

Manuel d'Utilisation
Fascicule U2.09 : Outils et Solutions Métiers
Document : U2.09.01

Méthodologie pour la réalisation d'une analyse de nocivité de défaut avec l'outil-métier ASPIC, préparation des données d'entrée

Résumé :

L'outil-métier ASPIC permet de réaliser des analyses de nocivité de défaut dans les piquages du CSP. Cet outil est composé d'un mailleur automatique de piquage et d'un solveur pour les analyses thermo-élastiques linéaires. Il est entièrement intégré au *Code_Aster*. Le mailleur est utilisable indépendamment du solveur. Cette note constitue le référentiel méthodologique d'une étude de nocivité de défaut avec ASPIC.

Table des matières

1 Synthèse	3
2 Introduction	4
2.1 Contexte.....	4
2.2 Objectif de la note	4
2.3 Démarche adoptée	4
2.4 Plan de la note qui en découle	4
3 Données d'entrée ASPIC.....	5
3.1 Géométrie du maillage.....	5
3.2 Conditions aux limites et chargements.....	7
3.3 Matériaux	8
4 Du calcul de ligne à l'analyse de nocivité de défaut	9
4.1 Calculs de lignes : généralité.....	9
4.2 Définition du chargement ASPIC à partir du DAC	9
4.2.1 Etape 1 : changement de repère.....	9
4.2.2 Etape 2 : rééquilibrage des torseurs	10
4.2.3 Etape 3 : correction des moments.....	10
4.2.4 Etape 4 : obtention du chargement maximisé.....	11
4.3 Application	12
5 Analyse de nocivité de défaut sur un piquage.....	12
5.1 Principe	12
5.2 Données de sortie ASPIC.....	13
5.3 Codification	13
5.4 Exemple d'application.....	13
6 Conditions d'utilisation ou d'application des résultats.....	14
Annexe 1 Exemple de fichier de données ASPIC.....	15
Annexe 2 Guide à l'utilisation de l'outil métier.....	17
Annexe 3 Référentiel méthodologique	19
7 Bibliographie	20

1 Synthèse

L'outil-métier ASPIC permet de réaliser des analyses de nocivité de défaut dans les piquages du CSP. Cet outil est composé d'un mailleur automatique de piquage et d'un solveur pour les analyses thermo-élastiques linéaires. Il est entièrement intégré au *Code_Aster*. Le mailleur est utilisable indépendamment du solveur.

Cette note a pour objectif de décrire la méthodologie pour la réalisation d'une analyse de nocivité de défaut avec l'outil métier ASPIC. On s'attache également à lister de façon exhaustive l'ensemble des données d'entrée ASPIC. On dispose dans la version 6.4 du *Code_Aster* de deux macro-commandes, l'une correspond au mailleur automatique (MACR_ASPIC_MAIL), l'autre à la procédure de calcul proprement dite (MACR_ASPIC_CALC).

Pour renseigner ces macro-commandes, il faut disposer des informations sur :

- la géométrie du piquage,
- les conditions aux limites et chargements appliqués aux extrémités (extrémité de la tubulure raccordée BRANCH ou extrémités du corps RUN, R1 ou R2),
- les caractéristiques matériaux.

Les résultats fournis par la macro commande de calcul servent, par comparaison avec les critères codifiés, à statuer sur la nocivité ou non d'un défaut caractérisé lors d'un contrôle.

Ce document constitue le référentiel méthodologique d'une étude de nocivité de défaut avec ASPIC. On y trouve une description exhaustive des données d'entrée pour les macro-commandes de l'outil métier ASPIC. La construction de ces données à partir des données fournies dans le DAC est entièrement explicitée. Enfin la description d'une étude d'analyse de nocivité de défaut sur un piquage est détaillée. Des exemples illustrent chaque phase de mise en données et le type de résultat attendu lors d'une analyse de nocivité.

2 Introduction

2.1 Contexte

L'outil-métier ASPIC permet de réaliser des analyses de nocivité de défaut dans les piquages du CSP. Cet outil est composé d'un mailleur automatique de piquage et d'un solveur pour les analyses thermo-élastiques linéaires. Il est entièrement intégré au *Code_Aster*. Le mailleur est utilisable indépendamment du solveur.

2.2 Objectif de la note

Cette note a pour objectif de décrire la méthodologie pour la réalisation d'une analyse de nocivité de défaut avec l'outil métier ASPIC. On s'attache également à lister de façon exhaustive l'ensemble des données d'entrée ASPIC.

Cette note s'appuie sur la note rédigée par J.P. SERMAGE, référence [bib1].

2.3 Démarche adoptée

Ce référentiel doit permettre de mettre en œuvre des analyses de nocivité de défauts selon des règles conformes au RSE-M [bib4]. La méthode de correction plastique applicable est la méthode K_{cp} . On dispose dans la version 6.4 de *Code_Aster* [bib5] de deux macro-commandes, l'une correspond au mailleur automatique (MACR_ASPIC_MAIL), l'autre à la procédure de calcul proprement dite (MACR_ASPIC_CALC).

Pour renseigner ces macro-commandes, il faut disposer des informations sur :

- la géométrie du piquage,
- les conditions aux limites et chargements appliqués aux extrémités (extrémité de la tubulure raccordée BRANCH ou extrémités du corps RUN, R1 ou R2),
- les caractéristiques matériaux.

Les résultats fournis par la macro-commande de calcul servent, par comparaison avec les critères codifiés, à statuer sur la nocivité ou non d'un défaut caractérisé lors d'un contrôle.

2.4 Plan de la note qui en découle

Le plan de la note suit la démarche globale d'une analyse de nocivité de défaut avec l'outil métier ASPIC.

Le chapitre 3 présente les données d'entrée de l'outil métier ASPIC.

Le chapitre 4 décrit comment construire à partir du DAC les données d'entrée ASPIC.

Le chapitre 5 rappelle le principe d'une analyse de nocivité de défaut.

3 Données d'entrée ASPIC

3.1 Géométrie du maillage

Les informations relatives à la géométrie du piquage servent à renseigner la macro-commande MACR_ASPIE_MAIL [bib12]. Le concept produit par cette macro-commande est de type maillage. Il contient les entités topologiques permettant :

- d'appliquer les conditions aux limites et les chargements ;
- de dépouiller les résultats.

