SSNS114 – Dégradation d'une plaque en béton armé sous sollicitations variées avec la loi BETON_REGLE_PR

Résumé :

Ce test valide la loi de comportement non-linéaire du béton BETON_REGLE_PR (voir [R7.01.27]) pour des chargements cycliques variés : traction/compression, flexion alternée, cisaillement dans le plan et leurs combinaisons. On utilise une modélisation multicouche, dans laquelle on représente les aciers des nappes d'armatures par des GRILLE_EXCENTRE. Les analyses sont faites en statique (STAT_NON_LINE). Les résultats sont comparés avec ceux d'une modélisation avec le modèle de comportement ENDO_ISOT_BETON (voir [R7.01.04]).

La modélisation H teste la thermomécanique. Dans cette modélisation, on vérifie que les deux chargements de dilatation thermique (température homogène dans l'épaisseur et gradient de température constant dans l'épaisseur) conduisent au même état de contrainte que deux chargements mécaniques simples : extension selon Ox et flexion autour de Oy.

Les modélisations E à G correspondent aux modélisations A à C pour d es niveaux de sollicitations plus élevés.

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

1 Problème de référence

1.1 Géométrie

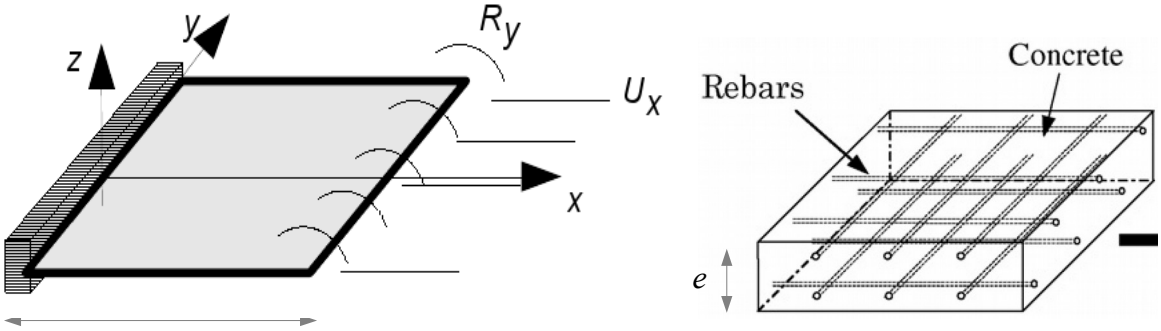


Figure 1.1-a: géométrie de la plaque carrée en béton armé

Longueur : $L = 1.0\,m$; Épaisseur de la plaque : $e = 0.1\,m$.
Diamètre des aciers : $0.01\,m$. Enrobage des nappes d'armature inférieure et supérieure des aciers selon l'axe z : $0.01\,m$.

La modélisation est basée sur une modélisation semi-globale en plaque multicouche. On modélise le béton et les armatures séparément. Pour chaque nappe d'armatures, on considère une couche qui se comporte uniquement dans le sens longitudinal des armatures. Donc on aura 4 couches pour les armatures.
Sur le même maillage on définit 5 modèles représentant la plaque en béton armé : 1 modèle DKT pour le béton et 4 modèles GRILLE pour les armatures (2 suivant la direction X , 2 suivant la direction Y pour les parties inférieure et supérieure). Le taux de ferraillage pour chaque nappe d'armatures est de $8.0 \times 10^{-4}\,m^2/m$.

La position des armatures (inférieure ou supérieure) est définie par le mot clé EXCENTREMENT sous le mot clé facteur GRILLE dans l'opérateur AFFE_CARA_ELEM, qui vaut $\pm 0.04\,m$: on admet donc ici que les aciers en X et en Y sont à la même position, ce qui constitue l'approximation habituelle des modèles multicouches.

1.2 Propriétés du matériau

La fissuration du béton est modélisée par la loi de comportement BETON_REGLE_PR, tandis que l'acier modélisé par la loi GRILLE_ISOT_LINE.

Béton (modèle BETON_REGLE_PR) :

Module de Young: $E_b = 32308.0\,MPa$
Coefficient de Poisson : $\nu_b = 0.20$
Seuil d'endommagement en traction simple σ_y^t : $3.4\ MPa$
Pente adoucissante : $E_T = -0.2\,E_b$
Seuil d'endommagement en compression simple σ_y^c : $32.308\ MPa$
Déformation au seuil de compression ε_c : 0.002
Exposant de la loi d'écrouissage en compression n : 2

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

Acier :

Module de Young : $E_a = 200000.0\ MPa$

Limite de linéarité σ_e^{acier} : $570.0\ MPa$

Pente post-élastique $E_{écrouis}^{acier}$: $= 0.0015\ E_a = 300\ MPa$.

1.3 Conditions aux limites et chargements

On considère différentes modélisations *A à H* pour différents types de chargements caractéristiques et différents comportements de la plaque. Dans tous les cas, les chargements sont des déplacements (ou des rotations) imposés aux bords de la plaque, différemment pour chaque modélisation.

Les modélisations considérées sont :

modélisation A (§3) : traction – compression - traction pure ;
modélisation B (§4) : flexion pure alternée ;
modélisation C (§5) : couplage de traction - compression et flexion ;
modélisation D (§6) : cisaillement pur et distorsion dans le plan ;
modélisation E (§7) : traction – compression pure, sollicitations élevées ;
modélisation F (§8) : flexion pure alternée, sollicitations élevées ;
modélisation G (§9) : couplage traction/compression et flexion, sollicitations élevées ;
modélisation H (§10) : chargement thermique.

1.4 Conditions initiales

Initialement, les déplacements et les contraintes sont identiquement nuls.

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

2 Solution de référence

La solution de référence est obtenue avec l'utilisation de la loi de comportement ENDO_ISOT_BETON.

2.1 Modèles

La modélisation est identique à celle du modèle multicouche avec la loi BETON_REGLE_PR présenté précédemment.

2.2 Propriétés des matériaux

Les propriétés du béton sont identiques à celle de la loi BETON_REGLE_PR

Béton (modèle ENDO_ISOT_BETON) :

Module de Young: $E_b = 32308.0\,MPa$

Coefficient de Poisson : $\nu_b = 0.20$

Seuil d'endommagement en traction simple $\sigma^t_{y,EIB}$: $3.4\ MPa$

Pente adoucissante : $-0.2\,E_b$.

Les propriétés de l'acier sont identiques à celle utilisé pour le modèle avec la loi BETON_REGLE_PR.

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

3 Modélisation A

3.1 Caractéristiques de la modélisation

Le chargement est de type traction – compression – traction pure.

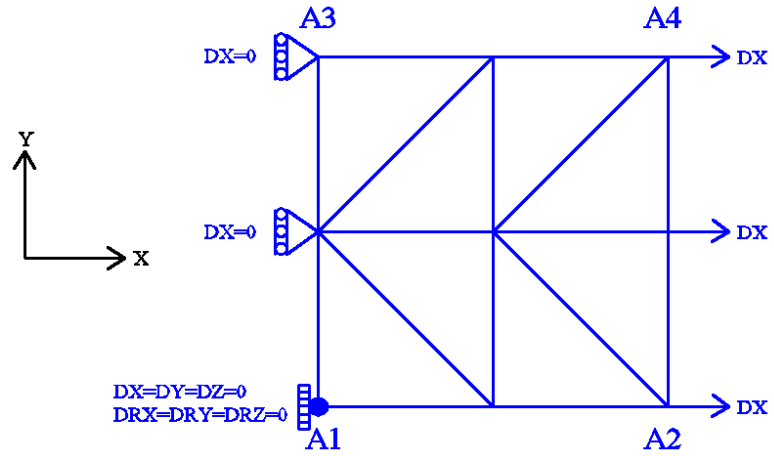


Figure 3.1-a: maillage et conditions aux limites.

Modélisation : DKT
Conditions aux limites :

- Encastrement en A_1 ;
- $DX=0.0$ sur l'arête A_1-A_3 ;
-
- $DX=U_0\times f(t)$ sur l'arête A_2-A_4 ;

où $U_0=2.0\times10^{-4}m$ et $f(t)$ représentent l'amplitude du chargement cyclique en fonction du paramètre (de pseudo-temps) t . Pour bien vérifier le modèle, on considère deux fonctions de chargement comme suit :

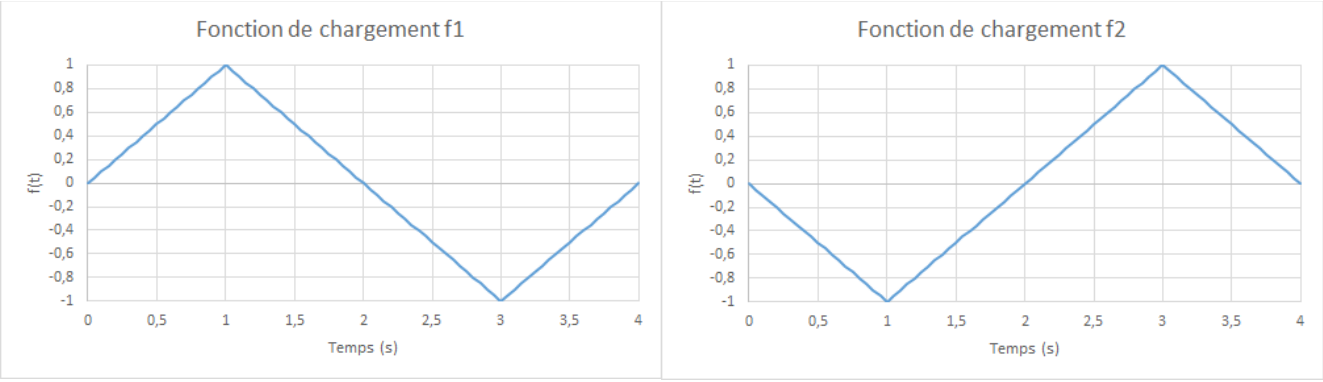


Figure 3.1-b: fonctions de chargement f1 (gauche) et f2 (droite).

Note : la déformation extrémale est : 2.0×10^{-4} , soit bien en-deçà du passage en plasticité des aciers. Pas de temps d'intégration : 0.05 .

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

3.2 Caractéristiques du maillage

Nombre de nœuds : 9. Nombre de mailles : 8 TRIA3 ; 8 SEG2.

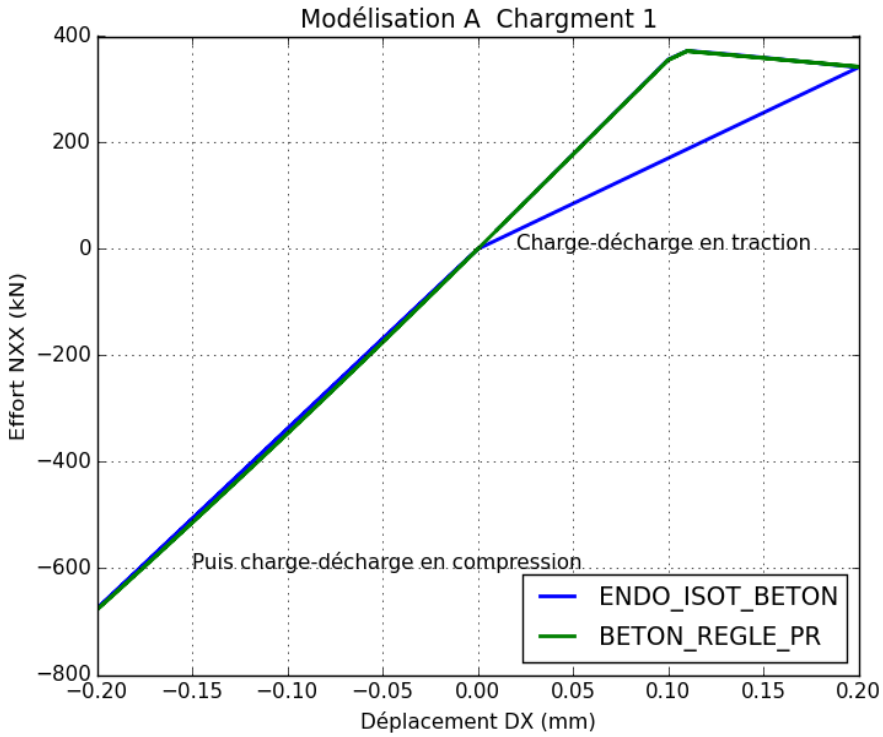
3.3 Grandeurs testées et résultats pour la fonction de chargement f1

On compare la somme des forces de réactions selon l'axe Ox en $A1-A3$ et les déplacements selon l'axe Oy en $A4$ (effet Poisson) obtenus par la modélisation multicouche avec la loi ENDO_ISOT_BETON et par celle reposant sur la loi BETON_REGLE_PR, en termes de différences relatives ; la tolérance est prise en valeur absolue sur ces différences relatives :

