HSNA100 - Séchage d'un mur d'enceinte en béton

Résumé :

Ce cas test est destiné à valider le calcul du séchage du béton, développé dans l'opérateur de thermique non linéaire de *Code_Aster*. Le cas étudié correspond au séchage simulé de l'enceinte de Flamanville. Les données géométriques et les caractéristiques matériaux sont issues de la thèse de Laurent Granger "Comportement différé du béton dans les enceintes de centrales nucléaires" publié par le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (1996, pages 185 à 204).

Le séchage s'effectue par échange avec l'extérieur, sur les parois interne et externe du mur, en modélisation axisymétrique $2D$. Il est effectué sur une durée de 54 ans.

Le coefficient de diffusion du séchage dépendant de la température, l'analyse est composée du chaînage d'un calcul thermique et d'un calcul de séchage. On effectue ensuite un calcul mécanique de retrait en élasticité linéaire et en plasticité Von Misès avec un écrouissage isotrope.

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

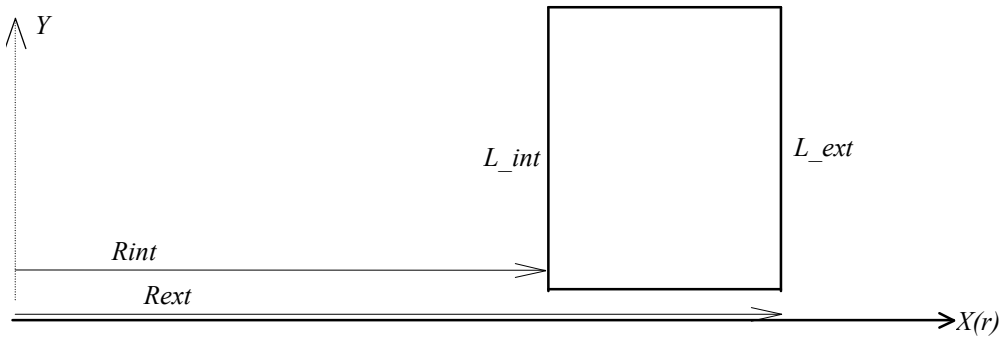
1 Problème de référence

1.1 Géométrie

L'enceinte est modélisée sur une hauteur $\mathrm{Lint}=\mathrm{Lext}=1\ m$

Rayon extérieur de l'enceinte : $Rext=23{,}5\ m$

Rayon intérieur de l'enceinte : $Rint=22{,}5\ m$



1.2 Propriétés de matériaux

Pour le calcul thermique :

Coefficient de diffusion thermique : $\lambda=80\,J/(h.cm.\,^\circ C)=2.22\,W/(m.\,^\circ C)$

Chaleur volumique : $\rho\,C_p=2.4\,10^6\,J/m^3/^\circ C$

Pour le calcul du séchage :

Dans l'équation du séchage :

$$\frac{dC}{dt}-\mathrm{div}\left[D(C,T)\,grad\,C\right]=0$$

le coefficient de diffusion D sera de la forme préconisée par Granger [bib1], [bib2] :

$$D(C,T)=A\exp(BC)\frac{T}{T_0}\exp\left[-\frac{Q_S}{R}\left(\frac{1}{T}-\frac{1}{T_0}\right)\right]$$

$A=3.8\,10^{-13}\,m^2/s$

$B=0.05$

$T_0=0\,^\circ C$

$\frac{Q_S}{R}=4700\,K^{-1}$

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

1.3 Conditions aux limites et chargements

Pour le calcul thermique :

Un échange thermique est imposé sur les parois intérieure et extérieure du mur de l'enceinte (groupes de mailles l_{int} et l_{ext}).
Pendant les cinq premières années, la température extérieure est de $15\,°C$ sur chaque paroi :
$T_{\text{int}}=T_{\text{ext}}=15\,°C$
A partir de la cinquième année, la température extérieure interne passe à $35\,°C$:
$T_{\text{int}}=35\,°C$ et $T_{\text{ext}}=15\,°C$
La paroi interne est considérée comme non ventilée et son coefficient d'échange est de $h_{\text{int}}=4\frac{W}{m^2.\,°C}$.
La paroi extérieure est considérée comme ventilée et son coefficient d'échange est de $h_{\text{ext}}=6\frac{W}{m^2.\,°C}$. (page 136 dans [bib1]).

