Post-traitement selon la méthode Roche

Résumé :

L'opérateur POST_ROCHE [U4.84.46] est un post-traitement qui utilise la méthode Roche pour évaluer le résultat d'une solution non-linéaire à partir de solution de calculs préliminaires purement linéaires.

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

Table des matières

1 Introduction....3
2 Données d'entrée....3
3 Étapes de calcul....3
3.1 Établissement de la courbe de traction monotone selon Ramberg Osgood....3
3.2 Récupération et classification des moments....4
3.2.1 Classement des moments selon CSM2....4
3.2.2 Combinaison des moments selon CMS2 (RB 3645.82)....4
3.3 Calcul des contraintes de référence....5
3.3.1 Contraintes de référence dues aux déplacements imposés et aux dilatations thermiques..5
3.3.2 Contraintes de référence sismiques inertielles....5
3.4 Calcul de la réversibilité....5
3.4.1 Réversibilités locales et....6
3.4.2 Réversibilités totales et....6
3.5 Calcul des facteurs d'effet de ressort et 6
3.5.1 Facteur d'effet de ressort monotone....6
3.5.2 Facteur d'effet de ressort sismique....7
3.6 Calcul des coefficients d'abattement et , pour chaque tronçon (cas RCCM_RX='NON')....7
3.6.1 Coefficients d'abattement et....8
3.6.2 Coefficients d'abattement et....8
3.7 Calcul des coefficients d'abattement et , pour chaque tronçon (cas RCCM_RX='OUI')....9
3.7.1 Calcul de la contrainte vraie à partir d'une contrainte admissible....9
3.7.2 Calcul des coefficients d'abattement monotone et sismique....9
3.8 Calcul des contraintes équivalentes....10
3.8.1 Cas général....10
3.8.2 Cas des tuyaux droits....11
3.8.3 Cas des réductions....11
3.8.4 Cas des tuyaux cintrés et des coudes....11

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

1 Introduction

La méthode Roche permet d'évaluer une réponse non linéaire à partir de résultats de calculs linéaires auxquels on applique des coefficients d'abattement. Cette approche a pour objectif de réduire significativement les temps de calcul par rapport à une approche de résolution non-linéaire classique pour les calculs sismiques appliqués sur des lignes de tuyauteries.

Les coefficients d'abattement sont calculés à partir de facteur d'effet ressort. Ces facteurs représentent une estimation de l'écart entre la solution linéaire calculée et la solution non linéaire recherchée.

La détermination de coefficients d'abattement des moments issus des analyses élastiques linéaires de flexibilité des lignes de tuyauteries suit les spécifications suivantes :

- chapitres RB 3651.1132 et RB 3651.1142 du RCC-MRx (méthode Roche post-spectrale),
- méthode transitoire (méthode Roche post-transitoire non codifiée).

La détermination de la contrainte équivalente, en tenant compte des moments abattus et des moments non abattus, correspond à l'ensemble des chargements considérés.

Ces coefficients d'abattement sont applicables à la part secondaire des moments, relaxable, la part primaire étant elle non relaxable à cause de l'effet ressort.

Les géométries concernées sont :

- les tuyaux à diamètre constant et à diamètre variable (réductions),
- les lignes d'un seul tenant et les lignes ramifiées.

2 Données d'entrée

Les données d' entrée, nécessaire au calcul de post-traitement Roche sont :
- la géométrie de la ligne de tuyauterie,
- le champ de matériau,
- la liste des chargements mécaniques,
- les résultats des calculs pour chaque chargement mécanique.

3 Étapes de calcul

3.1 Établissement de la courbe de traction monotone selon Ramberg Osgood

Afin de déterminer les coefficients d'abattement à partir des facteurs de ressorts (voir § 3.5), on utilise une loi de comportement plastique selon Ramberg-Osgood.
La loi Ramberg-Osgood est caractérisée par deux paramètres K et n . La déformation s'écrit alors en fonction de la contrainte :

$$\epsilon=\frac{\sigma}{E}+\epsilon_{M,p}(\sigma)$$

où E est le module d'Young et $\epsilon_{M,p}$ la déformation plastique de la courbe moyenne de traction monotone, définie par la loi puissance :

$$\epsilon_{M,p}=K\left(\frac{\sigma}{E}\right)^{1/n}$$

Les paramètres matériaux de cette loi sont donnés en utilisant le mot-clé `POST_ROCHE` (ou `POST_ROCHE_FO`) de `DEFI_MATERIAU`. K correspond à l'opérande `RAMB_OSGO_FACT` et n à `RAMB_OSGO_EXPO`.

