Organisme(s) : EDF/AMA

Manuel de Référence
Fascicule R7.04 : Evaluation du dommage
Document : R7.04.03

Post-traitement selon le RCC-M

Résumé :

L'opérateur POST_RCCM permet de vérifier les critères de niveau 0 et certains critères de niveau A du RCC-M-B3200, pour des modélisations de milieux continus 2D ou 3D.

Elle permet également le calcul des critères de fatigue du §B3600 en post-traitement de calculs de tuyauteries.

Les critères définis dans le chapitre B3200 du RCC-M font intervenir des grandeurs significatives que l'on compare à des valeurs limites.

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 Pm, de membrane locale Pl et de membrane plus flexion Pm+Pb. La commande `POST_RCCM` calcule Pm ou Pl et Pm+Pb.

Les critères de niveau A visent 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 Sn, et éventuellement de la quantité Sn*. Pour la fatigue, ils nécessitent en plus le calcul de l'amplitude de variation de contrainte en un point, notée Sp.

La commande `POST_RCCM` [U4.67.04] effectue les calculs de Sn, Sn*, Sp et du nombre de cycles admissibles en fatigue. En post-traitement d'analyses de tuyauteries, l'option FATIGUE_B3600 permet le calcul facteur d'usage en fatigue en prenant en compte toutes les situations calculées.

Table des matières

1 Critères du RCC-M B3200. Adaptation au *Code_Aster*

Le chapitre B3200 du RCC-M [bib1] décrit les règles générales d'analyse du comportement des matériels de niveau 1 des Centrales Nucléaires. Ces règles permettent d'assurer les sécurités nécessaires vis-à-vis des dommages auxquels sont soumis ces matériels. Pour cela on définit différents niveaux de critères dans chaque catégorie de situation qui permettent de comparer des grandeurs significatives à des valeurs limites. Les adaptations nécessaires au *Code_Aster* sont décrites ici, et motivées dans la [bib2].

1.1 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. 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 d'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 sur un segment fourni par `INTE_MAIL_2D` ou `INTE_MAIL_3D`. On calcule tous les critères systématiquement aux deux extrémités du segment, ou plus précisément aux deux intersections du segment avec les bords de la structure.

1.2 Données de chargement

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 ASTER, on traite des résultats mécaniques (produits par `MECA_STATIQUE` ou `STAT_NON_LINE`), donc des transitoires. Pour chaque transitoire, le champs de contraintes sont fournis aux instants de discrétisation du calcul.

1.3 Données matériau

Les données matériau à fournir sont les suivantes :

- Sm : valeur admissible (tabulée dans le RCC-M Annexe Z1).
- m,n : constantes matériau pour le calcul de Ke(définies dans le RCC-M B3234.6)
- Ec, 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.

1.4 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 : Pm
- Primaire de membrane locale : Pl
- Primaire de flexion : Pb
- Expansion thermique : Pe
- 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 imposées 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.

1.5 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 touts les critères du B3200 et pourra être complétée (par exemple pour d'autres niveaux de critères, ou pour des critères du RCC-MR, ...).

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, et défini le segment par INTE_MAIL_2D ou _3D, 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 le mot-clé FATIGUE.

2 Critères de niveau 0 (mot-clé PM_PB)

2.1 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.

2.1.1 Contrainte équivalente primaire générale de membrane Pm

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

$$P_m = \max_t \left(\sigma_{ij}^{moy} \right)_{Eq.Tresca} \qquad \sigma_{ij}^{moy} = \frac{1}{l} \int_0^l \sigma_{ij} ds,$$

où $\left(\tau_{ij} \right)_{Eq.Tresca} = \max_{I,J} \left| \tau_I - \tau_J \right| \quad \left(\tau_I \;\; I=1,3 \text{ sont les contraintes principales} \right)$

Le critère s'écrit :

$$P_m \leq S_m$$

2.1.2 Contrainte équivalente primaire de membrane locale Pl

Etant donnée la contrainte primaire de la situation de référence (1e 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 :

$$P_l \leq 1.5 \; S_m$$

2.1.3 Contrainte équivalente primaire de membrane+flexion Pmb (ou Plb)

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

$$P_m = \max_t \left(\sigma_{ij}^{moy} \right)_{Eq.Tresca} \qquad P_b = \max_t \left(\sigma_{ij}^{fle} \right)_{Eq.Tresca} \qquad P_{mb} = \max_t \left(\sigma_{ij}^{lin} \right)_{Eq.Tresca}$$

$$\sigma_{ij}^{moy} = \frac{1}{l} \int_0^l \sigma_{ij} ds \qquad \sigma_{ij}^{fle} = \frac{6}{l^2} \int_0^l \left(s - \frac{l}{2} \right) \sigma_{ij} ds \qquad \sigma_{ij}^{lin} = \sigma_{ij}^{moy} \pm \sigma_{ij}^{fle}$$

$$\sigma_{ij}^{lin}(s=0) = \sigma_{ij}^{moy} - \sigma_{ij}^{fle}$$

$$\sigma_{ij}^{lin}(s=\ell) = \sigma_{ij}^{moy} + \sigma_{ij}^{fle}$$

Les critères s'écrivent :

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

2.2 Calculs effectués par *Aster*

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

Le concept résultat comporte soit un seul champ de contraintes, soit des champs résultant d'une évolution. Dans ce dernier cas, on cherchera le maximum par rapport à la liste des numéros d'ordre des termes intervenant dans les critères.

L'algorithme est le suivant :

Impression du segment (cf `POST_RELEVE`)

- Sur l'ensemble des numéros d'ordre n=1, nbmax
  - extraction de l'instant t
  - sur chaque extrémité du segment
    - calcul de Pm et Pmb par intégrations sur le segment

$$P_m = \max_t \left(\sigma_{ij}^{moy} \right)_{Eq.Tresca}$$

$$\sigma_{ij}^{moy} = \frac{1}{l} \int_0^l \sigma_{ij} ds,$$

$$P_b = \max_t \left(\sigma_{ij}^{fle} \right)_{Eq.Tresca} \qquad \sigma_{ij}^{fle} = \frac{6}{l^2} \int_0^l \left(s - \frac{l}{2} \right) \sigma_{ij} ds,$$

$$P_{mb}(s=0) = \max_t \left(\sigma_{ij}^{moy} - \sigma_{ij}^{fle} \right)_{Eq.Tresca} \qquad P_{mb}(s=l) = \max_t \left(\sigma_{ij}^{moy} + \sigma_{ij}^{fle} \right)_{Eq.Tresca}$$

    - Recherche du maximum de P_m, $P_{mb}(s=0)$, $P_{mb}(s=l)$.
  - Sortie et stockage dans la table du résultat.

Les valeurs limites sont Sm et 1.5 Sm, Sm 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`.

3 Critères de niveau A (hors fatigue) (mot-clé SN)

3.1 Critères de niveau A spécifiés par le RCC-M

Cette option permet de calculer les critères de niveau A (hors fatigue) qui visent à prémunir le matériel contre les dommages de déformation progressive. Ils nécessitent le calcul de l'amplitude de variation des contraintes primaires plus secondaires linéarisées, notée S_n.

