COMP011 – Validation thermo-mécanique des lois pour le béton

Résumé

Ce test permet de valider la prise en compte de la variation de température dans les lois de comportement pour le béton. Ces tests permettent de vérifier les deux points suivants:
- La dilatation thermique est bien calculée (avec prise en compte de la variation de la dilatation thermique avec la température).
- La variation des coefficients matériau avec la température est correcte, en particulier dans la résolution incrémentale du comportement.

Les lois de comportements validées sont les suivantes:
- Modélisation A :cette modélisation permet de valider le modèle BETON_REGLE_PR .
- Modélisation B : cette modélisation permet de valider le modèle MAZARS .
- Modélisation C : cette modélisation permet de valider le modèle BETON_UMLV .
- Modélisation D : cette modélisation permet de valider le modèle BETON_DOUBLE_DP .
- Modélisation E : cette modélisation permet de valider le modèle ENDO_ISOT_BETON.
- Modélisation F : cette modélisation permet de valider le modèle BETON_BURGER .
- Modélisation G : cette modélisation permet de valider le modèle MAZARS_UNIL .

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

1 Méthodologie

Il s'agit d'une double simulation, la première en thermo-mécanique, la seconde en mécanique pure. La première sera validée en comparaison de la seconde, en supposant bien sûr que le comportement testé fournit une solution correcte en mécanique pure.

1.1 Simulation 1

La première simulation (solution thermo-mécanique que l'on cherche à valider) consiste à appliquer une variation de température sur un point matériel, en bloquant les déformations selon la direction x $\varepsilon_{xx}=0$. La température imposée est croissante linéairement en fonction du temps. La température varie de $T_0=20\,°C$ à $T_{max}=500\,°C$. Le transitoire est constitué de NCAL pas.La température de référence est de $T_{réf}=20\,°C$.

1.2 Simulation 2

La seconde simulation (qui doit être équivalente à la première) consiste à appliquer au même point matériel une déformation imposée suivant x : $\varepsilon_{xx}=-\varepsilon^{th}=-\alpha(T)(T-T_{ref})$, en mécanique pure. A chaque calcul i, le chargement imposé est constitué de la déformation thermique $\varepsilon_{xx}=-\varepsilon_{th}=-\alpha(T)(T_i-T_{réf})$. Le chargement initial est constitué des déformations, contraintes et variables internes du calcul mécanique précédent.

En effet, pour tout comportement (en supposant la décomposition additive des déformations) :
$\sigma_{xx}=E(T)(\varepsilon_{xx}-\varepsilon^{th}-\varepsilon^{p}_{xx})$

dans le premier cas, $\sigma_{xx}=E(T)(0-\varepsilon^{th}-\varepsilon^{p}_{xx})$, et dans le second : $\sigma_{xx}=E(T)(\varepsilon-\varepsilon^{p}_{xx})$.

Il suffit donc, à chaque instant d'appliquer, pour le calcul mécanique, $\varepsilon_{xx}=-\varepsilon^{th}=-\alpha(T)(T-T_{ref})$.

De plus, pour obtenir les mêmes résultats dans les deux cas, il est nécessaire, à chaque pas de temps de la seconde simulation, d'effectuer le calcul mécanique pur avec des coefficients dont les valeurs sont interpolées en fonction de la température à l'instant courant. Cette interpolation est effectuée dans le fichier de commandes du test, dans une boucle en temps extérieure à STAT_NON_LINE .

2 Interprétation des résultats

Il s'agit de vérifier que le résultat obtenu à chaque instant du transitoire thermo-mécanique de la première simulation est identique au résultat obtenu avec la deuxième simulation.

La validation se fait par la comparaison entre les champs calculés à chaque pas du transitoire d'une part et le résultat d'un calcul mécanique d'autre part, la valeur de référence étant la composante du champ extraite à un instant donné i de la première simulation thermo-mécanique effectuée sur NCAL instants. La valeur calculée est celle obtenue à la fin du calcul mécanique $i+1$ de la boucle sur les NCAL.

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

3 Modélisation A

3.1 Loi de comportement et paramètres matériaux

La loi de comportement testée est 'BETON_REGLE_PR', elle est documentée dans la documentation [U4.43.01]. Cette loi de comportement de béton est dite « parabole rectangle ».

