

Contraintes et déformations

Tutorial SectionPro — Sections hexagonale, carrée creuse & poutre en U sous charges ELS et ELU selon trois codes normatifs (EC2, NBR-6118, BAEL 91)

BridgeKernel · 2026

Introduction

Étant donné des efforts imposés (N, M_y, M_z) , SectionPro calcule l'état de déformation $(\varepsilon_0, \kappa_y, \kappa_z)$ satisfaisant l'équilibre interne par résolution itérative. Le logiciel extrait les contraintes et déformations aux fibres extrêmes du béton et des armatures, les résultantes de compression et de traction, et un coefficient de sécurité (FS) défini comme le rapport des déformations critiques aux limites admissibles.

Cet article présente l'analyse sur trois géométries et trois normes — une **section hexagonale pleine** (EC2), une **section carrée creuse** (NBR-6118) et une **poutre en U à âmes inclinées** (BAEL 91) — chacune sollicitée à l'ELS (lois linéaires) et à l'ELU (lois non linéaires). Les cas de charge sont choisis pour que certaines vérifications passent (OK) et d'autres échouent (KO), illustrant le comportement de SectionPro lorsque la capacité est dépassée.

Résultats calculés

SectionPro fournit trois catégories de résultats pour chaque cas de charge :

Contraintes & déform.

σ_c — Contrainte extr. béton
 $\sigma_{s,\min}, \sigma_{s,\max}$ — Contraintes acier
 ε_c — Déformation extr. béton
 $\varepsilon_{s,\min}, \varepsilon_{s,\max}$ — Déform. acier
FS — Coefficient de sécurité
Vérification — OK / KO

Efforts internes

N_c — Résultante de compression
 N_t — Résultante de traction
 (x_C, y_C) — Centre de compression
 (x_T, y_T) — Centre de traction
 z — Bras de levier interne

Convergence

N_{iter} — Itérations
Tol — Tolérance de convergence
 $N_{\text{int}}, M_{z,\text{int}}, M_{y,\text{int}}$ — Efforts internes
 $\varepsilon_0, \kappa_x, \kappa_y$ — État de déformation

Scénarios de test

Chaque section est analysée à l'ELS et à l'ELU. Le béton a une résistance en traction nulle (section fissurée). À l'ELS, lois linéaires-élastiques ; à l'ELU, lois non linéaires (parabole-rectangle pour le

béton, bilinéaire élasto-plastique pour l'acier). Les cas de charge combinent flexion composée ($N + M_z$) et flexion biaxiale ($N + M_y + M_z$), avec des vérifications OK et KO.

Section	ELS (linéaire)	ELU (non linéaire)	Biaxiale ?	Norme
Hexagonale	OK	KO	Oui (ELU)	EC2
Carrée creuse	OK	OK	Oui	NBR-6118
Poutre en U	KO	OK	Oui (ELU)	BAEL 91

Section hexagonale pleine

Données d'entrée

Béton

- Section hexagonale
- Largeur $B = 2,00$ m
- Épaisseur minimale $h_1 = 0,60$ m
- Épaisseur maximale $h_2 = 1,00$ m

Armatures

- Espacement uniforme 150 mm
- 30 armatures
- Diamètre 25 mm
- Enrobage 50 mm
- 1 lit

Lois de matériaux (EC2)

- Béton C30/37 : $f_{ck} = 30$ MPa
- Acier B500B : $f_{yk} = 500$ MPa

Data

← Solid hexagonal section

Concrete ⓘ

Height h1 (m)

Height h2 (m)

Width (m)

0.6

1

2

Reinforcement ⓘ

Mode: uniform spacing ▾

Bar spacing (mm)

Bar diameter (mm)

Concrete cover (mm)

Layers (1 or 2)

150

25

50

1

Submit

Infos

Fig. 1. – Section hexagonale — géométrie et armatures.

