

Conclusions et Perspectives

Les travaux présentés dans ce mémoire ont un dénominateur commun : ils visent tous à améliorer la modélisation du comportement des matériaux métalliques en fatigue sous sollicitations quelconques, allant des plus simples aux plus complexes que sont les sollicitations multiaxiales aléatoires.

Les critères de fatigue multiaxiaux comptent parmi les outils incontournables des méthodes d'estimation de durée de vie en contraintes développées depuis maintenant plus de 10 ans au LMSO. Le plus grand nombre d'entre eux ont été présentés et validés à l'aide d'une banque de données d'essais. 233 essais multiaxiaux menés au seuil de l'endurance et relevés dans la littérature composent cette banque de données. Elle intègre une grande variété de chargements (biaxialité, déphasage, contraintes moyennes, ...). Au total 24 critères ont été validés. Les graphiques donnant le nombre d'essais en fonction de l'écart de validité permettent de juger de leur justesse et de dégager éventuellement leur caractère conservatif ou non conservatif. Ainsi les critères de Munday & Mitchell, Yokobori, Altenbach & Zolocheski 2, Deitman & Issler 1 et Kinasoshvili sont très peu fiables. Ceux de Findley et Stulen & Cummings sont trop conservatifs tandis que ceux de McDiarmid 1, Altenbach & Zolocheski 1, Crossland, Papadopoulos 1 ne le sont pas assez fortement. Nous avons montré que certains critères de type plan critique présentent une ambiguïté. Lorsque plusieurs plans sont définis comme critiques, la valeur de la fonction de fatigue n'est pas la même selon le choix du plan critique. Ces critères ne nous semblent donc pas très pertinents bien qu'ils donnent des résultats pouvant être considérés globalement comme corrects. Cette étude des critères de fatigue a pour dessein leur insertion dans la méthode classique d'estimation de durée de vie sous chargement quelconque. Cette intégration est réalisée de façon à conserver au mieux le formalisme initial de chaque critère.

La modélisation du comportement en fatigue des matériaux implique de traduire autant que possible les tendances issues des observations expérimentales. Ainsi certains critères dissocient les parties moyenne et alternée des contraintes normales, ou du premier invariant du tenseur des contraintes (pression hydrostatique), pour rendre compte précisément de l'effet néfaste des contraintes moyennes de traction que l'on constate sur un diagramme d'endurance en traction-compression. De même, ils ne prennent en compte que la partie alternée du cisaillement ou du deuxième invariant du déviateur des contraintes (contrainte octaédrique) afin de traduire la non-influence d'un cisaillement moyen en fatigue, comme en atteste le diagramme d'endurance en torsion. Un autre paramètre influant sur le comportement en fatigue est la présence d'un gradient de contrainte due à une entaille par exemple. Nous avons montré, au travers de nombreux résultats expérimentaux, l'aspect bénéfique du gradient de contrainte sur la tenue en fatigue des matériaux. Sa prise en compte a été faite jusqu'alors par l'intermédiaire de coefficients relatifs à la concentration de contrainte (coefficient k_t) et à la diminution des limites de fatigue exprimées en terme de contrainte nominale (coefficient k_f) entre une éprouvette lisse et entaillée. La première prise en compte du gradient de contrainte au sein des critères de fatigue a été entreprise par Papadopoulos. Il a judicieusement introduit un terme dans l'expression du critère de Mataka. Cependant pour des sollicitations de flexion-torsion ce nouveau critère n'apporte aucune amélioration par rapport à un calage du critère initial sur les limites d'endurance en flexion et en torsion alternée symétrique. Le terme introduit intègre le gradient de la seule contrainte normale agissant sur le plan critique considéré. Justifiant son raisonnement par la non-influence d'un cisaillement moyen sur la limite de fatigue en torsion, il néglige le gradient des

