

Post-traitement selon le RCC-M

Résumé :

L'opérateur `POST_RCCM` [U4.67.04] permet de vérifier les critères de niveau 0 et certains critères de niveau A du chapitre B3200 du RCC-M, pour des modélisations de milieux continus 2D ou 3D. Il permet également le calcul des critères de fatigue du chapitre B3600 en post-traitement de calculs de tuyauteries.

Les critères de niveau 0 visent à prémunir le matériel contre les dommages de déformation excessive, d'instabilité plastique et d'instabilité élastique et élastoplastique. Ces critères nécessitent le calcul des contraintes équivalentes de membrane P_m , de membrane locale P_l et de membrane plus flexion $P_m + P_b$. Ces paramètres sont calculés par la commande `POST_RCCM`, et comparés à des valeurs limites.

Les critères de niveau A visent quant à eux à prémunir le matériel contre les dommages de déformation progressive et de fatigue. Hors fatigue, ils nécessitent le calcul de l'amplitude de variation de contrainte linéarisée, notée S_n , et éventuellement de la quantité S_n^* et du rochet thermique. Pour la fatigue, ils nécessitent en plus le calcul de l'amplitude de variation de contrainte en un point, notée S_p . Une loi de fatigue (type Wohler) permet ensuite d'en déduire le facteur d'usage en prenant en compte les différents groupes de situations définis par l'utilisateur.

Par ailleurs, l'opérateur `POST_RCCM` permet de calculer le facteur d'amorçage au niveau d'une zone singulière, au sens de l'annexe ZD du RCC-M. Ce calcul est disponible pour des modélisations de milieux continus 2D ou 3D.

Table des matières

1 Introduction.....	4
2 Mise en données dans Code_Aster.....	5
2.1 Données géométriques.....	5
2.2 Données de chargement – Type EVOLUTION.....	5
2.3 Données de chargement – Type UNITAIRE.....	6
2.4 Données matKe mixteériau.....	6
2.5 Hypothèses simplificatrices.....	6
2.6 Calculs effectués par POST_RCCM.....	7
3 Critères de niveau 0 (mot-clé PM_PB).....	8
3.1 Critères de niveau 0 spécifiés par le RCC-M.....	8
3.1.1 Contrainte équivalente primaire générale de membrane Pm.....	8
3.1.2 Contrainte équivalente primaire de membrane locale Pl.....	8
3.1.3 Contrainte équivalente primaire de membrane+flexion Pmb (ou Plb).....	8
3.2 Calculs effectués dans le cas 'EVOLUTION'.....	9
3.3 Calculs effectués dans le cas 'UNITAIRE'.....	9
4 Critères de niveau A pour les résultats de type 'UNITAIRE'.....	10
4.1 Définition des critères dans le RCC-M.....	10
4.1.1 Calcul de Sn.....	10
4.1.2 Calcul de Sn*.....	11
4.1.3 Calcul du rochet thermique.....	11
4.1.4 Calcul du facteur d'usage.....	11
4.1.4.1 Principe général.....	11
4.1.4.2 Calcul des facteurs d'usage élémentaires.....	12
4.2 Hypothèse simplificatrice dans le cas 'UNITAIRE'.....	13
4.3 Calculs effectués avec l'option 'SN'.....	14
4.3.1 Calcul de Sn.....	14
4.3.2 Calcul de Sn*.....	14
4.3.3 Calcul du rochet thermique.....	14
4.4 Calculs effectués avec l'option 'FATIGUE'.....	15
4.4.1 Combinaison des situations à l'intérieur de chaque groupe de situations.....	15
4.4.1.1 Calcul de Sp(p,q).....	15
4.4.1.2 Calcul de Sn(p,q).....	16
4.4.1.3 Calcul de Spméca(p,q) et Spther(p,q).....	16
4.4.1.4 Calcul de S'alt(p,q).....	16
4.4.2 Prise en compte du séisme.....	17
4.4.3 Situations de passage entre groupes de situations.....	17
4.4.4 Stockage.....	18
4.4.5 Calcul du facteur d'usage total.....	18

5 Critères de niveau A pour les résultats de type 'EVOLUTION'.....	20
5.1 Définition des critères.....	20
5.1.1 Calcul de S_n	20
5.1.2 Calcul de S_n^*	20
5.1.3 Calcul du rochet thermique.....	20
5.1.4 Calcul du facteur d'usage selon l'annexe ZH210.....	20
5.1.5 Calcul du facteur d'amorçage	20
5.2 Calculs effectués avec l'option 'SN'.....	21
5.2.1 Calcul de S_n	21
5.2.2 Calcul de S_n^*	22
5.2.3 Calcul du rochet thermique.....	22
5.3 Calculs à la fatigue avec l'option 'FATIGUE_ZH210'	22
5.3.1 Calcul des facteurs d'usage élémentaires.....	23
5.3.2 Calcul du facteur d'usage total.....	23
5.3.3 Exemple.....	24
5.4 Calculs du facteur d'amorçage avec l'option 'AMORCAGE'.....	25
6 Critères de fatigue pour l'analyse simplifiée des tuyauteries selon le RCC-M B3600.....	26
6.1 Calcul préalable de tous les états de chargement.....	26
6.1.1 Calculs des états de chargement statiques.....	26
6.1.2 Calcul des chargements sismiques.....	26
6.1.3 Calcul des transitoires thermiques.....	27
6.2 Calculs des amplitudes de variation des contraintes	28
6.2.1 Principe de la méthode.....	28
6.2.2 Calcul des combinaisons de chargement (i,j) à l'intérieur de chaque groupe de situations	29
6.2.2.1 Notations et définitions.....	29
6.2.2.2 Calcul de	29
6.2.2.3 Calcul de	30
6.2.2.4 Calcul de	30
6.2.2.5 Cas des sous-cycles.....	31
6.2.3 Calcul des combinaisons de chargement (i,j) pour les situations de passage entre groupe de situations.....	31
6.3 Calcul du facteur d'usage	32
7 Bibliographie.....	34
8 Description des versions du document.....	34

1 Introduction

Le RCC-M [bib1] décrit les règles générales d'analyse du comportement des matériels de niveau 1 des Centrales Nucléaires. Ces règles visent à assurer aux matériels des centrales REP des marges de sécurité suffisantes vis-à-vis des différents types de dommages auxquels ils pourraient être exposés du fait des chargements qui leur sont appliqués : déformation excessive et instabilité plastique, instabilité élastique ou élastoplastique, déformation progressive sous l'effet de sollicitations répétées, fatigue (fissuration progressive), rupture brutale...

Dans *Code_Aster*, il est possible de réaliser deux types de calcul :

- calcul des critères de niveau 0 et A du paragraphe B3200 en post-traitement de calculs sur des structures 2D ou 3D ;
- calcul des critères de fatigue du paragraphe B3600 en post-traitement de calculs de tuyauteries.

Les critères du B3200 correspondent dans l'opérateur `POST_RCCM` aux résultats (`TYPE_RESU_MECA`) de types 'EVOLUTION' et 'UNITAIRE'. Leur calcul est détaillé dans les chapitres 3, 4 et 5.

Le critère de fatigue du B3600 correspond dans l'opérateur `POST_RCCM` aux résultats de type 'TUYAUTERIE'. Leur calcul est détaillé dans le chapitre 6.

2 Mise en données dans Code_Aster

Ce chapitre vise à rappeler quelques définitions de base associées au chapitre B3200 du RCC-M et à décrire les adaptations nécessaires à *Code_Aster*, qui sont motivées dans la [bib2]. Les critères du §B3200 correspondent dans l'opérateur `POST_RCCM` aux résultats (`TYPE_RESU_MECA`) de types 'EVOLUTION' et 'UNITAIRE'.

2.1 Données géométriques

L'utilisateur du RCC-M doit distinguer dans sa structure les zones de discontinuité majeure, les zones de discontinuité mineure et les zones comportant des singularités géométriques. Ces dernières nécessitent un traitement spécifique (décrit au §5.4).

Zone courante (hors singularité géométrique) :

Le RCC-M définit des "segments d'appui" qui servent à linéariser les contraintes. Ces segments sont, hors des zones de discontinuité, des segments généralement normaux à la surface médiane de la paroi, et dans les zones de discontinuité, les plus courts segments permettant de rejoindre les 2 faces de la paroi.

L'utilisateur de *Code_Aster* doit donc définir l'ensemble des sections de la structure où les calculs de post-traitement seront faits (c'est lui qui sait si ces sections passent par des zones courantes, ou des zones de discontinuité géométrique). En pratique, on travaille :

- soit sur un segment existant dans le maillage ;
- soit sur un segment fourni par `INTE_MAIL_2D` ou `INTE_MAIL_3D` ;
- soit sur un segment défini dans `MACR_LIGN_COUPE`.

On calcule tous les critères systématiquement aux deux extrémités du segment.

Singularité géométrique :

Les zones de discontinuités locales dont le contour géométrique présente des variations brusques sont le siège de concentrations de contraintes aiguës. Dans ce cas, les méthodes classiques associées aux zones courantes sont inadaptées et on introduit la notion de facteur d'amorçage. Ce paramètre doit être calculé sur un cercle (de rayon imposé, dépendant du matériau) autour de la singularité.

L'utilisateur doit donc définir cette ligne de coupe. En pratique, on travaille :

- soit sur une ligne de coupe circulaire existant dans le maillage ;
- soit sur une ligne de coupe circulaire définie dans `MACR_LIGN_COUPE`.

On rappelle que cette option n'est disponible que pour les chargements de type `EVOLUTION`.

2.2 Données de chargement – Type EVOLUTION

L'option 'EVOLUTION' est bien adaptée aux calculs sur un composant soumis à peu de situations de chargement et pas de séisme. L'utilisateur du RCC-M doit donner le nombre d'occurrences de chaque situation de fonctionnement (par exemple : chauffage de la chaudière, arrêt à chaud, etc.). Une situation de fonctionnement peut être décomposée en transitoires, c'est-à-dire des évolutions des paramètres de fonctionnement globaux (pression, température) en fonction du temps.

Dans *Code_Aster*, on traite des résultats mécaniques (produits par `MECA_STATIQUE` ou `STAT_NON_LINE`), donc des transitoires. Pour chaque transitoire, les champs de contraintes sont à fournir sur le segment d'analyse aux instants de discrétisation du calcul par l'intermédiaire de tables créées par appel à `POST_RELEVE_T` ou `MACR_LIGN_COUPE`.

Plusieurs types de résultats peuvent être nécessaires pour chaque transitoire : contraintes pour les chargements thermomécaniques (`TABL_RESU_MECA`), contraintes pour le chargement thermique seul (`TABL_SIGM_THER`), contraintes pour le chargement de pression seul (`TABL_RESU_PRES`) et contraintes pour les zones singulières (`TABL_SIGM_THETA`).

Cette option est celle qui conduit aux résultats les plus précis. Elle ne nécessite en effet d'introduire aucune hypothèse simplificatrice ni sur la définition des chargements, ni sur le calcul des différents critères de niveau 0 ou de niveau A.

Par ailleurs, cette option permet de calculer le facteur d'amorçage au niveau d'une zone singulière, au sens de l'annexe ZD du RCC-M.

2.3 Données de chargement – Type UNITAIRE

L'option 'UNITAIRE' est bien adaptée aux calculs sur un composant soumis à de nombreuses situations, avec éventuellement du séisme. Plusieurs groupes de situations peuvent également être définis, avec des situations de passage entre ces groupes.

Chaque situation est décrite par deux états mécaniques stabilisés (A et B, éventuellement liés à des chargements sismiques) et un transitoire thermique.

Chaque état mécanique stabilisé est décrit à partir d'une pression P et d'un torseur d'effort $\{F_x(i), F_y(i), F_z(i), M_x(i), M_y(i), M_z(i)\}$. Les tenseurs des contraintes sont reconstitués par combinaison linéaire à partir des tenseurs des contraintes associés à chacun des chargements unitaires. On note $\sigma_{\alpha_U}^B$ avec $\alpha \in \{XX, YY, ZZ, XY, XZ, YZ\}$ les composantes du tenseur des contraintes associées au chargement unitaire α_U . Le calcul du tenseur des contraintes correspondant à un chargement mécanique appartenant à un état stabilisé est alors obtenu de la façon suivante :

$$\sigma_{\alpha}(i) = F_x(i) \cdot \sigma_{\alpha_U}^{F_x} + F_y(i) \cdot \sigma_{\alpha_U}^{F_y} + F_z(i) \cdot \sigma_{\alpha_U}^{F_z} + M_x(i) \cdot \sigma_{\alpha_U}^{M_x} + M_y(i) \cdot \sigma_{\alpha_U}^{M_y} + M_z(i) \cdot \sigma_{\alpha_U}^{M_z} + P(i) \cdot \sigma_{\alpha_U}^P$$

L'utilisation de cette option nécessite le calcul préalable des champs de contraintes pour les 7 chargements élémentaires et des champs de contraintes pour chacun des transitoires thermiques ; ces champs sont à fournir sur le segment d'analyse aux instants de discrétisation du calcul par l'intermédiaire de tables.

Remarques :

- 1) Pour les piquages, il est également possible d'utiliser la méthode *UNITAIRE*, en définissant deux tenseurs d'efforts associés respectivement au corps et à la tubulure..
- 2) Contrairement au type *EVOLUTION*, il est ici nécessaire d'introduire certaines hypothèses pour le calcul en fatigue, cf. § 4.2.
- 3) Il convient de mettre en garde l'utilisateur que le choix de séparer les parties mécaniques et thermiques conduit à un conservatisme voulu qui peut s'avérer excessif.

