SSNV402 – Vérification de la loi de comportement BETON_RAG : couplage des phénomènes

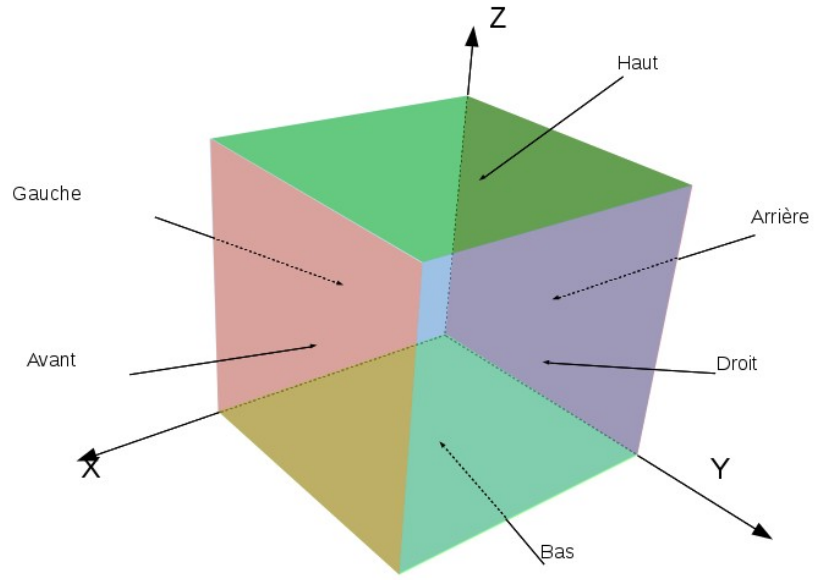
Résumé :
Ces tests vérifient la loi de comportement BETON_RAG sur un cube sollicité par un chargement de température et de séchage. La réponse du modèle est comparée à des solutions obtenues en résolvant analytiquement les équations qui régissent le comportement [R7.01.26].
Plusieurs modélisations sont proposées :
- Modélisation a : le cube est libre en déformations.
- Modélisation b : le cube est bloqué en déplacements.

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

1 Problème de référence

1.1 Géométrie

La géométrie est un cube de $1\,m$ de coté.



1.2 Maillage

Le maillage est réalisé avec 1 HEXA8.

1.3 Matériaux

Le matériau est de type BETON_RAG. Les caractéristiques nécessaires sont celles liées aux phénomènes d'avancement chimique ainsi que ceux concernant la RAG.

Il ne faut pas utiliser les caractéristiques matériaux de "BETON_RAG" de ce cas test pour faire des études. Ils ne sont pas physiques, ils servent à de la vérification mathématique.

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

```
MBETRAG = DEFI_MATERIAU(
    ELAS=_F(E = 32000.0E+06, # unité [Pa]
            NU = 0.25, ALPHA = 0.0,),
    BETON_RAG = _F(
        COMP_BETON  = 'ENDO_FLUA_RAG',
        # caractéristiques pour la mécanique
        ENDO_MC     =        1.95,
        ENDO_MT     =        2.00,
        ENDO_SIGUC  =      -35.00E+06,  # [Pa]
        ENDO_SIGUT  =       -3.18E+06,  # [Pa]
        ENDO_DRUPRA =        0.15,
        # Fluage
        FLUA_SPH_KR =    89000.0E+06,   # [Pa]
        FLUA_SPH_KI =    22000.0E+06,   # [Pa]
        FLUA_SPH_NR =  -156000.0E+06,   # [Pa.J]
        FLUA_SPH_NI =  -410000.0E+06,   # [Pa.J]
        FLUA_DEV_KR =    42000.0E+06,   # [Pa]
        FLUA_DEV_KI =    22000.0E+06,   # [Pa]
        FLUA_DEV_NR =  -117000.0E+06,   # [Pa.J]
        FLUA_DEV_NI =  -840000.0E+06,   # [Pa.J]
        # Avancement de la RAG
        GEL_ALPHA0  =        1.0E-04,
        GEL_TREF    =       25.0,       # [°C]
        GEL_EAR     =    45000.0,       # [1/°K]
        GEL_SR0     =        0.20,
        # Pression du Gel
        GEL_VG      =        3.0E-03,
        GEL_MG      =    26000.0E+06,   # [Pa]
        GEL_BG      =        0.080,
        GEL_A0      =        0.20,
        #
        RAG_EPSI0   =        0.0,
        # Pression capilaire
        PW_A        =        3.0E+06,   # [Pa]
        PW_B        =        2.0,
    ),
)
```

1.4 Conditions aux limites

1.4.1 Pour le cube libre en déformations latérales

Ces conditions aux limites concernent la modélisation a.
Les déplacements suivant sont imposés sur les faces :

- BAS : DZ = 0
- GAUCHE : DY = 0
- ARRIERE : DX = 0

1.5 Modélisation

Toutes les modélisations sont 3D.