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

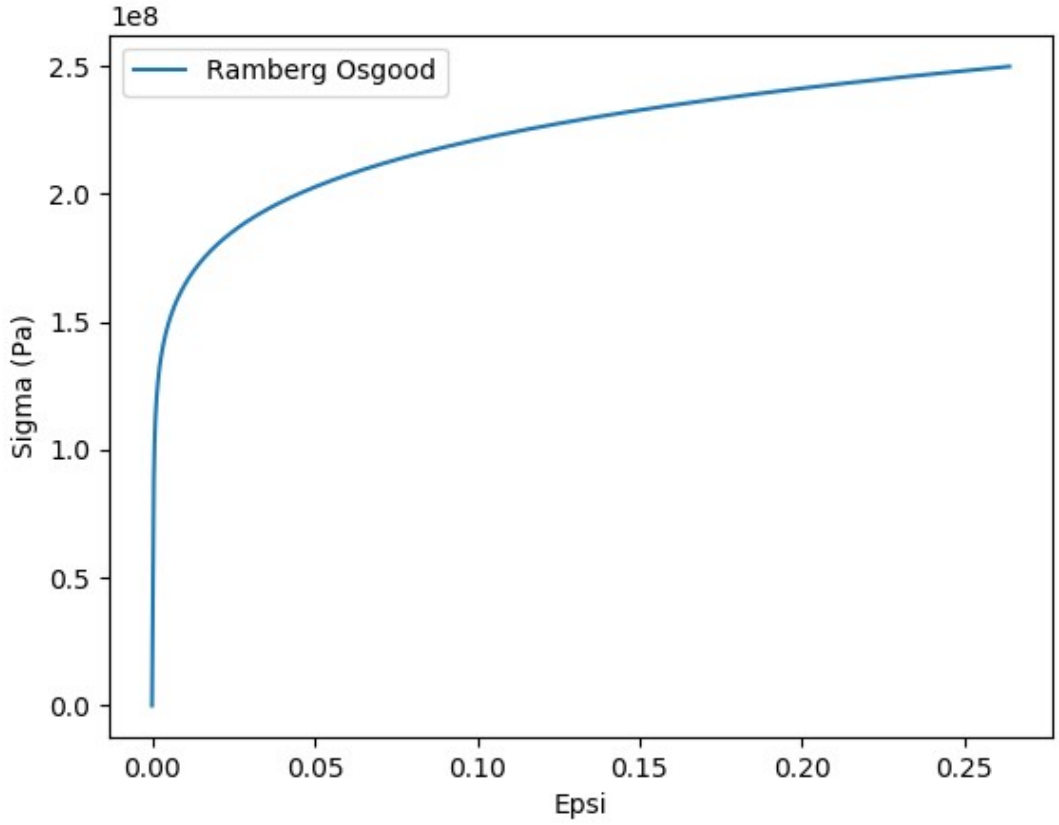


Image 3.1-1 Exemple de loi Ramberg Osgood.

3.2 Récupération et classification des moments

On classe les moments selon l'abscisse curviligne, pour chaque tronçon.

3.2.1 Classement des moments selon CSM2

Les moments dépendant des forces (RB 3623.3) sont dus :

- au poids ;
- au séisme, part inertielle quasi-statique, si la 2ième méthode de classement des moments sismiques CMS2 est appliquée ; Ils sont notés M_{SI}.
- aux sollicitations mécaniques appliquées (dont la pression).

Les moments dépendant des déplacements (RB 3623.4) sont dus :

- aux dilatations thermiques,
- aux déplacements imposés aux ancrages ; ils sont notés m_S.
- au séisme, part inertielle complément de la part quasi-statique, si la 2ème méthode de classement des moments sismiques CMS2 est appliquée. Ils sont notés m_{SI}.

3.2.2 Combinaison des moments selon CMS2 (RB 3645.82)

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

Les moments M_{SI} sont combinés avec les autres moments « dépendant des forces » en ajoutant les valeurs absolues et en affectant à chaque composante le signe de la composante du moment dû aux chargements mécaniques permanents. Le résultat est noté M.
Les moments m_S sont combinés avec les autres moments « dépendant des déplacements » en leur attribuant, pour chaque composante, le signe de ces derniers. Le résultat est noté m.

