SSNL119 - Réponse statique d'une poutre en béton armé (section rectangulaire) à comportement non linéaire

Résumé :

Le problème consiste à analyser la réponse d'une poutre en béton armé en flexion 3 points jusqu'à la ruine par l'intermédiaire d'une modélisation poutre multifibres [R3.08.08] ou d'une modélisation de plaque utilisant une loi de béton armé homogénéisée. Ce test correspond à une analyse statique d'une poutre ayant un comportement non-linéaire. Les modélisations du test sont :

- modélisation A : le béton est modélisé avec la loi endommageable adoucissante de comportement de Mazars dans sa version 1D [R7.01.08] et l'acier est élasto-plastique, le type d'éléments utilisé est POU_D_EM ;
- modélisation B : la poutre en béton armé est modélisée avec la loi homogénéisée GLRC_DM et une grille d'acier suivant une loi élasto-plastique représentant les aciers inférieurs ;
- modélisation C : la poutre en béton armé est modélisée avec la loi homogénéisée GLRC_DM avec une section d'armature moyennée ;
- modélisation D : la poutre en béton armé est modélisée avec la loi homogénéisée DHRC.
- Modélisation E : copie de la modélisation A avec les éléments POU_D_TGM servant à valider les options EPSI_ELGA et EPSP_ELGA pour ce type d'éléments.

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

1 Caractéristiques générales

1.1 Géométrie

La poutre en flexion trois points étudiée mesure 5m de long. Sa section est de 0,2x0,5m. Sa géométrie ainsi que le positionnement des aciers qui la constituent sont définis sur la Figure 1.1-a.

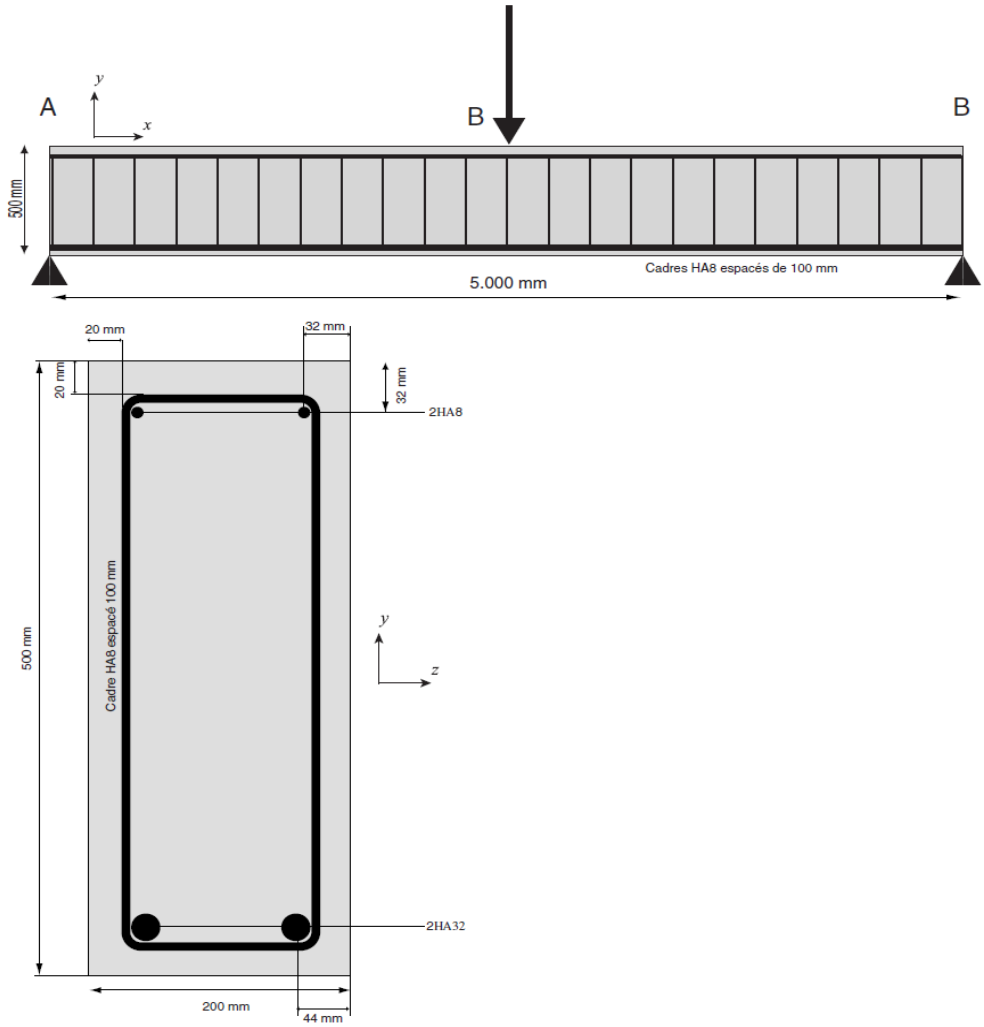


Figure 1.1-a : plan de la poutre.

1.2 Propriétés de matériaux

- Béton :
  Module de Young : $E = 37272\,MPa$
  Coefficient de Poisson : $\nu = 0.2$
  Seuil d'élasticité en traction : $\sigma_{ft} = 3.9\,MPa$
  Seuil d'élasticité en compression : $\sigma_{fc} = 38.3\,MPa$
  Seuil de déformation élastique en compression : $\varepsilon_{fc} = 2.0.10^{-3}$
  Énergie de fissuration $G_f^1 = 110\,J/m^2$

- Acier :
  Module de Young : $E = 200\,000\,MPa$

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

Coefficient de Poisson : $\nu = 0.33$
Limite élastique : $\sigma_e = 400\ MPa$
Module tangent (pente plastique) $E_T = 3280\ MPa$

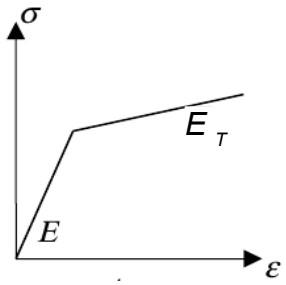


Figure 1.2-a : courbe de contrainte – déformation de l'acier

1.3 Conditions aux limites et chargements

Appui simple en B : $DY = 0$.
Appui double en A : $DX = DY = DZ = 0$ de même que $DRX = DRY = 0$.

