# Post-traitement selon le RCC-M

**Résumé :**

L'opérateur POST_RCCM [U4.83.11] 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. Les critères de niveau 0 visent à prémunir le matériel contre les dommages de déformation excessive, d'instabilité plastique, élastique et élastoplastique. Les critères de niveau A visent quant à eux à prémunir le matériel contre les dommages de déformation progressive et de fatigue.
Il permet également le calcul des critères de niveau A des chapitres B3600 et ZE200 en post-traitement de calculs de tuyauteries.
Enfin, il permet d'évaluer la tenue en fatigue environnementale pour les chapitres B3200 et ZE200.
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.



Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

# Table des matières

Introduction....5
Généralités....6
Données géométriques....6
Données matériau....6
Hypothèses simplificatrices....7
Calculs effectués par POST_RCCM....7
Critères de niveau 0 spécifiés par le RCC-M (mot-clé PM_PB)....8
Contrainte équivalente primaire générale de membrane....8
Contrainte équivalente primaire de membrane locale....8
Contrainte équivalente primaire de membrane+flexion....8
Critères de niveau A spécifiés par le RCC-M (mot-clés SN et FATIGUE/FATIGUE_ZH210)....8
Calcul de Sn et Sn*....9
Calcul du rochet thermique....9
Calcul du facteur d'usage en fatigue....10
Algorithme de calcul du facteur d'usage total....10
Calcul de Salt....10
Type 'B3200'....12
Données de chargement....12
Calculs effectués avec l'option 'PM_PB'....13
Calculs effectués avec l'option 'SN'....13
Méthode de sélection des instants....14
Calcul de Sn....14
Calcul de Sn*....15
Calcul du rochet thermique....15
Calculs effectués avec l'option 'FATIGUE'....15
Combinaison des situations à l'intérieur de chaque groupe de situations....16
Calcul de Sn....16
Calcul de Sn (p,q)....16
Calcul de Sp....16
Calcul de Sp1(p,q) et Sp2(p,q)....17
Calcul de Spméca et Spther....17
Calcul de S ALT et FUELEM....18
Situations de passage....19
Groupe de partage....19
Gestion des sous-cycles....19
Stockage....19
Prise en compte du séisme....21
Calcul du facteur d'usage total....21
Types 'ZE200a' et 'ZE200b'....24
Données de chargement....24
Calculs effectués avec l'option 'SN'....24
Type ' ZE200a '....24
Type ' ZE200b '....25
Calculs effectués avec l'option 'FATIGUE'....25



Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Combinaison des situations à l'intérieur de chaque groupe de situations....25
Calcul de Sn....25
Calcul de Sp....26
Calcul de Spméca et Spther....28
Calcul du Facteur d'usage total....30
Fatigue environnementale....30
Calcul du FEN....30
Calcul du facteur d'usage avec effet d'environnement....32
Critère sur la déformation minimale....32
FEN global et FEN intégré....32
Type 'EVOLUTION'....32
Données de chargement....32
Calculs effectués avec l'option 'AXIS' et 'RAYON_MOYEN'....33
Calculs effectués avec l'option 'PM_PB'....34
Calculs effectués avec l'option 'SN'....35
Calcul de Sn....35
Calcul de Sn*....35
Calcul du rochet thermique....35
Calculs à la fatigue avec l'option 'FATIGUE_ZH210'....36
Calcul des facteurs d'usage élémentaires....36
Calcul du facteur d'usage total....37
Calculs du facteur d'amorçage avec l'option 'AMORCAGE'....38
Principe du calcul du facteur d'amorçage....38
Calcul dans code_aster....39
Type 'B3600'....41
Calcul préalable de tous les états de chargement....41
Calculs des états de chargement statiques....41
Calcul des chargements sismiques....41
Combinaison des composantes inertielles et différentielles dues au séisme....42
Calcul des transitoires thermiques....42
Calculs des amplitudes de variation des contraintes....43
Principe de la méthode....43
Calcul des combinaisons de chargement à l'intérieur de chaque groupe....43
Notations et définitions....44
Calcul de Sp....44
Calcul de Sn....45
Calcul de Salt....45
Calcul des combinaisons de chargement pour les situations de passage....46
Calcul du facteur d'usage....47
Annexe 1 : Équations B3200 pour des situations sous forme unitaire....49
Calculs effectués avec l'option 'PM_PB'....49
Calculs effectués avec l'option 'SN'....50
Calcul de Sn....50
Calcul de Sn*....50
Rochet thermiques....51
Calculs effectués avec l'option 'FATIGUE'....51
Calcul de Sn....51
Calcul de Sp....51
Calcul de Sp meca....52



Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Annexe 2 : Équations B3200 pour des situations sous forme unitaire avec interpolation sur la température....52
Calcul de Sn pour une situation....53
Calculs effectués avec l'option 'FATIGUE'....53
Calcul de Sn pour une combinaison de situations p et q....54
Calcul de Sp pour une combinaison de situations p et q....54
Annexe 3 : Équations pour une jonction de tuyauteries (piquage)....55
Type ' B3200 '....55
Type ' ZE200a '....56
Type ' ZE200b '....57
Annexe 4 : Calcul du SP et du SPmeca d'une situation seule ('B3200', 'ZE200a' et 'ZE200b')....58
Type 'B3200'....58
Type ' ZE200a '....59
Type ' ZE200b '....59
Annexe 5 : Méthode de calcul du transitoire fictif 2 avec 'TOUT_INST'....60
Annexe 6 : Méthode 'B3200' avec indices de contraintes....60
Annexe 7 : Équations avec prise en compte du séisme....61
Calcul des grandeurs pour une situation....61
Type 'B3200'....61
Type ' ZE200a '....63
Type ' ZE200b '....64
Bibliographie....65
Description des versions du document....66



Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

# 1 Introduction

Le RCC-M [65] décrit les règles générales d'analyse du comportement des matériels 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 c*ode_aster*, il est possible de réaliser quatre types de calcul :

- calcul des critères de niveau 0 et A du chapitre B3200 en post-traitement de calculs sur des structures 2D ou 3D ;
- calcul des critères de fatigue du chapitre B3600 en post-traitement de calculs de tuyauteries ;
- calcul des critères de fatigue de l'annexe ZE200 en post-traitement de calculs de tuyauteries. La méthode suivant l'annexe ZE200 est une méthode mixte qui mélange équations simplifiées du B3600 et analyse détaillée du B3200.
- calcul de fatigue environnementale compatible avec les chapitres B3200 et l'annexe ZE200 du RCC-M. La tenue en fatigue environnementale a été intégrée au RCC-M édition 2016 sous forme d'une Règle en Phase Probatoire (RPP).

Le chapitre 2 rappelle des généralités sur le chapitre B3200 et l'annexe ZE200 du RCC-M.

Les critères du B3200 correspondent dans l'opérateur POST_RCCM aux méthodes (TYPE_RESU_MECA) 'B3200' et 'EVOLUTION'. Leur calcul est détaillé dans les chapitres 3 et 6. 'EVOLUTION' permet de faire du calcul de facteur d'amorçage pour les singularités géométriques et est bien adapté aux cas où il y a peu de situations. A contrario, 'B3200' est bien adapté aux calculs pour de nombreuses situations, qui peuvent être réparties sur plusieurs groupes de fonctionnement. Le séisme, les situations de passage et la fatigue environnementale peuvent être pris en compte avec ce TYPE_RESU_MECA.

Les critères du ZE200 correspondent dans l'opérateur POST_RCCM aux méthodes 'ZE200a' et 'ZE200b'. Leur calcul est détaillé dans le chapitre 4.

Le calcul de la tenue en fatigue environnementale est décrite dans le chapitre 5.

Le critère de fatigue du B3600 correspond dans l'opérateur POST_RCCM à la méthode 'B3600'. Leur calcul est détaillé dans le chapitre 7.



Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

# 2 Généralités

Ce chapitre vise à rappeler quelques définitions de base associées au chapitre B3200 et à l'annexe ZE200 du RCC-M. **Il ne concerne pas le chapitre B3600.**

Ce chapitre permet également de décrire les adaptations nécessaires réalisées dans c*ode_aster*, qui sont motivées dans [65] et [66]. Les critères du chapitre B3200 correspondent dans l'opérateur POST_RCCM aux méthodes TYPE_RESU_MECA='EVOLUTION' et TYPE_RESU_MECA='B3200'. Les critères de l'annexe ZE200 correspondent dans l'opérateur POST_RCCM aux méthodes TYPE_RESU_MECA='ZE200a' et TYPE_RESU_MECA='ZE200b'.

## 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 dans la partie 6.5).

***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 c*ode_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 défini dans MACR_LIGN_COUPE.

On calcule tous les critères systématiquement aux deux extrémités du segment (calcul du Pm, du facteur d'usage...).

***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. Le facteur d'amorçage ne peut être calculé qu'avec le type 'EVOLUTION'.
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.

## 2.2 Données matériau

Les données matériau nécessaires au calcul sont les suivantes :

- $Sm$ : valeur admissible (tabulée dans le RCC-M Annexe ZI).
- $Sy$ : limite conventionnelle d'élasticité (tabulée dans le RCC-M Annexe ZI 2.1).
- $m, n$ : constantes matériau pour le calcul de $Ke$ (définies dans le RCC-M B3234.6)
- $E_c$, $E$ : modules d'élasticité (pour la correction de la courbe de fatigue, annexe ZI).
- Courbes de fatigue du matériau : selon le RCC-M annexe ZI.
- 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.



Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

## 2.3 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. 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.

## 2.4 Calculs effectués par POST_RCCM

On décrit dans la suite le fonctionnement de la commande POST_RCCM permettant d'effectuer le calcul de certains critères de niveaux 0 et A du RCC-M B3200 et des critères de niveau A de l'annexe ZE200. La réalisation décrite ici ne prend pas en compte tous les critères du B3200 et pourra être complétée.

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 maximales. La recherche automatique de ce segment 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.

Quatre types de critères sont accessibles chacun par le mot-clé facteur 'OPTION' :

- 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 de niveau A par les mots-clé FATIGUE (pour les types 'B3200', 'ZE200a' et 'ZE200b') ou FATIGUE_ZH210 (pour le type 'EVOLUTION'),



Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

• un critère de fatigue environnementale par le mot-clé EFAT. Ce critère est compatible avec les options 'B3200', 'ZE200a' et 'ZE200b'.

Par ailleurs, avec la méthode 'EVOLUTION' uniquement, il est possible de vérifier le critère d'amorçage (critère de niveau A) dans une zone singulière (mot clé AMORCAGE).

## 2.5 Critères de niveau 0 spécifiés par le RCC-M (mot-clé PM_PB)

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 et sont disponibles pour les types 'B3200' et 'EVOLUTION'.

### 2.5.1 Contrainte équivalente primaire générale de membrane

Étant donnée la contrainte primaire de la situation de référence (1ère catégorie) et un segment situé hors d'une zone de discontinuité majeure. En chaque point extrémité de ce segment de longueur *l*, on calcule $P_m$ et le critère s'écrit (B3233.1) :

$$P_m \leq S_m$$

$S_m$ est la contrainte équivalente admissible, tabulée dans l'annexe ZI 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.

### 2.5.2 Contrainte équivalente primaire de membrane locale

Étant 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 (B3233.2) :

$$P_l \leq 1.5\, S_m$$

### 2.5.3 Contrainte équivalente primaire de membrane+flexion

Étant donnée la contrainte primaire de la situation de référence (1ère catégorie) et un segment (orienté). En chaque point extrémité de ce segment de longueur $l$, (extrémités correspondant aux peaux externe et interne), on calcule $P_{mb}$ et $P_{lb}$ et les critères s'écrivent (B3233.3) :

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

## 2.6 Critères de niveau A spécifiés par le RCC-M (mot-clés SN et FATIGUE/FATIGUE_ZH210)

Les critères de niveau A visent à prémunir le matériel contre les dommages de déformation progressive et de fissuration progressive. Avec les méthodes 'EVOLUTION', 'B3200', 'ZE200a' et 'ZE200b', quatre types de critères peuvent être vérifiés :

- Amplitude de variation des contraintes linéarisées $S_n$ (option 'SN') ;
- Amplitude de variation de $S_{n^*}$ (option 'SN') ;



Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

- Calcul du rochet thermique (option 'SN') ;
- Calcul du facteur d'usage en fatigue (options 'FATIGUE'/'FATIGUE_ZH210')

1.

Ces différents paramètres et les critères associés sont décrits ci-dessous tels que définis dans le RCC-M. Dans la partie 7, on introduit une hypothèse simplificatrice avant de détailler leur calcul dans c*ode_aster* dans les chapitres 3, 4 et 6.

### 2.6.1 Calcul de Sn et 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. En chaque point extrémité de ce segment de longueur $l$, on calcule $S_n$ selon le paragraphe B3232.6 et 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 :

- on calcule $S_{n^*}$ l'amplitude $S_n$ calculée sans prendre en compte les contraintes de flexion d'origine thermique et on doit 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.

### 2.6.2 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 :

$\sigma_\theta$, valeur maximale admissible de l'amplitude de variation de la contrainte d'origine thermique,

$\sigma_m$, 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 : $\%sigma_{\%thêta}=f(\%sigma_m, S_y)$. En posant $y'=\dfrac{\%sigma_{\%thêta}}{S_y}$ et $x=\dfrac{\%sigma_m}{S_y}$, on a

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



Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

pour $0<x\leq 0.5$

$y'=4(1-x)$ pour $0.5<x<1$

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

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

et pour $x<0,615$ : interpolation linéaire entre les points : $x=0,3\ ;0,4\ ;0,5$ et $y'=4,65\ ;3,55\ ;2,7$ .

En résumé, la contrainte de membrane $\%sigma_m$ est donc calculée par linéarisation de la contrainte de pression, puis on en déduit deux grandeurs $\sigma_{\theta_{LINE}}$ et $\sigma_{\theta_{PARA}}$ grâce aux équations ci-dessus. Ces deux grandeurs sont les valeurs maximales admissibles respectives de $Sn_{ther}$ et $Sp_{ther}$.

## 2.6.3 Calcul du facteur d'usage en fatigue

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

$$FU_{TOTAL}<1$$

### 2.6.3.1. Algorithme de calcul du facteur d'usage total

De manière schématique, l'algorithme de calcul de $FU_{TOTAL}$ défini dans le chapitre B3200 du RCC-M est le suivant :

1) On calcule le facteur d'usage élémentaire de chaque combinaison de situations. La combinaison des situations p et q repose sur la définition de deux transitoires fictifs 1 et 2. Le facteur d'usage élémentaire est la somme des facteurs d'usage dû à chacun de ces transitoires. A la fin de cette étape, on dispose d'une matrice symétrique (nxn) de facteurs d'usage élémentaires (n étant le nombre de situations),

$$FU_{ELEM}(p,q)=FU_{transitoire1}+FU_{transitoire2}$$

2) On initialise le facteur d'usage total à 0,

$$FU_{TOTAL}=0$$

3) On identifie la combinaison de situations k et l la plus pénalisante (facteur d'usage élémentaire maximal) et on le multiplie par le minimum des nombres d'occurrences de ces deux situations,

$$FU_{TOTAL}=FU_{TOTAL}+FU_{ELEM}(k,l)*min(n_k,n_l)$$

4) On réactualise le nombre d'occurrences des situations k et l,

$$n_k=n_k-min(n_k,n_l) \qquad n_l=n_l-min(n_k,n_l)$$

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.

$FU_{ELEM}(p,q)$ le facteur d'usage élémentaire pour une combinaison de situations p et q est calculé en introduisant dans la courbe de fatigue du matériau (courbe de Wöhler) les amplitudes de variation des contraintes alternées des deux transitoires fictifs $S^1_{ALT}(p,q)$ et $S^2_{ALT}(p,q)$.

### 2.6.3.2. Calcul de Salt



Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

$S^1_{ALT}(p,q)$ et $S^2_{ALT}(p,q)$ sont définies à partir de l'amplitude de variation des contraintes linéarisées $S_n(p,q)$ et l'amplitude de variation des contraintes totales des deux transitoires fictifs $S_{p^1}(p,q)$ et $S_{p^2}(p,q)$.

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

- KE_MECA :

$$S^1_{ALT}(p,q)=\frac{1}{2}.\frac{E_c}{E}.K_e(S_n).S_{p^1}$$

$$S^2_{ALT}(p,q)=\frac{1}{2}.\frac{E_c}{E}.K_e(S_n).S_{p^2}$$

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. $K_e$ est le facteur de concentration élasto-plastique fonction de $S_n(p,q)$ :

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

- 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.

KE_MIXTE : depuis le modificatif 1997 du RCC-M [1], on peut choisir une autre formule, basée sur une décomposition de $S_{ALT}$ :

$$S^1_{ALT}(p,q)=\frac{1}{2}.\frac{E_c}{E}.\left(K_{e^{meca}}(S_n).S_{p^{meca,1}}+K_{e^{ther}}(S_n).S_{p^{ther,1}}\right)$$

$$S^2_{ALT}(p,q)=\frac{1}{2}.\frac{E_c}{E}.\left(K_{e^{meca}}(S_n).S_{p^{meca,2}}+K_{e^{ther}}(S_n).S_{p^{ther,2}}\right)$$

avec :

- $K_{e^{meca}}(S_n)$ est égal au $K_e$ défini ci-dessus,
- $K_{e^{ther}}(S_n)=\max\left(1,86\left(1-\frac{1}{1,66+\frac{S_n}{S_m}}\right),1\right)$,
- $S_{p^{meca,1}}$ et $S_{p^{meca,2}}$ représentent les amplitudes de variation de la part mécanique des



Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

contraintes totales des transitoires fictifs 1 et 2

- $S_{p^{ther,1}}$ et $S_{p^{ther,2}}$ sont calculées à partir des contraintes totales $S_{p^1}$ et $S_{p^2}$ auxquelles on retranche respectivement les contraintes d'origine mécanique $S_{p^{meca,1}}$ et $S_{p^{meca,2}}$ .



Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

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

$$FU_{ELEM}(p,q)=FU_{transitoire1}+FU_{transitoire2}=f(S^1_{ALT})+f(S^2_{ALT}).$$

**Remarque :**

*1) Pour calculer le facteur d'usage élémentaire d'une situation p combinée avec elle même, en* KE_MECA, $S^1_{ALT}(p,q)=\frac{1}{2}.\frac{E_c}{E}.K_e(S_n(p,p)).S_p(p,p)$ *et* $S^2_{ALT}(p,q)=0$ .

*En* KE_MIXTE,
$S^1_{ALT}(p,q)=\frac{1}{2}.\frac{E_c}{E}.(K_{e^{meca}}(S_n(p,p)).S_{p^{meca}}(p,p)+K_{e^{ther}}(S_n(p,p)).S_{p^{ther}}(p,p))$ *et*
$S^2_{ALT}(p,q)=0$

*2) Dans le RCC-M, la contribution des sous-cycles est également prise en compte dans le facteur d'usage élémentaire. Dans code_aster, cette grandeur n'est pas prise en compte.*

# 3 Type 'B3200'

## 3.1 Données de chargement

Le type 'B3200' est bien adaptée aux calculs sur un composant soumis à de nombreuses situations. Plusieurs groupes de fonctionnement peuvent également être définis, avec éventuellement des situations de passage entre ces groupes. Des groupes de partage et un séisme peuvent être pris en compte également.

Une situation est définie par son chargement thermique, de pression et mécanique (efforts et moments). Dans code_aster les chargements peuvent être rentrés sous différentes formes.

- la thermique ne peut être rentrée que sous forme de transitoire $\sigma_{ther}$ ( RESU_THER )
- les chargements de pression peuvent être rentré de deux manières :
  - sous forme de transitoire $\sigma_{pres}$ ( RESU_PRES )
  - sous forme de chargement unitaire $\sigma^P$ avec deux pressions $P_A$ et $P_B$ pour les états stabilisés ( RESU_MECA_UNIT, PRES_A et PRES_B ),
- les contraintes liées aux chargements mécaniques (efforts et moments) :
  - sous forme d 'un transitoire $\sigma_{meca}$ ( RESU_MECA )
  - avec des chargements unitaires (efforts et moments globaux unitaires appliqués aux limites du modèle) avec deux torseurs pour les états stabilisés (CHAR_ETAT_A et CHAR_ETAT_B). Ces efforts peuvent être soit calculés avec c*ode_aster* , soit issus de la base de données OAR.
  - avec des chargements unitaires auxquels on applique un torseur, ce torseur est calculé par l' interpol ation entre deux torseurs ( CHAR_ETAT_ A et CHAR_ETAT_ B ) qui correspondent aux températures TEMP_A , et TEMP_B et grâce à la température au cours de la situation TABL_TEMP.

Tous les types de situations peuvent être combinées dans code_aster. Par exemple, l'utilisateur peut rentrer une première situation dont tous les chargements sont sous forme de transitoire puis une seconde situation dont la thermique et la pression sont sous forme de transitoire et la mécanique avec des chargements unitaires.



Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

**Par souci de clarté, seules les équations dans le cas où toutes les situations sont décrites par des chargements transitoires sont présentées dans ce chapitre**.

L'Annexe 1 donne les équations dans le cas où toutes les situations sont décrites sous forme unitaire. L'Annexe 2 donne les équations dans le cas où toutes les situations sont décrites sous forme unitaire avec interpolation sur la température.

Dans ce chapitre, toutes les situations de fonctionnement peuvent être décomposées en transitoires, c'est-à-dire des évolutions des contraintes dues aux différents chargements en fonction du temps :
- un transitoire somme des transitoires dus aux efforts et aux moments (défini sous `'RESU_MECA'` ),
- un transitoire dû à la pression (défini sous `'RESU_PRES'`),
- un transitoire thermique (défini sous `'RESU_THER'`).