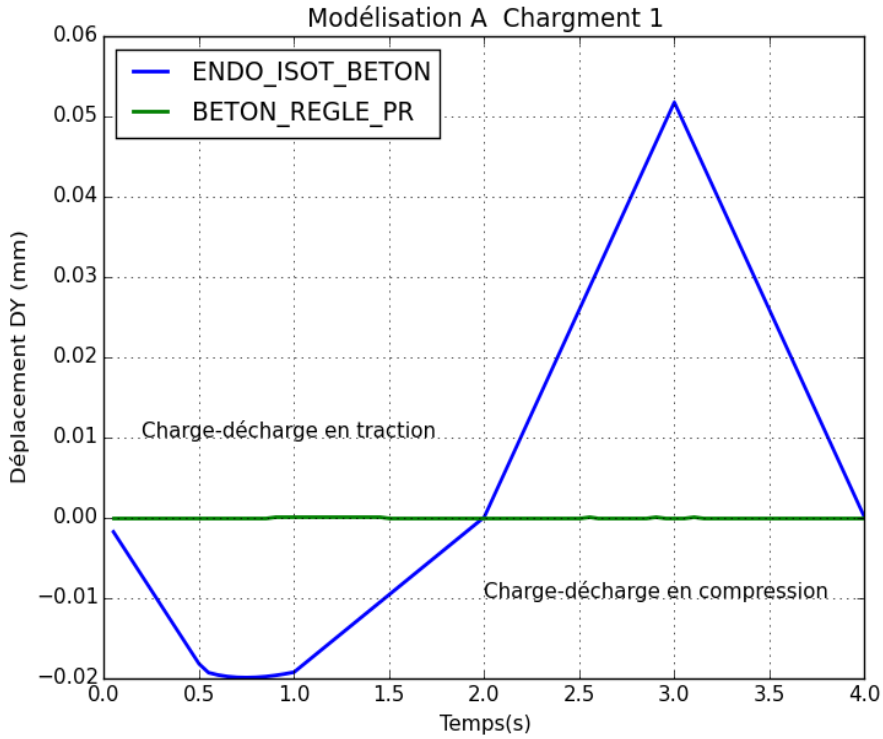
Identification	Type de référence	Valeur de référence	Tolérance
TRAC. - PHASE CHAR. ELAS. $t=0,25$			
Différence relative des efforts N_{xx}	AUTRE_ASTER	0	$1\ 10^{-2}$
Différence relative des déplacements DY	NON-REGRESSION	-	$1\ 10^{-6}$
TRAC. - PHASE CHAR. ENDO. $t=1,0$			
Différence relative des efforts N_{xx}	AUTRE_ASTER	0	$1\ 10^{-2}$
TRAC. - PHASE DECHAR. ELAS. $t=1,5$			
Différence relative des efforts N_{xx}	AUTRE_ASTER	0	1.1
COMPR. - PHASE CHAR. ELAS. $t=3,0$			
Différence relative des efforts N_{xx}	AUTRE_ASTER	0	$1\ 10^{-2}$
COMPR. - PHASE DECHAR. ELAS $t=3,5$			
Différence relative des efforts N_{xx}	AUTRE_ASTER	0	$3\ 10^{-2}$

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

Diagrammes comparés efforts N_{xx} – déplacement DX en traction/compression pour le chargement fl :



Diagrammes comparés déplacement DY (dû à l'effet de Poisson) en fonction du temps :



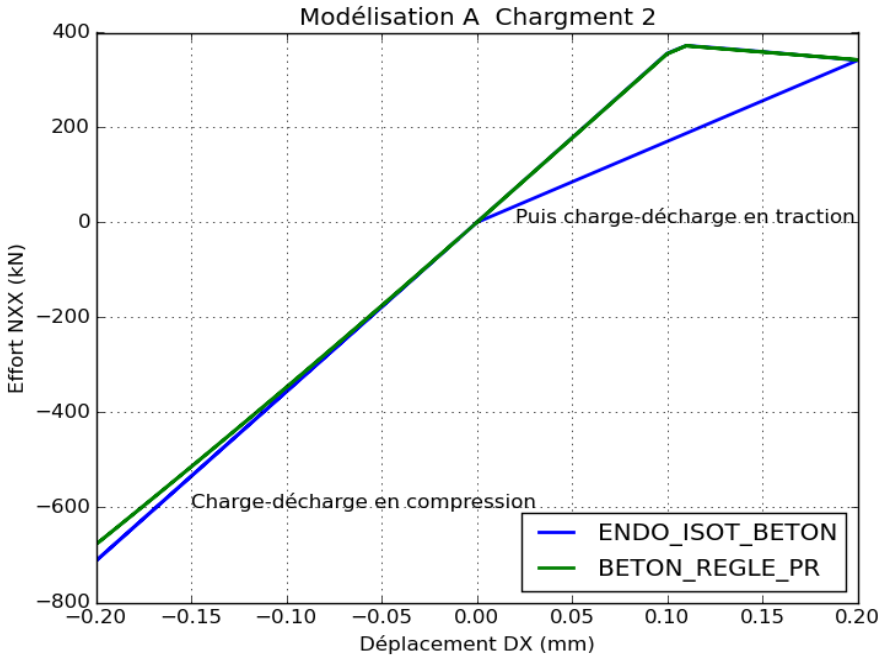
Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

3.4 Grandeurs testées et résultats pour la fonction de chargement f2

On compare les forces de réaction selon l'axe Ox et les déplacements selon l'axe Oy en $A4$ obtenus par la modélisation multicouche avec la loi ENDO_ISOT_BETON et par celle reposant sur la loi BETON_REGLE_PR, en termes de différences relatives ; la tolérance est prise en valeur absolue sur ces différences relatives :

Identification	Type de référence	Valeur de référence	tolérance
COMPR. - PHASE CHAR. ELAS. $t=0,25$			
Différence relative des efforts N_{xx}	AUTRE_ASTER	0	$3\ 10^{-2}$
COMPR. - PHASE CHAR. ENDO. $t=1,0$			
Différence relative des efforts N_{xx}	AUTRE_ASTER	0	$5\ 10^{-2}$
COMPR. - PHASE DECHAR. ELAS. $t=1,5$			
Différence relative des efforts N_{xx}	AUTRE_ASTER	0	$3\ 10^{-2}$
COMPR. - PHASE DECHAR. ELAS. $t=2,25$			
Différence relative des efforts N_{xx}	AUTRE_ASTER	0	$1\ 10^{-2}$
TRAC. - PHASE CHAR. ELAS. $t=3,0$			
Différence relative des efforts N_{xx}	AUTRE_ASTER	0	$1\ 10^{-1}$
TRAC. - PHASE DECHAR. ELAS. $t=3,5$			
Différence relative des efforts N_{xx}	AUTRE_ASTER	0	1.1

Diagrammes comparés N_{xx} – déplacement DX en traction/compression pour le chargement $f2$:



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

3.5 Remarques

D'après les courbes précédentes, on constate que le modèle multicouche avec la loi BETON_REGLE_PR représente le comportement global du béton armé en traction – compression pure d'une manière satisfaisante en charge. Cependant en décharge, la loi BETON_REGLE_PR suit la même courbe que la charge à la différence de la loi ENDO_ISOT_BETON.

L'effet de Poisson n'est pas modélisé par la loi BETON_REGLE_PR, on obtient donc un déplacement nul dans la direction transverse DY.

On observe une symétrie de la réponse selon le sens choisi de charge compression-traction ou inverse, selon le chargement $f1$ ou $f2$ pour la loi BETON_REGLE_PR .

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

4 Modélisation B

4.1 Caractéristiques de la modélisation

Le chargement est de type flexion pure alternée.

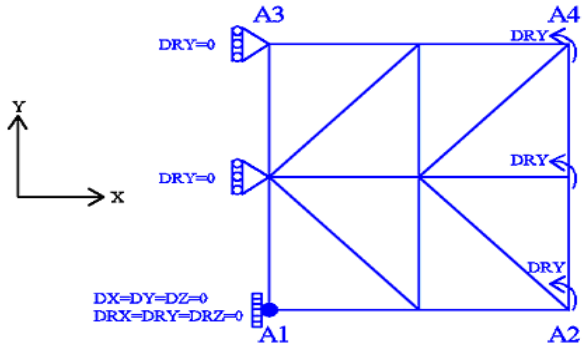


Figure 4.1-a: maillage et conditions aux limites

Modélisation : DKT
Conditions aux limites :

- $DRY = 0.0$ sur l'arête $A_1 - A_3$
- $DRY = R_0 \times f(t)$ sur l'arête $A_2 - A_4$,

où $R_0 = 6 \times 10^{-3}$ et $f(t)$ est l'amplitude du chargement cyclique en fonction du paramètre (de pseudo-temps) t , Pour bien vérifier le modèle, on considère trois fonctions de chargements comme :

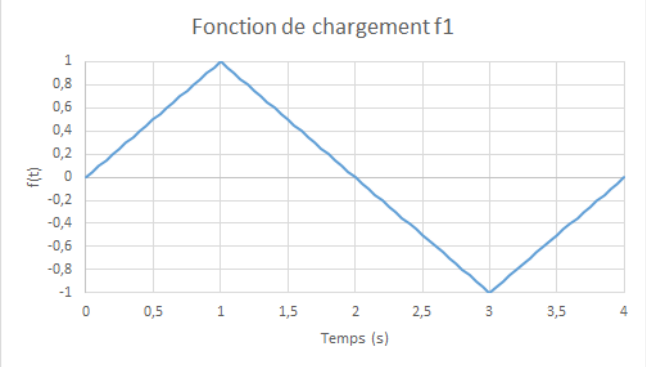


Figure 4.1-b: flexion négative, puis flexion positive

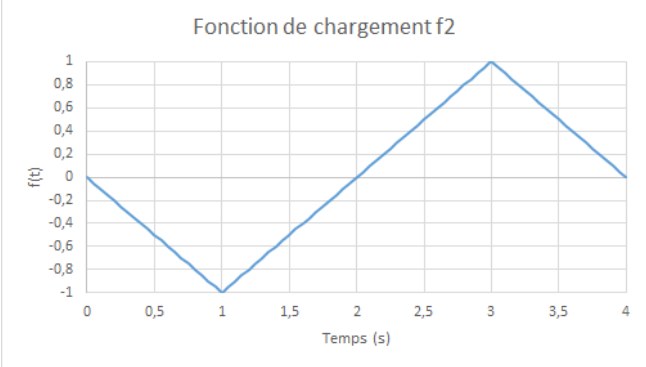


Figure 4.1-c: flexion positive, puis flexion négative

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

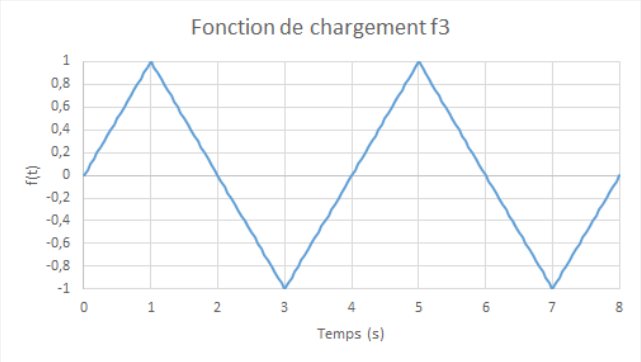


Figure 4.1-d: deux cycles de flexion alternée

Note : la déformation extrémale des aciers est : 2.4×10^{-3} *, soit en-deçà du passage en plasticité des aciers. Incrément d'intégration :* $0.05\ s$.

4.2 Caractéristiques du maillage

Nombre de nœuds : 9. Nombre de mailles : 8 TRIA3.

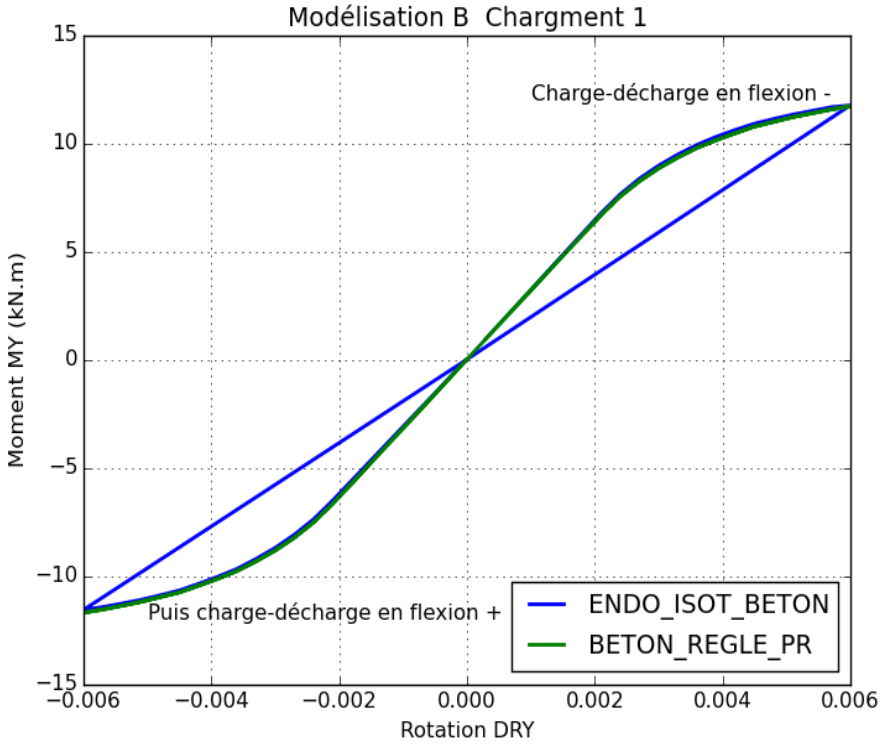
4.3 Grandeurs testées et résultats pour la fonction de chargement f1

On compare la somme des moments selon l'axe Oy en $A1-A3$ et les rotations selon l'axe Ox en $A4$ obtenus par la modélisation multicouche avec la loi ENDO_ISOT_BETON et par celle reposant sur la loi BETON_REGLE_PR, en termes de différences relatives ; la tolérance est prise en valeur absolue sur ces différences relatives.