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

2 Modélisation A

2.1 Caractéristiques de la modélisation

Cette modélisation est réalisée sur un cube libre de se déformer. Le chargement est une température et un séchage qui varient au cours du temps.

```
# Liste commune pour l'interpolation de la température et du séchage
L_evol = DEFI_LIST_REEL(VALE=(0.0, 2.0, 10.0, 40.0, 50.0, 80.0, 100.0, 110.0, 200.0,))

# Champ de Température
TFONC = DEFI_FONCTION(NOM_PARA='INST',
    PROL_DROITE='CONSTANT', PROL_GAUCHE='CONSTANT',
    VALE=(    0.0,  10.0,
              2.0,  10.0,
             10.0,  40.0,
             40.0,  50.0,
            100.0,  20.0,
            200.0,  50.0,), )

# Champ de Séchage
SFONC = DEFI_FONCTION(NOM_PARA='INST',
    PROL_DROITE='CONSTANT', PROL_GAUCHE='CONSTANT',
    VALE=(    0.0,  0.30,
              2.0,  0.30,
             50.0,  0.60,
             80.0,  0.30,
            100.0,  0.70,
            110.0,  0.70,), )
```

La figure 2.1-a représente l'évolution du chargement au cours du temps.

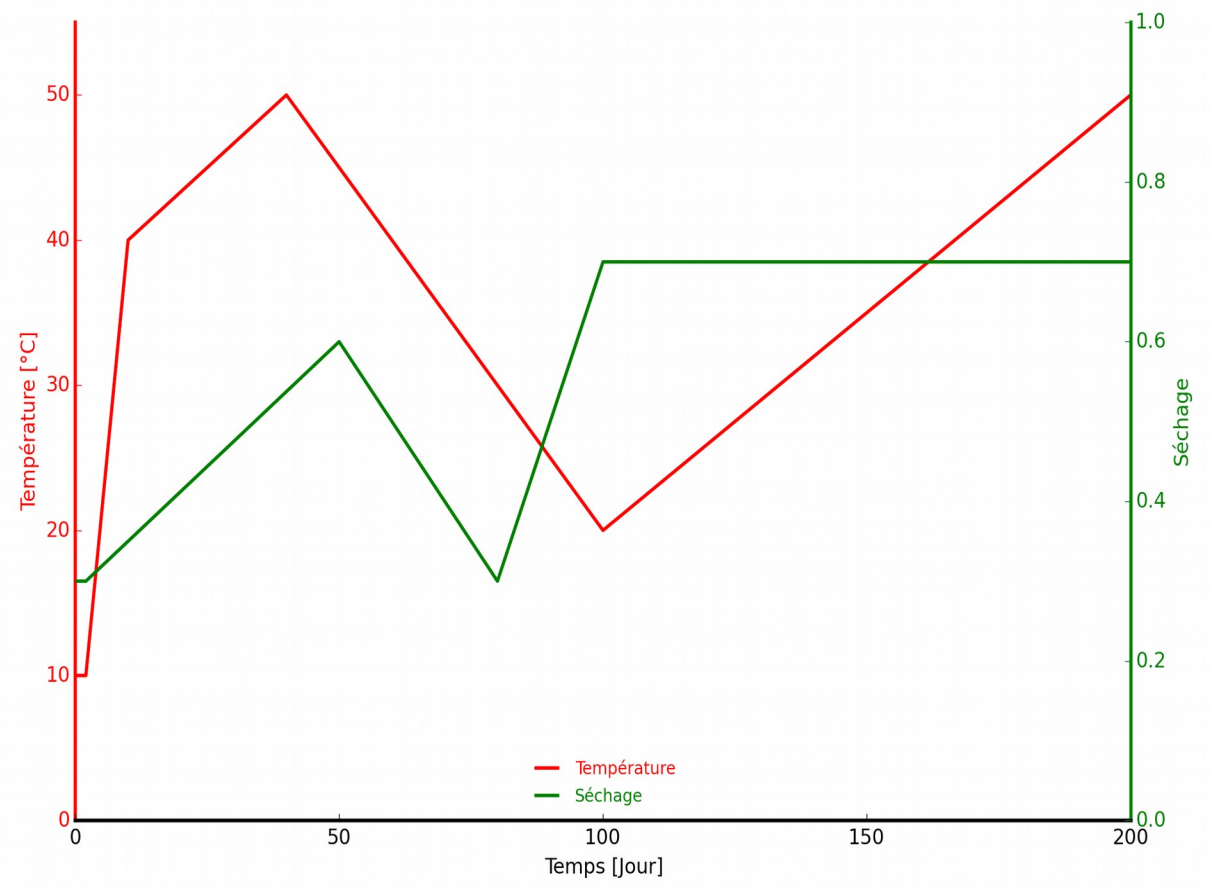


Figure 2.1-a : Évolution du chargement de température et de séchage.

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

2.2 Solution de référence

Les équations sont issues de [R7.01.26].

2.2.1 A vancement chimique

L'avancement chimique suit la loi suivante :

$$\frac{\partial A}{\partial t} = a_0 . \exp\left[\frac{E_a}{R}\left(\frac{1}{T_{ref}}-\frac{1}{T}\right)\right]\frac{\langle S_r - S_r^0\rangle_+}{\left(1-S_r^0\right)}\langle S_r - A\rangle_+ \qquad \text{[éq 2.2.1-1]}$$

Cette équation dépend de la température et du séchage. Elle peut donc être vérifiée sans connaître l'état de déformation et de contrainte de l'échantillon.