2.4 Données matériau

Les données matériau nécessaires au calcul sont les suivantes :

- S_m : valeur admissible (tabulée dans le RCC-M Annexe Z1).
- S_y : limite conventionnelle d'élasticité (tabulée dans le RCC-M Annexe Z1 2.1).
- m, n : constantes matériau pour le calcul de K_e (définies dans le RCC-M B3234.6)
- E_c, E : modules d'élasticité (pour la correction de la courbe de fatigue, annexe Z1).
- Courbes de fatigue du matériau : selon le RCC-M annexe Z1.
- Distance d à la singularité géométrique et loi d'amorçage du matériau (telle que définies et tabulées dans l'annexe ZD2200 du RCC-M) pour le calcul du facteur d'amorçage.

2.5 Hypothèses simplificatrices

Dans le RCC-M, l'utilisateur doit être capable de dire, après analyse des résultats du calcul, si les directions principales en un point donné sont fixes ou si elles tournent au cours du temps.

Par contre, dans la commande `POST_RCCM`, on peut ne pas faire d'hypothèse. On ne considérera que le cas où les directions principales sont quelconques.

De plus, l'utilisateur doit être capable de classer les contraintes dans les catégories suivantes :

- Primaire générale de membrane : P_m
- Primaire de membrane locale : P_l
- Primaire de flexion : P_b
- Expansion thermique : P_e
- Secondaire : Q
- De pointe : F

Ce choix ne peut être fait par `POST_RCCM`. Seul l'utilisateur peut qualifier un champ de contraintes ("Primaire", "secondaire", ou la somme des deux). Les critères qui sont à vérifier sont calculés à partir de champs de contraintes (constants ou fonction du temps) fournis par l'utilisateur. C'est lui qui assure la cohérence entre le calcul de ces champs et les critères appliqués.

Toutefois, pour fixer les idées, la classification est plus simple dans les cas suivants :

- un chargement constant ou variable à force ou pression imposée est primaire, sauf pour certaines structures très particulières,
- un chargement constant ou variable à déplacement imposé est en principe, secondaire (sauf dans le cas de "l'effet de ressort"),
- un chargement thermique permanent ou transitoire est en principe secondaire.

Par contre, la combinaison de ces types de chargements conduit à un résultat qui ne peut plus être qualifié de primaire ou secondaire. Suivant les critères, l'utilisateur pourra donc être amené à décomposer ses chargements.

2.6 Calculs effectués par `POST_RCCM`

On décrit ici le fonctionnement de la commande `POST_RCCM` permettant d'effectuer le calcul de certains critères RCC-M B3200 de niveaux 0 et A. La réalisation décrite ici ne prend pas en compte tous les critères du B3200 et pourra être complétée (par exemple pour d'autres niveaux de critères).

La donnée principale est le segment (d'appui) où seront effectués les calculs. C'est l'utilisateur qui choisit le segment et qui a la responsabilité de trouver celui pour lequel les quantités intervenant dans les critères sont maximum. La recherche automatique de ce segment réalisant le maximum est un problème difficile, et n'est pas programmée.

Après avoir calculé un ou plusieurs résultats par `MECA_STATIQUE` ou `STAT_NON_LINE`, l'utilisateur doit extraire les contraintes sur le segment d'analyse par `POST_RELEVE_T` ou `MACR_LIGN_COUPE`. Pour finir, l'utilisateur demande le calcul du ou des critères par l'opérateur `POST_RCCM`.

Trois types de critères sont accessibles chacun par un mot-clé facteur :

- des critères de niveau 0 par le mot-clé `PM_PB`,
- des critères de niveau A (hors fatigue) par le mot-clé `SN`,
- des critères de fatigue (également de niveau A) par les mots-clé `FATIGUE` (pour 'UNITAIRE') ou `FATIGUE_ZH210` (pour 'EVOLUTION'),

Par ailleurs, pour les résultats de type 'EVOLUTION' uniquement, il est possible de vérifier le critère d'amorçage (critère de niveau A) dans une zone singulière (mot clé `AMORCAGE`).

3 Critères de niveau 0 (mot-clé `PM_PB`)

3.1 Critères de niveau 0 spécifiés par le RCC-M

Les critères de niveau 0 visent à prémunir le matériel contre les dommages de déformation excessive, d'instabilité plastique et d'instabilité élastique et élastoplastique. Ils doivent être vérifiés par la situation de référence (voir le B3121 et le B3151). Ces critères nécessitent le calcul des contraintes équivalentes P_m , P_l , P_b qui sont définies ci-dessous.

3.1.1 Contrainte équivalente primaire générale de membrane P_m

Etant donnée la contrainte primaire de la situation de référence (1^{ère} catégorie) et un segment situé hors d'une zone de discontinuité majeure. En chaque point extrémité de ce segment de longueur l , on calcule :

$$P_m = \max_t \|\sigma_{ij}^{moy}\| \quad \sigma_{ij}^{moy} = \frac{1}{l} \int_0^l \sigma_{ij} ds,$$

où $\|\cdot\|$ désigne la norme de Tresca : $\|\tau_{ij}\| = \max_{I,J} |\tau_I - \tau_J|$
($\tau_{I \ I=1,3}$ sont les contraintes principales)

Le critère s'écrit (B3233.1) :

$$P_m \leq S_m$$

S_m est la contrainte équivalente admissible, tabulée dans l'annexe Z1 du RCC-M. S_m est définie dans le calcul par l'opérande `SM` du mot clé `facteur RCCM` (ou `RCCM_FO`) de `DEFI_MATERIAU`. Elle peut être fonction de la température.

3.1.2 Contrainte équivalente primaire de membrane locale P_l

Etant donnée la contrainte primaire de la situation de référence (1^{ère} catégorie) et un segment **situé dans une zone de discontinuité majeure**, la définition de P_l est identique à celle de P_m sur ce segment.

Le critère s'écrit (B3233.2) :

$$P_l \leq 1.5 S_m$$

3.1.3 Contrainte équivalente primaire de membrane+flexion P_{mb} (ou P_{lb})

Étant donnée la contrainte primaire de la situation de référence (1^{ère} catégorie) et un segment (orienté). En chaque point extrémité de ce segment de longueur l , (extrémités correspondant aux peaux externe et interne), on calcule :

$$P_m = \max_t \|\sigma_{ij}^{moy}\| \quad P_b = \max_t \|\sigma_{ij}^{fle}\| \quad P_{mb} = \max_t \|\sigma_{ij}^{lin}\|$$
$$\sigma_{ij}^{moy} = \frac{1}{l} \int_0^l \sigma_{ij} ds \quad \sigma_{ij}^{fle} = \frac{6}{l^2} \int_0^l \left(s - \frac{l}{2}\right) \sigma_{ij} ds \quad \sigma_{ij}^{lin} = \sigma_{ij}^{moy} \pm \sigma_{ij}^{fle}$$
$$\sigma_{ij}^{lin}(s=0) = \sigma_{ij}^{moy} - \sigma_{ij}^{fle}$$
$$\sigma_{ij}^{lin}(s=l) = \sigma_{ij}^{moy} + \sigma_{ij}^{fle}$$

Les critères s'écrivent (B3233.3) :

$$P_{mb} \leq 1.5 S_m$$
$$P_{lb} \leq 1.5 S_m$$

3.2 Calculs effectués dans le cas 'EVOLUTION'

La table des contraintes comporte soit un seul pas de temps, soit un transitoire complet (*nb_inst* pas de temps). Dans ce dernier cas, on cherchera le maximum, par rapport à la liste des numéros d'ordre, des différentes termes intervenant dans les critères.

C'est à l'utilisateur de savoir si on calcule P_m (contrainte générale de membrane : hors des zones de singularité géométrique) ou bien P_l (contrainte locale de membrane : dans les singularités). A partir des relevés de contraintes fournis, on calcule donc une contrainte de membrane.

L'algorithme est le suivant :

- Sur l'ensemble des numéros d'ordre $n=1, nb_inst$
 - extraction des contraintes à l'instant t
 - sur chaque extrémité du segment
 - calcul de $P_m(t)$, $P_b(t)$, $P_{mb}(t, s=0)$ et $P_{mb}(t, s=l)$ par intégration sur le segment
$$\sigma_{ij}^{moy}(t) = \frac{1}{l} \int_0^l \sigma_{ij}(t) ds, \quad P_m(t) = \|\sigma_{ij}^{moy}(t)\|,$$
$$\sigma_{ij}^{fle}(t) = \frac{6}{l^2} \int_0^l \left(s - \frac{l}{2}\right) \sigma_{ij}(t) ds, \quad P_b(t) = \|\sigma_{ij}^{fle}(t)\|$$
$$P_{mb}(t, s=0) = \max_t \|\sigma_{ij}^{moy}(t) - \sigma_{ij}^{fle}(t)\| \quad P_{mb}(t, s=l) = \max_t \|\sigma_{ij}^{moy}(t) + \sigma_{ij}^{fle}(t)\|$$
 - Recherche du maximum de $P_m(t)$, $P_{mb}(t, s=0)$ et $P_{mb}(t, s=l)$
 - Sortie et stockage dans la table du résultat.

Les valeurs limites sont respectivement S_m et $1,5 S_m$, S_m étant la contrainte admissible fonction du matériau et de la température, donnée par le mot-clé `SM_KE_RCCM` du comportement `FATIGUE` dans `DEFI_MATERIAU`.

Remarque :

Les contraintes thermiques sont de type secondaire et ne doivent donc pas être prises en compte dans le calcul des critères de niveau 0. Dans `POST_RCCM`, si `TABL_RESU_MECA` et `TABL_SIGM_THER` sont présents simultanément, on suppose que le résultat `TABL_RESU_MECA` correspond au chargement complet thermomécanique, et on lui retranche donc les contraintes d'origine thermique.

3.3 Calculs effectués dans le cas 'UNITAIRE'

En notant A et B les deux états mécaniques stabilisés, le calcul de P_m se fait de la façon suivante :

$$P_m = \max \left(\|\sigma_{ij}^{moy}\|^A, \|\sigma_{ij}^{moy}\|^B \right)$$

et de même pour P_b et P_{mb} .

4 Critères de niveau A pour les résultats de type 'UNITAIRE'

4.1 Définition des critères dans le RCC-M

Les critères de niveau A visent à prémunir le matériel contre les dommages de déformation progressive et de fissuration progressive. Pour les résultats de type 'UNITAIRE', quatre type de critères peuvent être vérifiés :

1. Amplitude de variation des contraintes linéarisées S_n (option 'SN') ;
2. Amplitude de variation de S_n^* (option 'SN') ;
3. Calcul du rochet thermique (option 'SN') ;
4. Calcul du facteur d'usage en fatigue (option 'FATIGUE') .

Ces différents paramètres et les critères associés sont décrits ci-dessous tels que définis dans le RCC-M. Dans le paragraphe suivant, on introduit une hypothèse simplificatrice avant de détailler leur calcul dans *Code_Aster*.

4.1.1 Calcul de S_n

On prend en compte les contraintes primaires plus secondaires et les contraintes résultant des dilatations thermiques contrariées : $P_l + P_b + P_E + Q$ qui représente donc les contraintes **linéarisées** associées à tout le chargement (mécanique et thermique).

Les points de calcul sont les deux extrémités du segment. En chaque point extrémité de ce segment de longueur l , on calcule S_n selon le paragraphe B3232.6 :

$$S_n = \max_{t_1} \left(\max_{t_2} \left\| \sigma_{ij}^{lin}(t_1) - \sigma_{ij}^{lin}(t_2) \right\| \right)$$
$$\sigma_{ij}^{moy} = \frac{1}{l} \int_0^l \sigma_{ij} ds \quad \sigma_{ij}^{fle} = \frac{6}{l^2} \int_0^l \left(s - \frac{l}{2} \right) \sigma_{ij} ds \quad \sigma_{ij}^{lin} = \sigma_{ij}^{moy} \pm \sigma_{ij}^{fle}$$
$$\sigma_{ij}^{lin}(s=0) = \sigma_{ij}^{moy} - \sigma_{ij}^{fle}$$
$$\sigma_{ij}^{lin}(s=l) = \sigma_{ij}^{moy} + \sigma_{ij}^{fle}$$

Le critère d'adaptation globale s'écrit (B3234.2) :

$$S_n \leq 3 S_m$$

S_m étant la contrainte admissible fonction du matériau et de la température, donnée par l'opérande SM du mot clé facteur RCCM (ou RCCM_FO) de DEFI_MATERIAU.

Si ce critère n'est pas vérifié, on peut pratiquer l'analyse élastoplastique simplifiée du B3234.3. Il faut effectuer les trois opérations suivantes :

- vérifier le critère :

$$S_n^* \leq 3 S_m$$

- faire une correction élastoplastique ($Ke > 1$) dans l'analyse à la fatigue,
- vérifier le critère du rochet thermique (B3234.8) dans les parties courantes des coques cylindriques (et tuyaux) soumises à une pression et un gradient de température cyclique.

4.1.2 Calcul de S_n^*

On note S_n^* l'amplitude S_n calculée sans prendre en compte les contraintes de flexion d'origine thermique. On traduit cette définition par :

- A l'origine du segment :

$$S_n^* = \max_{t_1} \left(\max_{t_2} \left\| \left(\sigma_{ij}^{lin}(t_1) + \sigma_{ij}^{flecth}(t_1) \right) - \left(\sigma_{ij}^{lin}(t_2) + \sigma_{ij}^{flecth}(t_2) \right) \right\| \right)$$

- A l'extrémité du segment :

$$S_n^* = \max_{t_1} \left(\max_{t_2} \left\| \left(\sigma_{ij}^{lin}(t_1) - \sigma_{ij}^{flecth}(t_1) \right) - \left(\sigma_{ij}^{lin}(t_2) - \sigma_{ij}^{flecth}(t_2) \right) \right\| \right)$$

avec $\sigma_{ij}^{flecth} = \frac{6}{l^2} \int_0^l \left(s - \frac{l}{2} \right) \sigma_{ij}^{th} ds$.