3.3 Calcul des contraintes de référence

La contrainte de référence est calculée pour chaque section.

3.3.1 Contraintes de référence dues aux déplacements imposés et aux dilatations thermiques

La contrainte de référence est calculée conformément au §RB 3643.31 (Combinaison selon la 2ème méthode de Classement des Moments dépendant des déplacements CMS2) :

$$\sigma_{ref}^2 = \left(0.79 B_2 \frac{m_R^{'}}{Z} \right)^2 + \left(0.87 \frac{m_1}{Z} \right)^2 ,$$

où :

- $m_R^{'} = \sqrt{m_2^2 + m_3^2}$ est le moment de flexion résultant dû aux déplacements imposés et aux dilatations thermiques (RB 3623.4),
- m_1 est le moment de torsion dû aux déplacements imposés (RB 3623.4),
- $B_2 = 1$ coefficient de contrainte (RB 3680) pour les tronçons de partie droite (tuyaux droits, réductions, té et piquages),
- $B_2 = max\left(\frac{1.30}{f^{2/3}}, 1.0\right)$ coefficient de contrainte (RB 3680) pour les coudes et les cintres,
- $f = h_c \frac{R_c}{r_m^2}$ où $r_m = \frac{D_e - h_c}{2}$,
- R_c est le rayon de courbure,
- D_e et h_c correspondent respectivement au diamètre extérieur et à l'épaisseur du tuyau,
- Z est le moment d'inertie, qui s'écrit pour les poutres circulaires $Z = \frac{I_y}{R}$, pour les réductions on prend le minimum du rapport sur l'élément tuyau $Z = min \frac{I_y}{R}$.

3.3.2 Contraintes de référence sismiques inertielles

La contrainte de référence est calculée conformément au §RB 3643.31 (Combinaison selon la 2ème méthode de Classement des Moments Sismiques CMS2) :

$$\sigma_{S2,ref}^2 = \left(0.79 B_2 \frac{\left(M_{S2}\right)_R^{'}}{Z} \right)^2 + \left(0.87 \frac{M_{S21}}{Z} \right)^2 ,$$

où :

- $\left(M_{S2}\right)_R^{'}$ est le moment de flexion sismique inertiel résultant (RB 3645.7 et RB 3645.82),
- M_{S21} est le moment de torsion sismique inertiel (RB 3645.7 et RB 3645.82),
- l'indice $S2$ est relatif à la combinaison CMS2,
- B_2 est définie comme au § 3.3.1 .

3.4 Calcul de la réversibilité

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

La réversibilité locale est calculée pour chaque section et de la réversibilité totale pour chaque tronçon de ligne.

3.4.1 Réversibilités locales t et t_S

La réversibilité locale est définie par le rapport déformation élastique sur déformation plastique, correspondant à la contrainte de référence.

En chaque section droite, la réversibilité locale liée aux contraintes de référence dues aux déplacements imposés s'écrit :

$$\frac{1}{t}=\frac{\varepsilon_{M,p}(\sigma_{ref})}{\frac{\sigma_{ref}}{E}}.$$

La réversibilité locale liée aux contraintes de référence sismiques s'écrit :

$$\frac{1}{t_S}=\frac{\epsilon_{M,p}(\sigma_{S2,ref})}{\frac{\sigma_{S2,ref}}{E}}.$$

3.4.2 Réversibilités totales T et T_S

La réversibilité totale est calculée sur chaque tronçon du système de tuyauterie présentant deux points fixes.

La réversibilité totale liée aux contraintes de référence dues aux déplacements imposés s'écrit :

$$\frac{1}{T}\int_0^l \sigma_{ref}^2 Ads=\int_0^l \frac{1}{t}\sigma_{ref}^2 Ads,$$

et la réversibilité totale liée aux contraintes de référence sismiques s'écrit :

$$\frac{1}{T_S}\int_0^l \sigma_{S2,ref}^2 Ads=\int_0^l \frac{1}{t_S}\sigma_{S2,ref}^2 Ads,$$

où :

- l est la longueur du tronçon de l'abscisse curviligne,
- A est l'aire de la section droite le long de l'abscisse curviligne.