2.2.2 Pression d'eau

La pression capillaire est reliée au degré de saturation, par la relation :

$$Pc = -a . S_r . \left(Sr^{-b} - 1\right)^{1-1/b} \qquad \text{[éq 2.2.2-1]}$$

Cette équation ne dépend que du séchage. Elle peut donc être vérifiée sans connaître l'état de déformation et de contrainte de l'échantillon.

2.2.3 Pression du gel

La pression de gel effective suit la loi suivante

$$P_{gel} = b_g . M_g \langle A . V_g - \langle A_0 . V_g + b_g tr\left(\varepsilon^{total}\right)\rangle_+\rangle_+ \qquad \text{[éq 2.2.3-1]}$$

Cette équation dépend de l'avancement chimique et de la trace de la déformation. Elle ne peut donc être vérifiée qu'en connaissant l'état de déformation l'échantillon.

2.2.4 État mécanique de l'échantillon

Pour résoudre les équations précédentes il faut déterminer les déformations. Les équation suivantes régissent le problème :

$$\varepsilon^e = \frac{1+\nu^0}{E^0}.\sigma^e - \frac{\nu^0}{E^0} tr\left(\sigma^e\right). Id$$

avec :

$$\varepsilon^{total} = \varepsilon^e + \varepsilon^{fluage} + \varepsilon^{vdt} + \varepsilon^{ther}$$
$$\sigma^{total} = \sigma^e - P_{gel}. Id - P_c . Id$$

On est dans le cas où $\sigma^{total} = 0$ du fait des conditions aux limites. Les paramètres matériaux sont choisis de façon à ce que $\varepsilon^{fluage} = 0$, $\varepsilon^{vdt} = 0$, $\varepsilon^{ther} = 0$.

On a donc $tr\left(\varepsilon^{total}\right) = \frac{3.\left(1-2.\nu^0\right)}{E^0}.\left(P_{gel} + P_c\right)$ [éq 2.2.4-1]

2.3 Grandeurs testées et résultats

Pour l'avancement chimique, la variable interne correspondante est BR_AVCHI. La figure 2.3-a représente son évolution au cours du temps.