**Remarques :**
- *Pour les piquages, l'utilisateur doit alors rentrer sous `RESU_MECA` un tenseur mécanique transitoire qui est la somme des deux tenseurs d'efforts associés au corps et à la tubulure. L'Annexe 3 résume les équations dans ce cas.*
- *Le transitoire thermique, le transitoire de pression et le transitoire mécanique correspondant à une situation doivent être définis aux mêmes instants*

## 3.2 Calculs effectués avec l'option `'PM_PB'`

Pour l'instant, cette option est disponible si tous les chargements mécaniques et de pression des situations sont sous forme unitaire.
Étant donnée la contrainte primaire de la situation de référence (1ère catégorie) et un segment situé hors d'une zone de discontinuité majeure. En chaque point extrémité de ce segment de longueur *l*, on calcule pour une situation :

Avec $\sigma_{ij}=\sigma_{ij,pres}+\sigma_{ij,meca}$

$$P_m=\max_t \| \sigma_{ij}^{moy} \|_{TRESCA} \text{ avec } \sigma_{ij}^{moy}=\frac{1}{l}\int_0^l \sigma_{ij}\,\text{ds et } \| \tau_{ij} \|_{TRESCA}=\max_{I,J}|\tau_I-\tau_J|$$

$$(\tau_{II=1,3} \text{ étant les contraintes principales})$$

$$P_b=\max_t \| \sigma_{ij}^{fle} \|_{TRESCA} \text{ avec } \sigma_{ij}^{fle}=\frac{6}{l^2}\int_0^l \left(s-\frac{l}{2}\right)\sigma_{ij}\,\text{ds}$$

$$P_{mb}=\max_t \| \sigma_{ij}^{lin} \|_{TRESCA} \text{ avec } \sigma_{ij}^{lin}(s=0)=\sigma_{ij}^{moy}-\sigma_{ij}^{fle}$$
$$\sigma_{ij}^{lin}(s=l)=\sigma_{ij}^{moy}+\sigma_{ij}^{fle}$$

## 3.3 Calculs effectués avec l'option `'SN'`



Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Les points de calcul sont les deux extrémités du segment. Pour une situation donnée, en chaque point extrémité de ce segment de longueur $l$, on calcule $S_n$ selon le paragraphe B3232.6 :

$$S_n = \max_{t_1,t_2} \| \sigma_{ij}^{lin}(t_1) - \sigma_{ij}^{lin}(t_2) \|_{TRESCA} \text{ où } \sigma^{lin}(s=0) = \sigma^{moy} - \sigma^{fle} \text{ et}$$
$$\sigma^{lin}(s=l) = \sigma^{moy} + \sigma^{fle}$$

Dans le cas où la situation est décrite de manière instantanée (cf partie 12 ), cette définition est applicable directement.
Dans code_ aster, lorsque la situation est définie de manière unitaire avec deux états stabilisés et un transitoire thermique, la formule a été adaptée en introduisant une méthode de sélection des instants. Cette méthode est décrite dans la partie 14 .

### 3.3.1 Méthode de sélection des instants

Dans la méthode `'B3200'` développée dans c*ode_aster*, une méthode de sélection des instants a été implémentée (`'TRESCA'` sous le mot-clé `'METHODE'`)

On va ainsi supposer que les instants qui correspondent aux extrema de l'amplitude de variation des contraintes (linéarisées ou totales) de la combinaison de deux situations sont aussi les instants correspondants aux extrema des contraintes de chacune des situations prises seule.

Quatre instants $t^{maxSn}$, $t^{minSn}$, $t^{maxSp}$ et $t^{minSp}$ sont donc identifiés préalablement pour chaque situation. On note $\sigma_{tran}$ le tenseur des contraintes somme des tenseurs sous forme de transitoire.

$t^{maxSn}$ et $t^{minSn}$ correspondent aux extrema de la contrainte transitoire linéarisée de la situation, au sens d'une contrainte équivalente de Tresca signée par la trace des contraintes :

$$t^{minSn} = \mathrm{Argmin}\left( \| \sigma_{tran}^{lin}(t) \| . \mathrm{sgn}\left( \mathrm{Tr}\left( \sigma_{tran}^{lin}(t) \right) \right) \right)$$
$$t^{maxSn} = \mathrm{Argmax}\left( \| \sigma_{tran}^{lin}(t) \| . \mathrm{sgn}\left( \mathrm{Tr}\left( \sigma_{tran}^{lin}(t) \right) \right) \right)$$

$t^{maxSp}$ et $t^{minSp}$ correspondent aux extrema de la contrainte transitoire totale de la situation, au sens d'une contrainte équivalente de Tresca signée par la trace des contraintes :

$$t^{minSp} = \mathrm{Argmin}\left( \| \sigma_{tran}(t) \| . \mathrm{sgn}\left( \mathrm{Tr}\left( \sigma_{tran}(t) \right) \right) \right)$$
$$t^{maxSp} = \mathrm{Argmax}\left( \| \sigma_{tran}(t) \| . \mathrm{sgn}\left( \mathrm{Tr}\left( \sigma_{tran}(t) \right) \right) \right)$$

**Remarque :**

> *Il y a en réalité 2x4 instants qui sont identifiés au préalable pour chaque situation : à l'origine et à l'extrémité du segment d'analyse.*

Cette méthode de sélection des instants permet un gain de temps non négligeable. Elle est disponible en choisissant la valeur `'TRESCA'` sous le mot clé `'METHODE'`.La méthode de sélection des instants par le tresca signé est prise par défaut si l'utilisateur ne spécifie rien. Mais elle peut manquer de robustesse dans le cas notamment où le repère des contraintes principales tournent.
Il est alors possible de tester tous les instants des transitoires, en choisissant la valeur `'TOUT_INST'` sous le mot clé `'METHODE'`. On ne peut pas différencier la méthode de sélection des instants pour Sn et Sp.

### 3.3.2 Calcul de Sn

On note $\sigma_{tran}(t)$ le tenseur transitoire associé à la situation ; et $t^{maxSn}$ et $t^{minSn}$ les instants extrémaux tels que définis au 14.



Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Avec 'METHODE' = 'TRESCA', le paramètre $S_n$ pour la situation est défini par :

$$S_n = \| \sigma_{tran}^{lin}(t^{maxSn}) - \sigma_{tran}^{lin}(t^{minSn}) \| .$$

Avec 'METHODE' = 'TOUT_INST', le paramètre $S_n$ pour la situation est défini par :

$$S_n = \max_{t_1,t_2} \| \sigma_{tran}^{lin}(t_1) - \sigma_{tran}^{lin}(t_2) \| .$$

**Remarque :**

*Dans ce cas,* $\sigma_{tran}(t) = \sigma_{ther}(t) + \sigma_{pres}(t) + \sigma_{meca}(t)$ .

### 3.3.3 Calcul de Sn*

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 :

$$S_n^* = \max_{t_1,t_2} \| \sigma_{tran}^{lin}(t_1) + \sigma_{ther}^{fle}(t_1) - (\sigma_{tran}^{lin}(t_2) + \sigma_{ther}^{fle}(t_2)) \|$$

- A l'extrémité du segment :

$$S_n^* = \max_{t_1,t_2} \| \sigma_{tran}^{lin}(t_1) - \sigma_{ther}^{fle}(t_1) - (\sigma_{tran}^{lin}(t_2) - \sigma_{ther}^{fle}(t_2)) \|$$

avec $\sigma_{ther}^{fle} = \frac{6}{l^2} \int_0^l (s - \frac{l}{2}) \sigma_{ther} ds$ .

### 3.3.4 Calcul du rochet thermique

Il faut 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 généré par la commande apparaissent, pour chaque extrémité de chaque segment d'analyse, pour les situations et pour les combinaisons de situations :

- le maximum de la contrainte de membrane générale due à la pression $\%sigma_m$ ('SIG_PRES_MOY')
- l'amplitude linéarisée de variation de la contrainte d'origine thermique $Sn_{ther}$ et sa valeur maximale admissible $\sigma_{\theta_{LINE}}$ ('SN_THER' et 'CRIT_LINE')
- l'amplitude de variation de la contrainte d'origine thermique $Sp_{ther}$ et sa valeur maximale admissible $\sigma_{\theta_{PARA}}$ ('SP_THER' et 'CRIT_ PARAB ')

## 3.4 Calculs effectués avec l'option 'FATIGUE'

On rappelle que le calcul du facteur d'usage élémentaire nécessite au préalable le calcul de l'amplitude



Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

de variation des contraintes linéarisées $S_n$ et totales $S_p$ pour chacune des combinaisons de situations (partie 10). 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.
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.

## 3.4.1 Combinaison des situations à l'intérieur de chaque groupe de situations

### 3.4.1.1. Calcul de Sn

Il ne faut pas oublier le cas où la combinaison la plus pénalisante des contraintes linéarisées correspond aux deux extrema de la même situation. Pour la combinaison des situations p et q :

$$S_n = \max(S_n(p,p), S_n(q,q), S_n(p,q))$$

Les grandeurs $S_n(p,p)$ et $S_n(q,q)$ sont calculées suivant la partie 13 et le calcul de la grandeur $S_n(p,q)$ est décrit dans la suite de cette partie.

### 3.4.1.2. Calcul de Sn (p,q)

On note $\sigma_{tran,p}(t)$ le tenseur transitoire associé à la situation p et $\sigma_{tran,q}(t)$ le tenseur transitoire associé à la situation q. $t_{p^{maxSn}}$ et $t_{p^{minSn}}$ les instants extrémaux du transitoire de la situation p et $t_{q^{maxSn}}$ et $t_{q^{minSn}}$ les instants extrémaux du transitoire de la situation q tels que définis au 14.

Avec 'METHODE' = 'TRESCA', le paramètre $S_n$ pour la combinaison des situations p et q est défini par :

$$S_n(p,q) = max(\| \sigma^{lin}_{tran,p}(t_{p^{maxSn}}) - \sigma^{lin}_{tran,q}(t_{q^{minSn}}) \|, \| \sigma^{lin}_{tran,q}(t_{q^{maxSn}}) - \sigma^{lin}_{tran,p}(t_{p^{minSn}}) \|) .$$

Avec 'METHODE' = 'TOUT_INST', le paramètre $S_n$ pour la combinaison des situations p et q est défini par :

$$S_n(p,q) = \max_{t_p, t_q} \| \sigma^{lin}_{tran,p}(t_p) - \sigma^{lin}_{tran,q}(t_q) \| .$$

**Remarque :**

*Dans ce cas,* $\sigma_{tran}(t) = \sigma_{ther}(t) + \sigma_{pres}(t) + \sigma_{meca}(t)$ .

### 3.4.1.3. Calcul de $S_p$

On calcule en fait l'amplitude de variation des contraintes totales des deux transitoires fictifs $S_{p^1}(p,q)$ et $S_{p^2}(p,q)$. Il ne faut pas oublier le cas où la combinaison la plus pénalisante des contraintes totales correspond aux deux extrema de la même situation. On modifie donc la définition de $S_{p^1}$ et de $S_{p^2}$ comme suit :

$$S_{p^1} = max(S_p(p,p), S_p(q,q), S_{p^1}(p,q))$$

Si $S_{p^1} = S_{p^1}(p,q)$, alors $S_{p^2} = S_{p^2}(p,q)$ ;
Si $S_{p^1} = S_p(p,p)$, alors $S_{p^2} = S_p(q,q)$ ;
Si $S_{p^1} = S_p(q,q)$, alors $S_{p^2} = S_p(p,p)$.



Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Les grandeurs $S_p(p,p)$ et $S_p(q,q)$ sont calculées suivant l'Annexe 4 et le calcul des grandeurs $S_{p^1}(p,q)$ et $S_{p^2}(p,q)$ est décrit dans la suite de cette partie.

#### 3.4.1.4. Calcul de $S_p^1(p,q)$ et $S_p^2(p,q)$

On note $\sigma_{tran,p}(t)$ le tenseur transitoire associé à la situation $p$ et $\sigma_{tran,q}(t)$ le tenseur transitoire associé à la situation $q$. $t_{p^{maxSp}}$ et $t_{p^{minSp}}$ les instants extrémaux du transitoire de la situation $p$ et $t_{q^{maxSp}}$ et $t_{q^{minSp}}$ les instants extrémaux du transitoire de la situation $q$ tels que définis au 14.

Avec 'METHODE' = 'TRESCA', les paramètres $S_{p^1}$ et $S_{p^2}$ pour la combinaison des situations p et q sont définis par :

$$S_{p^1}(p,q)=max(\|\sigma_{tran,p}(t_{p^{maxSp}})-\sigma_{tran,q}(t_{q^{minSp}})\|,\|\sigma_{tran,q}(t_{q^{maxSp}})-\sigma_{tran,p}(t_{p^{minSp}})\|)$$

$$S_{p^2}(p,q)=min(\|\sigma_{tran,p}(t_{p^{maxSp}})-\sigma_{tran,q}(t_{q^{minSp}})\|,\|\sigma_{tran,q}(t_{q^{maxSp}})-\sigma_{tran,p}(t_{p^{minSp}})\|)\cdot$$

Avec 'METHODE' = 'TOUT_INST', le paramètre $S_{p^1}$ pour la combinaison des situations p et q est défini par :

$$S_{p^1}(p,q)=\max_{t_1,t_2}\|\sigma_{tran,p}(t_1)-\sigma_{tran,q}(t_2)\|.$$

Si $t_{1^p}$ et $t_{1^q}$ sont les instants du transitoire fictif 1, alors on détermine les instants du transitoire fictif 2 $t_{2^p}$ et $t_{2^q}$ selon la méthode décrite dans l'Annexe 5 et la grandeur $S_{p^2}(p,q)$ vaut :

$$S_{p^2}(p,q)=\|\sigma_{tran,p}(t_{2^p})-\sigma_{tran,q}(t_{2^q})\|$$

**Remarque :**

- *L'utilisateur a la possibilité de rentrer des indices de contraintes sous le mot clé* `INDI_SIGM` *afin de comparer les résultats obtenus avec la méthode* `'ZE200a'` *ou* `'ZE200b'`*. Les équations correspondantes sont décrites dans l'Annexe 6.*
- *Dans cette partie ,* $\sigma_{tran}(t)=\sigma_{ther}(t)+\sigma_{pres}(t)+\sigma_{meca}(t)\cdot$

#### 3.4.1.5. Calcul de $S_p^{méca}$ et $S_p^{ther}$

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 $S_{p^{ca}}$, le RCC-M (§B3234.6) laisse la liberté entre (cf. §2.6.3.1) :

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

C'est cette dernière méthode, plus conservative mais plus simple à mettre en œuvre, qui a été retenue.

Il ne faut pas oublier le cas où la combinaison la plus pénalisante des contraintes totales correspond aux deux extrema de la même situation. On modifie donc la définition de $S_{p^{meca,1}}$ et de $S_{p^{meca,2}}$ comme



Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

suit :

Si $S_{p^1}=S_{p^1}(p,q)$, alors $S_{p^{meca,1}}=S_{p^{meca,1}}(p,q)$ et $S_{p^{meca,2}}=S_{p^{meca,2}}(p,q)$.
Si $S_{p^1}=S_p(p,p)$, alors $S_{p^{meca,1}}=S_{p^{meca}}(p,p)$ et $S_{p^{meca,2}}=S_{p^{meca}}(q,q)$.
Si $S_{p^1}=S_p(q,q)$, alors $S_{p^{meca,1}}=S_{p^{meca}}(q,q)$ et $S_{p^{meca,2}}=S_{p^{meca}}(p,p)$.

Les grandeurs $S_{p^{meca}}(p,p)$ et $S_{p^{meca}}(q,q)$ sont calculées suivant l'Annexe 4 et le calcul des grandeurs $S_{p^{meca,1}}(p,q)$ et $S_{p^{meca,2}}(p,q)$ est décrit dans la suite de cette partie. Les amplitudes de contrainte thermique valent $S_{p^{ther,1}}=max(0,S_{p^1}-S_{p^{meca,1}})$ et $S_{p^{ther,2}}=max(0,S_{p^2}-S_{p^{meca,2}})$.

On note $t_{p^{maxSp}}$ et $t_{p^{minSp}}$ les instants extrémaux du transitoire de la situation p et $t_{q^{maxSp}}$ et $t_{q^{minSp}}$ les instants extrémaux du transitoire de la situation q tels que définis au 14.

Avec 'METHODE' = 'TRESCA', les paramètres $S_{p^1}$ et $S_{p^2}$ pour la combinaison des situations p et q sont définis par :

Si $S_{p^1}(p,q)=\|\sigma_{tran,p}(t_{p^{maxSp}})-\sigma_{tran,q}(t_{q^{minSp}})\|$, alors

$$S_{p^{meca,1}}(p,q)=\|\sigma_{meca+pression,p}(t_{p^{maxSp}})-\sigma_{meca+pression,q}(t_{q^{minSp}})\|$$
$$\text{et } S_{p^{meca,2}}(p,q)=\|\sigma_{meca+pression,q}(t_{q^{maxSp}})-\sigma_{meca+pression,p}(t_{p^{minSp}})\|.$$

Si $S_{p^1}(p,q)=\|\sigma_{tran,q}(t_{q^{maxSp}})-\sigma_{tran,p}(t_{p^{minSp}})\|$, alors

$$S_{p^{meca,1}}(p,q)=\|\sigma_{meca+pression,q}(t_{q^{maxSp}})-\sigma_{meca+pression,p}(t_{p^{minSp}})\|$$
$$\text{et } S_{p^{meca,2}}(p,q)=\|\sigma_{meca+pression,p}(t_{p^{maxSp}})-\sigma_{meca+pression,q}(t_{q^{minSp}})\|.$$

Avec 'METHODE' = 'TOUT_INST', les instants $t_{1^p}$, $t_{1^q}$, $t_{2^p}$, $t_{2^q}$, définissant les transitoires fictifs 1 et 2 (cf. partie 16) interviennent également dans les paramètres $S_{p^{meca,1}}$ et $S_{p^{meca,2}}$

$$S_{p^{meca,1}}(p,q)=\|\sigma_{meca+pression,p}(t_{1^p})-\sigma_{meca+pression,q}(t_{1^q})\|$$
$$S_{p^{meca,2}}(p,q)=\|\sigma_{meca+pression,p}(t_{2^p})-\sigma_{meca+pression,q}(t_{2^q})\|.$$

**3.4.1.6.**

**3.4.1.7. Calcul de $S_{ALT}$ et $FU_{ELEM}$**

Les amplitudes de contrainte $S_n$, $S_{p^1}$ et $S_{p^2}$ ($S_{p^{meca1}}$, $S_{p^{meca2}}$, $S_{p^{ther1}}$ et $S_{p^{ther2}}$ si KE_MIXTE) permettent d'aboutir aux amplitudes de contrainte $S^1_{ALT}$ et $S^2_{ALT}$ d'après les équations de la partie 10.

On en déduit via la courbe de Wöhler f les nombres de cycles admissibles $N^1_{adm}$ et $N^2_{adm}$ tels que $N^1_{adm}=f(S^1_{ALT})$ et $N^2_{adm}=f(S^2_{ALT})$.

Le facteur d'usage élémentaire de la combinaison de situation est alors égal à

$$FU_{ELEM}=FU_1+FU_2=\frac{1}{N^1_{adm}}+\frac{1}{N^2_{adm}}$$



Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

### 3.4.2 Situations de passage

Deux situations p et q 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 des situations p et q le nombre d'occurrences de la situation de passage. Une fois que ce nombre d'occurrences $N_{pass}$ est épuisé alors ces situations ne sont plus combinables. Un exemple est donné dans la partie 19.
Une situation de passage peut relier au maximum 20 groupes de fonctionnement. La situation de passage doit appartenir à tous les groupes qu'elle relie.
Plusieurs situations de passage peuvent être déclarées en même temps. Si plusieurs situations de passage relient les mêmes groupes, on prendra le nombre d'occurrence de celle qui donne le facteur d'usage élémentaire le moins pénalisant par ailleurs.

### 3.4.3 Groupe de partage

Des situations faisant partie d'un même groupe de partage partagent leur nombre d'occurrences. Ce groupe de partage est numéroté sous le mot-clé `'NUME_PARTAGE'` et n'a rien à voir avec le groupe de fonctionnement sous `'NUME_GROUPE'`. Une situation donnée ne peut appartenir qu'à un seul groupe de partage.

### 3.4.4 Gestion des sous-cycles

La méthode de calcul de l'amplitude de contrainte avec les transitoires fictifs sélectionne un couple d'instants. Il faut également prendre en compte les sous-cycles que comportaient chaque situation. L'utilisateur a cette possibilité en précisant `SOUS_CYCL = 'OUI'` mais uniquement lorsque `METHODE='TOUT_INST'`

A l'étape de calcul des grandeurs pour les situations seules, une fois que le couple d'instants extrémaux est trouvé, on extrait également les sous-cycles de chaque situations. Par exemple, pour une situation p, sont extraits $n_p$ sous-cycles $Sp_{i,p}$ et pour une situation q, sont extraits $n_q$ sous-cycles $Sp_{j,q}$.

Au facteur d'usage élémentaire calculé précédemment,on ajoute alors la contribution des sous-cycles, $FU_{ELEM}=FU_1+FU_2+FU_{souscycl}$. Cette contribution est fonction des sous-cycles extraits précédemment et du Ke équivalent qui a servi pour la combinaison des situations.

$$FU_{souscycl}=\sum_{i=1}^{n_p}\left(\frac{1}{N_i}\right)+\sum_{j=1}^{n_q}\left(\frac{1}{N_j}\right) \text{ avec } N_i=f(S_{ALT,i}) \text{ et } N_j=f(S_{ALT,j}),$$

$$S_{ALT,i}=\frac{1}{2}\frac{E_c}{E}Ke(Sn(p,q))Sp_i \text{ et } S_{ALT,j}=\frac{1}{2}\frac{E_c}{E}Ke(Sn(p,q))Sp_j.$$

### 3.4.5 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, c'est à dire 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 et étant symétrique, on ne la remplit qu'au dessus de la diagonale.

