HSNV129 - Essai de compression-dilatation pour étude du couplage thermique-fissuration

Résumé :

On applique à un élément de volume obéissant à la loi de Mazars un chargement thermo-mécanique de façon à vérifier la bonne prise en compte de la dépendance des paramètres matériaux avec la température ainsi que la prise en compte de la dilatation thermique. Le chargement est homogène et se décompose ainsi : compression à déplacement imposé et température constante, puis application d'un cycle de chauffage-refroidissement.

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

1 Problème de référence

1.1 Géométrie et conditions aux limites

Élément de volume matérialisé par un cube de côté unitaire (m) :

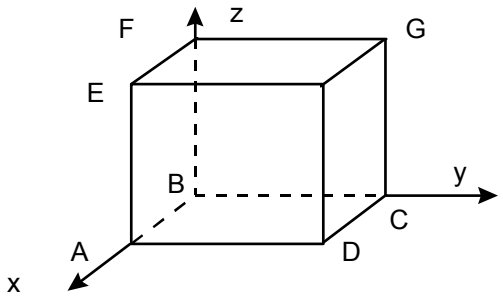


Figure 1.1-a : Géométrie

Le chargement est tel qu'on obtient un état de contrainte et de déformation uniforme dans le volume. Les blocages sont les suivants :

- face $ABCD$: $DZ=0$
- face $BCGF$: $DX=0$
- face $ABFE$: $DY=0$
- face $EFGH$: déplacement $Uz(t)$

La température $T(t)$ est supposée uniforme sur le cube ; la température de référence vaut $0\,°C$.
Uz et T varient en fonction du temps de la façon suivante :

instant t	0	100	200	300
$Uz(t)$	$0\,m.$	$-10^{-3}m.$	$-10^{-3}m.$	$-10^{-3}m.$
$T(t)$	$0\,°C$	$0\,°C$	$200\,°C$	$0\,°C$

On réalise donc un chargement purement mécanique, puis on chauffe en bloquant la direction Uz, avant de refroidir. Ceci permet de vérifier la séparation des déformations thermiques et mécaniques ainsi que la non-recouvrance des propriétés mécaniques après chauffage.

1.2 Propriétés du matériau

Pour le modèle de Mazars, les paramètres suivants ont été utilisés (valeur à $0\,°C$) :

Comportement élastique :

$$E=32\,000\ MPa\ ,\ \nu=0.2,\ \alpha=1.2\ 10^{-5}\,°C^{-1}$$

Caractéristiques thermiques :

$$\lambda=2.2\,W\,m^{-1}\,K^{-1}\ ,\ C_p=2.2\,10^{6}\ J\ m^{-3}\ K^{-1}$$

Comportement endommageant :

$$\varepsilon_{d0}=1.0\ 10^{-4};\ A_c=1.15;\ A_t=1.0;\ B_c=2000.0;\ B_t=10000.0;\ k=0.7$$

On considère par ailleurs que E et B_c varient avec la température. Leur évolution est donnée sur les figures [Figure 1.2-a] et [Figure 1.2-b].