Chargement quasi-statique : déplacement monotone DY vers le bas appliqué à mi-travée en C (essai de flexion 3 points), selon une fonction linéaire du temps :

t	DY
0,0	0,0 cm
3,0	$-3,0\ cm$
5,0	$-5,0\ cm$

Le déplacement final appliqué pour la modélisation A est de $-3,0\ cm$.

Pour la modélisation D, le déplacement imposé se fait suivant DZ .

Remarque : les armatures transversales ne sont pas prises en compte dans les calculs.

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

2 Solution de référence

Ce test valide la non-régression.
Pour les modélisations de B à D, les résultats sont également comparés aux résultats expérimentaux issus de [1] et [2].

2.1 Références bibliographiques

[1] Pera, J. (1973). 'Reinforced concrete redundant beams. Theoretical and experimental analysis'. Thesis by a doctor-engineer, INSA Lyon.
[2] GHAVAMIAN Sh., DELAPLACE A., Modèles de fissuration de béton (Projet MECA). Revue française de génie civil, volume 7 – n°5/2003.

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

3 Modélisation A

3.1 Caractéristiques de la modélisation

Le béton est modélisé avec la loi d'endommagement de Mazars en version $1D$ (MAZARS_GC) [R7.01.08]. Les paramètres matériaux utilisés sont les suivants :

$$AC=1.71202987 \quad BC=2.01163780E+03 \quad BT=1.21892353E+04 \quad BETA=1.10E+00$$
$$AT=1.0E+00 \quad EPSD0=8.20396008E-05$$

3.2 Grandeurs testées et résultats

La flèche est celle du centre de la poutre, les résultats locaux (contraintes, déformations) sont ceux du deuxième point de Gauss du 9ème élément (le plus proche du milieu de la poutre).

Réaction d'appui au point A :

Flèche (m)	Grandeur		Lieu	Type référence	Tolérance
1,00E-03	REAC_NODA	DY	groupe:A	NON_REGRESSION	3 . 0E -0 4
1.40E-02	REAC_NODA	DY	groupe:A	NON_REGRESSION	3.0E-04
2.68E-02	REAC_NODA	DY	groupe:A	NON_REGRESSION	3.0E-04

Contrainte dans les aciers tendus :

Flèche (m)	Grandeur	Lieu	Type référence	Tolérance
1,00E-03	SIXX	maille:M9, point:2 sous_point:41	NON_REGRESSION	3.0E-04
1.40E-02	SIXX	maille:M9, point:2 sous_point:41	NON_REGRESSION	3.0E-04
2.68E-02	SIXX	maille:M9, point:2 sous_point:41	NON_REGRESSION	0,0E+00

Contrainte dans les aciers comprimés :

Flèche (m)	Grandeur	Lieu	Type référence	Tolérance
1,00E-03	SIXX	maille:M9, point:2 sous_point:44	NON_REGRESSION	3.0E-04
1.40E-02	SIXX	maille:M9, point:2 sous_point:44	NON_REGRESSION	3.0E-04
2.68E-02	SIXX	maille:M9, point:2 sous_point:44	NON_REGRESSION	3.0E-04

Déformation dans les aciers tendus :

Flèche (m)	Grandeur	Lieu	Type référence	Tolérance
1,00E-03	EPXX	maille:M9, point:2 sous_point:41	NON_REGRESSION	3.0E-04
1.40E-02	EPXX	maille:M9, point:2 sous_point:41	NON_REGRESSION	3.0E-04
2.68E-02	EPXX	maille:M9, point:2 sous_point:41	NON_REGRESSION	3.0E-04

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

Contrainte dans le béton comprimé :

Flèche (m)	Grandeur	Lieu	Type référence	Tolérance
1,00E-03	SIXX	maille:M9, point:2 sous_point:1	NON_REGRESSION	3.0E-04
1.40E-02	SIXX	maille:M9, point:2 sous_point:1	NON_REGRESSION	3.0E-04
2.68E-02	SIXX	maille:M9, point:2 sous_point:1	NON_REGRESSION	3.0E-04

Contrainte dans le béton tendu :

Flèche (m)	Grandeur	Lieu	Type référence	Tolérance
1,00E-03	SIXX	maille:M9, point:2 sous_point:40	NON_REGRESSION	3.0E-04
1.40E-02	SIXX	maille:M9, point:2 sous_point:40	NON_REGRESSION	3.0E-04
2.68E-02	SIXX	maille:M9, point:2 sous_point:40	NON_REGRESSION	3.0E-04