ELS — Flexion composée ($N + M_z$)

Charges imposées : $N = 500$ kN, $M_z = 1000$ kN · m, $M_y = 0$

Visualization of stresses and strains

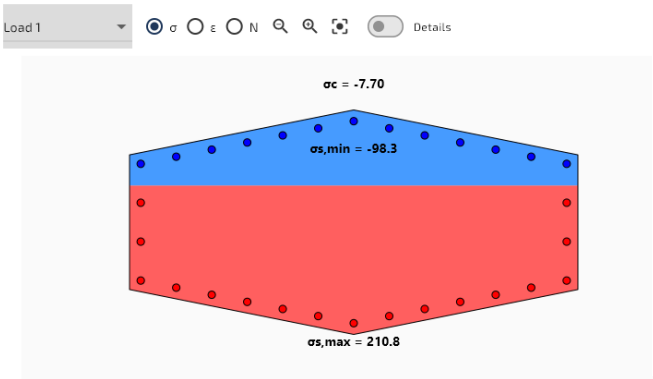


Fig. 2. – Distribution des contraintes.

Visualization of stresses and strains

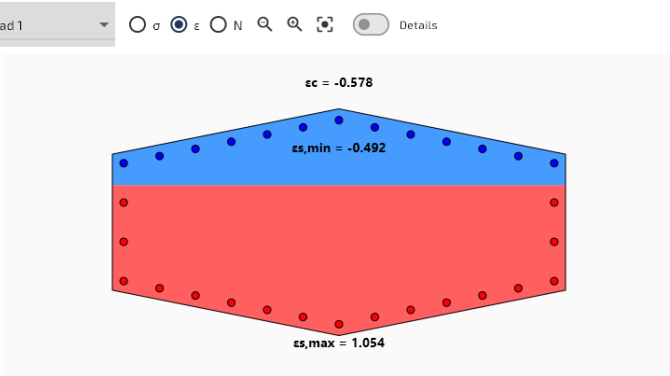


Fig. 3. – Distribution des déformations.

Contraintes et déformations

σ_c	-7,70 MPa
$\sigma_{s, \min}$	-98,33 MPa
$\sigma_{s, \max}$	210,77 MPa
ε_c	-0,578‰
$\varepsilon_{s, \min}$	-0,492‰
$\varepsilon_{s, \max}$	1,054‰
FS	0,527
Vérification	OK

Efforts internes

N_c	1731,2 kN
N_t	-1231,2 kN
x_C	0,000 m
y_C	0,345 m
x_T	0,000 m
y_T	-0,327 m
z	0,672 m

Convergence

N_{iter}	4
Tol	$3,91 \times 10^{-9}$
N_{int}	500,0 kN
$M_{z, \text{int}}$	1000,0 kN · m
$M_{y, \text{int}}$	0,0 kN · m
ε_0	$0,281 \times 10^{-3}$
κ_x	$-1,717 \times 10^{-3}$
κ_y	$0,000 \times 10^{-3}$

ELU — Flexion biaxiale ($N + M_y + M_z$)

Charges imposées : $N = 2000$ kN, $M_z = 3000$ kN · m, $M_y = 1800$ kN · m

Visualization of stresses and strains

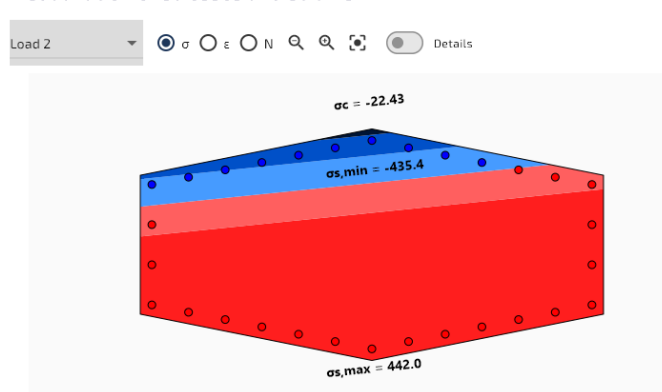


Fig. 4. – Distribution des contraintes.

Visualization of stresses and strains

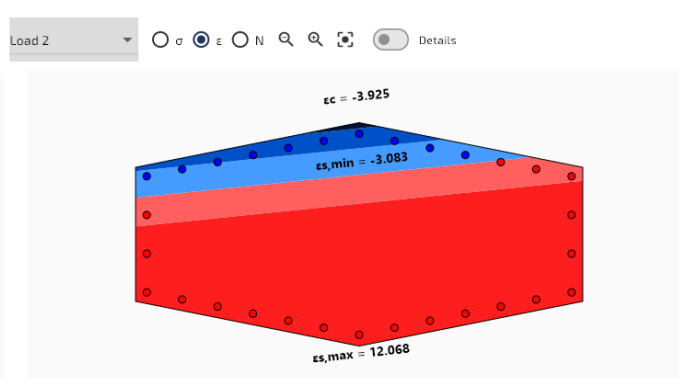


Fig. 5. – Distribution des déformations.