3.5 Calcul des facteurs d'effet de ressort r_M et r_S

Le facteur d'effet ressort est calculée pour chaque section, les maximums sont calculés sur chaque tronçon.

3.5.1 Facteur d'effet de ressort monotone r_M

Le facteur d'effet de ressort monotone r_M quantifie l'effet de ressort monotone. Il est calculé sur chaque plus petite partie du système de tuyauterie présentant deux points fixes.
Ce facteur caractérise la différence entre les contraintes et déformations σ_{el} et ϵ_{el} calculés en admettant un comportement élastique et les valeurs vraies σ et ϵ , reliées par la courbe de traction monotone :

$$r_M=-E\frac{\epsilon-\epsilon_{el}}{\sigma-\sigma_{el}}$$

Ce facteur r_M est :

- nul lorsque l'effet de ressort est nul et que la contrainte est purement secondaire (la déformation est celle calculée élastiquement)
- infini lorsque la contrainte est purement primaire (la contrainte est celle calculée élastiquement)

Il y a un facteur r_M en chaque section droite de tuyauterie :

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

$$r_M = max\left(\frac{T}{t} - 1 ; 0\right)$$

3.5.2 Facteur d'effet de ressort sismique r_s

Le facteur d'effet de ressort sismique r_s quantifie l'effet de ressort sismique :

$$r_s = \frac{T_s}{t_s} - 1$$

3.6 Calcul des coefficients d'abattement g et g_S, pour chaque tronçon (cas RCCM_RX='NON')

La contrainte élastique est supposée être la somme linéaire de la contrainte de référence et la contrainte de pression : $\sigma_{el} = \sigma_R + \sigma_P$
Selon les cas monotone ou sismique, on a $\sigma_R = \sigma_{ref}$ ou $\sigma_R = \sigma_{S2,ref}$ respectivement.
Les coefficients d'abattement relient la contrainte de référence calculée linéairement à la contrainte « vraie », issue de la projection de la contrainte élastique sur la courbe de traction monotone selon la droite de pente $-\frac{E}{r}$. Ils sont calculés pour chaque section de chaque tronçon de tuyauterie.

Selon les cas monotone ou sismique, on a $r = r_M$ ou $r = r_S$ respectivement.

