Loi de comportement RGI_BETON_BA

Résumé :

Le modèle présenté dans ce document est un enrichissement d'un modèle déjà effectif dans Code_Aster : RGI_BETON (cf. R7.01.30). Il permet de considérer des armatures réparties au sein d'un massif de béton sans différencier leur maillage. Les comportements des deux matériaux sont évalués et homogénéisés afin d'en déduire la réponse du matériau béton armé.

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

Table des matières

Table des matières

1 Introduction....2

2 Loi de comportement RGI_BETON_BA....3

2.1L oi de comportement du béton armé homogénéisé....3

2.1.1Contribution en zone saine....3

2.1.2Contributions en zone endommagée....4

2.2Loi de comportement de la contribution axiale de l'armature....5

2.2.1 Relaxation....6

2.2.2Adhérence acier béton....9

2.3Résumé des paramètres matériau de RGI_BETON_BA....11

3 Variables internes du modèle....12

4 Organigramme général de résolution....14

5 Intégration numérique....15

5.1Schéma d'intégration numérique....15

5.1.1Phase de prédiction viscoélastique....15

5.1.2Phase de c orrection....16

6 Bibliographie....17

7 Fonctionnalités et vérification....17

1 Introduction

Le modèle présenté dans ce document est un développement d'un modèle déjà effectif dans Code_Aster : RGI_BETON. Cette notice fait donc suite à celle-ci ([R7.01.30]) puisque seul le développement sera décrit ici.
Il permet de considérer des armatures réparties au sein d'un massif de béton sans différencier leur maillage. Les comportements des deux matériaux sont évalués indépendamment puis homogénéisés afin d'en déduire de la réponse du matériau béton armé.

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

2 Loi de comportement RGI_BETON_BA

2.1 L oi de comportement du béton armé homogénéisé

Cette loi permet donc de considérer le béton armé comme un unique matériau et ainsi, d'éviter la différenciation des maillages du béton de celui des armatures. L'évaluation de son comportement est obtenue par combinaison de la contribution de l'armature et du béton par une loi de comportement homogénéisée. Dans le modèle présenté ici, issus des travaux de [Sellier, 2018], jusqu'à cinq densités d'armature peuvent être considérées. Celles-ci sont définies selon un indice *r*, auquel est associé une direction $\vec{V}^r$, une densité surfacique ρ^r et autres paramètre matériau.

Le matériau étant alors défini comme du béton armé, les paramètres renseignés dans ELAS permettant d'approcher la solution correspondent donc à ceux propres au béton armé. La réponse de ce matériau étant obtenue à partir de la contribution du béton et de l'acier évaluée de façon indépendante, il s'agit donc de renseigner au modèle les paramètres propres au béton seul. En considérant E^{be} le module du béton seul et E^r le module de l'armature, c elui-ci peut être évalué par la formule suivante :

$$E^{ELAS}=(1-\rho)E^{be}+\rho E^r \quad (1)$$

Le modèle comportemental de béton auquel est associé ce développement prenant en compte l'endommagement, il s'agit d onc de considérer l'impact de ces armatures en zone s saines et en zones endommagée s .
C es zones pouvant coexister au sein d'un même élément, i l en est de même pour la réponse de l'armature. Afin d'assurer cette différenciation, la contribution de l'armature est d écomposée selon la zone saine ou endommagée considérée, respectivement σ_{ij}^H et σ_{ij}^R et sont pondérées de façon à considérer l'endommagement local du béton. Ainsi, en zone fissurée la contrainte σ_{ij}^R est multipliée par l'endommagement local du béton dans la direction principale D_i^t , et en zone saine la contrainte σ_{ij}^H est multipliée par son complément à 1. Enfin, le comportement global du béton armé est obtenus en homogénéisant ces contraintes avec celle de la matrice de béton σ_{ij}^m tel que :

$$\sigma_{ij}=\left(1-\sum_{r=1}^{Nr}\rho^r\right)\sigma_{ij}^m+\left(1-D_{ijkl}^t\right)\sigma_{kl}^H+D_{ijkl}^t\cdot\sigma_{kl}^R \quad (2)$$

2.1.1 Contribution en zone saine

Dans ce modèle [Sellier, 2018], la participation de l'armature est limitée à celle de sa direction axiale. Ses contributions σ_i^H et σ_i^R respectivement en zone saine et en zone fissurée sont évaluées à partir de cette contrainte σ^r. En zone saine, σ_i^H est telle que :

$$\sigma_{ij}^H=\sum_{r=1}^{Nr}\rho^r\sigma^r\left(\vec{V}^r\otimes\vec{V}^r\right)_{ij} \quad (3)$$

