Relation de comportement BETON_BURGER pour le fluage du béton

Résumé :

Ce document présente le modèle de fluage BETON_BURGER, qui est une façon de modéliser le fluage du béton (propre et de dessiccation). Ce modèle s'inspire fortement de la structure déjà mise en place dans le modèle BETON_UMLV.

Ce modèle est implémenté sous MFront et intégré directement dans code_aster.

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

Table des Matières

1 Introduction....3
2 Hypothèses....5
3 Description du modèle....6
3.1 Fluage propre....6
3.1.1 Description de la partie sphérique....6
3.1.2 Description de la partie déviatorique....6
3.1.3 Description de la non linéarité visqueuse....7
3.1.4 Restriction du nombre de paramètres du modèle....7
3.1.5 Thermo-activation des déformations de fluage propre....7
3.2 Fluage de dessiccation....9
4 Description du modèle sous MFront....10
5 Description des variables internes....11
6 Notations....13
7 Bibliographie....14
8 Fonctionnalités et vérification....15

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

1 Introduction

Dans le cadre des études du comportement à long terme de structures en béton, une part prépondérante des déformations mesurées sur structure concerne les déformations différées qui apparaissent dans le béton au cours de sa vie. On parle de « retrait » quand la déformation est mesurée sur une éprouvette non soumise à chargement et de « fluage » quand la déformation a lieu sous chargement. Les échanges d'eau entre l'éprouvette et l'environnement influencent la déformation finale de façon considérable. Cette observation donne lieu classiquement à des distinctions ultérieures sur les déformations différées. On distingue alors classiquement les retraits au jeune âge, le retrait de dessiccation, le fluage propre et le fluage de dessiccation. On rappelle les déformations différées d'une structure en béton pour situer la part de la déformation calculée dans ce document :

- au jeune âge sans charge :

  1) le retrait endogène (1 jour - 1 an)
  2) le retrait thermique (1 heure – 1 jour)

  provoquées par une réaction de thermo-hydratation.

- à moyen terme sans charge : le retrait de dessiccation (quelques mois – quelques ans) selon les dimensions de la structure provoqué par le séchage qui se traduit par une évaporation d'une partie de l'eau non utilisée dans le processus d'hydratation.
- à long terme sous charge :

  1) Le fluage propre, qui est la part de fluage du béton qu'on observerait lors d'un essai sans échange d'eau avec l'extérieur.

  2) Le fluage de dessiccation en complément au fluage propre est la part du fluage total directement liée au départ d'eau affectant le béton qui subit un chargement mécanique d'une part et le séchage d'autre part.

Le modèle présenté ici est dédié à la modélisation de la déformation différée associée au fluage, propre et dessiccation. Dans *code_aster*, le modèle est utilisé sous le nom de BETON_BURGER.

Fluage propre. Le premier modèle de fluage des bétons introduit dans code_aster (voir [R7.01.01] et [bib4]) a été développé dans l'optique de prédire les déformations longitudinales de fluage sous des contraintes uniaxiales. La généralisation de ce modèle, afin de prendre en compte un état de contraintes multiaxiales, se fait alors par l'intermédiaire d'un coefficient de Poisson de fluage arbitraire, constant et égal, ou proche, du coefficient de Poisson élastique. Or, la détermination *a posteriori* du coefficient de Poisson de fluage effectif montre sa dépendance vis-à-vis du chemin de chargement. Par ailleurs, le béton de certains ouvrages du parc EDF, telles les enceintes de confinement de réacteur nucléaire, est soumis à un état de contraintes biaxiales. Ce constat a conduit à la mise au point de la loi de déformations de fluage propre UMLV (Université de Marne-la-Vallée, partenaire dans le développement de ce modèle) pour laquelle le coefficient de Poisson de fluage est une conséquence directe du calcul des déformations principales.
Le modèle BETON_UMLV suppose pour sa part des vitesses de déformation à long terme constante, rhéologie qui semble peu vraisemblable au vu des résultats expérimentaux issus des travaux de Brooks [bib7]. En conservant la structure du modèle BETON_UMLV, on ajoute une non linéarité sur les vitesses de déformation à long terme pour corriger ce point, méthodologie également employée par Sellier et al. [bib6]. Le nouveau modèle développé est décrit comme phénoménologique.
La déformation de fluage propre est fortement affectée par l'hygrométrie du béton. Cette dépendance est prise en compte par la loi BETON_BURGER (comme c'était le cas pour BETON_UMLV). L'effet de la température dans les déformations de fluage propre est aussi pris en compte dans la loi BETON_BURGER via une loi de type Arrhénius.
Expérimentalement les déformations de fluage propre présentent aussi un comportement vieillissant : la déformation après un temps Δt dépend de l'âge du matériau à l'instant de chargement. Cet aspect du comportement du béton n'est pas pris en compte dans ce modèle.