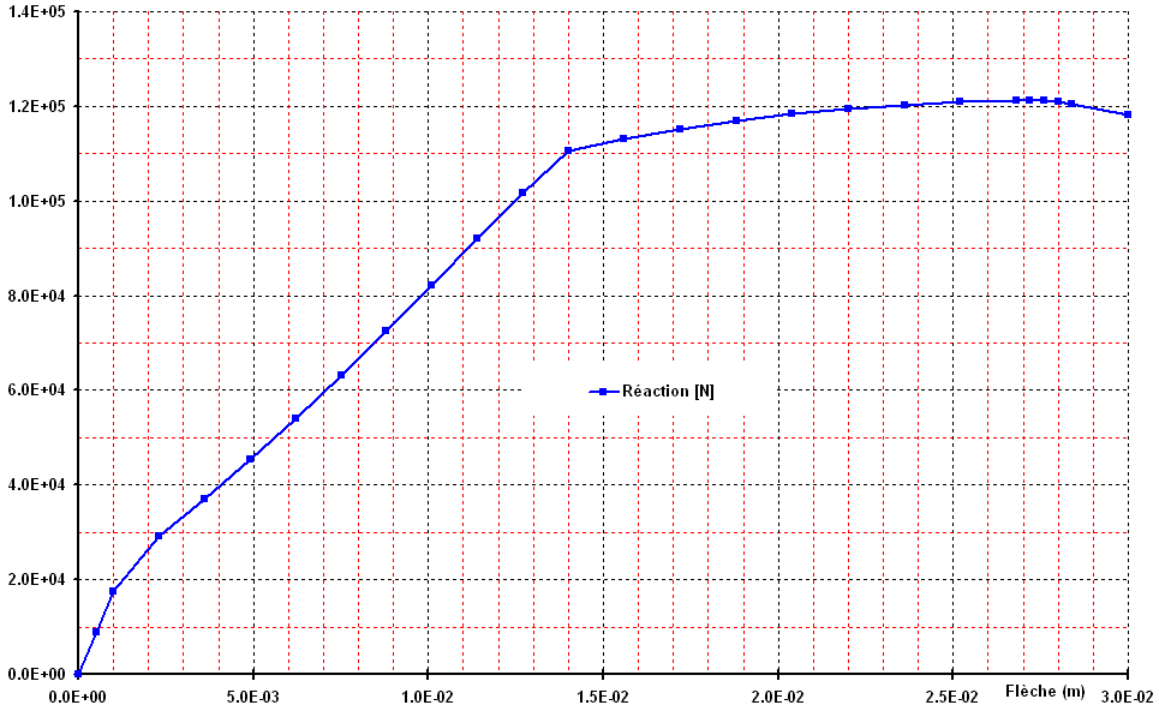


Figure 3.2-a : réaction sur un appui, en fonction de la flèche au centre.

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

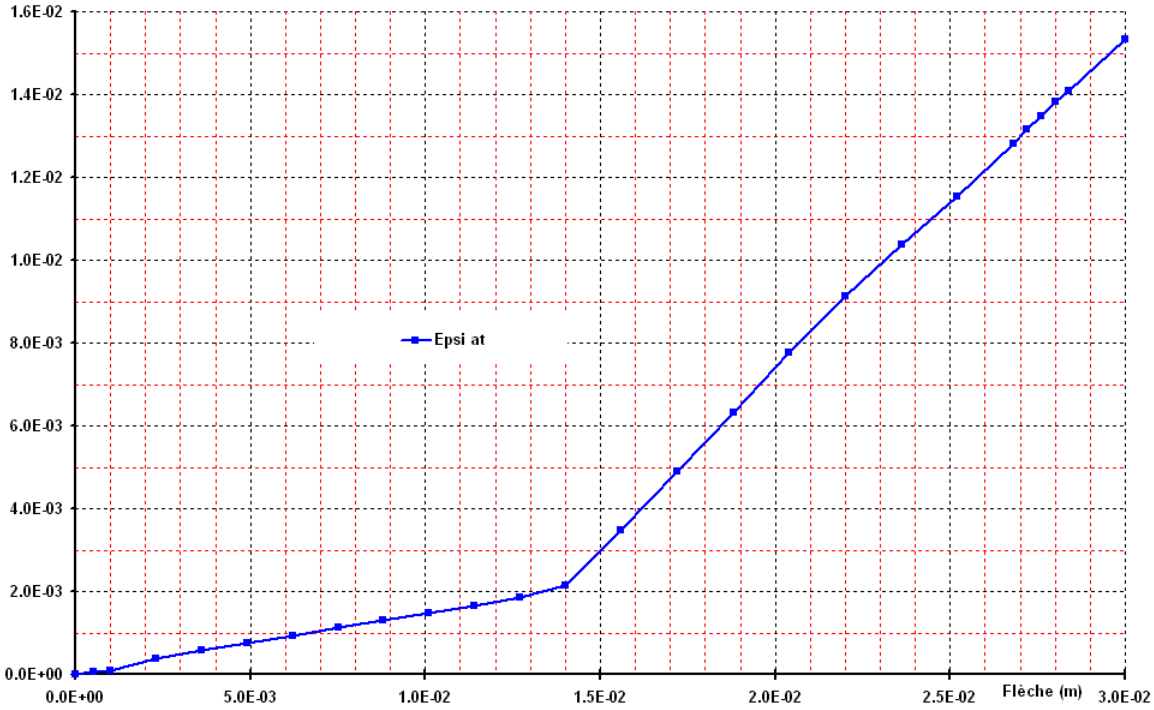


Figure 3.2-b : déformation des aciers tendus, en fonction de la flèche au centre.

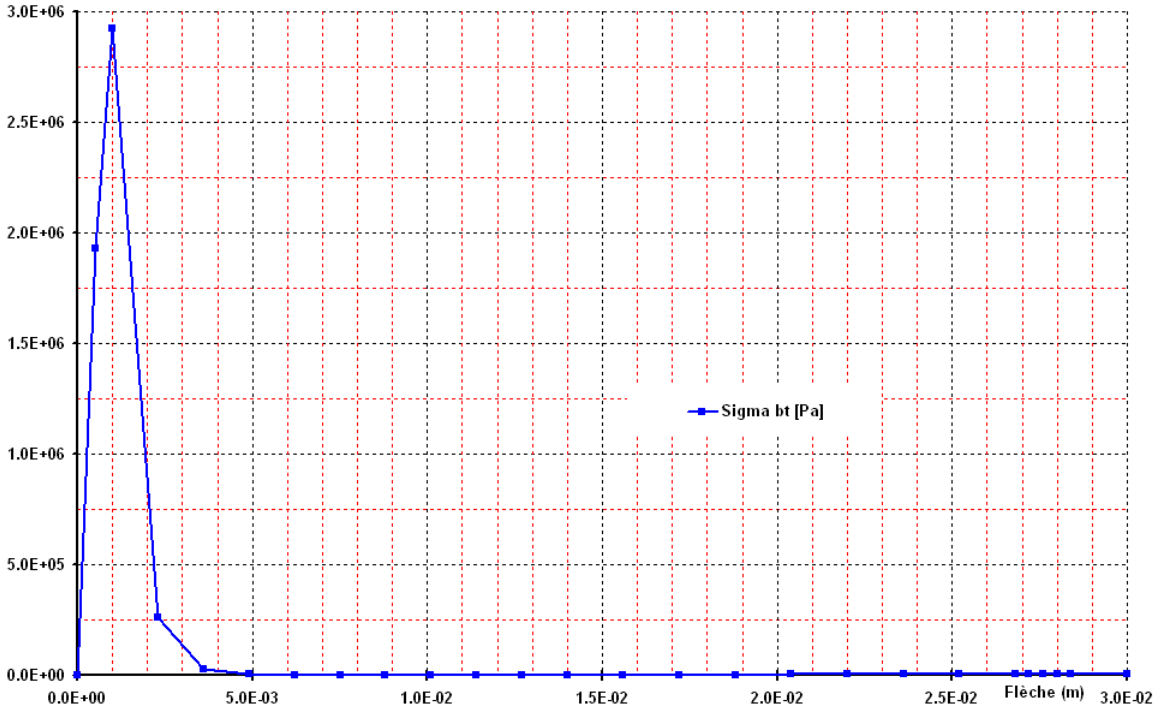


Figure 3.2-c : contrainte béton tendu, en fonction de la flèche au centre.