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

2.1.2 Contributions en zone endommagée

E n zone fissurée, l' orientation de l'armature peut évoluer si la normale à la fissure ne lui est pas alignée. C'est l'effet Dowel l dit aussi G oujon (Figure 1) . Dans le modèle, et a u sein de la fissure, seule la p art de l'armature est considérée. En plus de l' évolution de sa direction , il s'agit donc aussi de p rendre en compte l'impact de l'endommagement sur sa contribution.
En premier temps, la nouvelle direction de l'armature $\vec{D}^r$ est évaluée. Traversant une fissure du béton, celle-ci est donc comprise entre sa direction initiale $\vec{V}^r$ et entre la direction principale de la fissure $\vec{V}^I$. Il est à noter que cette présente notice détaillant uniquement le développement relatifs aux armatures homogénéisée, le détail du calcul de $\vec{V}^I$ n'est pas présenté ici, et peut être trouvé dans la notice du modèle initial ([Code_Aster [R7.01.36]])

L a nouvelle direction p eut alors d'écrire t el que :

$$\vec{D}^r=\cos\left(\alpha^r\right)\vec{V}_r+\sin\left(\alpha^r\right)\cdot\frac{\vec{g}_I^r}{\|\vec{g}_I^r\|} \tag{4}$$

A vec :

- $\vec{g}_I^r$ le déplacement entre l'ouverture de fissure $w_I^{pl,t}$ et sa projection sur la direction initiale de l'armature $\vec{V}^r$ tel que :

$$\vec{g}_I^r=w_I^{pl,t}\left(\vec{V}^I-\left(\vec{V}^r\cdot\vec{V}^I\right)\cdot\vec{V}^r\right) \tag{5}$$

- α^r l'angle séparant la direction d'armature initiale $\vec{V}^r$ de sa nouvelle $\vec{D}^r$:

$$\alpha^r=2\arcsin\left(\sqrt{\frac{g_I^r}{4\,R^r}}\right)\leq arcos\left(\left|\vec{V}^I\cdot\vec{V}^r\right|\right) \tag{6}$$

- R^r le rayon de courbure obtenue tel que :

$$R^r=\frac{\pi\,D_r^{eq}\sigma^r}{4f_c} \tag{7}$$

S i plusieurs armatures traversent la même fissure, l'ensemble de leur contribution est considéré. Celles-ci sont pondérée s par l'endommagement local correspondant, puis sommée s et ramenée s en base locale grâce à la matrice de passage **P** . L'évaluation de ces contributions s'initie par la définition d'une première matrice de calcul **R** (8) et sont par suite déduites de sa partie symétrique (9) tel que :

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

$$\boldsymbol{R}=\sum_r \rho^r \sigma^r \boldsymbol{P}^{\boldsymbol{T}}[D_I^t\left(\vec{V}^r\cdot\vec{V}^I\right)\vec{D}_I^r];\boldsymbol{P}^{\boldsymbol{T}}[D_{II}^t\left(\vec{V}^r\cdot\vec{V}^{II}\right)\vec{D}_{II}^r];\boldsymbol{P}^{\boldsymbol{T}}[D_{III}^t\left(\vec{V}^r\cdot\vec{V}^{III}\right)\vec{D}_{III}^r]$$

$$\boldsymbol{R}=\sum_r \rho^r \sigma^r \begin{pmatrix} \boldsymbol{P}^{\boldsymbol{T}}[D_I^t\left(\vec{V}^r\cdot\vec{V}^I\right)\vec{D}_I^r] \\ \boldsymbol{P}^{\boldsymbol{T}}[D_{II}^t\left(\vec{V}^r\cdot\vec{V}^{II}\right)\vec{D}_{II}^r] \\ \boldsymbol{P}^{\boldsymbol{T}}[D_{III}^t\left(\vec{V}^r\cdot\vec{V}^{III}\right)\vec{D}_{III}^r] \end{pmatrix} \tag{8}$$

$$D_{ijkl}^t\cdot\sigma_{kl}^R=\left[\boldsymbol{P}\left[\frac{1}{2}\left[\boldsymbol{R}+\boldsymbol{R}^{\boldsymbol{T}}\right]\right]\boldsymbol{P}^T\right]_{ij} \tag{9}$$