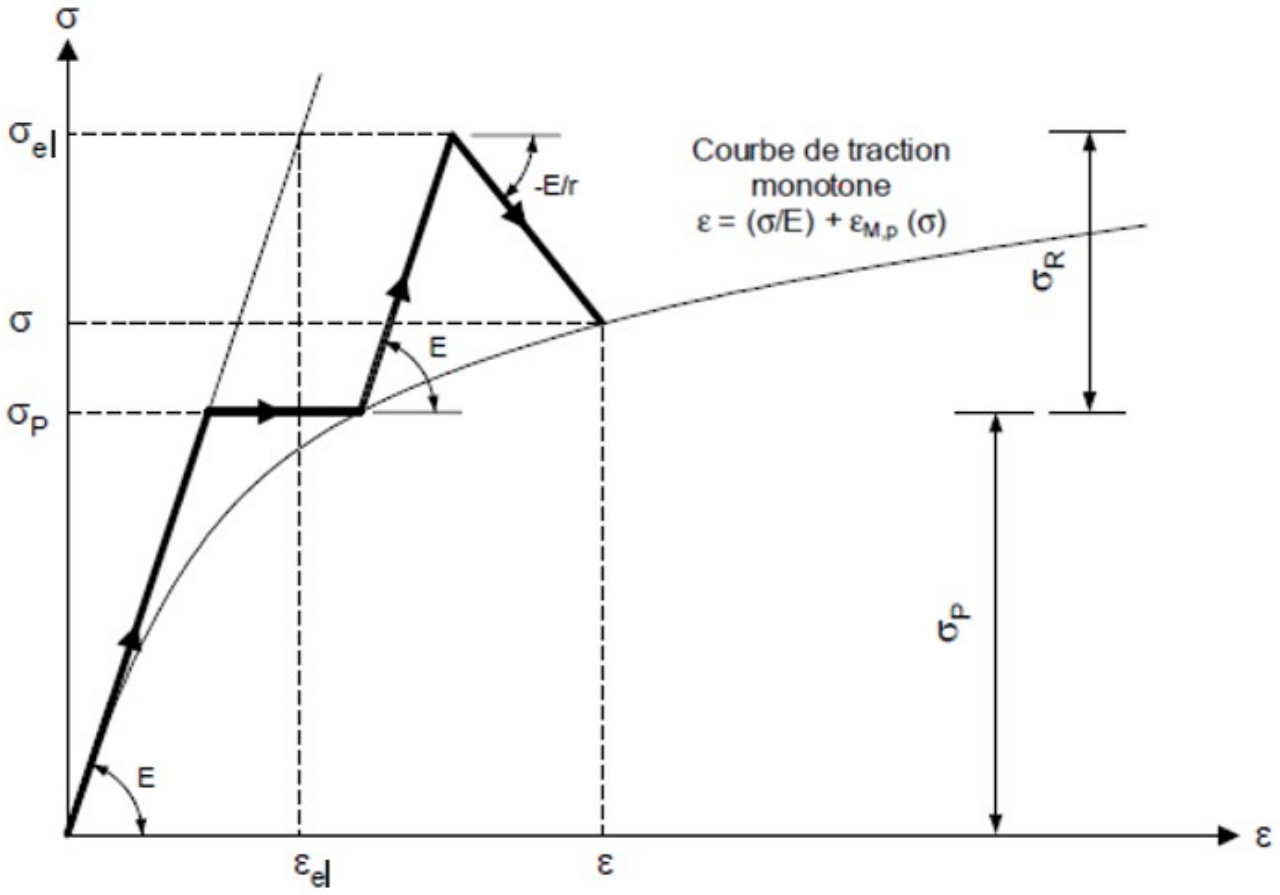


Image 3.6-1: Abattement de la contrainte linéaire élastique σ_{el} sur la courbe de traction monotone

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

3.6.1 Coefficients d'abattement g et g_{opt}

On distingue g et g_{opt} , calculés à partir du facteur d'effet de ressort r_M ou de son maximum selon l'abscisse curviligne $\max_s r_M$.

Le coefficient g est calculé à partir du facteur d'effet ressort monotone r_M, dépendant de l'abscisse curviligne. La contrainte vraie et σ la déformation vraie ϵ sont solutions du système d'équations suivant :

$$r_M = -E \frac{\epsilon - \frac{\sigma_{ref} + \sigma_P}{E} - \epsilon_{M,p}(\sigma_P)}{\sigma - \sigma_{ref} - \sigma_P}$$
$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} + \epsilon_{M,p}(\sigma)$$

où σ_P correspond à la contrainte induite par la pression interne du tuyau, d'expression :

$$\sigma_P = 0{,}87\, P \frac{D_i}{2 h_c}$$

avec P , la pression interne, D_i le diamètre intérieur et h_c l'épaisseur du tuyau.

L'inégalité $\sigma_P < \sigma$ doit être vérifiée pour garantir le calcul correct de g.

Le coefficient d'abattement s'écrit ensuite :

$$g = \frac{\sigma - \sigma_P}{\sigma_{ref}},$$

Le coefficient g_{opt} est calculé de la même manière que g, mais en utilisant cette fois le facteur d'effet de ressort monotone maximal $\max_s r_M$, ne dépendant plus de l'abscisse curviligne, mais toujours dépendant du tronçon. La contrainte vraie σ et la déformation vraie ϵ sont alors solutions du système d'équations suivant :

$$\max_s r_M = -E \frac{\epsilon - \frac{\sigma_{ref} + \sigma_P}{E} - \epsilon_{M,p}(\sigma_P)}{\sigma - \sigma_{ref} - \sigma_P}$$
$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} + \epsilon_{M,p}(\sigma)$$

Le coefficient d'abattement s'écrit ensuite :

$$g_{opt} = \frac{\sigma - \sigma_P}{\sigma_{ref}}.$$

3.6.2 Coefficients d'abattement g_S et g_{Sopt}

On distingue g_S et g_{Sopt} , calculés à partir du facteur d'effet de ressort sismique r_S ou de son maximum selon l'abscisse curviligne $\max_s r_S$.