En pratique, les échelles de temps du séchage étant très supérieures à celles de la thermique, on peut considérer que l'équilibre thermique est quasi immédiat. Le calcul est effectué en thermique linéaire.

Pour le calcul du séchage :

Les conditions aux limites sont exprimées en terme de flux normal d'humidité sur les parois interne et externe de l'enceinte (groupes de mailles l_{int} et l_{ext}). On utilise l'option `FLUX_NL` de l'opérateur `AFFE_CHAR_THER_F` . Le flux normal s'exprime d'une façon générale, dans un calcul de séchage, en fonction de la concentration initiale C_0 , de la concentration à 50 % d'humidité C_{50} et de la concentration extérieure C_{ext} , sous la forme :

$$w=-D(C,T)\frac{\partial C}{\partial n}=\frac{0.5\beta}{(C_0-C_{50})^2}\left[C-(2C_0-C_{ext})\right](C-C_{ext})$$

avec

$\beta=3.41557.10^{-6}\frac{l}{m^2.s}$ (page 181 dans [bib1])

Les données retenues dans le cas de l'enceinte de Flamanville sont les suivantes :
$C_0=105.7\,l/m^3$ et $C_{50}=57.5\,l/m^3$ (page 194 dans [bib1])

Sur la face intérieure :

De 0 à 5 ans , $C_{ext}=69.1\,l/m^3$ Valeur pour 60% d'humidité

de *5 à 54 ans,* $C_{ext}=51.6\,l/m^3$ Valeur pour 45% d'humidité

Sur la face extérieure :

$C_{ext}=69.1\,l/m^3$

Le calcul de séchage est effectué en thermique non linéaire, par chaînage avec le calcul thermique linéaire.

1.4 Conditions initiales

Les conditions initiales sont constituées par la température initiale, que l'on prend à $15\,°C$, et la concentration en eau initiale, qui vaut $C_0=105.7\,l/m^3$

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

2 Solution de référence

2.1 Méthode de calcul utilisée pour la solution de référence

La solution de référence est constituée par le calcul effectué avec une modélisation analogue par L. Granger, dans le cadre de sa thèse [bib1]. Le cas test concerne le calcul effectué avec les données expérimentales correspondant à l'enceinte de Flamanville. La mise en œuvre et les résultats y sont décrits pages 185 à 204.
Le séchage est effectué sur 54 ans, en tenant compte du changement de conditions aux limites lors de la cinquième année.

2.2 Résultats de référence

Concentration en eau dans l'épaisseur de l'enceinte, au bout de 5, 15, et 54 ans.

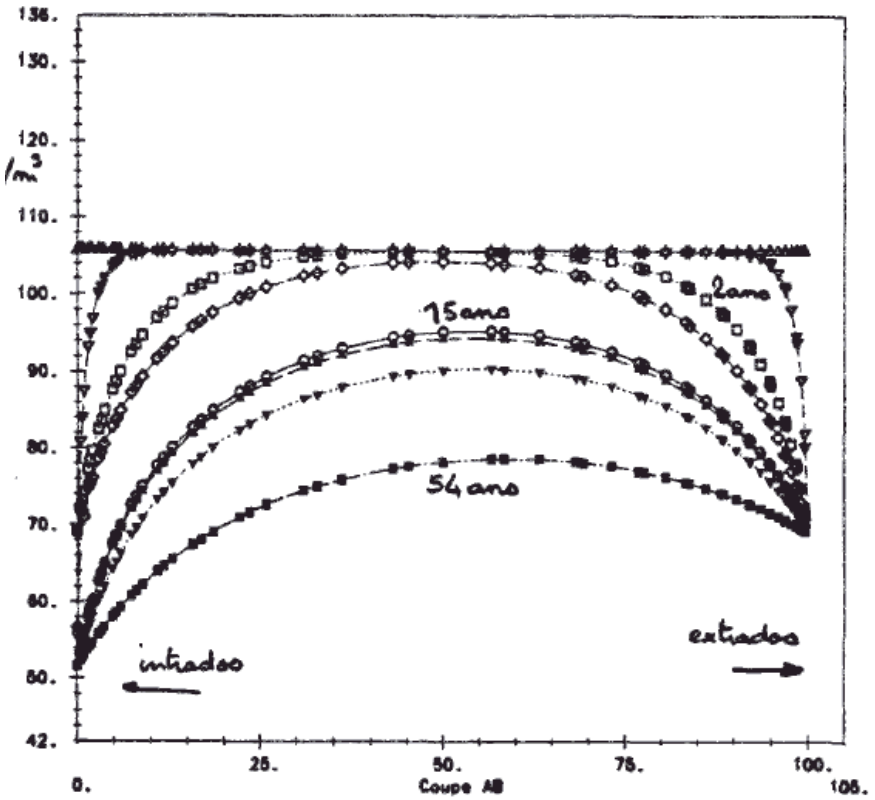


Figure 1 : Concentration en eau suivant une coupe pour différents instants (page 204 [bib1])