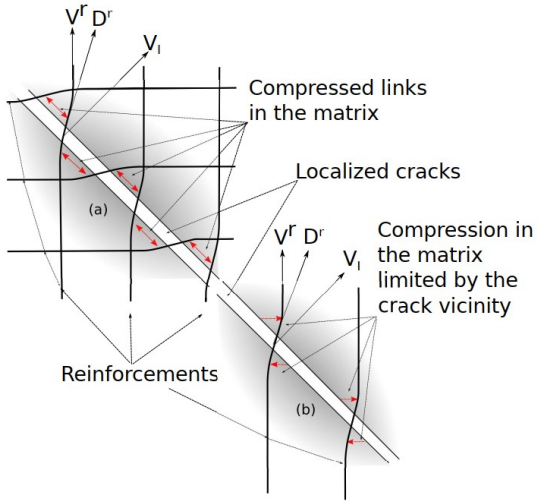


**Figure 1: a) Mécanismes assurant l'effet Dowel ,
b) Cas d'un effet plus limité [Sellier, 2018]**

I l est à noter que cet effet est permis par les zone de confinement développée entre les armatures et le béton comme sur la Figure 1 -a. Si le nombre d'armature est plus limité (Figure 1 -b), l ' impact de cet effet Dowel en est fortement réduit [Sellier, 2018] .

Enfin, il est à noter que d ans le cas d'éléments de taille importante la représentation de la fissuration n'est pas souvent explicite. Il est néanmoins possible pour ces éléments armé, et en considérant une longueur d'ancrage de l'acier et la distance maximale entre deux fissures, d'obtenir le nombre de fissure localisées.

2.2 Loi de comportement de la contribution axiale de l'armature

La contribution de l'armature est considérée dans sa direction axiale uniquement. La loi comportementale qui la définie permet la prise en compte de la plasticité et de relaxation. La déformation de l'armature est décomposée selon sa part plastique $\varepsilon^{r,pl}$, et ses part de relaxation élastique et permanente, $\varepsilon^{r,K}$ et $\varepsilon^{r,M}$.

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

De plus, il est aussi possible de considérer des densités d'armatures actives en considérant une valeur de précontrainte initiale σ_0^r tel que :

$$\sigma^r - \sigma_0^r = E^r\left(\varepsilon^r - \varepsilon^{r,pl} - \varepsilon^{r,M} - \varepsilon^{r,K}\right) \quad (10)$$

La déformation plastique est évaluée par une fonction critère permettant de prendre en compte l'écrouissage de l'armature. En considérant le module d'écrouissage et la limite d'élasticité, respectivement H^r et f_y^r, la fonction critère s'écrit :

$$f^r = |\sigma^r - H^r \varepsilon^{r,pl}| - f_y^r \leq 0 \quad (11)$$

2.2.1 Relaxation

Comme vu sur l'équation (10), le modèle permet de considérer une précontrainte. Le présent modèle ayant des finalités de calcul structural, les phénomènes de relaxation doivent donc être considérés. Ceux-ci étant fortement impacté par la valeur de tension initiale ainsi que par la température [Ajimi et al., 2017], un modèle de relaxation considérant ces impacts a été implémenté par [Chhun et al., 2018] [Chhun, 2017]. De la même façon que le modèle de fluage implémenté pour le béton [CF notice aster RGI_BETON], celui-ci est assuré par différents coefficients impactant les caractéristiques instantanées des armatures considérées. Le modèle est composé d'un première partie élastique assurant le comportant instantané, suivie d'un étage de Kelvin assurant la part des déformations visco-élastiques, et d'un troisième niveau dirigeant la part de déformation permanente, assurée par un module de Maxwell (Figure 2).

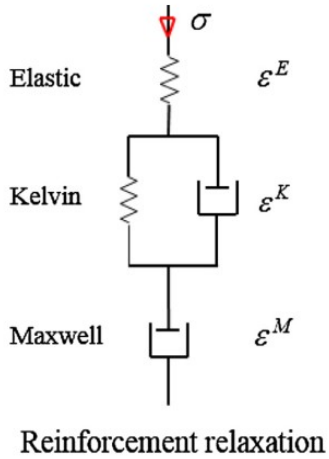


Figure 2: Schéma rhéologique idéalisé du modèle de relaxation issu de [Chhun, 2017]

2.2.1.1 Etage de Maxwell

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

La part permanente de la relaxation est évaluée de façon analogue à celle utilisé par/dans [[Sellier et al., 2016] / [Code_Aster [R7.01.36]]] pour la modélisation des déformations permanente de fluage. Elle est évaluée en fonction du ratio d e la déformation élastique $\varepsilon^{r,el}$ divisé par le produit du temps caractéristique de Maxwell $\tau^{r,M}$, paramètre matériau, et par le coefficient de consolidation Cc :

$$\frac{\partial \varepsilon^{r,M}}{\partial t}=\frac{\varepsilon^{r,el}}{\tau^{M} Cc} \tag{12}$$

Avec Cc fonction de la déformation visqueuse atteinte au pas actuel, et d'un coefficient k, coefficient d'amplitude de relaxation :

$$Cc=\frac{1}{k}\exp\left(\frac{1}{k}\frac{\varepsilon^{r,M}}{\varepsilon^{r,el}}\right) \tag{13}$$