Exemple 1

Dans le tableau ci-dessous, on donne l'exemple d'un calcul avec trois groupes de fonctionnement.

- Le groupe 1 contient les situations numérotées 1, 2 et 3
- Le groupe 2 contient les situations numérotées 4, 5 et 6
- Le groupe 3 contient les situations numérotées 7, 8 et 9



Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

On calcule le $FU_{ELEM}$ des combinaisons possibles, sinon on met un zéro dans le tableau.

| $FU_{ELEM}$ | Groupe 1 | | | Groupe 2 | | | Groupe 3 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Situ 1 | Situ 2 | Situ 3 | Situ 4 | Situ 5 | Situ 6 | Situ 7 | Situ 8 | Situ 9 |
| Situ 1 | FU(1,1) | FU(1,2) | FU(1,3) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Situ 2 | | FU(2,2) | FU(2,3) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Situ 3 | | | FU(3,3) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Situ 4 | | | | FU(4,4) | FU(4,5) | FU(4,6) | 0 | 0 | 0 |
| Situ 5 | | | | | FU(5,5) | FU(5,6) | 0 | 0 | 0 |
| Situ 6 | | | | | | FU(6,6) | 0 | 0 | 0 |
| Situ 7 | | | | | | | FU(7,7) | FU(7,8) | FU(7,9) |
| Situ 8 | | | | | | | | FU(8,8) | FU(8,9) |
| Situ 9 | | | | | | | | | FU(9,9) |

Exemple 2

Dans le tableau ci-dessous, on donne l'exemple d'un calcul avec trois groupes de fonctionnement, la situation 7 est une situation de passage entre les groupes 1 et 3.

- Le groupe 1 contient les situations numérotées 1, 2, 3 et 7
- Le groupe 2 contient les situations numérotées 4, 5 et 6
- Le groupe 3 contient les situations numérotées 7, 8 et 9

On calcule le $FU_{ELEM}$ des combinaisons possibles, sinon on met un zéro dans le tableau. On ne remet pas deux fois la situation 7 dans le tableau même si elle appartient à deux groupes.

FU(1,7), FU(2,7) et FU(3,7) sont désormais calculés car les situations 1,2, 3 et 7 font partie du même groupe.

La situation de passage numéro 7 a créé le passage entre les groupes 1 et 3et on calcule donc les termes ***FU(1,8), FU(1,9), FU(2,8), FU(2,9), FU(3,8) et FU(3,9)***.

| | Tableau des $FU_{ELEM}$ | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Situ 1 | Situ 2 | Situ 3 | Situ 4 | Situ 5 | Situ 6 | Situ 7 | Situ 8 | Situ 9 |
| Situ 1 | FU(1,1) | FU(1,2) | FU(1,3) | 0 | 0 | 0 | FU(1,7) | ***FU(1,8)*** | ***FU(1,9)*** |
| Situ 2 | | FU(2,2) | FU(2,3) | 0 | 0 | 0 | FU(2,7) | ***FU(2,8)*** | ***FU(2,9)*** |
| Situ 3 | | | FU(3,3) | 0 | 0 | 0 | FU(3,7) | ***FU(3,8)*** | ***FU(3,9)*** |
| Situ 4 | | | | FU(4,4) | FU(4,5) | FU(4,6) | 0 | 0 | 0 |
| Situ 5 | | | | | FU(5,5) | FU(5,6) | 0 | 0 | 0 |
| Situ 6 | | | | | | FU(6,6) | 0 | 0 | 0 |
| Situ 7 | | | | | | | FU(7,7) | FU(7,8) | FU(7,9) |
| Situ 8 | | | | | | | | FU(8,8) | FU(8,9) |
| Situ 9 | | | | | | | | | FU(9,9) |



Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

### 3.4.6 Prise en compte du séisme

Lorsqu'un séisme est pris en compte, on construit une seconde matrice des facteurs d'usage élémentaire avec séisme. Cette matrice est remplie de la même manière que la matrice sans séisme en ne tenant compte que des combinaisons possibles (groupes et situations de passage).

Enfin, les facteurs d'usage élémentaires avec séisme sont la somme du facteur d'usage de la combinaison de la situation p et q avec séisme, de la contribution des sous-cycles des situations (cf 19) et de la contribution des sous cycles sismiques $FU_{ss}$.

$$FU_{ELEM}(p,q,S)=FU(p,q,S)+FU_{souscycl}+FU_{ss}$$

avec $FU_{ss}=(2n_s-1)FU(S)$ où $FU(S)$ est le facteur d'usage dû au séisme seul et $n_s$ est le nombre de sous-cycles sismiques ('NB_CYCL_SEISME').

Si l'utilisateur a choisi 'SOUS_CYCL' = 'OUI', pour le calcul de $FU_{souscycl}$, on reprend la méthode appliquée dans la partie 19 en prenant le Ke dépendant du séisme uniquement.

Pour obtenir $FU(p,q,S)$, la deuxième phase consiste à calculer les amplitudes de contraintes qui correspondent aux combinaisons des situations d'un groupe donné, en prenant en compte les chargements sismiques.

Selon la définition des situations, le séisme peut aussi être défini de deux manières différentes :

- unitaire : il est décrit par un état mécanique (S) et le torseur correspondant $\{F_{X^s},F_{Y^s},F_{Z^s},M_{X^s},M_{Y^s},M_{Z^s}\}$ sous CHAR_ETAT, le mot clé 'RESU_MECA_UNIT' doit être renseigné.
- avec six tenseurs correspondant aux efforts et moments $\sigma_{FX,S}$, $\sigma_{FY,S}$, $\sigma_{FZ,S}$, $\sigma_{MX,S}$, $\sigma_{MY,S}$, $\sigma_{MZ,S}$

**Remarque :**

*Pour les piquages, l e torseur d'effort passe de 6 à 12 composantes en unitaire et le nombre de tenseurs passe de 6 à 12 en instantané*

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.

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 à toutes les possibilités de signe. Afin de mieux comprendre, un exemple est donné dans la suite de ce paragraphe, plus d'équations avec le séisme sont résumées dans l'Annexe 7.

Par exemple, pour la méthode de sélection d'instants 'TOUT_INST',

$$S_{p^1}(p,q,S)=\max_{t_1,t_2}\|\sigma_{tran,p}(t_1)-\sigma_{tran,q}(t_2)\pm\sigma_{FX,S}\pm\sigma_{FY,S}\pm\sigma_{FZ,S}\pm\sigma_{MX,S}\pm\sigma_{MY,S}\pm\sigma_{MZ,S}\|.$$

### 3.4.7 Calcul du facteur d'usage total

Si on a N situations, à l'issue des étapes précédentes, on dispose donc de :

- une matrice $[N,N]$ des facteurs d'usage élémentaires $FU_{ELEM}(p,q,S)$ avec séisme
- une matrice $[N,N]$ des facteurs d'usage élémentaires $FU_{ELEM}(p,q)$ sans séisme.



Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

On note :

$n_p$ le nombre d'occurrences associé à la situation $p$

$n_q$ le nombre d'occurrences associé à la situation $q$

$N_s$ le nombre d'occurrences 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

- 1) O n initialise le facteur d'usage total $FU_{TOTAL}=0$
- 2 )
  - Si $N_s/2>0$ , on cherche dans le tableau $FU_{ELEM}(p,q,S)$ le plus grand facteur d'usage élémentaire avec séisme
  - Si $N_s/2=0$ , on va à l'étape 8
- 3) O n multiplie ce facteur d'usage élémentaire $FU_{ELEM}(p,q,S)$ par son nombre d'occurrenc e
  - $n_{occ}=min\{n_p,n_q,N_s/2\}$ en général
  - $n_{occ}=min\{n_p,n_q,N_s/2,n_{pass}\}$ si les situations p et q ne sont reliées que par une situation de passage
- 4) O n obtient le facteur d'usage partiel dû à cette combinaison $FU_{partiel}=n_{occ}*FU_{ELEM}(p,q,S)$ .
- 5 ) O n incrémente le facteur d'usage total avec le facteur d'usage partiel trouvé à l'étape précédente $FU_{TOTAL}=FU_{TOTAL}+FU_{partiel}$
- 6) O n met à jour les nombres d'occurrences
  - En général, $n_p=n_p-n_{occ}$ , $n_q=n_q-n_{occ}$ et $N_s/2=N_s/2-n_{occ}$ .
  - Si une situation a fait le passage, on met aussi à jour $n_{pass}=n_{pass}-n_{occ}$
- 7) S i la situation p ou la situation q appartient à un groupe de partage, on met à jour les nombres d'occurrences des situations d e ce même groupe de partage. Puis on reprend la boucle à l'étape 2.
- 8 ) O n cherche dans le tableau $FU_{ELEM}(p,q)$ le plus grand facteur d'usage élémentaire
- 9 ) O n multiplie ce facteur d'usage élémentaire $FU_{ELEM}(p,q)$ par son nombre d'occurrence
  - $n_{occ}=min\{n_p,n_q\}$ en général
  - $n_{occ}=min\{n_p,n_q,n_{pass}\}$ si les situations p et q ne sont reliées que par une situation de passage
- 10) O n obtient le facteur d'usage partiel dû à cette combinaison $FU_{partiel}=n_{occ}*FU(p,q)$
- 11 ) O n incrémente le facteur d'usage total avec le facteur d'usage partiel trouvé à l'étape précédente $FU_{TOTAL}=FU_{TOTAL}+FU_{partiel}$
- 12) O n met à jour les nombres d'occurrences
  - En général, $n_p=n_p-n_{occ}$ , $n_q=n_q-n_{occ}$ .
  - Si une situation a fait le passage, on met aussi à jour $n_{pass}=n_{pass}-n_{occ}$
- 13) S i la situation p ou la situation q appartient à un groupe de partage, on met à jour les nombres d'occurrences des situations d e ce même groupe de partage. Puis on reprend la boucle à l'étape 8



Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

jusqu'à épuisement de tous les nombres d'occurrences de toutes les situations.

**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.*



Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

# 4 Types 'ZE200a' et 'ZE200b'

## 4.1 Données de chargement

Les types 'ZE200a' et 'ZE200b' sont bien adaptés aux calculs sur une tuyauterie ou un piquage soumis à de nombreuses situations. Plusieurs groupes de fonctionnement peuvent également être définis, avec éventuellement des situations de passage entre ces groupes. Des groupes de partage et un séisme peuvent être pris en compte également.

Chaque situation est décrite par deux états stabilisés et un transitoire thermique. Les états stabilisés décrivent les chargements dus aux moments via un torseur $\{M_X, M_Y, M_Z\}$.

La pression peut être décrite de deux manières différentes :

- 'ZE200a' : elle est associée aux états stabilisés qui sont alors définis par une pression $p$
- 'ZE200b' : elle est sous forme de transitoire sous le mot clé 'RESU_PRES'.

L'utilisation de ces options nécessite le calcul préalable 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.

Des données supplémentaires sont nécessaires pour le calcul suivant l'Annexe ZE200 du RCC-M. Ces données interviennent dans les équations simplifiées issues du chapitre B3600. Elles sont les suivantes :

- Caractéristiques géométriques de la tuyauterie : épaisseur EP, rayon R et moment d'inertie I sous le mot clé TUYAU.
- Indices de contraintes du paragraphe B3680 du RCC-M : C1, C2, C3, K1, K2, K3 sous le mot clé INDI_SIGM

**Remarques :**

- *Pour les piquages, il est également possible d'utiliser les types ZE200a et ZE200b en définissant deux torseurs de moments associés respectivement au corps et à la tubulure. Il faut également définir les rayons du corps et de la tubulure sous 'TUYAU' ainsi que leurs indices de contraintes sous 'INDI_SIGM'. L'Annexe 3 résume les équations dans ce cas.*
- *Les efforts ne sont pas pris en compte en ZE200*
- *En 'ZE200b', l'utilisateur doit également fournir les champs de contraintes pour chacun des transitoires de pression et ils doivent être définis aux mêmes instants que les transitoires thermiques*
- *Les deux méthodes de sélection d'instants 'TRESCA' et 'TOUT_INST' sont disponibles (cf. partie 14 )*

## 4.2 Calculs effectués avec l'option 'SN'

### 4.2.1 Type ' ZE200a '

On note $\sigma_{ther}$ le tenseur des contraintes du transitoire thermique associé à la situation et $t^{maxSn}$ et $t^{minSn}$ les instants extrémaux de ce transitoire tels que définis au 14. On indice A et B les grandeurs des états stabilisés de la situation (pression et torseur sur les moments). R, e, et I sont les caractéristiques géométriques de la tuyauterie, $C_1$ et $C_2$ sont les indices de contraintes du RCC-M.



Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Avec 'METHODE' = 'TRESCA', le paramètre $S_n$ pour la situation est défini par :

$$S_n = C_1 \frac{R}{e} |P_A - P_B| + C_2 \frac{R}{I} \sqrt{(M_{XA}-M_{XB})^2+(M_{YA}-M_{YB})^2+(M_{ZA}-M_{ZB})^2} + \| \sigma^{lin}_{ther}(t^{maxSn}) - \sigma^{lin}_{ther}(t^{minSn}) \|$$

Avec 'METHODE' = 'TOUT_INST', le paramètre $S_n$ pour la situation est défini par :

$$S_n = C_1 \frac{R}{e} |P_A - P_B| + C_2 \frac{R}{I} \sqrt{(M_{XA}-M_{XB})^2+(M_{YA}-M_{YB})^2+(M_{ZA}-M_{ZB})^2} + \max_{t_1,t_2} \| \sigma^{lin}_{ther}(t_1) - \sigma^{lin}_{ther}(t_2) \|$$

### 4.2.2 Type 'ZE200b'

On note $\sigma_{tran}$ le tenseur somme des transitoires associé à la situation et $t^{maxSn}$ et $t^{minSn}$ les instants extrémaux de ce transitoire tels que définis au 14. On indice A et B les grandeurs des états stabilisés de la situation (torseur sur les moments). R, e, et I sont les caractéristiques géométriques de la tuyauterie, $C_2$ est l'indice de contraintes du RCC-M.

Avec 'METHODE' = 'TRESCA', le paramètre $S_n$ pour la situation est défini par :

$$S_n = C_2 \frac{R}{I} \sqrt{(M_{XA}-M_{XB})^2+(M_{YA}-M_{YB})^2+(M_{ZA}-M_{ZB})^2} + \| \sigma^{lin}_{tran}(t^{maxSn}) - \sigma^{lin}_{tran}(t^{minSn}) \|$$

Avec 'METHODE' = 'TOUT_INST', le paramètre $S_n$ pour la situation est défini par :

$$S_n = C_2 \frac{R}{I} \sqrt{(M_{XA}-M_{XB})^2+(M_{YA}-M_{YB})^2+(M_{ZA}-M_{ZB})^2} + \max_{t_1,t_2} \| \sigma^{lin}_{tran}(t_1) - \sigma^{lin}_{tran}(t_2) \|$$

**Remarque :**

*Dans ce paragraphe ,* $\sigma_{tran}(t) = \sigma_{ther}(t) + \sigma_{pres}(t)$ .

## 4.3 Calculs effectués avec l'option 'FATIGUE'

On rappelle que le calcul du facteur d'usage élémentaire nécessite au préalable le calcul de l'amplitude de variation des contraintes linéarisées $S_n$ et totales $S_p$ pour chacune des combinaisons de situations (partie 10).

### 4.3.1 Combinaison des situations à l'intérieur de chaque groupe de situations

#### 4.3.1.1. Calcul de $S_n$

Il ne faut pas oublier le cas où la combinaison la plus pénalisante des contraintes linéarisées correspond aux deux extrema de la même situation. Pour la combinaison des situations p et q :

$$S_n = \max(S_n(p,p), S_n(q,q), S_n(p,q))$$

Les grandeurs $S_n(p,p)$ et $S_n(q,q)$ sont calculées suivant la partie 24 et le calcul de la grandeur $S_n(p,q)$ est décrit dans la suite de ce paragraphe.

On note $\sigma_{tran,p}$ le tenseur somme des transitoires associé à la situation p et $\sigma_{tran,q}$ le tenseur somme des transitoires associé à la situation q. $t_{p^{maxSn}}$ , $t_{p^{minSn}}$ , $t_{q^{maxSn}}$ , $t_{q^{minSn}}$ , les instants extrémaux de ces transitoires tels que définis au 14. On indice p et q les grandeurs des états stabilisés des deux situations (pressions et torseurs sur les moments). R, e, et I sont les caractéristiques géométriques de la tuyauterie, $C_1$ et $C_2$ sont les indices de contraintes du RCC-M.



Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Pour les deux types 'ZE200a' et 'ZE200b', on maximise d'abord la grandeur $S_n''$ sur les quatre possibilités de combinaison d'états stabilisés.

Pour 'ZE200a'

$$\sigma_{tran}(t)=\sigma_{ther}(t)$$

$$S_n''=\max_{p,q}\left(C_1\frac{R}{e}|P_p-P_q|+C_2\frac{R}{I}\sqrt{(M_{Xp}-M_{Xq})^2+(M_{Yp}-M_{Yq})^2+(M_{Zp}-M_{Zq})^2}\right)$$

Pour 'ZE200b'

$$\sigma_{tran}(t)=\sigma_{ther}(t)+\sigma_{pres}(t)$$

$$S_n''=\max_{p,q}\left(C_2\frac{R}{I}\sqrt{(M_{Xp}-M_{Xq})^2+(M_{Yp}-M_{Yq})^2+(M_{Zp}-M_{Zq})^2}\right)$$

Puis, pour les deux types, la suite du calcul est identique.

Avec 'METHODE' = 'TRESCA', le paramètre $S_n$ pour la situation est défini par :

$$S_n(p,q)=S_n'+S_n'' \text{ avec } S_n'=\max(S_{nA},S_{nB})$$

$$S_{nA}=\|\sigma^{lin}_{tran,p}(t_{p^{maxSn}})-\sigma^{lin}_{tran,q}(t_{q^{minSn}})\| \text{ et } S_{nB}=\|\sigma^{lin}_{tran,q}(t_{q^{maxSn}})-\sigma^{lin}_{tran,p}(t_{p^{minSn}})\|.$$

Si $S_n'=S_{nA}$, alors $S_{n,ther}'=\|\sigma^{lin}_{ther,p}(t_{p^{maxSn}})-\sigma^{lin}_{ther,q}(t_{q^{minSn}})\|$ et si 'ZE200b', $S_{n,pres}'=\|\sigma^{lin}_{pres,p}(t_{p^{maxSn}})-\sigma^{lin}_{pres,q}(t_{q^{minSn}})\|$.

Si $S_n'=S_{nB}$, alors $S_{n,ther}'=\|\sigma^{lin}_{ther,q}(t_{q^{maxSn}})-\sigma^{lin}_{ther,p}(t_{p^{minSn}})\|$ et si 'ZE200b', $S_{n,pres}'=\|\sigma^{lin}_{pres,q}(t_{q^{maxSn}})-\sigma^{lin}_{pres,p}(t_{p^{minSn}})\|$.

Ou, avec 'METHODE' = 'TOUT_INST', le paramètre $S_n$ pour la situation est défini par :

$$S_n(p,q)=S_n'+S_n'' \text{ avec } Sn'=\max_{t_1,t_2}\|\sigma^{lin}_{tran,p}(t_1)-\sigma^{lin}_{tran,q}(t_2)\|.$$

Si $Sn'=\|\sigma^{lin}_{tran,p}(t_p)-\sigma^{lin}_{tran,q}(t_q)\|$, alors $S_{n,ther}'=\|\sigma^{lin}_{ther,p}(t_p)-\sigma^{lin}_{ther,q}(t_q)\|$ et si 'ZE200b', $S_{n,pres}'=\|\sigma^{lin}_{pres,p}(t_p)-\sigma^{lin}_{pres,q}(t_q)\|$.

#### 4.3.1.2. Calcul de $S_p$

Il ne faut pas oublier le cas où la combinaison la plus pénalisante des contraintes totales correspond aux deux extrema de la même situation. On modifie donc la définition de $S_{p^1}$ et de $S_{p^2}$ comme suit :

$$S_{p^1}=\max(S_p(p,p),S_p(q,q),S_{p^1}(p,q))$$



Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Si $S_{p^1}=S_{p^1}(p,q)$, alors $S_{p^2}=S_{p^2}(p,q)$ ;
Si $S_{p^1}=S_p(p,p)$, alors $S_{p^2}=S_p(q,q)$ ;
Si $S_{p^1}=S_p(q,q)$, alors $S_{p^2}=S_p(p,p)$.

Les grandeurs $S_p(p,p)$ et $S_p(q,q)$ sont calculées suivant l'Annexe 4 et le calcul des grandeurs $S_{p^1}(p,q)$ et $S_{p^2}(p,q)$ est décrit dans la suite de ce paragraphe.

On note $\sigma_{tran,p}$ le tenseur somme des transitoires associé à la situation p et $\sigma_{tran,q}$ le tenseur somme des transitoires associé à la situation q. $t_{p^{maxSp}}$, $t_{p^{minSp}}$, $t_{q^{maxSp}}$, $t_{q^{minSp}}$, les instants extrémaux de ces transitoires tels que définis au 14. On indice p et q les grandeurs des états stabilisés des deux situations (pressions et torseurs sur les moments). R, e, et I sont les caractéristiques géométriques de la tuyauterie, $K_1$, $K_2$, $K_3$, $C_1$, $C_2$ et $C_3$ sont les indices de contraintes du RCC-M.