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

Instant	Valeur de référence	Précision
10.00	4.981207356948E-03	1.0E-03
40.00	5.361979299970E-01	1.0E-03
50.00	5.924644217241E-01	1.0E-03
80.00	5.938195769343E-01	1.0E-03
100.00	5.938216310035E-01	1.0E-03
110.00	5.938338086705E-01	1.0E-03
200.00	7.000000000002E-01	1.0E-03

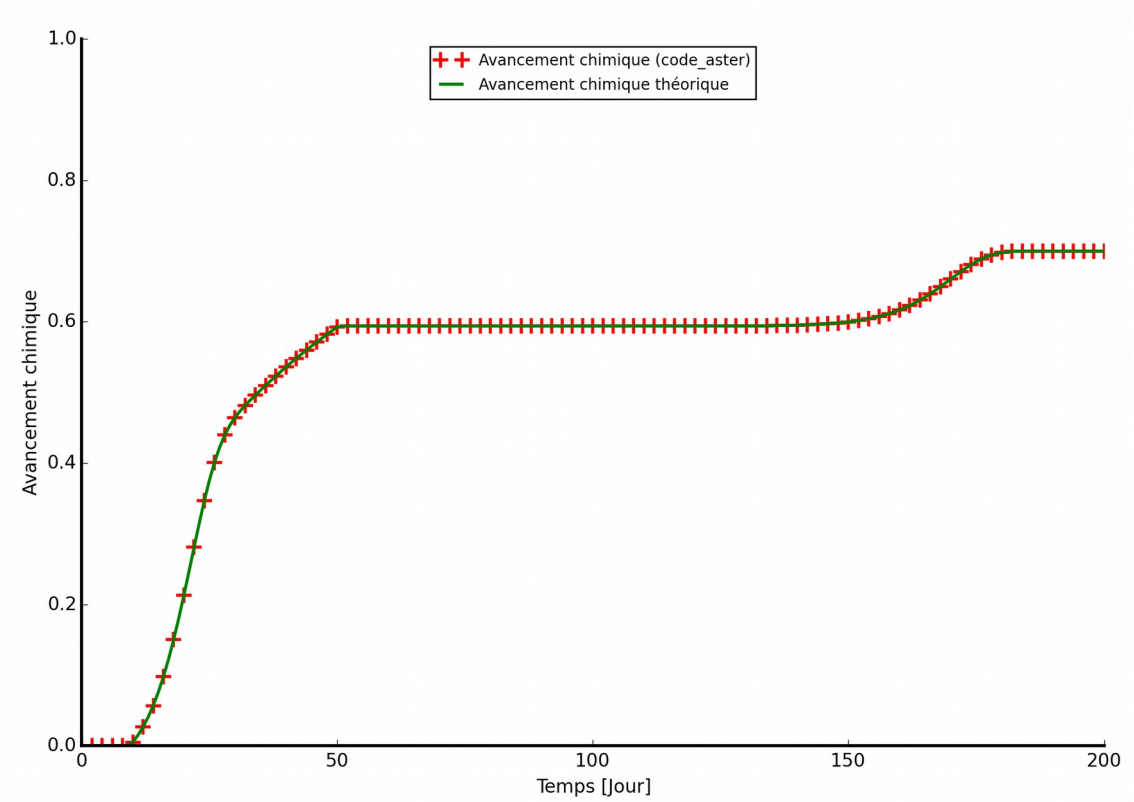


Figure 2.3-a : Avancement chimique, comparaison entre la solution théorique et celle obtenue par code_aster.

Pour la pression de gel, la variable interne correspondante est BR_PRGEL. La figure 2.3-b représente son évolution au cours du temps.

Instant	Valeur de référence	Précision
40.00	2.101217954854E+06	1.0E-03
50.00	2.448598919982E+06	1.0E-03
80.00	2.460563938661E+06	1.0E-03
100.00	2.455008850947E+06	1.0E-03
110.00	2.455084251465E+06	1.0E-03
200.00	3.112433957654E+06	1.0E-03