Contraintes et déformations

σ_c	-22,43 MPa
$\sigma_{s, \min}$	-435,44 MPa
$\sigma_{s, \max}$	441,98 MPa
ε_c	-3,925‰
$\varepsilon_{s, \min}$	-3,083‰
$\varepsilon_{s, \max}$	12,068‰
FS	1,121
Vérification	KO

Efforts internes

N_c	5871,9 kN
N_t	-3871,9 kN
x_C	-0,252 m
y_C	0,356 m
x_T	0,083 m
y_T	-0,235 m
z	0,679 m

Convergence

N_{iter}	8
Tol	$6,84 \times 10^{-9}$
N_{int}	2000,0 kN
$M_{z, \text{int}}$	3000,0 kN · m
$M_{y, \text{int}}$	1800,0 kN · m
ε_0	$4,492 \times 10^{-3}$
κ_x	$-16,834 \times 10^{-3}$
κ_y	$-1,721 \times 10^{-3}$

Lorsque $FS > 1$, les charges imposées dépassent la capacité de la section. Ici, le béton est écrasé ($\varepsilon_c = 3,925\text{‰} > \varepsilon_{cu} = 3,5\text{‰}$). Au-delà de la rupture, un module sécant prolonge la loi de matériau pour atteindre un équilibre fictif post-rupture, quantifiant le dépassement ($FS = 1,121$).

Section carrée creuse

Données d'entrée

Béton

- Section carrée creuse
- Côté extérieur $a = 2,0$ m
- Épaisseur de paroi $t = 0,30$ m

Armatures

- Espacement uniforme 150 mm
- 64 armatures
- Diamètre 20 mm
- Enrobage 40 mm
- 1 lit par face (intérieure + extérieure)

Lois de matériaux (NBR-6118)

- Béton C30 : $f_{ck} = 30$ MPa
- Acier : $f_{yk} = 500$ MPa

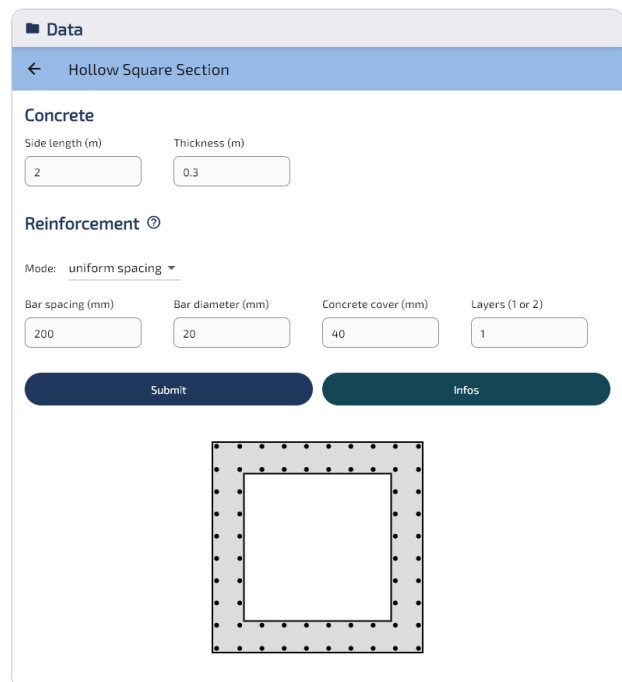


Fig. 6. – Section carrée creuse — géométrie et armatures.