σ_{ij}^{th} provient d'un calcul effectué avec le chargement thermique seul (c'est à dire que l'on enlève du calcul complet, ayant mené à la valeur de S_n , tous les chargements autres que le chargement thermique).

4.1.3 Calcul du rochet thermique

La paroi d'un appareil soumis simultanément à une pression constante et à des variations cycliques de température peut subir de grandes déformations sous rochet thermique. Il s'agit d'un mécanisme particulier de déformation progressive dans lequel la déformation augmente approximativement de la même quantité à chaque cycle.

La condition à respecter est écrite ci-dessous et porte sur la valeur maximale admissible de l'amplitude de variation de la contrainte d'origine thermique, cf. B3234.8. Elle se rapporte au cas d'une coque à symétrie de révolution chargée par une pression interne constante. On note :

σ_θ , valeur maximale admissible de l'amplitude de variation de la contrainte d'origine thermique, calculée de la même façon que S_p

σ_m , maximum de la contrainte de membrane (ou moyenne) générale due à la pression,

S_y , limite conventionnelle d'élasticité lue sur les tableaux Z I 2.1, pour la température maximale atteinte au cours du cycle.

Le critère est de la forme : $\sigma_\theta = f(\sigma_m, S_y)$. En posant $y' = \frac{\sigma_\theta}{S_y}$ et $x = \frac{\sigma_m}{S_y}$, on a

- si la variation de température est linéaire à travers la paroi :

$$y' = 1/x \quad \text{pour} \quad 0 < x \leq 0.5$$

$$y' = 4(1-x) \quad \text{pour} \quad 0.5 < x < 1$$

- si la variation de température est parabolique dans la paroi :

$$y' = 5,2(1-x) \quad \text{pour} \quad 0.615 \leq x < 1$$

et pour $x < 0,615$: interpolation linéaire entre les points : $x = 0,3 ; 0,4 ; 0,5$ et

$$y' = 4,65 ; 3,55 ; 2,7.$$

4.1.4 Calcul du facteur d'usage

4.1.4.1 Principe général

Le principe général du calcul à la fatigue consiste à combiner chacune des situations 2 à 2 et à s'assurer que le facteur d'usage total ainsi défini est inférieur à 1.

De manière schématique, l'algorithme de calcul défini dans le paragraphe B3200 du RCC-M est le suivant :

- 1) Calcul du facteur d'usage élémentaire de chacune des combinaisons de situation :
 - a) la combinaison entre deux situations p et q repose sur la définition de deux transitoires fictifs :

Transitoire 1 entre le maximum (sur le temps t) du maximum de $(\sigma^p(t), \sigma^q(t))$ et le minimum du minimum de $(\sigma^p(t), \sigma^q(t))$;

Transitoire 2 entre le minimum du maximum et le maximum du minimum.
 - b) Calcul du facteur d'usage élémentaire associé à chacun des deux transitoires fictifs à l'aide de la loi de fatigue (cf. paragraphe ci-dessous) :

$$u(p, q) = u_{\text{Transitoire 1}} + u_{\text{Transitoire 2}}$$
 - c) A la fin de cette étape, on dispose donc d'une matrice $n \times n$ (où n est le nombre de situations) des facteurs d'usage
- 2) $U^{\text{tot}} = 0$
- 3) Identification de la combinaison (k, l) la plus pénalisante (maximum du facteur d'usage) : $U^{\text{tot}} = U^{\text{tot}} + \min(n_k, n_l) \cdot u(k, l)$, où n_k et n_l sont les nombres d'occurrences des situations k et l
- 4) Réactualisation du nombre d'occurrences des situations k et l : $n_k = n_k - \min(n_k, n_l)$ et $n_l = n_l - \min(n_k, n_l)$
- 5) Retour à l'étape 3 jusqu'à épuisement de toutes les occurrences.

La définition des deux transitoires fictifs constitue une étape délicate de cet algorithme. La règle est différente selon que les directions principales sont fixes ou variables.

- **Cas des contraintes principales fixes** : selon le paragraphe B3234.5 et [6], les transitoires fictifs pour la combinaison des situations p et q sont définis ci-dessous, en notant $(\sigma_i)_{1 \leq i \leq 3}$ les contraintes principales et $S_{ij} = \sigma_i - \sigma_j$ leur différence.

Transitoire fictif 1 :

$$\begin{aligned} [S_{ij}^{\text{max}}(1)]_{pq} &= \text{Max}(S_{ij}^{\text{max}}(p); S_{ij}^{\text{max}}(q)) \\ [S_{ij}^{\text{min}}(1)]_{pq} &= \text{Min}(S_{ij}^{\text{min}}(p); S_{ij}^{\text{min}}(q)) \end{aligned}$$

Transitoire fictif 2 :

$$\begin{aligned} [S_{ij}^{\text{max}}(2)]_{pq} &= \text{Max}(\text{Min}(S_{ij}^{\text{max}}(p); S_{ij}^{\text{max}}(q)), \text{Max}(S_{ij}^{\text{min}}(p); S_{ij}^{\text{min}}(q))) \\ [S_{ij}^{\text{min}}(2)]_{pq} &= \text{Min}(\text{Min}(S_{ij}^{\text{max}}(p); S_{ij}^{\text{max}}(q)), \text{Max}(S_{ij}^{\text{min}}(p); S_{ij}^{\text{min}}(q))) \end{aligned}$$

- **Cas des contraintes principales variables** : le paragraphe B3234.5 indique qu'on « remplace S_{ij} par S'_{ij} , en prenant soin de conserver à chaque direction principale qui tourne son identité ». Le calcul de S'_{ij} est détaillé dans le § B 3232.6 :

$$(S'_{ij})_{t,k} = (\sigma'_i)_{t,k} - (\sigma'_j)_{t,k} \text{ avec } (\sigma')_{t,k} = \sigma(t) - \sigma(t_k)$$

L'instant t_k correspond à un extremum de la situation considéré. Il faut maximiser la quantité $(S'_{ij})_{t,k}$ sur tous les extrema de la situation.

4.1.4.2 Calcul des facteurs d'usage élémentaires

Le facteur d'usage élémentaire pour une combinaison de situations (p, q) est calculé en introduisant dans la courbe de fatigue du matériau (courbe de Wöhler) l'amplitude de variation des contraintes alternées $S'_{alt}(p, q)$.

Cette amplitude est définie à partir de l'amplitude de variation des contraintes linéarisées $S_n(p, q)$ et totales $S_p(p, q)$ (même définition que $S_n(p, q)$, mais avec les contraintes à l'origine ou à l'extrémité).

Deux formules sont proposées (cf. §B3234.6):

- KE_MECA :

$$S'_{alt}(p, q) = \frac{1}{2} \cdot \frac{E_c}{E} \cdot K_e(S_n(p, q)) \cdot S_p(p, q)$$

avec :

- E_c : Module d'Young de référence pour la construction de la courbe de Wöhler ;
- K_e le facteur de concentration élasto-plastique :

$$K_e(S_n(p, q)) = \begin{cases} 1 & \text{si } S_n(p, q) \leq 3 \cdot S_m \\ 1 + \frac{1-n}{n \cdot (m-1)} \cdot \left(\frac{S_n(p, q)}{3 \cdot S_m} - 1 \right) & \text{si } 3 \cdot S_m < S_n(p, q) < 3 \cdot m \cdot S_m \\ \frac{1}{n} & \text{si } S_n(p, q) \geq 3 \cdot m \cdot S_m \end{cases}$$

où m et n sont des coefficients dépendants du matériau.

- KE_MIXTE : depuis le modificatif 1997 du RCC-M [1], on peut choisir une autre formule, basée sur une décomposition de S'_{alt} :

$$S'_{alt}(p, q) = \frac{1}{2} \cdot \frac{E_c}{E} \cdot \left(K_e^{meca}(S_n(p, q)) \cdot S_p^{meca}(p, q) + K_e^{ther}(S_n(p, q)) \cdot S_p^{ther}(p, q) \right)$$

avec :

- $K_e^{meca}(S_n(p, q))$ est égal au K_e défini ci-dessus,

$$- K_e^{ther}(S_n(p, q)) = \max \left(1, 1,86 \left(1 - \frac{1}{1,66 + \frac{S_n}{S_m}} \right) \right),$$

- $S_p^{meca}(p, q)$ représente la quantité S_p , amplitude de variation de la part mécanique des contraintes calculée sur la base des sollicitations d'origine mécanique : pression, poids propre, séisme (inertiel et déplacements d'ancrage), expansion thermique.

- $S_p^{ther}(p, q)$ représente la quantité S_p calculée à partir des contraintes mécaniques engendrées uniquement par les transitoires thermiques.

4.2 Hypothèse simplificatrice dans le cas 'UNITAIRE'

Dans la méthode 'UNITAIRE' développée dans Code_Aster, les situations sont définies de manière simplifiée par deux états stabilisés et un transitoire thermique. Il n'est alors pas possible de travailler directement sur chacun des instants des situations et des hypothèses doivent être introduites, en particulier pour identifier les deux transitoires fictifs qui couplent deux situations.

On va ainsi supposer que les instants qui correspondent aux extrema de l'amplitude de variation des contraintes entre deux situations sont aussi les instants correspondants aux extrema des contraintes thermiques de chacune des situations.

Autrement dit :

$$\max_{t_1, t_2} \|\sigma_{ther, p}(t_1) - \sigma_{ther, q}(t_2)\| \approx \max \left(\|\sigma_{ther, p}(t_p^{\max}) - \sigma_{ther, q}(t_q^{\min})\|, \|\sigma_{ther, p}(t_p^{\min}) - \sigma_{ther, q}(t_q^{\max})\| \right)$$

où l'instant $t_i^{\max}$ (resp. $t_i^{\min}$) correspond à l'instant où le transitoire thermique de la situation i atteint son maximum (resp. minimum).

Cette hypothèse est vérifiée quand les directions principales sont fixes. Dans les cas industriels qui nous concernent, les directions principales du chargement thermique varient a priori peu au cours du temps. Cette hypothèse semble donc licite.

Les instants $t_p^{\max}$ et $t_p^{\min}$ sont donc identifiés préalablement pour toutes les situations p : ils correspondent aux extrema de la contrainte thermique associée à p , au sens d'une contrainte équivalente de Tresca signée par la trace des contraintes :

$$t_p^{\min} = \text{Arg min} \left(\|\sigma_{ther, p}(t)\| \cdot \text{sgn}(\text{Tr}(\sigma_{ther, p}(t))) \right)$$
$$t_p^{\max} = \text{Arg max} \left(\|\sigma_{ther, p}(t)\| \cdot \text{sgn}(\text{Tr}(\sigma_{ther, p}(t))) \right)$$

Remarque :

L'identification des instants $t_p^{\max}$ et $t_p^{\min}$ est faite indépendamment pour les deux extrémités du segment d'analyse. On ne différencie pas ici les deux couples d'instants extrémaux pour ne pas alourdir la présentation des algorithmes.

4.3 Calculs effectués avec l'option 'SN'

4.3.1 Calcul de S_n

On note σ_{1_p} et σ_{2_p} les contraintes mécaniques associées aux deux états stabilisés de la situation p ; $\sigma_{ther, p}(t)$ le transitoire thermique associé à cette situation ; et $t_p^{\max}$ et $t_p^{\min}$ les instants extrémaux de ce transitoire thermique tel que défini ci-dessus.

Le paramètre S_n pour la situation p est alors calculé comme suit :

$$S_n = \max \left(\|\sigma_{1_p}^{lin} - \sigma_{2_p}^{lin} + \sigma_{ther, p}^{lin}(t_p^{\max}) - \sigma_{ther, p}^{lin}(t_p^{\min})\|, \|\sigma_{2_p}^{lin} - \sigma_{1_p}^{lin} + \sigma_{ther, p}^{lin}(t_p^{\max}) - \sigma_{ther, p}^{lin}(t_p^{\min})\| \right)$$

4.3.2 Calcul de S_n^*

Si un transitoire thermique est défini (i.e. le mot-clé NUME_RESU_THER est renseigné), le calcul de S_n^* pour la situation p se fait de même :

$$S_n^* = \max \left(\left\| \sigma_{1_p}^{lin} - \sigma_{2_p}^{lin} + \sigma_{ther,p}^{moy}(t_p^{max}) - \sigma_{ther,p}^{moy}(t_p^{min}) \right\|, \left\| \sigma_{2_p}^{lin} - \sigma_{1_p}^{lin} + \sigma_{ther,p}^{moy}(t_p^{max}) - \sigma_{ther,p}^{moy}(t_p^{min}) \right\| \right)$$

4.3.3 Calcul du rochet thermique

Le calcul est effectué si l'opérande NUME_RESU_THER est présent dans le cas 'UNITAIRE'. Il faut également avoir préalablement défini la limite conventionnelle d'élasticité pour la température maximale atteinte au cours du cycle soit par l'opérande SY_MAX de POST_RCCM ; soit par l'opérande SY_02 du mot-clé RCCM dans DEFI_MATERIAU [U4.43.01]. Si aucune limite d'élasticité n'est définie, le calcul du rochet thermique est impossible. Les contraintes dues au chargement de pression sont extraites de la table fournie sous TABL_PRES.