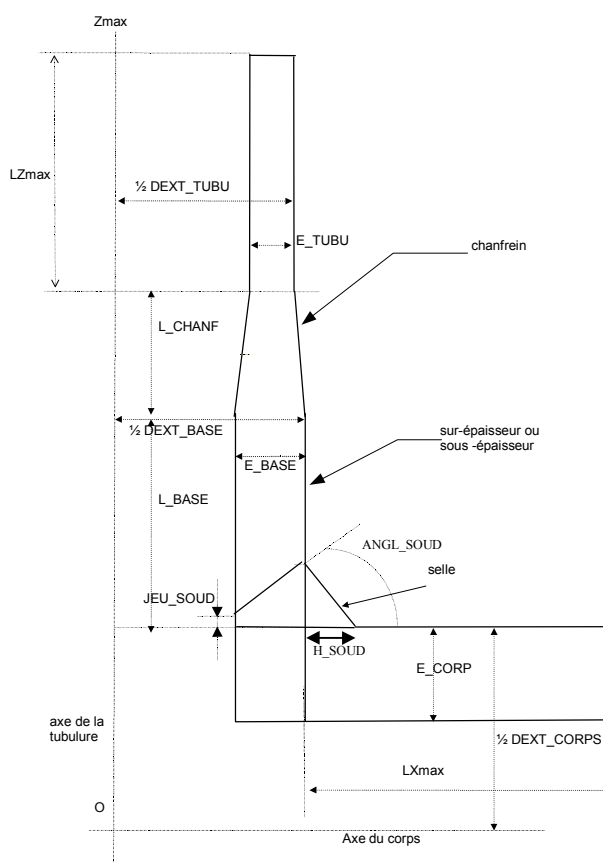


Figure 3.1-a : Description des paramètres géométriques (soudure de type_2)

Dans un premier temps, la commande EXEC_MAIILLAGE permet de faire le lien avec le logiciel GIBI qui sert à produire le maillage. Les paramètres comme : COEF_MULT_RC1, COEF_MULT_RC2, ..., NB_SECTEUR, ..., RAYON_TORE, permettent d'optimiser la qualité du maillage (liste non exhaustive). Puis, on renseigne l'état de raffinement du maillage souhaité près de la soudure, il peut être grossier (2 nœuds sur la selle et 3 nœuds sur l'interface) ou fin (3 nœuds sur la selle et 7 nœuds sur l'interface).

- 'GROS' (option par défaut)
- 'FIN'

On préconise l'option 'GROS' pour les maillages fissurés, le bloc fissure étant suffisamment raffiné et l'option 'FIN' pour mener une analyse de nocivité de défaut sur piquages sain [bib7].

Concernant la tubulure, les paramètres géométriques à renseigner sont :

- l'épaisseur de la tubulure dans la zone de raccord (**E_BASE**), (réel, mm),
- le diamètre extérieur de la tubulure (**DEXT_BASE**), (réel, mm),
- la longueur de la base de la tubulure (**L_BASE**), (réel, mm),
- la longueur du chanfrein (**L_CHANF**), (réel, mm),
- l'épaisseur de la tubulure au-dessus du chanfrein (**E_TUBU**), (réel, mm),
- le diamètre extérieur de la tubulure au-dessus du chanfrein (**DEXT_TUBU**), (réel, mm),
- la cote maximale de la tubulure (**Z_MAX**), (réel, mm),
- le type et la position de la soudure (**TYPE_1** ou **TYPE_2**).

Le type et la position de la soudure est de type_1 si le biseau de la soudure est situé dans le corps [Figure 3.1-a], de type_2 si le biseau de la soudure est situé dans la tubulure.
La soudure est repérée par :

- la hauteur de soudure comptée à partie de la surface extérieure (**H_SOUD**), (réel, mm),
- l'angle de la soudure (**ANGL_SOUD**), (degrés),
- le jeu de la soudure caractérisé par l'espace situé entre le corps et la tubulure (**JEU_SOUD**), (réel, mm).

Enfin le corps du piquage est défini par :

- l'épaisseur du corps (**E_CORP**), (réel, mm),
- le diamètre extérieur du corps (**DEXT_CORP**), (réel, mm),
- la cote maximale du corps (**X_MAX**), (réel, mm).

Si le piquage analysé comporte une fissure, il faut également définir les caractéristiques de la fissure :

- le type de la fissure (**longue ou courte**).

Les fissures longues correspondent à des fissures longues mais peu profondes (1/8 ou 1/4 épaisseur), les fissures courtes correspondent à des fissures de profondeur maximale égale à la demi épaisseur du piquage.

- la profondeur de la fissure (**PROFONDEUR**), (réel, mm),
- la longueur de la fissure (**LONGUEUR**), (réel, mm),
- la position du centre de la fissure (**AZIMUT**), (degrés),
- la position (droit ou incliné) suivant le type de la soudure (**POSITION**), [Figures 3.1-b] et [Figure 3.1-c],
- la position débouchant en peau interne ou externe ou non-débouchant (**FISSURE**),
- la longueur du ligament intérieur (fissure non débouchante) (**LIGA_INT**), (réel, mm),
- le demi-angle d'ouverture de la fissure (**ANGL_OUVERTURE**), (degrés).