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

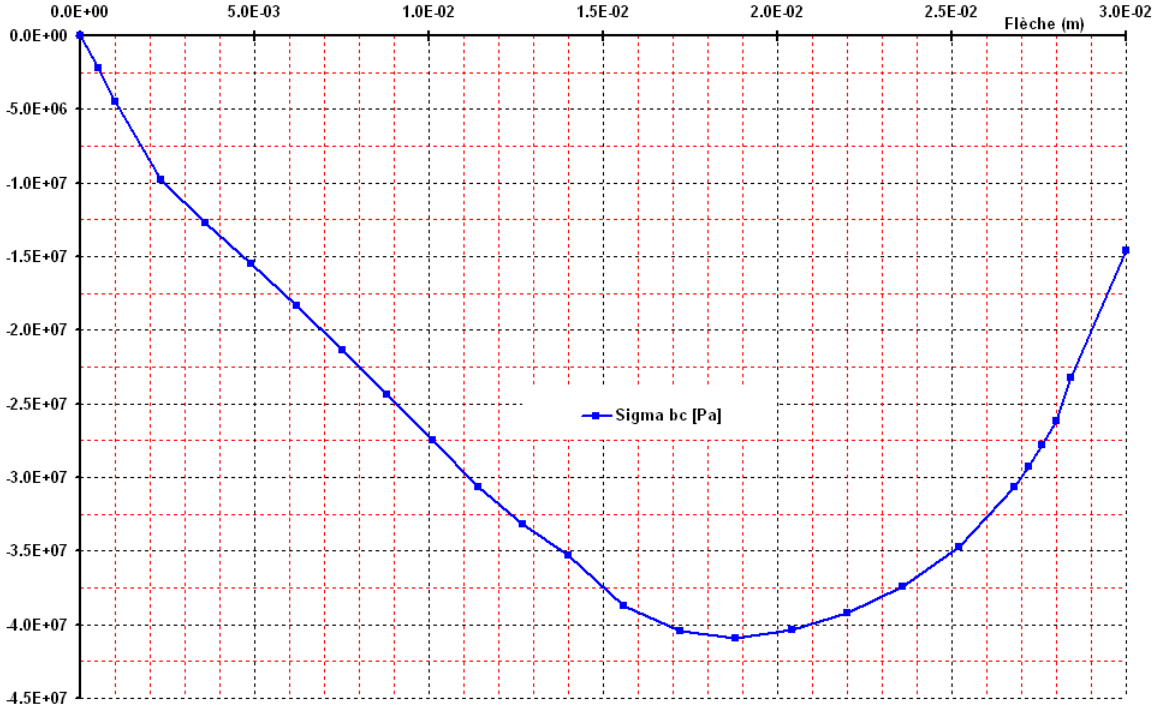


Figure 3.2-d : contrainte béton comprimé, en fonction de la flèche au centre.

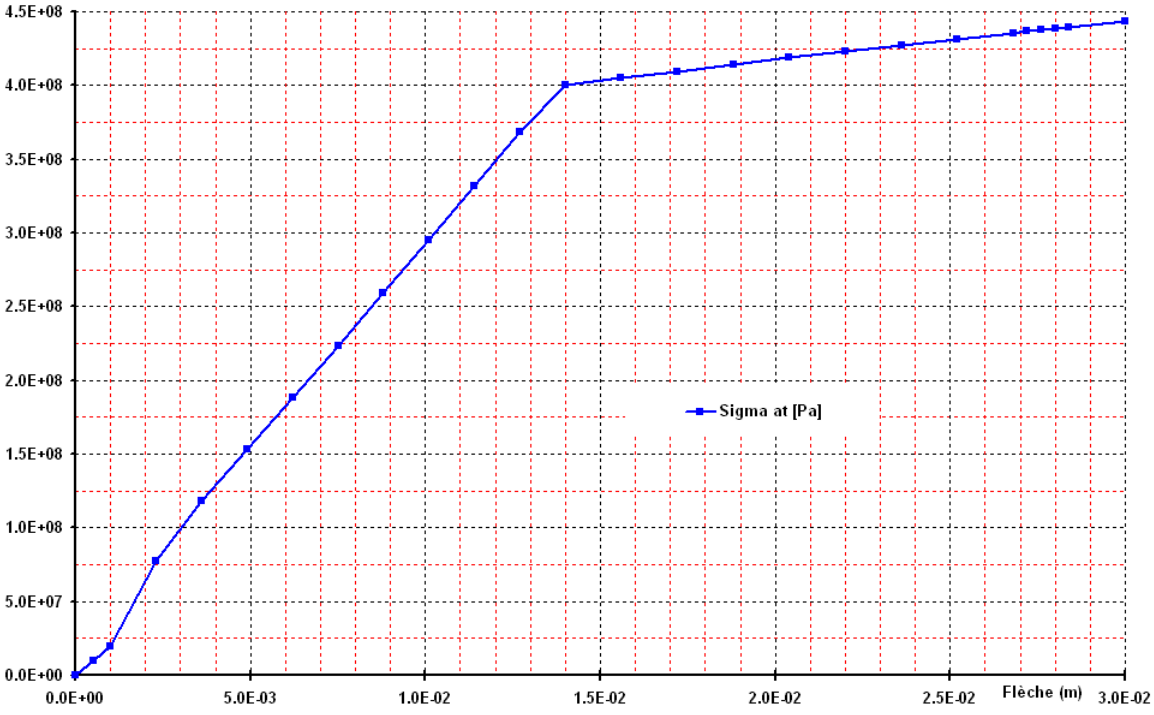


Figure 3.2-e : contrainte acier tendu, en fonction de la flèche au centre.