3.1.1 Calcul de Sn

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 (donné par le mot-clé CHEMIN). En chaque point extrémité de ce segment de longueur l , on calcule :

$$S_n = \max_{t_1}\left(\max_{t_2}\left(\sigma_{ij}^{lin}(t_1) - \sigma_{ij}^{lin}(t_2)\right)_{Eq.Tresca}\right)$$

$$\sigma_{ij}^{moy} = \frac{1}{l}\int_0^l \sigma_{ij} ds \qquad \sigma_{ij}^{fle} = \frac{6}{l^2}\int_0^l \left(s - \frac{l}{2}\right)\sigma_{ij} ds \qquad \sigma_{ij}^{lin} = \sigma_{ij}^{moy} \pm \sigma_{ij}^{fle}$$

$$\sigma_{ij}^{lin}(s=0) = \sigma_{ij}^{moy} - \sigma_{ij}^{fle}$$

$$\sigma_{ij}^{lin}(s=\ell) = \sigma_{ij}^{moy} + \sigma_{ij}^{fle}$$

Le critère (d'adaptation globale) s'écrit :

$$S_n \leq 3 S_m$$

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.

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 la règle de Bree (B3234.8) dans les parties courantes des coques cylindriques (et tuyaux) soumises à une pression et un gradient de température cyclique. Ceci concerne une situation très particulière et ne sera donc pas décrit ici.

3.1.2 Calcul de Sn*

On note S_n^* l'amplitude Sn calculée sans prendre en compte les contraintes de flexion d'origine thermique. On calcule pour chaque extrémité :

$$S_{n^*}^* = \max_{t_1}\left(\max_{t_2}\left(\left(\sigma_{ij}^{lin}(t_1) - \sigma_{ij}^{fleth}(t_1)\right) - \left(\sigma_{ij}^{lin}(t_2) - \sigma_{ij}^{fleth}(t_2)\right)\right)_{Eq.Tresca}\right)$$

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

σ_{ij}^{th} provenant 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 Sn, tous les chargements autres que le chargement thermique).

3.2 Calculs effectués par *Aster*

3.2.1 Calcul de Sn

A partir des instants de calcul sélectionnés dans le résultat, on calcule donc S_n à chaque extrémité du segment. Si il y n'a pas de calcul à l'instant t = 0, on crée un champ de contraintes identiquement nul à t = 0.

L'algorithme est le suivant :

Impression des caractéristiques du segment (cf POST_RELEVE)

- sur l'ensemble des numéros d'ordre, n_1=1,nbmax
  - 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 nbmax
    - 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

      $$\sigma_{ij}^{lin}(t_2, s=0) - \sigma_{ij}^{lin}(t_1, s=0) \text{ et } \sigma_{ij}^{lin}(t_2, s=l) - \sigma_{ij}^{lin}(t_1, s=l)$$
    - 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

Sortie et stockage dans la table du résultat.

3.2.2 Calcul de S_n*

Ce calcul est effectué si l'opérande RESU_SIGM_THER est présent. Seul l'utilisateur assure la cohérence, 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 RESULTAT peut être dû à une combinaison de ce chargement thermique avec d'autres chargements. Il faut donc que les instants de ce résultat correspondent à ceux du résultat associé au mot clé RESULTAT.

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

4 Critères de fatigue (de niveau A) (mot-clé FATIGUE)

Dans le cas de la fatigue il faut s'assurer que le facteur d'usage total - qui intègre l'effet des combinaisons de situations 2 à 2 - est inférieur à 1. Pour cette analyse on a besoin :

- d'une part, de S_n défini précédemment, qui nécessite la linéarisation des contraintes, ceci pour calculer le facteur de concentration élastoplastique K_e,
- d'autre part, de S_p qui est l'amplitude de variation de contraintes totales ($P_l + P_b + P_e + Q + F$), qui ne nécessite pas de linéarisation, et qui dont la définition suit. Ce S_p sert à calculer la contrainte équivalente alternée S_{alt} qui, via les courbes de fatigue, permet de déterminer le facteur d'usage.

Nous présentons deux méthodes :

- la première permet de calculer le facteur d'usage pour un seul transitoire (d'après le RCC-M B3234.5). On suppose ici que le transitoire ne comporte pas de fluctuations secondaires (chaque quantité varie entre un minimum et un maximum toujours identiques),
- la deuxième méthode permet de combiner plusieurs transitoires et de tenir compte des facteurs d'usage propres aux fluctuations secondaires (RCC-M annexe ZH210).

On suppose également que l'on ne se situe pas dans des zones comportant des singularités géométriques (sinon, il faut appliquer les méthodes de calcul à l'amorçage des zones singulières qui font l'objet de l'annexe ZD du RCC-M).

4.1 Première méthode : amplitude maximum dans un transitoire

C'est une première approche du calcul du dommage de fatigue du RCC-M B3200, limitée au traitement d'un seul transitoire (pas de combinaison de transitoires) et sans considération de sous-cycles. Cette méthode est la seule disponible en version 3 du *Code_Aster* (elle est activée par le mot-clé '`FATIGUE_SPMAX`' dans la version 4). On calcule l'amplitude de variation de contrainte en un point, notée S_p, et l'amplitude de variation de contrainte linéarisée Sn pour le calcul du facteur de correction élastoplastique K_e (suivant le RCC-M B3200).

En chaque point extrémité du segment de longueur l , on calcule :

$$S_p = \max_{t_1}\left(\max_{t_2}\left(\sigma_{ij}(t_1) - \sigma_{ij}(t_2)\right)_{Eq.Tresca}\right) \qquad S_n = \max_{t_1}\left(\max_{t_2}\left(\sigma_{ij}^{lin}(t_1) - \sigma_{ij}^{lin}(t_2)\right)_{Eq.Tresca}\right)$$

$$\sigma_{ij}^{moy} = \frac{1}{l}\int_0^l \sigma_{ij} ds \qquad \sigma_{ij}^{fle} = \frac{6}{l^2}\int_0^l \left(s - \frac{l}{2}\right)\sigma_{ij} ds \qquad \sigma_{ij}^{lin} = \sigma_{ij}^{moy} \pm \sigma_{ij}^{fle}$$

puis

$S_{alt} = \dfrac{1}{2}\dfrac{E_c}{E} K_e(S_n) S_p$ et par la courbe de fatigue de Wöhler : $N_{adm} = f(S_{alt})$.

Une valeur acceptable de K_e peut être déterminée suivant le RCC-M B3200 comme suit :

$$K_e(S_n) = 1 \qquad \text{si} \quad S_n < 3S_m$$

$$K_e(S_n) = 1 + \frac{1-n}{n(m-1)}\left(\frac{S_n}{3S_m} - 1\right) \qquad \text{si} \quad 3S_m < S_n < 3mS_m$$

$$K_e(S_n) = \frac{1}{n} \qquad \text{si} \quad S_n > 3mS_m$$

Les valeurs de m et n sont données dans le B3234.6 du RCC-M. Ces paramètres et la courbe de fatigue sont introduits dans la commande DEFI_MATERIAU [U4.23.01] sous le mot-clé facteur FATIGUE.

- n correspond à N_KE_RCCM
- m correspond à M_KE_RCCM
- S_m correspond à SM_KE_RCCM
- Le module d'Young de référence de la courbe de fatigue *Ec* correspond à E_REFE. Le module d'Young correspondant au calcul effectué est défini classiquement sous le mot-clé facteur ELAS.
- La courbe de fatigue $N_{adm} = f\left(S_{alt}\right)$ est une fonction définie par DEFI_FONCTION, et introduite dans DEFI_MATERIAU par le mot-clé WOHLER du mot-clé facteur FATIGUE.

Cet algorithme est directement déduit du calcul de S_n et S_p maximum pour un seul transitoire et ne prend pas en compte les sous-cycles. Il ne correspond donc pas à celui de POST_FATIGUE.