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

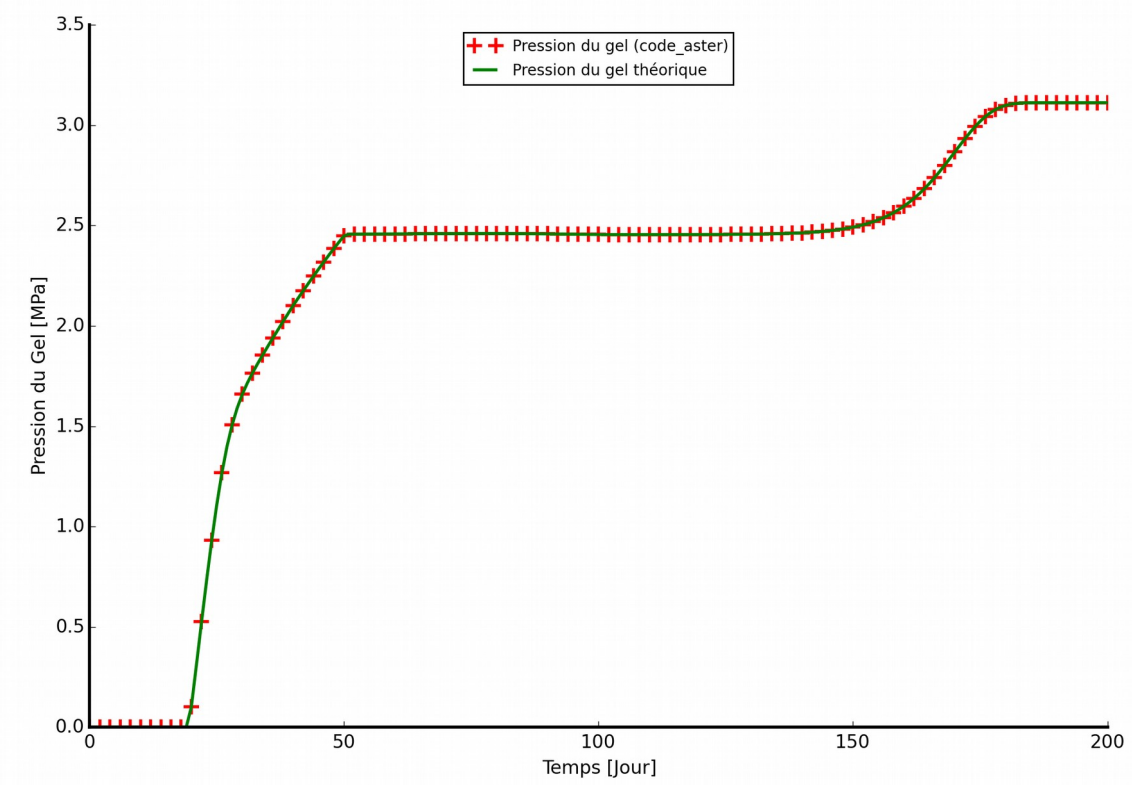


Figure 2.3-b : Pression de gel, comparaison entre la solution théorique et celle obtenue par code_aster.

Pour la pression capillaire, la variable interne correspondante est BR_PRCAP. La figure 2.3-c représente son évolution au cours du temps.

Instant	Valeur de référence	Précision
10.00	-2.810249099279E+06	1.0E-03
40.00	-2.529791246328E+06	1.0E-03
50.00	-2.400000000000E+06	1.0E-03
80.00	-2.861817604251E+06	1.0E-03
100.00	-2.142428528563E+06	1.0E-03
110.00	-2.142428528563E+06	1.0E-03
200.00	-2.142428528563E+06	1.0E-03