Dans le tableau résultat apparaissent, pour chaque extrémité de chaque segment d'analyse, la limite d'élasticité SY, l'amplitude de variation de la contrainte d'origine thermique SP_THER, le maximum de la contrainte de membrane générale due à la pression SIGM_M_PRES et deux valeurs maximales admissibles de l'amplitude de variation de la contrainte thermique calculées soit en supposant une variation de température linéaire dans la paroi (VALE_MAXI_LINE), soit en supposant une variation de température parabolique dans la paroi (VALE_MAXI_PARAB).

4.4 Calculs effectués avec l'option 'FATIGUE'

Le calcul du facteur d'usage nécessite au préalable le calcul de l'amplitude de variation des contraintes pour chacune des combinaisons de situations. Ce calcul est réalisé successivement pour les situations à l'intérieur de chaque groupe avec ou sans séisme, puis pour les combinaisons de situations de passage entre groupes de situations.

Les amplitudes de variation des contraintes permettent d'identifier les facteurs d'usage élémentaires associés à toutes les combinaisons. On utilise ensuite une méthode de cumul des facteurs d'usage élémentaires, basée sur l'hypothèse du cumul linéaire du dommage, pour obtenir le facteur d'usage global.

4.4.1 Combinaison des situations à l'intérieur de chaque groupe de situations

4.4.1.1 Calcul de $S_p(p,q)$

On considère dans un premier temps la combinaison entre les états i_p et j_q . Ces deux états peuvent être combinés de deux manières, caractérisés par $S_p(i_p, j_q, t_p^{max}, t_q^{min})$ et $S_p(i_p, j_q, t_q^{max}, t_p^{min})$:

$$S_p(i_p, j_q, t_p^{max}, t_q^{min}) = \max \begin{cases} \left\| \sigma_{i_p} + \sigma_{ther,p}(t_p^{max}) - \sigma_{j_q} - \sigma_{ther,q}(t_q^{min}) \right\| \\ \left\| \sigma_{j_q} + \sigma_{ther,p}(t_p^{max}) - \sigma_{i_p} - \sigma_{ther,q}(t_q^{min}) \right\| \end{cases}$$

$$S_p(i_p, j_q, t_q^{max}, t_p^{min}) = \max \begin{cases} \left\| \sigma_{i_p} + \sigma_{ther,p}(t_q^{max}) - \sigma_{j_q} - \sigma_{ther,q}(t_p^{min}) \right\| \\ \left\| \sigma_{j_q} + \sigma_{ther,p}(t_q^{max}) - \sigma_{i_p} - \sigma_{ther,q}(t_p^{min}) \right\| \end{cases}$$

On peut alors définir les deux transitoires fictifs qui combinent les états i_p et j_q :

$$S_p^1(i_p, j_q) = \max \left(S_p(i_p, j_q, t_q^{max}, t_p^{min}), S_p(i_p, j_q, t_p^{max}, t_q^{min}) \right)$$

$$S_p^2(i_p, j_q) = \min \left(S_p(i_p, j_q, t_q^{max}, t_p^{min}), S_p(i_p, j_q, t_p^{max}, t_q^{min}) \right)$$

Le S_p^1 et le S_p^2 de la combinaison de situations (p, q) sont alors définis par maximisation sur les quatre combinaisons possibles d'états stabilisés :

$$S_p^1(p, q) = \max_{i_p, j_q} S_p^1(i_p, j_q) \quad \text{et} \quad S_p^2(p, q) = \max_{i_p, j_q} S_p^2(i_p, j_q)$$

Il faut cependant aussi considérer le cas où la combinaison la plus pénalisante des contraintes thermiques correspond aux deux extrema de la même situation (autrement dit le maximum du maximum et le minimum du minimum sont dans la même situation). On modifie donc la définition de S_p^1 et de S_p^2 comme suit :

Si $S_p^1(p, q) < S_p(p, p)$, alors $S_p^1(p, q) = S_p(p, p)$ et $S_p^2(p, q) = S_p(q, q)$;

Si $S_p^1(p, q) < S_p(q, q)$, alors $S_p^1(p, q) = S_p(q, q)$ et $S_p^2(p, q) = S_p(p, p)$.

Remarques :

- 1) Dans le cas particulier où les deux situations sont en mécanique pure, la définition précédente conduirait à prendre S_p^1 et S_p^2 égaux, ce qui serait inutilement conservatif. Dans ce cas, on définit donc S_p^2 comme correspondant à la deuxième combinaison d'états stabilisés la plus pénalisante. De même, la formulation est adaptée si l'une des situations n'a pas de transitoire thermique.
- 2) Il y aurait d'autres manières de définir les deux transitoires fictifs, mais la méthode présentée ici semble la plus générale et reste toujours conservative. Ainsi, dans le cas où la combinaison la plus pénalisante des contraintes thermiques correspond aux deux extrema de la même situation, alors le S_p calculé correspond directement à la définition du RCC-M. De même dans le cas où le chargement mécanique est négligeable. Le niveau de conservatisme de la présente formulation augmente avec le poids du chargement mécanique par rapport au chargement thermique.

4.4.1.2 Calcul de $S_n(p, q)$

L'amplitude S_n associée à la combinaison de situations (p, q) est calculée comme le paramètre S_p^1 ci-dessus, soit :

$$S_n(p, q) = \max \left(S_n(p, p), S_n(q, q), \max_{i_p, j_q} S_n(i_p, j_q) \right)$$

4.4.1.3 Calcul de $S_p^{méca}(p, q)$ et $S_p^{ther}(p, q)$

Dans le cas où on utilise la méthode KE_MIXTE, il faut décomposer l'amplitude de variation des contraintes en une partie mécanique et une partie thermique. Pour la définition de $S_p^{méca}$ (resp. de S_p^{ther}), le RCC-M (§B3234.6) laisse la liberté entre (cf. §4.1.4.2) :

- prendre la part mécanique (resp. thermique) de l'amplitude des contraintes maximales entre les deux transitoires ;
- prendre la valeur maximale de l'amplitude des contraintes mécaniques (resp. thermiques) au cours de ces transitoires.

C'est cette dernière méthode, plus conservative mais plus simple à mettre en œuvre, qui a été retenue. Pour la part mécanique, on a six combinaisons d'états stabilisés possibles :

$$\|\sigma_{i_p} - \sigma_{j_q}\| \text{ pour } (i_p, j_q) \in \{1, 2\} ; \|\sigma_{2_p} - \sigma_{1_p}\| ; \|\sigma_{2_q} - \sigma_{1_q}\|.$$

Le transitoire mécanique fictif 1, caractérisé par $S_p^{1méca}$, correspond à la combinaison la plus pénalisante. Si cette combinaison fait intervenir deux états stabilisés d'une même situation, alors le transitoire mécanique fictif 2 correspond à la combinaison des deux états stabilisés de l'autre situation ; sinon le $S_p^{2méca}$ correspond à la deuxième combinaison la plus pénalisante.

Les transitoires fictifs thermiques S_p^{1ther} et S_p^{2ther} sont définis de la même manière, en combinant les instants correspondants aux extrema des transitoires thermiques.

4.4.1.4 Calcul de $S'_{alt}(p, q)$

Le calcul de $S'_{alt}(p, q)$ est effectué, pour chaque couple de situations à partir de l'amplitude de variation des contraintes des deux transitoires fictifs $S_p^1(p, q)$ et $S_p^2(p, q)$, et de l'amplitude de variation des contraintes linéarisées $S_n(p, q)$.

Cas KE_MECA :

$$S'_{alt}(p, q) = \frac{1}{2} \cdot \frac{E_c}{E} \cdot K_e(S_n(p, q)) \cdot S_p^1(p, q)$$

$$S'_{alt}(p, q) = \frac{1}{2} \cdot \frac{E_c}{E} \cdot K_e(S_n(p, q)) \cdot S_p^2(p, q)$$

Le module d'Young de référence (E_c) est fourni par l'utilisateur dans `DEFI_MATERIAU`, sous le mot clé `E_REFE`, du mot clé facteur `FATIGUE`. Les paramètres m et n sont fournis dans `DEFI_MATERIAU`, sous les mots clés `M_KE` et `N_KE`, du mot clé facteur `RCCM`. Si les mots clés `TEMP_REF_A` et `TEMP_REF_B` sont présents, S_n est interpolée pour cette température (qui doit correspondre à la température moyenne du transitoire). Sinon, S_n est prise à température ambiante.

Cas **KE_MIXTE** :

$$S'_{alt}(p, q) = \frac{1}{2} \cdot \frac{E_c}{E} \cdot \left(K_e^{meca}(S_n(p, q)) \cdot S_p^{1meca}(p, q) + K_e^{ther}(S_n(p, q)) \cdot S_p^{1ther}(p, q) \right)$$

$$S'_{alt}(p, q) = \frac{1}{2} \cdot \frac{E_c}{E} \cdot \left(K_e^{meca}(S_n(p, q)) \cdot S_p^{2meca}(p, q) + K_e^{ther}(S_n(p, q)) \cdot S_p^{2ther}(p, q) \right)$$

On calcule enfin $FU(p, q)$ le facteur d'usage élémentaire associé à la combinaison des situations p et q , défini à partir de la courbe de fatigue du matériau $N_{adm} = f(S_{alt})$:

$$FU(p, q) = f(S'_{alt}(p, q)) + f(S'_{alt}(p, q))$$

4.4.2 Prise en compte du séisme

La deuxième phase consiste à calculer les amplitudes de contraintes qui correspondent aux combinaisons de tous les états stabilisés appartenant aux situations d'un groupe donné, en prenant en compte les chargements sismiques.

Les chargements sismiques ne sont pas signés. Chaque composante du tenseur des contraintes ($M_X^S, M_Y^S, \dots$) peut donc prendre deux valeurs (positive et négative). Lors de la superposition d'un chargement non signé avec un chargement signé, le RCC-M impose de retenir sur chaque composante un signe tel que la contrainte calculée (en fait S'_{alt}) soit majorée. Le tenseur des contraintes comptant six composantes, il existe donc 64 combinaisons de signes à examiner.

Les paramètres $S_p^1(p, q, S)$, $S_p^2(p, q, S)$, $S_n(p, q, S)$ et $S'_{alt}(p, q, S)$ avec séisme sont calculés de la même manière que sans séisme, mais en maximisant l'amplitude des contraintes par rapport au signe de chacune des composantes du tenseur des contraintes. Par exemple :

$$S_p(p, p, S) = \max \left(\left| \pm (\sigma_1 - \sigma_2)_p \right| + \sigma_{ther, p}(t_p^{\max}) - \sigma_{ther, p}(t_p^{\min}) + 2 \sum \pm M_X^S \sigma_{M_x} \pm M_Y^S \sigma_{M_y} \dots \right)$$

La maximisation portant ici sur la combinaison des signes des composantes du tenseur des contraintes de la situation de séisme. σ_{M_x} désigne le tenseur des contraintes associé à un chargement unitaire selon M_x . On note $FU(p, q, S)$ le facteur d'usage élémentaire associé à la combinaison des situations p et q . On calcule également le facteur d'usage associé aux sous-cycles de séisme $FU(S)$, caractérisé par $S_p(S)$:

$$S_p(S) = \max \left(\left| 2 \sum \pm M_X^S \sigma_{M_x} \pm M_Y^S \sigma_{M_y} \dots \right| \right)$$

Remarque :

Le facteur 2 sur la composante sismique de l'expression précédente apparaît, car la quantité calculée ici est une amplitude.

4.4.3 Situations de passage entre groupes de situations

Pour chaque situation de passage d'un groupe à un autre, on considère l'ensemble des combinaisons (p, q) avec p appartenant au premier groupe (de dimension N) et q appartenant au deuxième groupe (de dimension M). Pour chaque combinaison, $FU(p, q)$ est obtenu de la même façon que précédemment. On construit encore une matrice (rectangulaire) contenant tous les $FU(p, q)$, à laquelle on associe le nombre d'occurrences de la situation de passage.

En effet, deux situations ne sont combinables que si elles appartiennent au même groupe ou bien s'il existe une situation de passage entre les groupes auxquels elles appartiennent. Dans ce dernier cas, on associera à la combinaison (p, q) le nombre d'occurrences de la situation de passage. Dans le cas où la situation de passage appartient à l'un des deux groupes (ce qui n'est pas exclu a priori), elle est naturellement combinée aux autres situations de ce groupe, puis sert à la combinaison des situations de son groupe avec les situations du groupe en relation.

4.4.4 Stockage

Pour effectuer le calcul du facteur d'usage total, les facteurs d'usage élémentaires calculés précédemment et les nombres d'occurrences associés sont stockées dans une matrice carrée contenant tous les facteurs d'usage élémentaires FU hors séisme, pour toutes les combinaisons de situations possibles (à l'intérieur de chaque groupe de situations, et entre deux groupes s'il existe une situation de passage). La matrice a pour dimension la somme du nombre de situations de tous les groupes :

FU		Groupe 1				Groupe 2				Groupe 3			
		Situ 1	...	Situ j	...	...	...	Situ 1	...	...	..	Situ n	Situ N
Groupe 1	Situ 1	FU	...	...	...	0	0	0	0	...	...	...	...
	Situ i			FU(i, j)	...	0	0	0	0	...	...	FU(i, n)	...
	...				...	0	0	0	0	...	...	...	...
	...				...	0	0	0	0	...	...	...	...
Groupe 2	...				...	...	...	...	...	0	0	0	0
	Situ k					...	...	FU(k, 1)	...	0	0	0	0
	...							...	...	0	0	0	0
	...			SYM				...	...	0	0	0	0
Groupe 3	...								...	...	...	...	...
	Situ m									...	...	FU(m, n)	...
	...											...	...
	Situ N												...