Si l'utilisateur désire à la fois le calcul de fatigue et de S_n pour le transitoire, il peut se passer d'utiliser le mot-clé S_n, car le calcul de S_{alt} implique deux calculs :

- celui de S_p
- celui de S_n effectué précédemment.

Comme pour le critère $S_n < 3S_m$, à partir de tous les instants de calcul, on calcule S_p à chaque extrémité du segment. Si il y a un seul instant, on crée un transitoire fictif entre cet instant et l'état identiquement nul.

L'algorithme est quasiment identique à celui utilisé pour le calcul de S_n, sans linéarisation. Il s'écrit :

- Impression du segment (cf POST_RELEVE)
- sur l'ensemble des numéros d'ordre, n_1=1,nbmax

4.1.1 Calcul de Sp

- Extraction de l'instant t_1
- Pour n_2 variant de n_1+1 à nbmax
  - Extraction de l'instant t_2
  - calcul de $\sigma_{ij}\left(t_2, s=0\right)-\sigma_{ij}\left(t_1, s=0\right)$ et $\sigma_{ij}\left(t_2, s=l\right)-\sigma_{ij}\left(t_1, s=l\right)$
  - Calcul des directions principales et calcul de
  - $\left(\sigma_{ij}\left(t_1, s=0\right)-\sigma_{ij}\left(t_2, s=0\right)\right)_{Eq.Tresca}$ et $\left(\sigma_{ij}\left(t_1, s=l\right)-\sigma_{ij}\left(t_2, s=l\right)\right)_{Eq.Tresca}$
  - recherche du maximum pour obtenir :

$$S_p(s=0)=\max_{t_1}\left(\max_{t_2}\left(\sigma_{ij}\left(t_1, s=0\right)-\sigma_{ij}\left(t_2, s=0\right)\right)_{Eq.Tresca}\right)$$

$$S_p(s=l)=\max_{t_1}\left(\max_{t_2}\left(\sigma_{ij}\left(t_1, s=l\right)-\sigma_{ij}\left(t_2, s=l\right)\right)_{Eq.Tresca}\right)$$

4.1.2 Calcul de Sn par l'algorithme décrit précédemment

$$S_n(s=0)=\max_{t_1}\left(\max_{t_2}\left(\sigma_{ij}^{lin}\left(t_1, s=0\right)-\sigma_{ij}^{lin}\left(t_2, s=0\right)\right)_{Eq.Tresca}\right)$$

$$S_n(s=l)=\max_{t_1}\left(\max_{t_2}\left(\sigma_{ij}^{lin}\left(t_1, s=l\right)-\sigma_{ij}^{lin}\left(t_2, s=l\right)\right)_{Eq.Tresca}\right)$$

Remarque :

Les instants qui maximisent S_p ne sont pas forcément identiques à ceux qui maximisent S_n.

- Sortie et stockage dans la table du résultat.

Après le calcul de S_p et de S_n, on obtient le nombre de cycles admissibles par :

- Le calcul de K_e pour chaque extrémité, comme par la formule précédente.
- Le calcul de S_{alt} à partir de S_p, E_c, E, K_e :

$$S_{alt} = \frac{1}{2}\frac{E_c}{E} K_e\left(S_n\right) S_p$$

- On déduit ensuite N_{adm} de S_{alt} et de la courbe de fatigue.

4.2 Deuxième méthode : combinaison de plusieurs transitoires et sous-cycles, méthode ZH210

La première méthode ne prend pas en compte les sous-cycles éventuels, et ne combine pas les transitoires entre eux. On décrit ici une autre possibilité, disponible seulement en version 4 du *Code_Aster* (mot-clé '`FATIGUE_ZH210`').

L'algorithme 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).

Cette méthode issue de l'annexe ZH210 du RCC-M a été choisie préférentiellement à d'autres méthodes décrites dans le RCC-M [bib1].

Le principal avantage de cette méthode est de considérer automatiquement tous les sous-cycles possibles. Son inconvénient est le nombre de calculs à effectuer si on ne restreint pas l'ensemble des instants utilisés dans le calcul.

En effet, on définit 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 le *Code_Aster*, tous les instants de calcul sont utilisés. On associe à chacun d'eux le nombre d'occurrences du transitoire. La définition est donc :

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

Ensuite, on construit l'ensemble des 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 tous 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.

4.2.1 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 $S_n(k,l)$ par :

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

A partir de $S_n(k,l)$, on calcule $K_e(k,l)$ comme précédemment, puis :

$S_{alt}(k,l) = \dfrac{1}{2}\dfrac{E_c}{E} K_e(k,l)\, S_p(k,l)$ et par la courbe de fatigue de Wöhler : $N_{adm}(k,l) = f\left(S_{alt}\right)$.

La méthode pour déterminer K_e est identique à la précédente.

A partir du nombre de cycles admissibles $N_{adm}(k,l)$, on calcule le facteur d'usage de la combinaison :

$u(k,l) = N_{kl}/N_{adm}(k,l)$, avec N_{kl} = min(Nocc(k),Nocc(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.

4.2.2 Algorithme de cumul

Pour chaque extrémité :

Données : Nombre total d'états de chargement N
matrice u(k,l), k,l=1,N
vecteur d'entiers Nocc(i), i=1,N

U(M1) =0 (facteur d'usage total)

- recherche du maximum de u(M1,k,l) sur toutes les combinaisons (k,l) telles que Nocc(k)>0 et Nocc(l)>0. Soit u(M1,m,n).
- U(M1) = U(M1) + u(M1,m,n).
- Si Nocc(m) < Nocc(n) alors
  Nocc(n)=Nocc(n)-Nocc(m)
  Nocc(m)=0

et inversement
Si Nocc(n) < Nocc(m) alors
Nocc(m)=Nocc(m)-Nocc(n)
Nocc(n)=0

- Si il existe encore des états de chargement i tels que Nocc(i)>0, retour en 1.

Deux remarques peuvent être faites :

Si le nombre d'instants définis pour chaque transitoire est grand, le 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 il faut prévoir en plus une possibilité pour l'utilisateur de 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, augmentatnt le facteur d'usage (ces instants sont uniquement utilisés pour la discrétisation numérique du problème mécanique ou thermique).

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

Vocabulaire utilisé : comparativement aux options précédentes, qui traitent des transitoires complets (modélisation mécanique de la structure soumise à des histoires de températures et de chargement mécaniques), il est d'usage en B3600 de définit 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.

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.

5.1 Calculs 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).

5.1.1 Calculs des états de chargement statiques

On traite les résultats des calculs statiques (champ `EFGE_ELNO_DEPL` ou `SIEF_ELNO_ELGA`) pour les états stabilisés de la liste des situations subies par la ligne. Les torseurs pour chaque état stabilisé sont obtenus par sommation algébrique des torseurs correspondant aux différents cas de charge de la situation (signés).

$$M_i = M_{i\_CHAR1} + M_{i\_CHAR2} + \ldots \quad \mathrm{i} \in \{\mathrm{x};\mathrm{y};\mathrm{z}\}$$

(les chargements sont par exemple la dilatation thermique contrariée, le déplacement d'ancrage).

5.1.2 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 :

  $$M_{i\_S\_DYN} = \sqrt{\sum_j \left(M_{i\_S\_DYN}\left(spectre_j\right)\right)^2} \quad (\mathrm{i},\mathrm{j}) \in \{\{x;y;z\};\{X;Y;Z\}\}$$

  avec : $M_{i\_S\_DYN}$ (spectre$_j$) le moment dans la direction i résultant du chargement dynamique dans la direction j. Ce cumul est déjà fait 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).
  Les chargements doivent ensuite être combinés par moyenne quadratique par POST_RCCM_B3600 (ce calcul n'est pas effectué au préalable).