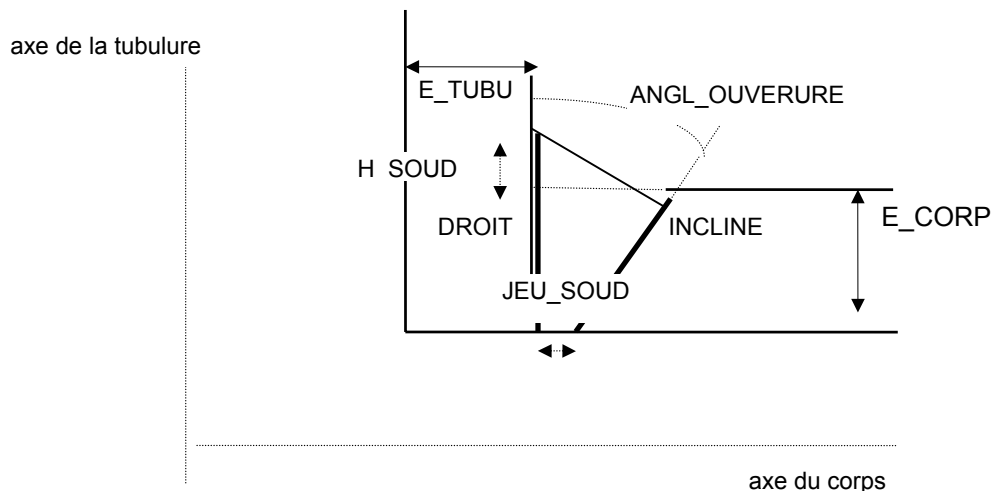


Figure 3.1-b : Géométrie piquage type n°1

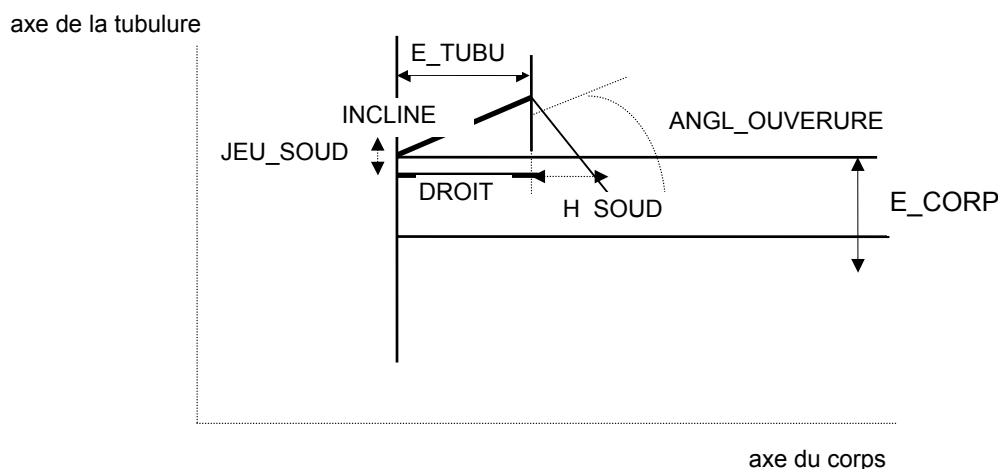


Figure 3.1-c : Géométrie piquage type n°2

Les conditions aux limites, les chargements et les données matériau sont renseignés au niveau de la macro-commande `MACR_ASPIG_CALC` [bib12], objectifs des paragraphes suivants. Cette macro-commande a pour objet de réaliser un calcul prédéfini de piquages sains ou fissurés, ainsi que les post-traitements associés.

3.2 Conditions aux limites et chargements

Pour réaliser un calcul aux éléments finis, la modélisation impose de bien définir les conditions aux limites et les chargements appliqués qu'ils soient mécanique ou thermique.

Symboliquement un piquage est défini par l'intersection de la droite [R1, R2] représentant le corps et la demi-droite [O, B] représentant la tubulure. Le point O représente l'origine du piquage c'est-à-dire l'intersection des axes des deux tubes.

(R1 : P1_CORP, R2 : P2_CORP et B : P_TUBU)

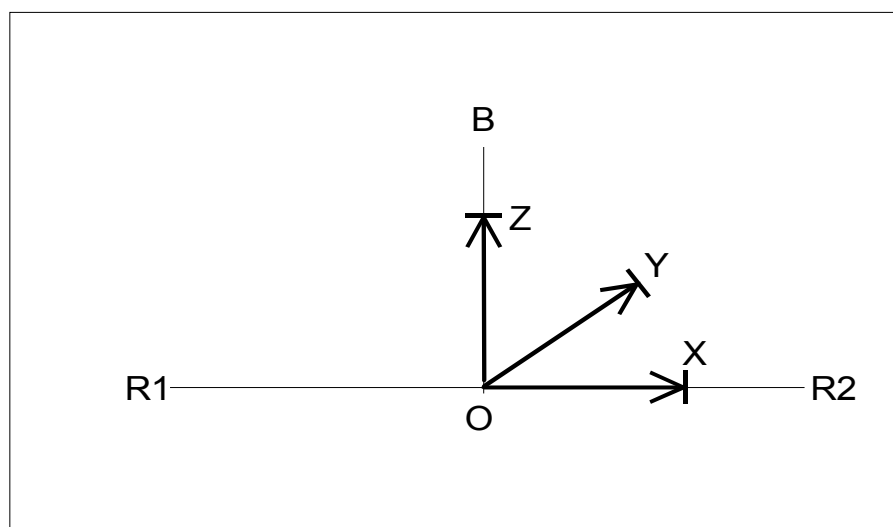


Figure 3.2-a : Représentation symbolique du piquage

Pour assurer l'équilibre (**EQUILIBRE**) de la structure, on définit un encastrement de type poutre à l'une des deux extrémités du corps (R1 ou R2). De ce choix dépend la définition du torseur des efforts à appliquer aux extrémités (R1 ou R2 et B).

On indique ensuite la valeur de la pression (**PRES_REP**) qui s'applique en peau interne (**MPa**), avec prise en compte de l'effet de fond sur les faces associées à l'extrémité de la tubulure B et l'une des deux faces extrémités du corps (R1 ou R2).

Le torseur d'effort est appliqué aux extrémités B de la tubulure et (R1 ou R2) du corps (**TORS_CORP**, **TORS_TUBU**).

On renseigne les 6 composantes du torseur d'efforts :

- force selon X F_X (**N**)
- force selon Y F_Y (**N**)
- force selon Z F_Z (**N**)
- moment selon X M_X (**N.mm**)
- moment selon Y M_Y (**N.mm**)
- moment selon Z M_Z (**N.mm**)

Pour les calculs thermiques (**ECHANGE**), on indique la valeur du coefficient d'échange (**W/mm²**) sur la peau interne de la tubulure et du corps, ainsi que la valeur de la température du fluide (**°C**) à l'intérieur du piquage pour différents instants du transitoire.

On verra au chapitre 4 comment construire ce torseur d'effort à partir du DAC (Dossier d'Analyse de Conception).

3.3 Matériaux

La définition du ou des matériaux se fait en dehors de la macro-commande **MACR_ASPIC_CALC**, mais leur affectation se fait dans la macro-commande par le mot clé **AFFE_MATERIAU**. Les données matériau sont soit prises à température donnée (ambiante ou moyenne du transitoire), soit fonction de la température (cas général). Lorsque ces données dépendent de la température, elles sont stockées pour une liste de températures. Elles proviennent soit : du RCC-M [bib10], du RSE-M [bib4] ou de mesures spécifiques.

