

- **La méthode de dommage par plan**, basée sur les mêmes modules que ceux de la méthode classique (comptage des cycles, critères de fatigue multiaxiaux et lois d'endommagement), mais qui calcule et cumule le dommage plan physique par plan physique, rendant plus réaliste la modélisation de la dégradation de la matière (car elle s'appuie sur les contraintes normale et tangentielle qui agissent sur le plan physique considéré). Elle fournit à la fois des estimations de durée de vie plus proches de la réalité et l'orientation des plans où la fissure s'amorce. Cette méthode nécessite d'utiliser des critères de fatigue multiaxiaux de type plan critique dont l'indicateur d'endommagement sert de mesure du caractère critique du plan.
- **La méthode de comptage et dommage par plan**. Le comptage des cycles multiaxiaux auxquels est soumise la matière n'est plus réalisé à partir de la contrainte normale d'un plan physique fixe ; il s'opère sur chaque plan physique étudié, à l'aide de sa propre contrainte normale, qui évolue au cours du temps et est utilisée comme variable de comptage. Ainsi toutes les opérations s'effectuent à l'échelle du plan, que ce soit le comptage des cycles, l'estimation de la durée de vie de la facette subissant ces cycles grâce à un critère de fatigue de type plan critique adapté à un plan, ou encore le calcul et le cumul du dommage. Ici aussi, durée de vie et orientation du plan d'amorçage sont les deux renseignements donnés par la méthode.

Même si la robustesse, au sens physique s'entend, de la troisième méthode est avérée d'après l'étude précédente qui a permis d'évoluer vers cette approche systématique de type plan critique, il n'en demeure pas moins que l'ensemble des trois méthodes est proposé à l'utilisateur du logiciel. La raison tient au fait que peu de critères sont exploitables dans les deux dernières méthodes (restriction à certains critères de type plan critique) alors que la première autorise l'utilisation de n'importe quel critère, ce qui, dans le cadre d'une sollicitation multiaxiale périodique, est tout à fait envisageable.

III.3.1 Extension des méthodes aux calculs en fatigue des structures

Ces trois méthodes ont été programmées à l'origine pour calculer la tenue en fatigue d'un point physique d'une structure où sont connues les caractéristiques en fatigue (courbes S-N) ainsi que la séquence de chargement qui lui est appliquée, l'ensemble correspondant aux données d'entrée. Jusqu'alors la mesure des déformations à l'aide de jauges ou la mesure d'efforts sur des géométries simples suffisaient à définir la séquence de chargement en contraintes en un point (figure III.41).

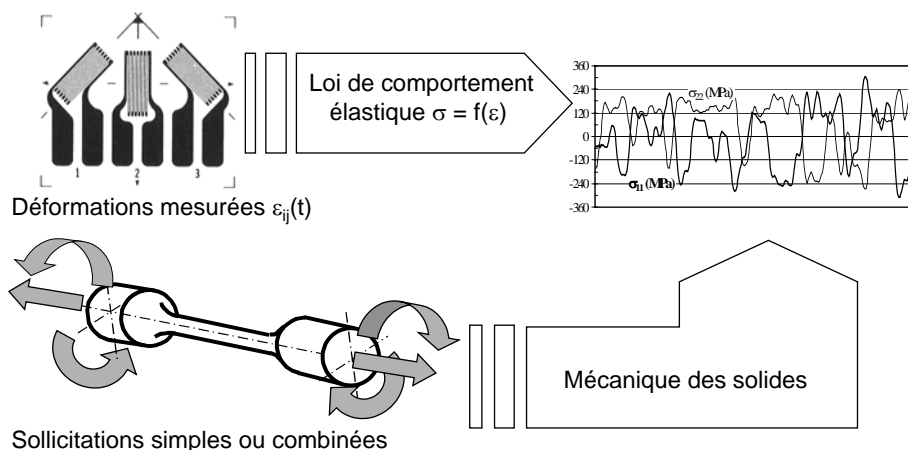


Figure III.41. Obtention d'une séquence de chargement en contraintes en un point.