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

Fluage de dessiccation. Le modèle proposé ici est celui de Bazant [bib10]. C'est une loi purement visqueuse.

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

2 Hypothèses

Hypothèse 1 (H.P.P.)
La loi est écrite dans le cadre des petites perturbations.

Hypothèse 2 (partition des déformations)
En petites déformations, le tenseur des déformations totales est décomposé en plusieurs termes relatifs aux processus considérés. S'agissant de la description des différents mécanismes de déformations différées des bétons, on admet que la déformation totale s'écrive :

$$\underset{\text{déformation élastique}}{\underbrace{\underline{\varepsilon}^{e}}} + \underset{\text{fluage propre}}{\underbrace{\underline{\varepsilon}^{fp}}} + \underset{\text{fluage de dessiccation}}{\underbrace{\underline{\varepsilon}^{fdess}}} + \underset{\text{retrait endogène}}{\underbrace{\underline{\varepsilon}^{re}}} + \underset{\text{retrait de dessiccation}}{\underbrace{\underline{\varepsilon}^{rd}}} + \underset{\text{déformation thermique}}{\underbrace{\underline{\varepsilon}^{th}}} \quad (1)$$

Dans ce document, on ne décrit pas la prise en compte des différents types de retraits (pour cela, voir la documentation de *code_aster* [R7.01.12]), de sorte que (1) se réduise à :

$$\underline{\varepsilon} = \underline{\varepsilon}^{e} + \underline{\varepsilon}^{fp} + \underline{\varepsilon}^{fdess} \quad (2)$$

Hypothèse 3 (décomposition des composantes de fluage propre)

De façon générale, le fluage propre peut être modélisé en combinant le comportement élastique du solide et le comportement visqueux du fluide. Pour la loi présentée, le fluage propre est décrit comme la combinaison du comportement élastique des hydrates et des granulats et du comportement visqueux de l'eau.
Dans le cas du modèle BETON_BURGER, on effectue l'hypothèse que le fluage propre puisse être décomposé en un processus découplant une partie sphérique et une partie déviatorique. Le tenseur des déformations totales de fluage propre s'écrit alors :

$$\underline{\varepsilon}^{fp} = \underset{\text{partie sphérique}}{\underbrace{\varepsilon^{fs}\cdot\underline{\underline{1}}}} + \underset{\text{partie déviatorique}}{\underbrace{\underline{\varepsilon}^{fd}}} \quad \text{avec} \quad \varepsilon^{fs} = \frac{1}{3}\cdot tr\,\underline{\varepsilon}^{fp} \quad (3)$$

Le tenseur des contraintes peut être développé suivant une forme similaire :

$$\underline{\sigma} = \underset{\text{partie sphérique}}{\underbrace{\sigma^{s}\cdot\underline{\underline{1}}}} + \underset{\text{partie déviatorique}}{\underbrace{\underline{\sigma}^{d}}} \quad (4)$$

Le modèle BETON_BURGER suppose un découplage total entre les composantes sphériques et déviatoriques du fluage propre : les déformations induites par les contraintes sphériques sont purement sphériques et les déformations induites par les contraintes déviatoriques sont purement déviatoriques. En revanche, les déformations visqueuses cumulées ont un effet sur les propriétés visqueuses du fluide, quelle que soit sa provenance (sphérique ou déviatorique). Pour tenir compte de l'effet de l'humidité interne, les déformations sont multipliées par l'humidité relative interne :

$$\varepsilon^{s} = h\cdot f\left(\sigma^{s}\right) \text{ et } \underline{\varepsilon}^{d} = h\cdot f\left(\underline{\sigma}^{d}\right) \quad (5)$$

Ou h désigne l'humidité relative interne.
La condition (5) permet de vérifier *a posteriori* que les déformations de fluage propre sont proportionnelles à l'humidité relative.