Les données nécessaires à la définition du matériau sont :
données du comportement en traction

- module d'Young E (**MPa**)
- coefficient de Poisson ν
- coefficient de dilatation α (**°C⁻¹**)
- conductivité thermique λ (**W.mm⁻¹°C⁻¹**)
- masse volumique ρ (**kg.mm⁻³**)

On note également l'importance de la définition de la température de référence pour laquelle il n'y a pas de déformation thermique.

4 Du calcul de ligne à l'analyse de nocivité de défaut

4.1 Calculs de lignes : généralité

Un calcul de ligne consiste à déterminer des torseurs d'effort et des déplacements et à vérifier les critères de conception définis dans le RCC-M [bib5].

Les règles de tracé utilisées par le constructeur sont telles que les tuyauteries sont essentiellement sollicitées en pression et en flexion quel que soit le chargement. Les critères de conception portent sur les contraintes dues à la pression et sur celles générées par les moments de flexion et de torsion, ainsi que par l'effet de fond.

De façon générale, une ligne et ses tuyauteries auxiliaires sont représentées par un modèle filaire ou poutre à partir des isométriques dans le plan. Les composantes sont modélisées selon leur raideur et leur masse respectives : supportage, vannes, soupapes, piquages.

Dans le cadre d'une analyse de nocivité de défaut dans un composant, on utilise en données d'entrée les torseurs issus du calcul de ligne. Ces torseurs sont dits « signés » ou « non signés ».

Le torseur est signé lorsqu'il est parfaitement défini par sa direction, son signe et son amplitude. Typiquement, il s'agit des chargements de type poids, pression ou dilatation thermique. Le torseur est non signé lorsqu'il n'est défini que par son amplitude maximale et sa direction. C'est le cas des chargements alternatifs comme une rupture de tuyauterie ou un séisme. Pour l'analyse mécanique du piquage, les données du DAC à extraire sont les torseurs calculés au nœud de la ligne qui représente l'intersection entre deux portions de ligne.

4.2 Définition du chargement ASPIC à partir du DAC

La modélisation spatiale d'une ligne de tuyauterie à l'aide d'éléments poutres permet de déterminer en chacun des nœuds modélisés les torseurs mécaniques qui résultent de l'ensemble des situations de fonctionnement étudiées. Ces torseurs sont disponibles dans le DAC, dont un extrait est donné dans [bib14].

Les chargements signés sont des efforts mécaniques classiques, ils sont pratiquement équilibrés. Par contre les chargements non signés ne sont pas des efforts réels mais seulement les bornes supérieures de chaque composante. Ils ne sont pas équilibrés.

Pour définir les efforts mécaniques plusieurs étapes sont nécessaires, elles sont décrites dans les paragraphes suivants.

4.2.1 Etape 1 : changement de repère

Dans la modélisation poutre spatiale, le piquage correspond à un nœud du maillage qui est le point commun à trois poutres. Les torseurs mécaniques calculés en ce nœud pour chacune des poutres permettent de connaître les efforts à appliquer aux extrémités R1, R2 et B du piquage. Comme le repère local lié à chaque poutre ou le repère global "constructeur" dans lequel les torseurs mécaniques sont calculés ne correspond pas au repère du piquage, cette première étape consiste à effectuer un changement de repère adéquat afin de déterminer les torseurs mécaniques dans le repère du piquage (0, X, Y, Z). A l'issue de ce changement de repère, les composantes des torseurs mécaniques sont notées :

- extrémité R1 : $(FR1_{1,X}, FR1_{1,Y}, FR1_{1,Z}, MR1_{1,X}, MR1_{1,Y}, MR1_{1,Z})$
- extrémité R2 : $(FR2_{1,X}, FR2_{1,Y}, FR2_{1,Z}, MR2_{1,X}, MR2_{1,Y}, MR2_{1,Z})$
- extrémité B : $(FB_{1,X}, FB_{1,Y}, FB_{1,Z}, MB_{1,X}, MB_{1,Y}, MB_{1,Z})$

Cette étape concerne aussi bien les chargements signés que non signés.

4.2.2 Etape 2 : rééquilibrage des torseurs

Du fait de la précision des calculs liés à la discrétisation de la ligne de tuyauterie, les torseurs mécaniques que l'on calcule ne sont pas rigoureusement équilibrés. La correction proposée ici consiste à rééquilibrer des torseurs par valeur moyenne.

Rééquilibrer les torseurs par valeur moyenne consiste à modifier chaque composante suivant les formules suivantes :

$$\begin{cases} FR1_{2,i} = FR1_{1,i} - \frac{1}{3}(FR1_{1,i} + FR2_{1,i} + FB_{1,i}) \\ FR2_{2,i} = FR2_{1,i} - \frac{1}{3}(FR1_{1,i} + FR2_{1,i} + FB_{1,i}) \\ FB_{2,i} = FB_{1,i} - \frac{1}{3}(FR1_{1,i} + FR2_{1,i} + FB_{1,i}) \end{cases} \quad \text{éq 4.2.2-1}$$

$$\text{et } \begin{cases} MR1_{2,i} = MR1_{1,i} - \frac{1}{3}(MR1_{1,i} + MR2_{1,i} + MB_{1,i}) \\ MR2_{2,i} = MR2_{1,i} - \frac{1}{3}(MR1_{1,i} + MR2_{1,i} + MB_{1,i}) \\ MB_{2,i} = MB_{1,i} - \frac{1}{3}(MR1_{1,i} + MR2_{1,i} + MB_{1,i}) \end{cases}$$

avec i = (X,Y,Z)

Ainsi les torseurs issus du calcul de ligne vérifient les équations d'équilibres :

$$\begin{cases} FR1_{2,X} + FR2_{2,X} + FB_{2,X} = 0. \\ FR1_{2,Y} + FR2_{2,Y} + FB_{2,Y} = 0. \\ FR1_{2,Z} + FR2_{2,Z} + FB_{2,Z} = 0. \end{cases} \quad \text{et} \quad \begin{cases} MR1_{2,X} + MR2_{2,X} + MB_{2,X} = 0. \\ MR1_{2,Y} + MR2_{2,Y} + MB_{2,Y} = 0. \\ MR1_{2,Z} + MR2_{2,Z} + MB_{2,Z} = 0. \end{cases} \quad \text{éq 4.2.2-2}$$

4.2.3 Etape 3 : correction des moments

L'application des efforts aux extrémités R1, R2 et B induit, pour les efforts tranchants, un moment supplémentaire qu'il est nécessaire de compenser en introduisant une correction sur les moments rééquilibrés.