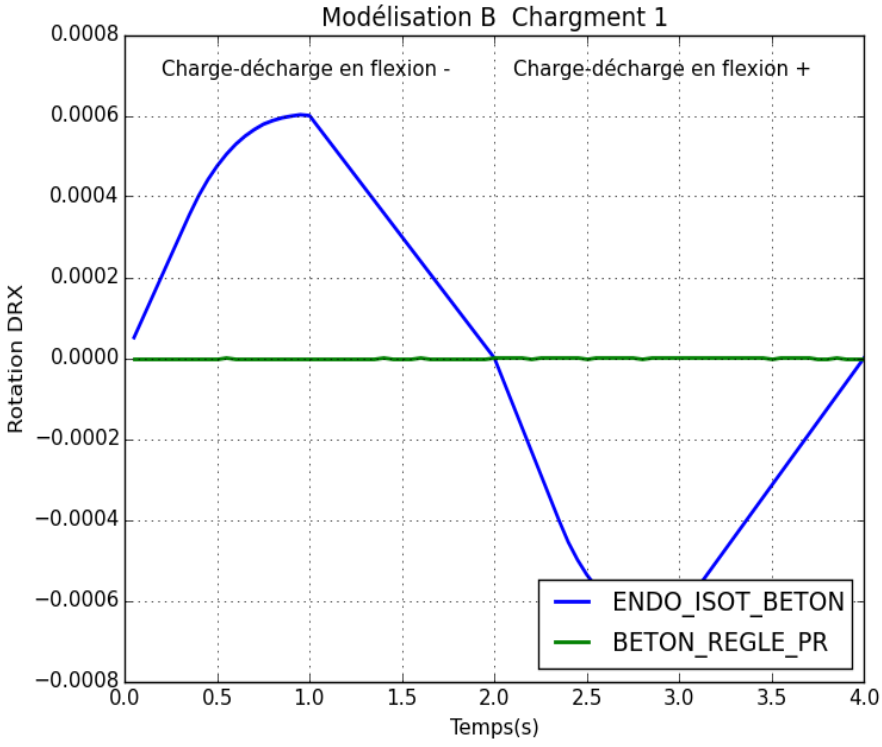
Identification	Type de référence	Valeur de référence	Tolérance
FLEXION NEG - PHASE CHAR. ELAS. $t=0,25$			
Différence relative des moments M_{yy}	AUTRE_ASTER	0	$3\ 10^{-2}$
Différence relative des rotations DRX	NON_REGRESSION	-	$1\ 10^{-6}$
FLEXION NEG - PHASE CHAR. ENDO. $t=1,0$			
Différence relative des moments M_{yy}	AUTRE_ASTER	0	$1\ 10^{-2}$
Différence relative des rotations DRX	NON_REGRESSION	-	$1\ 10^{-6}$
FLEXION NEG - PHASE DECHAR. ELAS. $t=1,5$			
Différence relative des moments M_{yy}	AUTRE_ASTER	0	$6\ 10^{-1}$
Différence relative des rotations DRX	NON_REGRESSION	-	$1\ 10^{-6}$
FLEXION POS. - PHASE CHAR. ELAS. $t=2,25$			
Différence relative des moments M_{yy}	AUTRE_ASTER	0	$3\ 10^{-2}$
Différence relative des rotations DRX	NON_REGRESSION	-	$1\ 10^{-6}$
FLEXION POS. - PHASE CHAR. ENDO. $t=3,0$			
Différence relative des moments M_{yy}	AUTRE_ASTER	0	$2\ 10^{-2}$
Différence relative des rotations DRX	NON_REGRESSION	-	$1\ 10^{-6}$
FLEXION POS. - PHASE DECHAR. ELAS. $t=3,5$			
Différence relative des moments M_{yy}	AUTRE_ASTER	0	$6\ 10^{-1}$
Différence relative des rotations DRX	NON_REGRESSION	-	$1\ 10^{-6}$

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

Diagrammes comparés moment/rotation en flexion cyclique pour le chargement $f1$:



Diagrammes comparés rotation DRX (due à l'effet de Poisson) en fonction du temps pour le chargement $f1$:



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

4.4 Grandeurs testées et résultats pour la fonction de chargement f2

On compare les moments selon l'axe Oy en $A1-A3$ et les rotations selon l'axe Ox en $A4$ obtenus par la modélisation multicouche avec la loi ENDO_ISOT_BETON et par celle reposant sur la loi BETON_REGLE_PR, en termes de différences relatives ; certaines tolérances sont prises en valeur absolue :

Identification	Type de référence	Valeur de référence	Tolérance
FLEXION NEG. - PHASE CHAR. ELAS. $t=0,25$			
Différence relative des moments M_{yy}	AUTRE_ASTER	0	$3\ 10^{-2}$
Différence relative des rotations DRX	NON_REGRESSION	-	$1\ 10^{-6}$
FLEXION NEG. - PHASE CHAR. ENDO. $t=1,0$			
Différence relative des moments M_{yy}	AUTRE_ASTER	0	$1\ 10^{-2}$
Différence relative des rotations DRX	NON_REGRESSION	-	$1\ 10^{-6}$
FLEXION NEG. - PHASE DECHAR. ELAS. $t=1,5$			
Différence relative des moments M_{yy}	AUTRE_ASTER	0	$6\ 10^{-1}$
Différence relative des rotations DRX	NON_REGRESSION	-	$1\ 10^{-6}$
FLEXION POS. - PHASE CHAR. ELAS. $t=2,25$			
Différence relative des moments M_{yy}	AUTRE_ASTER	0	$3\ 10^{-2}$
Différence relative des rotations DRX	NON_REGRESSION	-	$1\ 10^{-6}$
FLEXION POS. - PHASE CHAR. ENDO. $t=3,0$			
Différence relative des moments M_{yy}	AUTRE_ASTER	0	$2\ 10^{-2}$
Différence relative des rotations DRX	NON_REGRESSION	-	$1\ 10^{-6}$
FLEXION POS. - PHASE DECHAR. ELAS. $t=3,5$			
Différence relative des moments M_{yy}	AUTRE_ASTER	0	$6\ 10^{-1}$
Différence relative des rotations DRX	NON_REGRESSION	-	$1\ 10^{-6}$

On vérifie bien que ces résultats sont identiques à ceux obtenus avec le chargement $f1$ (en sens opposé).

4.5 Grandeurs testées et résultats pour la fonction de chargement f3

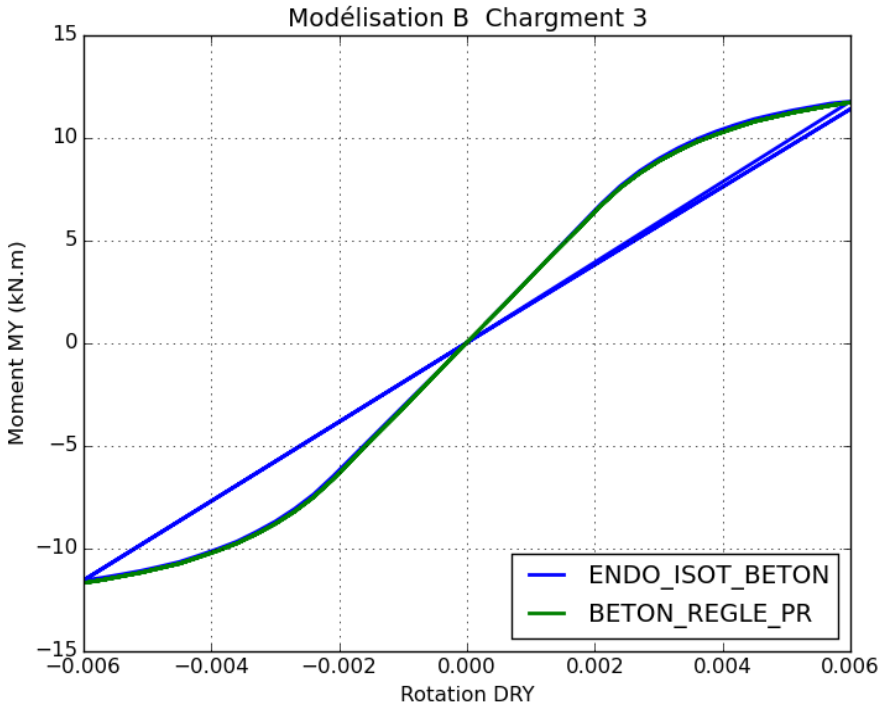
On compare les moments selon l'axe Oy en $A1-A3$ et les rotations selon l'axe Ox en $A4$ obtenus par la modélisation multicouche avec la loi ENDO_ISOT_BETON et par celle reposant sur la loi BETON_REGLE_PR, en termes de différences relatives :

Identification	Type de référence	Valeur de référence	Tolérance
FLEXION NEG. - PHASE CHAR. ELAS. $t=4,25$			
Différence relative des moments M_{yy}	AUTRE_ASTER	0	$7\ 10^{-1}$
Différence relative des rotations DRX	NON_REGRESSION	-	$1\ 10^{-6}$
FLEXION NEG. - PHASE CHAR. ENDO. $t=5,0$			
Différence relative des moments M_{yy}	AUTRE_ASTER	0	$3\ 10^{-2}$
Différence relative des rotations DRX	NON_REGRESSION	-	$1\ 10^{-6}$
FLEXION NEG. - PHASE DECHAR. ELAS. $t=1,5$			
Différence relative des moments M_{yy}	AUTRE_ASTER	0	$6\ 10^{-1}$
Différence relative des rotations DRX	NON_REGRESSION	-	$1\ 10^{-6}$
FLEXION POS. - PHASE CHAR. ELAS. $t=2,25$			

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

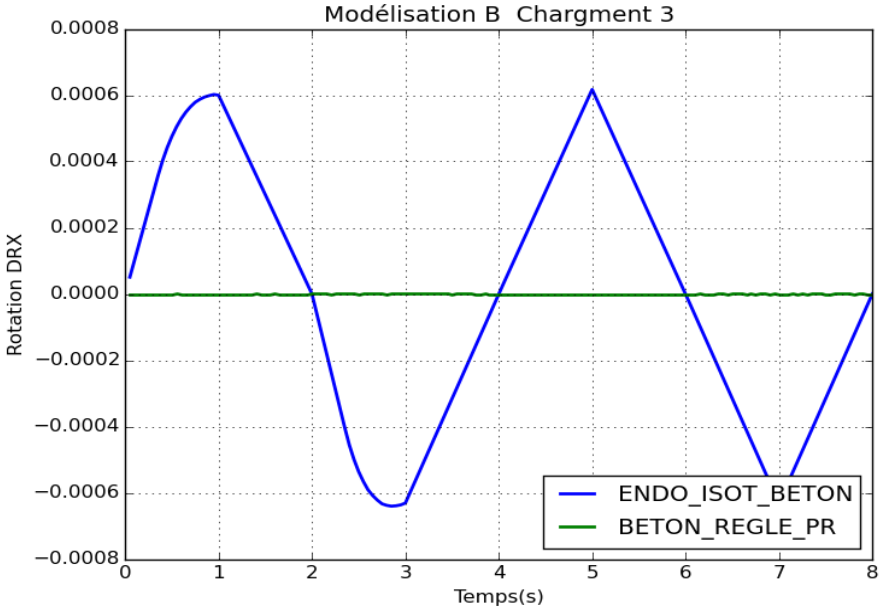
Différence relative des moments	M_{yy}	AUTRE_ASTER	0	3 10^{-2}
Différence relative des rotations	DRX	NON_REGRESSION	-	1 10^{-6}
FLEXION POS. - PHASE CHAR. ENDO.	$t=3,0$			
Différence relative des moments	M_{yy}	AUTRE_ASTER	0	2 10^{-2}
Différence relative des rotations	DRX	NON_REGRESSION	-	1 10^{-6}
FLEXION POS. - PHASE DECHAR. ELAS.	$t=3,5$			
Différence relative des moments	M_{yy}	AUTRE_ASTER	0	6 10^{-1}
Différence relative des rotations	DRX	NON_REGRESSION	-	1 10^{-6}

Diagrammes comparés moment/rotation en flexion cyclique pour le chargement $f3$:



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

Diagrammes comparés rotation DRX (due à l'effet de Poisson) en fonction du temps pour le chargement $f3$:



4.6 Remarques

D'après les courbes précédentes, on constate que le modèle multicouche avec la loi BETON_REGLE_PR représente le comportement global du béton armé en flexion – + d'une manière satisfaisante en charge. Cependant en décharge, la loi BETON_REGLE_PR suit la même courbe que la charge à la différence de la loi ENDO_ISOT_BETON.

L'effet de Poisson n'est pas modélisé par la loi BETON_REGLE_PR, on obtient donc une rotation nulle dans la direction DRX.

On observe une symétrie de la réponse selon le sens choisi de charge flexion – et + ou le cas opposé, selon le chargement $f1$ ou $f2$ pour la loi BETON_REGLE_PR .

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

5 Modélisation C

5.1 Caractéristiques de la modélisation

Le chargement est un couplage traction – compression et flexion.

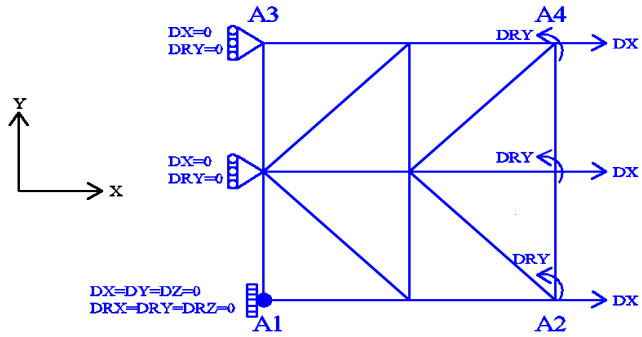


Figure 5.1-a: maillage et conditions aux limites

Modélisation : DKT
Conditions aux limites : couplage de Traction – Compression et Flexion :

- $DX=0.0$ et $DRY=0.0$ sur l'arête A_1-A_3
- $DX=U_0\times f(t)$ et $DRY=R_0\times f(t)$ sur l'arête A_2-A_4 ,

où $U_0=1.5\times10^{-4}m$, $R_0=5.\times10^{-3}rad$ et $f(t)$ est l'amplitude du chargement cyclique en fonction du paramètre (de pseudo-temps) t . On considère deux types de chargement :

- La même fonction $f1$ de chargement pour la membrane et la flexion (cas synchrone) :

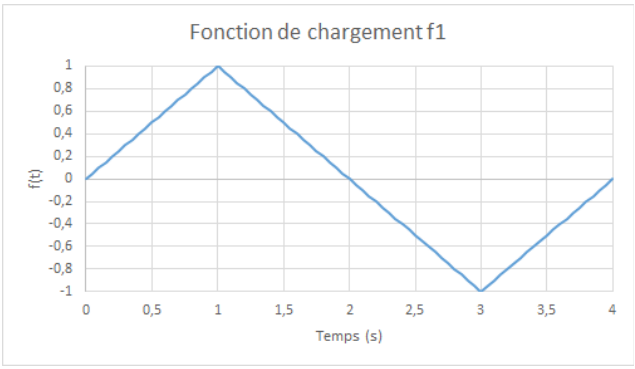


Figure 5.1-b: fonction de chargement f1

- La fonction $f2$ de chargement de membrane deux fois plus rapide que celui de flexion (en pratique les fréquences de membrane d'une dalle sont supérieures à celles de flexion) :

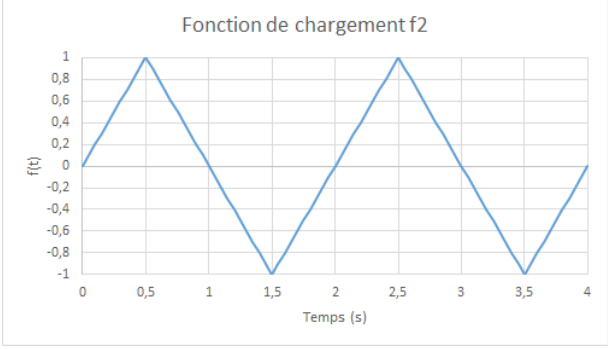


Figure 5.1-c: fonction de chargement f2

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

5.2 Caractéristiques du maillage

Nombre de nœuds : 9. Nombre de mailles : 8 TRIA3 ; 8 SEG2.