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

3 Description du modèle

3.1 Fluage propre

Pour modéliser le phénomène de fluage propre, le modèle proposé s'appuie sur des modèles rhéologiques simples (figure 3.1-1) comprenant en série un corps élastique (décrit par le comportement ELAS), un solide de Kelvin Voigt linéaire pour la modélisation du fluage réversible (recouvrance), et un liquide de Maxwell avec une viscosité non linéaire pour modéliser le fluage à long terme. Les chaînes sphérique et déviatorique sont équivalentes dans leur construction.
L'étage de Kelvin Voigt a une limite de déformation gérée par le module d'élasticité. La particularité du modèle repose sur le choix de la non-linéarité affectée à la viscosité du corps de Maxwell.

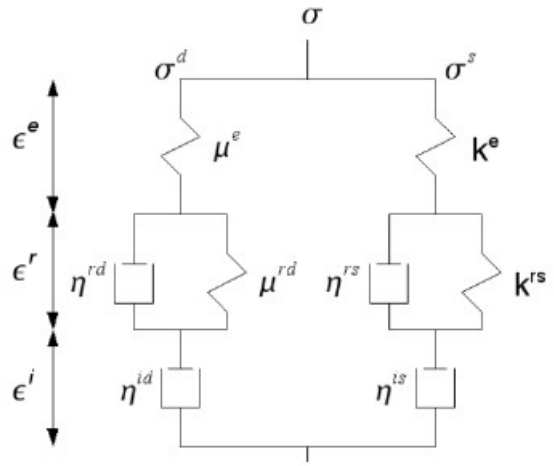


Figure 3.1-1: Schéma rhéologique distinguant la partie sphérique et déviatorique du tenseur des contraintes

3.1.1 Description de la partie sphérique

La déformation sphérique de fluage propre s'écrit comme la somme d'une partie réversible et d'une partie irréversible :

$$\varepsilon^{fs} = \underbrace{\varepsilon_r^{fs}}_{\substack{partie \\ réversible}} + \underbrace{\varepsilon_i^{fs}}_{\substack{partie \\ irréversible}} \tag{6}$$

Le processus de déformation sphérique du fluage est gouverné par les équations suivantes :

$$h \cdot \sigma^s = k^{rs} \cdot \varepsilon_r^{fs} + \eta^{rs} \cdot \dot{\varepsilon}_r^{fs} \tag{7}$$

et:

$$h \cdot \sigma^s = \eta^{is} \cdot \dot{\varepsilon}_i^{fs} \tag{8}$$

avec :

- k_r^s le module de compressibilité associé au fluage propre sphérique réversible,
- η_r^s la viscosité de l'étage de Kelvin Voigt associé au fluage propre sphérique réversible,
- η_i^s la viscosité sphérique non linéaire du fluide de Maxwell.

L'indicateur $\dot{}$ associé à toute variable décrit la vitesse d'évolution de cette variable.

3.1.2 Description de la partie déviatorique

La déformation déviatorique de fluage propre s'écrit également comme la somme tensorielle d'une partie réversible et d'une partie irréversible :

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

$$\underbrace{\underline{\underline{\varepsilon}}^{fd}}_{\substack{\text{déformation}\\ \text{déviatorique}\\ \text{totale}}} = \underbrace{\underline{\underline{\varepsilon}}_r^{fd}}_{\substack{\text{contribution}\\ \text{réversible}}} + \underbrace{\underline{\underline{\varepsilon}}_i^{fd}}_{\substack{\text{contribution}\\ \text{irréversible}}} \quad (9)$$

La $j^{ème}$ composante principale de la déformation déviatorique totale est régie par les équations :

$$\eta_r^d \cdot \dot{\varepsilon}_r^{fd,j} + k_r^d \cdot \varepsilon_r^{fd,j} = h \cdot \sigma^{d,j} \quad (10)$$

Et :

$$\eta_i^d \cdot \dot{\varepsilon}_i^{fd,j} = h \cdot \sigma^{d,j} \quad (11)$$

avec :

- k_r^d le module de cisaillement associé au fluage propre déviatorique réversible,
- η_r^d la viscosité de l'étage de Kelvin Voigt associé au fluage propre déviatorique réversible,
- η_i^d la viscosité déviatorique non linéaire du fluide de Maxwell.

