

**Manuel de Validation****Fascicule V7.20 : Thermo-mécanique statique non linéaire des structures axisymétriques****Document V7.20.100**

# 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 du *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 Mises avec un écrouissage isotrope.

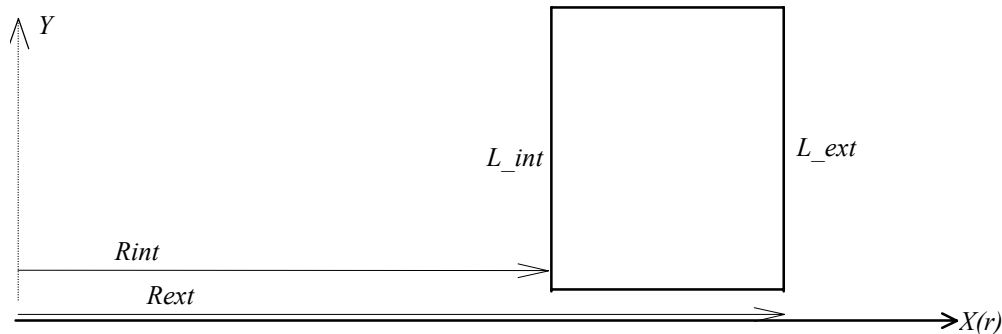
## 1 Problème de référence

### 1.1 Géométrie

L'enceinte est modélisée sur une hauteur  $L_{int} = L_{ext} = 1$  m

Rayon extérieur de l'enceinte :  $R_{ext} = 23,4$  m

Rayon intérieur de l'enceinte :  $R_{int} = 22,5$  m



### 1.2 Propriétés de matériaux

**Pour le calcul thermique :**

Coefficient de diffusion thermique :  $\lambda = 8000 \text{ W} / \text{m} / ^\circ \text{C}$

Chaleur volumique :  $\rho C_p = 2.4 \cdot 10^6 \text{ J} / \text{m}^3 / ^\circ \text{C}$

**Pour le calcul du séchage :**

Dans l'équation du séchage :

$$\frac{dC}{dt} - \text{Div}[D(C, T) \text{Grad} C] = 0$$

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

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

$$A = 3,8 \times 10^{-13} \text{ m}^2 / \text{s}$$

$$B = 0,05$$

$$T_0 = 273^\circ \text{K}$$

$$\frac{Q_s}{R} = 4700 \text{ K}^{-1}$$

### 1.3 Conditions aux limites et chargements

**Pour le calcul thermique :**

Les températures sont imposées 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 imposée est de 15°C sur chaque paroi :

$$T_{int} = T_{ext} = 15^{\circ}C$$

A partir de la cinquième année, la température en paroi interne passe à 35°C :

$$T_{int} = 35^{\circ}C \quad \text{et} \quad T_{ext} = 15^{\circ}C$$

En pratique, les échelles de temps du séchage étant très supérieures à celle 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  $C_0$  et de la concentration extérieure  $C_{eq}$ , sous la forme :

$$w = -D(C, T) \frac{\partial C}{\partial n} = \frac{0,5\beta}{(C_0 - C_{eq})^2} \left[ C - 2(C - C_{eq}) \right] (C - C_{eq})$$

avec

$$\beta = 3.41557.10^{-8}$$

Les données retenues dans le cas de l'enceinte de Flamanville sont les suivantes :

$$C_0 = 105,7 \text{ l / m}^3 \text{ (concentration initiale)}$$

Sur la face intérieure :

$$\text{de } 0 \text{ à } 5 \text{ ans,} \quad C_{eq} = 69,1 \text{ l / m}^3$$

$$\text{de } 5 \text{ à } 54 \text{ ans,} \quad C_{eq} = 51,6 \text{ l / m}^3$$

Sur la face extérieure :

$$C_{eq} = 69,1 \text{ l / m}^3$$

L'expression du flux est interpolée par le *Code\_Aster*, en fonction de la valeur courante de la concentration en eau, (variable de calcul). On utilise une fonction interprétée, pour définir son expression, suivant la formulation ci-dessus (opérateur `FORMULE`), et l'opérateur `CALC_FONC_INTERP` pour définir la fonction tabulée correspondante.