Dans le tableau ci-dessus, on associe la valeur 0 aux combinaisons d'états entre les groupes 1 et 2 et les groupes 1 et 3, parce qu'il n'existe pas de situation de passage entre ces groupes. Par contre il en existe une entre les groupes 1 et 3, on associe donc à chaque combinaison d'états des groupes 1 et 3 la valeur de FU .

Le numéro des états de chargement devra être construit à partir du numéro de situation (unique) et du numéro relatif (1 ou 2) de l'état stabilisé de la situation, pour obtenir une numérotation univoque des états de chargement.

Dans le cas des sous-cycles, seul le terme diagonal est rempli.

Cette matrice est aussi à construire pour les valeurs de $FU(i, j, S)$ qui prennent en compte de séisme. Il y a donc deux matrices donnant toutes les valeurs possibles de FU .

En correspondance de cette matrice, on peut associer un tableau donnant le nombre d'occurrences, le numéro de situation et le numéro de groupe de chaque état stabilisé, et un tableau donnant le nombre d'occurrences des situations de passage :

Situati on	groupe	Sous- cycle	nocc
1	1	0	N1
2	1	0	Ni
3	2	0	Nk
...	...	...	...
...	3	nsous	0
...	...	...	...
N	3	0	N

groupe 1	groupe 2	Npass
1	1	0
1	2	0
1	3	npass
2	1	0
2	2	0
2	3	0
...	...	...

4.4.5 Calcul du facteur d'usage total

A l'issue des étapes précédentes, on dispose donc de :

- la matrice $[N, N]$ des facteurs d'usage $FU(p, q, S)$ prenant en compte le chargement sismique ;
- la matrice $[N, N]$ des facteurs d'usage $FU(p, q)$ sans séisme.

On note :

- n_p le nombre de cycles associé à la situation p
- n_q le nombre de cycles associé à la situation q
- N_s le nombre d'occurrences du séisme (en général seul le SNA est considéré en seconde catégorie)
- n_s nombre de sous-cycles associés à chaque séisme.
- n_{pass} nombre de cycles associés à une éventuelle situation de passage entre p et q si ces situations n'appartiennent pas à un même groupe, mais si il existe une situation de passage entre les deux.

Si $N_s > 0$, on sélectionne les $N_s/2$ combinaisons les plus pénalisantes, c'est-à-dire les $N_s/2$ combinaisons (k, l) menant aux plus grandes valeurs de $FU(k, l)$, sans prendre en compte le séisme.

Pour chacune de ces $N_s/2$ combinaisons :

- On calcule le facteur d'usage $u_1(k, l)$ associé à $S'_{alt}(k, l, T, S)$: $u_1(k, l) = FU(k, l, S)$
- On prend en compte les n_s sous-cycles du séisme par :
 $u_2(k, l) = (2 \cdot n_s - 1) * FU(S)$
- On obtient alors : $u(k, l) = u_1(k, l) + u_2(k, l)$
- On recommence ce calcul jusqu'à épuisement des $N_s/2$ combinaisons les plus pénalisantes.

Le calcul du facteur d'usage est ensuite poursuivi sans prendre en compte le séisme :

Si $N_s = 0$, ou après avoir pris en compte le séisme pour les $N_s/2$ combinaisons les plus défavorables :

- On sélectionne la combinaison (p, q) conduisant à la valeur maximum de $FU(p, q)$, sur l'ensemble des combinaisons telle que le nombre d'occurrences n_0 soit non nul, en notant
 $n_0 = \min\{n_p, n_q, n_{pass}\}$ si n_{pass} est non nul, ou bien $n_0 = \min\{n_p, n_q\}$ sinon.
- On incrémente le facteur d'usage global : $U = U + n_0 * FU(p, q)$
- On remplace :
 n_p par $(n_p - n_0)$
 n_q par $(n_q - n_0)$
s'il s'agit d'une situation de passage, n_{pass} par $(n_{pass} - n_0)$

si $n_k = 0$, la colonne et la ligne k de la matrice des $S'_{alt}(i, j)$ sont mises à 0.
si $n_l = 0$, la colonne et la ligne l de la matrice des $S'_{alt}(i, j)$ sont mises à 0.

- La boucle est répétée jusqu'à épuisement complet du nombre de cycles.

Remarque :

L'annexe ZI du code RCC-M définit les courbes de Wöhler jusqu'à une amplitude de contrainte minimum correspondant à une durée de vie de 10^6 cycles. Si la valeur S'_{alt} calculée pour une combinaison (i, j) d'état stabilisé est inférieure à cette amplitude minimum, le facteur d'usage est égal à 0 pour la combinaison (i, j) considérée.

Cas des sous-cycles

Les sous-cycles correspondent soit à la prise en compte des sous-cycles liés au séisme, soit à des situations pour lesquels le mot clé COMBINABLE='NON' a été renseigné. Dans le deux cas, on calcule l'amplitude de contraintes en faisant intervenir uniquement les contraintes liées à ces sous-cycles (pas de combinaison d'états de chargement en dehors de cette situation). Pour le calcul de S'_{alt} , il faut utiliser le facteur K_e qui correspond à la situation principale dont est issu le sous-cycle.

5 Critères de niveau A pour les résultats de type 'EVOLUTION'

5.1 Définition des critères

Les critères de niveau A visent à prémunir le matériel contre les dommages de déformation progressive et de fissuration progressive. Pour les résultats de type 'EVOLUTION', quatre types de critères peuvent être vérifiés :

1. Amplitude de variation des contraintes linéarisées S_n (option 'SN') ;
2. Amplitude de variation de S_n^* (option 'SN') ;
3. Calcul du rochet thermique (option 'SN') ;
4. Calcul du facteur d'usage en fatigue (option 'FATIGUE_ZH210') ; (sans séisme)
5. Calcul du facteur d'amorçage pour les zones singulières (option 'AMORCAGE').

Ces différents paramètres et les critères associés sont définis ci-dessous.

5.1.1 Calcul de Sn

L'amplitude de variation des contraintes linéarisées S_n et le critère associé sont définis dans le §4.1.1.

5.1.2 Calcul de Sn*

L'amplitude de variation des contraintes linéarisées sans prendre en compte les contraintes de flexion et le critère associé sont définis dans le §4.1.2.

5.1.3 Calcul du rochet thermique

Les exigences relatives au rochet thermique sont définies dans le §4.1.3.

5.1.4 Calcul du facteur d'usage selon l'annexe ZH210

Les exigences relatives au calcul du facteur d'usage sont définies dans le §4.1.4.

La méthode choisie pour les résultats de type 'EVOLUTION' correspond à l'annexe ZH210 du RCC-M. Elle consiste à « oublier » la notion de situation et à combiner directement des *états de chargements*, qui sont les instants significatifs de tous les transitoires où les contraintes passent par un extremum local.

Le principal avantage de cette méthode est de considérer automatiquement tous les sous-cycles possibles : il n'est pas nécessaire d'identifier les transitoires fictifs combinant les situations entre elles. Son inconvénient est le nombre de calculs à effectuer si on ne restreint pas l'ensemble des instants utilisés dans le calcul.

5.1.5 Calcul du facteur d'amorçage

Les zones de discontinuités locales dont le contour présente des variations brusques sont le siège de concentrations de contraintes aiguës. Dans ce cas, la notion de facteur d'usage définie dans le chapitre précédent n'est plus adaptée et il faut la remplacer par la notion de facteur d'amorçage (B3234.7).

Le facteur d'amorçage est calculé à partir de l'amplitude de variation de la contrainte dans la structure à une distance d de la singularité, et d'une loi d'amorçage. La procédure d'analyse est définie dans l'annexe ZD2200. La distance d et les lois d'amorçage sont des caractéristiques matériau et sont tabulées dans le tableau ZD2300.

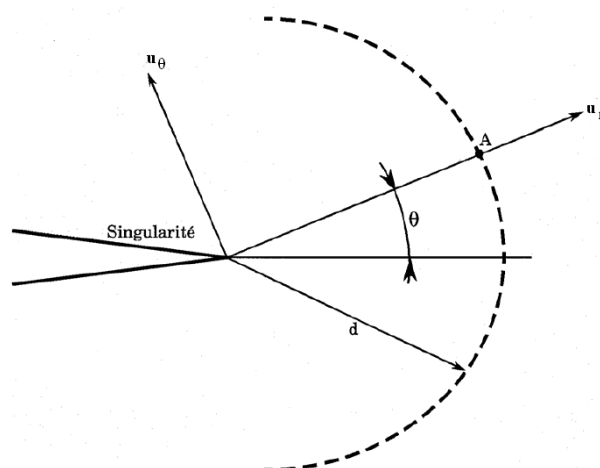


Figure 5.1.5-a : définition du repère local

La loi d'amorçage définie dans le RCC-M est de la forme :

$$\Delta \sigma_{\theta\theta}(d) = A_AMORC \cdot (N_a)^{B_AMORC}$$

avec N_a le nombre de cycles acceptables et $\Delta \sigma_{\theta\theta}$ l'amplitude de variation des contraintes tangentielles, dans le repère local, à la distance d de la singularité.

La loi d'amorçage développée dans l'opérateur POST_RCCM prend en compte le rapport de charge R du chargement, comme préconisé dans le RSE-M (ref 7) :

$$\Delta \sigma_{eff}(d) = A_AMORC \cdot (N_a)^{B_AMORC}$$

avec la relation suivante entre amplitude de variation des contraintes réelle $\Delta \sigma_{\theta\theta}$ et efficace $\Delta \sigma_{eff}$:

$$\Delta \sigma_{eff} = \frac{\Delta \sigma_{\theta\theta}}{1 - \frac{R}{R_AMORC}}.$$

Les paramètres de la loi d'amorçage (A_AMORC , B_AMORC , R_AMORC) et la distance à la singularité D_AMORC sont à définir sous le mot clé facteur RCCM de DEFI_MATERIAU.

Remarque :

Pour utiliser une loi d'amorçage telle que définie dans le RCC-M, soit sans prise en compte du rapport de charge, il suffit de définir un R_AMORC grand (1000 par exemple).

5.2 Calculs effectués avec l'option 'SN'

5.2.1 Calcul de Sn

On note nb_inst le nombre d'instants sélectionnés dans le transitoire considéré.

L'algorithme de calcul de S_n est le suivant :

- sur l'ensemble des numéros d'ordre, $n_1 = 1, nb_inst$
 - Extraction de l'instant t_1

- Calcul de $\sigma_{ij}^{lin}(t_1, s=0)$ et $\sigma_{ij}^{lin}(t_1, s=l)$
- Pour n_2 variant de n_1+1 à nb_inst
 - Extraction de l'instant t_2
 - calcul de $\sigma_{ij}^{lin}(t_2, s=0)$ et $\sigma_{ij}^{lin}(t_2, s=l)$ et de $\sigma_{ij}^{lin}(t_2, s=0) - \sigma_{ij}^{lin}(t_1, s=0)$ et $\sigma_{ij}^{lin}(t_2, s=l) - \sigma_{ij}^{lin}(t_1, s=l)$
 - calcul des directions principales et du critère de Tresca :
 $\left(\sigma_{ij}^{lin}(t_2, s=0) - \sigma_{ij}^{lin}(t_1, s=0)\right)_{Eq. Tresca}$ et $\left(\sigma_{ij}^{lin}(t_2, s=l) - \sigma_{ij}^{lin}(t_1, s=l)\right)_{Eq. Tresca}$
 - recherche du maximum donc de S_n à chaque extrémité
- Sortie et stockage dans la table du résultat.

Remarque :

La quantité S_n calculée ici correspond à une amplitude. Il est donc indispensable que tous les états du système soient considérés, y compris les états à contrainte nulle (par exemple arrêt à froid : pression et moments appliqués nuls et température ambiante).

5.2.2 Calcul de S_n^*

Ce calcul est effectué si l'opérande `TABL_SIGM_THER` est présent. Seul l'utilisateur assure la cohérence des données, c'est-à-dire que ce résultat doit être produit par un calcul thermo-mécanique sous chargement thermique seul, sachant que le résultat donné par `TABL_RESU_MECA` peut être dû à une combinaison de ce chargement thermique avec d'autres chargements. Il faut donc en particulier que les instants des tables `TABL_RESU_MECA` et `TABL_SIGM_THER` correspondent.

L'algorithme est identique au précédent mais porte sur deux champs de contraintes.

5.2.3 Calcul du rochet thermique

Le calcul est effectué si les opérands `TABL_SIGM_THER` et `TABL_RESU_PRES` sont présents. Il faut également avoir préalablement défini la limite conventionnelle d'élasticité pour la température maximale atteinte au cours du cycle soit par l'opérande `SY_MAX` de `POST_RCCM` ; soit par l'opérande `SY_02` du mot-clé `RCCM` dans `DEFI_MATERIAU` [U4.43.01]. Si aucune limite d'élasticité n'est définie, le calcul du rochet thermique est impossible.

Dans le tableau résultat apparaissent, pour chaque extrémité de chaque segment d'analyse, la limite d'élasticité `SY`, l'amplitude de variation de la contrainte d'origine thermique `SP_THER`, le maximum de la contrainte de membrane générale due à la pression `SIGM_M_PRES` et deux valeurs maximales admissibles de l'amplitude de variation de la contrainte thermique calculées soit en supposant une variation de température linéaire dans la paroi (`VALE_MAXI_LINE`), soit en supposant une variation de température parabolique dans la paroi (`VALE_MAXI_PARAB`).

5.3 Calculs à la fatigue avec l'option 'FATIGUE_ZH210'

Le principe de la méthode ZH210 est de définir, pour chaque transitoire, un ensemble "d'états de chargement", qui sont les instants significatifs où les contraintes passent par un extremum local. Par défaut, dans *Code_Aster*, tous les instants de calcul sont utilisés. On associe à chacun d'eux le nombre d'occurrences *Nocc* du transitoire. La définition est donc :

Etat de chargement = {instant, tenseur de contraintes, nombre d'occurrences}.