Le problème devient plus ardu pour le calcul d'une structure complexe. La première étape de la construction du logiciel de calcul en fatigue a consisté à établir les séquences de chargement en contraintes en tout point de la structure. Cela est possible grâce à l'utilisation du code d'Eléments Finis ABAQUS [109] et en faisant l'hypothèse que la structure travaille dans son domaine élastique. Une pièce soumise à un chargement multiaxial en force (figure III.42) est modélisée par Eléments Finis ; l'ensemble des efforts qui lui sont appliqués est décrit sous la forme d'une combinaison linéaire d'états unitaires (figure III.43).

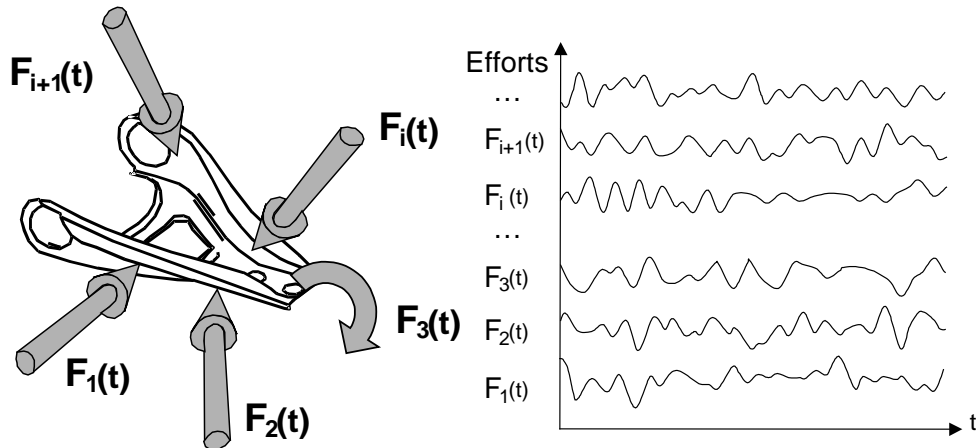


Figure III.42. Structure soumise à un chargement multiaxial.

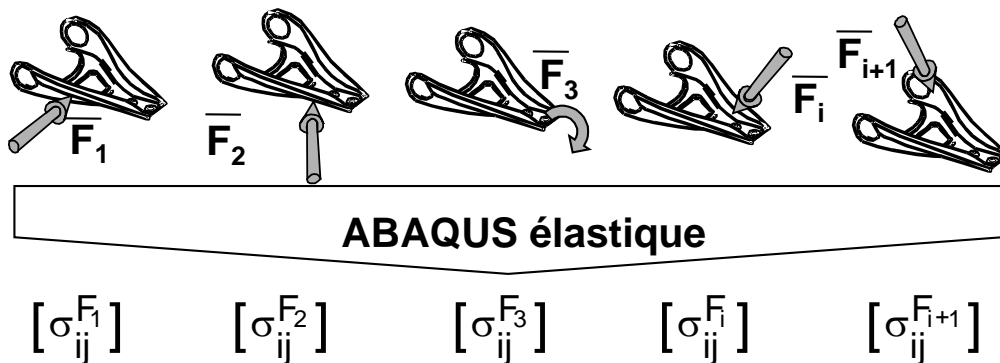


Figure III.43. Décomposition des efforts en états unitaires.