Finalement les efforts que l'on applique aux extrémités R1, R2 et B sont définis par :

$$FR1 = \begin{cases} FR1_X = FR1_{2,X} \\ FR1_Y = FR1_{2,Y} \\ FR1_Z = FR1_{2,Z} \end{cases} \quad \text{et} \quad MR1 = \begin{cases} MR1_X = MR1_{2,X} \\ MR1_Y = MR1_{2,Y} - FR1_{2,Z} \times d_1 \\ MR1_Z = MR1_{2,Z} + FR1_{2,Y} \times d_1 \end{cases} \quad \text{éq 4.2.3-1}$$

$$FR2 = \begin{cases} FR2_X = FR2_{2,X} \\ FR2_Y = FR2_{2,Y} \\ FR2_Z = FR2_{2,Z} \end{cases} \quad \text{et} \quad MR2 = \begin{cases} MR2_X = MR2_{2,X} \\ MR2_Y = MR2_{2,Y} + FR2_{2,Z} \times d_1 \\ MR2_Z = MR2_{2,Z} - FR2_{2,Y} \times d_1 \end{cases} \quad \text{éq 4.2.3-2}$$

$$FB = \begin{cases} FB_X = FB_{2,X} \\ FB_Y = FB_{2,Y} \\ FB_Z = FB_{2,Z} \end{cases} \quad \text{et} \quad MB = \begin{cases} MB_X = MB_{2,X} + FB_{2,Y} \times d_2 \\ MB_Y = MB_{2,Y} - FB_{2,X} \times d_2 \\ MB_Z = MB_{2,Z} \end{cases} \quad \text{éq 4.2.3-3}$$

Les équations d'équilibres relatives au piquage sont alors automatiquement vérifiées :

$$\begin{cases} FR1_X + FR2_X + FB_X = 0. \\ FR1_Y + FR2_Y + FB_Y = 0. \\ FR1_Z + FR2_Z + FB_Z = 0. \end{cases} \quad \text{éq 4.2.3-4}$$

$$\text{et} \quad \begin{cases} MRI_X + MR2_X + MB_X - FB_Y \times d_2 = 0. \\ MRI_Y + MR2_Y + MB_Y + FR1_Z \times d_1 - FR2_Z \times d_1 + FB_X \times d_2 = 0. \\ MRI_Z + MR2_Z + MB_Z - FR1_Y \times d_1 + FR2_Y \times d_1 = 0. \end{cases}$$

Les efforts réels définis par les équations [éq 4.2.3-1] [éq 4.2.3-2] et [éq 4.2.3-3] peuvent être appliqués directement aux extrémités R1, R2 et B du piquage fissuré. Dans ASPIC l'une des extrémités du RUN est encastree (R1 ou R2). Le torseur d'effort défini au paragraphe [§3.2] est [éq 4.2.3-3] pour l'extrémité de la tubulure et [éq 4.2.3-1] ou [éq 4.2.3-2] pour l'extrémité du corps.

4.2.4 Etape 4 : obtention du chargement maximisé

L'ultime étape consiste à définir le chargement maximisé. Le chargement maximisé est le chargement correspondant à la combinaison du chargement signé et non signé telle que le taux de restitution d'énergie, noté G_{\max} local soit maximum pour une fissure donnée.

Deux méthodes de calcul de G_{\max} sont disponibles, une analytique décrite dans [bib13], l'autre numérique et implantée dans *Code_Aster*.

La méthode analytique concerne le chargement non signé et consiste à rechercher celui qui maximise le mode d'ouverture I. Le REX [bib15] montre que sa mise en œuvre est fastidieuse, aussi on préconise l'emploi de la méthode numérique. Un exemple de la mise en œuvre de la méthode analytique est donné dans [bib8]. Cet exemple a permis de valider la méthode analytique par comparaison du résultat avec la méthode numérique de référence.

La méthode numérique implantée dans *Code_Aster* examine les trois couples possibles de contraintes et retient le minimum des maxima atteints (solution conservative par rapport à la solution exacte). Autrement dit, on calcul trois G_{\max} , le premier à partir des torseurs définis à l'extrémité du RUN (R1 et R2), le second à partir des torseurs définis à l'une des extrémité du RUN et à l'extrémité du BRANCH (R1 et B), le dernier est la combinaison (R2 et B). Un exemple de la mise en œuvre de la méthode numérique est donnée dans [bib9].

Il est possible de maximiser le chargement mécanique dans sa totalité, auquel cas, il suffit de calculer l'amplitude du chargement total comme étant la somme des amplitudes du chargement signé et du chargement non signé. Le résultat de [bib8] montre que cette façon de faire est conservative par rapport au cas où seul le chargement non signé est maximisé.

4.3 Application

Le tableau suivant donne les chargements élémentaires au centre du piquage (relevé dans le DAC) participants à la situation de catégorie 2. Les chargements signés sont cumulés linéairement entre eux, les chargements non signés sont quant à eux cumulés quadratiquement. Ces chargements doivent être affectés d'un coefficient de sécurité de 1.5.

Dans chaque catégorie, les situations sont obtenues par les combinaisons suivantes, par exemple en 2^{ème} catégorie : 1 – 17 – 18 – 19 – Max (14, 15, 16) – 2 – 6 – 7 – 8 à 13

Intitulé	numéro	Nature
Poids propre	1	Signé
Déplacements été	17	Signé
Déplacements hiver	18	Signé
Fluage	19	Signé
Dilatation maximale CP5 GV1	Max (14, 15 et 16)	Signé
Séisme normal admissible	2	Non Signé
DDS SNA radial traversées BR	6	Non Signé
DDS SNA tangentiel traversées BR	7	Non Signé
DDS SNA piquage GV	8 à 13	Non Signé

On donne un exemple de la mise en œuvre des étapes (1, 2 et 3) successives décrites ci dessus pour le cas de chargement n°1 correspondant au poids propre. Le premier tableau est le résultat de la transformation de données issues du DAC (second tableau).