3.1.3 Description de la non linéarité visqueuse

La non-linéarité de la viscosité est interprétée selon [bib6] comme le résultat d'une consolidation sphérique de l'échantillon ([bib7]) et d'un enchevêtrement ou blocage des déplacements des feuillets CSH, constituants du mortier. Un coefficient de « consolidation » est donc introduit selon la même idée pour contrôler l'évolution des viscosités. Ce coefficient supplémentaire intervient sur les lois d'évolutions des corps de Maxwell (sphérique et déviatorique). Il dépend directement de la norme du tenseur des déformations différées irréversibles cumulées. Cette extension des hypothèses posées par [bib6] permet une prise en compte de la non-linéarité pour tout type de trajets (avec ou sans chargement sphérique). La formulation explicite des corps de Maxwell est la suivante :

$$\eta_i^s = \eta_{i,0}^s \cdot \exp\left(\frac{\left\|\varepsilon_m^{fi}\right\|}{\kappa}\right) \text{ et } \eta_i^d = \eta_{i,0}^d \cdot \exp\left(\frac{\left\|\varepsilon_m^{fi}\right\|}{\kappa}\right) \quad (12)$$

avec :

- $\eta_{i,0}^s$ la viscosité initiale du fluide de Maxwell portant sur la partie sphérique
- $\eta_{i,0}^d$ la viscosité initiale du fluide de Maxwell portant sur la partie déviatorique
- κ la déformation caractéristique liée à une viscosité amplifiée d'un facteur $\exp(1)$.
- $\left\|\varepsilon_m^{fi}\right\|$ La déformation équivalente irréversible, c'est-à-dire la norme du tenseur complet (sphérique et déviatorique) de déformations de fluage irréversible, valeur maximale atteinte au cours du chargement.

La construction de $\left\|\varepsilon_m^{fi}\right\|$ suit la logique suivante : $\left\|\varepsilon_m^{fi}\right\| = max\left(\left\|\varepsilon_m^{fi}\right\|, \sqrt{\underline{\underline{\varepsilon}}^{fi} : \underline{\underline{\varepsilon}}^{fi}}\right)$.

3.1.4 Restriction du nombre de paramètres du modèle

L'équivalence des chaînes rhéologiques déviatorique et sphérique permet d'obtenir, en respectant l'expression suivante, un coefficient de Poisson apparent de fluage constant :

$$\frac{\eta_{i,0}^s}{\eta_{i,0}^d} = \frac{\eta_r^s}{\eta_r^d} = \frac{k_r^s}{k_r^d} = \frac{(1+\nu)}{(1-2\cdot\nu)} = \beta \quad (13)$$

Pour l'utilisation du modèle BETON_BURGER sur des essais uniaxiaux de fluage, on dispose rarement des déformations radiales des échantillons rendant difficile l'identification de l'ensemble des paramètres du modèle. Une première approximation consiste à assumer la relation (13) et limite ainsi le nombre de paramètres à déterminer à quatre.

3.1.5 Thermo-activation des déformations de fluage propre

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

Les résultats expérimentaux d'essai de fluage propre en température montrent que la déformation de fluage est thermo-activée. Pour des températures T inférieures à 55°C, elle obéit à une loi de type Arrhenius :

$$\varepsilon^f(T)=\varepsilon^f(T_0)\cdot\exp\left(\frac{-E_{ac}}{R}\cdot\left(\frac{1}{T}-\frac{1}{T_0}\right)\right) \quad (14)$$

avec :

- T_0 la température de référence
- E_{ac} l'énergie d'activation
- R la constante des gaz parfaits (8,3144621 $J.K^{-1}.mol^{-1}$)

Pour satisfaire cette relation et tout en gardant un temps caractéristique constant, la raideur des ressorts et la viscosité des amortisseurs sont modifiées de la manière suivante :

$$k^{rs}(T)=k^{rs}(T_0)\cdot\exp\left(\frac{E_{ac}}{R}\cdot\left(\frac{1}{T}-\frac{1}{T_0}\right)\right) \quad (15)$$

$$k^{rd}(T)=k^{rd}(T_0)\cdot\exp\left(\frac{E_{ac}}{R}\cdot\left(\frac{1}{T}-\frac{1}{T_0}\right)\right) \quad (16)$$

$$\eta^{rs}(T)=\eta^{rs}(T_0)\cdot\exp\left(\frac{E_{ac}}{R}\cdot\left(\frac{1}{T}-\frac{1}{T_0}\right)\right) \quad (17)$$