  La contribution quasi-statique des déplacements d'ancrage différentiels à la composante i du moment s'écrit :

$$M_{i\_S\_ANC} = \sqrt{\sum_{k=1}^{N\_ANC} (M^k_{i\_S\_ANC})^2}$$

  avec : $M^k_{i\_S\_ANC}$ la i^{éme} composante du moment correspondant au k^{éme} déplacement d'ancrage.

Combinaison des composantes inertielles et différentielles dues au séisme :

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

$M_{i\_S} = \sqrt{\left(M_{i\_S\_ANC}\right)^2 + \left(M_{i\_S\_DYN}\right)^2}$ $\quad i \in \{x;y;z\}$ ce qui revient à effectuer le moyenne quadratique de tous les moments inertiels et différentiels, $M_{i\_S} = \sqrt{\sum_{k=1,N\_ANC} \left(M^k{}_{i\_S\_ANC}\right)^2 + \left(M_{i\_S\_DYN}\right)^2}$ $\quad i \in \{x;y;z\}$

Le résultat de ce cumul est à stocker dans le tableau ci-dessus.

Chacun des ces chargements (réponse inertielle, déplacement d'ancrage) est défini par une occurrence du mot-clé `RESU_MECA`.

5.1.3 Calcul des transitoires thermiques

Dans le § B3653 du RCC-M qui décrit la méthode d'analyse à la fatigue pour une ligne de tuyauterie, les chargements de type "gradient thermique dans l'épaisseur" sont pris en compte par l'intermédiaire de quatre variables :

ΔT_1 : amplitude de la variation entre les deux états stabilisés de la différence de température entre les parois interne et externe, pour une distribution linéaire équivalente de la température.

ΔT_2 : partie non linéaire de la distribution dans l'épaisseur de paroi de l'amplitude de variation de la température entre les deux états stabilisés.

T_a et T_b : amplitude de variation entre deux états stabilisés des températures moyennes dans les zones respectives a et b situées de part et d'autre d'une discontinuité de matériau ou de structure.

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

Chaque calcul est dépouillé à l'aide de deux appels à `POST_RELEVE_T` (`OPERATION =EXTRACTION` et `OPERATION=MOYENNE`) de façon à extraire, pour chaque instant i, la variation de la température sur la section choisie et les valeurs moyennes (moments d'ordre 0 et 1).

A partir de ces valeurs, on calcule les quantités ΔT_1, ΔT_2, T_a et T_b de la façon suivante :

Pour chaque instant τ du transitoire, on calcule (par les mêmes routines que dans POST_RELEVE_T) :

$T_{moy}(\tau)=\frac{1}{t}\int_{-t/2}^{t/2}T(\tau,y).dy$: valeur moyenne de $T(\tau)$ sur le ligament

Eventuellement (discontinuité de matériau ou jonction) :

$T_{moy}^{B}(\tau)=\frac{1}{t}\int_{-t/2}^{t/2}T^{B}(\tau,y).dy$: valeur moyenne de $T(\tau)$ sur le ligament correspondant au nœud B situé de l'autre côté de la jonction

$V_{moy}(\tau)=\frac{12}{t^2}\int_{-t/2}^{t/2}y.T(\tau,y).dy$: variation d'une distribution linéaire équivalente à $T(\tau)$.

alors :

$\Delta T_1(\tau) = V_{moy}(\tau)$

$$\Delta T_2(\tau)=\max\left|\begin{array}{l}\left|T_{ext}(\tau)-T_{moy}(\tau)\right|-\left|\frac{1}{2}\Delta T_1(\tau)\right|\\ \left|T_{\text{int}}(\tau)-T_{moy}(\tau)\right|-\left|\frac{1}{2}\Delta T_1(\tau)\right|\\ 0\end{array}\right.$$

Dans le cas d'une discontinuité de matériau ou d'une jonction, on calcule :

$$T_a(\tau)=T_{moy}(\tau)$$
$$T_b(\tau)=T_{moy}^{B}(\tau)$$
$$\alpha_a T_a(\tau)-\alpha_b T_b(\tau)$$

en utilisant les coefficients de dilatation éventuellement différents pour les deux mailles concourantes au nœud traité.
En pratique, les zones a et b correspondront à des segments choisis par l'utilisateur dans POST_RELEVE, et les tables produites seront associées aux deux mailles adjacentes ayant en commun le nœud qui correspond à la jonction.

5.2 Calculs des amplitudes de contraintes

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

La première 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 choisissant les instants des transitoires thermiques qui maximisent ces amplitudes de contraintes. En effet, les transitoires thermiques définis dans les Dossier d'Analyse du Comportement sont associés à des situations. Lors de l'analyse du comportement à la fatigue, nous sommes amenés à définir des cycles de chargements fictifs en associant des états stabilisés appartenant à des situations différentes. Dans ce cas, le transitoire thermique associé au cycle fictif correspondant aux états stabilisés i et j sera choisi de façon à maximiser l'amplitude de contraintes.

On considère donc l'ensemble des combinaisons (i,j) avec (i,j) $\in$ ({1, 2, .. , N},{1, 2, .. , N}) (N étant le nombre d'états stabilisés hors séisme, c'est-à-dire 2 fois le nombre de situations du groupe), et l'on construit une matrice [N;N] des valeurs $S'_{alt}(i,j)$.

Pour chaque combinaison, $S'_{alt}(i,j)$ est obtenu de la façon suivante :
Soient deux états stabilisés, i et j appartenant respectivement aux situations p et q :

On calcule
$S_p(i,j)$: amplitude de variation des contraintes totales (eq. (11) du §B3653 du RCC-M) par :

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

$\left(t_k^p,t_l^p\right)$ désigne deux instants quelconques du transitoire associé à la situation p.

On calcule aussi le même type de terme, avec le transitoire thermique associé à la situation q :

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

alors :

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

avec :

- C_1, C_2, C_3, K_1, K_2, K_3 indices de contraintes fournis au §B3680 du RCC-M
- E : module d'élasticité de la tuyauterie à température ambiante
- ν : coefficient de Poisson
- α : coefficient de dilatation de la tuyauterie à température ambiante (à T_REF)
- E_{ab} : module d'élasticité moyen entre les deux zones séparées par une discontinuité à la température ambiante (TEMP_REF).
- D_0 : diamètre extérieur de la tuyauterie
- t : épaisseur nominale de la paroi
- I : moment d'inertie de la tuyauterie $I = \frac{\pi}{64}.\left(D_0^2 - \left(D_0 - 2.t\right)^2\right)$
- $M_i(i,j)$: variation de moment résultant des différents chargements des situations auxquelles appartiennent les états stabilisés i et j :
- $M_i = \sqrt{\left(M_X(i)-M_X(j)\right)^2 + \left(M_Y(i)-M_Y(j)\right)^2 + \left(M_Z(i)-M_Z(j)\right)^2}$
- $P_0(i,j)$: différence de pression entre les états i et j.