Le coefficient g_S est calculé à partir du facteur d'effet ressort sismique r_S, dépendant de l'abscisse curviligne. La contrainte vraie σ et la déformation vraie ϵ sont solutions du système d'équations suivant :

$$r_S = -E \frac{\epsilon - \frac{\sigma_{ref} + \sigma_P}{E} - \epsilon_{M,p}(\sigma_P)}{\sigma - \sigma_{ref} - \sigma_P}$$
$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} + \epsilon_{M,p}(\sigma)$$

Le coefficient d'abattement s'écrit ensuite :

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

$$g_S = \frac{\sigma - \sigma_P}{\sigma_{ref}}$$

le coefficient g_{opt} est calculé de la même manière que g , mais en utilisant cette fois le facteur d'effet de ressort maximal $\max_s r_S$, ne dépendant plus de l'abscisse curviligne, mais toujours dépendant du tronçon.
La contrainte vraie σ et la déformation vraie ϵ sont alors solutions du système d'équations suivant :

$$\max_s r_S = -E \frac{\epsilon - \frac{\sigma_{ref} + \sigma_P}{E} - \epsilon_{M,p}(\sigma_P)}{\sigma - \sigma_{ref} - \sigma_P}$$

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} + \epsilon_{M,p}(\sigma)$$

Le coefficient d'abattement s'écrit ensuite :

$$g_{Sopt} = \frac{\sigma - \sigma_P}{\sigma_{ref}}.$$

3.7 Calcul des coefficients d'abattement g_{RX} et g_{SRX}, pour chaque tronçon (cas RCCM_RX='OUI')

Dans ce cas de figure, on considère que la contrainte vraie n'est plus une inconnue du système de 2 équations, mais une constante dépendant d'une contrainte admissible définie à partir de la donnée de la contrainte minimale de rupture et de la contrainte minimale à 0,2% de déformation du matériau, le coefficient d'abattement peut alors se calculer directement sans résolution du système, par une formule analytique codifiée dans le RCC-Mrx.

3.7.1 Calcul de la contrainte vraie à partir d'une contrainte admissible

La contrainte admissible S^* est définie par :

$$S^* = \alpha[0{,}426(R_{p0,2})_{min}(\theta_m) + 0{,}032(R_m)_{min}(\theta_m)]$$

Où :

- α est un coefficient adimensionnel supérieur ou égal à 1, il correspond à l'opérande `COEF` du matériau `POST_ROCHE`
- $(R_{p0,2})_{min}(\theta_m)$ est la limite conventionnelle d'élasticité minimale à 0,2% de déformation, pour la température moyenne θ_m dans l'épaisseur durant le chargement étudié, il correspond à l'opérande `RP02_MIN` du matériau `POST_ROCHE`
- $(R_m)_{min}(\theta_m)$ est la résistance à la traction minimale, pour la température moyenne θ_m dans l'épaisseur durant le chargement étudié, il correspond à l'opérande `RM_MIN` du matériau `POST_ROCHE`

La contrainte vraie σ est alors définie par :

$$\sigma = 2S^* \Big/ \frac{(R_{p0,2})_{moy}(\theta_m)}{(R_{p0,2})_{min}(\theta_m)}$$

Avec :

- $(R_{p0,2})_{moy}(\theta_m)$ la limite conventionnelle d'élasticité moyenne à 0,2% de déformation, pour la température moyenne θ_m dans l'épaisseur durant le chargement étudié

3.7.2 Calcul des coefficients d'abattement monotone g_{RX} et sismique g_{SRX}

D'après la codification RCC-MRx (RB 3651.1132 et RB 3651.1142) les coefficients d'abattement monotones et sismiques sont alors les suivants :

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

$$g_{RX}=\frac{(\sigma-\sigma_P)(1+\max_s r_M)}{E[\varepsilon_{M,p}(\sigma)-\varepsilon_{M,p}(\sigma_P)]+(\sigma-\sigma_P)(1+\max_s r_M)}$$

et

$$g_{SRX}=\frac{(\sigma-\sigma_P)(1+\max_s r_S)}{E[\varepsilon_{M,p}(\sigma)-\varepsilon_{M,p}(\sigma_P)]+(\sigma-\sigma_P)(1+\max_s r_S)}$$

Dans la suite, le traitement est le même quelque soit la valeur de RCCM_RX. g_{RX} correspondra donc à g_{opt} et g_{SRX} à g_{Sopt}.