Pour les deux types 'ZE200a' et 'ZE200b', on maximise d'abord la grandeur $S_p''$ sur les quatre possibilités de combinaison d'états stabilisés, $S_{n,ther}'$ et $S_{n,pres}'$ ayant été déterminées dans la partie 25.

Pour 'ZE200a'

$$\sigma_{tran}(t)=\sigma_{ther}(t)$$

$$S_p''=\max_{p,q}\left[K_1C_1\frac{R}{e}\left|P_p-P_q\right|+K_2C_2\frac{R}{I}\sqrt{\left(M_{Xp}-M_{Xq}\right)^2+\left(M_{Yp}-M_{Yq}\right)^2+\left(M_{Zp}-M_{Zq}\right)^2}\right]$$

$S_{p^2}''$ est le complémentaire de $S_{p^1}''$ sur les états stabilisés.

Par exemple, en indiçant A et B les états stabilisés des situations p et q, si $S_p''=K_1C_1\frac{R}{e}\left|P_{pA}-P_{qB}\right|+K_2C_2\frac{R}{I}\sqrt{\left(M_{XpA}-M_{XqB}\right)^2+\left(M_{YpA}-M_{YqB}\right)^2+\left(M_{ZpA}-M_{ZqB}\right)^2}$ alors

$S_p''=K_1C_1\frac{R}{e}\left|P_{pB}-P_{qA}\right|+K_2C_2\frac{R}{I}\sqrt{\left(M_{XpB}-M_{XqA}\right)^2+\left(M_{YpB}-M_{YqA}\right)^2+\left(M_{ZpB}-M_{ZqA}\right)^2}$.

$$S_p'''=\left(K_3C_3-1\right)S_{n,ther}'$$

Pour 'ZE200 b '

$$\sigma_{tran}(t)=\sigma_{ther}(t)+\sigma_{pres}(t)$$

$$S_{p^1}''=\max_{p,q}\left[K_2C_2\frac{R}{I}\sqrt{\left(M_{Xp}-M_{Xq}\right)^2+\left(M_{Yp}-M_{Yq}\right)^2+\left(M_{Zp}-M_{Zq}\right)^2}\right]$$

$S_{p^2}''$ est le complémentaire de $S_{p^1}''$ sur les états stabilisés.

Par exemple, en indiçant A et B les états stabilisés des situations p et q, si $S_{p^1}''=K_2C_2\frac{R}{I}\sqrt{\left(M_{XpA}-M_{XqB}\right)^2+\left(M_{YpA}-M_{YqB}\right)^2+\left(M_{ZpA}-M_{ZqB}\right)^2}$ alors

$$S_{p^2}''=K_2C_2\frac{R}{I}\sqrt{\left(M_{XpB}-M_{XqA}\right)^2+\left(M_{YpB}-M_{YqA}\right)^2+\left(M_{ZpB}-M_{ZqA}\right)^2}.$$

$$S_p'''=\left(K_3C_3-1\right)S_{n,ther}'+\left(K_1C_1-1\right)S_{n,pres}'$$



Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Pour les deux types, la suite du calcul est identique.

$$S_{p^1}(p,q)=S_{p^1}'+S_{p^1}''+S_p'''$$
$$S_{p^2}(p,q)=S_{p^2}'+S_{p^2}''+S_p'''$$

Avec 'METHODE' = 'TRESCA', les paramètres $S_{p^1}'$ et $S_{p^2}'$ pour la combinaison des situations p et q sont définis par :

$$S_{p^1}'=max\left(\left\|\sigma_{tran,p}\left(t_{p^{maxSy}}\right)-\sigma_{tran,q}\left(t_{q^{minSy}}\right)\right\|,\left\|\sigma_{tran,q}\left(t_{q^{maxSy}}\right)-\sigma_{tran,p}\left(t_{p^{minSy}}\right)\right\|\right) S_{p^2}'=min\left(\left\|\sigma_{tran,p}\left(t_{p^{maxSy}}\right)-\sigma_{tran,q}\left(t_{q^{minSy}}\right)\right\|,\left\|\sigma_{tran,q}\left(t_{q^{maxSy}}\right)-\sigma_{tran,p}\left(t_{p^{minSy}}\right)\right\|\right)$$

Avec 'METHODE' = 'TOUT_INST', le paramètre $S_{p1}'$ pour la combinaison des situations p et q est défini par :

$$S_{p^1}'=\max_{t_1,t_2}\left\|\sigma_{tran,p}(t_1)-\sigma_{tran,q}(t_2)\right\| .$$

Si $t_{1^p}$ et $t_{1^q}$ sont les instants du transitoire fictif 1 $S_{p^1}'$, alors on détermine les instants du transitoire fictif 2 $t_{2^p}$ et $t_{2^q}$ selon la méthode décrite dans l'Annexe 5 et la grandeur $S_{p^2}'$ vaut :

$$S_{p^2}'=\left\|\sigma_{tran,p}(t_{2^p})-\sigma_{tran,q}(t_{2^q})\right\|$$

#### 4.3.1.3. Calcul de $S_p^{méca}$ et $S_p^{ther}$

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 $S_{p^{ca}}$, le RCC-M (§B3234.6) laisse la liberté entre (cf. §2.6.3.1) :

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

C'est cette dernière méthode, plus conservative mais plus simple à mettre en œuvre, qui a été retenue.

Il ne faut pas oublier le cas où la combinaison la plus pénalisante des contraintes totales correspond aux deux extrema de la même situation. On modifie donc la définition de $S_{p^{meca,1}}$ et de $S_{p^{meca,2}}$ comme suit :

Si $S_{p^1}=S_{p^1}(p,q)$, alors $S_{p^{meca,1}}=S_{p^{meca,1}}(p,q)$ et $S_{p^{meca,2}}=S_{p^{meca,2}}(p,q)$.
Si $S_{p^1}=S_p(p,p)$, alors $S_{p^{meca,1}}=S_{p^{meca}}(p,p)$ et $S_{p^{meca,2}}=S_{p^{meca}}(q,q)$.
Si $S_{p^1}=S_p(q,q)$, alors $S_{p^{meca,1}}=S_{p^{meca}}(q,q)$ et $S_{p^{meca,2}}=S_{p^{meca}}(p,p)$.

Les grandeurs $S_{p^{meca}}(p,p)$ et $S_{p^{meca}}(q,q)$ sont calculées suivant l'Annexe 4 et le calcul des grandeurs $S_{p^{meca,1}}(p,q)$ et $S_{p^{meca,2}}(p,q)$ est décrit dans la suite de ce paragraphe.

L'amplitude de contrainte thermique $S_{p^{ther,1}}$ (resp. $S_{p^{ther,2}}$) est définie en prenant l'amplitude de contrainte totale $S_{p^1}$ (resp. $S_{p^2}$) à laquelle on retranche $s_{p^{meca,1}}$ (resp. $S_{p^{meca,2}}$).

On note $\sigma_{pres,p}$ le tenseur dû à la pression associé à la situation p et $\sigma_{pres,q}$ le tenseur dû à la pression associé



Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

à la situation q. $t_{p^{maxSp}}$, $t_{p^{minSp}}$, $t_{q^{maxSp}}$, $t_{q^{minSp}}$, les instants extrémaux de ces transitoires tels que définis au 14. On indice p et q les grandeurs des états stabilisés des deux situations (pressions et torseurs sur les moments). R, e, et I sont les caractéristiques géométriques de la tuyauterie, $K_1$, $K_2$, $K_3$, $C_1$, $C_2$ et $C_3$ sont les indices de contraintes du RCC-M.

Pour les deux types 'ZE200a' et 'ZE200b', on maximise d'abord la grandeur $S_p''$ sur les quatre possibilités de combinaison d'états stabilisés, $S_{n,pres}'$ ayant été déterminée dans la partie 25.

Pour 'ZE200a'

Les états p et q sont les états qui ont maximisé la grandeur $S_{p^1}$ (partie 26).

$$S_{p^{meca}}=K_1C_1\frac{R}{e}|P_p-P_q|+K_2C_2\frac{R}{I}\sqrt{(M_{Xp}-M_{Xq})^2+(M_{Yp}-M_{Yq})^2+(M_{Zp}-M_{Zq})^2}$$

$S_{p^{meca,2}}$ est le complémentaire de $S_{p^{meca,1}}$ sur les états stabilisés.

Pour 'ZE200b'

$$S_{p^{meca,1}}(p,q)=S_{p^{meca,1}}'+S_{p^1}''+S_p'''$$
$$S_{p^{meca,2}}(p,q)=S_{p^{meca,2}}'+S_{p^2}''+S_p'''$$

Les états p et q sont les états qui ont maximisé la grandeur $S_{p^1}$ (partie 26).

$S_{p^1}''=K_2C_2\frac{R}{I}\sqrt{(M_{Xp}-M_{Xq})^2+(M_{Yp}-M_{Yq})^2+(M_{Zp}-M_{Zq})^2}$, $S_{p^2}''$ est le complémentaire de $S_{p^1}''$ sur les états stabilisés et $S_p'''=(K_1C_1-1)S_{n,pres}'$.

Avec 'METHODE' = 'TRESCA', les paramètres $S_{p^{meca,1}}'$ et $S_{p^{meca,2}}'$ pour la combinaison des situations p et q sont définis à partir des grandeurs $S_{p^1}'$ et $S_{p^2}'$ de la partie 26 :

Si $S_{p^1}'=\|\sigma_{tran,p}(t_{p^{maxSp}})-\sigma_{tran,q}(t_{q^{minSp}})\|$, alors
$S_{p^{meca,1}}'(p,q)=\|\sigma_{pression,p}(t_{p^{maxSp}})-\sigma_{pression,q}(t_{q^{minSp}})\|$
et $S_{p^{meca,2}}'(p,q)=\|\sigma_{pression,q}(t_{q^{maxSp}})-\sigma_{pression,p}(t_{p^{minSp}})\|$.

Si $S_{p^1}'=\|\sigma_{tran,q}(t_{q^{maxSp}})-\sigma_{tran,p}(t_{p^{minSp}})\|$, alors
$S_{p^{meca,1}}'(p,q)=\|\sigma_{pression,q}(t_{q^{maxSp}})-\sigma_{pression,p}(t_{p^{minSp}})\|$
et $S_{p^{meca,2}}'(p,q)=\|\sigma_{pression,p}(t_{p^{maxSp}})-\sigma_{pression,q}(t_{q^{minSp}})\|$.



Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Avec 'METHODE' = 'TOUT_INST' , on n'effectue pas de nouvelle recherche d'instants par rapport à la méthode KE_MECA (partie 26 ). Soient $t_{1^p}$ et $t_{1^q}$ sont les instants du transitoire fictif 1 $S_{p^1}$', et $t_{2^p}$ et $t_{2^q}$ les instants du transitoire fictif 2 $S_{p^2}$' . Alors, les paramètres $S_{p^{meca,1}}$' et $S_{p^{meca,2}}$' pour la combinaison des situations p et q sont définis par :

$$S_{p^{meca,1}} = \| \sigma_{pres,p}(t_{1^p}) - \sigma_{pres,q}(t_{1^q}) \| ,$$

$$S_{p^{meca,2}} = \| \sigma_{pres,p}(t_{2^p}) - \sigma_{pres,q}(t_{2^q}) \| .$$

### 4.3.2 Calcul du Facteur d'usage total

La prise en compte du séisme, les groupes de partage, les sous-cycles, l a gestion des situations de passage, le stockage des facteurs d'usage élémentaires et le calcul du facteur d'usage total sont les mêmes que pour la méthode 'B3200' (voir parties 19 à 21 ).

# 5 Fatigue environnementale

La prise en compte des effets d'environnement sur la tenue en fatigue dans code_aster est disponible pour les types B3200, ZE200a et ZE200b. Cette prise en compte s'effectue après la combinaison des situations et le calcul du facteur d'usage habituel décrits dans la partie 21.

## 5.1 Calcul du FEN

Le facteur environnemental pour la combinaison des situations $p$ et $q$ s'exprime en fonction de $\Delta\varepsilon$ incrément de déformation, de $F$ facteur environnemental partiel et des instants $t_k$ et $t_l$ . L'indice $k$ balaye les instants du transitoire de $p$ et l'indice $l$ balaye les instants du transitoire de $q$ .

$$FEN_{comb}(p,q) = \frac{\sum_k F(t_k)\Delta\varepsilon(t_k) + \sum_l F(t_l)\Delta\varepsilon(t_l)}{\sum_k \Delta\varepsilon(t_k) + \sum_l \Delta\varepsilon(t_l)} .$$

Quel que soit le matériau étudié, la forme générale du facteur d'environnemental partiel $F$ est la suivante :

$$F(t_k) = exp[(A + B\dot{\varepsilon}^*(t_k))S^* O^* T^* + C] .$$

- A, B et C sont des constantes qui dépendent de la nature du matériau : ferritique, austénitique, base-nickel (mots clés A_ENV, B_ENV et C_ENV),

- $S^*$ est la teneur en souffre du métal analysé, donc commune à toutes les situations (mot clé S_ETOILE),

- $O^*$ est le degré d'oxygène dissous dans l'eau au contact de la section analysée. Cette grandeur peut être différente pour chaque situation (mot clé O_ETOILE),

- $T^*$ est une fonction qui dépend de la température moyenne T. L'utilisateur doit donc fournir une table qui contient l'évolution de la température au cours du transitoire (mot clé TABL_TEMP).

$$T = \frac{T(t_k) + T(t_{k-1})}{2} .$$

La fonction $T^*$ est décrite ci-dessous et dépend des seuils $T_{seuil,sup}$ et $T_{seuil,inf}$ (mots clés SEUIL_T_SUP



Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

et SEUIL_T_INF) et des valeurs seuils $T_{sup}, T_{inf}, T_{moy,num}$ et $T_{moy,den}$ (mots clés VALE_T_SUP, VALE_T_INF, VALE_T_MOY_NUM et VALE_T_MOY_DEN) :

$$T^* = \begin{cases} T_{inf} & \text{si } T > T_{seuil,sup} \\ \dfrac{T - T_{moy,num}}{T_{moy,den}} & \text{si } T_{seuil,inf} \leq T \leq T_{seuil,sup} \\ T_{sup} & \text{si } T < T_{seuil,inf} \end{cases}.$$

- $\dot{\epsilon}^*$ est une fonction qui dépend de la vitesse de déformation $\dot{\epsilon}$. Cette fonction est décrite ci dessous et dépend des seuils $\epsilon_{seuil,sup}$ et $\epsilon_{seuil,inf}$ (mots clés SEUIL_EPSI_SUP et SEUIL_EPSI_INF)

$$\dot{\epsilon}^* = \begin{cases} 0 & \text{si } \dot{\epsilon} > \epsilon_{seuil,sup} \\ ln\left(\dfrac{\dot{\epsilon}}{\epsilon_{seuil,sup}}\right) & \text{si } \epsilon_{seuil,inf} \leq \dot{\epsilon} \leq \epsilon_{seuil,sup} \\ ln\left(\dfrac{\epsilon_{seuil,inf}}{\epsilon_{seuil,sup}}\right) & \text{si } \dot{\epsilon} < \epsilon_{seuil,inf} \end{cases}.$$

La vitesse de déformation $\dot{\epsilon}$ est égale à :

$$\dot{\epsilon}(t_k) = \frac{\Delta\epsilon(t_k)}{t_k - t_{k-1}}.$$

L'incrément de déformation $\Delta\epsilon$ intervient à la fois dans l'expression du facteur environnemental de la situation $FEN$ et dans le facteur environnemental partiel $F(t_k)$ via $\dot{\epsilon}$. $\Delta\epsilon$ est calculé à partir du tenseur des contraintes sous formes de transitoire $\sigma_{tran}$ de la manière suivante : on calcule le tenseur $\Delta\sigma$ tel que

$$\Delta\sigma(t_k) = \sigma_{tran}(t_k) - \sigma_{tran}(t_{k-1}).$$

Après diagonalisation,

$$\Delta\sigma(t_k) = \begin{pmatrix} \sigma_1(t_k) & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2(t_k) & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3(t_k) \end{pmatrix} \text{ avec } \sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3.$$

On peut ensuite calculer $\Delta\epsilon$ qui est fonction des contraintes principales, du $K\epsilon$ de la combinaison de situation et du module d'Young $E$ pris à la température moyenne du pas de temps $T$. $K\epsilon$ a été stocké lors du calcul du facteur d'usage usuel (partie 1010) et $E$ est calculé par interpolation linéaire sur la courbe $E(T)$ donnée sous le mot clé TABL_YOUNG.



Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

$$\Delta\epsilon(t_k)=\begin{cases}0 & \text{si}\ \sigma_1\leq 0\\ Ke.\dfrac{\sigma_1(t_k)-\sigma_3(t_k)}{E(T)} & \text{si}\ \sigma_1>0\end{cases}.$$

**Remarque :**

*La table de température entrée sous le mot clé TABL_TEMP doit être définie aux mêmes instants que les tables qui contiennent les contraintes sous forme de transitoire (thermique, pression, mécanique selon la méthode de calcul)*

## 5.2 Calcul du facteur d'usage avec effet d'environnement

Pour le calcul du facteur d'usage avec effet d'environnement, deux grandeurs interviennent encore à ce stade : un critère sur la déformation (mot clé CRIT_EPSI) et le FEN intégré (mot clé FEN_INTEGRE). Ces deux grandeurs ne dépendent pas de la combinaison de situations, on ne rentre donc qu'une valeur pour toutes combinaisons de situations.

### 5.2.1 Critère sur la déformation minimale

Lors du calcul de $FEN_{comb}(p,q)$, si la somme des incréments de déformations dus aux situations p et q est inférieure à CRIT_EPSI alors l'effet d'environnement n'est pas pris en compte pour cette combinaison.

Plus précisément,

$$\text{si}\ \sum_k \Delta\epsilon_p(t_k)+\sum_k \Delta\epsilon_q(t_k)\leq\epsilon_{limite}\ \text{alors}\ FEN_{comb}(p,q)=1.$$

Enfin, pour obtenir le facteur d'usage élémentaire avec effet d'environnement, on multiplie le facteur d'usage élémentaire $U^{elem}(p,q)$ (partie 10) par le FEN de la combinaison des situations p et q :

$$U_{env}^{elem}(p,q)=U^{elem}(p,q).FEN_{comb}(p,q).$$

Le facteur d'usage total avec effet d'environnement $U_{env}^{TOT}$ est calculé en prenant en compte $U_{env}^{elem}(p,q)$ à la place de $U^{elem}(p,q)$ mais sans repasser par l'algorithme de la partie 10.

### 5.2.2 FEN global et FEN intégré

Une dernière vérification est alors faite : on définit le FEN global tel que :

$$FEN_{global}=\frac{U_{env}^{TOT}}{U^{TOT}}$$

Si $FEN_{global}>FEN_{integre}$ alors le facteur d'usage total avec effet d'environnement $U_{env}^{TOT}$ est mis à jour en les divisant par FEN_INTEGRE.

# 6 Type 'EVOLUTION'

## 6.1 Données de chargement

'EVOLUTION' est bien adapté 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



Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

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 c*ode_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).

Ce TYPE_RESU_MECA est celui qui conduit aux résultats les plus précis. Il 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, il permet de calculer le facteur d'amorçage au niveau d'une zone singulière, au sens de l'annexe ZD du RCC-M.

## 6.2 Calculs effectués avec l'option 'AXIS' et 'RAYON_MOYEN'

Le traitement de la linéarisation des contraintes à l'aide de la méthode 3D peut conduire à un résultat erroné en raison de la distribution de masse radiale inhomogène sous l'hypothèse axisymétrique. Pour un modèle axisymétrique, l'axe médian doit être décalé vers l'extérieur d'une distance de sorte que le moment de flexion résultant s'annule sur l'axe décalé [9].

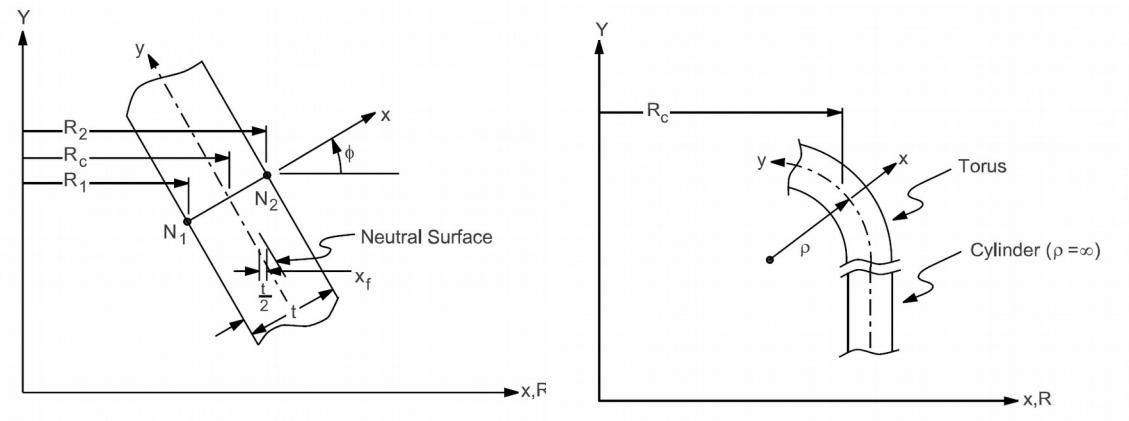



**Figure 6.2-1 Modèle axisymétrique et variables impliquées dans la méthode de linéarisation des contraintes. Gauche : modèle sans courbure ; Droite : modèle avec une courbure en plan XOY. (Réf. *ANSYS APDL Theory Reference* )**

Par convention, le modèle est axisymétrique autour de l'axe Y. Le tenseur des contraintes ayant été converti dans le repère 2D local, suivant la conception physique, on peut quantifier la distance de décalage pour linéariser la contrainte normale :

$$x_f = \frac{M_z}{F_y} = \frac{t^2 cos(\phi)}{12 R_c} \quad (6.2-1)$$

Où $M_z$ est le moment de flexion total dans la direction périphérique induit par la contrainte normale et $F_y$ est la force normale totale. Les autres variables sont visualisées dans la Figure 6.2-1.