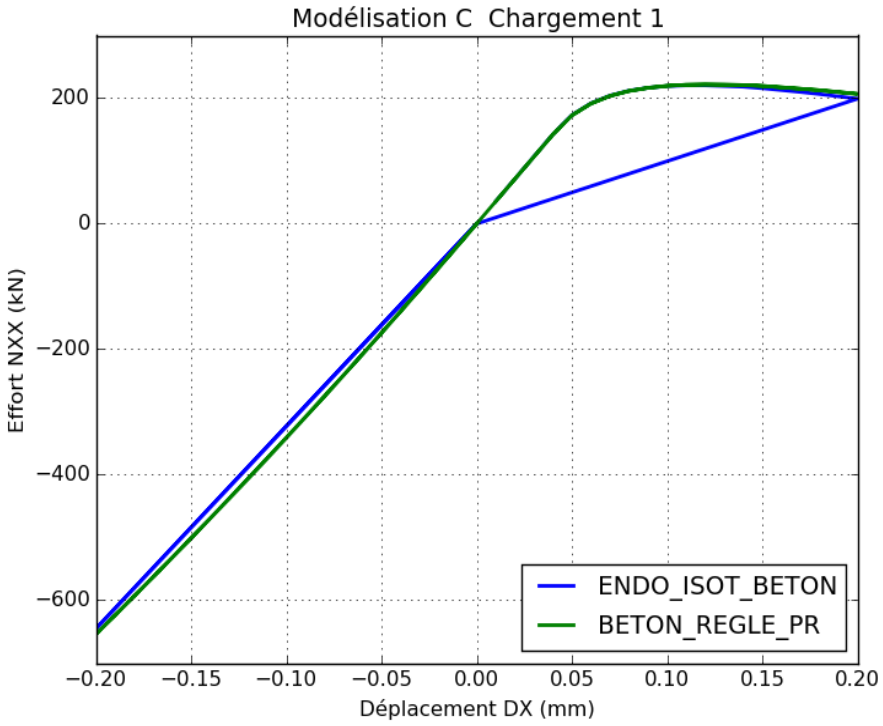
5.3 Grandeurs testées et résultats : premier chargement (même fonction de chargement pour membrane et flexion)

On compare la somme des forces selon l'axe Ox en $A1-A3$, les déplacements selon l'axe Oy en $A4$, les moments selon l'axe Oy en $A1-A3$ et les rotations selon l'axe Ox en $A4$ obtenus par la modélisation multicouche avec la loi ENDO_ISOT_BETON et par celle reposant sur la loi BETON_REGLE_PR, en termes de différences relatives ; les tolérances sont prises en valeur absolue:

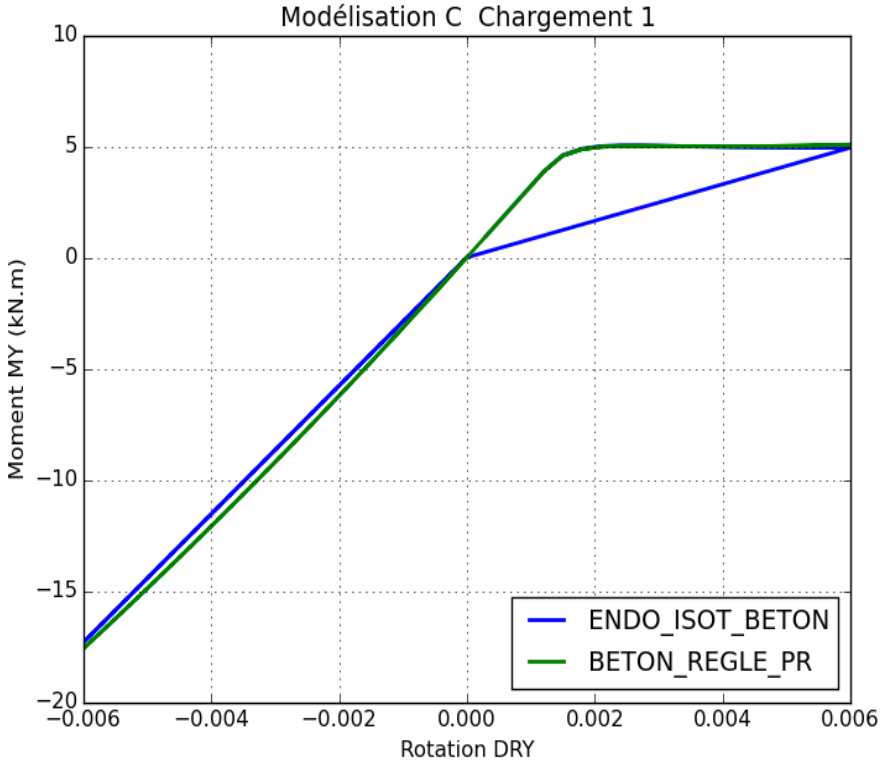
Identification	Type de référence	Valeur de référence	Tolérance
PHASE ELASTIQUE $t=0,25$			
Différence relative des efforts N_{xx}	NON_REGRESSION	-	1 10^{-6}
Différence relative des déplacements DY	NON_REGRESSION	-	1 10^{-6}
Différence relative des moments M_{yy}	NON_REGRESSION	-	1 10^{-6}
Différence relative des rotations DRX	NON_REGRESSION	-	1 10^{-6}
PHASE ENDOMMAGEMENT $t=1,0$			
Différence relative des efforts N_{xx}	NON_REGRESSION	-	1 10^{-6}
Différence relative des déplacements DY	NON_REGRESSION	-	1 10^{-6}
Différence relative des moments M_{yy}	NON_REGRESSION	-	1 10^{-6}
Différence relative des rotations DRX	NON_REGRESSION	-	1 10^{-6}
PHASE DECHARGEMENT $t=1,5$			
Différence relative des efforts N_{xx}	NON_REGRESSION	-	1 10^{-6}
Différence relative des déplacements DY	NON_REGRESSION	-	1 10^{-6}
Différence relative des moments M_{yy}	NON_REGRESSION	-	1 10^{-6}
Différence relative des rotations DRX	NON_REGRESSION	-	1 10^{-6}
PHASE ELASTIQUE $t=2,25$			
Différence relative des moments M_{yy}	NON_REGRESSION	-	1 10^{-6}
Différence relative des rotations DRX	NON_REGRESSION	-	1 10^{-6}
PHASE RECHARGEMENT $t=3,0$			
Différence relative des efforts N_{xx}	NON_REGRESSION	-	1 10^{-6}
Différence relative des déplacements DY	NON_REGRESSION	-	1 10^{-6}
Différence relative des moments M_{yy}	NON_REGRESSION	-	1 10^{-6}
Différence relative des rotations DRX	NON_REGRESSION	-	1 10^{-6}
PHASE DECHARGEMENT $t=3,5$			
Différence relative des efforts N_{xx}	NON_REGRESSION	-	1 10^{-6}
Différence relative des déplacements DY	NON_REGRESSION	-	1 10^{-6}
Différence relative des moments M_{yy}	NON_REGRESSION	-	1 10^{-6}
Différence relative des rotations DRX	NON_REGRESSION	-	1 10^{-6}

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

Diagrammes comparés des efforts N_{xx} – en fonction du déplacement DX imposé pour le chargement $f1$:

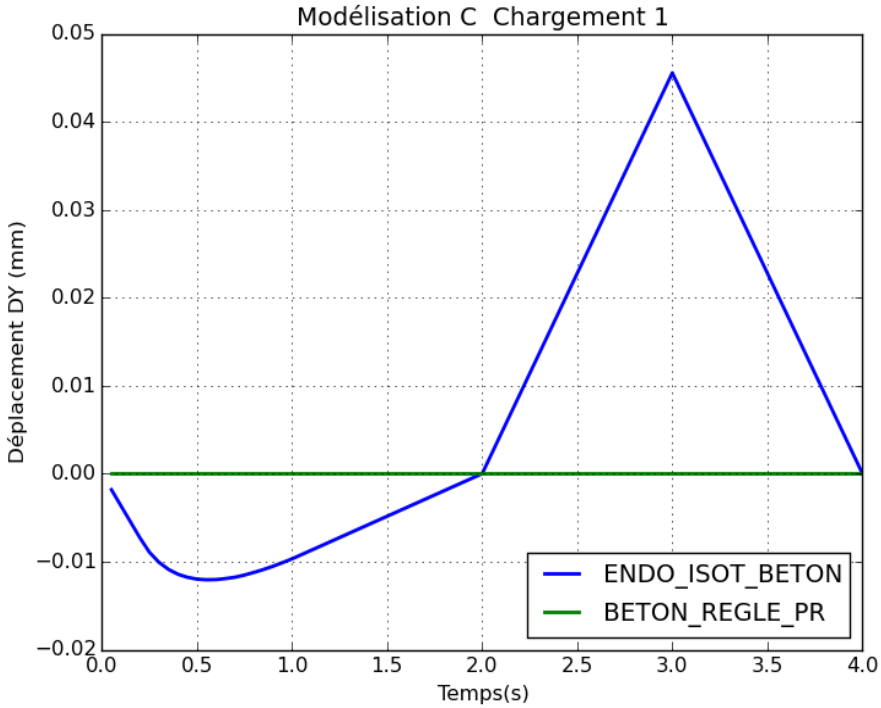


Diagrammes comparés du moment M_{yy} en fonction de la rotation DRY imposée pour le chargement $f1$:

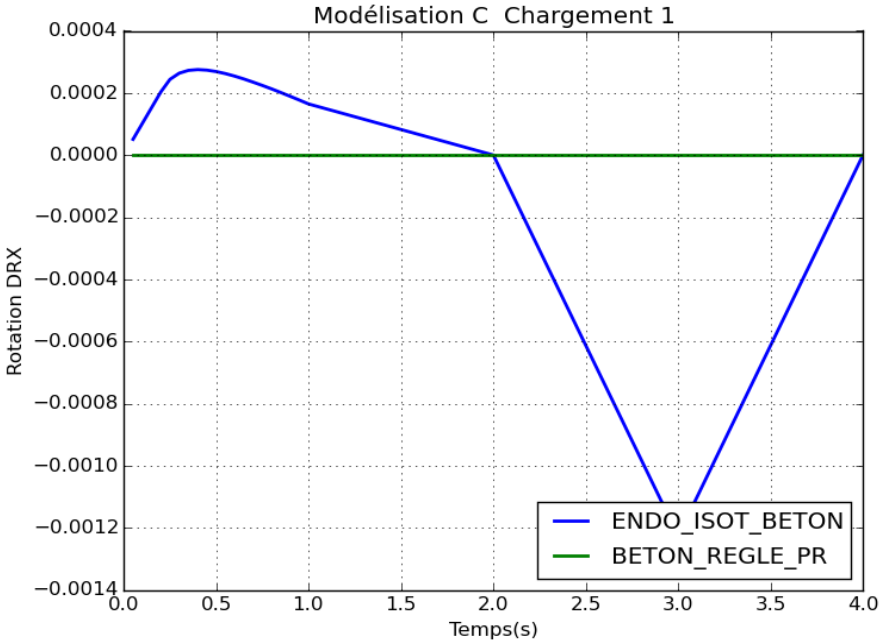


Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Diagrammes comparés déplacement DY (dû à l'effet de Poisson) pour le chargement $f1$:



Diagrammes comparés rotation DRX (due à l'effet de Poisson) pour le chargement $f1$:



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

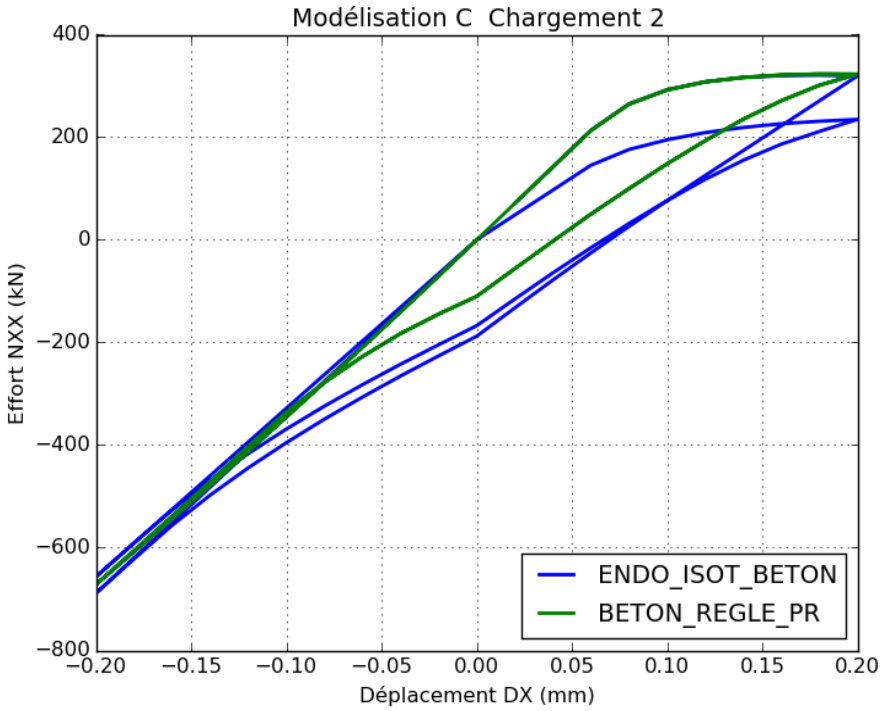
5.4 Grandeurs testées et résultats : deuxième chargement (membrane deux fois plus rapide que flexion)