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

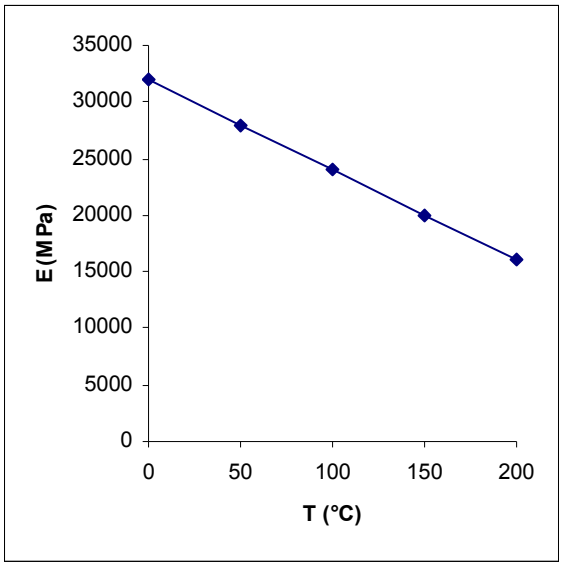


Figure 1.2-a : Évolution du module d'Young avec la température

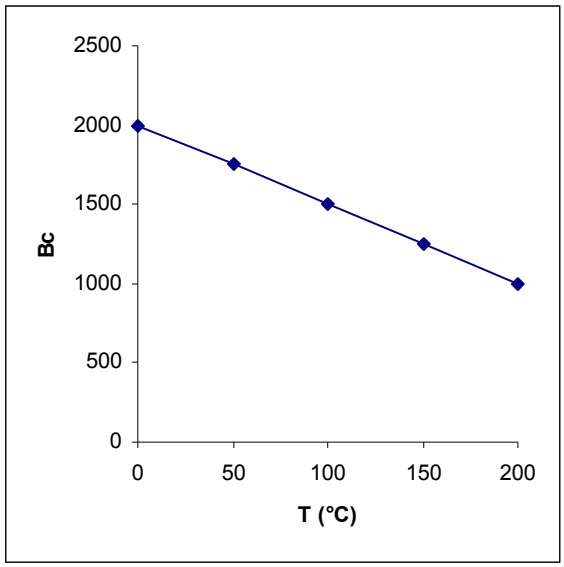


Figure 1.2-b : Évolution de B_C avec la température

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

2 Solution de référence

On peut déterminer analytiquement la solution du problème posé.
On note :

- ε_0 la déformation appliquée dans la direction z,
- ε_1, ε_2 et ε_3 les déformations principales

2.1 Première étape du chargement : compression simple

- Le tenseur des déformations vaut : $\begin{pmatrix} -\nu\varepsilon_0 & 0 & 0 \\ 0 & -\nu\varepsilon_0 & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_0 \end{pmatrix}$ avec $\varepsilon_0<0$
- La déformation équivalente vaut par conséquent :

$$\tilde{\varepsilon} = \sqrt{\left\langle \varepsilon_1^e \right\rangle_+^2 + \left\langle \varepsilon_2^e \right\rangle_+^2 + \left\langle \varepsilon_3^e \right\rangle_+^2} = -\nu\varepsilon_0\sqrt{2}$$

- Dès lors que $\tilde{\varepsilon} > \varepsilon_{d0}$, il y a évolution de l'endommagement qui vaut :

$$D = 1 - \frac{\varepsilon_{d0}(1-A_c)}{\tilde{\varepsilon}} - \frac{A_c}{\exp\left[B_c(\tilde{\varepsilon}-\varepsilon_{d0})\right]}$$

- Enfin la contrainte σ_{zz} vaut :

$$\sigma_{zz} = E(1-D)\varepsilon_0$$

2.2 Deuxième étape du chargement : dilatation thermique en déformations planes

- Le tenseur des déformations totales vaut :

$$\begin{pmatrix} -\nu\varepsilon_0 + \alpha(T-T_{ref})(1+\nu) & 0 & 0 \\ 0 & -\nu\varepsilon_0 + \alpha(T-T_{ref})(1+\nu) & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_0 \end{pmatrix}$$ avec $\varepsilon_0<0$ fixe

- La déformation élastique valant $\boldsymbol{\varepsilon}^e = \boldsymbol{\varepsilon} - \alpha(T-T_{ref})\mathbf{I}_d$, la déformation équivalente vaut :

$$\tilde{\varepsilon} = \sqrt{2}\nu\left(\alpha(T-T_{ref}) - \varepsilon_0\right)$$

- L'endommagement vaut :

$$D = MAX\left[D^-, 1 - \frac{\varepsilon_{d0}(1-A_c)}{\tilde{\varepsilon}} - \frac{A_c}{\exp\left[B_c(\tilde{\varepsilon}-\varepsilon_{d0})\right]}\right]$$

- Enfin la contrainte σ_{zz} vaut :

$$\sigma_{zz} = E(1-D)\left[\varepsilon_0 - \alpha(T-T_{ref})\right]$$

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

Remarque :

- *A un état donné, les paramètres matériaux utilisés sont ceux définis à la température maximale vue par le matériau et pas à la température courante.*
- *L'évaluation de l'endommagement D fait intervenir la notion de maximum atteint au cours de l'histoire du chargement ; la solution n'est donc pas complètement analytique mais implique une discrétisation. Dans le cas où il n'y a pas d'influence de la thermique, il suffit de prendre $\widetilde{\varepsilon}$ équivalent à la déformation équivalente maximale atteinte. Lorsqu'on prend en compte l'aspect thermique, le chauffage peut contribuer à «diminuer» ou «retarder» l'endommagement à déformation donnée ; c'est le cas avec l'évolution de B_c retenue. Dans ce cas, il faut en fait discrétiser assez finement le chargement pour avoir la bonne valeur d'endommagement D (qui présente en effet un maximum dans notre cas).*

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

3 Modélisation A

3.1 Caractéristiques de la modélisation

Modélisation 3D
Élément MECA_HEXA8

3.2 Caractéristiques du maillage

Nombre de nœuds : 8
Nombre de mailles et types : 1 HEXA8

3.3 Fonctionnalités testées

La loi de comportement MAZARS_FO combinée avec ELAS_FO.