Ensuite, on construit l'ensemble de tous les états de chargement en balayant tous les transitoires. Au bout du compte, la notion de transitoire est oubliée : on ne travaille plus que sur un ensemble d'états de chargement. On calcule alors les facteurs d'usage élémentaires associés à toutes les

combinaisons prises deux à deux. On utilise ensuite une méthode de cumul des facteurs d'usage élémentaires, basée sur l'hypothèse du cumul linéaire du dommage, pour obtenir le facteur d'usage global.

Remarque :

L'algorithme décrit ici est similaire à celui de `POST_FATIGUE`. Plus précisément, l'algorithme utilisé dans `POST_FATIGUE` est une restriction au cas uniaxial de la méthode ZH210. En effet, la donnée de la commande `POST-FATIGUE` est une fonction scalaire du temps, alors que `POST_RCCM` traite des tenseurs de contraintes fonctions du temps.

5.3.1 Calcul des facteurs d'usage élémentaires

A chaque extrémité du segment, pour tout couple d'états de chargement k et l , on calcule les quantités $S_p(k, l)$ et $S_n(k, l)$ définies par :

$$S_p(k, l) = \left(\left(\sigma_{ij}(k) - \sigma_{ij}(l) \right)_{Eq. Tresca} \right) \quad S_n(k, l) = \left(\left(\sigma_{ij}^{lin}(k) - \sigma_{ij}^{lin}(l) \right)_{Eq. Tresca} \right)$$

Pour le calcul de $S_{alt}(k, l)$, deux formules sont proposées (cf. §B3234.6) :

- la méthode originelle (`KE_MECA`) qui ne fait pas de distinction entre la part mécanique et la part thermique :

$$S_{alt}(k, l) = \frac{1}{2} E \left(S_n(k, l) \right) S_p(k, l)$$

où :

$$K_e(S_n) = \begin{cases} 1 & \text{si } S_n \leq 3 \cdot S_m \\ 1 + \frac{1-n}{n \cdot (m-1)} \cdot \left(\frac{S_n}{3 \cdot S_m} - 1 \right) & \text{si } 3 \cdot S_m < S_n < 3 \cdot m \cdot S_m \\ \frac{1}{n} & \text{si } S_n \geq 3 \cdot m \cdot S_m \end{cases}$$

- la méthode `KE_MIXTE` introduite dans le modificatif 1997 du RCC-M [1] qui est basée sur une décomposition de S_{alt} entre la part mécanique et la part thermique :

$$S_{alt}(k, l) = \frac{1}{2} \cdot \frac{E_c}{E} \cdot \left(K_e^{meca}(S_n(k, l)) \cdot S_p^{meca}(k, l) + K_e^{ther}(S_n(k, l)) \cdot S_p^{ther}(k, l) \right)$$

avec :

- $K_e^{meca}(S_n(k, l))$ est égal au K_e défini ci-dessus,

$$K_e^{ther}(S_n(k, l)) = \max \left(1, 1,86 \left(1 - \frac{1}{1,66 + \frac{S_n}{S_m}} \right) \right)$$

- $S_p^{meca}(k, l)$ représente la quantité S_p , amplitude de variation de la part mécanique des contraintes calculée sur la base des sollicitations d'origine mécanique : pression, poids propre, séisme (inertiel et déplacements d'ancrage), expansion thermique.

- $S_p^{ther}(k, l)$ représente la quantité S_p calculée à partir des contraintes mécaniques engendrées uniquement par les transitoires thermiques.

Le module d'Young de référence de la courbe de fatigue E_c correspond à l'opérande `E_REFE` du mot-clé facteur `FATIGUE` dans `DEFI_MATERIAU`. S_m , m et n paramètres matériau pouvant dépendre de la température, sont fournis par l'utilisateur dans `DEFI_MATERIAU`, sous les mots clés `SM`, `M_KE` et `N_KE`, du mot clé facteur `RCCM` (ou `RCCM_FO`).

La courbe de fatigue $N_{adm} = f(S_{alt})$ est une fonction définie par `DEFI_FONCTION`, et introduite dans `DEFI_MATERIAU` par le mot-clé `WOHLER` du mot-clé facteur `FATIGUE`. Elle permet de calculer le nombre de cycles admissible $N_{adm}(k, l)$ associé à $S_{alt}(k, l)$, puis le facteur d'usage élémentaire :

$$u(k, l) = \frac{1}{N_{adm}(k, l)}.$$

Ce calcul est effectué pour chaque combinaison de deux états de chargement. On obtient donc (toujours pour chaque extrémité du segment) une matrice symétrique $u(k, l)$, d'ordre le nombre d'états de chargement N_{tot} .

5.3.2 Calcul du facteur d'usage total

L'algorithme de calcul du facteur d'usage total, pour chacune des extrémités de la ligne de coupe, est le suivant :

- 1) $u^{tot} = 0$
- 2) $u^{max} = 0$
- 3) Boucle $i = 1 \dots N_{tot}$ (recherche du maximum dans le tableau)
 Si $Nocc(i) > 0$:
 Boucle $j = i + 1 \dots N_{tot}$
 Si $Nocc(j) > 0$ et $u(i, j) > u^{max}$:
 $u^{max} = u(i, j)$, $m = i$, $n = j$
- 4) $Nocc(m, n) = \min(Nocc(m), Nocc(n))$
- 5) $u^{tot} = u^{tot} + Nocc(m, n) * u(m, n)$
- 6) Réactualisation du nombre d'occurrences :
 $Nocc(m) = Nocc(m) - Nocc(m, n)$
 $Nocc(n) = Nocc(n) - Nocc(m, n)$
- 7) Retour au début de la procédure jusqu'à élimination de toutes les occurrences

Remarques :

• Si le nombre d'instants définis pour chaque transitoire est grand, le temps de calcul peut être prohibitif. Il faut donc pouvoir le restreindre. C'est ce qui est fait dans `POST_FATIGUE`, par un tri préliminaire des instants. On élimine les instants tels que la fonction scalaire soit linéaire pour ne garder que les extrémités des segments de droite. On élimine aussi les très petites variations. Ici, en situation multi-axiale, le tri est plus délicat. La notion de contraintes proportionnelles pourrait être utilisée, mais en pratique l'utilisateur peut définir lui-même la liste des instants (mot-clé `NUME_ORDRE`).

• Par cette méthode, on est sûr de n'oublier aucun sous-cycle. Par contre, il est souhaitable d'éliminer les instants qui ne correspondent pas à des extrema locaux, car ils pourraient générer des sous-cycles factices, augmentant le facteur d'usage (ces instants sont uniquement utilisés pour la discrétisation numérique du problème mécanique ou thermique).

• Avec l'option '`FATIGUE_ZH210`', les combinaisons de transitoires sont prises en compte dans le calcul de S_n et de S_n^* .

5.3.3 Exemple

Ce paragraphe vise à illustrer l'algorithme de calcul du facteur d'usage sur un exemple simple, tiré du cas test de validation élémentaire rccm01a [V1.01.107]. On suppose qu'il y a trois situations de deux pas de temps chacune, le nombre d'occurrences étant respectivement de 1, 5 et 10.

La matrice des facteurs d'usage telle que calculée par la première partie de l'algorithme est donnée ci-dessous. Pour alléger la présentation, sauf la partie supérieure de la matrice symétrique est écrite.

	<i>j</i>	1	2	3	4	5	6
<i>i</i>	Nocc	1	1	5	5	10	10
1	1	0	$1 \cdot 10^{-4}$	0	$3 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$
2	1		0	$1 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	0
3	5			0	$3 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$
4	5				0	$1 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$
5	10					0	$1 \cdot 10^{-4}$
6	10						0

Tableau 5.3.3-1 : Matrice initiale des facteurs d'usage

La combinaison la plus pénalisante est $\{i=1, j=4\}$, dont le nombre d'occurrences est 1 :

$$FA^{tot} = 0 + 1 \cdot 3 \cdot 10^{-4}$$

Les nombres d'occurrences sont mis à jour : $Nocc(1)=0$, $Nocc(4)=4$. La matrice des facteurs d'usage est mise à jour ; si la ligne i ou la colonne j a un nombre d'occurrences nul, elle est mise à zéro.

	<i>j</i>	1	2	3	4	5	6
<i>i</i>	Nocc	0	1	5	4	10	10
1	0						
2	1		0	$1 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	0
3	5			0	$3 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$
4	4				0	$1 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$
5	10					0	$1 \cdot 10^{-4}$
6	10						0

Tableau 5.3.3-2 : Matrice des facteurs d'usage – itération 1 du calcul

Le calcul se poursuit de la même manière : la combinaison la plus pénalisante est maintenant $\{i=3, j=4\}$, dont le nombre d'occurrences est 4 :

$$FA^{tot} = 1 \cdot 3 \cdot 10^{-4} + 4 \cdot 3 \cdot 10^{-4}$$

Les combinaisons pénalisantes sont ensuite successivement $\{i=3, j=5\}$ de nombre d'occurrences 1 ; $\{i=5, j=6\}$ de nombre d'occurrences 9.

Le facteur d'usage total est alors :

$$FA^{tot} = 1 \cdot 3 \cdot 10^{-4} + 4 \cdot 3 \cdot 10^{-4} + 1 \cdot 2 \cdot 10^{-4} + 9 \cdot 1 \cdot 10^{-4} = 2,6 \cdot 10^{-3}$$

5.4 Calculs du facteur d'amorçage avec l'option 'AMORCAGE'

Le calcul du facteur d'amorçage est réalisé avec l'option AMORCAGE, pour des résultats de type 'EVOLUTION' uniquement. La table attendue en entrée, sous le mot clé TABL_SIGM_THETA, correspond au relevé des contraintes sur une **ligne de coupe circulaire** (de rayon D_{AMORC}) autour de la singularité. Les contraintes doivent être exprimées dans le **repère local**.

Une telle table peut être créée à l'aide de la commande MACR_LIGN_COUPE. Comme dans le calcul en fatigue (cf. §5.3), on considère que tous les instants fournis correspondent à des extrema du transitoire. Par ailleurs, la notion de transitoire est oubliée et on ne travaille plus que sur un ensemble

d'états de chargement. On note $N_{occ}(i)$ le nombre d'occurrences associé à l'état de chargement i et N_{tot} le nombre total d'états de chargement.

L'algorithme de calcul est alors le suivant :

Boucle sur les points de la ligne de coupe

•Vérification que le point est à la distance d de la singularité

•Boucle $i = 1 \dots N_{tot}$

Extraction de $\sigma_{\theta\theta}(i)$

Boucle $j = i + 1 \dots N_{tot}$

Extraction de $\sigma_{\theta\theta}(j)$

Calcul de $\Delta\sigma_{\theta\theta}(i, j) = |\sigma_{\theta\theta}(j) - \sigma_{\theta\theta}(i)|$

Calcul de $R(i, j) = \frac{\min(\sigma_{\theta\theta}(i), \sigma_{\theta\theta}(j))}{\max(\sigma_{\theta\theta}(i), \sigma_{\theta\theta}(j))}$

Calcul de $\Delta\sigma_{eff}(i, j) = \frac{\Delta\sigma_{\theta\theta}(i, j)}{1 - R(i, j) / R_{AMORC}}$

Calcul du nombre de cycles admissibles et du facteur d'amorçage élémentaire

$$N_a(i, j) = \left(\frac{\Delta\sigma_{eff}(i, j)}{A_{AMORC}} \right)^{1/B_{AMORC}}$$

$$FA(i, j) = \frac{1}{N_a(i, j)}$$

A la fin de cette première partie, on a donc une matrice des facteurs d'amorçage de l'ensemble des combinaisons d'états de chargement. La taille de la matrice est $N_{tot} \times N_{tot}$ mais seule la partie au-dessus de la diagonale est renseignée.

L'algorithme de calcul du facteur d'amorçage total, pour un point donné sur la ligne de coupe, est ensuite le suivant :

1. $FA^{max} = 0$

2. $FA^{tot} = 0$

3. Boucle $i = 1 \dots N_{tot}$ (recherche du maximum dans le tableau)

Si $Nocc(i) > 0$:

Boucle $j = i + 1 \dots N_{tot}$

Si $Nocc(j) > 0$ et $FA(i, j) > FA^{max}$:

$$FA^{max} = FA(i, j), m = i, n = j$$

4. $Nocc(m, n) = \min(Nocc(m), Nocc(n))$

5. $FA^{tot} = FA^{tot} + Nocc(m, n) * FA(m, n)$

6. Réactualisation du nombre d'occurrences :

$$Nocc(m) = Nocc(m) - Nocc(m, n)$$

$$Nocc(n) = Nocc(n) - Nocc(m, n)$$

7. Retour au début de la procédure jusqu'à élimination de toutes les occurrences

A la fin de cet algorithme, on dispose ainsi du facteur d'amorçage pour chacun des points (i.e. pour chacun des angles) de la ligne de coupe.

6 Critères de fatigue pour l'analyse simplifiée des tuyauteries selon le RCC-M B3600

De même que pour le cas 'UNITAIRE' décrit précédemment, il est d'usage en B3600 de définir chaque situation comme le passage d'un état stabilisé A (correspondant à une pression interne donnée dans la ligne de tuyauterie, une température uniforme donnée, et des chargements mécaniques fixes) à un état stabilisé B (avec des chargements constants différents des précédents). On associe à cette situation un transitoire thermique. Des sollicitations d'origine thermique peuvent également être prises en compte dans le calcul.