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  $C_0 = 105,7 \text{ l / m}^3$ .

---

## **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 au milieu de l'enceinte, au bout de 5, 15, et 54 ans.

### **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 sur l'incertitude de la solution, en ce qui concerne l'enceinte de Flamanville.

### **2.4 Références bibliographiques**

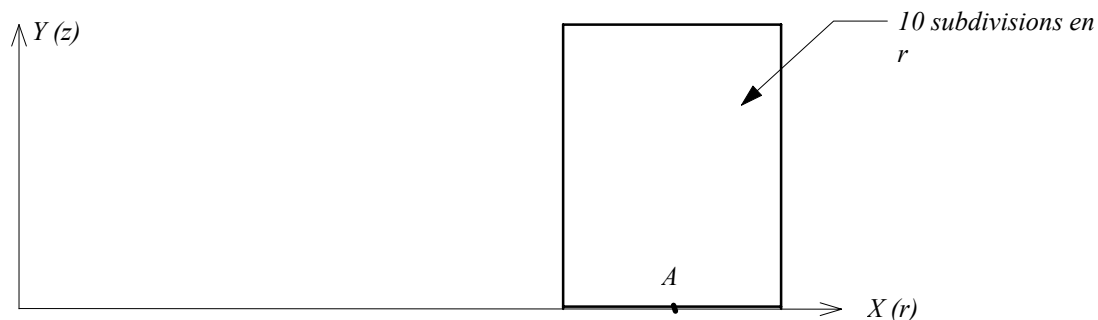
- [1] L. GRANGER : "Comportement différé du béton dans les enceintes de centrales nucléaires" publié par le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (1996).
- [2] G. DEBRUYNE, B. CIREE : « Modélisation de la thermo-hydratation, du séchage et du retrait du béton », manuel de Référence *Code\_Aster*, [R7.01.12] (2001).

## 3 Modélisation A

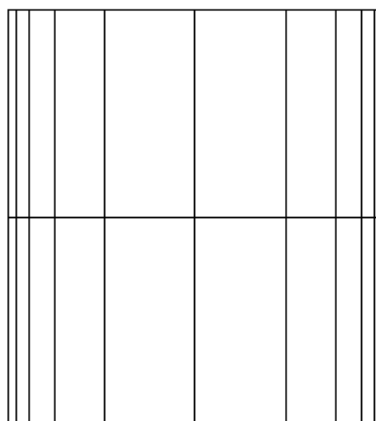
### 3.1 Caractéristiques de la modélisation

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 : 85

Nombre de mailles et type : 20 QUAD8

### 3.3 Caractéristiques de la discrétisation temporelle

Calcul thermique (ans)	Calcul de séchage (ans)
0.1	0.001
1	0.1
5	1
5.1	4.9
6	5
10	5.001
54	5.1
	6
	10
	50
	54

## 3.4 Fonctionnalités testées

Commandes	Options
AFFE_MODELE	' THERMIQUE ' ' AXIS ' ' TOUT '
AFFE_CHAR_THER_F	' FLUX_NL ' ' GROUP_MA '
DEFI_MATERIAU	' SECH_GRANGER '
THER_NON_LINE	' COMP_THER_NL ' ' SECH_GRANGER ' ' EVOL_THER_SECH '