contraintes tangentielles. Nous pensons que cette hypothèse mérite d'être validée expérimentalement afin qu'elle soit bien étayée. En se basant sur le principe donné par Papadopoulos, nous avons intégré la prise en compte du gradient aux critères du laboratoire (Robert et Fogue) en respectant leur formulation. Les résultats de la validation sur 73 essais de flexion-torsion montrent une amélioration du critère de Fogue tandis qu'elle n'apporte pas d'amélioration évidente pour les critères de Mataka et Robert par rapport à la version de ces mêmes critères calés simplement sur la limite de fatigue de flexion au lieu de celle de traction. La prise en compte du gradient proposée peut être étendue suivant le même principe à d'autres critères. L'utilisation des critères intégrant le gradient pour des structures à géométrie complexe nécessite la mise en œuvre d'une méthode numérique permettant, à partir de résultats de calculs par éléments finis, de déterminer la valeur du gradient quelque soit le type de chargement. Cette étape indispensable a fait l'objet d'une proposition.

La finalité de ces études est l'implémentation des critères de fatigue dans la méthode d'estimation de durée de vie proposée par le laboratoire. Celle-ci a évolué dans un premier temps vers un nouveau concept : le dommage par plan. Il s'agit d'une vision différente de l'endommagement qui ne se manifeste plus de façon globale en un point mais qui est perçu par la matière plan par plan physique. La validation a montré une amélioration générale des résultats. Dans un second temps, l'étude de l'influence de la variable de comptage, qui constituait un point discutable de l'approche du LMSo du fait du choix arbitraire de cette variable, a abouti à une troisième méthode basée sur le principe du comptage et dommage par plan. S'il est pertinent d'affecter au plan un dommage évalué à l'aide des contraintes agissant sur ce plan, le comptage des cycles est tout autant à relier au plan utilisé car ce comptage est réalisé à partir de la contrainte normale. La notion de cycle est donc intimement liée au plan employé pour l'identifier. Ainsi la nouvelle démarche passe en revue un grand nombre de plans physiques sur lesquels sont réalisés pour chacun d'entre eux le comptage, l'évaluation du dommage puis son cumul. Le plan le plus endommagé constitue le plan critique et renseigne à la fois sur la durée de vie du matériau et sur l'orientation du plan d'amorçage de la fissure macroscopique. Cette dernière approche confère un sens plus physique à la méthode générale d'estimation de durée de vie. Toutes les méthodes (classique, dommage par plan, comptage et dommage par plan) ont été validées avec les séquences fournies par l'Université Technique d'Opole (Pologne). Les résultats montrent une amélioration des prévisions avec, pour la dernière méthode, une indépendance des estimations vis à vis d'un choix arbitraire de plan de comptage.

L'aboutissement de ces travaux est la création du logiciel à caractère industriel Sollife. En cours d'élaboration aujourd'hui, le logiciel fonctionne et permet de calculer la réponse en fatigue d'une structure soumise à n'importe quel type de chargement comme cela a été présenté sur deux applications industrielles. Le logiciel est composé des quatre modules suivants :

- Le module de mise en données permettant de construire les fichiers contenant les données d'entrée nécessaires aux calculs en fatigue. L'intérêt de ce module est de faciliter la tâche du futur utilisateur dans les opérations de préparation des calculs.
- Le module de décomposition du chargement pour le calcul des contraintes en service. La modélisation par éléments finis est réalisée grâce au code de calcul ABAQUS. Pour cela l'utilisateur définit les différents efforts unitaires qui interviennent dans la séquence de chargement, afin de calculer par superposition élastique la réponse en contrainte de la structure qu'il veut dimensionner en fatigue.

- Le module de calcul en fatigue proprement dit, qui constitue le processeur de Sollife. Il effectue les calculs en fatigue en appliquant la démarche générale d'estimation de durée de vie. L'ensemble des résultats figure dans un fichier relu par le module suivant de visualisation des résultats. Les caractéristiques particulières de ce module sont les possibilités offertes à l'utilisateur d'appliquer un chargement multiaxial composé de six forces ou moments, de définir jusqu'à cinq domaines de propriétés (couples matériau-critère), de gérer automatiquement les données de fatigue (courbes S-N), d'utiliser un grand nombre de critères de fatigue multiaxiaux et de lois d'endommagement.
- Le module de visualisation des résultats. Ce module utilise le post-processeur fourni par le code de calcul ABAQUS. Il relit les fichiers issus du processeur Sollife et permet de visualiser sur le maillage de la structure l'ensemble des résultats sous forme de cartographies. Cette étape constitue l'aboutissement du dimensionnement en fatigue de la structure étudiée par le Bureau d'Etudes : le concepteur peut ainsi analyser les résultats obtenus, localiser rapidement les zones critiques (zones fortement endommagées) et obtenir une estimation de la tenue en fatigue de sa structure soumise à la séquence de chargement considérée.