ELS — Flexion biaxiale ($N + M_y + M_z$)

Charges imposées : $N = -400$ kN, $M_z = 900$ kN · m, $M_y = 400$ kN · m

Visualization of stresses and strains

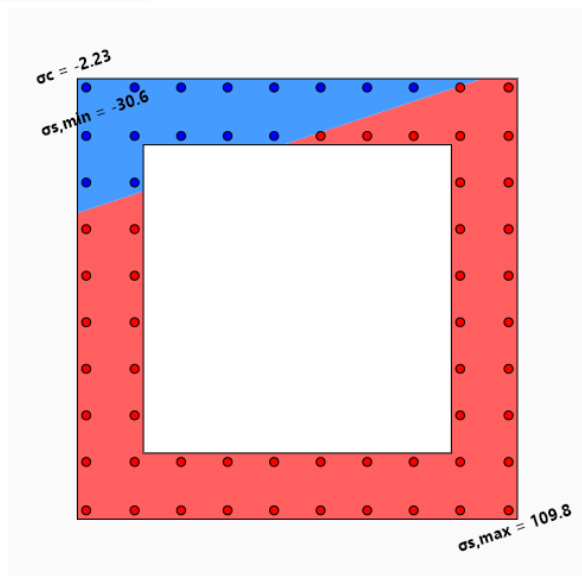


Fig. 7. – Distribution des contraintes.

Visualization of stresses and strains

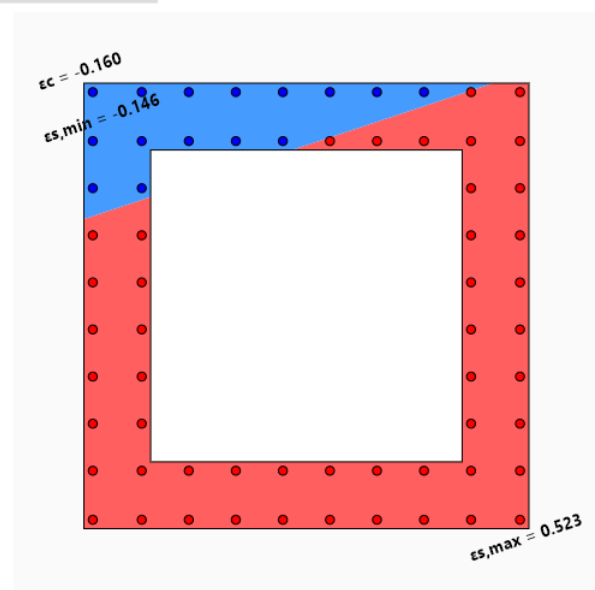


Fig. 8. – Distribution des déformations.

Contraintes et déformations

σ_c	-2,23 MPa
$\sigma_{s, \min}$	-30,57 MPa
$\sigma_{s, \max}$	109,79 MPa
ε_c	-0,160‰
$\varepsilon_{s, \min}$	-0,146‰
$\varepsilon_{s, \max}$	0,523‰
FS	0,274
Vérification	OK

Efforts internes

N_c	458,9 kN
N_t	-858,9 kN
x_C	-0,541 m
y_C	0,859 m
x_T	0,177 m
y_T	-0,589 m
z	1,616 m

Convergence

N_{iter}	4
Tol	$7,72 \times 10^{-10}$
N_{int}	-400,0 kN
$M_{z, \text{int}}$	900,0 kN · m
$M_{y, \text{int}}$	400,0 kN · m
ε_0	$0,189 \times 10^{-3}$
κ_x	$-0,261 \times 10^{-3}$
κ_y	$-0,087 \times 10^{-3}$

ELU — Flexion biaxiale ($N + M_y + M_z$)