Les paramètres élastiques sont les suivants :

$E(T)$, $\nu(T)$ et $\alpha(T)$

Les paramètres élasto-plastiques sont les suivants :

E_T , σ_y^t , σ_y^c , ε_C et n

Valeurs des paramètres utilisés

Paramètres	$T=20\,°C$	$T=500\,°C$
$E(T)$	$30\,000.\,MPa$	$10\,000.\,MPa$
$\nu(T)$	$0.$	$0.$
$\alpha(T)$	$0.5\times10^{-5}K^{-1}$	$0.8\times10^{-5}K^{-1}$
E_T	$-10\,000.\,MPa$	$-10\,000.\,MPa$
σ_y^t	$3.\,MPa$	$3.\,MPa$
σ_c^t	$30.\,MPa$	$30.\,MPa$
ε_C	$1.\times10^{-3}$	$1.\times10^{-3}$
n	$2.$	$2.$

3.2 Grandeurs testées et résultats

Résultat au numéro d'ordre i	Nom du paramètre testé	Type de référence	Valeur de référence	Tolérance
RESU_19	VMIS (MPa)	AUTRE_ASTER	3.0E7	10 E-6
RESU_19	TRACE (MPa)	AUTRE_ASTER	-3.0E7	10 E-6

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

4 Modélisation B

4.1 Loi de comportement et paramètres matériaux

La loi de comportement testée est ' MAZARS ', elle est documentée dans la doc [R7.01.08] . Cette loi élastique fragile, permet de rendre compte de l'adoucissement du béton et distingue l'endommagement en traction et en compression.

Les paramètres élastiques sont les suivants : $E(T)$, $\nu(T)$ et $\alpha(T)$

Les paramètres élasto-plastiques sont : $\varepsilon_0(T)$, $A_C(T)$, $A_T(T)$, $B_C(T)$, $B_T(T)$ et k

Valeurs des paramètres utilisés :

Paramètres	$T=0°C$	$T=500°C$
$E(T)$	$32000.MPa$	$16000.MPa$
$\nu(T)$	0.2	0.18
$\alpha(T)$	$1.2E-5\,K^{-1}$	$2.0E5\,K^{-1}$
$\varepsilon_0(T)$	0.0001	0.00005
$A_C(T)$	1.4	1.0
$A_T(T)$	1.0	0.8
$B_C(T)$	2000.	1000.
$B_T(T)$	10000.	20000.
k	0.7	0.7

4.2 Résultats

Résultat au numéro d'ordre i	Nom du paramètre testé	Type de référence	Valeur de référence	Tolérance
RESU_19	VMIS (MPa)	AUTRE_ASTER	1.402148E7	0.10%
RESU_19	TRACE (MPa)	AUTRE_ASTER	-1.402148E7	0.10%
RESU_19	V1	AUTRE_ASTER	0.9087143	0.10%
RESU_19	V2	AUTRE_ASTER	1	0.10%
RESU_19	V4	AUTRE_ASTER	2.443761E-3	0.10%

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

5 Modélisation C

5.1 Loi de comportement et paramètres matériaux

La loi de comportement testée est 'BETON_UMLV', elle est documentée dans la doc R7.01.16 . Cette loi est utilisée pour la modélisation du fluage propre du béton avec prise en compte de la distinction entre fluage volumique et fluage déviatorique afin de rendre compte des phénomènes dans les cas de fluages multiaxiaux. Le test s'effectue avec sur modélisation D_PLAN (maille QUAD4) avec la commande STAT_NON_LINE. Les paramètres élastiques sont les suivants :

$E(T)$, $\nu(T)$ et $\alpha(T)$

Les paramètres de la loi visco-plastique sont les suivants :

K_R^S, K_I^S, K_R^D, η_R^S, η_I^S, η_R^D et η_I^D

Valeurs des paramètres utilisés :

Paramètres	$T=0°C$	$T=500°C$
$E(T)$	$11000\,MPa$	$31000\,MPa$
$\nu(T)$	$0.$	$0.$
$\alpha(T)$	$2.\times10^{5}\,K^{-1}$	$2.\times10^{-4}\,K^{-1}$
K_R^S	$2.\times10^{5}\,MPa$	$2.\times10^{5}\,MPa$
K_I^S	$5.\times10^{4}\,MPa$	$5.\times10^{4}\,MPa$
K_R^D	$5.\times10^{4}\,MPa$	$5.\times10^{4}\,MPa$
η_R^S	$4.\times10^{10}\,MPa.s$	$4.\times10^{10}\,MPa.s$
η_I^S	$10^{11}\,MPa.s$	$10^{11}\,MPa.s$
η_R^D	$10^{10}\,MPa.s$	$10^{10}\,MPa.s$
η_I^D	$10^{11}\,MPa.s$	$10^{11}\,MPa.s$

5.2 Résultats

Résultat au numéro d'ordre i	Nom du paramètre testé	Type de référence	Valeur de référence	Tolérance
RESU_19	PRIN_1 (Pa)	AUTRE_ASTER	-3100.	0.10%