A partir des états unitaires correspondant à une force normalisée \bar{F}_k et associant en chaque point de la pièce un tenseur de contraintes $[\sigma_{ij}^{F_k}]$, il est alors simple de recomposer la séquence de chargement en contraintes en tout point étant donnée la linéarité du comportement élastique de la structure, puisqu'il suffit de superposer par combinaison linéaire les états unitaires pondérés respectivement par les valeurs des efforts à l'instant t :

$$[\sigma_{ij}] = \frac{F_1(t)}{\bar{F}_1} [\sigma_{ij}^{F_1}] + \frac{F_2(t)}{\bar{F}_2} [\sigma_{ij}^{F_2}] + \frac{F_3(t)}{\bar{F}_3} [\sigma_{ij}^{F_3}] + \dots + \frac{F_i(t)}{\bar{F}_i} [\sigma_{ij}^{F_i}] + \frac{F_{i+1}(t)}{\bar{F}_{i+1}} [\sigma_{ij}^{F_{i+1}}] + \dots \quad (III.37)$$

Soit :

$$[\sigma_{ij}] = \sum_{k=1}^n \frac{F_k(t)}{\bar{F}_k} [\sigma_{ij}^{F_k}] \quad (III.38)$$

III.3.2 Logiciel Sollife

Dès lors qu'est résolu le problème de la construction des séquences multiaxiales en contraintes en tout point de la structure, il est possible d'appliquer à une pièce à géométrie complexe un chargement multiaxial quelconque en force. Ceci a donné lieu à la réalisation du logiciel baptisé Sollife qui, bien que toujours en cours d'élaboration aujourd'hui, fonctionne. Le logiciel se compose des quatre modules suivants :

- Un module de mise en données (figure III.44) développé en langage C sous l'interface Builder Xcessory [110] et permettant de construire les fichiers qui contiennent les données d'entrée nécessaires aux calculs en fatigue. L'objectif de ce module est de faciliter la tâche du futur utilisateur pour effectuer les saisies grâce à un environnement convivial (gestion des fichiers, gestion des données matériau, multi-fenêtrage, menus déroulants, etc.). Il doit aussi être capable de gérer les autres modules, en particulier ceux de calcul et de visualisation des résultats.

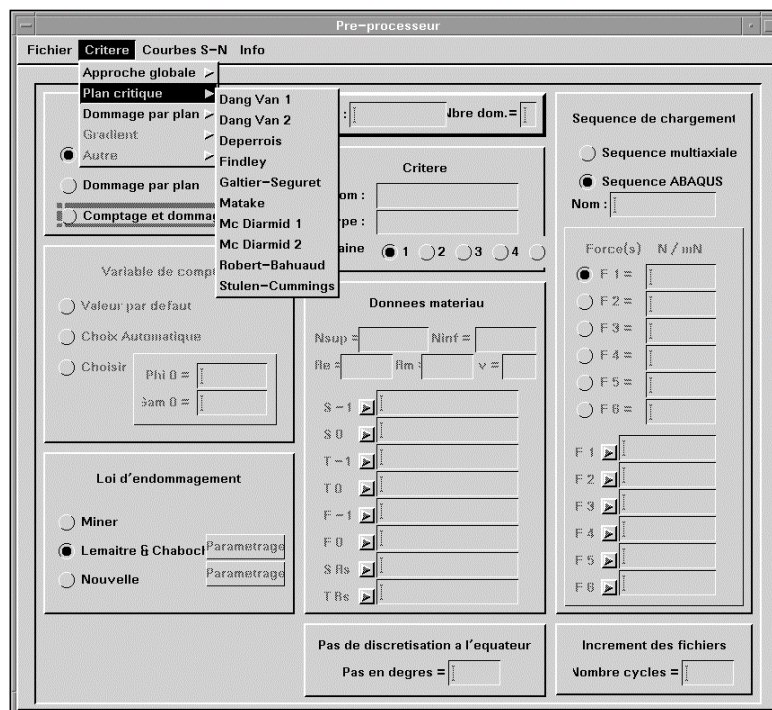


Figure III.44. Exemple de fenêtre écran du module de mise en données.

- Un module de calcul des états unitaires des contraintes (figure III.45) et de création des fichiers associés. La modélisation par éléments finis est réalisée grâce au code de calcul ABAQUS. L'utilisateur détermine les différents efforts unitaires pour chacun desquels un calcul par éléments finis de la structure est effectué. Pour chaque force unitaire sont stockées dans les fichiers les matrices de contraintes associées pour déterminer par superposition les contraintes dans toute la structure pour un chargement quelconque.