$$\eta^{rd}(T)=\eta^{rd}(T_0)\cdot\exp\left(\frac{E_{ac}}{R}\cdot\left(\frac{1}{T}-\frac{1}{T_0}\right)\right) \quad (18)$$

$$\eta_0^{is}(T)=\eta_0^{is}(T_0)\cdot\exp\left(\frac{E_{ac}}{R}\cdot\left(\frac{1}{T}-\frac{1}{T_0}\right)\right) \quad (19)$$

$$\eta_0^{id}(T)=\eta_0^{id}(T_0)\cdot\exp\left(\frac{E_{ac}}{R}\cdot\left(\frac{1}{T}-\frac{1}{T_0}\right)\right) \quad (20)$$

$$\kappa(T)=\frac{\kappa(T_0)}{\exp\left(\frac{E_{ac}}{R}\cdot\left(\frac{1}{T}-\frac{1}{T_0}\right)\right)} \quad (21)$$

Pour déterminer l'énergie d'activation E_{ac}, il est vivement conseillé d'employer des données expérimentales d'essais de fluage en température. Sans ces données, la valeur par défaut de l'énergie d'activation est 17.5kJ.mol $^{-1}$.

Le champ de température est donc indispensable en préalable du calcul mécanique. Si néanmoins le champ de température n'est pas fourni, la thermo-activation n'est pas prise en compte dans le modèle, c'est-à-dire $k^{rs}(T)=k^{rs}(T_0)$, $k^{rd}(T)=k^{rd}(T_0)$, $\eta^{rs}(T)=\eta^{rs}(T_0)$, $\eta^{rd}(T)=\eta^{rd}(T_0)$, $\eta_0^{is}(T)=\eta_0^{is}(T_0)$, $\eta_0^{id}(T)=\eta_0^{id}(T_0)$, $\kappa(T)=\kappa(T_0)$.

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

3.2 Fluage de dessiccation

On suppose de pouvoir décomposer le fluage de dessiccation $\Delta\varepsilon^{fdess}$ en deux parties appelées intrinsèque et structurale [bib4] :

$$\Delta\varepsilon^{fdess}=\Delta\varepsilon_{int}^{fdess}+\Delta\varepsilon_{struct}^{fdess} \tag{22}$$

Il est convenu que la déformation structurale n'est pas une composante de déformation en soi, donc dans ce document la seule composante du fluage de dessiccation concerne la partie intrinsèque :

$$\Delta\varepsilon^{fdess}=\Delta\varepsilon_{int}^{fdess} \tag{23}$$

Bazant et al. [bib10] suggèrent que le séchage et l'application d'un chargement en compression simultanément sont responsables de la micro-diffusion des molécules entre les macro-pores et les micro-pores. La micro-diffusion des molécules d'eau favoriserait la rupture des liaisons entre les particules de gel induisant la déformation de fluage de dessiccation. C'est un des phénomènes physico-chimiques les plus compliqués à modéliser résultant d'un couplage entre la contrainte, le fluage propre et le séchage. Ils proposent l'équation suivante (équation d'un amortisseur) pour prendre en compte le fluage de dessiccation (intrinsèque) au niveau élémentaire :

$$\dot{\varepsilon}^{fdess}=\frac{|\dot{h}|\sigma}{\eta^{fd}} \tag{24}$$

avec :

- ε^{fdess} la déformation du fluage de dessiccation,
- η^{fd} un paramètre matériau (en $[Pa\cdot sec]$ dans le S.I.),
- h l'humidité relative qui évolue dans le temps, donnée du problème d'évolution.

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

4 Description du modèle sous MFront

Le comportement est défini dans le fichier BETON_BURGER.mfront.

Parser/DSL	`Implicit`
Algorithm	`NewtonRaphson_NumericalJacobian`
	`@Epsilon 1.E-11`

Variables internes (@StateVariable)	`real ESPHR`
	`real ESPHI`
	`real ELIM`
	`Stensor EDEVR`
	`Stensor EDEVI`
	`Stensor Edess`

Variables internes auxilliaires (@AuxiliaryStateVariable)	`Stensor EF`

Variables de commandes (@ExternalStateVariable)	`real HYGR`
	`real HYDR`
	`real SECH`

Modélisations	`'3D'`
	`'AXIS'`
	`'D_PLAN'`

Déformations	`'PETIT'`
	`'PETIT_REAC'`
	`'GDEF_LOG'`

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

5 Description des variables internes

Le tableau suivant donne la correspondance entre le numéro des variables internes accessibles par *code_aster* et leur description dans le cas d'une modélisation 2D (D_PLAN ou AXIS) :

Rappel : les quatre premières variables internes (dans le cas 2D) sous MFront sont toujours les déformations élastiques.