D ans cette équation, k permet de considérer l'impact non linéaire de la température (T) e t du taux de charge (M) sur le phénomène de relaxation :

$$k=k_{ref}k^{T}k^{M} \tag{14}$$

A vec :

- k_{ref} , paramètre traduisant la capacité de relaxation du matériau, obtenus en considérant les paramètres ε_{ref}^{K} et σ_{ref} , respectivement le potentiel de référence de la relaxation et le taux de charge auquel ce potentiel à été fixé, tel que :

$$k_{ref}=E\frac{\varepsilon_{ref}^{K}}{\sigma_{ref}} \tag{15}$$

- k^{M} , permettant de considérer l' amplification non linéaire du taux de relaxation a vec l e taux de charge :

$$k^{M}=\frac{\mu^{cr}}{\mu^{cr}-\mu} \tag{16}$$

μ étant le taux de charge définit en fonction de la limite d'élasticité f_y tel que :

$$\mu=\frac{|\sigma|}{f_y} \tag{17}$$

et μ^{cr} le taux de charge critique, traduisant la tendance non linéaire du matériau à augmenter son taux de relaxation avec l'augmentation du taux de charge, fonction de χ coefficient de relaxation non linéaire (définit tel que la tendance soit linéaire pour $\chi=1$ et devenant non linéaire pour $\chi>1$, cf Figure 3)

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

$$\mu^{cr}=\frac{2}{3}\frac{\chi}{\chi-1} \tag{18}$$

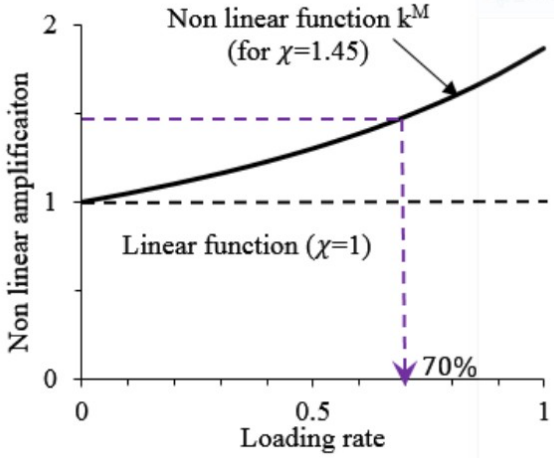


Figure 3: Fonction d'amplification non linéaire k^M issue de [Chhun, 2017]

- k^T , coefficient dirigeant l'accélération de la relaxation avec l'augmentation de la température, et assurant l'évolution non linéaire pour d'important niveau de charge :

$$k^T=\begin{cases}\exp\left[A^T\left(T-T_{ref}\right)^{n^r}\right] & si \quad T>T_{ref}\\ \exp\left[-A^T\left(T_{ref}-T\right)^{n^r}\right] & si \quad T\leqslant T_{ref}\end{cases} \tag{19}$$

L'évolution non linéaire est dirigée par A^T , coefficient d'activation t hermique fonction du taux de charge :

$$A^T=A^T_{ref}\exp\left(\gamma\cdot\mu^{TM}\right) \tag{20}$$

Avec A^T_{ref} valeur de référence pour le coefficient d'activation thermique, γ coefficient de couplage pour l'impact des contrainte sur l'énergie d'activation, μ^{TM} le taux de charge pouvant modifier l'activation thermique. En considérant μ^{thr} le seuil minimum de taux de charge pour impacter le coefficient d'activation thermique fixé à 0,7, μ^{TM} s'écrit tel que :

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

$$\mu^{TM}(t+dt)=max(\mu^{TM}(t),\mu(t+dt),\mu^{thr}) \quad (21)$$

2.2.1.2 Etage de Kelvin

Concernant le comportement viscoélastique, et comme développé par [Chhun et al., 2018], celui-ci est assuré par un module de Kelvin (Figure 2). De la même façon que les déformations permanentas, celles-ci se voient aussi impactées par la température :

$$\frac{\partial \varepsilon^K}{\partial t}=\frac{1}{\tau^{r,K}}\left(\frac{\varepsilon^{el}}{\Psi^K}-\varepsilon^K\right) \quad (22)$$

Avec $\tau^{r,k}$ et Ψ^k respectivement le temps caractéristique pour l es déformations de Kelvin et le taux de cette relaxation vis à vis de la déformation élastique, fonction de valeurs de référence et de k^T coefficient multiplicateur d'activation thermique définit dans l'équation (19) :

$$\tau^{r,K}=\frac{\tau^{r,K}_{ref}}{k^T} \quad (23)$$

$$\Psi^K=\frac{\Psi^K_{ref}}{k^T} \quad (24)$$

Il est à noter que cette partie du modèle a été validé à l'échelle de la structure de laboratoire et appliquée sur une structure de grande échelle [Chhun, 2017].