On compare les forces selon l'axe Ox en $A1-A3$, les déplacements selon l'axe Oy en $A4$, les moments selon l'axe Oy en $A1-A3$ et les rotations selon l'axe Ox en $A4$ obtenus par la modélisation multicouche avec la loi ENDO_ISOT_BETON et par celle reposant sur la loi BETON_REGLE_PR, en termes de différences relatives ; les tolérances sont prises en valeur absolue:

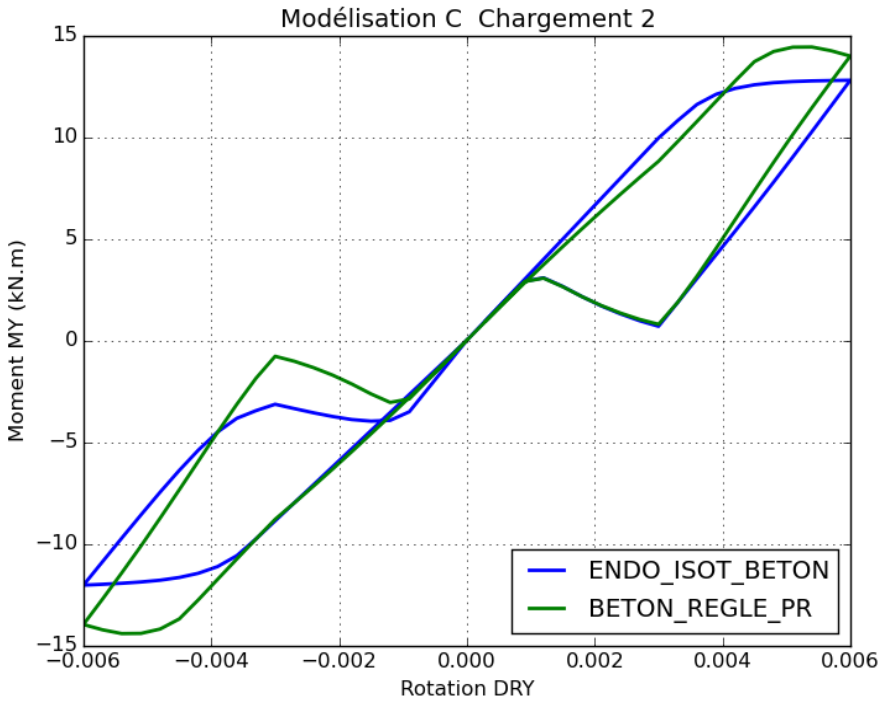
Identification	Type de référence	Valeur de référence	Tolérance
PHASE ELASTIQUE $t=0,2$			
Différence relative des efforts N_{xx}	NON_REGRESSION	-	1 10^{-6}
Différence relative des déplacements DY	NON_REGRESSION	-	1 10^{-6}
PHASE ELASTIQUE $t=0,25$			
Différence relative des moments M_{yy}	NON_REGRESSION	-	1 10^{-6}
Différence relative des rotations DRX	NON_REGRESSION	-	1 10^{-6}
PHASE ENDOMMAGEMENT $t=0,5$			
Différence relative des efforts N_{xx}	NON_REGRESSION	-	1 10^{-6}
Différence relative des déplacements DY	NON_REGRESSION	-	1 10^{-6}
PHASE ENDOMMAGEMENT $t=1,0$			
Différence relative des moments M_{yy}	NON_REGRESSION	-	1 10^{-6}
Différence relative des rotations DRX	NON_REGRESSION	-	1 10^{-6}
PHASE DECHARGEMENT $t=1,5$			
Différence relative des efforts N_{xx}	NON_REGRESSION	-	1 10^{-6}
Différence relative des déplacements DY	NON_REGRESSION	-	1 10^{-6}
Différence relative des moments M_{yy}	NON_REGRESSION	-	1 10^{-6}
Différence relative des rotations DRX	NON_REGRESSION	-	1 10^{-6}
PHASE ELASTIQUE $t=2,25$			
Différence relative des moments M_{yy}	NON_REGRESSION	-	1 10^{-6}
Différence relative des rotations DRX	NON_REGRESSION	-	1 10^{-6}
PHASE ELASTIQUE $t=2,5$			
Différence relative des efforts N_{xx}	NON_REGRESSION	-	1 10^{-6}
Différence relative des déplacements DY	NON_REGRESSION	-	1 10^{-6}
PHASE RECHARGEMENT $t=3,0$			
Différence relative des moments M_{yy}	NON_REGRESSION	-	1 10^{-6}
Différence relative des rotations DRX	NON_REGRESSION	-	1 10^{-6}
PHASE DECHARGEMENT $t=3,5$			
Différence relative des efforts N_{xx}	NON_REGRESSION	-	1 10^{-6}
Différence relative des déplacements DY	NON_REGRESSION	-	1 10^{-6}
Différence relative des moments M_{yy}	NON_REGRESSION	-	1 10^{-6}
Différence relative des rotations DRX	NON_REGRESSION	-	1 10^{-6}

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

Diagrammes comparés de la force FX (efforts N_{xx}) – en fonction du déplacement DX imposé pour le chargement $f2$:

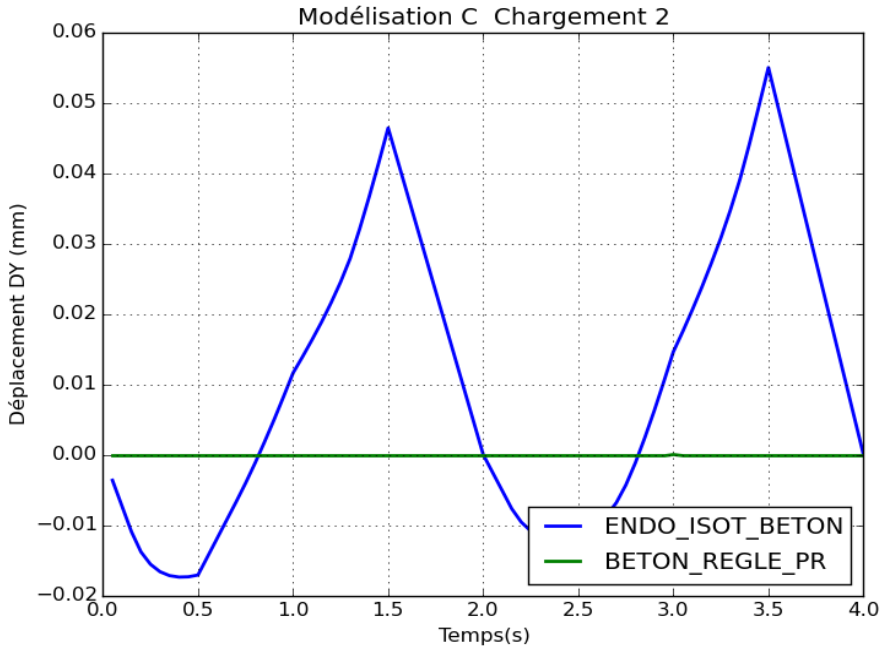


Diagrammes comparés moment M_{yy} en fonction de la rotation DRY imposée pour le chargement $f2$:

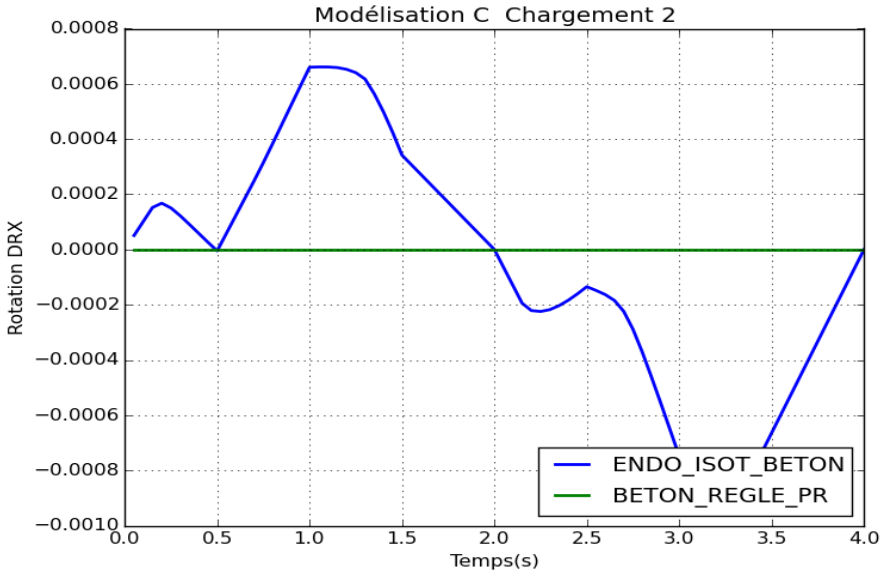


Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Diagrammes comparés déplacement DY (dû à l'effet de Poisson) pour le chargement $f2$:



Diagrammes comparés rotation DRX (due à l'effet de Poisson) pour le chargement $f2$:



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

5.5 Remarques

D'après les courbes précédentes, on constate que le modèle multicouche avec la loi BETON_REGLE_PR représente le comportement global du béton armé en flexion et traction d'une manière satisfaisante en charge. Les mêmes seuils d'endommagement sont identifiés. Cependant en décharge, la loi BETON_REGLE_PR suit la même courbe que la charge à la différence de la loi ENDO_ISOT_BETON.

L'effet de Poisson n'est pas modélisé par la loi BETON_REGLE_PR, on obtient donc une rotation nulle dans la direction DRX et un déplacement DY nul.

Pour le second chargement, on observe un comportement similaire pour le couplage de membrane-flexion entre BETON_REGLE_PR et ENDO_ISOT_BETON en charge (réponse élastique, endommagement et compression). Les mêmes seuils d'endommagement sont identifiés.

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

6 Modélisation D

6.1 Caractéristiques de la modélisation

Le chargement est de type distorsion et cisaillement pur dans le plan.

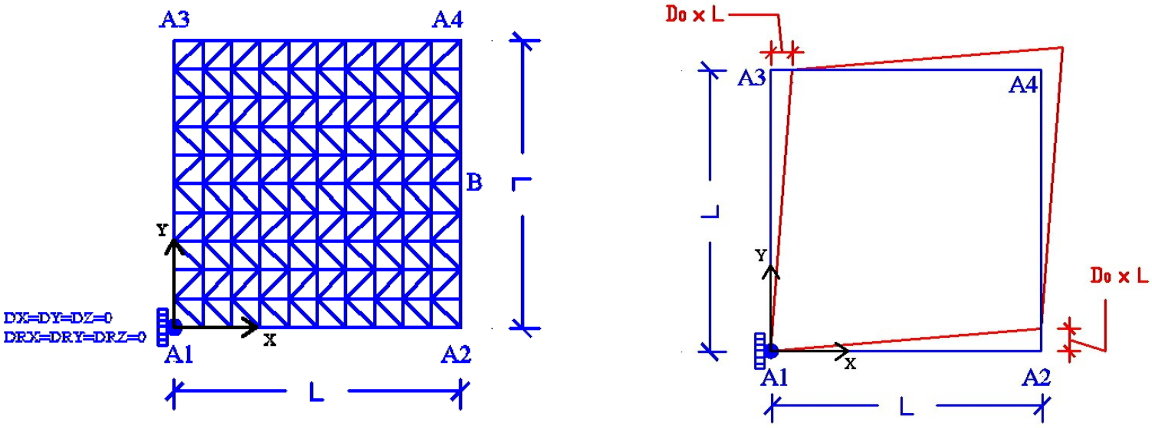


Figure 6.1-a: maillage et conditions aux limites

Modélisation : DKT. $L=1.0\,m$.
Conditions aux limites (voir figure ci-dessus à droite) de telle sorte que la plaque soit soumise à une distorsion pure : ε_{xy} doit être constant ou à un cisaillement pur donc on applique des efforts. Par conséquent, on applique le champ de déplacement suivant sur les bords de la plaque pour la distorsion :

$$\begin{cases} u_x = D_0 \cdot y \\ u_y = D_0 \cdot x \end{cases} \Rightarrow \varepsilon_{xy} = \frac{1}{2}\left(u_{x,y} + u_{y,x}\right) = D_0$$

Donc :

- on impose un encastrement en A_1 ,
- $u_x = D_0 \cdot y$, $u_y = 0$ sur l'arête $A_1 - A_3$, $u_x = 0$, $u_y = D_0 \cdot x$ sur l'arête $A_1 - A_2$,
- $u_x = D_0 \cdot y$, $u_y = D_0 \cdot L$ sur l'arête $A_2 - A_4$, $u_x = D_0 \cdot L$, $u_y = D_0 \cdot x$ sur l'arête $A_3 - A_4$,

où $D_0 = 3.3\,10^{-4}$ et $f(t)$ représentent l'amplitude du chargement cyclique en fonction du paramètre (de pseudo-temps) t , définie comme :

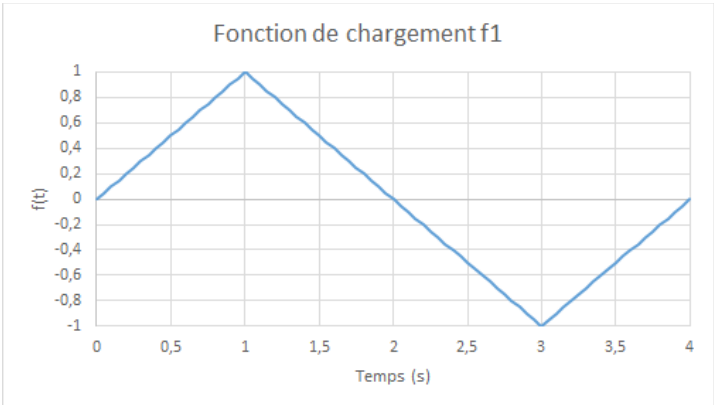


Figure 6.1-b: fonction de chargement

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

Incrément d'intégration : $0.05\,s$.