Les termes faisant intervenir la température sont :

$$T_{moy}\left(t_k^q,t_l^q\right) = \frac{1}{t}\int_{-t/2}^{t/2} T\left(t_k^q,t_l^q\right)(y).dy = \frac{1}{t}\int_{-t/2}^{t/2} T\left(t_k^q\right)(y).dy \frac{1}{t}\int_{-t/2}^{t/2} T\left(t_l^q\right)(y).dy = T_{moy}\left(t_k^q\right) - T_{moy}\left(t_l^q\right)$$

$$\Delta T_1\left(t_k^q,t_l^q\right) = \frac{12}{t^2}\int_{-t/2}^{t/2} y.T\left(t_k^q,t_l^q\right)(y).dy = \frac{12}{t^2}\int_{-t/2}^{t/2} y.T\left(t_k^q\right)(y).dy - \frac{12}{t^2}\int_{-t/2}^{t/2} y.T\left(t_l^q\right)(y).dy = V_{moy}\left(t_k^q\right) - V_{moy}\left(t_l^q\right)$$

$$\text{et } \Delta T_2\left(t_k^q,t_l^q\right)=\max\left|\begin{array}{l}\left|T_{\max}\left(t_k^q,t_l^q\right)-T_{moy}\left(t_k^q,t_l^q\right)\right|-\left|\tfrac{1}{2}\Delta T_1\left(t_k^q,t_l^q\right)\right|\\ \left|T_{\min}\left(t_k^q,t_l^q\right)-T_{moy}\left(t_k^q,t_l^q\right)\right|-\left|\tfrac{1}{2}\Delta T_1\left(t_k^q,t_l^q\right)\right|\\ 0\end{array}\right.$$

On calcule aussi :

$S_n(i,j)$: amplitude de variation des contraintes linéarisées (eq. (10) du §B3653 du RCC-M)

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

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

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

On calcule alors $S_n(p,q)=\max\limits_{i,j}S_n(i,j)$, pour i et j balayant l'ensemble des états stabilisés des deux situations p et q (en général, 6 combinaisons possibles).

On obtient finalement l'amplitude de contrainte entre les états i et j, par :

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

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 le facteur de concentration élasto-plastique défini au §B3234.6 du RCC-M.

$$K_e\left(S_n(p,q)\right)=\left|\begin{array}{ll}1 & \text{si } S_n(p,q)\le 3.\mathrm{S_m}\\ 1+\dfrac{1-n}{n.(m-1)}.\left(\dfrac{S_n(p,q)}{3.S_m}-1\right) & \text{si } 3.\mathrm{S_m}<S_n(p,q)<3.m.\mathrm{S_m}\\ \dfrac{1}{n} & \text{si } S_n(p,q)\ge 3.m.\mathrm{S_m}\end{array}\right.$$

Les valeurs de m et n dépendent du matériau, et sont fournis par l'utilisateur dans `DEFI_MATERIAU`, sous les mots clés `M_KE` et `N_KE`, du mot clé facteur `FATIGUE`. La valeur de S_m est la plus petite des valeurs correspondant aux états stabilisés i et j. 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.

Remarque :

Dans le cas de chargements mixtes mécanique et thermique, le RCC-M (à partir du modificatif de juin 1994) autorise la décomposition du facteur de concentration élasto-plastique en une composante mécanique (K_{e_meca}) et une composante thermique (K_{e_ther}). Cette méthode de calcul est généralement (mais pas dans tous les cas) un peu moins pénalisante que la méthode ci-dessus. Nous avons choisi ici de ne pas utiliser cette possibilité pour deux raisons. D'une part la décomposition de K_e n'est rentable que si la part de chargement d'origine thermique est importante (et elle complique l'analyse à la fatigue). D'autre part l'expression de K_{e_ther} proposée dans le RCC-M n'est valable que pour les aciers austénitiques. Dans le cas des aciers ferritiques, les coefficients de l'expression de K_{e_ther} doivent faire l'objet d'une validation au cas par cas, ce qui semble peu compatible avec les objectifs de notre cahier des charges.

On construit ainsi, pour chaque groupe de situation, une matrice carrée symétrique contenant l'ensemble des $S'_{alt}(i,j)$ ainsi obtenus. Dans cet ensemble, on identifie la combinaison (k,l) correspondant à la plus grande valeur de S'_{alt}. On associe à cette matrice un vecteur contenant le nombre d'occurrences de chaque état stabilisé

5.2.1.1 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 Ke qui correspond à la situation principale dont est issu le sous-cycle.

5.2.2 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 encore une matrice (rectangulaire) contenant tous les $S'_{alt}(i,j)$,

5.3 Calcul du facteur d'usage

On note :

n_k le nombre de cycles associé à la situation p à laquelle appartient l'état stabilisé k ;
n_l le nombre de cycles associé à la situation q à laquelle appartient l'état stabilisé l ;
N_s le nombre d'occurrences du séisme (seul le SNA est considéré en seconde catégorie)
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 $N_s \neq 0$, on sélectionne les Ns/2 combinaisons d'états stabilisés k et l les plus pénalisantes, c'est à dire les Ns/2 combinaisons (k,l) menant aux plus grandes valeurs de $S'_{alt}(k,l)$.

Pour chacune de ces Ns/2 combinaisons :

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

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

  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.

- On calcule ensuite S_p et S_n avec la nouvelle valeur de M_i et on calcule :

$$S'_{alt\_S}(k,l) = \frac{1}{2}.\frac{E_c}{E}.K_e\left(S_{n\_S}(m,n)\right).S_{p\_S}(k,l)$$

- on calcule le nombre de cycles admissibles N(k,l) pour l'amplitude de contrainte $S'_{alt\_S}(k,l)$. N(k,l) correspond à l'abscisse du point d'ordonnée $S'_{alt\_S}(k,l)$ dans la courbe de Wöhler associée au matériau.
- on calcule enfin $u_1(k,l) = \dfrac{1}{N(k,l)}$
- on prend en compte les sous-cycles dus aux séisme en calculant :

$$S'_{alt\_SC}(k,l) = \frac{E_c}{E}.K_e\left(S_{n\_S}(k,l)\right).K_2.C_2.\frac{D_0}{4.I}.\sqrt{\Delta M_{S1}{}^2 + \Delta M_{S2}{}^2 + \Delta M_{S3}{}^2}$$

- on calcule avec cette valeur : $u_2(k,l) = \dfrac{(2.n_s - 1)}{N_{SC}(k,l)}$ avec : $N_{SC}(k,l)$ nombre de cycles admissibles pour l'amplitude de contrainte $S'_{alt\_SC}(k,l)$. Il faut noter que l'on utilise la valeur $K_e\left(S_{n\_S}(k,l)\right)$ précédemment calculée pour le cycle principal.

- On cumule alors ces facteurs d'usage partiels dans le facteur d'usage total : $U = U + u_1(k,l) + u_2(k,l)$

On recommence ce calcul jusqu'à épuisement des Ns/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 Ns/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 $n_0 = \min\{ n_k, n_{l,}, n_{pass,}\}$ si n_{pass} est non nul, ou bien $n_0 = \min\{ n_k, n_{l,,}\}$ si n_{pass} est nul.

- on calcule le nombre de cycles admissibles N(k,l) pour l'amplitude de contrainte $S'_{alt}(k,l)$. N(k,l) correspond à l'abscisse du point d'ordonnée $S'_{alt\_S}(k,l)$ dans la courbe de Wöhler associée au matériau.

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

- on calcule $u(k,l) = \dfrac{n_0}{N(k,l)}$
- on remplace ensuite
  n_k par $(n_k - n_0)$
  n_l par $(n_l - n_0)$
  s'il s'agit d'une situation de passage, n_{pass} 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. Le facteur d'usage U_g de la ligne pour le groupe considéré est alors défini par :

$U_g = \sum u(k,l)$. Il est cumulé avec le facteur d'usage total : $U_{tot} = U_{tot} + U_g$

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.

6 Déroulement de l'analyse du comportement à la fatigue selon RCC-M B3200

Le traitement qui est décrit ici (cf. [bib2]) est à effectuer pour le segment considéré. Le résultat obtenu sera donc un facteur d'usage (total ou partiel) en chaque extrémité de ce segment.