Nous possédons aujourd'hui un outil de calcul en fatigue capable de traiter un grand nombre de problèmes de fatigue, ceci quel que soit le chargement. Le logiciel a été développé dans le but de traiter des structures complexes composées éventuellement de plusieurs matériaux. L'intérêt du logiciel est d'être modulaire et donc d'offrir la possibilité d'intégrer un grand nombre de critères de fatigue multiaxiaux en contraintes et de lois de dommage.

Les perspectives à court terme sont la finalisation du logiciel dans sa globalité afin qu'il constitue d'une part un outil industriel performant de calcul en fatigue et d'autre part un outil d'investigation tout aussi fiable. Au travers des validations réalisées sur deux structures industrielles, nous avons mis en évidence le fait que les déformations permanentes dont l'origine provient surtout des opérations de mise en forme (emboutissage) améliorent de façon non négligeable les caractéristiques en fatigue du matériau. Nous espérons modéliser prochainement les variations des propriétés de fatigue à partir de celles obtenues sur le métal de base avant transformation. Les opérations de mise en forme ne sont pas la seule origine des déformations plastiques. Le chargement peut lui-même engendrer des déformations permanentes, notamment dans les zones de concentrations de contraintes. Tant que ces écrouissages sont localisés et que le comportement global de la structure reste élastique, il est possible de corriger les surestimations occasionnées qui conduisent, comme nous l'avons vu, à des prévisions de durées de vie trop conservatives et donc non réalistes. De nombreuses méthodes basées sur la règle de Neuber permettent, à partir de la courbe d'écrouissage cyclique, de corriger les estimations élastiques multiaxiales.

Toute méthode numérique, pour qu'elle soit exploitable industriellement, ne doit pas être pénalisée par les temps de calculs. Ceux-ci sont inhérents à la complexité des structures modélisées par éléments finis (parfois avec un nombre gigantesque d'éléments). Une étude préalable du chargement permettra de traiter les cas les plus complexes. Il s'agit dans un premier temps de filtrer les séquences de chargement, c'est à dire de ne conserver que les cycles de grande amplitude afin de réduire la longueur des séquences tout en conservant leur caractère endommageant. La simulation permettra alors très rapidement de localiser les zones critiques du point de vue de la fatigue. C'est sur ces zones critiques qu'il faudra alors réaliser l'estimation de durée de vie en considérant les séquences dans leur

totalité. Cette possibilité de réduction temporaire des séquences relativement longues est une perspective à moyen terme qui sera à développer.

D'autres perspectives concernent le potentiel du logiciel à aborder les problèmes des cordons de soudure, des bords de découpe ou encore des points soudés qui sont autant de sites favorisant l'amorçage de fissures, ceci grâce à la possibilité de considérer plusieurs domaines où sont associés un matériau et un critère de fatigue. L'idée est de réaliser l'analyse en intégrant à la fois la géométrie particulière des zones susceptibles d'être détériorées par fatigue et de leur nouvelles caractéristiques (zone affectée thermiquement par exemple). La structure réelle peut ainsi être considérée comme un ensemble multi-matériau.

Les perspectives à plus long terme enfin sont de développer une ou plusieurs lois d'endommagement, mieux appropriées aux tôles d'aciers au carbone, c'est à dire qui intègrent dans la loi d'évolution du dommage la variation des caractéristiques de fatigue due à la mise en forme et au chargement, notamment du fait des écrouissages engendrés par ces deux sources de transformation de la matière.