Le traitement qui est décrit ici est effectué pour chaque nœud de chaque maille de la ligne de tuyauterie considérée. Le résultat obtenu sera donc un facteur d'usage (total ou partiel) pour chaque nœud de chaque maille demandée par l'utilisateur.

6.1 Calcul préalable de tous les états de chargement

Pour chaque nœud de chaque maille, la présente étape consiste à calculer, pour toutes les situations, les moments relatifs à chaque état stabilisé (en cumulant les différents chargements qui interviennent).

6.1.1 Calculs des états de chargement statiques

On traite les résultats des calculs statiques (champ EFGE_ELNO ou SIEF_ELNO) pour les états stabilisés de la liste des situations subies par la ligne.

Un état stabilisé peut être défini par une liste de cas de charge, chaque charge étant signée. Dans ce cas, les torseurs de l'état stabilisé sont obtenus par sommation algébrique des torseurs de chacun des cas de charge :

$$M_i = M_{i_{CHAR1}} + M_{i_{CHAR2}} + \dots \quad i \in \{x; y; z\}$$

Les chargements sont par exemple la dilatation thermique contrariée, le déplacement d'ancrage.

6.1.2 Calcul des chargements sismiques

Le chargement sismique se décompose en 2 parties :

- Une partie inertielle

Elle est calculée en imposant à l'ensemble des ancrages le même mouvement caractérisé par le spectre enveloppe des différents spectres de plancher, dans les directions horizontales X et Y d'une part, et verticale Z d'autre part (dans le repère global). Pour ce faire, on utilise la commande COMB_SISM_MODAL, qui produit des efforts généralisés qui correspondent à chaque direction de séisme ainsi que le cumul quadratique de ces efforts.

La contribution inertielle du séisme à la composante i du moment s'écrit :

$$M_{i_S_DYN} = \sqrt{\sum_j \left(M_{i_S_DYN}(\text{spectre}_j) \right)^2} \quad (i,j) \in \{x; y; z\}; \{X; Y; Z\}$$

avec $M_{i_S_DYN}(\text{spectre}_j)$ le moment dans la direction i résultant du chargement dynamique dans la direction j . Ce cumul est fait directement par COMB_SISM_MODAL.

- Une partie quasi-statique

Elle est estimée en imposant des déplacements différentiels statiques correspondant aux maxima des différences des mouvements sismiques des points d'ancrage au cours du temps. Les calculs sont donc réalisés

pour chaque chargement unitaire (un calcul par déplacement dans une direction donnée pour une extrémité de la ligne).

On note N_{ANC} le nombre de points d'ancrage de la structure. La contribution quasi-statique des déplacements d'ancrage différentiels à la composante i du moment s'écrit :

$$M_{i_S_ANC} = \sqrt{\sum_{k=1}^{N_{ANC}} (M_{i_S_ANC}^k)^2}$$

avec $M_{i_S_ANC}^k$ la $i^{ème}$ composante du moment correspondant au $k^{ème}$ déplacement d'ancrage.

Combinaison des composantes inertielles et différentielles dues au séisme :

La $i^{ème}$ composante résultante est obtenue par moyenne quadratique des $i^{ème}$ composantes inertielles et différentielles :

$$M_{i_S} = \sqrt{(M_{i_S_ANC})^2 + (M_{i_S_DYN})^2} \quad i \in \{x; y; z\}$$

ce qui revient en fait à effectuer le moyenne quadratique de tous les moments inertiels et différentiels,

$$M_{i_S} = \sqrt{\sum_{k=1, N_{ANC}} (M_{i_S_ANC}^k)^2 + (M_{i_S_DYN})^2} \quad i \in \{x; y; z\}$$

Pour l'utilisateur, la situation de séisme est définie par la liste des résultats correspondant à la réponse inertielle et aux réponses au déplacement des N_{ANC} points d'ancrage successifs. La recombinaison par moyenne quadratique est faite directement par l'opérateur `POST_RCCM`.

6.1.3 Calcul des transitoires thermiques

Les chargements de type "gradient thermique dans l'épaisseur" sont décomposés en trois parties, cf. Figure 6.1.3-a :

- une valeur constante qui est la valeur moyenne de la température :

$$T_{moy} = \frac{1}{t} \int_{-t/2}^{t/2} T(y) \cdot dy, \text{ où } t \text{ correspond à l'épaisseur nominale de la paroi.}$$

- une distribution linéaire de moyenne nulle (moment d'ordre 1) :

$$V = \frac{12}{t^2} \int_{-t/2}^{t/2} y \cdot T(y) \cdot dy$$

- une distribution non linéaire de moyenne nulle et de moment nul par rapport à la fibre moyenne.

Pour chacun des transitoires et chaque section de tuyauterie de la ligne (et chaque jonction), on réalise donc au préalable, selon la complexité géométrique du problème étudié un calcul thermique 2D ou 3D.

Chaque calcul est ensuite dépouillé de façon à extraire, pour chaque instant du transitoire, la température sur la section choisie et les valeurs moyennes (moments d'ordre 0 et 1). Cette opération peut être faite par exemple à l'aide de deux appels à `POST_RELEVE_T` (`OPERATION = 'EXTRACTION'` et `OPERATION = 'MOYENNE'`).

Dans le cas d'une discontinuité de matériau ou d'une jonction, on calcule la température moyenne (notée T_a et T_b) sur les deux côtés de la jonction. En pratique, les zones a et b correspondront à des segments choisis par l'utilisateur dans `POST_RELEVE_T`, et les tables produites seront associées aux deux mailles adjacentes ayant en commun le nœud qui correspond à la jonction.

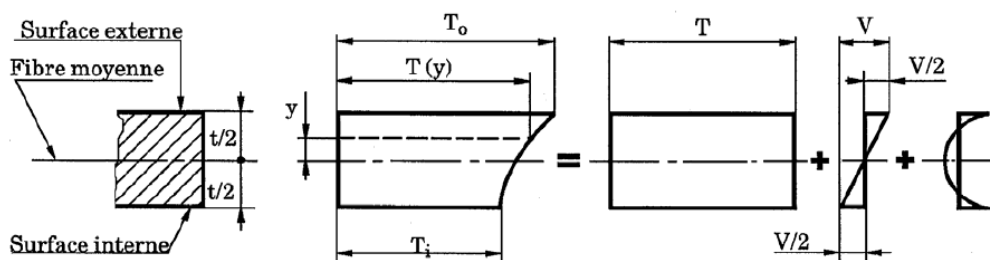


Figure 6.1.3-a : Décomposition de la distribution de température dans l'épaisseur de la paroi (figure extraite du RCC-M, §B3653.4)

6.2 Calculs des amplitudes de variation des contraintes

6.2.1 Principe de la méthode

Les amplitudes de variation des contraintes sont définies dans le paragraphe B3653 du RCC-M pour des combinaisons entre deux instants ou deux états de chargements. En notant t_i et t_j ces deux instants, on a de manière schématique pour l'amplitude de variation d'une quantité S :

$$S(t_i, t_j) = S^{\text{mécanique}}(t_i) - S^{\text{mécanique}}(t_j) + S^{\text{thermique}}(t_i) - S^{\text{thermique}}(t_j)$$

Dans la méthode telle que développée dans *Code_Aster*, les situations sont définies de manière simplifiée par deux états stabilisés et un transitoire thermique : il n'est alors pas possible de travailler directement sur chacun des instants des situations et des hypothèses doivent être introduites.

On considère donc l'ensemble des combinaisons (i, j) avec $(i, j) \in (1, 2, \dots, N, 1, 2, \dots, N)$, N étant le nombre d'états stabilisés hors séisme (c'est-à-dire 2 fois le nombre de situations du groupe). Soient deux états stabilisés, i et j , appartenant respectivement aux situations p et q . L'amplitude de variation S sera alors calculée de la manière suivante :

$$S(i, j) = S^{\text{mécanique}}(i) - S^{\text{mécanique}}(j) + \max(\Delta S^{\text{thermique}}(p), \Delta S^{\text{thermique}}(q))$$

en notant $\Delta S^{\text{thermique}}(p)$ l'amplitude de variation de la contrainte thermique du transitoire p .

Remarques :

- [1] *Il est important de noter que l'amplitude de variation des contraintes se fait en maximisant l'amplitude des contraintes thermiques pour chaque transitoire thermique indépendamment l'un de l'autre. La méthode de calcul pour le cas 'TUYAUTERIE' est donc différente de celle adoptée pour le cas 'UNITAIRE'.*
- [2] *Comme indiqué dans le paragraphe B3653.2, tous les états du système doivent être considérés, y compris les états à contrainte nulle (par exemple arrêt à froid : pression et moments appliqués nuls et température ambiante).*

6.2.2 Calcul des combinaisons de chargement (i,j) à l'intérieur de chaque groupe de situations

L'objectif est de construire, pour chaque groupe de situation, une matrice carrée symétrique contenant l'ensemble des amplitudes de variation de la contrainte alternée $S'_{alt}(i, j)$, avec i et j deux états stabilisés associés respectivement aux situations p et q . Ce calcul nécessite le calcul préalable des quantités S_p (amplitude de la contrainte totale) et S_n (amplitude de la contrainte linéarisée).

6.2.2.1 Notations et définitions

On note :

$C_1, C_2,$ = Indices de contraintes fournis au §B3680 du RCC-M

$C_3,$

$K_1, K_2,$

K_3

E = Module d'élasticité de la tuyauterie à température ambiante

ν = Coefficient de Poisson

α = Coefficient de dilatation de la tuyauterie à température ambiante

E_{ab} = Module d'élasticité moyen entre les deux zones séparées par une discontinuité à la température ambiante

D_0 = Diamètre extérieur de la tuyauterie

t = Epaisseur nominale de la paroi

I = Moment d'inertie de la tuyauterie : $I = \frac{\pi}{64} (D_0^2 - (D_0^2 - 2t)^2)$

$M_i(i, j)$ = Variation de moment résultant des différents chargements des situations auxquelles appartiennent les états stabilisés i et j :

$$M_i(i, j) = \sqrt{(M_X(i) - M_X(j))^2 + (M_Y(i) - M_Y(j))^2 + (M_Z(i) - M_Z(j))^2}$$

$P_0(i, j)$ = Différence de pression entre les états i et j

$T_a(t_k, t_l),$ = Amplitude de variation des températures moyennes dans les zones a et b entre les instants t_k et t_l

$T_b(t_k, t_l)$

$T_o(t_k, t_l),$ = Amplitude de variation des températures au niveau de la paroi externe / interne entre les instants t_k et t_l

$T_i(t_k, t_l)$

$\Delta T_1(t_k, t_l)$ = Amplitude de la variation entre les deux instants de la différence de température entre les parois interne et externe, pour une distribution linéaire équivalente de la température :

$$\Delta T_1(t_k, t_l) = \frac{12}{t^2} \int_{-t/2}^{t/2} y \cdot T(t_k, t_l)(y) \cdot dy = V(t_k) - V(t_l)$$

$\Delta T_2(t_k, t_l)$ = Partie non linéaire de la distribution dans l'épaisseur de paroi de l'amplitude de variation de la température entre les instants t_k et t_l :

$$\Delta T_2(t_k, t_l) = \max \begin{cases} |T_o(t_k, t_l) - T_{moy}(t_k, t_l)| - |1/2 \Delta T_1(t_k, t_l)| \\ |T_i(t_k, t_l) - T_{moy}(t_k, t_l)| - |1/2 \Delta T_1(t_k, t_l)| \\ 0 \end{cases}$$

6.2.2.2 Calcul de $S_p(i, j)$

L'amplitude de variation des contraintes totales S_p pour les tuyauteries est définie dans l'équation 11 du §B3653 du RCC-M. On calcule :

$$S_p(i, j, t_p) = K_1 \cdot C_1 \cdot \frac{|P_0(i, j)| \cdot D_0}{2 \cdot t} + K_2 \cdot C_2 \cdot \frac{D_0}{2 \cdot I} \cdot M_i(i, j) + \frac{1}{2 \cdot (1 - \nu)} \cdot K_3 \cdot E \cdot \alpha \cdot |\Delta T_1(t_k^p, t_l^p)| \\ + K_3 \cdot C_3 \cdot E_{ab} \cdot |\alpha_a \cdot T_a(t_k^p, t_l^p) - \alpha_b \cdot T_b(t_k^p, t_l^p)| + \frac{1}{1 - \nu} \cdot E \cdot \alpha \cdot |\Delta T_2(t_k^p, t_l^p)|$$

(t_k^p, t_l^p) désignent deux instants quelconques du transitoire associé à la situation p . En cas de discontinuité de matière ou d'une jonction, les termes ΔT_1 et ΔT_2 à retenir sont ceux associés à la section la plus pénalisante.