6.1 Calculs de tous les états de chargement

6.1.1 Combinaison linéaire des tenseurs de contraintes

La présente étape consiste à reconstituer, pour toutes les situations, (y compris les situations de passage) les tenseurs de contraintes en chaque nœud du segment relatifs à chaque état stabilisé (en cumulant les différents tenseurs des contraintes qui interviennent).

Pour chaque calcul de chargement unitaire, on extrait le tenseur des contraintes le long du segment d'analyse. Les tenseurs des contraintes doivent tous être exprimées dans un même repère (le repère global lié à la modélisation 2D ou 3D).

Ce repère doit être cohérent avec celui dans lequel sont exprimés les efforts globaux issus du calcul poutre.

On note $\sigma_{\alpha\_U}(\beta)$ avec $\alpha \in \{\mathrm{XX}, \mathrm{YY}, \mathrm{ZZ}, \mathrm{XY}, \mathrm{XZ}, \mathrm{YZ}\}$ les composantes du tenseur des contraintes associées au chargement unitaire β. Le calcul du tenseur de contraintes correspondant à chargement mécanique appartenant à un état stabilisé est alors obtenu de la façon suivante :

soit $F_x(i), F_y(i), F_z(i), M_x(i), M_y(i), M_z(i)$ le torseur d'effort associé au chargement (i).

on a alors, par combinaison linéaire :

$$\sigma_\alpha(i) = F_x(i).\sigma_{\alpha\_U}(F_{X\_U}) + F_y(i).\sigma_{\alpha\_U}(F_{Y\_U}) + F_z(i).\sigma_{\alpha\_U}(F_{Z\_U}) +$$
$$M_x(i).\sigma_{\alpha\_U}(M_{X\_U}) + M_y(i).\sigma_{\alpha\_U}(M_{Y\_U}) + M_z(i).\sigma_{\alpha\_U}(M_{Z\_U})$$

On cumule ensuite linéairement les tenseurs de contraintes pour tous les chargements de l'état stabilisé considéré.

On stocke, à ce niveau, les tenseurs de contraintes pour chaque nœud du segment.

6.1.2 Calcul des transitoires thermiques

Comme les transitoires thermiques conduisent à des relevés de contraintes (sur une section correspondant au nœud étudié) variables en fonction du temps, il est nécessaire de stocker toutes ces valeurs afin de maximiser correctement les amplitudes de contraintes.

6.1.3 Cas des chargements sismiques

Le chargement sismique se décompose en 2 parties :

a) 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). A l'issue de ce calcul poutre, on obtient des efforts généralisés qui au cumul quadratique de ces efforts pour chaque direction de séisme, donc des efforts non signés. On stocke ces contraintes dans le tableau 1 ci-dessus, pour rechercher par la suite la combinaison de signe qui maximise l'amplitude de contraintes.

b) 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. De même, les efforts sont combinés par moyenne quadratique, donc non signés. Le résultat est à stocker dans le tableau 1 ci-dessus.

6.1.4 Calculs des amplitudes de contraintes à l'intérieur de chaque groupe de situations

La première 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 choisissant les instants des transitoires thermiques qui maximisent ces amplitudes de contraintes.

En effet, les transitoires thermiques définis dans les Dossier d'Analyse du Comportement sont associés à des situations. Lors de l'analyse du comportement à la fatigue, nous sommes amenés à définir des cycles de chargements fictifs en associant des états stabilisés appartenant à des situations différentes. Dans ce cas, le transitoire thermique associé au cycle fictif correspondant aux états stabilisés i et j sera choisi de façon à maximiser l'amplitude de contraintes.

On considère donc l'ensemble des combinaisons (i,j) avec (i,j) $\in$ ({1, 2, .. , N},{1, 2, .. , N}) (N étant le nombre d'états stabilisés hors séisme, c'est à dire 2 fois le nombre de situations du groupe), et l'on construit une matrice [N;N] des valeurs $S'_{alt}(i,j)$.

6.1.4.1 Calcul des $S'_{alt}(i,j)$ sans prise en compte du séisme

Le calcul de $S'_{alt}(i,j)$ est effectué, pour chaque couple d'états stabilisés (i,j), et chaque extrémité du segment, à partir du tenseur des contraintes $S_p(i,j)$ et du tenseur des contraintes linéarisées $S_n(p,q)$:

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

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`.

K_e le facteur de concentration élasto-plastique défini au §B3234.6 du RCC-M.

$$K_e\left(S_n(p,q)\right)=\left|\begin{array}{ll} 1 & \text{si } S_n(p,q)\leq 3.\mathrm{S_m} \\ 1+\dfrac{1-n}{n.(m-1)}.\left(\dfrac{S_n(p,q)}{3.S_m}-1\right) & \text{si } 3.\mathrm{S_m} < S_n(p,q) < 3.m.\mathrm{S_m} \\ \dfrac{1}{n} & \text{si } S_n(p,q)\geq 3.m.\mathrm{S_m} \end{array}\right.$$

Les valeurs de m et n dépendent du matériau, et sont fournis par l'utilisateur dans `DEFI_MATERIAU`, sous les mots clés `M_KE_RCCM` et `N_KE_RCCM`, du mot clé facteur `FATIGUE`.

Remarque :

Dans le cas de chargements mixtes mécanique et thermique, le RCC-M (à partir du modificatif de juin 1994) autorise la décomposition du facteur de concentration élasto-plastique en une composante mécanique (K_{e_meca}) et une composante thermique (K_{e_ther}). Cette méthode de calcul est généralement (mais pas dans tous les cas) un peu moins pénalisante que la méthode ci-dessus. La décomposition mécanique - thermique conduit en effet à des valeurs de Ke plus importantes pour certaines valeurs de Sn.

Nous avons choisi ici de ne pas utiliser cette possibilité pour deux raisons. D'une part la décomposition de K_e n'est rentable que si la part de chargement d'origine thermique est importante (et elle complique l'analyse à la fatigue). D'autre part l'expression de K_{e_ther} proposée dans le RCC-M n'est valable que pour les aciers austénitiques. Dans le cas des aciers ferritiques, les coefficients de l'expression de K_{e_ther} doivent faire l'objet d'une validation au cas par cas, ce qui semble peu compatible avec les objectifs de notre cahier des charges.

On construit ainsi, pour chaque groupe de situation, une matrice carrée symétrique contenant l'ensemble des $S'_{alt}(i,j)$ ainsi obtenus. On associe à cette matrice un vecteur contenant le nombre d'occurrences de chaque état stabilisé. En fait, le procédé ce calcul du facteur d'usage nécessite de calculer deux matrices $S'_{alt}(i,j)$: l'une sans prendre en compte le séisme, l'autre avec prise en compte du séisme. On s'intéresse ici à la matrice sans séisme.

Pour chaque combinaison, $S'_{alt}(i,j)$ est obtenu en deux étapes : il faut d'abord calculer $S_n(p,q)$, puis $S_p(i,j)$.

Il faut rechercher le maximum de $S'_{alt}(i,j)$ pour chaque combinaison d'états de chargement i,j. Mais il faut pour obtenir ces valeurs tenir compte de la variation des contraintes dues aux transitoires thermiques, qui sont variables en fonction du temps. La démarche présentée ici consiste donc à chercher l'instant des contraintes thermiques qui rendent maximum $S'_{alt}(i,j)$.

Les paragraphes suivants correspondent donc à des calculs à effectuer pour tout couple d'état de chargement i,j appartenant aux situations p et q d'un même groupe de situations, et pour tout couple d'instants t_p et t_q transitoires associés respectivement aux situations p et q.