6.2 Caractéristiques du maillage

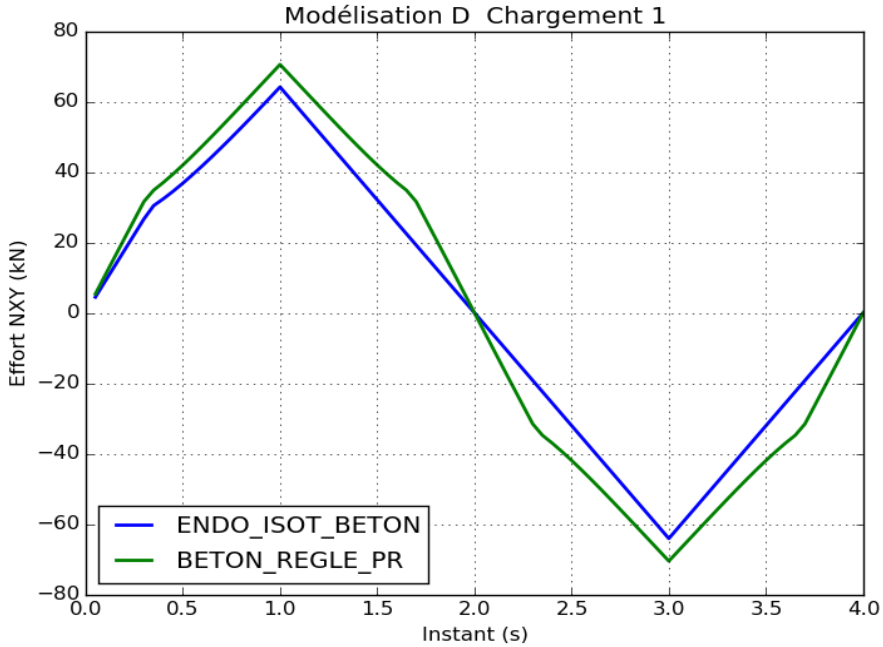
Nœuds : 121.
Mailles : 200 TRIA3 ; 40 SEG2.

6.3 Grandeurs testées et résultats

Pour la distorsion, on compare l'effort tranchant N_{xy} en B obtenu par les deux modélisations ; les tolérances sont prises en valeur absolue sur ces différences relatives :

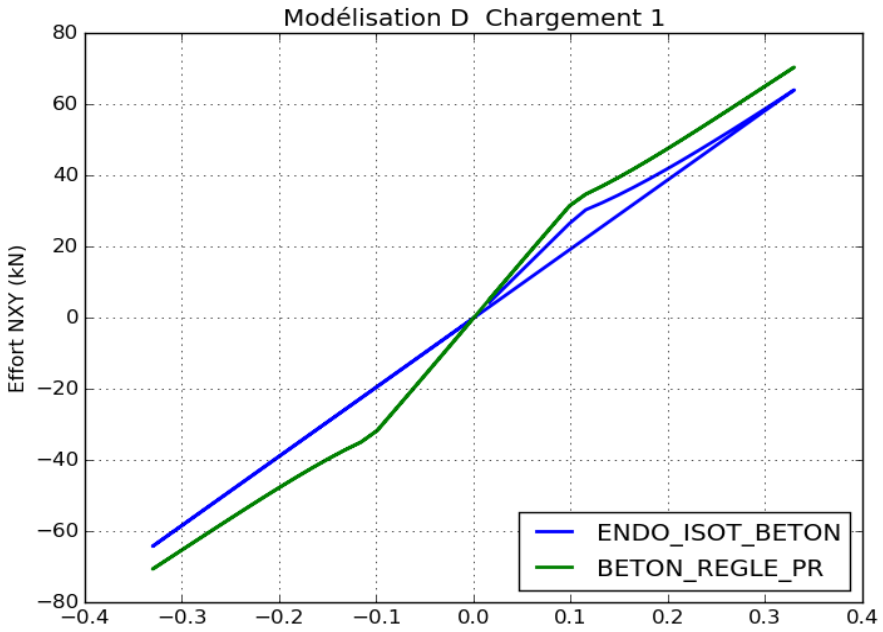
Identification	Type de référence	Valeur de référence	Tolérance
DIST. POS. - PHASE CHAR. ELAS. $t=0,25$			
Différence relative des efforts N_{xy}	AUTRE_ASTER	0	$2\ 10^{-1}$
DIST. POS. - PHASE CHAR.ENDO. $t=1,0$			
Différence relative des efforts N_{xy}	AUTRE_ASTER	0	$1\ 10^{-1}$
DIST. POS. - PHASE DECHAR. ELAS. $t=1,5$			
Différence relative des efforts N_{xy}	AUTRE_ASTER	0	$4\ 10^{-1}$
DIST. NEG. - PHASE CHAR. ELAS. $t=3,0$			
Différence relative des efforts N_{xy}	AUTRE_ASTER	0	$1\ 10^{-1}$
DIST. NEG. - PHASE DECHAR. ELAS. $t=3,5$			
Différence relative des efforts N_{xy}	AUTRE_ASTER	0	$4\ 10^{-1}$

Diagramme effort tranchant N_{xy} (dans le plan) en fonction du temps :



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

Diagramme effort tranchant N_{xy} (dans le plan) en fonction de D_0 imposé :



6.4 Remarques

On observe un comportement similaire en cisaillement pour les lois BETON_REGLE_PR et ENDO_ISOT_BETON en charge : la raideur en cisaillement est cependant plus élevée pour la loi BETON_REGLE_PR (~15%).

La réponse en décharge n'est pas prise en compte par la loi BETON_REGLE_PR (réponse élastique).

La réponse en cisaillement pour BETON_REGLE_PR est symétrique à la différence de la loi ENDO_BETON_ISOT pour laquelle on conserve la mémoire de la fissuration dans une direction.

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

7 Modélisation E

7.1 Caractéristiques de la modélisation

Le chargement est de type traction – compression pure.

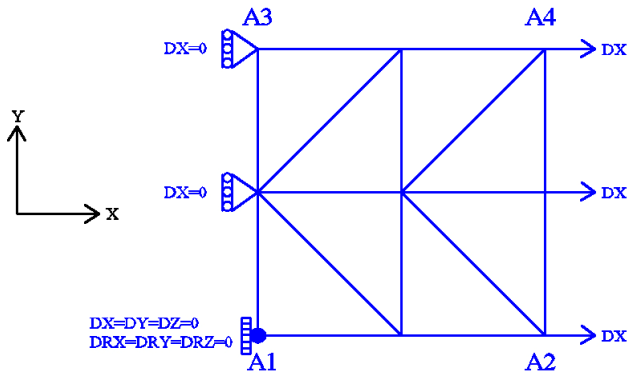


Figure 7.1-a: maillage et conditions aux limites.

Modélisation : DKTG
Conditions aux limites :

- Encastrement en A_1 ;
- $DX=0.0$ sur l'arête A_1-A_3 ;
- $DX=U_0\times f(t)$ sur l'arête A_2-A_4 ;

où $U_0=1.0\times10^{-3}m$ et $f(t)$ représentent l'amplitude du chargement cyclique en fonction du paramètre (de pseudo-temps) t . Pour bien vérifier le modèle, on considère une fonction de chargement comme suit :

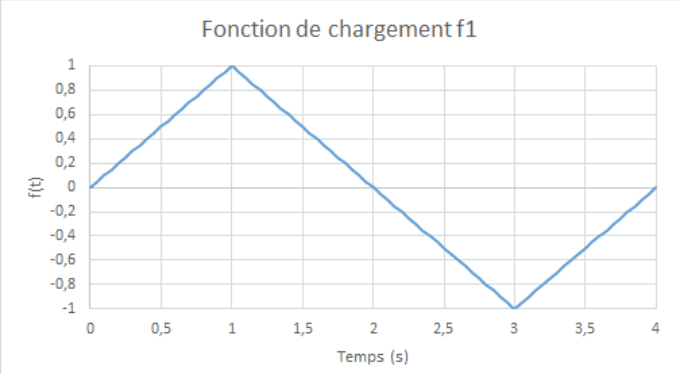


Figure 7.1-b: fonction de chargement : traction, puis compression

Note : la déformation extrémale est : 1.0×10^{-3} , soit environ le tiers de la déformation de passage en plasticité des aciers. Pas de temps d'intégration : 0.025 .

7.2 Caractéristiques du maillage

Nombre de nœuds : 9.
Nombre de mailles : 8 TRIA3 ; 8 SEG2.

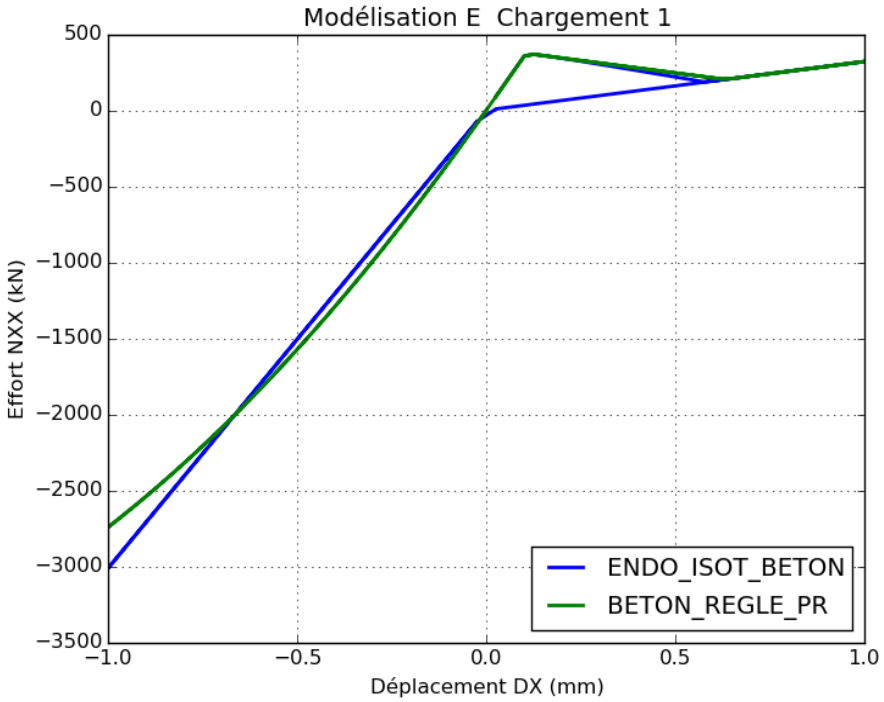
Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

7.3 Grandeurs testées et résultats

On compare les forces de réactions selon l'axe Ox en $A1-A3$ et les déplacements selon l'axe Oy en $A4$ obtenus par la modélisation multicouche avec la loi ENDO_ISOT_BETON et par celle reposant sur la loi BETON_REGLE_PR, en termes de différences relatives ; les tolérances sont prises en valeur absolue :

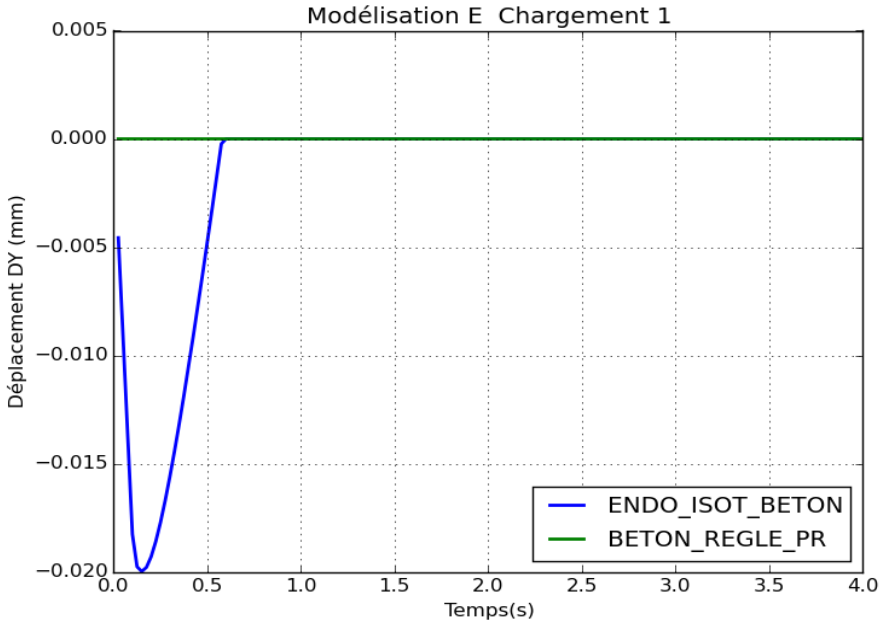
Identification	Type de référence	Valeur de référence	Tolérance
TRACTION - ELASTIQUE $t=0,25$			
Différence relative FX	NON_REGRESSION	-	$1\ 10^{-6}$
Différence relative DY	NON_REGRESSION	-	$1\ 10^{-6}$
TRACTION - ENDOMMAGEMENT $t=1,0$			
Différence relative FX	NON_REGRESSION	-	$1\ 10^{-6}$
TRACTION - DECHARGEMENT $t=1,5$			
Différence relative FX	NON_REGRESSION	-	$1\ 10^{-6}$
COMPRESSION - CHARGEMENT $t=2,5$			
Différence relative FX	NON_REGRESSION	-	$1\ 10^{-6}$
COMPRESSION - DECHARGEMENT $t=3,5$			
Différence relative FX	NON_REGRESSION	-	$1\ 10^{-6}$

Diagrammes comparés des efforts N_{xx} – déplacement DX en traction – compression pour le chargement f :



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

Diagrammes comparés déplacement DY (dû à l'effet de Poisson) en fonction du temps :



7.4 Remarques

Le cas test effectué ici vise à tester le modèle BETON_REGLE_PR sous des sollicitations assez importantes pour qu'apparaisse effectivement la reprise de raideur des aciers.

