un nouveau prototype qui suivra le même cursus. Ce circuit classique de conception est aujourd'hui remis en question pour des raisons de coût (amortissement des installations et temps d'immobilisation), et parce qu'il se révèle complexe et non compétitif en terme de délai.

L'objectif du dimensionnement en fatigue est de pourvoir le concepteur d'un outil-logiciel lui permettant de simuler le comportement en fatigue de nouveaux produits soumis au cas le plus général de chargement, c'est à dire à des sollicitations multiaxiales aléatoires. La conception d'un composant mécanique suit alors un cheminement plus performant : dans un premier temps, et très rapidement, l'outil-logiciel permet de simuler la réponse en fatigue du composant soumis à un chargement type représentatif des sollicitations réelles en service, puis dans un second temps, il permet d'optimiser la conception du composant vis à vis de son comportement en fatigue en ajustant les marges de sécurité à la valeur souhaitée. La phase de conception sera alors optimisée du point de vue de la tenue à la fatigue avant même la réalisation du prototype.

Les travaux présentés dans cette thèse sont tous orientés vers la réalisation d'un outil-logiciel à caractère industriel de dimensionnement en fatigue sous chargement quelconque. Débutés il y a trois ans, ils ont été réalisés dans le cadre d'une convention CIFRE

entre le Laboratoire d'Etudes et de Développement des Produits Plats (LEDEPP) de SOLLAC et le Laboratoire de Mécanique des Solides (LMSO) de l'INSA de Lyon. Les deux premiers chapitres portent sur des études de validation d'outils spécifiques à la fatigue multiaxiale, préalable indispensable à leur intégration dans la démarche générale de prévision de durée de vie en fatigue, elle-même développée et validée dans le troisième et dernier chapitre.

Le premier chapitre est consacré à l'étude des critères de fatigue multiaxiaux. L'utilisation de ces critères est à la base des méthodes de dimensionnement en fatigue développées au LMSO et ils constituent les principaux outils des approches en contraintes du bureau d'études. L'objectif de ce chapitre est de rassembler le plus grand nombre de critères afin d'établir et de valider autant de modélisations possibles de la prévision de l'amorçage d'une fissure macroscopique. Les 37 critères présentés ont été recensés dans la littérature. Ils sont répertoriés en trois familles : les critères empiriques basés sur un grand nombre de résultats expérimentaux, les critères de type plan critique qui considèrent que l'endommagement par fatigue a lieu sur un plan physique particulier, et enfin les critères d'approche globale qui utilisent soit des invariants du tenseur des contraintes ou de son déviateur, soit des quantités liées à l'ensemble des plans physiques autour du point d'étude (point où est connu le cycle des contraintes et qui fait l'objet de l'analyse en fatigue). Le formalisme de chaque critère est présenté sous la forme d'une fonction de fatigue qui permet de comparer l'ensemble des expressions. Une banque de données regroupant 233 essais de fatigue multiaxiaux au seuil de l'endurance issus de la littérature permet de valider 24 des 37 critères (certains n'étant pas applicables pour tout type de sollicitations).

Le deuxième chapitre traite de la prise en compte du gradient de contrainte par les critères de fatigue. De nombreuses études expérimentales mettent en évidence l'aspect bénéfique en fatigue de la présence d'un gradient de contrainte. Les structures sont aujourd'hui de plus en plus complexes et leur géométrie engendre fréquemment des concentrations de contraintes dont les effets sont contradictoires : il y a localement une augmentation du niveau de contrainte, néfaste à la tenue en fatigue, mais celle-ci est compensée par le gradient de contrainte qui en quelque sorte rehausse les propriétés de résistance à la fatigue du matériau. Des considérations statistiques basées sur la présence de défauts répartis de manière homogène dans la matière permettent sinon de modéliser, du moins d'expliquer le comportement en fatigue des matériaux en présence d'un gradient de contrainte. Peu de travaux considèrent le gradient sous sa forme mathématique. Un travail mené au CETIM a permis de modéliser l'effet en fatigue du gradient propre à une entaille mécanique, mais la démarche se limite au cas de sollicitations de flexion-torsion en phase. Une proposition de Papadopoulos a été reprise afin d'intégrer la prise en compte du gradient de contrainte dans les critères du Laboratoire (critères de Robert et de Fogue). Des essais de fatigue en flexion-torsion permettent de valider les propositions. L'application de ces critères de fatigue au calcul des structures, à partir des champs de contraintes obtenus par la méthode des éléments finis, nécessite une procédure numérique particulière pour déterminer le gradient de contrainte. Cette procédure est décrite en fin de chapitre.

Le troisième et dernier chapitre est consacré aux méthodes de prévision de durées de vie sous chargement quelconque. La méthode classique en contrainte proposée par le LMSO est présentée puis validée grâce aux nombreux résultats d'essais, généreusement transmis par l'Université Technique d'Opole et obtenus sur des éprouvettes cruciformes soumises à des sollicitations biaxiales aléatoires. Une nouvelle approche est développée. Elle est basée sur le concept du dommage par plan. Le dommage relatif au point de matière où l'étude est menée est calculé puis cumulé plan par plan passant par ce point. Cette approche, qui utilise un critère de type plan critique, constitue une deuxième

méthode d'estimation de durée de vie sous chargement multiaxial d'amplitude variable. Elle est validée et comparée à la méthode classique. L'étude de l'influence du plan de comptage, plan dont la contrainte normale est utilisée pour le comptage des cycles, est ensuite exposée. Elle aboutit à une troisième méthode d'estimation de durée de vie sous chargement multiaxial aléatoire qui s'affranchit du choix du plan de comptage : il s'agit cette fois-ci de réaliser plan par plan le comptage de cycles, le calcul du dommage et son cumul. Cette nouvelle méthode est validée et comparée aux deux premières. Un logiciel regroupant les trois démarches est présenté. Couplé en post-processeur à un code de calcul par éléments finis, il constitue le logiciel industriel Sollife de dimensionnement à la fatigue de structures complexes soumises à un chargement quelconque. Sa validation est réalisée au travers de deux applications industrielles : un disque d'accouplement moteur et un triangle de suspension automobile. Le logiciel conçu peut ainsi être utilisé dès la phase de conception du composant pour optimiser le choix du matériau en fonction de son niveau de résistance en fatigue, ou la géométrie de la pièce analysée.