## 4 Résultats de la modélisation A

### 4.1 Valeurs testées

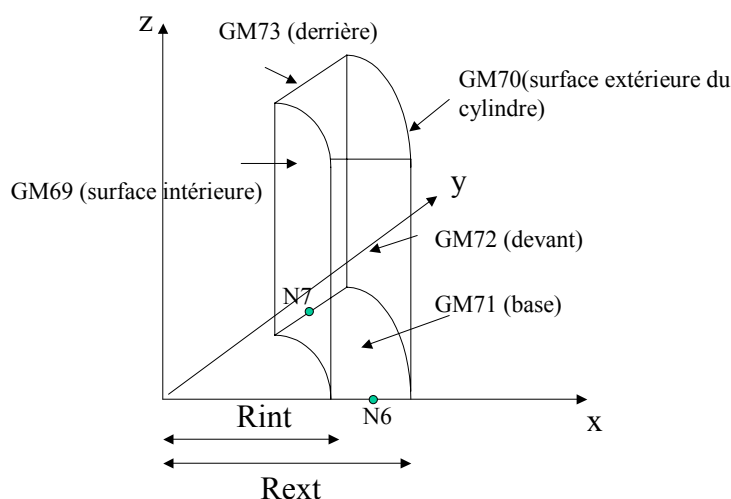
Concentration en eau au point A :

Identification	Référence	Aster	% différence
concentration à 5 ans	104.	104.818	0.951
concentration à 15 ans	95.	96.161	1.540
concentration à 54 ans	78.	78.276	0.568
Déplacement radial à 54 ans (élasticité)	-0.2759	-0.2758	0.011
Déplacement radial à 54 ans (plasticité)	-0.1840	-0.1840	0.005

## 5 Modélisation B

### 5.1 Caractéristiques de la modélisation

Il s'agit d'une modélisation 3D



### 5.2 Caractéristiques du maillage

Le maillage est réalisé avec l'outil graphique gmsh.

Nombre de nœuds :456.

Les mailles volumiques sont des mailles tétraédriques tetra4.

Nombre de mailles et types : 929 TETRA4, 410 TRIA3, 8 SEG2, 2 POI1.

### 5.3 Fonctionnalités testées

Commandes	Options		
DEFI_MATERIAU	' SECH_GRANGER '		
AFFE_MODELE	' THERMIQUE '	' 3D '	' TOUT '
AFFE_CHAR_THER_F	' FLUX_NL '	' GROUP_MA '	
DEFI_MATERIAU	' SECH_GRANGER '		
THER_NON_LINE	' COMP_THER_NL '	' SECH_GRANGER '	
STAT_NON_LINE	' COMP_INCR '	' GRANGER_FP '	

## 6 Résultats de la modélisation B

### 6.1 Valeurs testées

La référence AUTRE\_ASTER correspond aux résultats de la modélisation A.

Concentration en eau au nœud N6 :

Identification Concentration en eau	Référence AUTRE_ASTER	Aster	% différence
à 5 ans	104.818	107.094	2.171
à 15 ans	96.161	98.459	2.390
à 54 ans	78.276	79.693	1.810

Concentration en eau au nœud N6 :

Identification Concentration en eau	Référence AUTRE_ASTER	Aster	% différence
à 10 ans	100.071	102.345	2.273
à 20 ans	92.787	95.056	2.445
à 30 ans	87.224	89.290	2.368
à 40 ans	82.893	84.673	2.147
à 50 ans	79.460	80.970	1.901

Concentration en eau au nœud N7 :

Identification Concentration	Référence NON_REGRESSION	Aster	% différence
à 5 ans	104.818	105.773	0.912
à 15 ans	96.161	97.597	1.494
à 54 ans	78.276	79.558	1.638

Concentration en eau au nœud N7 :

Identification Concentration en eau	Référence NON_REGRESSION	Aster	% différence
à 10 ans	100.071	101.571	1.499
à 20 ans	92.787	94.185	1.507
à 30 ans	87.224	88.571	1.543
à 40 ans	82.893	84.202	1.579
à 50 ans	79.460	80.746	1.619

Déplacement Dx au nœud N6 calcul élastoplastique :