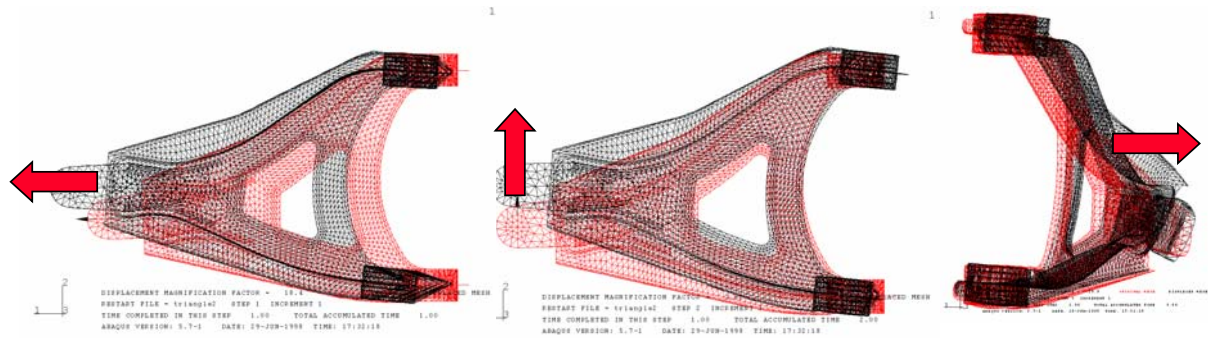


Figure III.45. Exemple de décomposition du chargement en états unitaires.

- Un module de calcul en fatigue proprement dit (figure III.46). Celui-ci est écrit en langage Fortran. Il constitue le processeur de Sollife, c'est à dire qu'il effectue les calculs en fatigue selon l'une des trois méthodes décrites précédemment. Il écrit l'ensemble des résultats dans un fichier (nombre de cycles extraits, nombre de cycles endommageants, dommage, durée de vie et état de contrainte équivalent maximum selon Von Mises) qui sera relu par le module de visualisation des résultats. Les caractéristiques particulières de ce module sont les possibilités d'appliquer un chargement multiaxial suivant six forces et/ou couples unitaires, de définir et mettre en œuvre jusqu'à cinq domaines (couples matériau-critère), de gérer automatiquement les données de fatigue (courbes S-N), d'utiliser un grand nombre de critères multiaxiaux (une vingtaine actuellement) ainsi que plusieurs lois d'endommagement (même si actuellement seulement deux lois de dommage, Miner et Lemaitre & Chaboche sont disponibles).

```

PROCESSEUR SOLLIFE
ESTIMATION DE DUREE DE VIE DE
STRUCTURE SOUS CHARGEMENTS COMPLEXES

SOLLAC LEDEPP - INSA LMSO
SERVICE FATIGUE

VERSION 0698 SOLLAC - GROUPE USINOR

-----
REPertoire DE TRAVAIL =
/home/weber/fatigue/sequence/
NOM DU FICHIER PRE-PROCESSEUR ?
sol3.pre
LECTURE DU FICHIER TERMINE :
AUCUNE ERREUR (CODE ERREUR= 0)
METHODE DU COMPTAGE ET DU DOMMAGE PAR PLAN
LOI D'ENDOMMAGEMENT DE MINER
CHOIX AUTOMATIQUE DU PLAN DE COMPTAGE
PAS DE DISCRETISATION = 5.0
NOMBRE DE FACETTES POUR LA DISCRETISATION = 823
NOM DU FICHIER DE LA SEQUENCE =
flextra.for
SEQUENCE EN FORCES
NOM DU FICHIER DES ETATS DE CONTRAINTE POUR LA FORCE 1 =
/home/weber/fatigue/sequence/FORCE21
FORCE 1 UNITAIRE = 5000.0 N / mN
NOM DU FICHIER DES ETATS DE CONTRAINTE POUR LA FORCE 2 =
/home/weber/fatigue/sequence/FORCE22
FORCE 2 UNITAIRE = 100.0 N / mN
NOMBRE DE DOMAINE DANS LA STRUCTURE = 1
NUMERO DU POINT TRAITÉ = 1
NUMERO DU POINT TRAITÉ = 2
NUMERO DU POINT TRAITÉ = 3
NUMERO DU POINT TRAITÉ = 4
NUMERO DU POINT TRAITÉ = 5
    
```

Figure III.46. Exemple de déroulement d'un calcul du logiciel Sollife.