Numéro (ASPIC)	FR2x (daN)	FR2y (daN)	FR2z (daN)	MR2x (daN.m)	MR2y (daN.m)	MR2z (daN.m)
1 (poids propre)	492,93	458,31	-951,23	731,76	-98,90	776,68

Numéro (DAC)	Nx_d (daN)	Ty_d (daN)	Tz_d (daN)	Cx_d (daN.m)	My_d (daN.m)	Mz_d (daN.m)
1 (poids propre)	21,597	13,021	-1422,562	544,156	1237,734	130,765

Un exemple de maximisation du chargement mécanique est donné dans [bib8] et [bib9].

5 Analyse de nocivité de défaut sur un piquage

Les grandeurs que l'on utilise en mécanique de la rupture sont les facteurs d'intensité de contrainte pour chaque mode d'ouverture du défaut et le taux de restitution d'énergie. Le taux de restitution d'énergie G est calculé quel que soit le mode de sollicitation (ouverture ou fermeture) de la fissure.

5.1 Principe

Deux méthodes peuvent être mises en œuvre à partir des résultats de l'exécution de la macro commande de calcul. L'une, ou l'on compare le taux de restitution d'énergie élastoplastique $G (= J^{EF})$ à la force fissurante $J_{0,2}$ du matériau. Si le rapport $J_{0,2} / J^{EF} > 1$, il n'y a pas risque de rupture brutale.

L'autre, ou le calcul est élastique, on applique alors la méthode analytique de correction plastique. Pour le cas d'un chargement combinant mécanique et thermique elle consiste en une règle de cumul entre la méthode K_{cp} et J_{th} . En mécanique seule, la méthode codifiée dans le RSE-M est la méthode K_{cp} .

L'étude de la correction de plasticité sous chargement mécanique seul ($1/K_r$) est jugée trop complexe, la géométrie proprement dite des piquages ne permet pas le calcul de L_r (indicateur du niveau de plasticité en mécanique). De plus une validation type [bib10] nécessiterait de nombreux calculs éléments finis en élastoplasticité.

5.2 Données de sortie ASPIC

Les post-traitements de calcul ASPIC doivent permettre de mettre en œuvre des analyses de nocivité de défaut conformément au RSE-M telles que :

- transformation d'un champs de contrainte en facteurs d'intensité de contrainte par la méthode des fonctions d'influence
- calcul de la correction de plasticité et vérification du domaine de validité.

Pour les piquages sains, les contraintes d'ouverture suivant les modes I, II et III sont calculées.

Via l'opérande RCCM, on peut réaliser un post-traitement du type `POST_RCCM`, des précautions sont à prendre au moment de définir les caractéristiques matériau [bib12].

Le taux de restitution de densité d'énergie, noté G , est calculé en fonction de l'abscisse curviligne sur le fond de fissure et en fonction du temps. C'est cette valeur qui est comparée à la force fissurante du matériau $J_{0,2}$ pour évaluation des facteurs de marge.

5.3 Codification

Les critères à appliquer pour les études spécifiques des défauts sont codifiés dans l'annexe 5.6 IV 2 du RSE-M [bib4] pour les matériels de niveau 2.

La force fissurante $J_{0,2}$ du matériau à l'amorçage de la déchirure correspond conventionnellement à une extension ductile de 0,2 mm. Par exemple pour le métal de base type A48 ou A42 et les joints soudés, ces valeurs sont :

- $J_{0,2} = 92 \text{ KJ/m}^2$ pour une température inférieure ou égale à 100°C
- $J_{0,2} = 55 \text{ KJ/m}^2$ pour une température supérieure ou égale à 200°C

Les valeurs de $J_{0,2}$ peuvent être interpoler linéairement entre 100°C et 200°C

5.4 Exemple d'application

On trouve des exemples d'utilisation dans les documents [bib8], [bib9].

On résume dans le tableau suivant les résultats de l'analyse de nocivité de défaut sur le piquage ANG-ASG du palier CP0-BGY [bib9].

Piquage ANG-ASG	Interface droite
a (mm)	3
c/a	17,3
T_{moy} °C	186
J_e^{EF} (KJ/m²)	4,87
J^{EF} (KJ/m²)	3,32
J_{0,2} (KJ/m²)	60,2
J_{0,2} / J^{EF}	18,13

6 Conditions d'utilisation ou d'application des résultats

Les calculs plastiques doivent être réservés aux analyses mécaniques de type expertise en raison du temps de calcul associé (voir annexe). La préparation des données d'entrée pour les macro-commandes d'ASPIC demande beaucoup de rigueur. Un REX [bib15] de travaux pratiques avec ASPIC a montré que la préparation des chargements et l'obtention du chargement maximisé prend 2 à 3 journées de travail pour un ingénieur. Pour obtenir le chargement maximisé, on préconise d'utiliser la méthode numérique de calcul du G_{\max} local.

Pour le calcul de la force fissurante, on préconise l'utilisation de la méthode analytique comme dans [bib8] et [bib9]. Pour cela il faut préalablement vérifier que le domaine d'application est compris dans le domaine de validité des méthodes codifiées dans le RSE-M [bib4].

Annexe 1 Exemple de fichier de données ASPIC

Le langage de commande décrit ci dessous correspond à la version 6 de *Code_Aster*.

```
# AUTEUR N. Ligneau
# Piquage ARE-ASG GRAVELINES 3
# FRA EER DC 1470 C du 15/12/99
#
# Piquage fissure
#
# ASTER-V6.04
#
# unités : N, mm, MPa

DEBUT (CODE=_F ( NOM = 'ARE-ASG' ) )

MA = MACR_ASPIC_MAIL(
    EXEC_MALLAGE=_F( LOGICIEL = 'GIBI2000', ),
    TUBULURE =_F( E_BASE      = 21.4,
                  DEXT_BASE   = 140.0,
                  L_BASE      = 41.0,
                  L_CHANF     = 40.8,
                  E_TUBU      = 8.0,
                  DEXT_TUBU   = 114.3,
                  Z_MAX        = 490.49,
                  TYPE        = 'TYPE_2' ),
    RAFF_MAIL = 'GROS',
    SOUDURE =_F( H_SOUD      = 15.0,
                 ANGL_SOUD   = 30.0,
                 JEU_SOUD    = 2.5 ),
    CORPS =_F( E_CORP       = 30.9,
               DEXT_CORP    = 406.4,
               X_MAX        = 764.47 ),

# fissure a = 3 mm

    FISS_SOUDURE =_F( TYPE      = 'LONGUE',
                     PROFONDEUR = 3.0,
                     LONGUEUR  = 104.0,
                     AZIMUT     = 0.0,
                     POSITION    = 'DROIT',
                     FISSURE    = 'DEB_INT' )
)

# Tu42C

TU42C=DEFI_MATERIAU(ELAS=_F( E      = 1.99100E5,
                             NU      = 0.3,
                             ALPHA   = 1.845E-05, ),
                    RCCM=_F( SM = 103.0, ),
                    THER=_F( LAMBDA = 0.0514,
                             RHO_CP = 3.8394E-3, ))

# Données du coefficient d'échange sur la peau interne

COEFHCOR=DEFI_CONSTANTE( VALE=1.85E-3, )
COEFHTUB=DEFI_CONSTANTE( VALE=0.01775, )
```