Identification Déplacement Dx	Référence AUTRE_ASTER	Aster	% différence
à 54 ans	-0.184	-0.184	0.126

Déplacement Dx au nœud N7 calcul élastoplastique :

Identification Déplacement Dx	Référence NON_REGRESSION	Aster	% différence
à 54 ans	-0.181	-0.184	-1.592



Titre : HSNA100 - Séchage d'un mur d'enceinte en béton  
Auteur(s) : G. DEBRUYNE

Date : 23/06/03  
Clé : V7.20.100-C Page : 9/10

Déplacement Dx au nœud N6 calcul élastique :

Identification Déplacement Dx	Référence AUTRE_ASTER	Aster	% différence
à 54 ans	-0.275	-0.275	-0.073

Déplacement Dx au nœud N7 calcul élastique :

Identification Déplacement Dx	Référence NON_REGRESSION	Aster	% différence
à 54 ans	-0.271	-0.275	-1.626

## 7 Modélisation C

### 7.1 Caractéristiques de la modélisation

Il s'agit ici de comparer les champs mécaniques issus des commandes MECA\_STATIQUE et STAT\_NON\_LINE. Ceux-ci doivent être identiques à condition que la concentration en eau initiale soit nulle. En effet, le retrait de dessiccation est égal à  $\varepsilon(t) = \beta(C(t) - C_0)$  pour le calcul incrémental (STAT\_NON\_LINE) et  $\varepsilon(t) = \beta C(t)$  en MECA\_STATIQUE puisque le calcul ne tient pas compte de l'histoire du matériau. On affecte alors une pré-concentration en eau égale à  $C_0$  par l'opérateur CREA\_CHAMP et on remplace la concentration en eau courante  $C(t)$  par  $C(t) - C_0$  à l'aide de l'opérateur COMB\_CHAM\_NO.

On utilise la même modélisation axisymétrique que A, avec la même discrétisation spatiale et temporelle. Seul le chargement mécanique est modifié, on supprime les pressions mécaniques exercées sur l'enceinte ainsi que la dilatation thermique (en annulant le coefficient de dilatation) afin d'isoler le retrait du au séchage.

### 7.2 Fonctionnalités testées

Les fonctionnalités testées sont celles des autres modélisations plus les suivantes :

Commandes	Options
CREA_CHAMP	'AFFE' 'NOEU_TEMP_R'
CREA_CHAMP	'EXTR' 'NOEU_TEMP_R'
COMB_CHAM_NO	
CREA_RESU	'EVOL_THER'

## 8 Résultats de la modélisation C

### 8.1 Valeurs testées

Déplacement au point A2 :

Identification	Référence	Aster Stat Non Line	Aster Méca Statique	% différence
DX (N47)	8.7688E-4	8.9645E-4	8.7688E-4	2.2

La valeur de référence retenue est celle obtenue par l'opérateur MECA\_STATIQUE.

## 9 Synthèse des résultats

Pour la modélisation A, la précision des résultats atteint 1.5 % environ pour la concentration en eau par rapport à la solution de référence dont on ne connaît pas la propre précision.

Le test a également été effectué sur un maillage beaucoup plus grossier (4 éléments dans la direction radiale), et les résultats sont aussi bons au centre de la structure en béton.

Pour la modélisation B, la différence atteint 2.5% sur les concentrations du fait d'un maillage 3D relativement grossier.

Ce test permet de plus de vérifier la non régression du code pour le calcul de séchage dans l'opérateur de mécanique non linéaire. La loi de comportement choisie, ainsi que le champ d'humidité résultante ne permettent pas de connaître de solution analytique simple. La convergence en thermique non linéaire est délicate au premier pas de temps, pour trouver le premier état d'équilibre, du fait de l'échelle importante des pas de temps. La modélisation C permet de tenir compte d'une concentration en eau initiale non nulle dans un calcul réalisé avec l'opérateur MECA\_STATIQUE.