2.2.2 Adhérence acier béton

Dans la version du présent modèle, l'hypothèse d'adhérence parfaite est faite entre les deux matériaux acier et béton. De cette façon, la déformation axiale totale de l'armature est évaluée à partir de son allongement supposé, déterminé à partir de la matrice de déformation du béton $\bar{\bar{\varepsilon}}$ tel que :

$$\varepsilon^r \approx \varepsilon_r+\frac{1}{2}\gamma_r^2 \quad (25)$$

Avec ε_r la déformation axiale de l'armature :

$$\varepsilon_r=(\vec{V}^r)^t\,\bar{\bar{\varepsilon}}\,\vec{V}^r \quad (26)$$

Et γ_r la déformation de cisaillement

$$\gamma_r=\|\bar{\bar{\varepsilon}}\vec{V}^r-\varepsilon_r\vec{V}^r\| \quad (27)$$

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

Il est à noter que la prise en compte d'un glissement à cette interface est possible mais non implémentée dans ce présent modèle. Celui-ci nécessitant des calculs non local il n'est pas présenté ici mais peut être trouvé dans [Sellier, and Millard, 2019].

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

2.3 Résumé des paramètres matériau de RGI_BETON_BA

En plus des paramètres de RGI_BETON, il est nécessaire de fournir les paramètres suivants (les paramètres grisés sont à recaler pour chaque nouveau matériau) :

Paramètre	Signification	Symbole	Valeur usuelle	Unité
YOUM	Module d'Young propre au béton	E^{be}	15-40	MPa
NUM	Coefficient de Poisson propre au béton	ν^{be}	0,2	-
NREN	Nombre total de densité considérée	N^r	[0 ; 5]	-
ROA(i)	Densité surfacique	ρ^r	0.01	m²/m²
DEQ(i)	Diamètre équivalent	Deq^r	0.01	m
VR(i)1	Projection de la direction de l'armature selon $\vec{x}$	e_1^r	1.0	-
VR(i)2	Projection de la direction de l'armature selon $\vec{y}$	e_2^r	0.	-
VR(i)3	Projection de la direction de l'armature selon $\vec{z}$	e_3^r	0.	-
YOR(i)	Module d'Young	E^r	200 000	MPa
SYR(i)	Limite d'élasticité	f_y^r	500	MPa
HPL(i)	Module d'écrouissage	H^r	1000	MPa
TYR(i)	Contrainte à l'interface	$\tau^{r,1}$	6	MPa
TMR(i)	Temps caractéristiques irréversible pour le fluage (Maxwell)	$\tau^{r,M}$	0.1	Jours
TKR(i)	Temps caractéristiques réversible pour le fluage (Kelvin)	$\tau^{r,K}$	0.1	Jours
P RE (i)	Précontrainte initiale (imposée comme contrainte initiale au premier pas)	σ_0^r	0.	MPa
E KR (i)	Déformation caractéristique pour la relaxation	ε_{ref}^K	1e-4	-
S KR (i)	Contrainte caractéristique pour le calage de	σ_{ref}	1260	MPa
X FL (i)	Exposant pour l'activation thermique de la relaxation	n^r	2,55	-
X NR (i)	Co efficient de relaxation non linéaire	χ	1,216	-
T T R(i)	Température de référence pour le calage de $\tau^{r,M}$	T_{ref}	38	°C
C TM (i)	Coefficient de couplage pour l'impact des contraintes sur l'énergie d'activation	γ	4,8	-
A TR (i)	Valeur de référence pour le coefficient d'activation thermique	A_{ref}^T	1,5e-4	-
M US (i)	S euil au-delà duquel l'activation thermique devient fonction du taux de charge	μ^{thr}	0,7	-
Y KY (i)	Coefficient de réduction de relaxation réversible évalué à T^{ref}	Ψ_{ref}^k	100	-

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

3 Variables internes du modèle

Voici les variables internes stockées en chaque point de Gauss dans l'implémentation du modèle