3.4 Grandeurs testées et résultats

On compare l'endommagement D et la contrainte σ_{zz} à différents instants

Identification		Référence	*Aster*	% différence
$t=50$	D	0	0	
	σ_{zz} (MPa)	–16.0	–16.0	2.33 10 $^{-14}$
$t=100$	D	0.1702	0.1702	0.007
	σ_{zz} (MPa)	–26.5532	–26.5532	6.46 10 $^{-5}$
t = 150	D	0.4247	0.4247	–0.005
	σ_{zz} (MPa)	–30.3768	–30.3769	2.91 10 $^{-4}$
t = 200	D	0.4626	0.4625	–0.014
	σ_{zz} (MPa)	–29.2327	–29.2382	0.019
t = 250	D	0.4626	0.4625	–0.014
	σ_{zz} (MPa)	–18.9153	–18.9188	0.019
t = 300	D	0.4626	0.4625	–0.014
	σ_{zz} (MPa)	–8.5979	–8.5994	0.018

3.5 Remarque

En réalité, l'endommagement maximum, c'est-à-dire 0.4626 est atteint au temps $t \approx 180\,s$. Ensuite, il n'évolue plus à cause de la diminution de B_c quand la température augmente.

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

4 Modélisation B

4.1 Caractéristiques de la modélisation

Modélisation 3D
Élément MECA_HEXA8

4.2 Caractéristiques du maillage

Nombre de nœuds : 8
Nombre de mailles et types : 1 HEXA8

4.3 Fonctionnalités testées

Le matériau MAZARS_FO combiné avec ELAS_FO. Le comportement MAZARS_UNIL.

4.4 Grandeurs testées et résultats

On teste les variables $V1$ et $V2$ respectivement les seuils ELS et ELU ainsi que la contrainte σ_{xx} à différents instants.

Instants	Grandeur	Résultats	Précision %
50.0	'V1'	-0.719298246	1.0E-05
100.0	'V1'	-1.28135185	1.0E-05
150.0	'V1'	-1.6480642	1.0E-05
200.0	'V1'	-1.70896633	1.0E-05
250.0	'V1'	-1.08820627	1.0E-05
300.0	'V1'	-0.428461374	1.0E-05

Instants	Grandeur	Résultats	Précision %
50.0	'V2'	-0.148461498	1.0E-05
100.0	'V2'	-0.296922996	1.0E-05
150.0	'V2'	-0.672443255	1.0E-05
200.0	'V2'	-1.07072232	1.0E-05
250.0	'V2'	-0.672443255	1.0E-05
300.0	'V2'	-0.296922996	1.0E-05

Instants	Grandeur	Résultats [Pa]	Précision %
50.0	'SIZZ'	-16400000.0	1.0E-05
100.0	'SIZZ'	-29214822.1	1.0E-05
150.0	'SIZZ'	-36125567.3	1.0E-05
200.0	'SIZZ'	-35956651.5	1.0E-05
250.0	'SIZZ'	-23853481.4	1.0E-05
300.0	'SIZZ'	-9768919.3	1.0E-05

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

5 Synthèse des résultats

On obtient la solution analytique avec une précision inférieure à 0.02 % ce qui permet d'être assuré de la bonne implantation du modèle de Mazars y compris lorsqu'intervient la température. Rappelons les choix qui ont été faits pour le couplage fissuration-thermique et qui sont vérifiés ici :

- dilatation thermique linéaire,
- évolution de l'endommagement uniquement sous l'effet de la déformation élastique et pas thermique,
- dépendance des paramètres matériaux avec la température maximale, c'est-à-dire la non-réversibilité des modifications des propriétés mécaniques lorsque le béton est chauffé puis refroidi.

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