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

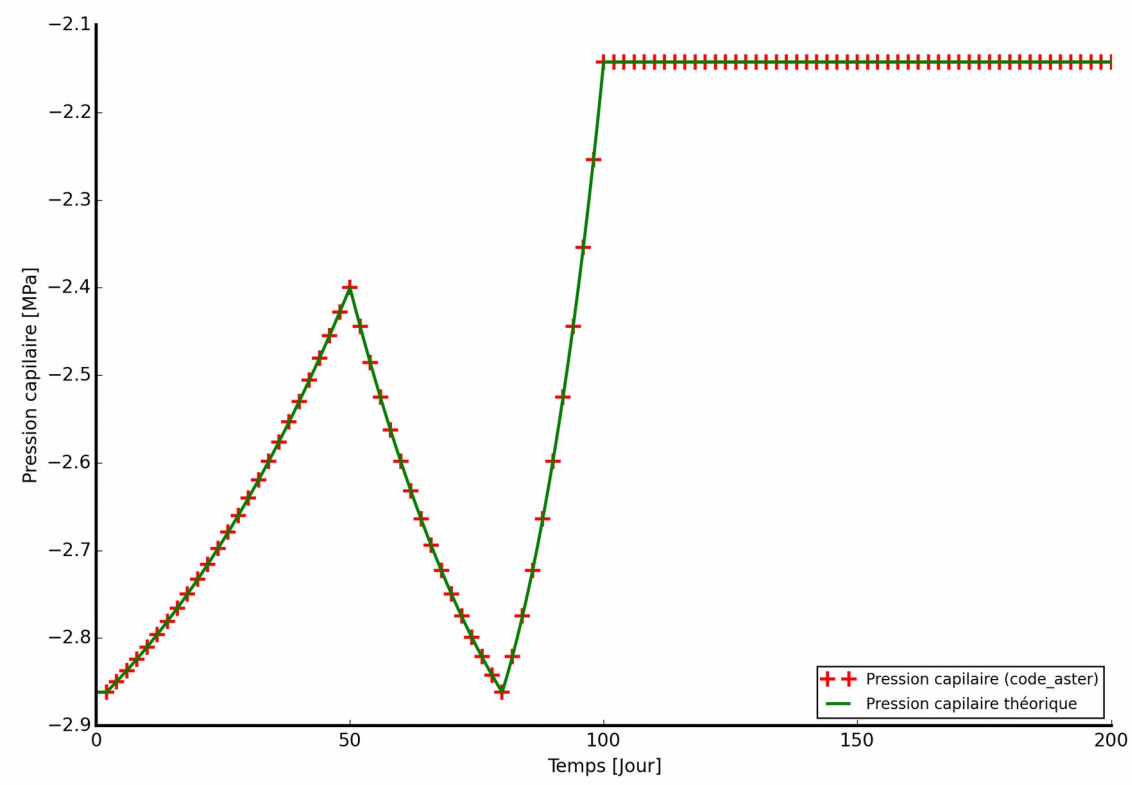


Figure 2.3-c : Pression de gel , comparaison entre la solution théorique et celle obtenue par code_aster.

Les grandeurs testées sont les déformations. Les noms des composantes du champ EPSI_ELGA sont EPXX, EPYY, EPZZ. La figure 2.3-d représente l'évolution de la trace des déformations au cours du temps. Compte tenue de la symétrie du problème les 3 déformations sont identiques, on a donc :

$$EPXX = EPYY = EPZZ = Trace(Epsi)/3$$

Instant	Valeur de référence	Précision
10.00	-4.391014217624E-05	1.0E-03
40.00	-6.696457679281E-06	2.1E-03
50.00	7.593581247263E-07	1.6E-02
80.00	-6.269588524836E-06	1.0E-03
100.00	4.884067537256E-06	3.2E-03
110.00	4.885245670348E-06	1.0E-03
200.00	1.515633482955E-05	1.0E-03