Signification des variables internes	Numéro	Symbole	Nom
Variables scalaires			
Armature n°1			
Déformation axiale	115	ERT1	ε^r
Déformation plastique	116	ERP1	$\varepsilon^{r,pl}$
Contrainte axiale	117	SNR1	σ_0^r
Déformation de Maxwell	118	ERM1	$\varepsilon^{r,M}$
Taux de chargement maximal	119	MUR1	μ^{MAX}
Déformation de Kelvin	120	EKR1	$\varepsilon^{r,K}$
Précontrainte résiduelle	121	SPR1	σ_{res}^r
Armature n°2			
Déformation axiale	122	ERT2	ε^r
Déformation plastique	123	ERP2	$\varepsilon^{r,pl}$
Contrainte axiale	124	SNR2	σ_0^r
Déformation de Maxwell	125	ERM2	$\varepsilon^{r,M}$
Taux de chargement maximal	126	MUR2	μ^{MAX}
Déformation de Kelvin	127	EKR2	$\varepsilon^{r,K}$
Précontrainte résiduelle	128	SPR2	σ_{res}^r
Armature n°3			
Déformation axiale	129	ERT3	ε^r
Déformation plastique	130	ERP3	$\varepsilon^{r,pl}$
Contrainte axiale	131	SNR3	σ_0^r
Déformation de Maxwell	132	ERM3	$\varepsilon^{r,M}$
Taux de chargement maximal	133	MUR3	μ^{MAX}
Déformation de Kelvin	134	EKR3	$\varepsilon^{r,K}$
Précontrainte résiduelle	135	SPR3	σ_{res}^r
Armature n°4			
Déformation axiale	136	ERT4	ε^r
Déformation plastique	137	ERP4	$\varepsilon^{r,pl}$
Contrainte axiale	138	SNR4	σ_0^r
Déformation de Maxwell	139	ERM4	$\varepsilon^{r,M}$
Taux de chargement maximal	140	MUR4	μ^{MAX}
Déformation de Kelvin	141	EKR4	$\varepsilon^{r,K}$
Précontrainte résiduelle	142	SPR4	σ_{res}^r
Armature n°5			
Déformation axiale	143	ERT5	ε^r
Déformation plastique	144	ERP5	$\varepsilon^{r,pl}$

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

Contrainte axiale	145	SNR5	σ_0^r
Déformation de Maxwell	146	ERM5	$\varepsilon^{r,M}$
Taux de chargement maximal	147	MUR5	μ^{MAX}
Déformation de Kelvin	148	EKR5	$\varepsilon^{r,K}$
Précontrainte résiduelle	149	SPR5	σ_{res}^r
Contraintes dans le béton seul			
Direction 11 (repère global)	150	SBE1	σ_{11}^{be}
Direction 22 (repère global)	151	SBE2	σ_{22}^{be}
Direction 33 (repère global)	152	SBE3	σ_{33}^{be}
Direction 12 (repère global)	153	SBE4	σ_{12}^{be}
Direction 13 (repère global)	154	SBE5	σ_{13}^{be}
Direction 23 (repère global)	155	SBE6	σ_{23}^{be}
Contraintes principale du béton seul			
Contrainte principale majeure	156	SPM1	σ_I
Contrainte principale s econdaire	157	SPM2	σ_{II}
Contrainte principale mineure	158	SPM3	σ_{III}

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

4 Organigramme général de résolution

Après évaluation du comportement du béton, le modèle évalue la contribution de l'armature. Cette notice visant a expliciter uniquement cette contribution, celle du béton ne sera pas décrite ici. Sa loi de comportement détaillée est présentée dans la notice [R7.01.30]. L'organigramme présenté ci-dessous en Figure 4 récapitule les principales étapes de la résolution du calcul pour la prise en compte d'armature homogénéisé au béton.