Titre : *Méthodologie pour la réalisation d'une analyse de nocivité de défaut*
Auteur(s) : **J. ANGLES, J.P. SERMAGE**

Date : 15/04/03
Clé : U2.09.01-A Page : 16/20

Description de la variation des chargements au cours du temps

```
VARTEMP=DEFI_FONCTION(NOM_PARA='INST',  
                      VALE=( 0.0, 220.0,  
                             1.0, 220.0,  
                             2.0, 7.0)),  
                      PROL_DROITE='CONSTANT')
```

```
VARP=DEFI_FONCTION(NOM_PARA='INST',  
                   VALE=( 0.0, 0.0,  
                          1.0, 1.0)),  
                   PROL_DROITE='CONSTANT')
```

```
VARFOR=DEFI_FONCTION(NOM_PARA='INST',  
                     VALE=( 0.0, 0.0,  
                            1.0, 1.0)),  
                     PROL_DROITE='CONSTANT')
```

```
LIST=DEFI_LIST_REEL(DEBUT=0.0,  
                   INTERVALLE=( _F( JUSQU_A = 1.0,  
                                    NOMBRE = 1,)),  
                               _F( JUSQU_A = 2.0,  
                                    NOMBRE = 10,)),  
                               _F( JUSQU_A = 6.0,  
                                    NOMBRE = 8,)),  
                               _F( JUSQU_A = 10.0,  
                                    NOMBRE = 4,)))
```

```
RESUTher = MACR_ASPIC_CALC (  
  TYPE_MALLAGE = 'FISS_LONG_DEB',  
  TUBULURE     = _F( TYPE = 'TYPE_2' ),  
  MODELE       = CO( "MOD" ),  
  MALLAGE      = MA,  
  RESU_THER    = CO( "RESUTH" ),  
  AFFE_MATERIAU=_F( TOUT      = 'OUI',  
                    RCCM      = 'OUI',  
                    MATER     = TU42C,  
                    TEMP_REF  = 220.0 ),  
  ECHANGE=_F( COEF_H_TUBU = COEFHTUB,  
              COEF_H_CORP = COEFHCOR,  
              TEMP_EXT = VARTEMP ),  
  EQUILIBRE=_F( NOEUD = 'P2_CORP' ),  
  PRES_REP = _F( PRES = 0.0,  
                NOEUD = 'P1_CORP',  
                EFFE_FOND = 'OUI',  
                FONC_MULT = VARP ),  
  COMP_ELAS=_F( RELATION = 'ELAS' ),  
  INCREMENT=_F( LIST_INST = LIST ),  
  NEWTON      = _F( REAC_INCR = 50,  
                  MATRICE = 'TANGENTE',  
                  REAC_ITER = 10 ),  
  THETA_3D    = (_F( R_INF=0.1,  
                    R_SUP=1.0 ),  
                _F( R_INF=0.5,  
                    R_SUP=1.0 ),  
                _F( R_INF=0.25,  
                    R_SUP=2.0 ),  
                _F( R_INF=0.5,  
                    R_SUP=2.5 ))
```

FIN ()

Annexe 2 Guide à l'utilisation de l'outil métier

Temps de calcul sur Origin 2000, (on peut diviser par trois pour avoir une estimation sur Alphaserber).

Nb ddl	Espace mémoire (Mo)	Tps de calcul total (s CPU)
100 000 maillage sans défaut raffinement 'FIN'	1500	CALCUL THERMO_ELASTIQUE Solveur THER_LINE : 10 s CPU/pas de tps Solveur STAT_NON_LINE et CALC_ELEM : 1000 s CPU pour le 1 ^{er} incrément, 55 s CPU pour les suivants Dépouillement en température : 6 s CPU/pas de tps Dépouillement en contrainte : 100 s CPU/pas de tps
102 000 maillage avec fissure longue raffinement 'GROS'	2500	CALCUL THERMO_PLASTIQUE Solveur THER_LINE : 21 s CPU/pas de tps Solveur STAT_NON_LINE et CALC_ELEM : 12 000 s CPU/pas de tps en moyenne (3 à 4 itérations par pas de calcul) – soit un total de 76h CPU de calcul pour 23 pas de temps. Dépouillement en température : temps négligeable Dépouillement en Gthéta : 10s CPU/pas de tps

Les calculs plastiques doivent être réservés aux analyses mécaniques de type expertise en raison du temps de calcul associé.

Les temps de calcul pour déterminer le G local maximal sont importants. Ils sont précisés dans le tableau ci-dessous :

	Temps CPU total (en s)	Mémoire demandée (Mo)
Défaut droit	70752	1100
Défaut incliné	64466	1100

Maillage sain

Pour les transitoires thermiques, il faut utiliser un raffinement dit 'FIN' de maillage.

Pour dépouiller les champs de contrainte sous chargement élémentaires, il faut dépouiller dans des plans espacés au maximum de 15°. Soit 24 plans au total pour ASPIC.

Géométrie de la soudure

La géométrie de la soudure a une influence : l'angle total couvert et la surépaisseur extérieure. Pour l'angle, les deux interfaces soudure corps et soudure tubulure constitue des positions extrêmes et donnent également des résultats qui enveloppent tous les plans intermédiaires. Quant à la surépaisseur, on ne peut conclure de façon fiable uniquement à partir des résultats présentés ici. On conclura de façon très globale en disant que plus cette surépaisseur est petite, moins on a de matière et donc plus on se place dans une configuration géométrique pénalisante.