De même, la distance de décalage pour linéariser la contrainte circonférentielle est exprimée comme :la distance de décalage pour linéariser la contrainte circonférentielle est exprimée :

$$x_h = \frac{M_y}{F_z} = \frac{t^2}{12 \rho} \quad (6.2-2)$$



Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

L'idée principale du calcul de la contrainte de membrane $\sigma_{ij}^{m}$ est de faire la moyenne de la force totale par l'aire élémentaire dans le plan qui est orthogonal à la composante de contrainte. Le calcul de la contrainte de flexion utilise l'équation dans la section 3.2 quand dans les cas 3D. La seule différence avec les modèles 3D est la prise en compte de l'axe décalé. Ici, le calcul détaillé est présenté à titre d'exemple pour la composante de contrainte circonférentielle dont la formulation est la plus compliquée.

$$\sigma_z^m = \frac{F_z}{A_z} = \frac{\int_{-t/2}^{t/2} \sigma_z(\rho + x)\Delta\phi dx}{\rho\Delta\phi t} = \frac{\int_{-t/2}^{t/2} \sigma_z(1 + x/\rho)dx}{t}$$

$$\sigma_z^b = \frac{M_z(x - x_h)}{I_y} = \frac{(x - x_h)\int_{-t/2}^{t/2} \sigma_z(\rho + x)\Delta\phi(x - x_h)dx}{\rho t\Delta\phi(t^2/12 - x_h^2)} = \frac{(x - x_h)}{t(t^2/12 - x_h^2)}\int_{-t/2}^{t/2} \sigma_z(1 + x/\rho)(x - x_h)dx$$

L'expression simplifiée des autres composantes de contrainte linéarisées peut être trouvée dans ANSYS APDL Theory Reference [10].
Le code nouvellement développé au sein de la commande code_aster POST_RCCM permet aux utilisateurs de basculer vers la routine de calcul optimisée si un modèle axisymétrique est déclaré, sans que les fonctionnalités d'origine de la commande ne soient perturbées. De plus, il a été possible d'indiquer la courbure de l'axe $\rho$ dans le plan XOY si nécessaire, en se référant à la Figure 6.2-1. La valeur $\rho$ par défaut a été fixée à -1 représentant un axe parfaitement droit.

## 6.3 Calculs effectués avec l'option 'PM_PB'

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 $n = 1, \text{nb_inst}$ :

- extraction des contraintes à l'instant $t$
- Sur chaque extrémité du segment :
  - calcul de $P_m(t)$, $P_b(t)$, $P_{\text{mb}}(t, s=0)$ et $P_{\text{mb}}(t, s=l)$ par intégration sur le segment

$$\%sigma a_{\text{ij}}^{\text{moy}}(t) = \frac{1}{l}\int_0^l \%sigma a_{\text{ij}}(t)\,\text{ds}, P_m(t) = ¿\%sigma a_{\text{ij}}^{\text{moy}}(t)\|¿$$

¿

  - 

$$\%sigma a_{\text{ij}}^{\text{fle}}(t) = \frac{6}{l^2}\int_0^l \left(s - \frac{l}{2}\right)\%sigma a_{\text{ij}}(t)\,\text{ds}, P_b(t) = ¿\%sigma a_{\text{ij}}^{\text{fle}}(t)\|P_{mb}(t, s=0) = \max_t \|\sigma_{ij}^{moy}(t) - \sigma_{ij}^{fle}(t)\|$$

  - $P_{mb}(t, s=l) = \max_t \|\sigma_{ij}^{moy}(t) + \sigma_{ij}^{fle}(t)\|$
- 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.

**Remarque :**



Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

*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.*

## 6.4 Calculs effectués avec l'option 'SN'

### 6.4.1 Calcul de Sn

On note $\mathrm{nb_inst}$ 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, $n_1=1,\mathrm{nb_inst}$
  - 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 $\mathrm{nb_inst}$
    - 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 :
      $\left(\%sigma_{ij}^{lin}(t_2,s=0)-\%sigma_{ij}^{lin}(t_1,s=0)\right)_{\mathrm{Eq.Tresca}}$ et
      $\left(\%sigma_{ij}^{lin}(t_2,s=l)-\%sigma_{ij}^{lin}(t_1,s=l)\right)_{\mathrm{Eq.Tresca}}$
    - 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).*

### 6.4.2 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.

### 6.4.3 Calcul du rochet thermique

Le calcul est effectué si les opérandes TABL_SIGM_THER et TABL_RESU_PRES sont présents. Il faut également avoir préalablement défini la limite conventionnelle d'élasticité pour la température



Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

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).

## 6.5 Calculs à la fatigue avec l'option 'FATIGUE_ZH210'

Les exigences relatives au calcul du facteur d'usage sont définies dans le §2.6.3.

La méthode ''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. Par défaut, dans c*ode_aster*, tous les instants de calcul sont utilisés. On associe à chacun d'eux le nombre d'occurrences $\mathrm{Nocc}$ 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.

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.

**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.*

### 6.5.1 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 :

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

Pour le calcul de $S_{alt}(k,l)$ , deux formules sont proposées (cf. partie 10) :

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



Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

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 :

$u(k,l)=$ ¿ .

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 $N_{tot}$.

### 6.5.2 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* $\mathrm{Nocc}(i)>0$ :

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

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

   $u^{max}=u(i,j),m=i,n=j$
4) $\mathrm{Nocc}(m,n)=\min(\mathrm{Nocc}(m),\mathrm{Nocc}(n))$
5) $u^{tot}=u^{tot}+\mathrm{Nocc}(m,n)*u(m,n)$
6) Réactualisation du nombre d'occurrences :
   $\mathrm{Nocc}(m)=\mathrm{Nocc}(m)-\mathrm{Nocc}(m,n)$
7) $\mathrm{Nocc}(n)=\mathrm{Nocc}(n)-\mathrm{Nocc}(m,n)$
8) 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 $S_{n^*}$.*

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.



Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

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.

| | j | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| i | **Nocc** | **1** | **1** | **5** | **5** | **10** | **10** |
| 1 | **1** | 0 | $1.10^{-4}$ | 0 | **$3.10^{-4}$** | $2.10^{-4}$ | $1.10^{-4}$ |
| 2 | **1** | | 0 | $1.10^{4}$ | $2.10^{-4}$ | $1.10^{4}$ | 0 |
| 3 | **5** | | | 0 | $3.10^{-4}$ | $2.10^{-4}$ | $1.10^{-4}$ |
| 4 | **5** | | | | 0 | $1.10^{-4}$ | $2.10^{-4}$ |
| 5 | **10** | | | | | 0 | $1.10^{-4}$ |
| 6 | **10** | | | | | | 0 |

**Tableau 6.4.2-1 :** Matrice initiale des facteurs d'usage

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

$$\mathrm{FA}^{\mathrm{tot}} = 0 + 1 * 3.10^{-4}$$

Les nombres d'occurrences sont mis à jour : $\mathrm{Nocc}(1)=0$, $\mathrm{Nocc}(4)=4$. 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.

| | j | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| i | **Nocc** | **0** | **1** | **5** | **4** | **10** | **10** |
| 1 | **0** | | | | | | |
| 2 | **1** | | 0 | $1.10^{-4}$ | $2.10^{-4}$ | $1.10^{-4}$ | 0 |
| 3 | **5** | | | 0 | **$3.10^{-4}$** | $2.10^{-4}$ | $1.10^{-4}$ |
| 4 | **4** | | | | 0 | $1.10^{-4}$ | $2.10^{-4}$ |
| 5 | **10** | | | | | 0 | $1.10^{-4}$ |
| 6 | **10** | | | | | | 0 |

**Tableau 6.4.2-2 :** 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 :

$$\mathrm{FA}^{\mathrm{tot}} = 1 * 3.10^{-4} + 4 * 3.10^{-4}$$

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 :

$$\mathrm{FA}^{\mathrm{tot}} = 1 * 3.10^{-4} + 4 * 3.10^{-4} + 1 * 2.10^{-4} + 9 * 1.10^{-4} = 2{,}6.10^{-3}$$

## 6.6 Calculs du facteur d'amorçage avec l'option 'AMORCAGE'

### 6.6.1 Principe du 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 précédemment 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.



Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

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

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

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 15) :

$$\%DELTA\%sigma_{\text{eff}}(d) = \text{A_AMORC}.(N_a)^{\text{B_AMORC}}$$

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

$$\Delta\sigma_{eff} = \frac{\Delta\sigma_{\theta\theta}}{1-¿} \; .$$

¿

**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).*

### 6.6.2 Calcul dans code_aster

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.

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**.

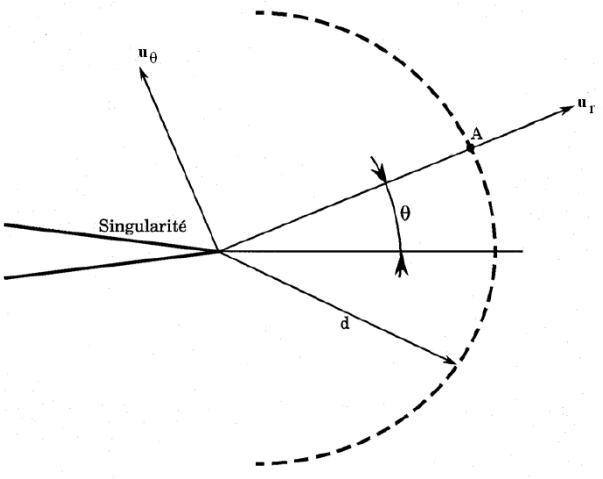



**Figure 6.5.2-a :** définition du repère local

Une telle table peut être créée à l'aide de la commande MACR_LIGN_COUPE. Comme dans le calcul en fatigue (cf. §6.4), 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



Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

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

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

$$N_a(i,j)=()^{1/\mathrm{B_AMORC}}$$
$$\mathrm{FA}(i,j)=$$ ¿

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. $\mathrm{FA}^{}\max=0$
2. $\mathrm{FA}^{\mathrm{tot}}=0$
3. Boucle $i=1\dots N_{tot}$ (recherche du maximum dans le tableau)

   *Si* $\mathrm{Nocc}(i)>0$ :

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

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

   $$\mathrm{FA}^{\max}=\mathrm{FA}(i,j),m=i,n=j$$
4. $\mathrm{Nocc}(m,n)=\min(\mathrm{Nocc}(m),\mathrm{Nocc}(n))$
5. $\mathrm{FA}^{\mathrm{tot}}=\mathrm{FA}^{\mathrm{tot}}+\mathrm{Nocc}(m,n)*\mathrm{FA}(m,n)$
6. Réactualisation du nombre d'occurrences :

   $$\mathrm{Nocc}(m)=\mathrm{Nocc}(m)-\mathrm{Nocc}(m,n)$$
   $$\mathrm{Nocc}(n)=\mathrm{Nocc}(n)-\mathrm{Nocc}(m,n)$$
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.



Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

# 7 Type 'B3600'

Dans code_aster, il est possible d'évaluer des critères de niveau A (fatigue) selon le chapitre B3600 du RCC-M. 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.

## 7.1 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).

### 7.1.1 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 :

$$M_i = M_{i_{CHAR\,1}} + M_{i_{CHAR\,2}} + \ldots \mathrm{i} \in (\mathrm{z})$$

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

### 7.1.2 Calcul des chargements sismiques

Le chargement sismique se décompose en deux 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 ¡ du moment s'écrit :

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

avec $M_{i_S_DYN}$ (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



Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

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 :

$$M_{i_S_ANC}=\sqrt{\sum_{k=1}^{N_ANC} ¿\left(M_{i_S_ANC}^{\ k}\right)^2}$$

¿

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

#### 7.1.2.1. 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 :

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

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

$$M_{i_S}=\sqrt{\sum_{k=1,N_ANC} ¿\left(M_{i_S_ANC}^{k}\right)^2+\left(M_{i_S_DYN}\right)^2}\ i\in(x;y;z)$$

¿

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.

### 7.1.3 Calcul des transitoires thermiques

Les chargements de type "gradient thermique dans l'épaisseur" sont décomposés en trois parties, cf. Figure 7.1.3-a :

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

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

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

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

- 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



Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

(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.

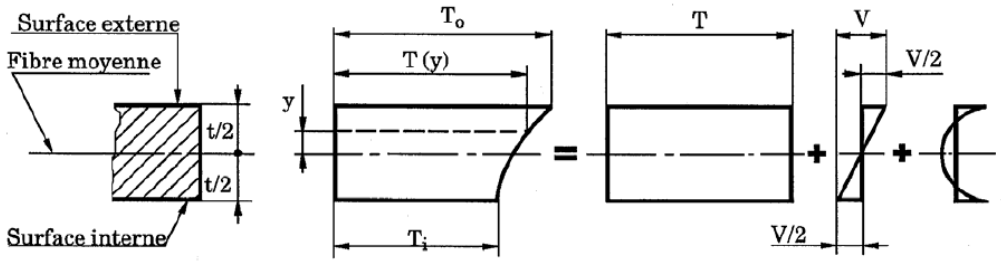



**Figure 7.1.3-a :** Décomposition de la distribution de température dans l'épaisseur de la paroi (figure extraite du RCC-M, §B3653.4)

## 7.2 Calculs des amplitudes de variation des contraintes

### 7.2.1 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 $S$ :

$$S(t_i,t_j)=S^{canique}(t_i)-S^{canique}(t_j)+S^{thermique}(t_i)-S^{thermique}(t_j)$$

Dans la méthode telle que développée dans c*ode_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 $(i,j)\in(1,2,..,N,1,2,..,N)$, $N$ étant le nombre d'états stabilisés hors séisme (c'est-à-dire 2 fois le nombre de situations du groupe). 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 :

$$S(i,j)=S^{canique}(i)-S^{canique}(j)+\max\left(\Delta S^{thermique}(p),\Delta S^{thermique}(q)\right)$$

en notant $\Delta S^{thermique}(p)$ 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 'B3600' est donc différente de celle adoptée pour le cas 'B3200_UNIT'.*

[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)* .

### 7.2.2 Calcul des combinaisons de chargement à l'intérieur de chaque groupe



Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

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).

#### 7.2.2.1. Notations et définitions

On note :

$C_1$, $C_2$, $C_3$, $K_1$, $K_2$, $K_3$ = Indices de contraintes fournis au §B3680 du RCC-M

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

$\nu$ = Coefficient de Poisson

$\alpha$ = 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 : $I=\frac{\%pi}{64}\left(D_{0^2}-\left(D_{0^2}-2t\right)^2\right)$

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

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

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

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

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

$\%DELTAT$ = 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 :

$$\%DELTAT_1(t_k,t_l)=\frac{12}{t^2}\int_{-t/2}^{t/2} y.T(t_k,t_l)(y).\mathrm{dy}=¿V(t_k)-V(t_l)$$

¿

$\%DELTAT$ = 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 $t_l$ :

$$\%DELTAT_2(t_k,t_l)=\max\left|\left|T_o(t_k,t_l)-T_{moy}(t_k,t_l)\right|-\left|1/2\%DE\right.\right.$$
$$\left.\left|\left|T_i(t_k,t_l)-T_{moy}(t_k,t_l)\right|-\left|1/2\%DE\right.\right.$$
$$0$$

#### 7.2.2.2. Calcul de Sp

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 :



Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

$$S_p(i,j,t_p)=K_1.C_1.\frac{|P_0(i,j)|.D_0}{2.t}+K_2.C_2.\frac{D_0}{2.I}.M_i(i,j)+\frac{1}{2.(1-\%nu)}.K_3.E.\%alpha.|\%DELT$$

$$+K_3.C_3.E_{ab}.|\%alpha_a.T_a(t_i k^p,t_i l^p)-\%alpha_b.T_b(t_i k^p,t_i l^p)|+\frac{1}{1-\%nu}.E.\%alpha.|\%DEL$$

$(t_i k^p, t_i l^p)$ désignent deux instants quelconques du transitoire associé à la situation $p$. En cas de discontinuité de matière ou d'une jonction, les termes $\%DELTAT_1$ et $\%DELTAT_2$ 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 :

$$S_p(i,j)=\max\left(\max_{(t_i k^q,t_i l^q)}\left(S_p(i,j,t_p)\right),\max_{(t_i k^q,t_i l^q)}\left(S_p(i,j,t_q)\right)\right)$$

#### 7.2.2.3. Calcul de Sn

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 :

$$S_n(i,j,t_p)=C_1.\frac{|P_0(i,j)|.D_0}{2.t}+C_2.\frac{D_0}{2.I}.M_i(i,j)+\frac{1}{2.(1-\%nu)}.E.\%alpha.|\%DELTA$$
$$+C_3.E_{ab}.|\%alpha_a.T_a(t_i k^p,t_i l^p)-\%alpha_b.T_b(t_i k^p,t_i l^p)|$$

$$S_n(i,j,t_q)=C_1.\frac{|P_0(i,j)|.D_0}{2.t}+C_2.\frac{D_0}{2.I}.M_i(i,j)+\frac{1}{2.(1-\%nu)}.E.\%alpha.|\%DELTA$$
$$+C_3.E_{ab}.|\%alpha_a.T_a(t_i k^q,t_i l^q)-\%alpha_b.T_b(t_i k^q,t_i l^q)|$$

$$S_n(i,j)=\max\left(\max_{(t_i k^q,t_i l^q)}\left(S_n(i,j,t_p)\right),\max_{(t_i k^q,t_i l^q)}\left(S_n(i,j,t_q)\right)\right)$$

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).

#### 7.2.2.4. Calcul de Salt

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 :

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

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.
- $E$ : 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.



Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

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

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 $S_{alt}$ :

$$S'_{alt}(i,j) = \frac{1}{2}.\frac{E_c}{E}.\left( K_{¿}e^{meca}(S_n(p,q)).S_{p^{meca}}(i,j) + K_{¿}e^{ther}(S_n(p,q)).S_{p^{the}} \right.$$

avec :

- $K_{¿}e^{meca}(S_n(p,q))$ est égal au $K_e$ défini ci-dessus
- $K_{e^{ther}}(S_n(p,q)) = \max\left( 1, 86\left( 1 - \frac{1}{1,66 + \frac{S_n}{S_m}} \right) \right)$
1

- $S_{p^{meca}}(i,j)$ 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 $T_a$, $T_b$, $\%DELTAT_1$ et $\%DELTAT_2$ dans la définition du §7.2.2.2).

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.

### 7.2.3 Calcul des combinaisons de chargement pour les situations de passage

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



Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

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

## 7.3 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 combinaisons d'états stabilisés $k$ et $l$ les plus pénalisantes, c'est à dire les combinaisons $(k,l)$ menant aux plus grandes valeurs de $S'_{alt}(k,l)$ .**

Pour chacune de ces 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 $l$:



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 $l$ ;

$\%DELTAM_{Sx}$ : amplitude totale de variation dans la direction $x$ des moments dus au séisme ( $\%DELTAM_{Sx}=2M_{x_S}$ où $M_{x_S}$ est le moment résultant total (inertie et déplacements d'ancrage) tel que définie dans le §7.1.2).

  - 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 :

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

  - On calcule le nombre de cycles admissibles $N(k,l)$ pour l'amplitude de contrainte $S'^{S}_{alt}(k,l)$ 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 :*



Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

- Amplitude de variation de la contrainte sismique seule :



- On calcule le nombre de cycles admissibles $N_{SC}(k,l)$ pour l'amplitude de contrainte $S_{SC}(k,l)$. 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 calcule enfin $u_2(k,l)=\dfrac{(2n_s-1)}{N_{SC}(k,l)}$

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

On recommence ce calcul jusqu'à épuisement des 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 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 :

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

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

- 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 : $u(k,l)=\dfrac{n_0}{N(k,l)}$ .
- On remplace enfin :

$n_k$ 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.

**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 $S'_{alt}$*



Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

*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.*

# 8 Annexe 1 : Équations B3200 pour des situations sous forme unitaire

Chaque état mécanique stabilisé est décrit à partir d'une pression $p$ et d'un torseur d'effort $\{F_X, F_Y, F_Z, M_X, M_Y, M_Z\}$ défini sous le mot clé 'CHAR_MECA'. Les tenseurs des contraintes sont reconstitués par combinaison linéaire à partir des tenseurs des contraintes associés à chacun des chargements unitaires. Par exemple, on note $\underset{\sim}{\sigma}^{F_x}$ le tenseur des contraintes associées au chargement unitaire en effort selon la direction x. Le calcul du tenseur des contraintes correspondant à un chargement mécanique appartenant à un état stabilisé est alors obtenu de la façon suivante :

$$\underset{\sim}{\sigma} = F_X . \underset{\sim}{\sigma}^{F_x} + F_Y . \underset{\sim}{\sigma}^{F_y} + F_Z . \underset{\sim}{\sigma}^{F_z} + M_X . \underset{\sim}{\sigma}^{M_x} + M_Y . \underset{\sim}{\sigma}^{M_y} + M_Z . \underset{\sim}{\sigma}^{M_z} + P . \underset{\sim}{\sigma}^{P}$$

L'utilisation de cette option nécessite le calcul préalable des champs de contraintes pour les 7 chargements unitaires et des champs de contraintes pour chacun des transitoires thermiques ; les champs unitaires sont à fournir sur le segment d'analyse par l'intermédiaire de tables sous le mot clé 'RESU_MECA_UNIT'.