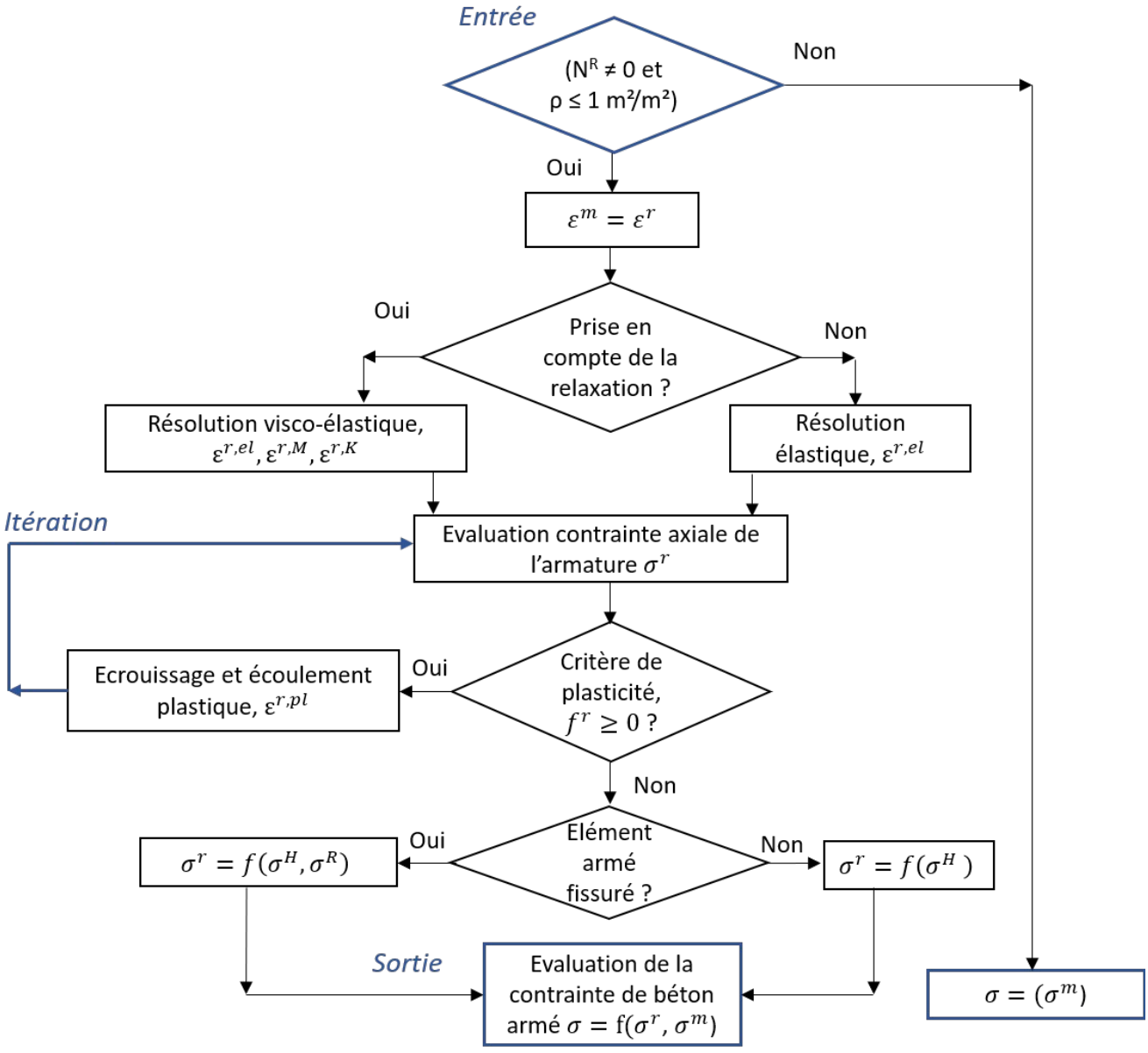


Figure 4: Organigramme de résolution

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

Comme dit précédemment, la première considérations qu'induit ces armatures homogénéisées est l'hypothèse d'adhérence parfaite. De part ce fait, la déformation finale du béton est récupérée et la contrainte dans l'armature en est déduite. La contrainte est par suite soumise à un critère de plasticité. Si celui-ci est actif, l'armature est plastifiée et une itération est faite pour ré-évaluer la valeur de sa contrainte en considérant la déformation plastique induite.
Une fois la contrainte de l'armature obtenue, c'est l'endommagement du béton que l'on va considérer. En effet, si l'élément armé est fissuré, on considère l'effet Goujon pour évaluer la résultante en partie fissurée ainsi que sa réduction en partie saine. Enfin, la contrainte du béton armé en est déduite en combinant ces contraintes avec celles du béton grâce à la loi d'homogénéisation.

5 Intégration numérique

Dans ce paragraphe, l'intégration numérique de la prise en compte des armatures réparties est présenté. Le modèle a été intégré selon un schéma implicite.

5.1 Schéma d'intégration numérique

Le schéma d'intégration implicite consiste en une phase de prédiction visco-élastique qui prend en compte le fluage. Elle est suivie d'une phase de correction plastique dans l'espace des contraintes effectives si au moins l'un des critères est atteint.
La notation pseudo-vecteur (tenseur symétrique) est adoptée.

5.1.1 Phase de prédiction viscoélastique

Les trois équations suivantes relient les incréments de déformations élastiques et de fluage (Maxwell et Kelvin) à la déformation totale. Le schéma est semi-implicite et θ vaut 1/2 :

$$\left\{\begin{array}{c} \Delta\varepsilon^{r,tot}=\Delta\varepsilon^{r,el}+\Delta\varepsilon^{r,K}+\Delta\varepsilon^{r,M} \\ \Delta\varepsilon^{r,K}\left(\frac{\Delta t}{\tau^{r,K}}+\theta\right)+\varepsilon^{r,K}=\frac{1}{\Psi^{K}}\left(\varepsilon^{r,el}+\theta\,\Delta\varepsilon^{r,el}\right) \\ \Delta\varepsilon^{r,M}=\frac{\Delta t}{\tau^{r,M}Cc^{r}}\left(\varepsilon^{r,el}+\theta\,\Delta\varepsilon^{r,el}\right) \end{array}\right. \quad (28)$$