On valide également le calcul de l'option EPSP_ELGA (déformation plastique) pour les éléments POU_D_EM. Pour cela on profite du fait que la déformation plastique équivalente est la première variable interne de la loi VMIS_ISOT_TRAC, cela fourni donc une valeur de référence.

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

Flèche (m)	Grandeur	Lieu	Valeur de référence	Type référence	Tolérance
2.68E-02	VARI/V1	maille:M9, point:2 sous_point:44	-	NON_REGRESSION	-
2.68E-02	EPSP_EPXX	maille:M9, point:2 sous_point:44	-5.67130306951E-04	AUTRE_ASTER	3.0E-04

3.3 Remarques

Il n'y a pas de raffinement particulier des pas de temps à réaliser. Il y a 26 pas de temps (déclenchement d'une subdivision pour non-convergence en 10 itérations), ce qui correspond à 110 itérations de Newton pour le calcul complet.

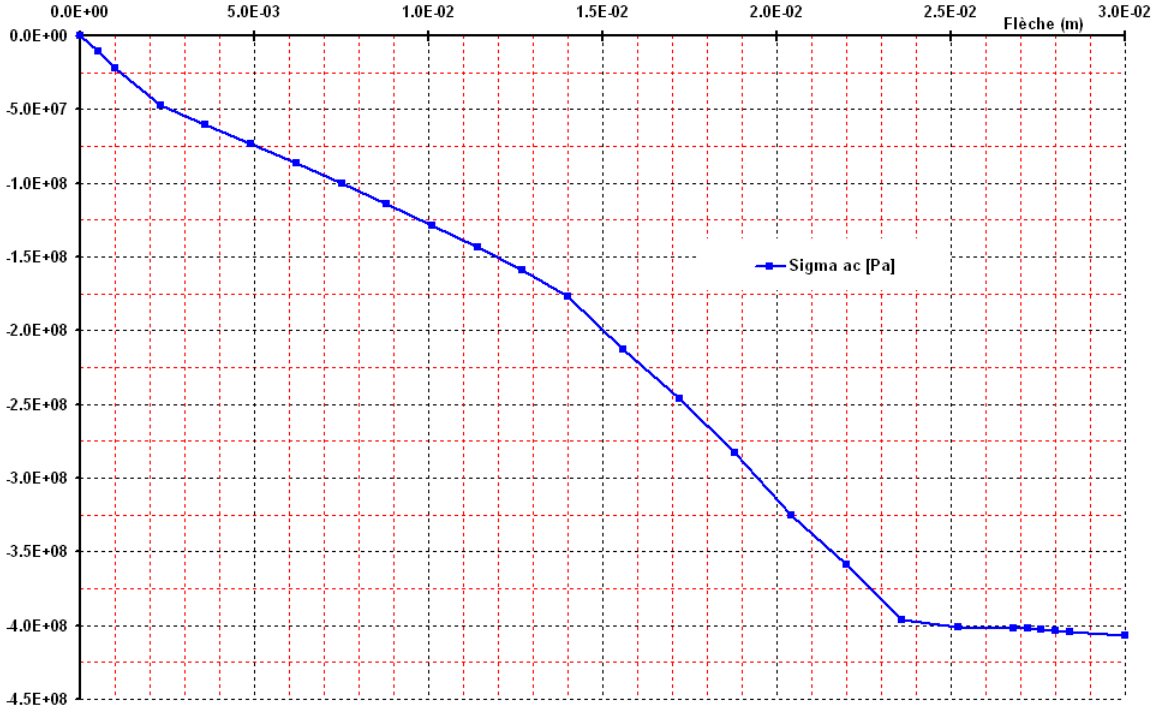


Figure 3.3-a : contrainte acier comprimé, en fonction de la flèche au centre.

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

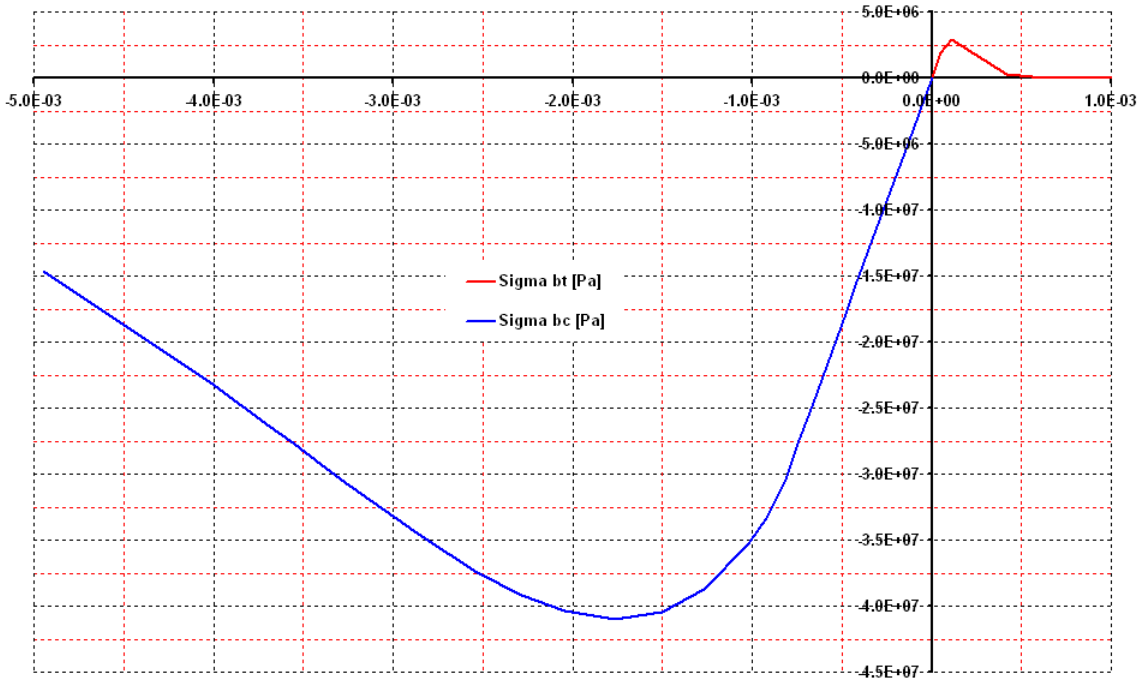


Figure 3.3-b : comportement du béton.