Le comportement est similaire en traction pour les lois BETON_REGLE_PR et ENDO_ISOT_BETON en charge : les différences apparaissent pour une compression importante en raison de la réponse parabolique de la loi BETON_REGLE_PR. En traction, après la ruine du béton, on retrouve la raideur correspondant à la reprise des efforts par l'acier.

La réponse en décharge n'est pas prise en compte par la loi BETON_REGLE_PR (réponse élastique)
La déformation due à l'effet poisson n'est pas prise en compte par la loi BETON_REGLE_PR . Pour la loi ENDO_ISOT_BETON, les déplacements DY sont non nuls avant l'apparition de la ruine du béton autour de 0.1 s.

La convergence du modèle avec la loi BETON_REGLE_PR est difficile autour de l'instant 0.6 s (reprise de raideur) avec la matrice TANGENTE, on utilise alors la matrice ELASTIQUE .

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

8 Modélisation F

8.1 Caractéristiques de la modélisation

Le chargement est de type flexion pure alternée.

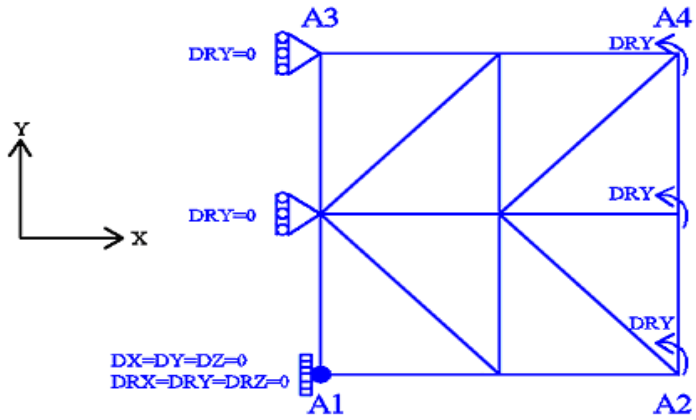


Figure 8.1-a: maillage et conditions aux limites

Modélisation : DKTG
Conditions aux limites :

- $DRY = 0.0$ sur l'arête $A_1 - A_3$
- $DRY = R_0 \times f(t)$ sur l'arête $A_2 - A_4$,

où $R_0 = 3.0 \times 10^{-2}$ et $f(t)$ est l'amplitude du chargement cyclique en fonction du paramètre (de pseudo-temps) t .
Pour vérifier le modèle, on considère la fonction de chargement suivante :

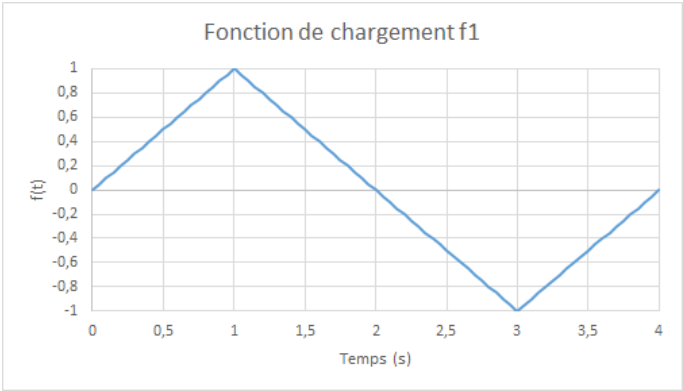


Figure 8.1-b: fonction de chargement

8.2 Caractéristiques du maillage

Nombre de nœuds : 9.
Nombre de mailles : 8 TRIA3 ; 8 SEG2.

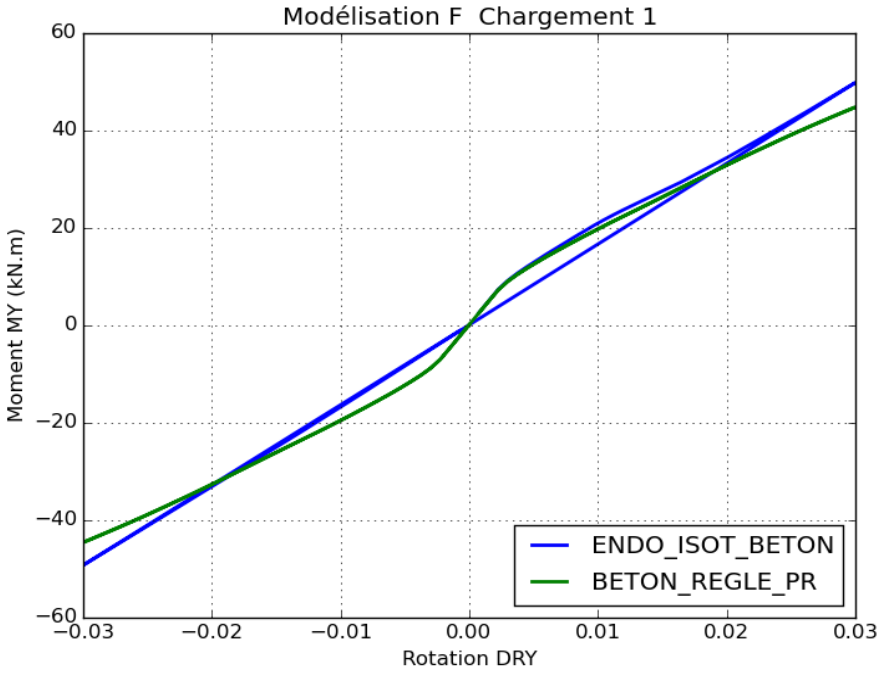
Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

8.3 Grandeurs testées et résultats

On compare les moments de réactions selon l'axe Oy en $A1-A3$ et les rotations selon l'axe Ox en $A4$ obtenus par la modélisation multicouche avec la loi ENDO_ISOT_BETON et par celle reposant sur la loi BETON_REGLE_PR, en termes de différences relatives ; les tolérances sont prises en valeur absolue :

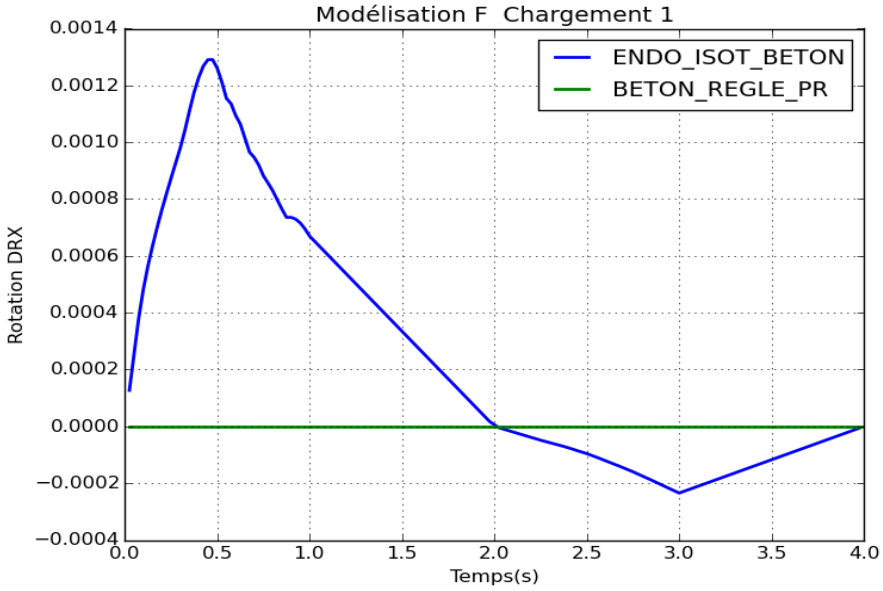
Identification	Type de référence	Valeur de référence	Tolérance
FLEXION POSITIVE - ELASTIQUE $t=0,25$			
Différence relative MY	NON_REGRESSION	-	1 10^{-6}
Différence relative DRX	NON_REGRESSION	-	1 10^{-6}
FLEXION POSITIVE - ENDOMMAGEMENT $t=1,0$			
Différence relative MY	NON_REGRESSION	-	1 10^{-6}
FLEXION POSITIVE - DECHARGEMENT $t=1,5$			
Différence relative MY	NON_REGRESSION	-	1 10^{-6}
FLEXION NEGATIVE – ELASTIQUE $t=2,25$			
Différence relative MY	NON_REGRESSION	-	1 10^{-6}
FLEXION NEGATIVE - ENDOMMAGEMENT $t=3,0$			
Différence relative MY	NON_REGRESSION	-	1 10^{-6}
FLEXION NEGATIVE - DECHARGEMENT $t=3,5$			
Différence relative MY	NON_REGRESSION	-	1 10^{-6}

Diagrammes comparés moment MY – rotation DRY en flexion alternée pour le chargement f :



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

Diagrammes comparés rotation DRX (dû à l'effet de Poisson) en fonction du temps :



8.4 Remarques

Le cas test effectué ici vise à tester le modèle BETON_REGLE_PR sous des sollicitations assez importantes pour qu'apparaisse effectivement la reprise de raideur des aciers.

Le comportement est similaire en flexion pour les lois BETON_REGLE_PR et ENDO_ISOT_BETON en charge : les différences apparaissent pour les chargements importants en raison de la différence de comportement en compression.

La réponse en décharge n'est pas prise en compte par la loi BETON_REGLE_PR (réponse élastique). On observe une symétrie de la réponse pour la loi BETON_REGLE_PR .

La rotation DRX est nul avec la loi BETON_REGLE_PR car l'effet Poisson n'est pas pris en compte.

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

9 Modélisation G

9.1 Caractéristiques de la modélisation

Le chargement est un couplage traction – compression et flexion.

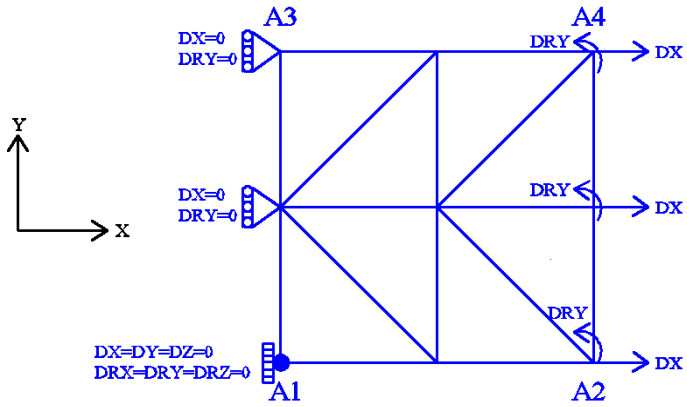


Figure 9.1-a: maillage et conditions aux limites

Modélisation : DKTG
Conditions aux limites : couplage de Traction – Compression et Flexion :

- $DX=0.0$ et $DRY=0.0$ sur l'arête A_1-A_3
- $DX=U_0\times f(t)$ et $DRY=R_0\times f(t)$ sur l'arête A_2-A_4 ,

où $U_0=1.\times10^{-3}m$, $R_0=3.\times10^{-2}rad$ et $f(t)$ est l'amplitude du chargement cyclique en fonction du paramètre (de pseudo-temps) t .
On considère le chargement suivant :
La même fonction f de chargement pour la membrane et la flexion :

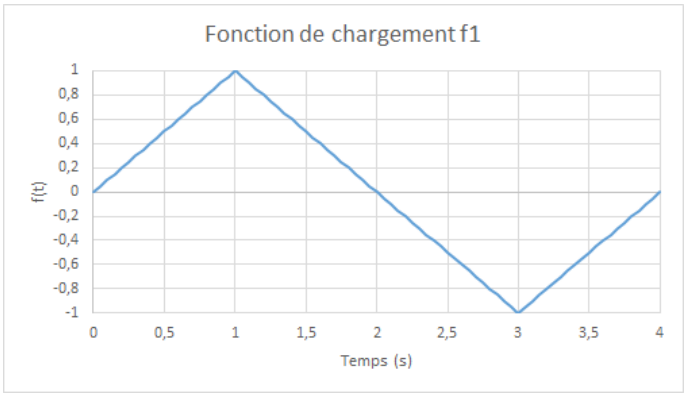


Figure 9.1-b: fonction de chargement

9.2 Caractéristiques du maillage

Nombre de nœuds : 9.
Nombre de mailles : 8 TRIA3 ; 8 SEG2.