En synthétisant :

$$\Leftrightarrow \bar{\bar{L}}\cdot\Delta\bar{X}=\bar{Y} \quad (29)$$

Avec $\bar{\bar{L}}$ établi en base principale de $d'\varepsilon$ et $\bar{X}=\begin{pmatrix} d\varepsilon^{r,el} \\ d\varepsilon^{r,M} \\ d\varepsilon^{r,K} \end{pmatrix}$

Ainsi, on a :

$$\Leftrightarrow \bar{X}=\bar{\bar{L}}^{-1}\cdot\bar{Y} \quad (30)$$

$$\bar{X}^{t}=\bar{X}^{-t}+\Delta\bar{X}^{t} \quad (31)$$

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

$$\Delta \bar{X}^t \rightarrow \Delta \varepsilon^{r,el} \quad (32)$$

L'incrément de contrainte s'écrit :

$$\Delta \sigma^r = E^r \cdot \Delta \varepsilon^{r,el} \quad (33)$$

Ainsi :

$$\sigma^r = \sigma_0^r + \Delta \sigma^r \quad (34)$$

5.1.2 Phase de c orrection

Après la phase de prédiction visco-élastique, une évaluation des critères est réalisée :

$$f^r = \Delta \sigma^r - f_y^r \quad (35)$$

Avec :

$$\Delta \sigma^r = \sigma^r - E^r \cdot \Delta \varepsilon^{r,pl} \quad (36)$$

Si le critère est activé, on réalise un écoulement en considérant la correction pour le fluage associé :

$$f_y^r - \Delta \sigma^r = -f^r \quad (37)$$

Avec une loi d'écoulement associée :

$$\Delta \varepsilon^{r,pl} = \frac{f^r}{E^r H^r} \quad (38)$$

Les variations de contrainte entraînent une correction visco élastique, ce qui oblige à coupler les équations de tir viscoélastique avec celles du retour radial, le système suivant est alors obtenu et résolu :

$$[\bar{Z}] \begin{pmatrix} d\varepsilon_e \\ d\varepsilon_M \\ d\varepsilon_K \\ d\varepsilon^{r,pl} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -f^r \end{pmatrix} \quad (39)$$

Avec $[\bar{Z}]$ la matrice contenant tous les coefficients déduits des conditions d'annulation de critère et de comportement viscoélastique.
Les incréments sont utilisés pour obtenir les valeurs admissibles des variables d'état en fin de pas. Ces dernières peuvent alors être utilisées pour calculer les endommagements conformément à l'algorithme de résolution.

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

6 Bibliographie

Ajimi WT, Chataigner S, Gaillet L: Influence of low elevated temperature on the mechanical behavior of steel rebars and prestressing wires in nuclear containment structures. Construction and Building Materials 2017;134:462–470.

Chhun P: Modélisation du comportement thermo-hydro-chemo-mécanique des enceintes de confinement nucléaire en béton armé-précontraint [Internet] 2017;Available from: http://www.theses.fr/2017TOU30139/document

Chhun P, Sellier A, Lacarriere L, Chataigner S, Gaillet L: Incremental modeling of relaxation of prestressing wires under variable loading and temperature. Construction and Building Materials 2018;163:337–342.

Code_Aster [R7.01.36]: Relation de comportement KIT_RGI [Internet]. Available from: https://www.code-aster.org/V2/doc/v13/fr/index.php?man=R

Sellier A: Anisotropic Damage and Visco-Elasto-Plasticity Applied to Multiphasic Materials [Internet], LMDC - Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions de Toulouse ; Université de Toulouse III - Paul Sabatier ; INSA de Toulouse, 2018.Available from: https://hal.insa-toulouse.fr/hal-01710289

Sellier A, Millard A: A homogenized formulation to account for sliding of non-meshed reinforcements during the cracking of brittle matrix composites: Application to reinforced concrete. Engineering Fracture Mechanics 2019;213:182–196.

Sellier A, Multon S, Buffo-Lacarrière L, Vidal T, Bourbon X, Camps G: Concrete creep modelling for structural applications: non-linearity, multi-axiality, hydration, temperature and drying effects. Cement and Concrete Research 2016;79:301–315.

7 Fonctionnalités et vérification

Ce document concerne la loi de comportement RGI_BETON_BA (mots clés COMPORTEMENT de STAT_NON_LINE) et leurs matériaux associés portant le même nom (commande DEFI_MATERIAU). Cette loi de comportement est vérifiée par les cas tests suivants :

SSNV269	Validation sur échantillon (Vieillissement d'éprouvette réactive)	[V6.04.269]

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