3.8 Calcul des contraintes équivalentes

3.8.1 Cas général

La contrainte équivalente est obtenue par combinaison des moments obtenus au § 3.2.1 pondéré par les coefficients d'abattements.

On utilise alors les coefficients g et g_S pour obtenir la contrainte équivalente (c'est valeur n'est pas calculée dans le cas RCCM_RX='OUI') :

$$\sigma_{eq}=\sqrt{\left(D_1\frac{P\,D_i}{2\,h_C}\right)^2+\left\langle\frac{D_2}{Z},|M|+g|m|+g_S|m_{SI}|\right\rangle^2},$$

ou les coefficients g_{opt} et g_{Sopt} pour obtenir la contrainte équivalente optimisée :

$$\sigma_{eqopt}=\sqrt{\left(D_1\frac{P\,D_i}{2\,h_C}\right)^2+\frac{1}{Z}\left\langle D_2^2,(|M|+g_{opt}|m|+g_{Sopt}|m_{SI}|)^2\right\rangle},$$

où :

- $|M|=\begin{pmatrix}M_1\\M_2\\M_3\end{pmatrix}$ est la somme des moments dépendant des efforts, comprenant la contribution des chargements primaires (poids…) et la contribution de la partie quasi-statique du séisme inertiel (pseudo-mode), pris en valeurs absolues,
- $|m|=\begin{pmatrix}m_1\\m_2\\m_3\end{pmatrix}$ est la somme des moments dépendant des déplacements (dilatation thermique, déplacements différentiels sismiques), pris en valeurs absolues,
- $|m_{SI}|=\begin{pmatrix}m_{SI1}\\m_{SI2}\\m_{SI3}\end{pmatrix}$ est le moment correspondant à la partie dynamique du séisme inertiel, classés comme dépendant des déplacements, pris en valeur absolue,
- P est la pression imposée à l'intérieur du tuyau,
- D_i et h_c correspondent respectivement au diamètre intérieur et à l'épaisseur du tuyau,
- Z est le moment d'inertie (qui s'écrit pour les poutres circulaires $Z=\frac{I_y}{R}$),
- D_1 est le coefficient de contrainte associé à la pression interne,

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

- $D_2=\begin{pmatrix} D_{21} \\ D_{22} \\ D_{23} \end{pmatrix}$ sont les coefficients de contraintes associés aux moments en torsion (D_{21}) et en flexion (D_{22} et D_{23}),
- $\langle .,. \rangle$ est le produit scalaire.

3.8.2 Cas des tuyaux droits

Dans le cas des tuyaux droit, on pose :

- $D_1=0,$
- $D_{21}=0.712,$
- $D_{22}=D_{23}=0.429\left(\frac{D_e}{h_c}\right)^{0.16},$

où D_e est le diamètre extérieur du tuyau.

3.8.3 Cas des réductions

Dans le cas des réductions, on pose :

- $Z=min\frac{I_y}{R}$
- $D_1=0,$
- $D_{21}=0.712,$
- $D_{22}=D_{23}=0.429\left(max\frac{D_e}{h_c}\right)^{0.16},$

où $min\frac{I_y}{R}$ est le minimum du rapport et $max\frac{D_e}{h_c}$ est le maximum du rapport sur l'élément de tuyau.

3.8.4 Cas des tuyaux cintrés et des coudes

Dans le cas des coudes, on pose :

- $D_1=0.87,$
- $D_{21}=0.712,$
- $D_{22}=max\left(1.07\left(\frac{\pi}{\psi_c}\right)^{-0.4} f^{-2/3}\left(1+0.142\frac{PD_i}{2h_cS_yf^{1.45}}\right)^{-1}, 1.02\right),$
- $D_{23}=max\left(0.809\, f^{-0.44}\left(1+0.142\frac{PD_i}{2h_cS_yf^{1.45}}\right)^{-1}, 1.02\right),$
- $f=h_c\frac{R_c}{r_m^2}$ où $r_m=\frac{D_e-h_c}{2}$,
- D_i, D_e et h_c correspondent respectivement aux diamètres intérieur, extérieur et à l'épaisseur du tuyau.
- S_y est la limite conventionnelle d'élasticité minimale à 0,2% de déformation (Pa) (donnée par l'utilisateur)
- R_c est le rayon de courbure (donné par l'utilisateur),
- ψ_c est l'angle d'ouverture du coude (donné par l'utilisateur.

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