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

6 Modélisation D

6.1 Loi de comportement et paramètres matériaux

La loi de comportement testée est 'BETON_DOUBLE_DP', elle est documentée dans la doc R7.01.03. Cette loi est utilisée pour la description du comportement non linéaire du béton. Elle comporte un critère de Drücker Prager en traction et un critère de Drücker Prager en compression, découplés. Les deux critères peuvent avoir un écrouissage adoucissant.
Les paramètres élastiques sont les suivants :

$E(T)$, $\nu(T)$ et $\alpha(T)$

Les paramètres élasto-plastiques sont les suivants :

$f'c(T)$, $f't(T)$, $\beta(T)$, $G_C(T)$, $G_T(T)$ et ϕ

Valeurs des paramètres utilisés

Paramètres	$T=0°C$	$T=20°C$	$T=400°C$	$T=800°C$
$E(T)$	37000.MPa	$32000.MPa$	$15000.MPa$	$5000.MPa$
$\nu(T)$	0.			0.
$\alpha(T)$	$1.\times10^{-5}K^{-1}$			$2.\times10^{-5}K^{-1}$
$f'c(T)$	40.		40.	15.
$f't(T)$	4.		4.	1.5
$\beta(T)$	1.16			1.16
$G_C(T)$	10.			10.
$G_T(T)$	0.1			0.1
ϕ	33.3333	33.3333	33.3333	33.3333

6.2 Résultats

Résultat au numéro d'ordre i	Nom du paramètre testé	Type de référence	Valeur de référence	Tolérance
RESU_19	VMIS (MPa)	AUTRE_ASTER	33.602	0.10%
RESU_19	TRACE (MPa)	AUTRE_ASTER	-33.602	0.10%
RESU_19	V1	AUTRE_ASTER	6.9118E-03	0.10%
RESU_19	V3	AUTRE_ASTER	500.	0.10%
RESU_19	V4	AUTRE_ASTER	1	0.10%

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

7 Modélisation E

7.1 Loi de comportement et paramètres matériaux

La loi de comportement testée est ' ENDO_ISOT_BETON ', elle est documentée dans la doc R7.01.04 . Cette loi est utilisée pour la description de l'endommagement du béton, en distinguant la traction de la compression, et en prenant en compte la refermeture des fissures.
Valeurs des paramètres utilisés

Paramètres	$T=0°C$	$T=500°C$
$E(T)$	30000.MPa	20000. MPa
$\nu(T)$	0.02	0.02
$\alpha(T)$	$1.\times10^{-5}K^{-1}$	$2.\times10^{-5}K^{-1}$
SYT	$3\,MPa$	$3\,MPa$
SYC	$200\,MPa$	$200\,MPa$
D_SIGM_EPSI	$-6000\,MPa$	$-6000\,MPa$

7.2 Résultats

Résultat au numéro d'ordre i	Nom du paramètre testé	Type de référence	Valeur de référence	Tolérance
RESU_19	VMIS (MPa)	AUTRE_ASTER	1.92E+08	0.10%
RESU_19	TRACE (MPa)	AUTRE_ASTER	-1.92E+08	0.10%

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

8 Modélisation F

8.1 Loi de comportement et paramètres matériaux

La loi de comportement testée est 'BETON_BURGER', elle est documentée dans la doc [R7.01.35]. Cette loi, implémentée sous Mfront, est utilisée pour la modélisation du fluage propre du béton avec prise en compte de la distinction entre fluage volumique et fluage déviatorique afin de rendre compte des phénomènes dans les cas de fluages multi-axiaux. Le test s'effectue avec sur modélisation D_PLAN (maille QUAD4) avec la commande STAT_NON_LINE. Les paramètres élastiques sont les suivants :

$E(T)$, $\nu(T)$ et $\alpha(T)$

Les paramètres de la loi visco-plastique sont les suivants :

K_R^S, K_R^D, η_R^S, η_I^S, η_R^D, η_I^D et κ.

Valeurs des paramètres utilisés :

Paramètres	$T=0\,°C$	$T=500\,°C$
$E(T)$	$11\,000\,MPa$	$31\,000\,MPa$
$\nu(T)$	$0.$	$0.$
$\alpha(T)$	$1{,}0\times10^{-4}\,K^{-1}$	$2{,}0\times10^{-4}\,K^{-1}$
K_R^S	$4360\,MPa$	$4360\,MPa$
κ	$3{,}3\times10^{-3}$	$3{,}3\times10^{-3}$
K_R^D	$3270\,MPa$	$3270\,MPa$
η_R^S	$3{,}41\times10^{9}\,MPa\,.\,s$	$3{,}41\times10^{9}\,MPa\,.\,s$
η_I^S	$5{,}76\times10^{12}\,MPa\,.\,s$	$5{,}76\times10^{12}\,MPa\,.\,s$
η_R^D	$2{,}55\times10^{9}\,MPa\,.\,s$	$2{,}55\times10^{9}\,MPa\,.\,s$
η_I^D	$4{,}32\times10^{12}\,MPa\,.\,s$	$4{,}32\times10^{12}\,MPa\,.\,s$