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

4 Modélisation B

4.1 Caractéristiques de la modélisation

La poutre est modélisée par des éléments DKTG et GRILLE_EXCENTRE. On utilise 16 éléments dans la direction longitudinale X et un seul dans la direction transversale Z.

Le béton armé est modélisé par la loi de comportement GLRC_DM. Les paramètres de la loi de comportement GLRC_DM sont obtenus grâce à la macro-commande DEFI_GLRC. Les données matériaux utilisées sont définies en 1.2. Pour les nappes d'armatures du modèle GLRC, on définit une section d'armature $OMX=OMY=5{,}03\text{E-}4\,m^2/m$ et l'excentrement $RX=RY=0{,}872$.
On ajoute une grille d'armature inférieure avec une section de $S=7{,}54\,E-4\,m^2/m$ et un excentrement de $-0{,}218\,m$.

4.2 Grandeurs testées et résultats

Les valeurs sont issues de résultats expérimentaux (SOURCE_EXTERNE). La flèche est celle du centre de la poutre, les résultats locaux (déformations) sont ceux du point de Gauss d'un élément de la grille d'armature (le plus proche du milieu de la poutre).
La loi GLRC_DM étant une loi de béton armé homogénéisée, les contraintes et déformations du béton ou des armatures incluses dans la loi ne sont pas accessibles.

Réaction d'appui sur centre du bord A :

Flèche (m)	Grandeur		Lieu	Type référence	Référence	Tolérance
3,00E-03	REAC_NODA	DY	groupe:A	SOURCE_EXTERNE	2,95780E+04	0,11
0.50E-02	REAC_NODA	DY	groupe:A	SOURCE_EXTERNE	4,02560E+04	0,16
0.7E-02	REAC_NODA	DY	groupe:A	SOURCE_EXTERNE	4,98640E+04	0,19
1.1E-02	REAC_NODA	DY	groupe:A	SOURCE_EXTERNE	6,97240E+04	0,23
1.6E-02	REAC_NODA	DY	groupe:A	SOURCE_EXTERNE	8,95840E+04	0,22
1.9E-02	REAC_NODA	DY	groupe:A	SOURCE_EXTERNE	9,9940E+04	0,2
5.0E-02	REAC_NODA	DY	groupe:A	SOURCE_EXTERNE	1.1768E+05	0,06

Flèche (m)	Grandeur		Lieu	Type référence	Tolérance
3,00E-03	REAC_NODA	DY	groupe:A	NON_REGRESSION	1.0E-6
0.50E-02	REAC_NODA	DY	groupe:A	NON_REGRESSION	1.0E-6
0.7E-02	REAC_NODA	DY	groupe:A	NON_REGRESSION	1.0E-6
1.1E-02	REAC_NODA	DY	groupe:A	NON_REGRESSION	1.0E-6
1.6E-02	REAC_NODA	DY	groupe:A	NON_REGRESSION	1.0E-6
1.9E-02	REAC_NODA	DY	groupe:A	NON_REGRESSION	1.0E-6
5.0E-02	REAC_NODA	DY	groupe:A	NON_REGRESSION	1.0E-6

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

Déformation dans les aciers tendus :

Flèche (m)	Grandeur	Lieu	Type référence	Référence	Tolérance
3,00E-03	EXX	maille:HM52, point:1	SOURCE_EXTERNE	4.3175E-04	0,18
0.50E-02	EXX	maille:HM52, point:1	SOURCE_EXTERNE	4.1754E-04	0,34
0.7E-02	EXX	maille:HM52, point:1	SOURCE_EXTERNE	8.3099E-04	0,11
1.1E-02	EXX	maille:HM52, point:1	SOURCE_EXTERNE	1.2757E-03	0,13
1.6E-02	EXX	maille:HM52, point:1	SOURCE_EXTERNE	2.0344E-03	0,24
1.9E-02	EXX	maille:HM52, point:1	SOURCE_EXTERNE	2.5815E-03	0,3
5.0E-02	EXX	maille:HM52, point:1	SOURCE_EXTERNE	2.1200E-02	0,7