On calcule de même $S_p(i, j, t_q)$ avec le transitoire thermique associé à la situation q . L'amplitude S_p pour la combinaison (i, j) est alors :

$$S_p(i, j) = \max \left\{ \max_{(t_k^q, t_l^q)} (S_p(i, j, t_p)), \max_{(t_k^q, t_l^q)} (S_p(i, j, t_q)) \right\}$$

6.2.2.3 Calcul de $S_n(p, q)$

L'amplitude de variation des contraintes linéarisées S_n pour les tuyauteries est définie dans l'équation 10 du §B3653 du RCC-M. On calcule :

$$S_n(i, j, t_p) = C_1 \cdot \frac{|P_0(i, j)| \cdot D_0}{2 \cdot t} + C_2 \cdot \frac{D_0}{2 \cdot I} \cdot M_i(i, j) + \frac{1}{2 \cdot (1 - \nu)} \cdot E \cdot \alpha \cdot |\Delta T_1(t_k^p, t_l^p)| \\ + C_3 \cdot E_{ab} \cdot |\alpha_a \cdot T_a(t_k^p, t_l^p) - \alpha_b \cdot T_b(t_k^p, t_l^p)| \\ S_n(i, j, t_q) = C_1 \cdot \frac{|P_0(i, j)| \cdot D_0}{2 \cdot t} + C_2 \cdot \frac{D_0}{2 \cdot I} \cdot M_i(i, j) + \frac{1}{2 \cdot (1 - \nu)} \cdot E \cdot \alpha \cdot |\Delta T_1(t_k^q, t_l^q)| \\ + C_3 \cdot E_{ab} \cdot |\alpha_a \cdot T_a(t_k^q, t_l^q) - \alpha_b \cdot T_b(t_k^q, t_l^q)| \\ S_n(i, j) = \max \left\{ \max_{(t_k^q, t_l^q)} (S_n(i, j, t_p)), \max_{(t_k^q, t_l^q)} (S_n(i, j, t_q)) \right\}$$

On calcule alors $S_n(p, q) = \max_{i, j} S_n(i, j)$, pour i et j balayant l'ensemble des états stabilisés des deux situations p et q (4 combinaisons possibles).

6.2.2.4 Calcul de $S'_{alt}(i, j)$

Deux formules sont proposées pour définir l'amplitude de variation $S'_{alt}(i, j)$ entre les états i et j :

- KE_MECA : c'est la méthode originelle, seule disponible dans les versions antérieures à la version 7.2 :

$$S'_{alt}(i, j) = \frac{1}{2} \cdot \frac{E_c}{E} \cdot K_e(S_n(p, q)) \cdot S_p(i, j)$$

avec :

- E_c : Module d'Young de référence pour la construction de la courbe de Wöhler, fourni par l'utilisateur dans DEFI_MATERIAU, sous le mot clé E_REFE, du mot clé facteur FATIGUE.

- E : Plus petit des modules d'Young utilisés pour le calcul des états i et j , c'est-à-dire évalués aux températures de ces états stabilisés.

$$K_e(S_n(p, q)) = \begin{cases} 1 & \text{si } S_n(p, q) \leq 3 \cdot S_m \\ 1 + \frac{1-n}{n \cdot (m-1)} \cdot \left(\frac{S_n(p, q)}{3 \cdot S_m} - 1 \right) & \text{si } 3 \cdot S_m < S_n(p, q) < 3 \cdot m \cdot S_m \\ \frac{1}{n} & \text{si } S_n(p, q) \geq 3 \cdot m \cdot S_m \end{cases}$$

avec m et n dépendant du matériau, et fournis par l'utilisateur dans `DEFI_MATERIAU`, sous les mots clés `M_KE` et `N_KE`, du mot clé facteur `RCCM`. Si les mots clés `TEMP_REF_A` et `TEMP_REF_B` sont présents, S_n est interpolée pour cette température (qui doit correspondre à la température moyenne du transitoire). Sinon, S_n est prise à température ambiante.

- `KE_MIXTE` : depuis le modificatif 1997 du RCC-M, on peut choisir une autre formule, basée sur une décomposition de S_{alt} :

$$S'_{alt}(i, j) = \frac{1}{2} \cdot \frac{E_c}{E} \cdot \left(K_e^{meca}(S_n(p, q)) \cdot S_p^{meca}(i, j) + K_e^{ther}(S_n(p, q)) \cdot S_p^{ther}(i, j) \right)$$

avec :

- $K_e^{meca}(S_n(p, q))$ est égal au K_e défini ci-dessus

$$- K_e^{ther}(S_n(p, q)) = \max \left| \begin{array}{c} 1,86 \left(1 - \frac{1}{1,66 + \frac{S_n}{S_m}} \right) \\ 1 \end{array} \right|$$

- $S_p^{meca}(i, j)$ représente l'amplitude de variation de la part mécanique de la quantité S_p , entre les états i et j . Elle est calculée sur la base des sollicitations d'origine mécanique : pression, poids propre, séisme (inertiel et déplacements d'ancrage), expansion thermique.

- $S_p^{ther}(i, j)$ l'amplitude de variation de la part thermique de la quantité S_p , entre les états i et j (termes dépendants de T_a , T_b , ΔT_1 et ΔT_2 dans la définition du §6.2.2.2).

6.2.2.5 Cas des sous-cycles

Les sous-cycles correspondent soit à la prise en compte des sous-cycles liés au séisme, soit à des situations pour lesquels le mot clé `COMBINABLE='NON'` a été renseigné. Dans le deux cas, on calcule l'amplitude de contraintes en faisant intervenir uniquement les contraintes liées à ces sous-cycles (pas de combinaison d'états de chargement en dehors de cette situation). Pour le calcul de S'_{alt} , il faut utiliser le facteur K_e qui correspond à la situation principale dont est issu le sous-cycle.

6.2.3 Calcul des combinaisons de chargement (i,j) pour les situations de passage entre groupe de situations

Deux états de chargement ne sont combinables que s'ils appartiennent à la même situation ou bien s'il existe une situation de passage entre les groupes auxquels ils appartiennent. Dans ce dernier cas, on associera à la combinaison (i, j) le nombre d'occurrences de la situation de passage. Dans le cas où la situation de passage appartient à l'un des deux groupes (ce qui n'est pas exclu a priori), elle est naturellement combinée aux autres situations de ce groupe, puis sert à la combinaison des situations de son groupe avec les situations du groupe en relation.

Pour chaque situation de passage d'un groupe à un autre, on considère donc l'ensemble des combinaisons (i, j) avec i appartenant au premier groupe (de dimension N) et j appartenant au deuxième groupe (de dimension M). Pour chaque combinaison, $S'_{alt}(i, j)$ est obtenu de la même façon que précédemment et on lui associe le nombre d'occurrences de la situation de passage. On construit une matrice (rectangulaire) contenant tous les $S'_{alt}(i, j)$.

6.3 Calcul du facteur d'usage

On note :

- n_k : nombre de cycles associé à la situation p à laquelle appartient l'état stabilisé k ;
- n_l : nombre de cycles associé à la situation q à laquelle appartient l'état stabilisé l ;
- N_s : nombre d'occurrences du séisme ;
- n_s : nombre de sous-cycles associés à chaque occurrence du séisme ;
- n_{pass} : nombre de cycles associés à une éventuelle situation de passage entre p et q si ces situations n'appartiennent pas à un même groupe, mais si il existe une situation de passage entre les deux.

Pour l'ensemble des combinaisons d'états de chargement (à l'intérieur d'un groupe de situations ou associée à une situation de passage) :

Si $N_s > 0$, on sélectionne les $N_s/2$ combinaisons d'états stabilisés k et l les plus pénalisantes, c'est à dire les $N_s/2$ combinaisons (k, l) menant aux plus grandes valeurs de $S'_{alt}(k, l)$.

Pour chacune de ces $N_s/2$ combinaisons :

• A) *Superposition des moments d'origine sismique et de la combinaison (k, l) :*

- On superpose les chargements de séisme à la variation de moment résultant des différents chargements des états stabilisés k et l :

$$M_i = \sqrt{(|M_1(k) - M_1(l)| + \Delta M_{S1})^2 + (|M_2(k) - M_2(l)| + \Delta M_{S2})^2 + (|M_3(k) - M_3(l)| + \Delta M_{S3})^2}$$

avec :

$M_x(k)$ et $M_x(l)$: composantes dans la direction x ($x \in \{1; 2; 3\}$) des moments associés aux états k et l ;

ΔM_{Sx} : amplitude totale de variation dans la direction x des moments dus au séisme ($\Delta M_{Sx} = 2M_{x_s}$ où M_{x_s} est le moment résultant total (inertie et déplacements d'ancrage) tel que définie dans le §6.1.2).

- On calcule ensuite S_p et S_n tels que définis précédemment avec la nouvelle valeur de M_i (notés respectivement S_{p_s} et S_{n_s}) et on calcule :

$$S'_{alt_s}(k, l) = \frac{1}{2} \cdot \frac{E_c}{E} \cdot K_e(S_{n_s}(m, n)) \cdot S_{p_s}(k, l)$$

- On calcule le nombre de cycles admissibles $N(k, l)$ pour l'amplitude de contrainte $S'_{alt_s}(k, l)$ à l'aide de la courbe de Wöhler associée au matériau.
- On calcule enfin $u_1(k, l) = \frac{1}{N(k, l)}$

- B) Prise en compte de $2n_s - 1$ cycles sismiques considérés comme des sous-cycles :

- Amplitude de variation de la contrainte sismique seule :

$$S'_{alt_{sc}}(k, l) = \frac{E_c}{E} K_e(S_{n_s}(k, l)) \cdot K_2 \cdot C_2 \frac{D_0}{4 \cdot I} \sqrt{\Delta M_{s1^2} + \Delta M_{s2^2} + \Delta M_{s3^2}}$$

- On calcule le nombre de cycles admissibles $N_{SC}(k, l)$ pour l'amplitude de contrainte $S'_{alt_{sc}}(k, l)$. Il faut noter que l'on utilise la valeur $K_e(S_{n_s}(k, l))$ précédemment calculée pour le cycle principal.

- On calcule enfin $u_2(k, l) = \frac{(2n_s - 1)}{N_{SC}(k, l)}$

- C) Cumul

- $u(k, l) = u_1(k, l) + u_2(k, l)$

On recommence ce calcul jusqu'à épuisement des $N_s/2$ combinaisons les plus pénalisantes.

Le calcul du facteur d'usage est ensuite poursuivi **sans prendre en compte le séisme**.

Si $N_s = 0$, ou après avoir pris en compte le séisme pour les $N_s/2$ combinaisons les plus défavorables :

- On sélectionne la combinaison (k, l) conduisant à la valeur maximum de $S'_{alt}(k, l)$, sur l'ensemble des combinaisons, telle que le nombre d'occurrences n_0 soit non nul, avec :

$$n_0 = \min\{n_k, n_l, n_{pass}\} \quad \text{si } n_{pass} \text{ est non nul}$$

$$n_0 = \min\{n_k, n_l\} \quad \text{si } n_{pass} \text{ est nul}$$

- On calcule le nombre de cycles admissibles $N(k, l)$ pour l'amplitude de contrainte $S'_{alt}(k, l)$, à l'aide de la courbe de Wöhler associée au matériau.

- On calcule ensuite le facteur d'usage élémentaire : $u(k, l) = \frac{n_0}{N(k, l)}$.

- On remplace enfin :

$$n_k \text{ par } (n_k - n_0)$$

$$n_l \text{ par } (n_l - n_0)$$

$$\text{s'il s'agit d'une situation de passage, } n_{pass} \text{ par } (n_{pass} - n_0)$$

alors :

si $n_k = 0$, la colonne et la ligne correspondant à l'état stabilisé k de la matrice $S'_{alt}(i, j)$ sont mises à 0.

si $n_l = 0$, la colonne et la ligne correspondant à l'état stabilisé l de la matrice $S'_{alt}(i, j)$ sont mises à 0.

La boucle est répétée jusqu'à épuisement du nombre de cycles.

Remarque :

L'annexe ZI du code RCC-M définit les courbes de Wöhler jusqu'à une amplitude de contrainte minimum correspondant à une durée de vie de 10^6 cycles. Si la valeur S'_{alt} calculée pour une combinaison (i, j) d'état stabilisé est inférieure à cette amplitude minimum, le facteur d'usage est égal à 0 pour la combinaison (i, j) considérée. Ceci revient implicitement à considérer l'existence d'une limite d'endurance à 10^6 cycles.

7 Bibliographie

- 1) « RCC-M : Règles de Conception et de Construction des matériels mécaniques des îlots nucléaires PWR. Edition juin 2000, modificatif juin 2007 » Edité par l'AFCEN : Association française pour les règles de conception et de construction des matériels des chaudières électro-nucléaires.
- 2) Y. WADIER, J.M. PROIX, « Spécifications pour une commande d'Aster permettant des analyses selon les règles du RCC-M B3200 ». Note EDF/DER/HI-70/95/022/0
- 3) I. FOURNIER, K. AABADI, A.M. DONORE : «Projet OAR : Descriptif du 'fichier OAR', système de fichiers d'alimentation de la base de données » Note EDF / R&D / HI-75/01/008/C
- 4) F. CURTIT « Réalisation d'un outil logiciel d'analyse à la fatigue pour une ligne de tuyauterie - cahier des charges » Note EDF / R&D / HT-26/02/010/A
- 5) F. CURTIT « Analyse à la fatigue d'une ligne VVP intérieur BR avec sous-épaisseur » Note EDF / R&D / HT-26/00/057/A
- 6) « Demande d'interprétation IC 73 (en réponse à la demande D4507-SIS-POT n°07/0870 de J. Pot) », AFCEN, 2007
- 7) « RSE-M : Règles de Surveillance en Exploitation des matériels mécaniques des îlots nucléaires REP. Edition 1997, modificatif 2005 » Edité par l'AFCEN : Association française pour les règles de conception et de construction des matériels des chaudières électro-nucléaires.

8 Description des versions du document

Version Aster	Auteur(s) Organisme(s)	Description des modifications
5	J.M. Proix, EDF-R&D/AMA	Texte initial
7.4	J.M. Proix, EDF-R&D/AMA	Ajout de la méthode unitaire
8.4	E. Galenne, EDF-R&D/AMA	Ajout des résultats de type UNITAIRE
9.4	E. Galenne, EDF-R&D/AMA	- Ajout du calcul du facteur d'amorçage (fiche 10429) - Modification de la formulation en fatigue pour les résultats de type UNITAIRE (fiche 12297)
10.4	E. Galenne, Chau T.H., EDF-R&D/AMA	- Ajout de la méthode KE_MIXTE pour EVOLUTION (fiche 12818)