Calcul de Sn(p,q) sans séisme

On calcule l'amplitude équivalente des contraintes linéarisées S_n pour tout couple d'états stabilisés appartenant aux situations p et q du couple i et j courant (en pratique il y a deux états stabilisés par situation, il y a donc 4 combinaisons à calculer).

Tout le long du ligament d'analyse, on calcule le tenseur d'amplitude des contraintes $\sigma(i,j)$

$$\sigma_{ij}(i,j) = \sigma_{ij}(i) - \sigma_{ij}(j)$$

avec $\sigma(\alpha)$le tenseur des contraintes associé à l'état de chargement α.

De plus, il faut ternir compte des transitoires thermiques associés aux situations p et q. On superpose donc à $\sigma(i,j)$ les tenseurs de contraintes correspondant aux transitoires thermiques associés aux situations p et q :

$$\sigma_{ij}(i,j,t_p) = \sigma_{ij}(i,j) + \sigma_{ij}(t_p) \quad \text{et} \quad \sigma_{ij}(i,j,t_q) = \sigma_{ij}(i,j) + \sigma_{ij}(t_q)$$

t_p et t_q représentent deux instants des transitoires associés respectivement aux situations p et q.
On linéarise ensuite $\boldsymbol{\sigma}(i,j,t_p)$ et $\boldsymbol{\sigma}(i,j,t_q)$, composante par composante, le long du ligament :

$$\left(\sigma_{ij}^{moy}\right)_{mn} = \frac{1}{t}.\int_{-t/2}^{t/2} \left(\sigma_{ij}\right)_{mn}(y).dy \quad \text{et} \quad \left(\sigma_{ij}^{fle}\right)_{mn} = \frac{6}{t^2}.\int_{-t/2}^{t/2} y.\left(\sigma_{ij}\right)_{mn}(y).dy$$

$$\left(\sigma_{ij}^{lin}\right)_{mn} = \left(\sigma_{ij}^{moy}\right)_{mn} + \left(\sigma_{ij}^{fle}\right)_{mn}$$

avec : t épaisseur de la paroi
y position radiale du point considéré (y est nulle à mi-épaisseur et positive en surface interne)

Pour chaque combinaison (i,j), on obtient deux valeurs : $S_n(i,j,t_p)$, $S_n(i,j,t_q)$ qui sont respectivement égales à la contrainte équivalente (au sens de Tresca) des deux tenseurs $\sigma_{ij}{}^{lin}(i,j,t_p)$, $\sigma_{ij}{}^{lin}(i,j,t_q)$
On retient finalement la plus grande de ces deux valeurs, pour chacune des 4 combinaisons i,j et ensuite la plus grande valeur parmi les 4 combinaisons :

$$S_n(p,q) = \max_{i,j}\left\{\max_{t_p} S_n(i,j,t_p), \max_{t_q} S_n(i,j,t_q)\right\}$$

On stocke, pour le couple de situation du groupe considéré, les valeurs de $S_n(p,q)$. En effet, la maximisation sur les instants pourrait ne pas être faite à ce niveau, mais seulement au niveau de la valeur de S'_{alt}(i,j). En fait on choisit ici de rendre maximum S_n(p,q) pour que le facteur de correction élastoplastique K_e soit maximum (ce qui est conforme au RCC-M, voir ZH210 par exemple).

Calcul de S_p(i,j) sans séisme

Le calcul de S_p (amplitude équivalente des contraintes totales) est à réaliser pour chacun des deux extrémités du segment, de la façon suivante :

Pour le couple (i,j), à chaque extrémité du segment, on calcule le tenseur d'amplitude des contraintes $\sigma(i,j)$

$$\sigma_{ij}(i,j)=\sigma_{ij}(i)-\sigma_{ij}(j)$$

avec $\sigma(\alpha)$ le tenseur des contraintes associé à l'état de chargement α.

De plus, il faut ternir compte des transitoires thermiques associés aux situations p et q. On superpose donc à $\sigma(i,j)$ les tenseurs de contraintes correspondant aux transitoires thermiques associés aux situations p et q :

$$\sigma_{ij}(i,j,t_p)=\sigma_{ij}(i,j)+\sigma_{ij}(t_p) \text{ et } \sigma_{ij}(i,j,t_q)=\sigma_{ij}(i,j)+\sigma_{ij}(t_q)$$

$S_p(i,j)$ est égal à la contrainte équivalente (au sens de Tresca) au tenseur $\sigma(i,j)$:
Soit σ_1, σ_2 et σ_3 les composantes de $\overline{\sigma}(i,j)$ dans le repère principal,

$$S_p(i,j)=\max\{|\sigma_1-\sigma_2|,|\sigma_2-\sigma_3|,|\sigma_3-\sigma_1|\}$$

Pour chaque combinaison (i,j), on obtient deux valeurs : $S_p(i,j,t_p)$, $S_p(i,j,t_q)$ qui sont respectivement égales à la contrainte équivalente (au sens de Tresca) des deux tenseurs $\sigma_{ij}(i,j,t_p)$, $\sigma_{ij}(i,j,t_q)$

Expression finale de S'$_{alt}$(i,j)

La valeur retenue pour S'$_{alt}$(i,j) est celle qui rend maximum l'expression :

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

Soit : $S'_{alt}(i,j)=\max\left\{\max_{t_p}\left(S'_{alt}(i,j,t_p)\right),\max_{t_q}\left(S'_{alt}(i,j,t_q)\right)\right\}$

On stocke alors cette valeur dans une matrice carrée symétrique contenant l'ensemble des S'$_{alt}$(i,j) sans séisme. On stocke aussi la matrice carré symétrique contenant les valeurs de $K_e(S_n(p,q))$, qui pourront être utilisées pour les sous-cycles.

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 Ke qui correspond à la situation principale dont est issu le sous-cycle.

6.1.4.2 Calcul des S'$_{alt}$(i,j) avec 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 choisissant d'une part, les instants des transitoires thermiques qui maximisent ces amplitudes de contraintes, et d'autre part, la combinaison de signes pour les chargements non signés qui fournissent aussi le maximum.

Calcul de $S_n(p,q)$ avec prise en compte du séisme

Les chargements sismiques ne sont pas signés. Chaque composante du tenseur des contraintes 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.
Après avoir reconstitué les champs de contraintes correspondant aux états stabilisés, d'une part et au séisme, d'autre part, on procède de la façon suivante :
on considère la combinaison de deux états stabilisés i et j, et on calcule $\boldsymbol{\sigma}(i,j,t_p)$ et $\boldsymbol{\sigma}(i,j,t_q)$, comme ci-dessus. On définit, pour chaque nœud du segment, et chacun des deux transitoires thermiques, 64 tenseurs S_k de chargements sismiques correspondant aux 64 combinaisons de signe possibles, pour les 6 composantes du tenseur des contraintes correspondant au chargement sismique, et on les numérote de 1 à 64.
On calcule ensuite l'amplitude équivalente de contrainte linéarisée sur le segment : $S_n(i,j,t_p,S_k)$ correspondant à la chacune des 64 combinaisons :
$S_n(i,j,t_p,S_k)$= contrainte équivalente de Tresca ($\sigma_{ij}^{lin}(i,j,t_p,S_k)$).
On retient finalement $S_n^S(p,q)=\max\limits_{i,j}\left\{\max\limits_{t_p}\left[\max\limits_{k} S_n(i,j,t_p,S_k)\right],\max\limits_{t_q}\left[\max\limits_{k} S_n(i,j,t_q,S_k)\right]\right\}$

On stocke, pour l'ensemble des couples de situations du groupe considéré, les valeurs de $S_n^S(m,n)$

6.1.4.3 Calcul de Sp(i,j) avec prise en compte du séisme

De même que précédemment, les chargements sismiques n'étant pas signé, il faut retenir sur chaque composante un signe tel que la contrainte calculée soit majorée. Le tenseur des contraintes comptant six composantes, il existe donc 64 combinaisons de signes à examiner. Pour chaque combinaison de signe et chaque instant, on obtient deux valeurs : $S_p(i,j,t_p,S_k)$, $S_p(i,j,t_q,S_k)$ qui sont respectivement égales à la contrainte équivalente (au sens de Tresca) des deux tenseurs $\sigma_{ij}(i,j,t_p)$, $\sigma_{ij}(i,j,t_q)$. On stocke ces valeurs.