**Remarques :**

- *Pour les piquages, il est également possible de définir deux tenseurs d'efforts associés respectivement au corps et à la tubulure. Le torseur d'effort passe de 6 à 12 composantes et on passe de 7 à 13 chargements unitaires. L'Annexe 5 résume les équations dans ce cas.*

## 8.1

## 8.2 Calculs effectués avec l'option 'PM_PB'

Pour l'instant, cette option est disponible si les données des situations sont sous forme unitaire uniquement, pas sous forme instantanée.
Etant donnée la contrainte primaire de la situation de référence (1ère catégorie) et un segment situé hors d'une zone de discontinuité majeure. En chaque point extrémité de ce segment de longueur *l*, on calcule pour une situation :

$$P_m = \max_t \| \sigma_{ij}^{moy} \|_{TRESCA} \text{ avec } \sigma_{ij}^{moy} = \frac{1}{l} \int_0^l \sigma_{ij} \, \text{ds et } \| \tau_{ij} \|_{TRESCA} = \max_{I,J} | \tau_I - \tau_J |$$

$$(\tau_{II=1,3} \text{ étant les contraintes principales})$$

$$P_b = \max_t \| \sigma_{ij}^{fle} \|_{TRESCA} \text{ avec } \sigma_{ij}^{fle} = \frac{6}{l^2} \int_0^l \left(s - \frac{l}{2}\right) \sigma_{ij} \, \text{ds}$$

$$P_{mb} = \max_t \| \sigma_{ij}^{lin} \|_{TRESCA} \text{ avec } \sigma_{ij}^{lin}(s=0) = \sigma_{ij}^{moy} - \sigma_{ij}^{fle}$$

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



Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

En notant $A$ et $B$ les deux états mécaniques stabilisés de la situation, on a :

$$P_m = \max_{\{\|\sigma_{ij}^{moy}\|^A, \|\sigma_{ij}^{moy}\|^B\}} \quad \text{et} \quad P_b = \max_{\{\|\sigma_{ij}^{fle}\|^A, \|\sigma_{ij}^{fle}\|^B\}}$$

$$P_{mb} = \max_{\{\|\sigma_{ij}^{lin}\|^A, \|\sigma_{ij}^{lin}\|^B\}} .$$

## 8.3 Calculs effectués avec l'option 'SN'

### 8.3.1

### 8.3.2 Calcul de Sn

Les points de calcul sont les deux extrémités du segment. Pour une situation donnée, en chaque point extrémité de ce segment de longueur $l$, on calcule $S_n$ selon le paragraphe B3232.6 :

$$S_n = \max_{t_1,t_2} \| \sigma_{ij}^{lin}(t_1) - \sigma_{ij}^{lin}(t_2) \|_{TRESCA} \text{ avec } \sigma_{ij}^{lin}(s=0) = \sigma_{ij}^{moy} - \sigma_{ij}^{fle}$$

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

On note $\sigma_A$ et $\sigma_B$ les contraintes mécaniques associées aux deux états stabilisés de la situation et $\sigma_{ther}(t)$ le transitoire thermique associé à cette situation. On a alors,

$$\sigma_{A^{lin}} - \sigma_{B^{lin}} = (F_{XA} - F_{XB})\sigma^{FX} + (F_{YA} - F_{YB})\sigma^{FY} + \ldots + (M_{ZA} - M_{ZB})\sigma^{MZ} + (P_A - P_B)\sigma^{P}$$

Selon la méthode de sélection des instants choisie (voir 14 ), on obtient l'amplitude Sn.

Avec 'METHODE' = 'TRESCA', $t^{maxSn}$ et $t^{minSn}$ étant les instants extrémaux de ce transitoire tels que définis au 14.le paramètre $S_n$ pour la situation est défini par :

$$S_n = \max( \| \sigma_{A^{lin}} - \sigma_{B^{lin}} + \sigma_{tran}^{lin}(t^{maxSn}) - \sigma_{tran}^{lin}(t^{minSn}) \|, \| \sigma_{B^{lin}} - \sigma_{A^{lin}} + \sigma_{tran}^{lin}(t^{maxSn}) - \sigma_{tran}^{lin}(t^{minSn}) \|) .$$

Avec 'METHODE' = 'TOUT_INST', le paramètre $S_n$ pour la situation est défini par :

$$S_n = max(S_{n1}, S_{n2}) ,$$

$$\text{avec } S_{n1} = \max_{t_1,t_2} \| \sigma_{A^{lin}} - \sigma_{B^{lin}} + \sigma_{ther}^{lin}(t_1) - \sigma_{ther}^{lin}(t_2) \|$$

$$\text{et } S_{n2} = \max_{t_1,t_2} \| \sigma_{B^{lin}} - \sigma_{A^{lin}} + \sigma_{ther}^{lin}(t_1) - \sigma_{ther}^{lin}(t_2) \| .$$

### 8.3.3 Calcul de Sn*

On note $S_{n^*}$ l'amplitude $S_n$ calculée sans prendre en compte les contraintes de flexion d'origine thermique.

Si un transitoire thermique est défini (i.e. le mot-clé NUME_RESU_THER est renseigné), le calcul de $S_{n^*}$ pour une situation se fait de manière similaire à celui de $S_n$ :

$$S_{n^*} = \max( \| \sigma_{A^{lin}} - \sigma_{B^{lin}} + \sigma_{ther}^{moy}(t^{maxSn}) - \sigma_{ther}^{moy}(t^{minSn}) \|, \| \sigma_{B^{lin}} - \sigma_{A^{lin}} + \sigma_{ther}^{moy}(t^{maxSn}) - \sigma_{ther}^{moy}(t^{minSn}) \|)$$



Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

### 8.3.4 Rochet thermiques

Voir partie 15.

## 8.4 Calculs effectués avec l'option 'FATIGUE'

### 8.4.1 Calcul de Sn

On note $\sigma_p$ (respectivement $\sigma_q$) les contraintes mécaniques associées à un état stabilisé de la situation p (respectivement de la situation q).

On note $\sigma_{tran,p}(t)$ le tenseur transitoire associé à la situation $p$ et $\sigma_{tran,q}(t)$ le tenseur transitoire associé à la situation q. $t_{p^{maxSn}}$ et $t_{p^{minSn}}$ les instants extrémaux du transitoire de la situation $p$ et $t_{q^{maxSn}}$ et $t_{q^{minSn}}$ les instants extrémaux du transitoire de la situation $q$ tels que définis au 14.

Avec 'METHODE' = 'TRESCA', le paramètre $S_n$ pour la combinaison des situations p et q est défini par :

$$S_n(p,q)=max(S_{nA},S_{nB},S_{nC},S_{nD})$$

$$\text{avec } S_{nA}=\max_{p,q}\left\|\sigma_{p^{lin}}-\sigma_{q^{lin}}+\sigma^{lin}_{tran,p}(t_{p^{maxSn}})-\sigma^{lin}_{tran,q}(t_{q^{minSn}})\right\|,$$

$$S_{nB}=\max_{p,q}\left\|\sigma_{q^{lin}}-\sigma_{p^{lin}}+\sigma^{lin}_{tran,p}(t_{p^{maxSn}})-\sigma^{lin}_{tran,q}(t_{q^{minSn}})\right\| \; S_{nC}=\max_{p,q}\left\|\sigma_{p^{lin}}-\sigma_{q^{lin}}+\sigma^{lin}_{tran,q}(t_{q^{maxSn}})-\sigma^{lin}_{tran,p}(t_{p^{minSn}})\right\|,$$

$$S_{nD}=\max_{p,q}\left\|\sigma_{q^{lin}}-\sigma_{p^{lin}}+\sigma^{lin}_{tran,q}(t_{q^{maxSn}})-\sigma^{lin}_{tran,p}(t_{p^{minSn}})\right\| .$$

Avec 'METHODE' = 'TOUT_INST', le paramètre $S_n$ pour la combinaison des situations p et q est défini par :

$$S_n(p,q)=max(S_{nA},S_{nB})$$

$$\text{avec } S_{nA}=\max_{t_1,t_2}\left\|\sigma_{p^{lin}}-\sigma_{q^{lin}}+\sigma^{lin}_{tran,p}(t_1)-\sigma^{lin}_{tran,q}(t_2)\right\|$$

$$\text{et } S_{nB}=\max_{t_1,t_2}\left\|\sigma_{q^{lin}}-\sigma_{p^{lin}}+\sigma^{lin}_{tran,p}(t_1)-\sigma^{lin}_{tran,q}(t_2)\right\| .$$

**Remarque :**

*Dans ce cas,* $\sigma_{tran}(t)=\sigma_{ther}(t)$ .

### 8.4.2 Calcul de Sp

On note $\sigma_p$ (respectivement $\sigma_q$) les contraintes mécaniques associées à un état stabilisé de la situation p (respectivement de la situation q).

On note $\sigma_{tran,p}(t)$ le tenseur transitoire associé à la situation p et $\sigma_{tran,q}(t)$ le tenseur transitoire associé à la situation q. $t_{p^{maxSp}}$ et $t_{p^{minSp}}$ les instants extrémaux du transitoire de la situation p et $t_{q^{maxSp}}$ et $t_{q^{minSp}}$ les instants extrémaux du transitoire de la situation q tels que définis au 14.



Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Avec 'METHODE' = 'TRESCA', les paramètres $S_{p1}$ et $S_{p2}$ pour la combinaison des situations p et q sont définis par :

$$S_{p^1}(p,q)=max(S_{pA},S_{pB})$$

$$S_{p^2}(p,q)=min(S_{pA},S_{pB})$$

En maximisant sur les quatre combinaisons possibles d'états stabilisés $(\sigma_p,\sigma_q)$,

$S_{pA}=max(\|\sigma_p-\sigma_q+\sigma_{tran,p}(t_{p^{maxSp}})-\sigma_{tran,q}(t_{q^{minSp}})\|,\|\sigma_q-\sigma_p+\sigma_{tran,p}(t_{p^{maxSp}})-\sigma_{tran,q}(t_{q^{minSp}})\|)$ ,

soit 8 possibilités.

$S_{pB}=max(\|\sigma_p-\sigma_q+\sigma_{tran,q}(t_{q^{maxSp}})-\sigma_{tran,p}(t_{p^{minSp}})\|,\|\sigma_q-\sigma_p+\sigma_{tran,q}(t_{q^{maxSp}})-\sigma_{tran,p}(t_{p^{minSp}})\|)$ ,

soit 8 possibilités.

Avec 'METHODE' = 'TOUT_INST', le paramètre $S_{p1}$ pour la combinaison des situations p et q est défini par :

$S_{p^1}(p,q)=max(S_{pA},S_{pB})$

avec $S_{pA}=\max_{t_1,t_2}\|\sigma_p-\sigma_q+\sigma_{tran,p}(t_1)-\sigma_{tran,q}(t_2)\|$ et

$S_{pB}=\max_{t_1,t_2}\|\sigma_q-\sigma_p+\sigma_{tran,p}(t_1)-\sigma_{tran,q}(t_2)\|$ .

Si $t_{1^p}$ et $t_{1^q}$ sont les instants du transitoire fictif 1 $S_{p^1}(p,q)$, alors on détermine les instants du transitoire fictif 2 $t_{2^p}$ et $t_{2^q}$ selon la méthode décrite dans l'Annexe 2 et la grandeur $S_{p^2}(p,q)$ vaut en maximisant sur les quatre combinaisons possibles d'états stabilisés $(\sigma_p,\sigma_q)$, :

$$S_{p^2}(p,q)=max(\|\sigma_q-\sigma_p+\sigma_{tran,p}(t_{2^p})-\sigma_{tran,q}(t_{2^q})\|,\|\sigma_p-\sigma_q+\sigma_{tran,p}(t_{2^p})-\sigma_{tran,q}(t_{2^q})\|)$$

**Remarques :**

*Dans cette partie ,* $\sigma_{tran}(t)=\sigma_{ther}(t)$ .

**8.4.2.1.**

### 8.4.3 Calcul de Sp meca

On note $\sigma_{p1}$ (respectivement $\sigma_{q1}$) les contraintes mécaniques associées aux états stabilisés de la situation p et de la situation q qui ont maximisé la grandeur $S_{p^1}$. On note $\sigma_{p2}$ (respectivement $\sigma_{q2}$) les contraintes mécaniques associées aux états stabilisés qui ont maximisé la grandeur $S_{p^2}$.

Avec 'METHODE' = 'TRESCA' et 'METHODE' = 'TOUT_INST' :

$$S_{p^{meca,1}}(p,q)=\|\sigma_{p1}-\sigma_{q1}\| \text{ et } S_{p^{meca,2}}(p,q)=\|\sigma_{p2}-\sigma_{q2}\|$$

# 9 Annexe 2 : Équations B3200 pour des situations sous forme unitaire avec interpolation sur la température

Chaque situation est définie par deux états mécaniques stabilisés A et B. Chaque état est décrit à partir d'une



Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

pression $p$ et d'un torseur d'effort $\{F_X, F_Y, F_Z, M_X, M_Y, M_Z\}$ défini sous le mot clé 'CHAR_MECA' et correspond à une température (TEMP_A ou TEMP_B). Dans cet exemple, les situations n'ont pas de chargement en pression.

L'utilisateur doit aussi rentrer le profil de température fonction du temps au cours de la situation (mot-clé 'TABL_TEMP' sous le mot clé facteur 'SITUATION' )

Les tenseurs des contraintes sont alors reconstitués par interpolation linéaire à partir de cette température fonction du temps et des deux torseurs. L'utilisation de cette option nécessite le calcul préalable des champs de contraintes pour les 6 chargements unitaires ('RESU_MECA_UNIT') et des champs de contraintes pour chacun des transitoires thermiques('RESU_THER').

Pour l'instant, le calcul du PM_PB n'est pas disponible si les données des situations sont sous forme unitaire avec interpolation sur la température.

## 9.1 Calcul de Sn pour une situation

On note $\sigma_{A^{mom,lin}}$ et $\sigma_{B^{mom,lin}}$ les contraintes mécaniques linéarisées associées aux moments des deux états stabilisés de la situation et $\sigma_{ther}(t)$ le transitoire thermique associé à cette situation. On a alors,

$$\sigma_{A^{mom,lin}}(T=TEMP_A)=F_{XA}\sigma^{lin,FX}+F_{YA}\sigma^{lin,FY}+F_{ZA}\sigma^{lin,FZ}+M_{XA}\sigma^{MX,lin}+M_{YA}\sigma^{MY,lin}+M_{ZA}\sigma^{MZ,lin}$$

$$\sigma_{B^{mom,lin}}(T=TEMP_B)=F_{XB}\sigma^{lin,FX}+F_{YB}\sigma^{lin,FY}+F_{ZB}\sigma^{lin,FZ}+M_{XB}\sigma^{MX,lin}+M_{YB}\sigma^{MY,lin}+M_{ZB}\sigma^{MZ,lin}$$

Aux instants t1 et t2, on a $T(t_1)=TEMP_1$ et $T(t_2)=TEMP_2$. Si $TEMP_A<TEMP_B$, par interpolation on a

$$F_X(t_1)=\frac{F_{XB}-F_{XA}}{TEMP_B-TEMP_A}*TEMP_1+\frac{F_{XA}TEMP_B-F_{XB}TEMP_A}{TEMP_B-TEMP_A}$$

$$F_X(t_2)=\frac{F_{XB}-F_{XA}}{TEMP_B-TEMP_A}*TEMP_2+\frac{F_{XA}TEMP_B-F_{XB}TEMP_A}{TEMP_B-TEMP_A}$$

Les équations sont similaires pour les cinq autres composantes. On en déduit l'expression des contraintes mécaniques linéarisées dues aux moments aux instants t1 et t2

$$\sigma^{mom,lin}(t_1)=F_X(t_1)\sigma^{lin,FX}+F_Y(t_1)\sigma^{lin,FY}+\ldots+M_Z(t_1)\sigma^{MZ,lin}$$
$$\sigma^{mom,lin}(t_2)=F_X(t_2)\sigma^{lin,FX}+F_Y(t_2)\sigma^{lin,FY}+\ldots+M_Z(t_2)\sigma^{MZ,lin}.$$

Avec 'METHODE' = 'TOUT_INST', le paramètre $S_n$ pour la situation est défini par :

$$S_n=\max_{t_1,t_2}\| \sigma^{mom,lin}(t_1)-\sigma^{mom,lin}(t_2)+\sigma^{lin}_{ther}(t_1)-\sigma^{lin}_{ther}(t_2)\|$$

Avec 'METHODE' = 'TRESCA', le paramètre $S_n$ pour la situation est défini par :

$$S_n=\| \sigma^{mom,lin}(t_{maxSn})-\sigma^{mom,lin}(t_{minSn})+\sigma^{lin}_{ther}(t_{maxSn})-\sigma^{lin}_{ther}(t_{minSn})\|$$

## 9.2 Calculs effectués avec l'option 'FATIGUE'

Manuel de référence Fascicule r7.04: Evaluation du dommage

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

### 9.2.1 Calcul de Sn pour une combinaison de situations p et q

On note $\sigma_{Ap}^{mom,lin}$ et $\sigma_{Bp}^{mom,lin}$ les contraintes mécaniques linéarisées associées aux moments des deux états stabilisés de la situation p et $\sigma_{ther,p}$ le transitoire thermique associé à cette situation.

On note $\sigma_{Aq}^{mom,lin}$ et $\sigma_{Bq}^{mom,lin}$ les contraintes mécaniques linéarisées associées aux moments des deux états stabilisés de la situation p et $\sigma_{ther,q}$ le transitoire thermique associé à cette situation.

Pour l'instant $t_p$ appartenant à $\sigma_{ther,p}$, on a $T(t_p)=TEMP_p$ et si $TEMP_{Ap}<TEMP_{Bp}$, par interpolation on a

$$F_X(t_p)=\frac{F_{XBp}-F_{XAp}}{TEMP_{Bp}-TEMP_{Ap}}*TEMP_p+\frac{F_{XAp}TEMP_{Bp}-F_{XBp}TEMP_{Ap}}{TEMP_{Bp}-TEMP_{Ap}}$$

Pour l'instant $t_q$ appartenant à $\sigma_{ther,q}$, on a $T(t_q)=TEMP_q$ et si $TEMP_{Aq}<TEMP_{Bq}$, par interpolation on a

$$F_X(t_q)=\frac{F_{XBq}-F_{XAq}}{TEMP_{Bq}-TEMP_{Aq}}*TEMP_q+\frac{F_{XAq}TEMP_{Bq}-F_{XBq}TEMP_{Aq}}{TEMP_{Bq}-TEMP_{Aq}}.$$

Les équations sont similaires pour les cinq autres composantes. On en déduit l'expression des contraintes mécaniques linéarisées dues aux moments aux instants $t_p$ et $t_q$.

$$\sigma^{mom,lin}(t_p)=F_X(t_p)\sigma^{lin,FX}+F_Y(t_p)\sigma^{lin,FY}+\ldots+M_Z(t_p)\sigma^{MZ,lin}$$
$$\sigma^{mom,lin}(t_q)=F_X(t_q)\sigma^{lin,FX}+F_Y(t_q)\sigma^{lin,FY}+\ldots+M_Z(t_q)\sigma^{MZ,lin}.$$

Avec 'METHODE' = 'TOUT_INST', le paramètre $S_n$ pour la combinaison des situations p et q est :

$$S_n=\max_{t_p,t_q}\|\sigma^{mom,lin}(t_p)-\sigma^{mom,lin}(t_q)+\sigma_{ther,p}^{lin}(t_p)-\sigma_{ther,q}^{lin}(t_q)\|$$

### 9.2.2 Calcul de Sp pour une combinaison de situations p et q

On note $\sigma_{Ap}^{mom}$ et $\sigma_{Bp}^{mom}$ les contraintes mécaniques associées aux moments des deux états stabilisés de la situation p et $\sigma_{ther,p}$ le transitoire thermique associé à cette situation.

On note $\sigma_{Aq}^{mom}$ et $\sigma_{Bq}^{mom}$ les contraintes mécaniques associées aux moments des deux états stabilisés de la situation p et $\sigma_{ther,q}$ le transitoire thermique associé à cette situation.

Pour l'instant $t_p$ appartenant à $\sigma_{ther,p}$, on a $T(t_p)=TEMP_p$ et si $TEMP_{Ap}<TEMP_{Bp}$, par interpolation on a

$$F_X(t_p)=\frac{F_{XBp}-F_{XAp}}{TEMP_{Bp}-TEMP_{Ap}}*TEMP_p+\frac{F_{XAp}TEMP_{Bp}-F_{XBp}TEMP_{Ap}}{TEMP_{Bp}-TEMP_{Ap}}$$

Pour l'instant $t_q$ appartenant à $\sigma_{ther,q}$, on a $T(t_q)=TEMP_q$ et si $TEMP_{Aq}<TEMP_{Bq}$, par interpolation on a

$$F_X(t_q)=\frac{F_{XBq}-F_{XAq}}{TEMP_{Bq}-TEMP_{Aq}}*TEMP_q+\frac{F_{XAq}TEMP_{Bq}-F_{XBq}TEMP_{Aq}}{TEMP_{Bq}-TEMP_{Aq}}.$$



Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Les équations sont similaires pour les cinq autres composantes. On en déduit l'expression des contraintes mécaniques dues aux moments aux instants $t_p$ et $t_q$.

$$\sigma^{mom}(t_p)=F_X(t_p)\sigma^{FX}+F_Y(t_p)\sigma^{FY}+\ldots+M_Z(t_p)\sigma^{MZ}$$
$$\sigma^{mom}(t_q)=F_X(t_q)\sigma^{FX}+F_Y(t_q)\sigma^{FY}+\ldots+M_Z(t_q)\sigma^{MZ}\,.$$

Avec 'METHODE' = 'TOUT_INST', le paramètre $S_{p^1}$ pour la combinaison des situations p et q est :

$$S_{p^1}=\max_{t_p,t_q}\|\sigma^{mom}(t_p)-\sigma^{mom}(t_q)+\sigma_{ther,p}(t_p)-\sigma_{ther,q}(t_q)\|$$

Les instants de $S_{p^2}$ sont déterminés selon l'Annexe 5.