- Un module de visualisation des résultats (figure III.47). Ce module utilise le post-processeur fourni par le code de calcul ABAQUS. Il lit les fichiers résultats issus du processeur Sollife et permet de visualiser sur le maillage de la structure les cartographies du nombre de cycles extraits, du nombre de cycles endommageants, du dommage, de la durée de vie et de l'état de contrainte équivalent maximum au sens de Von Mises. L'utilisateur peut ainsi aisément dépouiller les résultats obtenus, localiser rapidement les zones critiques (zones fortement endommagées) et obtenir une estimation de la tenue en fatigue de la structure soumise à la séquence de chargement considérée.

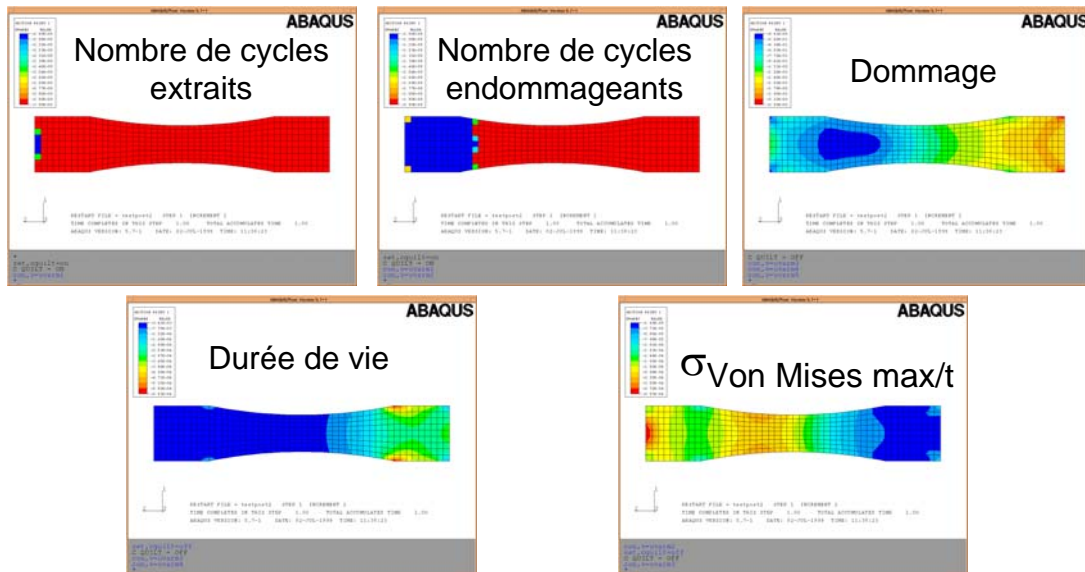


Figure III.47. Exemple de visualisation des résultats sur le post-processeur ABAQUS.

III.4 Validation du logiciel Sollife sur des applications industrielles

Deux applications industrielles ont permis d'établir les premières validations du logiciel. La démarche mise en œuvre correspond à l'approche basée sur le comptage et dommage par plan utilisant le critère de Robert. Celle-ci s'impose par son avantage essentiel d'être indépendante d'un choix de plan de comptage. Il s'agit pour la première validation d'un disque assurant un accouplement moteur et pour la seconde d'un triangle de suspension automobile. Certaines données ou spécificités liées aux applications sont volontairement passées sous silence pour des raisons de confidentialité vis à vis des clients de SOLLAC.