Expression finale de $S'_{alt}(i,j)$

La valeur retenue pour $S'_{alt}(i,j)$ est celle qui rend maximum l'expression :

$$\boxed{S'_{alt}(i,j,t_p,S_k)=\frac{1}{2}.\frac{E_c}{E}.K_e\left(S_n^S(p,q)\right).S_p(i,j,t_p,S_k)}$$

Soit : $S'_{alt}(i,j,S)=\max\left\{\max\limits_{t_p}\left(\max\limits_{k}\left[S'_{alt}(i,j,t_p,S_k)\right]\right),\max\limits_{t_q}\left(\max\limits_{k}\left[S'_{alt}(i,j,t_q,S_k)\right]\right)\right\}$

On stocke alors cette valeur dans une matrice carrée symétrique contenant l'ensemble des $S'_{alt}(i,j)$ avec séisme.

6.1.5 Calcul des amplitudes de contraintes pour les situations de passage entre groupe de situations

Pour chaque situation de passage d'un groupe à un autre, on considère 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. On construit encore une matrice (rectangulaire) contenant tous les $S'_{alt}(i,j)$, à laquelle on associe le nombre d'occurrences de la situation de passage.

En effet, 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.

6.1.6 Stockage des amplitudes de contraintes pour toutes les combinaisons

Pour effectuer le calcul du facteur d'usage, les amplitudes des contraintes calculées précédemment et les nombres d'occurrences associés sont stockées dans une matrice carrée contenant toutes les amplitudes de contraintes S'alt 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 :

S'alt		Groupe 1				Groupe 2				Groupe 3			
		Etat1	…	Etat j	…	…	…	Etat l	…	…	..	Etat n	Etat N
Groupe 1	Etat 1	S'alt	...	...	...	0	0	0	0	...	...	...	...
	Etat i			S'alt(i,j)	...	0	0	0	0	...	...	S'alt(i,n)	...
	…				...	0	0	0	0	...	...	...	...
	…				...	0	0	0	0	...	...	...	...
Groupe 2	….					...	...	...	...	0	0	0	0
	Etat k						...	S'alt(k,l)	...	0	0	0	0
	…							...	...	0	0	0	0
	….			SYM					...	0	0	0	0
Groupe 3	….									...	...	...	...
	Etat m										...	S'alt(m,n)	...
	…											...	...
	Etat 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 caque combinaison d'états des groupes 1 et 3 la valeur de S'alt.
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 $S'_{alt}(i,j,S)$ qui prennent en compte de séisme. Il y a donc deux matrices donnant toutes les valeurs possibles de S'alt.

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 :

Etat	Situation	groupe	Sous-cycle	nocc
Etat 1	1	1	0	N1
…	1	1	0	N1
Etat i	2	1	0	Ni
…	2	1	0	Ni
Etat k	3	2	0	Nk
…	…	…	…	…
Etat m	…	3	nsous	0
…	…	…	…	…
Etat N	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
3	1	npass
…	…	…

6.2 Calcul du facteur d'usage

Pour l'ensemble des combinaisons d'états de chargement (à l'intérieur d'un groupe de situations ou associée à une situation de passage), et pour chaque extrémité du segment :

La démarche générale décrite par le §ZH210 du code RCC-M est la suivante :

On considère l'ensemble des N états stabilisés, et on construit :

- la matrice [N,N] des amplitudes équivalentes de contrainte S'_{alt}(i,j,T,S) correspondant à la superposition du transitoire de passage de l'état stabilisé i à l'état stabilisé j, du transitoire thermique associé et du chargement sismique.
- la matrice [N,N] des amplitudes équivalentes de contrainte S'_{alt}(i,j,T) correspondant à la superposition du transitoire de passage de l'état stabilisé i à l'état stabilisé j et du transitoire thermique associé (sans séisme).

On note :

n_k le nombre de cycles associé à la situation p à laquelle appartient l'état stabilisé k ;
n_l le nombre de cycles associé à la situation q à laquelle appartient l'état stabilisé l ;
N_s le nombre d'occurrences du séisme (en général seul de 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 $N_S \neq 0$, on sélectionne les Ns/2 combinaisons les plus pénalisantes, c'est à dire les Ns/2 combinaisons (k,l) menant aux plus grandes valeurs de S'_{alt}(k,l), sans prendre en compte le séisme.

Pour chacune de ces Ns/2 combinaisons :

- On calcule le facteur d'usage u_1(k,l) associé à S'_{alt}(i,j,T,S) : $u_1(k,l)=\dfrac{1}{N(k,l)}$, avec N(k,l) le nombre de cycles admissibles associés à S'_{alt}(i,j,T,S).
- On prend en compte les n_s sous-cycles du séisme par : $S'_{alt\_SC}(k,l)$, k et l étant les deux états extrêmes du sous-cycle. Alors : $u_2(k,l)=\dfrac{(2.n_s-1)}{N_{SC}(k,l)}$ avec N_{SC}(k,l) nombre de cycles admissibles pour l'amplitude de contrainte S'_{alt_SC}(k,l).

- On obtient alors : $u(k,l) = u_1(k,l) + u_2(k,l)$
- On recommence ce calcul jusqu'à épuisement des Ns/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 Ns/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 $n_0 = \min\{n_k, n_l, n_{pass}\}$ si n_{pass} est non nul, ou bien $n_0 = \min\{n_k, n_l\}$ si n_{pass} est nul.
- on calcule le nombre de cycles admissibles N(k,l) pour l'amplitude de contrainte $S'_{alt}(k,l)$. N(k,l) correspond à l'abscisse du point d'ordonnée $S'_{alt}(k,l)$ dans la courbe de Wöhler associée au matériau.
- On calcule le facteur d'usage u(k,l) associé à l'amplitude de contrainte $S'_{alt}(k,l)$: $u(k,l) = \dfrac{n_0}{N(k,l)}$
- On incrémente le facteur d'usage global : U = U + u(k,l)
- On remplace :
  n_k par $(n_k - n_0)$
  n_l par $(n_l - n_0)$
  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 courbe 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.

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

Le facteur d'usage U_g de chaque extrémité du segment pour le groupe considéré est alors défini par :

$U_g = \sum u(k,l)$. Il est cumulé avec le facteur d'usage total : $U_{tot} = U_{tot} + U_g$

7 Bibliographie

[1] « RCC-M : Règles de Conception et de Construction des matériels mécaniques des îlots nucléaires PWR. Edition 1991 » 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« RCC-M : Règles de Conception et de Construction des matériels mécaniques des îlots nucléaires PWR. Edition 1993 » Edité par l'AFCEN : Association française pour les règles de conception et de construction des matériels des chaudières électro-nucléaires.

[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

Page laissée intentionnellement blanche.