2.3 Incertitude sur la solution

On ne dispose que des concentrations en eau calculées dans le cadre de la thèse de Laurent Granger, sans données numériques précises. Les résultats de références sont directement extrait de la Figure 1. L'incertitude de la solution est plus impotante en peau (où les points se superposent) qu'à coeur.

2.4 Références bibliographiques

1. L. GRANGER : "Comportement différé du béton dans les enceintes de centrales nucléaires" publié par le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (1996).

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

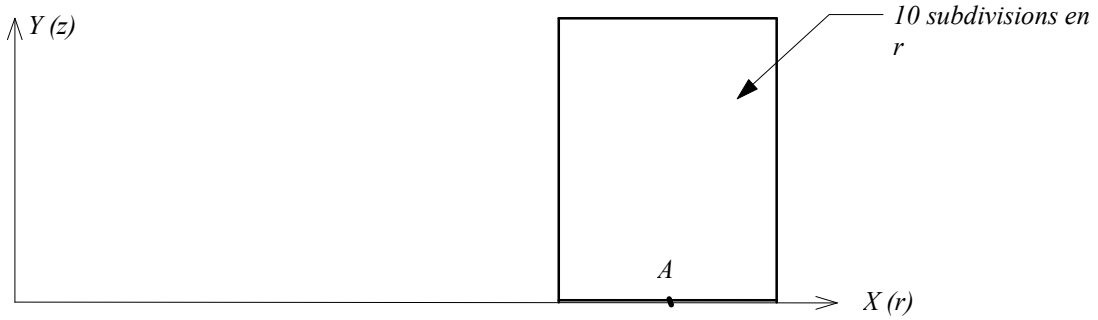
2. G. DEBRUYNE, B. CIREE : « Modélisation de la thermo-hydratation, du séchage et du retrait du béton », manuel de Référence *Code_Aster* , [R7.01.12] (2001).

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

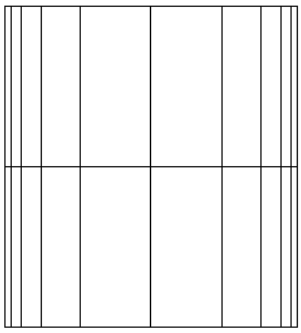
3 Modélisation A

3.1 Caractéristiques de la modélisation

Il s'agit d'une modélisation axisymétrique.
Découpage en 10 éléments de taille variable sur l'épaisseur, 2 éléments sur la hauteur.



3.2 Caractéristiques du maillage



Nombre de nœuds : 55
Nombre de mailles et type : 20 QUAD4

3.3 Grandeurs testées et résultats

La concentration en eau est testée sur 10 nœuds répartis dans l'épaisseur à trois instants (5, 15 et 54 ans):
A 5 ans :

X	Référence	*Aster*	% différence
22.50	67.68	69.40	-2.53
22.54	80.91	81.15	-0.29
22.60	89.69	90.61	-1.02
22.68	97.80	97.96	-0.16
22.81	102.21	102.99	-0.77
23.00	104.00	105.02	-0.98
23.19	102.00	102.95	-0.94
23.32	97.80	97.89	-0.09
23.40	90.18	90.53	-0.39
23.46	81.00	81.10	-0.12
23.50	71.20	69.36	2.58

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

A 15 ans :

X	Référence	Aster	% différence
22.50	54.2257	51.78	4.50
22.54	65.2	64.55	1.00
22.60	75.4576	74.96	0.66
22.68	84.9649	83.71	1.47
22.81	91.4	90.73	0.73
23.00	95.2	94.89	0.33
23.19	93.55	93.73	-0.19
23.32	89.3776	89.22	0.18
23.40	82.8	83.13	-0.40
23.46	76.3516	76.30	0.07
23.50	70.0603	69.28	1.12

A 54 ans :