Calcul élastique

La macro commande de calcul ASPIC fait appel au solveur STAT_NON_LINE. Les options par défaut de ce solveur implique une actualisation de la matrice de rigidité à chaque incrément, ce qui est coûteux en temps de calcul (1000s à chaque résolution) si on doit calculer plusieurs pas de chargement (cas d'un transitoire thermique) et inutile pour une analyse élastique. Par conséquent, il faut absolument indiquer dans la macro commande de calcul ASPIC l'option :

```
SOLVEUR =_F( REAC_INCR = n,          n > nombre d'incrément total du calcul
              MATRICE = 'TANGENTE',
              REAC_ITER = 0          ),
```

Calcul élasto-plastique

Ces calculs sont très longs et très coûteux. Différentes options ont été utilisées sous le mot clé NEWTON :

OPTION 1 :

```
NEWTON =_F( MATRICE = 'ELASTIQUE' ),
```

- Le calcul converge très lentement (plus de 10 itérations pour un incrément), beaucoup plus lentement qu'avec une matrice TANGENTE.

OPTION 2 :

```
NEWTON =_F( REAC_INCR = 1,  
            MATRICE = 'TANGENTE',  
            REAC_ITER = 1 ),
```

```
RECH_LINEAIRE =_F( RESI_LINE_RELA = 1.0E-3,  
                  ITER_LINE_MAXI = 3 ),
```

- Pour que le calcul converge avec un nombre d'itérations raisonnable (3 à 4 itérations par incrément de temps) il faut actualiser la matrice tangente à chaque incrément.
- L'utilisation de l'option de recherche linéaire ne semble pas modifier beaucoup le temps de calcul. Le coefficient de recherche linéaire est très proche de 1.

Annexe 3 Référentiel méthodologique

Les synthèses des notes constituant le référentiel méthodologique sont restituées ci dessous.

Etude de validation ASPIC : Piquage ARE-ASG sous chargement mécanique et thermique. N. LIGNEAU - SEPTEN E-N-T-MS/00-01631 A

Cette note a permis de :

- valider la méthode analytique de maximisation du chargement non signé par comparaison avec une méthode de référence [bib12]
- valider l'utilisation de l'outil métier ASPIC pour mettre en œuvre une analyse de nocivité par comparaison avec un calcul réalisé par FRAMATOME
- valider ASPIC pour les analyses thermo-mécaniques linéaires.

Méthode analytique de correction plastique pour les piquages sous chargement thermique et thermomécanique J.P. SERMAGE – SEPTEN E-N-ES-MS/02-01069 A

Cette note, via la démarche générale d'analyse de nocivité de défaut s'appuyant sur les méthodes codifiées dans le RSE-M et sur la base de l'étude [bib5], a permis de valider :

- l'utilisation de la méthode J_{th} , pour les chargements thermiques seuls
- la combinaison des méthodes K_{cp} et J_{th} dans le cas de chargements combinés mécaniques et thermiques.

Outil-métier ASPIC – Validation des maillages pour le calcul de transitoires thermiques S. MUSI, A. BENAZIZA – SEPTEN E-N-T-MS/00-01108 A

Cette note a permis de :

- valider des maillages de piquage sain et fissuré en élasticité linéaire
- contribuer à la validation des maillages de piquages fissurés en élastoplasticité par une comparaison qualitative avec une étude FRAMATOME, dont la référence est donnée ci dessous :

Piquage ARE/ASG de GRAVELINES 3 Calculs 3D élastoplastiques du piquage comportant un défaut circonferentiel en situations de 2^{ème}, 3^{ème} et 4^{ème} catégories Note FRA EER/DC/1470 indice C, N° FDU : 00A04082

Analyse de nocivité de défaut dans un piquage : validation de la méthode simplifiée des fonctions d'influence. N. LIGNEAU – SEPTEN E-N-T-MS/00-00828 A

Cette note a permis de :

- valider l'utilisation de la méthode analytique des fonctions d'influence codifiée dans le RSE-M pour le calcul du taux de restitution d'énergie élastique
- montrer la faisabilité d'une étude de nocivité de défaut avec ASPIC

7 Bibliographie

- [1] J. P. SERMAGE : Méthodologie pour la réalisation d'une analyse de nocivité de défaut avec l'outil métier ASPIC, préparation des données. Note SEPTEN E-N-ES-MS/02-01078A
- [2] C. CHEDEAU : Spécification pour la poursuite du développement sous assurance qualité d'ASPIC - UTO D4507-SIS-CDE/CDE-98/1916
- [3] J. P. SERMAGE : Plan Qualité Détaillé du lot « outil-métier ASPIC » du projet « Prestation pour l'UTO » - SEPTEN E-N-ES-MS/01-01051 A
- [4] RSE-M Edition 1997 et modificatifs de 1997 à 2000
- [5] C. JEAN : Fiche de mise en exploitation du logiciel *Code_Aster* version 5.7. Note E-N-ES-MS/02-00733.A
- [6] N. LIGNEAU : Etude de validation ASPIC : Piquage ARE-ASG sous chargement mécanique et thermique - SEPTEN E-N-T-MS/00-01631 A
- [7] S. MUSI, A. BENAZIZA : Outil-métier ASPIC – Validation des maillages pour le calcul de transitoires thermiques - SEPTEN E-N-T-MS/00-01108 A
- [8] N. LIGNEAU : Analyse de nocivité de défaut dans un piquage : validation de la méthode simplifiée des fonctions d'influence - SEPTEN E-N-T-MS/00-00828 A
- [9] J.P. SERMAGE : Méthode analytique de correction plastique pour les piquages sous chargement thermique et thermomécanique - SEPTEN E-N-ES-MS/02-01069 A
- [10] M.H. LACIRE : Tubes avec défauts circonférentiels : validation de la méthode simplifiée de calcul de J sous chargement mécanique - Rapport CEA SEMT/LISN/RT/99-036/A
- [11] RCC-M –Tome I – Volumes B-C-D : matériel de niveaux 1,2 et 3 AFCEN édition 2000.
- [12] Documentation utilisation des macro-commandes MACR_ASPIC_MAIL et MACR_ASPIC_CALC
- [13] Y. MEZIERE : Méthodologie d'analyse de nocivité de défauts dans les piquage en élasticité linéaire - SEPTEN E-N-T-MS/98-00268 A
- [14] Données et hypothèses pour la validation de la méthode analytique de correction plastique pour les piquages ASPIC. Courier UTO D4507-SIS-BUI n°01/0677
- [15] Outil-métier ASPIC – Retour d'expérience UTO. CR d'évaluation E-N-T-MS/01-00100-A