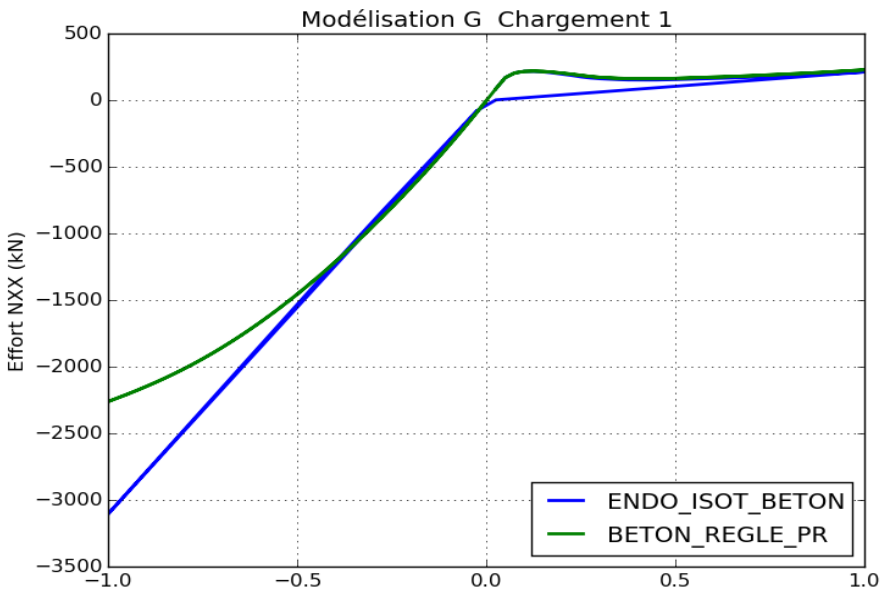
Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

9.3 Grandeurs testées et résultats

On compare les forces selon l'axe Ox en $A1-A3$, les déplacements selon l'axe Oy en $A4$, les moments selon l'axe Oy en $A1-A3$ et les rotations selon l'axe Ox en $A4$ obtenus par la modélisation multicouche (référence) et par celles reposant sur le modèle ENDO_ISOT_BETON , en terme s de différences relatives; la tolérance est prise en valeur absolue sur ces différences relatives :

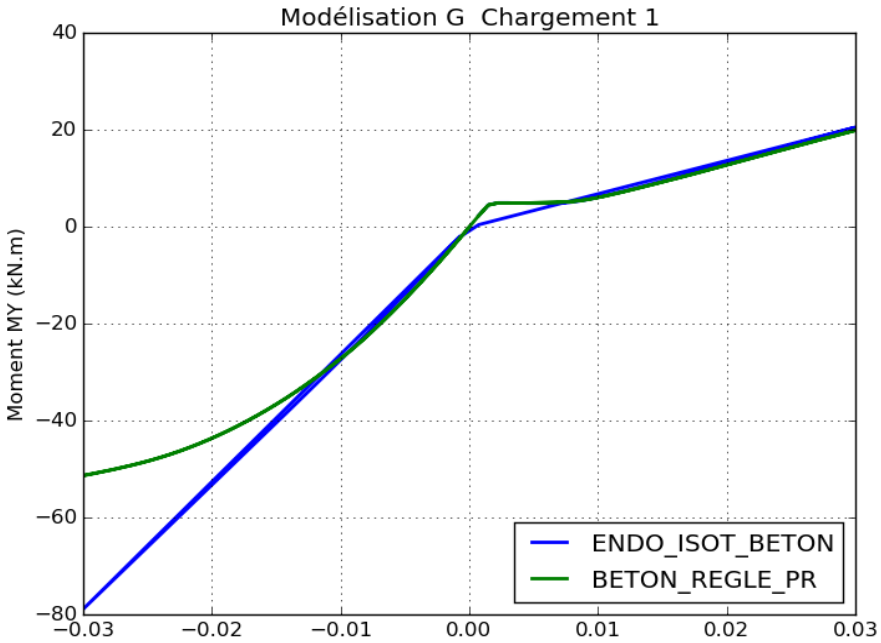
Identification	Type de référence	Valeur de référence	Tolérance
FLEXION POSITIVE - ELASTIQUE $t=0,25$			
Différence relative MY	NON_REGRESSION	-	$1\ 10^{-6}$
Différence relative DRX	NON_REGRESSION	-	$1\ 10^{-6}$
Différence relative FX	NON_REGRESSION	-	$1\ 10^{-6}$
Différence relative DY	NON_REGRESSION	-	$1\ 10^{-6}$
FLEXION POSITIVE - ENDOMMAGEMENT $t=1,0$			
Différence relative MY	NON_REGRESSION	-	$1\ 10^{-6}$
Différence relative FX	NON_REGRESSION	-	$1\ 10^{-6}$
FLEXION POSITIVE - DECHARGEMENT $t=1,5$			
Différence relative MY	NON_REGRESSION	-	$1\ 10^{-6}$
Différence relative FX	NON_REGRESSION	-	$1\ 10^{-6}$
FLEXION NEGATIVE – ELASTIQUE $t=2,25$			
Différence relative MY	NON_REGRESSION	-	$1\ 10^{-6}$
Différence relative FX	NON_REGRESSION	-	$1\ 10^{-6}$
FLEXION NEGATIVE - ENDOMMAGEMENT $t=3,0$			
Différence relative MY	NON_REGRESSION	-	$1\ 10^{-6}$
Différence relative FX	NON_REGRESSION	-	$1\ 10^{-6}$
FLEXION NEGATIVE - DECHARGEMENT $t=3,5$			
Différence relative MY	NON_REGRESSION	-	$1\ 10^{-6}$
Différence relative FX	NON_REGRESSION	-	$1\ 10^{-6}$

Diagrammes comparés force FX – déplacement DX pour le chargement f :

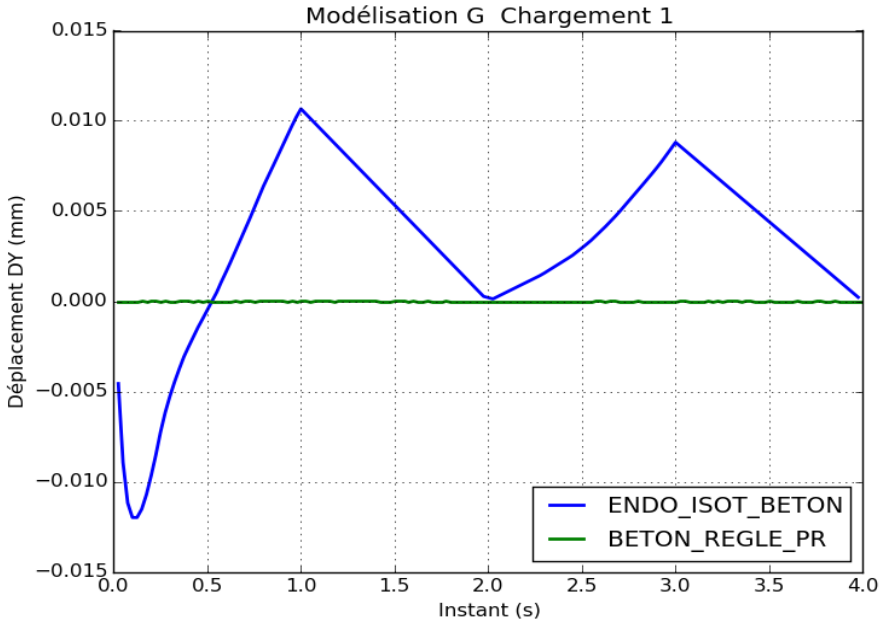


Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Diagrammes comparés moment MY – rotation DRY pour le chargement f :

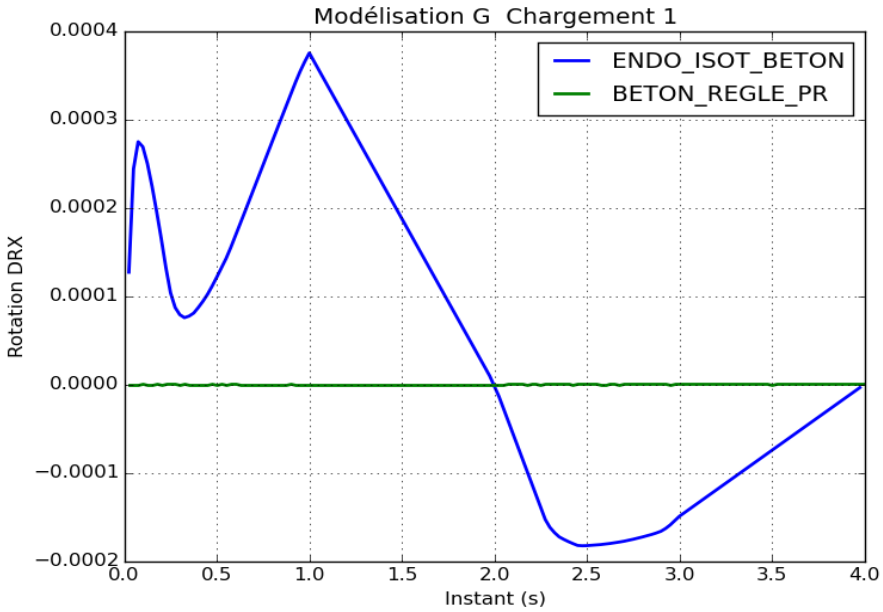


Diagrammes comparés déplacement DY (dû à l'effet de Poisson) en fonction du temps :



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

Diagrammes comparés rotation DRX (dû à l'effet de Poisson) en fonction du temps :



9.4 Remarques

Le cas-test effectué ici vise à tester le modèle BETON_REGLE_PR sous des sollicitations assez importantes pour qu'apparaisse effectivement la reprise de raideur des aciers.

Le comportement est similaire en flexion et traction pour les lois BETON_REGLE_PR et ENDO_ISOT_BETON en charge : les différences apparaissent pour les chargements importants en raison de la différence de comportement en compression.

La réponse en décharge n'est pas prise en compte par la loi BETON_REGLE_PR (réponse élastique). La rotation DRX et le déplacement DY sont nuls avec la loi BETON_REGLE_PR car l'effet de Poisson n'est pas pris en compte.

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

10 Modélisation H

10.1 Caractéristiques de la modélisation

Dans cette modélisation, on vérifie que les deux chargements de dilatation thermique (température homogène dans l'épaisseur et gradient de température constant dans l'épaisseur) conduisent au même état de contrainte que deux chargements mécaniques simples : extension selon Ox et flexion autour de Oy.

Remarque : cette vérification est valable quelque soit la relation de comportement.

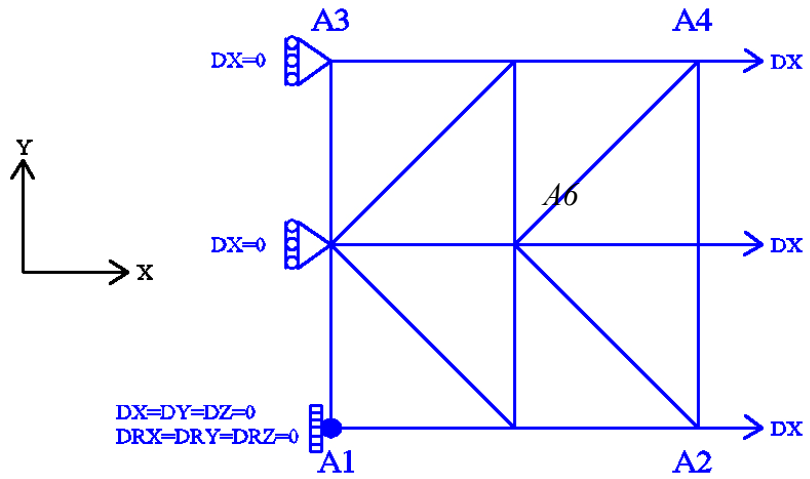


Figure 10.1-a: maillage et conditions aux limites (chargement 1)

Modélisation : DKT
Relations de comportement : BETON_REGLE_PR
Conditions aux limites :

- Encastrement en A_1 ;
- $DX=0.0$ sur l'arête A_1-A_3 ;
- $DRY=0.0$ sur l'arête A_1-A_3

Chargement 1 (extension) :

Le calcul de référence est fait avec le chargement mécanique suivant :

- $DX=2.e-4$ sur l'arête A_2-A_4

Le chargement thermo-mécanique équivalent est :

- $DX=0.0$ sur l'arête A_2-A_4
- Température de référence : $+10^oC$
- Température homogène imposée : -10^oC
- Coefficient de dilatation thermique : $\alpha=1.e-5/^oC$

Chargement 2 (flexion, voir modélisation B) :

Le calcul de référence est fait avec le chargement mécanique suivant :

- $DRY=6.e-3$ sur l'arête A_2-A_4

Le chargement thermo-mécanique équivalent est :

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

- $DRY = 0.0$ sur l'arête $A_2 - A_4$
- Température de référence : $+10^oC$
- Gradient de température homogène imposé : $T_{\inf} = +40^oC, T_{\mathrm{mil}} = +10^oC, T_{\sup} = -20^oC$
- Coefficient de dilatation thermique : $\alpha = 1.e-5/^oC$
- Rappel : l'épaisseur de la coque est $0.1\,m$

10.2 Caractéristiques du maillage

Nombre de nœuds : 9.
Nombre de mailles : 8 TRIA3 ; 8 SEG2.

10.3 Grandeurs testées et résultats pour le chargement 1

Pour les chargements mécanique et thermique équivalents, on vérifie que l'effort (homogène dans la plaque) est le même. La composante significative est ici NXX.
Les résultats sont très bons. Les chargements thermo-mécaniques donnent les mêmes résultats que les chargements mécaniques équivalents pour les relations de comportement GLRC_DM et ENDO_ISOT_BETON (voir cas test ssns106o).

Identification							Type de référence	Valeur de référence	Tolérance
Effort	EFGE_ELNO	NXX	pour la maille	M8	, nœud N7		AUTRE_ASTER	278768.0	$1\ 10^{-3}$

10.4 Grandeurs testées et résultats pour le chargement 2

Pour les chargements mécanique et thermique équivalents, on vérifie que l'effort (homogène dans la plaque) est le même. La composante significative est ici MXX.
Les résultats sont très bons. Les chargements thermo-mécaniques donnent les mêmes résultats que les chargements mécaniques équivalents pour les relations de comportement GLRC_DM et ENDO_ISOT_BETON voir cas test ssns106o).

Identification							Type de référence	Valeur de référence	Tolérance
Effort	EFGE_ELNO	MXX	pour la maille	M8	, nœud N7		AUTRE_ASTER	8366.7994	$1\ 10^{-3}$

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

11 Synthèse des résultats

Ces tests ayant pour but de valider la loi de comportement du béton BETON_REGLE_PR servent aussi à montrer un certain nombre de ses faiblesses. Les différentes modélisations permettent de tester :

A et E : le comportement en traction/compression
***B* et F**: le comportement en flexion cyclique
***C* et G**: le comportement couplant les phénomènes de membrane et de flexion
D :le comportement pour le cisaillement et la distorsion dans le plan
H : un chargement thermique.

Dans la plupart de ces situations, les efforts et moments prédits par le modèle BETON_REGLE_PR sont cohérents avec le modèle ENDO_ISOT_BETON pour la charge. En cas de décharge, le modèle BETON_REGLE_PR, qui est élastique, présente des erreurs importantes en comparaison avec le modèle ENDO_ISOT_BETON. Par ailleurs l'effet de Poisson n'étant pas modélisé par le modèle BETON_REGLE_PR, on mesure des différences importantes dans les déplacements perpendiculaires à la direction de chargement .

Par rapport au cas test ssns106, on ne modélise pas ici le cas de couplage flexion et cisaillement dans le plan (modélisations D et M du cas test ssns106). En effet on constate des difficultés de convergence avec la loi BETON_REGLE_PR pour ces cas.

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