III.4.1 Dimensionnement d'un disque d'accouplement

III.4.1.1 Introduction

Le disque d'accouplement est réalisé à partir de tôles de nuance ES qui subissent des opérations de mise en forme et de découpe afin d'obtenir en final la forme voulue. Ainsi le disque comporte deux diamètres de perçage situés dans deux plans différents. 8 trous sont répartis sur le diamètre extérieur et 6 autres trous sur le diamètre intérieur. Ces trous sont nécessaires pour réaliser la liaison du disque avec un arbre tournant (pour le diamètre intérieur) et avec un autre ensemble (pour le diamètre extérieur). La figure III.48 donne la modélisation par éléments finis de la coupelle.

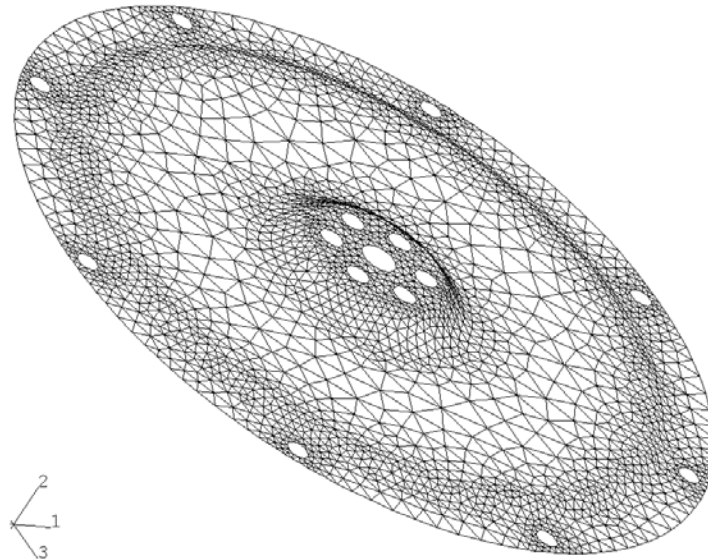


Figure III.48. Modélisation par éléments finis de la coupelle.

En service le disque d'accouplement est soumis à plusieurs efforts qui sont :

- Un effort axial statique,
- Un moment de torsion variable, d'une fréquence de 100 Hz,
- Un effort (engendrant une flexion rotative) dû à un défaut de coaxialité, et dont la fréquence est de 25 Hz.

L'ensemble de ces efforts combinés forme un chargement périodique d'amplitude constante. La séquence multiaxiale de chargement a donc une fréquence de 25 Hz (la plus petite des fréquences). Elle engendre un phénomène de fatigue dont la conséquence est la rupture de la coupelle en périphérie du diamètre intérieur de fixation (correspondant à la liaison avec l'arbre) après 500 000 répétitions de la séquence de chargement. L'analyse en fatigue présentée dans ce qui suit donne dans un premier temps la modélisation par éléments finis du problème qui permet, connaissant les efforts, de déterminer les contraintes auxquelles est soumise la coupelle. Dans un deuxième temps, les efforts sont identifiés et décomposés afin de construire la séquence de chargement en contraintes en tout point de la pièce. Cette décomposition est nécessaire pour la simulation du comportement en fatigue, dont les résultats sont donnés dans une troisième et dernière partie.

III.4.1.2 Modélisation

La coupelle a été maillée avec des éléments coques triangulaires de type S3R (ABAQUS version 5.7). Ces éléments sont triangulaires et possèdent un seul point de gauss et deux points d'intégration dans l'épaisseur (figure III.49).

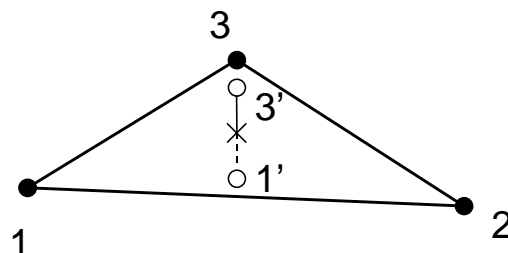


Figure III.49. Élément de modélisation.