Numéro de la variable	Description
5	Déformation sphérique réversible
6	Déformation sphérique irréversible
7	Déformation équivalente de fluage propre irréversible max
8	Déformation déviatorique réversible, composante 11
9	Déformation déviatorique réversible, composante 22
10	Déformation déviatorique réversible, composante 33
11	Déformation déviatorique réversible, composante 12
12	Déformation déviatorique irréversible, composante 11
13	Déformation déviatorique irréversible, composante 22
14	Déformation déviatorique irréversible, composante 33
15	Déformation déviatorique irréversible, composante 12
16	Fluage de dessiccation, composante 11
17	Fluage de dessiccation, composante 22
18	Fluage de dessiccation, composante 33
19	Fluage de dessiccation, composante 12
20	Déformation fluage propre, composante 11
21	Déformation fluage propre, composante 22
22	Déformation fluage propre, composante 33
23	Déformation fluage propre, composante 12

Le tableau suivant donne la correspondance entre le numéro des variables internes accessibles par *code_aster* et leur description dans le cas d'une modélisation 3D :

Rappel : les six premières variables internes (dans le cas 3D) sous MFront sont toujours les déformations élastiques.

Numéro de la variable	Description
7	Déformation sphérique réversible
8	Déformation sphérique irréversible
9	Déformation équivalente de fluage propre irréversible max
10	Déformation déviatorique réversible, composante 11
11	Déformation déviatorique réversible, composante 22
12	Déformation déviatorique réversible, composante 33
13	Déformation déviatorique réversible, composante 12
14	Déformation déviatorique réversible, composante 13
15	Déformation déviatorique réversible, composante 23
16	Déformation déviatorique irréversible, composante 11
17	Déformation déviatorique irréversible, composante 22
18	Déformation déviatorique irréversible, composante 33
19	Déformation déviatorique irréversible, composante 12
20	Déformation déviatorique irréversible, composante 13
21	Déformation déviatorique irréversible, composante 23
22	Fluage de dessiccation, composante 11
23	Fluage de dessiccation, composante 22
25	Fluage de dessiccation, composante 33
26	Fluage de dessiccation, composante 12
26	Fluage de dessiccation, composante 13

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

27	Fluage de dessiccation, composante 23
28	Déformation fluage propre, composante 11
29	Déformation fluage propre, composante 22
30	Déformation fluage propre, composante 33
31	Déformation fluage propre, composante 12
32	Déformation fluage propre, composante 13
33	Déformation fluage propre, composante 23

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

6 Notations

$\underline{\underline{\varepsilon}}$ tenseur des déformations totales

$\underline{\underline{\varepsilon}}^{f}$ tenseur des déformations de fluage propre

$\underline{\underline{\varepsilon}}^{e}$ tenseur des déformations élastiques

$\varepsilon^{fs}\underline{\underline{1}}$ partie sphérique du tenseur des déformations de fluage propre

$\varepsilon_r^{fs}\underline{\underline{1}}$ partie sphérique réversible du tenseur des déformations de fluage propre

$\varepsilon_i^{fs}\underline{\underline{1}}$ partie sphérique irréversible du tenseur des déformations de fluage propre

$\underline{\underline{\varepsilon}}^{fd}$ partie déviatorique du tenseur des déformations de fluage propre

$\underline{\underline{\varepsilon}}_r^{fd}$ partie déviatorique réversible du tenseur des déformations de fluage propre

$\underline{\underline{\varepsilon}}_i^{fd}$ partie déviatorique irréversible du tenseur des déformations de fluage propre

$\underline{\varepsilon}^{fi}$ tenseur complet des déformations de fluage irréversible

$\underline{\varepsilon}^{fdess}$ tenseur des déformations de fluage de dessiccation

$\underline{\underline{\sigma}}$ tenseur des contraintes totales

$\sigma^{s}\underline{\underline{1}}$ partie sphérique du tenseur des contraintes