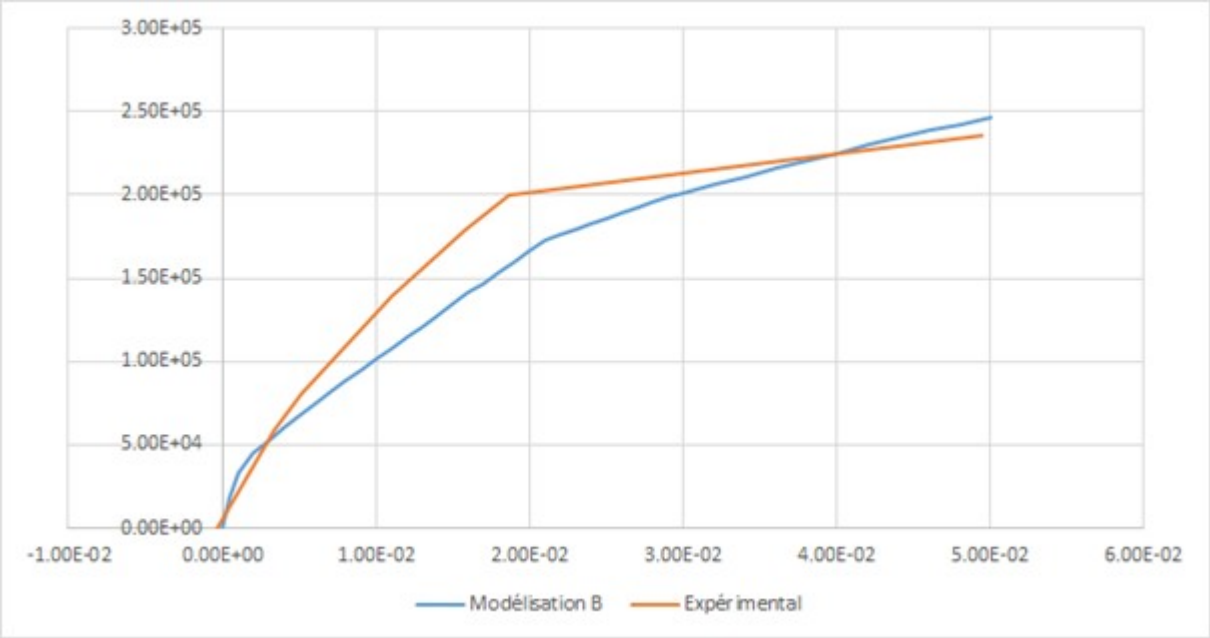


Figure 4.2-a : réaction sur un appui, en fonction de la flèche au centre.

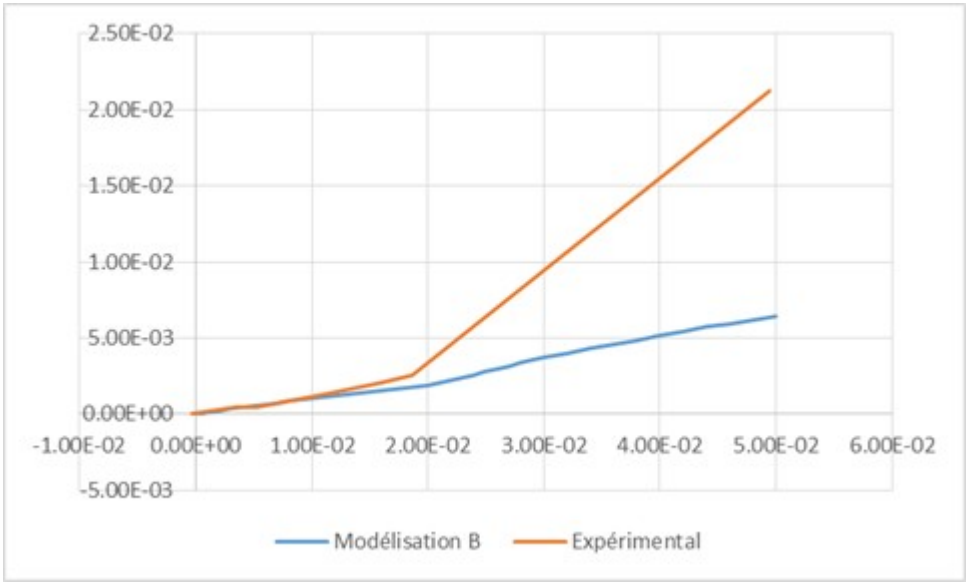


Figure 4.2-b : déformation des aciers tendus, en fonction de la flèche au centre.

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

5 Modélisation C

5.1 Caractéristiques de la modélisation

La poutre est modélisée par des éléments DKTG. On utilise 16 éléments dans la direction longitudinale X et une seule dans la direction transversale Z .

Le béton armé est modélisé par la loi de comportement GLRC_DM. Les paramètres de la loi de comportement GLRC_DM sont obtenus grâce à la macro-commande DEFI_GLRC. Les données matériaux utilisées sont définies en 1.2. Pour les nappes d'armatures du modèle GLRC, on définit une section d'armature $OMX = OMY = 4{,}27\text{E-}3\ m^2/m$ et l'excentrement $RX = RY = 0{,}872$.

5.2 Grandeurs testées et résultats

Les valeurs sont issues de résultats expérimentaux (SOURCE_EXTERNE). La flèche est celle du centre de la poutre, les résultats locaux (déformations) sont ceux du point de Gauss d'un élément de la grille d'armature (le plus proche du milieu de la poutre).
La loi GLRC_DM étant une loi de béton armé homogénéisée, les contraintes et déformations du béton ou des armatures incluses dans la loi ne sont pas accessibles.

Réaction d'appui sur centre du bord A :

Flèche (m)	Grandeur		Lieu	Type référence	Référence	Tolérance
3,00E-03	REAC_NODA	DY	groupe:A	SOURCE_EXTERNE	2,95780E+04	0,04
0.50E-02	REAC_NODA	DY	groupe:A	SOURCE_EXTERNE	4,02560E+04	0,07
0.7E-02	REAC_NODA	DY	groupe:A	SOURCE_EXTERNE	4,98640E+04	0,08
1.1E-02	REAC_NODA	DY	groupe:A	SOURCE_EXTERNE	6,97240E+04	0,11
1.6E-02	REAC_NODA	DY	groupe:A	SOURCE_EXTERNE	8,95840E+04	0,08
1.9E-02	REAC_NODA	DY	groupe:A	SOURCE_EXTERNE	9,9940E+04	0,05
5.0E-02	REAC_NODA	DY	groupe:A	SOURCE_EXTERNE	1.1768E+05	0,91