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

8.2 Résultats

Résultat au numéro d'ordre i	Nom du paramètre testé	Type de référence	Valeur de référence	Tolérance
RESU_0	PRIN_1 (Pa)	AUTRE_ASTER	-31.50	0.10%
RESU_1	PRIN_1 (Pa)	AUTRE_ASTER	-71.50	0.10%
RESU_2	PRIN_1 (Pa)	AUTRE_ASTER	-120.75	0.10%
RESU_3	PRIN_1 (Pa)	AUTRE_ASTER	-180.00	0.10%
RESU_4	PRIN_1 (Pa)	AUTRE_ASTER	-250.00	0.10%
RESU_5	PRIN_1 (Pa)	AUTRE_ASTER	-331.50	0.10%
RESU_6	PRIN_1 (Pa)	AUTRE_ASTER	-425.25	0.10%
RESU_7	PRIN_1 (Pa)	AUTRE_ASTER	-532.00	0.10%
RESU_8	PRIN_1 (Pa)	AUTRE_ASTER	-652.50	0.10%
RESU_9	PRIN_1 (Pa)	AUTRE_ASTER	-787.50	0.10%
RESU_10	PRIN_1 (Pa)	AUTRE_ASTER	-937.75	0.10%
RESU_11	PRIN_1 (Pa)	AUTRE_ASTER	-1104.00	0.10%
RESU_12	PRIN_1 (Pa)	AUTRE_ASTER	-1287.00	0.10%
RESU_13	PRIN_1 (Pa)	AUTRE_ASTER	-1487.50	0.10%
RESU_14	PRIN_1 (Pa)	AUTRE_ASTER	-1706.25	0.10%
RESU_15	PRIN_1 (Pa)	AUTRE_ASTER	-1944.00	0.10%
RESU_16	PRIN_1 (Pa)	AUTRE_ASTER	-2201.50	0.10%
RESU_17	PRIN_1 (Pa)	AUTRE_ASTER	-2479.50	0.10%
RESU_18	PRIN_1 (Pa)	AUTRE_ASTER	-2778.75	0.10%
RESU_19	PRIN_1 (Pa)	AUTRE_ASTER	-3100.00	0.10%

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

9 Modélisation G

9.1 Loi de comportement et paramètres matériaux

La loi de comportement testée est MAZARS_UNIL , elle est documentée dans la doc [R7.01.08] . Cette loi élastique fragile, permet de rendre compte de l'adoucissement du béton et distingue l'endommagement en traction et en compression.

Valeurs des paramètres matériaux utilisés :

Paramètres	$T=0\,°C$	$T=500\,°C$
$E(T)$	3.2E+10	1.6E+10
$\nu(T)$	0.20	0.18
$\alpha(T)$	1.2E-05	2.0E-05
$\varepsilon_0(T)$	1.0E-04	5.0E-05
$A_C(T)$	1.40	1.00
$A_T(T)$	1.00	0.80
$B_C(T)$	565.0	283.0
$B_T(T)$	10000.0	20000.0
k	0.70	0.70
SIGL	18.0E+06	13.0E+06
EPSL	3.50E-03	3.0E-03

9.2 Résultats

Résultat au numéro d'ordre	Nom du paramètre testé	Type de référence	Tolérance
i	VMIS (MPa)	AUTRE_ASTER	0.10%
i	TRACE (MPa)	AUTRE_ASTER	0.10%
i	V1	AUTRE_ASTER	0.10%
i	V2	AUTRE_ASTER	0.10%

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

10 Synthèse générale des résultats

Pour chacune des lois de comportement étudiées, les résultats du transitoire thermo-mécanique de la première simulation sont comparés avec ceux obtenus avec la deuxième simulation en mécanique pure. Les résultats sont concordants, ce qui montrent la bonne prise en compte de la dilatation thermique par ces lois de comportement, ainsi que la bonne dépendance des paramètres matériaux à la température.

Les lois de comportements validées sont les suivantes:

- Modélisation A : cette modélisation permet de valider le modèle BETON_REGLE .
- Modélisation B : cette modélisation permet de valider le modèle MAZARS .
- Modélisation C : cette modélisation permet de valider le modèle BETON_UMLV.
- Modélisation D : cette modélisation permet de valider le modèle BETON_DOUBLE_DP.
- Modélisation E : cette modélisation permet de valider le modèle ENDO_ISOT_BETON.
- Modélisation F : cette modélisation permet de valider le modèle BETON_BURGER .
- Modélisation G : cette modélisation permet de valider le modèle MAZARS_UNIL.

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