$\underline{\underline{\sigma}}^{d}$ partie déviatorique du tenseur des contraintes

h humidité relative interne

k_r^s rigidité apparente associée au Kelvin Voigt sphérique

k_r^d rigidité apparente associée au Kelvin Voigt déviatorique

η_i^s viscosité apparente associée aux déformations irréversibles sphériques

η_r^s viscosité apparente associée au Kelvin Voigt sphérique

η_i^d viscosité apparente associée aux déformations irréversibles déviatoriques

η_r^d viscosité associée au Kelvin Voigt déviatorique

η^{fd} viscosité associée au fluage de dessiccation

$x, \underline{x}, \underline{\underline{x}}$ désignent respectivement un scalaire, un vecteur et un tenseur d'ordre 2.

$x_n, x_{n+1}, \Delta x_n$ désignent respectivement la valeur de la quantité *x* au temps t_n, au temps t_{n+1} et la variation de x pendant l'intervalle $[t_n; t_{n+1}]$.

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

7 Bibliographie

1) BENBOUDJEMA F. : Modélisation des déformations différées du béton sous sollicitations biaxiales. Application aux bâtiments réacteurs de centrales nucléaires, Mémoire de D.E.A. Matériaux Avancés – Ingénierie des Structures et des Enveloppes, 38 p. (+ annexes) (1999).

2) BENBOUDJEMA F., MEFTAH F., HEINFLING G., LE PAPE Y. : Etude numérique et analytique de la partie sphérique du modèle de fluage propre UMLV pour le béton, note technique HT-25/02/040/A, 56 p (2002).

3) BENBOUDJEMA F., MEFTAH F., TORRENTI J.M., LE PAPE Y. : Algorithme du modèle de fluage propre et de dessiccation UMLV couplé à un modèle élastique, note technique HT-25/02/050/A, 68 p (2002).

4) GRANGER L. : Comportement différée du béton dans les enceintes de centrale nucléaire : analyse et modélisation, Thèse de Doctorat de l'ENPC (1995).

5) Relation de comportement de Granger pour le fluage propre du béton, Documentation *Code_Aster* [R7.01.01], 16 p (2001).

6) SELLIER A., BUFFO-LACARRIERE L.: Vers une modélisation simple et unifiée du fluage propre, du retrait et du fluage en dessiccation du béton, EJECE, volume 13(10), pages 1161-1182, 2009.

7) ACKER P. : Sur les origines du retrait et du fluage du béton. Revue Française de Génie Civil, vol.7, n°6, p.761-776.

8) MANDEL, J : Cours de Mécanique des Milieux Continus. Tome II, Mécanique des solides. Gauthier-Villard Éditeur, 837 pages, 1966.

9) BENBOUDJEMA F. : Contribution à l'analyse des déformations différées dans les matériaux cimentaires et de ses effets dans les ouvrages de Génie Civi *, Mémoire de l'obtention de l'habitlation à diriger des recherche, ENS Cachan.* 2012

10) BAZANT, Z.P., CHERN, J.C. : Concrete creep at variable humidity: constitutive law and mechanism. *Materials and Structures* (RILEM, Paris), 18, Jan., p. 1-20 (1985).

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

8 Fonctionnalités et vérification

Ce document concerne la loi de comportement BETON_BURGER (mot clé COMPORTEMENT de STAT_NON_LINE) et son matériau associé BETON_BURGER (commande DEFI_MATERIAU).

Cette loi de comportement est vérifiée par les cas tests suivants :

SSNV163	Calcul de fluage propre	[V6.04.163]
SSNV174	Prise en compte du retrait dans les modèles BETON_UMLV et BETON_BURGER	[V6.04.174]
SSNV180	Prise en compte de la dilatation thermique et du fluage de dessiccation dans les modèles BETON_UMLV et BETON_BURGER	[V6.04.180]
SSNV181	Vérification de la bonne prise en compte du cisaillement dans les modèles BETON_UMLV et BETON_BURGER	[V6.04.181]
SSNV235 c,d	Influence de la température dans l'évolution du fluage	[V6.04.235]
COMP003	Test de comportements spécifiques aux bétons. Simulation en un point matériel	V6.07.103
COMP011	Validation thermo-mécanique des lois pour le béton	V6.07.111

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