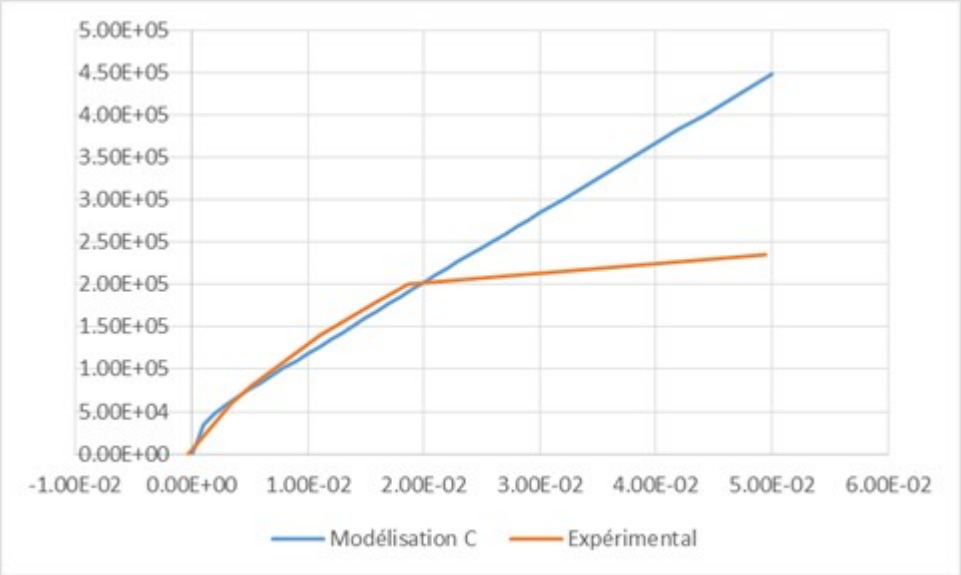


Figure 5.2-a : Réaction d'appui en fonction de la flèche au centre

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

6 Modélisation D

6.1 Caractéristiques de la modélisation

La poutre est modélisée par des éléments DKTG. On utilise 16 éléments dans la direction longitudinale X et une seule dans la direction transversale Y .

Le béton armé est modélisé par la loi de comportement DHRC. Les paramètres de la loi sont obtenus grâce au plugin d'identification éponyme dans Salome-Meca. Les données matériaux utilisées sont définies en 1.2.

6.2 Grandeurs testées et résultats

Les valeurs sont issues de résultats expérimentaux (SOURCE_EXTERNE). La flèche est celle du centre de la poutre.

Réaction d'appui sur centre du bord A :

Flèche (m)	Grandeur		Lieu	Type référence	Référence	Tolérance
3,00E-03	REAC_NODA	DY	groupe:A	SOURCE_EXTERNE	2,95780E+04	0,7
0.50E-02	REAC_NODA	DY	groupe:A	SOURCE_EXTERNE	4,02560E+04	0,7
0.7E-02	REAC_NODA	DY	groupe:A	SOURCE_EXTERNE	4,98640E+04	0,7
1.1E-02	REAC_NODA	DY	groupe:A	SOURCE_EXTERNE	6,97240E+04	0,7
1.6E-02	REAC_NODA	DY	groupe:A	SOURCE_EXTERNE	8,95840E+04	0,7
1.9E-02	REAC_NODA	DY	groupe:A	SOURCE_EXTERNE	9,9940E+04	0,75
5.0E-02	REAC_NODA	DY	groupe:A	SOURCE_EXTERNE	1.1768E+05	2,2

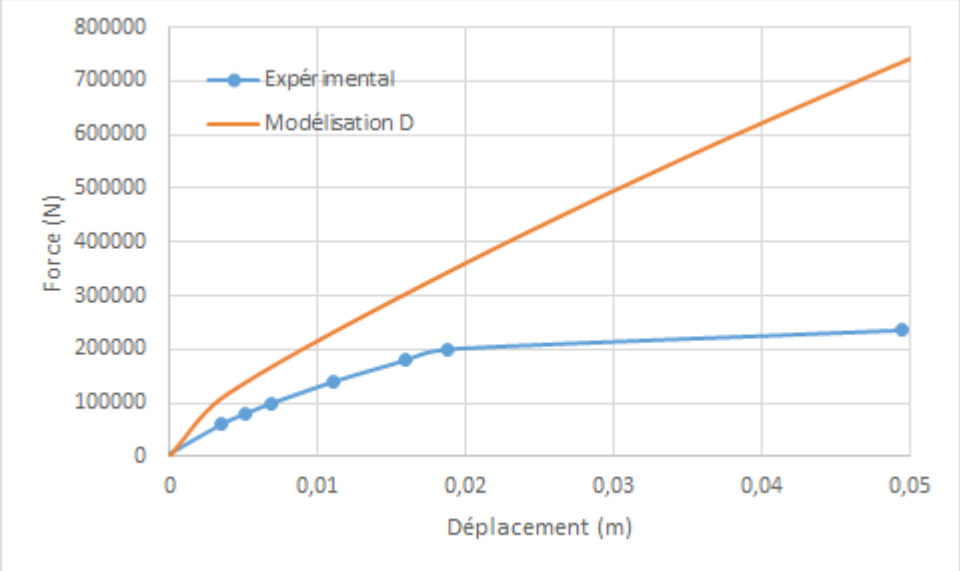


Figure 6.2-a : Réaction d'appui en fonction de la flèche au centre

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

7 Modélisation E

7.1 Caractéristiques de la modélisation

Cette modélisation est identique à la modélisation A excepté que les éléments de poutre sont de type POU_D_TGM .

7.2 Grandeurs testées et résultats

Cette modélisation a uniquement pour but de valider les options EPSI_ELGA (déformation totale) et EPSP_ELGA (déformation plastique) pour les éléments POU_D_TGM .

Pour cela on profite du fait que la déformation plastique équivalente est la première variable interne de la loi VMIS_ISOT_TRAC, cela fourni donc une valeur de référence pour le champ EPSP_ELGA. On obtient également une valeur de référence pour la déformation totale, à partir de la valeur de la contrainte, celle du module d'Young et celle de la déformation plastique.

Flèche (m)	Grandeur	Lieu	Valeur de référence	Type référence	Tolérance
2.68E-02	VARI/V1	maille:M9, point:2 sous_point:43	-	NON_REGRESSION	-
2.68E-02	SIXX	maille:M9, point:2 sous_point:43	-	NON_REGRESSION	-
2.68E-02	EPSP/EPXX	maille:M9, point:2 sous_point:43	0.00603834325985	AUTRE_ASTER	3.0E-04
2.68E-02	EPSI/EPXX	maille:M9, point:2 sous_point:43	0.008139023241	AUTRE_ASTER	3.0E-04

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

8 Synthèse des résultats

Les tests sont réalisés en non-régression du fait qu'il n'existe pas de référence avec la loi de comportement de Mazars ou GLRC_DM. Les coefficients de la loi de Mazars sont calés de façon à coller au mieux à une courbe de comportement de béton obtenue avec la loi de La Borderie (qui n'est plus disponible dans *Code_Aster*).

Pour les modélisations B, C et D, les résultats sont également comparés à des mesures expérimentales.

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