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

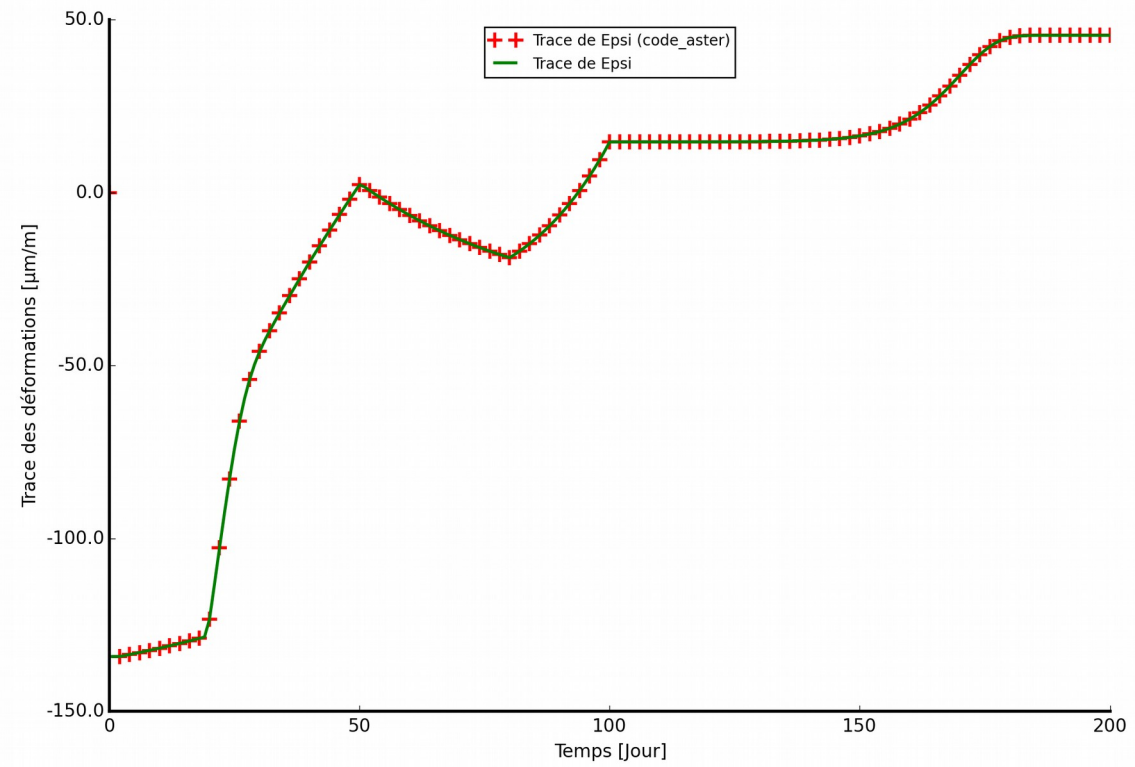


Figure 2.3-d : Trace des déformations, comparaison entre la solution théorique et celle obtenue par code_aster.

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

3 Modélisation B

3.1 Caractéristiques de la modélisation

Les données sont identiques à celles de la modélisation A.

3.2 Solution de référence

Les équations sont issues de [R7.01.26].

3.2.1 A vancement chimique

L'avancement chimique suit la loi suivante :

$$\frac{\partial A}{\partial t} = a_0 . \exp\left[\frac{E_a}{R}\left(\frac{1}{T_{ref}}-\frac{1}{T}\right)\right]\frac{\langle S_r - S_r^0\rangle_+}{\left(1-S_r^0\right)}\langle S_r - A\rangle_+ \qquad \text{[éq 3.2.1-1]}$$

Cette équation dépend de la température et du séchage. Elle peut donc être vérifiée sans connaître l'état de déformation et de contrainte de l'échantillon.

3.2.2 Pression d'eau

La pression capillaire est reliée au degré de saturation, par la relation :

$$Pc = -a . S_r . \left(Sr^{-b} - 1\right)^{1-1/b} \qquad \text{[éq 3.2.2-1]}$$

Cette équation ne dépend que du séchage. Elle peut donc être vérifiée sans connaître l'état de déformation et de contrainte de l'échantillon.

3.2.3 Pression du gel

La pression de gel effective suit la loi suivante

$$P_{gel} = b_g . M_g \langle A . V_g - \langle A_0 . V_g + b_g tr\left(\varepsilon^{total}\right)\rangle_+\rangle_+ \qquad \text{[éq 3.2.3-1]}$$

Cette équation dépend de l'avancement chimique et de la trace de la déformation. Elle ne peut donc être vérifiée qu'en connaissant l'état de déformation l'échantillon.

3.2.4 État mécanique de l'échantillon

Pour résoudre les équations précédentes il faut déterminer les contraintes. Les équation suivantes régissent le problème :

$$\varepsilon^e = \frac{1+\nu^0}{E^0} . \sigma^e - \frac{\nu^0}{E^0} tr\left(\sigma^e\right) . Id$$

avec :

$$\varepsilon^{total} = \varepsilon^e + \varepsilon^{fluage} + \varepsilon^{vdt} + \varepsilon^{ther}$$

$$\sigma^{total} = \sigma^e - P_{gel} . Id - P_c . Id$$

On est dans le cas où $\epsilon^{total} = 0$ du fait des conditions aux limites. Les paramètres matériaux sont choisis de façon à ce qu'il existe du fluage et que $\varepsilon^{vdt} = 0$, $\varepsilon^{ther} = 0$.

3.3 Grandeurs testées et résultats

L'avancement chimique ainsi que la pression capillaire ne dépendent ni de l'état de contrainte ni de l'état de déformations. Leurs évolutions sont identiques à celles de la modélisation A.

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

Pour l'avancement chimique, la variable interne correspondante est BR_AVCHI. La figure 2.3-a représente son évolution au cours du temps.

Instant	Valeur de référence	Précision
10.00	4.981207356948E-03	1.0E-03
40.00	5.361979299970E-01	1.0E-03
50.00	5.924644217241E-01	1.0E-03
80.00	5.938195769343E-01	1.0E-03
100.00	5.938216310035E-01	1.0E-03
110.00	5.938338086705E-01	1.0E-03
200.00	7.000000000002E-01	1.0E-03

Pour la pression de gel, la variable interne correspondante est BR_PRGEL. La figure 2.3-b représente son évolution au cours du temps.