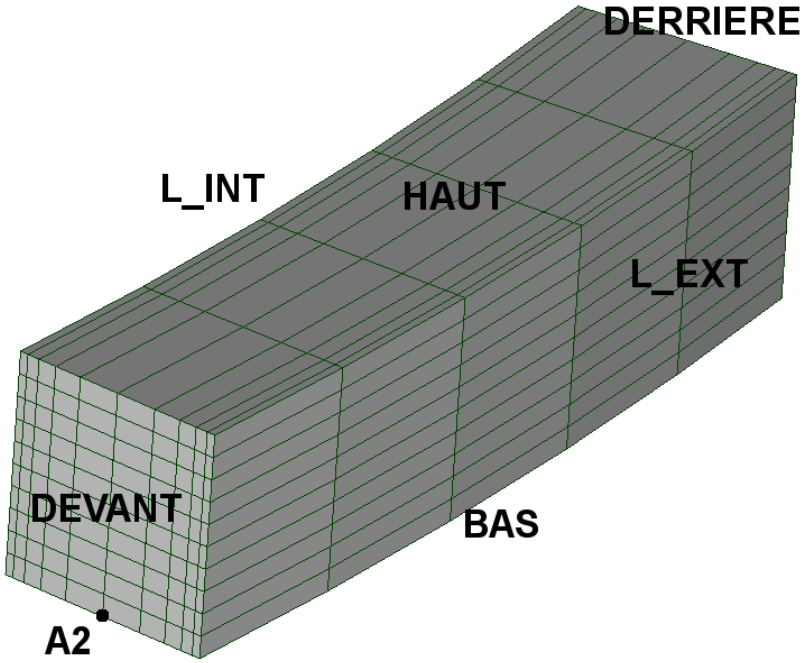
X	Référence	Aster	% différence
22.50	51.6	51.66	-0.11
22.54	56.8903	56.46	0.75
22.60	62.4	61.98	0.68
22.68	69.1059	67.83	1.84
22.81	74.4781	73.40	1.44
23.00	78.3688	77.45	1.17
23.19	77.8487	77.71	0.18
23.32	75.9533	75.73	0.29
23.40	73.1186	73.24	-0.17
23.46	70.815	70.96	-0.21
23.50	68.8035	69.15	-0.50

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

4 Modélisation B

4.1 Caractéristiques de la modélisation

Il s'agit d'une modélisation 3D



4.2 Caractéristiques du maillage

Nombre de nœuds :726.
Les mailles volumiques sont des mailles hexaédriques 500 HEXA8.

4.3 Grandeurs testées et résultats

La concentration en eau est testée sur 10 nœuds répartis dans l'épaisseur à trois instants (5, 15 et 54 ans):
A 5 ans :

X	Référence	*Aster*	% différence
22.50	67.68	69.40	-2.53
22.54	80.91	81.15	-0.29
22.60	89.69	90.61	-1.02
22.68	97.80	97.95	-0.16
22.81	102.21	102.99	-0.77
23.00	104.00	105.02	-0.98
23.19	102.00	102.95	-0.93
23.32	97.80	97.89	-0.09
23.40	90.18	90.53	-0.39
23.46	81.00	81.10	-0.12
23.50	71.20	69.36	2.58

A 15 ans :

X	Référence	*Aster*	% différence
22.50	54.2257	51.78	4.50

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

22.54	65.2	64.55	1.00
22.60	75.4576	74.96	0.67
22.68	84.9649	83.71	1.48
22.81	91.4	90.73	0.74
23.00	95.2	94.88	0.33
23.19	93.55	93.73	-0.19
23.32	89.3776	89.22	0.18
23.40	82.8	83.13	-0.40
23.46	76.3516	76.30	0.07
23.50	70.0603	69.28	1.12

A 54 ans :

X	Référence	*Aster*	% différence
22.50	51.6	51.66	-0.11
22.54	56.8903	56.46	0.75
22.60	62.4	61.97	0.68
22.68	69.1059	67.83	1.84
22.81	74.4781	73.40	1.45
23.00	78.3688	77.45	1.18
23.19	77.8487	77.71	0.18
23.32	75.9533	75.73	0.30
23.40	73.1186	73.24	-0.16
23.46	70.815	70.96	-0.21
23.50	68.8035	69.15	-0.50

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

5 Synthèse des résultats

La précision des résultats est inférieure à 5% environ pour la concentration en eau par rapport à la solution de référence dont on ne connaît pas la propre précision.

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