# 10 Annexe 3 : Équations pour une jonction de tuyauteries (piquage)

## 10.1 Type 'B3200'

Situation de type unitaire

On note $\sigma_1$ et $\sigma_2$ les contraintes mécaniques associées aux deux états stabilisés de la situation. Seules les définitions de $\sigma_1$ et $\sigma_2$ changent par rapport au cas d'un seul jeu de torseurs externes.

Pour un composant, chaque état mécanique stabilisé est décrit à partir d'une pression $p$ et d'un torseur d'effort $\{F_X,F_Y,F_Z,M_X,M_Y,M_Z\}$ défini sous le mot clé 'CHAR_MECA'. Pour une jonction de tuyauterie, on fournit deux torseurs d'efforts :

$$\{F_{X,corp},F_{Y,corp},F_{Z,corp},M_{X,corp},M_{Y,corp},M_{Z,corp}\}$$
$$\{F_{X,tubu},F_{Y,tubu},F_{Z,tubu},M_{X,tubu},M_{Y,tubu},M_{Z,tubu},\}\,.$$

Les tenseurs des contraintes sont reconstitués par combinaison linéaire à partir des tenseurs des contraintes associés à chacun des chargements unitaires. Par exemple, on note $\underset{\sim}{\sigma}^{F_X,tubu}$ le tenseur des contraintes associées au chargement unitaire en effort selon la direction x pour la tubulure. Le calcul du tenseur des contraintes correspondant à un chargement mécanique appartenant à un état stabilisé est alors obtenu de la façon suivante :

$$\underset{\sim}{\sigma}=F_{X,tubu}.\underset{\sim}{\sigma}^{F_X,tubu}+F_{Y,tubu}.\underset{\sim}{\sigma}^{F_Y,tubu}+F_{Z,tubu}.\underset{\sim}{\sigma}^{F_Z,tubu}+M_{X,tubu}.\underset{\sim}{\sigma}^{M_X,tubu}$$
$$+M_{Y,tubu}.\underset{\sim}{\sigma}^{M_Y,tubu}+M_{Z,tubu}.\underset{\sim}{\sigma}^{M_Z,tubu}+F_{X,corp}.\underset{\sim}{\sigma}^{F_X,corp}+F_{Y,corp}.\underset{\sim}{\sigma}^{F_Y,corp}$$
$$+F_{Z,corp}.\underset{\sim}{\sigma}^{F_Z,corp}+M_{X,corp}.\underset{\sim}{\sigma}^{M_X,corp}+M_{Y,corp}.\underset{\sim}{\sigma}^{M_Y,corp}+M_{Z,corp}.\underset{\sim}{\sigma}^{M_Z,corp}+P.\underset{\sim}{\sigma}^{P}$$

Le calcul des grandeurs $S_n$ et $S_p$ est ensuite identique à un seul composant.

Situation de type instantané

On note $\sigma_{tran}(t)$ le tenseur transitoire associé à la situation. Pour un composant, on rentre le transitoire thermique sous RESU_THER, le transitoire de pression sous RESU_PRES et le transitoire dû aux efforts et moments sous RESU_MECA et $\sigma_{tran}(t)=\sigma_{ther}(t)+\sigma_{pres}(t)+\sigma_{meca}(t)$.

Pour une jonction de tuyauterie, il faut rentrer sous RESU_MECA le tenseur somme des tenseurs du corps et de la tubulure.



Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

$$\sigma_{meca}(t)=\sigma_{meca,corp}(t)+\sigma_{meca,tubu}(t)$$

Le calcul des grandeurs $S_n$ et $S_p$ est ensuite identique à un seul composant.

## 10.2 Type ' ZE200a '

On note $\sigma_{tran}$ le tenseur somme des transitoires associé à la situation et $t^{maxSn}$ et $t^{minSn}$, $t^{maxSp}$ et $t^{minSp}$ les instants extrémaux de ce transitoire tels que définis au 14. On indice A et B les grandeurs des états stabilisés de la situation (pression et torseur sur les moments). R, $R_{tubu}$, $R_{corp}$, et I, $I_{tubu}$, $I_{corp}$ sont les caractéristiques géométriques de la tuyauterie, $K_1$, $K_{2,tubu}$,$K_{2,corp}$, $K_3$, $C_1$, $C_{2,tubu}$ , $C_{2,corp}$ et $C_3$ sont les indices de contraintes du RCC-M.

Le paramètre $S_n$ pour une situation est défini par :

$$S_n=S_n'+S_n'' \text{ avec}$$

$$S_n''=C_1\frac{R}{e}|P_A-P_B|+C_{2,corp}\frac{R_{corp}}{I_{corp}}\sqrt{(M_{XA,corp}-M_{XB,corp})^2+(M_{YA,corp}-M_{YB,corp})^2+(M_{ZA,corp}-M_{ZB,}$$
$$+C_{2,tubu}\frac{R_{tubu}}{I_{tubu}}\sqrt{(M_{XA,tubu}-M_{XB,tubu})^2+(M_{YA,tubu}-M_{YB,tubu})^2+(M_{ZA,tubu}-M_{ZB,tubu})^2}$$

Avec 'METHODE' = 'TRESCA' ,

$$S_n'=\| \sigma_{tran}^{lin}(t^{maxSn})-\sigma_{tran}^{lin}(t^{minSn}) \|$$

Avec 'METHODE' = 'TOUT_INST' ,

$$S_n'=\max_{t_1,t_2}\| \sigma_{tran}^{lin}(t_1)-\sigma_{tran}^{lin}(t_2) \|$$

Pour les deux méthodes,

$$S_p=S_{p^1}'+S_p''+S_p''' \text{ et } S_{p^{meca}}=S_p'' \text{ avec}$$

$$S_p''=K_1C_1\frac{R}{e}|P_A-P_B|+S_{p,moments}''$$

$$S_{p,moments}''=K_{2,corp}C_{2,corp}\frac{R_{corp}}{I_{corp}}\sqrt{(M_{XA,corp}-M_{XB,corp})^2+(M_{YA,corp}-M_{YB,corp})^2+(M_{ZA,corp}-M_{ZB,co}$$
$$+K_{2,tubu}C_{2,tubu}\frac{R_{tubu}}{I_{tubu}}\sqrt{(M_{XA,tubu}-M_{XB,tubu})^2+(M_{YA,tubu}-M_{YB,tubu})^2+(M_{ZA,tubu}-M_{ZB,tubu})^2}$$

$$\text{et } S_p'''=(K_3C_3-1)S_{n,ther}'$$

Avec 'METHODE' = 'TRESCA' ,

$$S_{n,ther}'=\| \sigma_{ther}^{lin}(t^{maxSn})-\sigma_{ther}^{lin}(t^{minSn}) \| \text{ et}$$



Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

$$S_{p^1}' = \| \sigma_{ther}(t^{maxSp}) - \sigma_{ther}(t^{minSp}) \| .$$

Avec 'METHODE' = 'TOUT_INST',

- on reprend les instants $t_{p^1}$ et $t_{p^2}$ qui maximisent la grandeur $S_n'$ et $S_{n,ther}' = \| \sigma_{ther}^{lin}(t_{p^1}) - \sigma_{ther}^{lin}(t_{p^2}) \|$,
- on calcule la grandeur $S_{p^1}'$ telle que $S_{p^1}' = \max_{t_1, t_2} \| \sigma_{ther}(t_1) - \sigma_{ther}(t_2) \|$.

**Remarque :**

*Dans ce paragraphe*, $\sigma_{tran}(t) = \sigma_{ther}(t)$.

## 10.3 Type 'ZE200b'

On note $\sigma_{tran}$ le tenseur somme des transitoires associé à la situation et $t^{maxSn}$ et $t^{minSn}$, $t^{maxSp}$ et $t^{minSp}$ les instants extrémaux de ce transitoire tels que définis au 14. On indice A et B les grandeurs des états stabilisés de la situation (pression et torseur sur les moments). R, $R_{tubu}$, $R_{corp}$, et I, $I_{tubu}$, $I_{corp}$ sont les caractéristiques géométriques de la tuyauterie, $K_1$, $K_{2,tubu}$,$K_{2,corp}$, $K_3$, $C_1$, $C_{2,tubu}$, $C_{2,corp}$ et $C_3$ sont les indices de contraintes du RCC-M.

Le paramètre $S_n$ pour une situation est défini par :

$$S_n = S_n' + S_n''$$

$$S_n'' = C_{2,corp} \frac{R_{corp}}{I_{corp}} \sqrt{(M_{XA,corp} - M_{XB,corp})^2 + (M_{YA,corp} - M_{YB,corp})^2 + (M_{ZA,corp} - M_{ZB,corp})^2}$$
$$+ C_{2,tubu} \frac{R_{tubu}}{I_{tubu}} \sqrt{(M_{XA,tubu} - M_{XB,tubu})^2 + (M_{YA,tubu} - M_{YB,tubu})^2 + (M_{ZA,tubu} - M_{ZB,tubu})^2}$$

Avec 'METHODE' = 'TRESCA', $S_n' = \| \sigma_{tran}^{lin}(t^{maxSn}) - \sigma_{tran}^{lin}(t^{minSn}) \|$ et avec 'METHODE' = 'TOUT_INST', $S_n' = \max_{t_1, t_2} \| \sigma_{tran}^{lin}(t_1) - \sigma_{tran}^{lin}(t_2) \|$.

Pour les deux méthodes,

$S_p = S_{p^1}' + S_p'' + S_p'''$ et $S_{p^{meca}} = S_{p^{meca,1}}' + S_p'' + S_{p^{meca}}'''$ avec

$$S_p'' = K_{2,corp} C_{2,corp} \frac{R_{corp}}{I_{corp}} \sqrt{(M_{XA,corp} - M_{XB,corp})^2 + (M_{YA,corp} - M_{YB,corp})^2 + (M_{ZA,corp} - M_{ZB,corp})^2}$$
$$+ K_{2,tubu} C_{2,tubu} \frac{R_{tubu}}{I_{tubu}} \sqrt{(M_{XA,tubu} - M_{XB,tubu})^2 + (M_{YA,tubu} - M_{YB,tubu})^2 + (M_{ZA,tubu} - M_{ZB,tubu})^2}$$

et $S_p''' = (K_3 C_3 - 1) S_{n,ther}' + (K_1 C_1 - 1) S_{n,pres}'$, $S_{p^{meca}}''' = (K_1 C_1 - 1) S_{n,pres}'$.



Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Avec 'METHODE' = 'TRESCA' ,

$$S_{n,ther}' = \| \sigma_{ther}^{lin}(t^{maxSn}) - \sigma_{ther}^{lin}(t^{minSn}) \| \text{ et } S_{n,pres}' = \| \sigma_{pres}^{lin}(t^{maxSn}) - \sigma_{pres}^{lin}(t^{minSn}) \|$$

$$S_{p^1}' = \| \sigma_{tran}(t^{maxSp}) - \sigma_{tran}(t^{minSp}) \| \text{ et } S_{p^{meca,1}}' = \| \sigma_{pres}(t^{maxSp}) - \sigma_{pres}(t^{minSp}) \|$$

Avec 'METHODE' = 'T OUT_INST ' , on reprend les instants $t_{p^1}$ et $t_{p^2}$ qui maximisent la grandeur $S_n'$ : $S_{n,ther}' = \| \sigma_{ther}^{lin}(t_{p^1}) - \sigma_{ther}^{lin}(t_{p^2}) \|$ et $S_{n,pres}' = \| \sigma_{pres}^{lin}(t_{p^1}) - \sigma_{pres}^{lin}(t_{p^2}) \|$ .

$S_{p^1}' = \max_{t_1,t_2} \| \sigma_{tran}(t_1) - \sigma_{tran}(t_2) \|$ et $S_{p^{meca,1}}' = \| \sigma_{pres}(t_{p^3}) - \sigma_{pres}(t_{p^4}) \|$ (on prend les instants $t_{p^3}$ et $t_{p^4}$ qui maximisent la grandeur $S_{p^1}'$).

**Remarque :**

*Dans ce tte partie,* $\sigma_{tran}(t) = \sigma_{ther}(t) + \sigma_{pres}(t)$ .

# 11 Annexe 4 : Calcul du SP et du SP$^{meca}$ d'une situation seule ('B3200', 'ZE200a' et 'ZE200b')

## 11.1 Type 'B3200'

Situation de type unitaire

On note $\sigma_{p1}\sigma_{p2}$ et les contraintes mécaniques associées aux états stabilisés de la situation p.

$$S_{p^{meca}}(p,p) = \| \sigma_{p1} - \sigma_{p2} \|$$

Avec 'METHODE' = 'TRESCA', le paramètre $S_p(p,p)$ pour la situation p est défini par :

$$S_p(p,p) = max(S_{pA}, S_{pB})$$

avec $S_{pA} = \| \sigma_{p1} - \sigma_{p2} + \sigma_{ther,p}(t_{p^{maxSp}}) - \sigma_{ther,p}(t_{p^{minSp}}) \|$ et

$S_{pB} = \| \sigma_{p2} - \sigma_{p1} + \sigma_{ther,p}(t_{p^{maxSp}}) - \sigma_{ther,p}(t_{p^{minSp}}) \|$ ,

Avec 'METHODE' = 'TOUT_INST' ,le paramètre $S_p(p,p)$ pour la situation p est défini par :

$$S_p(p,p) = max(S_{pA}, S_{pB})$$

avec $S_{pA} = \max_{t_1,t_2} \| \sigma_{p1} - \sigma_{p2} + \sigma_{ther,p}(t_1) - \sigma_{ther,p}(t_2) \|$ et

$S_{pB} = \max_{t_1,t_2} \| \sigma_{p2} - \sigma_{p1} + \sigma_{ther,p}(t_1) - \sigma_{ther,p}(t_2) \|$ .

Situation de type instantané

Avec 'METHODE' = 'TRESCA' , le paramètre $S_p(p,p)$ pour la situation p est défini par :

$$S_p(p,p) = \| \sigma_{ther+pres+meca,p}(t_{p^{maxSp}}) - \sigma_{ther+pres+meca,p}(t_{p^{minSp}}) \| ,$$



Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

$$S_{p^{meca}}(p,p)=\| \sigma_{pres+meca,p}(t_{p^{maxSp}})-\sigma_{pres+meca,p}(t_{p^{minSp}}) \|$$

Avec 'METHODE' = 'TOUT_INST' , le paramètre $S_p(p,p)$ pour la situation p est défini par :

$$S_p(p,p)=\max_{t_1,t_2} \| \sigma_{ther+pres+meca,p}(t_1)-\sigma_{ther+pres+meca,p}(t_2) \| .$$

Si $t_{p^1}$ et $t_{p^2}$ sont les instants qui maximisent $S_p$, alors

$$S_{p^{meca}}(p,p)=\| \sigma_{pres+meca,p}(t_{p^1})-\sigma_{pres+meca,p}(t_{p^2}) \|$$

## 11.2 Type ' ZE200a '

$S_p(p,p)=S_{p^1}'+S_p''+S_p'''$ et $S_{p^{meca}}(p,p)=S_p''$ avec

$S_p''=K_1C_1\frac{R}{C}|P_{p1}-P_{p2}|+K_2C_2\frac{R}{I}\sqrt{(M_{Xp1}-M_{Xp2})^2+(M_{Yp1}-M_{Yp2})^2+(M_{Zp1}-M_{Zp2})^2}$ **et** $S_p'''=(K_3C_3-1)S_{n,ther}'$

Avec 'METHODE' = 'TRESCA' ,

$$S_{n,ther}'=\| \sigma^{lin}_{ther,p}(t_{p^{maxSn}})-\sigma^{lin}_{ther,p}(t_{p^{minSn}}) \| .$$

$$S_{p^1}'=\| \sigma_{ther,p}(t_{p^{maxSp}})-\sigma_{ther,p}(t_{p^{minSp}}) \|$$

Avec 'METHODE' = 'T OUT_INST ' ,

$$S_{n,ther}'=\max_{t_1,t_2} \| \sigma^{lin}_{ther,p}(t_1)-\sigma^{lin}_{ther,p}(t_2) \| ,$$

$$S_{p^1}'=\max_{t_1,t_2} \| \sigma_{ther,p}(t_1)-\sigma_{ther,p}(t_2) \|$$

## 11.3 Type ' ZE200b '

$$S_p(p,p)=S_{p^1}'+S_p''+S_p'''$$

$$S_{p^{meca}}(p,p)=S_{p^{meca,1}}'+S_p''+S_{p^{meca}}'''$$

avec $S_p''=K_2C_2\frac{R}{I}\sqrt{(M_{Xp1}-M_{Xp2})^2+(M_{Yp1}-M_{Yp2})^2+(M_{Zp1}-M_{Zp2})^2}$ et

$S_p'''=(K_3C_3-1)S_{n,ther}'+(K_1C_1-1)S_{n,pres}'$ et $S_{p^{meca}}'''=(K_1C_1-1)S_{n,pres}'$

On note $\sigma_{tran}(t)=\sigma_{ther}(t)+\sigma_{pres}(t)$

Avec 'METHODE' = 'TRESCA' ,

$$S_{p^1}'=\| \sigma_{tran,p}(t_{p^{maxSp}})-\sigma_{tran,p}(t_{p^{minSp}}) \|$$



Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

$$S_{p^{meca,1}} = \| \sigma_{pres,p}(t_{p^{maxSp}}) - \sigma_{pres,p}(t_{p^{minSp}}) \|$$

$$S_{n,ther}' = \| \sigma^{lin}_{ther,p}(t_{p^{maxSn}}) - \sigma^{lin}_{ther,p}(t_{p^{minSn}}) \| \text{ et } S_{n,pres}' = \| \sigma^{lin}_{pres,p}(t_{p^{maxSn}}) - \sigma^{lin}_{pres,p}(t_{p^{minSn}}) \| .$$

Avec 'METHODE' = 'TOUT_INST ',

$$S_{p^1}' = \max_{t_1,t_2} \| \sigma_{tran,p}(t_1) - \sigma_{tran,p}(t_2) \|$$

Si $t_{p^1}$ et $t_{p^2}$ sont les instants qui maximisent $S_{p^1}'$, alors

$$S_{p^{meca,1}}' = \| \sigma_{pres,p}(t_{p^1}) - \sigma_{pres,p}(t_{p^2}) \|$$

Si $t_{p^3}$ et $t_{p^4}$ sont les instants qui maximisent $S_n'$, alors

$$S_{n,ther}' = \| \sigma^{lin}_{ther,p}(t_{p^3}) - \sigma^{lin}_{ther,p}(t_{p^4}) \| \text{ et } S_{n,pres}' = \| \sigma^{lin}_{pres,p}(t_{p^3}) - \sigma^{lin}_{pres,p}(t_{p^4}) \| .$$

# 12 Annexe 5 : Méthode de calcul du transitoire fictif 2 avec 'TOUT_INST'

On note $\sigma_{tran,p}$ le tenseur somme des transitoires associé à la situation p et $\sigma_{tran,q}$ le tenseur somme des transitoires associé à la situation q.

On note Si $t_{1^p}$ et $t_{1^q}$ sont les instants du transitoire fictif 1 $S_{p^1}(p,q)$, alors on détermine les instants du transitoire fictif 2 $t_{2^p}$ et $t_{2^q}$.

On cherche $t_{2^p}$ qui maximise la grandeur $S_{pA}$ tel que

$$S_{pA} = \max_t \| \sigma_{tran,p}(t_{1^p}) - \sigma_{tran,p}(t) \| = \| \sigma_{tran,p}(t_{1^p}) - \sigma_{tran,p}(t_{2^p}) \| .$$

On cherche $t_{2^q}$ qui maximise la grandeur $S_{pB}$ tel que

$$S_{pB} = \max_t \| \sigma_{tran,q}(t_{1^q}) - \sigma_{tran,q}(t) \| = \| \sigma_{tran,q}(t_{1^q}) - \sigma_{tran,q}(t_{2^q}) \| .$$

Les instants $t_{2^p}$ et $t_{2^q}$. sont ensuite utilisés pour le calcul de la grandeur $S_{p^2}(p,q)$ quelle que soit le TYPE_RESU_MECA choisi ( ZE200a, ZE200b, B3200 ).

# 13 Annexe 6 : Méthode 'B3200' avec indices de contraintes

L'utilisateur a la possibilité de rentrer des indices de contraintes sous le mot clé IN DI_SIGM afin de comparer les résultats obtenus avec ' ZE200a' ou 'ZE200b' ou pour intégrer les effets d'une soudure non modélisée . Les équations avec indices de contraintes pour 'B3200 ' figurent ci-dessous. Ceci n'est possible qu'avec des situations de type instantané.

Les paramètres $S_{p^1}(p,q)$ et $S_{p^2}(p,q)$ ont été déterminés dans la partie 16. On leur ajoute la grandeur $S_p'''$.



Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

$$S_{p^1}(p,q)=S_{p^1}(p,q)+S_p'''$$
$$S_{p^2}(p,q)=S_{p^2}(p,q)+S_p'''$$

$$S_p'''=(K_1C_1-1)S_{n,pres}'+(K_2C_2-1)S_{n,meca}'+(K_3C_3-1)S_{n,ther}'$$

Avec 'METHODE' = 'TRESCA', le paramètre $S_n$ pour la combinaison de situations p et q est défini par :

$$S_n=max(S_{nA},S_{nB}) \text{ avec}$$
$$S_{nA}=\|\sigma^{lin}_{tran,p}(t_{p^{maxSn}})-\sigma^{lin}_{tran,q}(t_{q^{minSn}})\| \text{ et } S_{nB}=\|\sigma^{lin}_{tran,q}(t_{q^{maxSn}})-\sigma^{lin}_{tran,p}(t_{p^{minSn}})\|.$$

Si $S_n=S_{nA}$, alors $S_{n,ther}'=\|\sigma^{lin}_{ther,p}(t_{p^{maxSn}})-\sigma^{lin}_{ther,q}(t_{q^{minSn}})\|$,
$S_{n,pres}'=\|\sigma^{lin}_{pres,p}(t_{p^{maxSn}})-\sigma^{lin}_{pres,q}(t_{q^{minSn}})\|$ et $S_{n,meca}'=\|\sigma^{lin}_{meca,p}(t_{p^{maxSn}})-\sigma^{lin}_{meca,q}(t_{q^{minSn}})\|$.

Si $S_n=S_{nB}$, alors $S_{n,ther}'=\|\sigma^{lin}_{ther,q}(t_{q^{maxSn}})-\sigma^{lin}_{ther,p}(t_{p^{minSn}})\|$,
$S_{n,pres}'=\|\sigma^{lin}_{pres,q}(t_{q^{maxSn}})-\sigma^{lin}_{pres,p}(t_{p^{minSn}})\|$ et $S_{n,meca}'=\|\sigma^{lin}_{meca,q}(t_{q^{maxSn}})-\sigma^{lin}_{meca,p}(t_{p^{minSn}})\|$.

Avec 'METHODE' = 'T OUT_INST ' , on utilise les instants qui interviennent dans la grandeur $S_n$ pour le calcul de $S_{n,pres}'$, $S_{n,ther}'$ et $S_{n,meca}'$.

Si $Sn=\|\sigma^{lin}_{tran,p}(t_p)-\sigma^{lin}_{tran,q}(t_q)\|$, alors $S_{n,ther}'=\|\sigma^{lin}_{ther,p}(t_p)-\sigma^{lin}_{ther,q}(t_q)\|$,
$S_{n,pres}'=\|\sigma^{lin}_{pres,p}(t_p)-\sigma^{lin}_{pres,q}(t_q)\|$
$S_{n,meca}'=\|\sigma^{lin}_{meca,p}(t_p)-\sigma^{lin}_{meca,q}(t_q)\|$.

# 14 Annexe 7 : Équations avec prise en compte du séisme

## 14.1 Calcul des grandeurs pour une situation

### 14.1.1 Type 'B3200'

Situation de type unitaire

On note $\sigma_1$ et $\sigma_2$ les contraintes mécaniques associées aux deux états stabilisés de la situation et $\sigma_{tran}(t)$ le tenseur transitoire associé à cette situation. $t^{maxSp}$, $t^{minSp}$, $t^{maxSn}$ et $t^{minSn}$ les instants extrémaux de ce transitoire tels que définis au 14.

Le séisme est décrit par un état mécanique stabilisé (S) et le torseur correspondant $\{F_{X^S},F_{Y^S},F_{Z^S},M_{X^S},M_{Y^S},M_{Z^S}\}$ sous CHAR_ETAT, le mot clé 'RESU_MECA_UNIT' doit être renseigné.

Avec 'METHODE' = 'TRESCA', on teste toutes les possibilités de signe sur les composantes du séisme et les paramètres $S_n$ et $S_p$ pour une situation sont définis par :

$$S_n=max(S_{nA},S_{nB})$$



Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

$$S_{nA1}=\sigma_{1^{lin}}-\sigma_{2^{lin}}+\sigma^{lin}_{tran}(t^{maxSn})-\sigma^{lin}_{tran}(t^{minSn})$$

$$S_{nB1}=\sigma_{2^{lin}}-\sigma_{1^{lin}}+\sigma^{lin}_{tran}(t^{maxSn})-\sigma^{lin}_{tran}(t^{minSn})$$

$$S_{nA}=\max_{S}\| S_{nA1}\pm 2F_{X^s}\sigma^{lin}_{FX}\pm 2F_{Y^s}\sigma^{lin}_{FY}\pm 2F_{Z^s}\sigma^{lin}_{FZ}\pm 2M_{X^s}\sigma^{lin}_{MX}\pm 2M_{Y^s}\sigma^{lin}_{MY}\pm 2M_{Z^s}\sigma^{lin}_{MZ}\| \text{ (64 possibilités)}$$

$$S_{nB}=\max_{S}\| S_{nB1}\pm 2F_{X^s}\sigma^{lin}_{FX}\pm 2F_{Y^s}\sigma^{lin}_{FY}\pm 2F_{Z^s}\sigma^{lin}_{FZ}\pm 2M_{X^s}\sigma^{lin}_{MX}\pm 2M_{Y^s}\sigma^{lin}_{MY}\pm 2M_{Z^s}\sigma^{lin}_{MZ}\| \text{ (64 possibilités)}$$

$$S_p=max(S_{pA},S_{pB})$$

$$S_{pA1}=\sigma_1-\sigma_2+\sigma_{tran}(t^{maxSp})-\sigma_{tran}(t^{minSp})$$

$$S_{pB1}=\sigma_2-\sigma_1+\sigma_{tran}(t^{maxSp})-\sigma_{tran}(t^{minSp})$$

$$S_{pA}=\max_{S}\| S_{pA1}\pm 2F_{X^s}\sigma_{FX}\pm 2F_{Y^s}\sigma_{FY}\pm 2F_{Z^s}\sigma_{FZ}\pm 2M_{X^s}\sigma_{MX}\pm 2M_{Y^s}\sigma_{MY}\pm 2M_{Z^s}\sigma_{MZ}\| \text{ (64 possibilités)}$$

$$S_{pB}=\max_{S}\| S_{pB1}\pm 2F_{X^s}\sigma_{FX}\pm 2F_{Y^s}\sigma_{FY}\pm 2F_{Z^s}\sigma_{FZ}\pm 2M_{X^s}\sigma_{MX}\pm 2M_{Y^s}\sigma_{MY}\pm 2M_{Z^s}\sigma_{MZ}\| \text{ (64 possibilités)}$$

Avec `'METHODE' = 'TOUT_INST'` , on teste toutes les possibilités de signe sur les composantes du séisme et les paramètres $S_n$ et $S_p$ pour une situation sont définis par :

$$S_n=max(S_{nA},S_{nB})\ ,$$

$$S_{nA1}=\sigma_{1^{lin}}-\sigma_{2^{lin}}+\sigma^{lin}_{tran}(t_1)-\sigma^{lin}_{tran}(t_2)$$

$$S_{nB1}=\sigma_{2^{lin}}-\sigma_{1^{lin}}+\sigma^{lin}_{tran}(t_1)-\sigma^{lin}_{tran}(t_2)$$

$$S_{nA}=\max_{t_1,t_2,S}\| S_{nA1}\pm 2F_{X^s}\sigma^{lin}_{FX}\pm 2F_{Y^s}\sigma^{lin}_{FY}\pm 2F_{Z^s}\sigma^{lin}_{FZ}\pm 2M_{X^s}\sigma^{lin}_{MX}\pm 2M_{Y^s}\sigma^{lin}_{MY}\pm 2M_{Z^s}\sigma^{lin}_{MZ}\| \text{ (64 possibilités)}$$

$$S_{nB}=\max_{t_1,t_2,S}\| S_{nB1}\pm 2F_{X^s}\sigma^{lin}_{FX}\pm 2F_{Y^s}\sigma^{lin}_{FY}\pm 2F_{Z^s}\sigma^{lin}_{FZ}\pm 2M_{X^s}\sigma^{lin}_{MX}\pm 2M_{Y^s}\sigma^{lin}_{MY}\pm 2M_{Z^s}\sigma^{lin}_{MZ}\| \text{ (64 possibilités)}$$

$$S_p=max(S_{pA},S_{pB})$$

$$S_{pA1}=\sigma_1-\sigma_2+\sigma_{tran}(t_1)-\sigma_{tran}(t_2)$$

$$S_{pB1}=\sigma_2-\sigma_1+\sigma_{tran}(t_1)-\sigma_{tran}(t_2)$$

$$S_{pA}=\max_{t_1,t_2,S}\| S_{pA1}\pm 2F_{X^s}\sigma_{FX}\pm 2F_{Y^s}\sigma_{FY}\pm 2F_{Z^s}\sigma_{FZ}\pm 2M_{X^s}\sigma_{MX}\pm 2M_{Y^s}\sigma_{MY}\pm 2M_{Z^s}\sigma_{MZ}\| \text{ (64 possibilités)}$$

$$S_{pB}=\max_{t_1,t_2,S}\| S_{pB1}\pm 2F_{X^s}\sigma_{FX}\pm 2F_{Y^s}\sigma_{FY}\pm 2F_{Z^s}\sigma_{FZ}\pm 2M_{X^s}\sigma_{MX}\pm 2M_{Y^s}\sigma_{MY}\pm 2M_{Z^s}\sigma_{MZ}\| \text{ (64 possibilités)}$$



Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Pour les deux méthodes, le paramètre $S_{p^{meca}}$ pour une situation est défini par :

$$S_{p^{meca}}=\max_S \| \pm(\sigma_1-\sigma_2) \pm 2F_{X^S}\sigma_{FX} \pm 2F_{Y^S}\sigma_{FY} \pm 2F_{Z^S}\sigma_{FZ} \pm 2M_{X^S}\sigma_{MX} \pm 2M_{Y^S}\sigma_{MY} \pm 2M_{Z^S}\sigma_{MZ} \|$$

**Remarque :**

*Dans cette partie,* $\sigma_{tran}(t)=\sigma_{ther}(t)$ .

Situation de type instantané

On note $\sigma_{tran}(t)$ le tenseur transitoire associé à la situation. $t^{maxSp}$ , $t^{minSp}$ , $t^{maxSn}$ et $t^{minSn}$ les instants extrémaux du transitoire de la situation tels que définis au 14.

Le séisme est décrit par six tenseurs correspondant aux efforts et moments $\sigma_{FX,S}$ , $\sigma_{FY,S}$ , $\sigma_{FZ,S}$ , $\sigma_{MX,S}$ , $\sigma_{MY,S}$ , $\sigma_{MZ,S}$ .

Avec 'METHODE' = 'TRESCA' , on teste toutes les possibilités de signe sur les composantes du séisme et les paramètres $S_n$ et $S_p$ pour une situation sont définis par :

$$S_n=\max_S \| \sigma^{lin}_{tran}(t^{maxSn})-\sigma^{lin}_{tran}(t^{minSn}) \pm \sigma^{lin}_{FX,S} \pm \sigma^{lin}_{FY,S} \pm \sigma^{lin}_{FZ,S} \pm \sigma^{lin}_{MX,S} \pm \sigma^{lin}_{MY,S} \pm \sigma^{lin}_{MZ,S} \| \text{ (64 possibilités)}$$

$$S_p=\max_S \| \sigma_{tran}(t^{maxSp})-\sigma_{tran}(t^{minSp}) \pm \sigma_{FX,S} \pm \sigma_{FY,S} \pm \sigma_{FZ,S} \pm \sigma_{MX,S} \pm \sigma_{MY,S} \pm \sigma_{MZ,S} \| \text{ (64 possibilités)}$$

$$S_{p^{meca}}=\max_S \| \sigma_{pres+meca}(t^{maxSp})-\sigma_{pres+meca}(t^{minSp}) \pm \sigma_{FX,S} \pm \sigma_{FY,S} \pm \sigma_{FZ,S} \pm \sigma_{MX,S} \pm \sigma_{MY,S} \pm \sigma_{MZ,S} \|$$

Avec 'METHODE' = 'T OUT_INST ' , on teste toutes les possibilités de signe sur les composantes du séisme et les paramètres $S_n$ et $S_p$ pour une situation sont définis par :

$$S_n=\max_{S,t_1,t_2} \| \sigma^{lin}_{tran}(t_1)-\sigma^{lin}_{tran}(t_2) \pm \sigma^{lin}_{FX,S} \pm \sigma^{lin}_{FY,S} \pm \sigma^{lin}_{FZ,S} \pm \sigma^{lin}_{MX,S} \pm \sigma^{lin}_{MY,S} \pm \sigma^{lin}_{MZ,S} \| \text{ (64 possibilités)}$$

$$S_p=\max_{S,t_1,t_2} \| \sigma_{tran}(t_1)-\sigma_{tran}(t_2) \pm \sigma_{FX,S} \pm \sigma_{FY,S} \pm \sigma_{FZ,S} \pm \sigma_{MX,S} \pm \sigma_{MY,S} \pm \sigma_{MZ,S} \| \text{ (64 possibilités)}$$

On prend les instants $t_{p^1}$ et $t_{p^2}$ qui maximisent $S_p$

$$S_{p^{meca}}=\max_S \| \sigma_{pres+meca}(t_{p^1})-\sigma_{pres+meca}(t_{p^2}) \pm \sigma_{FX,S} \pm \sigma_{FY,S} \pm \sigma_{FZ,S} \pm \sigma_{MX,S} \pm \sigma_{MY,S} \pm \sigma_{MZ,S} \|$$

**Remarque :**

*Dans ce tte partie,* $\sigma_{tran}(t)=\sigma_{ther}(t)+\sigma_{pres}(t)+\sigma_{meca}(t)$ .

### 14.1.2 Type ' ZE200a '

On note $\sigma_{ther}$ le tenseur du transitoire thermique associé à la situation et $t^{maxSn}$ et $t^{minSn}$ les instants extrémaux de ce transitoire tels que définis au 14. On indice A et B les grandeurs des états



Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

stabilisés de la situation (pression et torseur sur les moments). R, e, et I sont les caractéristiques géométriques de la tuyauterie, $K_1$, $K_2$, $K_3$, $C_1$, $C_2$ et $C_3$ sont les indices de contraintes du RCC-M.

Le séisme est décrit par un état mécanique stabilisé (S) et le torseur correspondant $\{M_{X^S}, M_{Y^S}, M_{Z^S}\}$ sous CHAR_ETAT. On teste toutes les possibilités de signe sur les composantes du séisme et le paramètre $S_n$ pour une situation est défini par :

$$S_n = S_n' + S_n''$$

$$S_n'' = \max_S \left( C_1 \frac{R}{e} |P_A - P_B| + C_2 \frac{R}{I} \sqrt{(M_{TA} - M_{TB} \pm 2M_{X^S})^2 + (M_{TA} - M_{TB} \pm 2M_{Y^S})^2 + (M_{TA} - M_{TB} \pm 2M_{Z^S})^2} \right)$$

Avec 'METHODE' = 'TRESCA', $S_n' = \| \sigma_{ther}^{lin}(t^{maxSn}) - \sigma_{ther}^{lin}(t^{minSn}) \|$ .

Avec 'METHODE' = 'TOUT_INST', $S_n' = \max_{t_1, t_2} \| \sigma_{ther}^{lin}(t_1) - \sigma_{ther}^{lin}(t_2) \|$ .

Pour les deux méthodes,

$$S_p = S_{p^1}' + S_p'' + S_p''' \text{ et } S_{p^{meca}} = S_p'' \text{ avec}$$

$$S_p'' = K_1 C_1 \frac{R}{e} |P_A - P_B| + \max_S [S_{p,moments}'']$$

$$S_{p,moments}'' = C_2 \frac{R}{I} \sqrt{(M_{TA} - M_{TB} \pm 2M_{X^S})^2 + (M_{TA} - M_{TB} \pm 2M_{Y^S})^2 + (M_{TA} - M_{TB} \pm 2M_{Z^S})^2}$$

$$\text{et } S_p''' = (K_3 C_3 - 1) S_{n,ther}'$$

Avec 'METHODE' = 'TRESCA' ,

$S_{n,ther}' = \| \sigma_{ther}^{lin}(t^{maxSn}) - \sigma_{ther}^{lin}(t^{minSn}) \|$ . et $S_{p^1}' = \| \sigma_{ther}(t^{maxSp}) - \sigma_{ther}(t^{minSp}) \|$

Avec 'METHODE' = 'T OUT_INST ' ,

On prend les instants $t_{p^1}$ et $t_{p^2}$ qui maximisent $S_n'$

$$S_{n,ther}' = \| \sigma_{ther}^{lin}(t_{p^1}) - \sigma_{ther}^{lin}(t_{p^2}) \| \text{ et } S_{p^1}' = \max_{t_1} \left( \max_{t_2} \| \sigma_{ther}(t_1) - \sigma_{ther}(t_2) \| \right)$$

### 14.1.3 Type ' ZE200b '

On note $\sigma_{tran}$ le tenseur somme des transitoires associé à la situation et $t^{maxSn}$ et $t^{minSn}$ les instants extrémaux de ce transitoire tels que définis au 14. On indice A et B les grandeurs des états stabilisés de la situation (pression et torseur sur les moments). R, e, et I sont les caractéristiques géométriques de la tuyauterie, $K_1$, $K_2$, $K_3$, $C_1$, $C_2$ et $C_3$ sont les indices de contraintes du RCC-M.

Le séisme est décrit par un état mécanique stabilisé (S) et le torseur correspondant $\{M_{X^S}, M_{Y^S}, M_{Z^S}\}$ sous CHAR_ETAT.

On teste toutes les possibilités de signe sur les composantes du séisme et le paramètre $S_n$ pour une situation est défini par :

$$S_n = S_n' + S_n'' \text{ avec}$$

$$S_n'' = \max_S \sqrt{(M_{TA} - M_{TB} \pm 2M_{X^S})^2 + (M_{TA} - M_{TB} \pm 2M_{Y^S})^2 + (M_{TA} - M_{TB} \pm 2M_{Z^S})^2}$$



Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Avec 'METHODE' = 'TRESCA', $S_n' = \| \sigma_{tran}^{lin}(t^{maxSn}) - \sigma_{tran}^{lin}(t^{minSn}) \|$.

Avec 'METHODE' = 'TOUT_INST', $S_n' = \max_{t_1, t_2} \| \sigma_{tran}^{lin}(t_1) - \sigma_{tran}^{lin}(t_2) \|$.

Pour les deux méthodes,

$S_p = S_{p^1}' + S_p'' + S_p'''$ et $S_{p^{meca}} = S_{p^{meca,1}}' + S_p'' + S_{p^{meca}}'''$ avec

et $S_p''' = (K_3 C_3 - 1) S_{n,ther}' + (K_1 C_1 - 1) S_{n,pres}'$ , $S_{p^{meca}}''' = (K_1 C_1 - 1) S_{n,pres}'$.

Avec 'METHODE' = 'TRESCA',

$S_{n,ther}' = \| \sigma_{ther}^{lin}(t^{maxSn}) - \sigma_{ther}^{lin}(t^{minSn}) \|$ et $S_{n,pres}' = \| \sigma_{pres}^{lin}(t^{maxSn}) - \sigma_{pres}^{lin}(t^{minSn}) \|$

$S_{p^1}' = \| \sigma_{tran}(t^{maxSp}) - \sigma_{tran}(t^{minSp}) \|$ et $S_{p^{meca,1}}' = \| \sigma_{pres}(t^{maxSp}) - \sigma_{pres}(t^{minSp}) \|$

Avec 'METHODE' = 'T OUT_INST ' , on reprend les instants $t_{p^1}$ et $t_{p^2}$ qui maximisent la grandeur $S_n'$ et

$$S_{n,ther}' = \| \sigma_{ther}^{lin}(t_{p^1}) - \sigma_{ther}^{lin}(t_{p^2}) \| \text{ et } S_{n,pres}' = \| \sigma_{pres}^{lin}(t_{p^1}) - \sigma_{pres}^{lin}(t_{p^2}) \|.$$

$$S_{p^1}' = \max_{t_1} ( \max_{t_2} \| \sigma_{tran}(t_1) - \sigma_{tran}(t_2) \| ).$$

On reprend les instants $t_{p^3}$ et $t_{p^4}$ qui maximisent la grandeur $S_{p^1}'$ et

$$S_{p^{meca,1}}' = \| \sigma_{pres}(t_{p^3}) - \sigma_{pres}(t_{p^4}) \|$$

**Remarque :**

*Dans ce tte partie,* $\sigma_{tran}(t) = \sigma_{ther}(t) + \sigma_{pres}(t)$.

# 15 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) »,



Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

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) T. METAIS : «Cahier des P rescriptions T echniques (CPT) pour la modification des calculs de fatigue de l'opérateur POST_RCCM de code_aster » Note EDF / SEPTEN / D305914013267

9) G. J. L, 'Outcur: An automated evaluation of two-dimensional finite element stresses according to ASME Section III stress requirements.', Pap Am Soc Mech Eng, no. 76-WA/PVP-16, p. 8, 1976.

10) 'ANSYS Mechanical APDL Theory Reference', p. 960, 2020.

# 16 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 de B3200_UNIT |
| 9.4 | E. Galenne, EDF-R&D/AMA | - Ajout du calcul du facteur d'amorçage (fiche 10429)<br>- Modification de la formulation en fatigue pour B3200_UNIT (fiche 12297) |
| 10.4 | E. Galenne, Chau T.H., EDF-R&D/AMA | - Ajout de la méthode KE_MIXTE pour EVOLUTION (fiche 12818) |
| 13.1 | S. Plessis, EDF-R&D/AMA | - Ajout de ZE200a et ZE200b<br>- Ajout de la fatigue environnementale EFAT |
| 13.3 | S. Plessis, EDF-R&D/AMA | Création de B3200 qui absorbe B3200_UNIT et permet de rentrer d'autres formes de chargement sur les moments |



Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)