Instant	Valeur de référence	Précision
40.00	2.101217954854E+06	1.0E-03
50.00	2.448598919982E+06	1.0E-03
80.00	2.460563938661E+06	1.0E-03
100.00	2.455008850947E+06	1.0E-03
110.00	2.455084251465E+06	1.0E-03
200.00	3.112433957654E+06	1.0E-03

Pour la pression capillaire, la variable interne correspondante est BR_PRCAP. La figure 2.3-c représente son évolution au cours du temps.

Instant	Valeur de référence	Précision
10.00	-2.810249099279E+06	1.0E-03
40.00	-2.529791246328E+06	1.0E-03
50.00	-2.400000000000E+06	1.0E-03
80.00	-2.861817604251E+06	1.0E-03
100.00	-2.142428528563E+06	1.0E-03
110.00	-2.142428528563E+06	1.0E-03
200.00	-2.142428528563E+06	1.0E-03

Pour les contraintes, les noms des composantes du champ SIEF_ELGA sont SIXX, SIYY, SIZZ. Compte tenue de la symétrie du problème les 3 contraintes sont identiques. La figure 3.3-a représente l'évolution de la contrainte au cours du temps.

Instant	Valeur de référence	Précision
10.00	2.810249099279E+06	1.6E-02
40.00	4.285732914740E+05	1.2E-01
50.00	-4.859891998248E+04	1.1E+00
80.00	4.012536655895E+05	1.3E-01
100.00	-3.125803223844E+05	1.9E-01
110.00	-3.126557229023E+05	1.9E-01
200.00	-9.700054290914E+05	6.5E-02

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

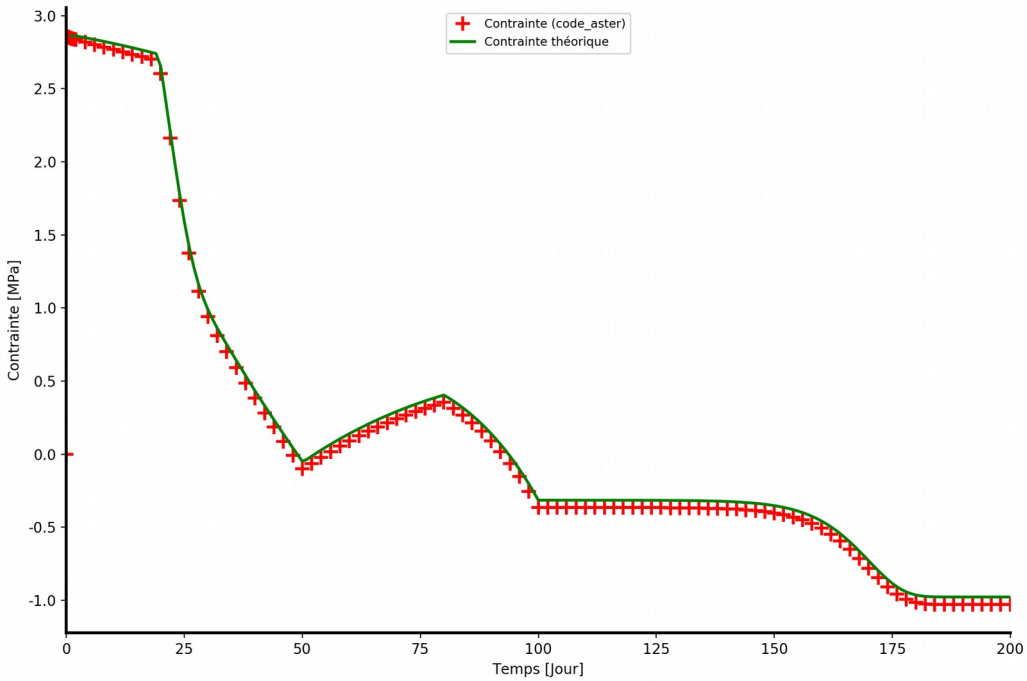


Figure 3.3-a : Contraintes, comparaison entre la solution théorique et celle obtenue par code_aster.

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

4 Synthèse des résultats

Les cas tests permettent de tester la bonne intégration de l'avancée chimique, de la pression de gel et de la pression capillaire. Pour la modélisation B, le phénomène de fluage est pris en compte. La résolution numérique du système d'équations différentielles montre une très bonne coïncidence avec les résultats de code_aster.

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