Charges imposées : $N = 0$ kN, $M_z = 6000$ kN · m, $M_y = 6000$ kN · m

Visualization of stresses and strains

Load 2 ☐ σ ☒ ε ☐ N ☐ M ☐ V ☐ Q ☐ R ☐ S ☐ T ☐ U ☐ V ☐ W ☐ X ☐ Y ☐ Z ☐ σ ☐ ε ☐ N ☐ M ☐ V ☐ Q ☐ R ☐ S ☐ T ☐ U ☐ V ☐ W ☐ X ☐ Y ☐ Z ☐ σ ☐ ε ☐ N ☐ M ☐ V ☐ Q ☐ R ☐ S ☐ T ☐ U ☐ V ☐ W ☐ X ☐ Y ☐ Z ☐ σ ☐ ε ☐ N ☐ M ☐ V ☐ Q ☐ R ☐ S ☐ T ☐ U ☐ V ☐ W ☐ X ☐ Y ☐ Z ☐ σ ☐ ε ☐ N ☐ M ☐ V ☐ Q ☐ R ☐ S ☐ T ☐ U ☐ V ☐ W ☐ X ☐ Y ☐ Z ☐ σ ☐ ε ☐ N ☐ M ☐ V ☐ Q ☐ R ☐ S ☐ T ☐ U ☐ V ☐ W ☐ X ☐ Y ☐ Z ☐ σ ☐ ε ☐ N ☐ M ☐ V ☐ Q ☐ R ☐ S ☐ T ☐ U ☐ V ☐ W ☐ X ☐ Y ☐ Z ☐ σ ☐ ε ☐ N ☐ M ☐ V ☐ Q ☐ R ☐ S ☐ T ☐ U ☐ V ☐ W ☐ X ☐ Y ☐ Z ☐ σ ☐ ε ☐ N ☐ M ☐ V ☐ Q ☐ R ☐ S ☐ T ☐ U ☐ V ☐ W ☐ X ☐ Y ☐ Z ☐ σ ☐ ε ☐ N ☐ M ☐ V ☐ Q ☐ R ☐ S ☐ T ☐ U ☐ V ☐ W ☐ X ☐ Y ☐ Z ☐ σ ☐ ε ☐ N ☐ M ☐ V ☐ Q ☐ R ☐ S ☐ T ☐ U ☐ V ☐ W ☐ X ☐ Y ☐ Z ☐ σ ☐ ε ☐ N ☐ M ☐ V ☐ Q ☐ R ☐ S ☐ T ☐ U ☐ V ☐ W ☐ X ☐ Y ☐ Z ☐ σ ☐ ε ☐ N ☐ M ☐ V ☐ Q ☐ R ☐ S ☐ T ☐ U ☐ V ☐ W ☐ X ☐ Y ☐ Z ☐ σ ☐ ε ☐ N ☐ M ☐ V ☐ Q ☐ R ☐ S ☐ T ☐ U ☐ V ☐ W ☐ X ☐ Y ☐ Z ☐ σ ☐ ε ☐ N ☐ M ☐ V ☐ Q ☐ R ☐ S ☐ T ☐ U ☐ V ☐ W ☐ X ☐ Y ☐ Z ☐ σ ☐ ε ☐ N ☐ M ☐ V ☐ Q ☐ R ☐ S ☐ T ☐ U ☐ V ☐ W ☐ X ☐ Y ☐ Z ☐ σ ☐ ε ☐ N ☐ M ☐ V ☐ Q ☐ R ☐ S ☐ T ☐ U ☐ V ☐ W ☐ X ☐ Y ☐ Z ☐ σ ☐ ε ☐ N ☐ M ☐ V ☐ Q ☐ R ☐ S ☐ T ☐ U ☐ V ☐ W ☐ X ☐ Y ☐ Z ☐ σ ☐ ε ☐ N ☐ M ☐ V ☐ Q ☐ R ☐ S ☐ T ☐ U ☐ V ☐ W ☐ X ☐ Y ☐ Z ☐ σ ☐ ε ☐ N ☐ M ☐ V ☐ Q ☐ R ☐ S ☐ T ☐ U ☐ V ☐ W ☐ X ☐ Y ☐ Z ☐ σ ☐ ε ☐ N ☐ M ☐ V ☐ Q ☐ R ☐ S ☐ T ☐ U ☐ V ☐ W ☐ X ☐ Y ☐ Z ☐ σ ☐ ε ☐ N ☐ M ☐ V ☐ Q ☐ R ☐ S ☐ T ☐ U ☐ V ☐ W ☐ X ☐ Y ☐ Z ☐ σ ☐ ε ☐ N ☐ M ☐ V ☐ Q ☐ R ☐ S ☐ T ☐ U ☐ V ☐ W ☐ X ☐ Y ☐ Z ☐ σ ☐ ε ☐ N ☐ M ☐ V ☐ Q ☐ R ☐ S ☐ T ☐ U ☐ V ☐ W ☐ X ☐ Y ☐ Z ☐ σ ☐ ε ☐ N ☐ M ☐ V ☐ Q ☐ R ☐ S ☐ T ☐ U ☐ V ☐ W ☐ X ☐ Y ☐ Z ☐ σ ☐ ε ☐ N ☐ M ☐ V ☐ Q ☐ R ☐ S ☐ T ☐ U ☐ V ☐ W ☐ X ☐ Y ☐ Z ☐ σ ☐ ε ☐ N ☐ M ☐ V ☐ Q ☐ R ☐ S ☐ T ☐ U ☐ V ☐ W ☐ X ☐ Y ☐ Z ☐ σ ☐ ε ☐ N ☐ M ☐ V ☐ Q ☐ R ☐ S ☐ T ☐ U ☐ V ☐ W ☐ X ☐ Y ☐ Z ☐ σ ☐ ε ☐ N ☐ M ☐ V ☐ Q ☐ R ☐ S ☐ T ☐ U ☐ V ☐ W ☐ X ☐ Y ☐ Z ☐ σ ☐ ε ☐ N ☐ M ☐ V ☐ Q ☐ R ☐ S ☐ T ☐ U ☐ V ☐ W ☐ X ☐ Y ☐ Z ☐ σ ☐ ε ☐ N ☐ M ☐ V ☐ Q ☐ R ☐ S ☐ T ☐ U ☐ V ☐ W ☐ X ☐ Y ☐ Z ☐ σ ☐ ε ☐ N ☐ M ☐ V ☐ Q ☐ R ☐ S ☐ T ☐ U ☐ V ☐ W ☐ X ☐ Y ☐ Z ☐ σ ☐ ε ☐ N ☐ M ☐ V ☐ Q ☐ R ☐ S ☐ T ☐ U ☐ V ☐ W ☐ X ☐ Y ☐ Z ☐ σ ☐ ε ☐ N ☐ M ☐ V ☐ Q ☐ R ☐ S ☐ T ☐ U ☐ V ☐ W ☐ X ☐ Y ☐ Z ☐ σ ☐ ε ☐ N ☐ M ☐ V ☐ Q ☐ R ☐ S ☐ T ☐ U ☐ V ☐ W ☐ X ☐ Y ☐ Z ☐ σ ☐ ε ☐ N ☐ M ☐ V ☐ Q ☐ R ☐ S ☐ T ☐ U ☐ V ☐ W ☐ X ☐ Y ☐ Z ☐ σ ☐ ε ☐ N ☐ M ☐ V ☐ Q ☐ R ☐ S ☐ T ☐ U ☐ V ☐ W ☐ X ☐ Y ☐ Z ☐ σ ☐ ε ☐ N ☐ M ☐ V ☐ Q ☐ R ☐ S ☐ T ☐ U ☐ V ☐ W ☐ X ☐ Y ☐ Z ☐ σ ☐ ε ☐ N ☐ M ☐ V ☐ Q ☐ R ☐ S ☐ T ☐ U ☐ V ☐ W ☐ X ☐ Y ☐ Z ☐ σ ☐ ε ☐ N ☐ M ☐ V ☐ Q ☐ R ☐ S ☐ T ☐ U ☐ V ☐ W ☐ X ☐ Y ☐ Z ☐ σ ☐ ε ☐ N ☐ M ☐ V ☐ Q ☐ R ☐ S ☐ T ☐ U ☐ V ☐ W ☐ X ☐ Y ☐ Z ☐ σ ☐ ε ☐ N ☐ M ☐ V ☐ Q ☐ R ☐ S ☐ T ☐ U ☐ V ☐ W ☐ X ☐ Y ☐ Z ☐ σ ☐ ε ☐ N ☐ M ☐ V ☐ Q ☐ R ☐ S ☐ T ☐ U ☐ V ☐ W ☐ X ☐ Y ☐ Z ☐ σ ☐ ε ☐ N ☐ M ☐ V ☐ Q ☐ R ☐ S ☐ T ☐ U ☐ V ☐ W ☐ X ☐ Y ☐ Z ☐ σ ☐ ε ☐ N ☐ M ☐ V ☐ Q ☐ R ☐ S ☐ T ☐ U ☐ V ☐ W ☐ X ☐ Y ☐ Z ☐ σ ☐ ε ☐ N ☐ M ☐ V ☐ Q ☐ R ☐ S ☐ T ☐ U ☐ V ☐ W ☐ X ☐ Y ☐ Z ☐ σ ☐ ε ☐ N ☐ M ☐ V ☐ Q ☐ R ☐ S ☐ T ☐ U ☐ V ☐ W ☐ X ☐ Y ☐ Z ☐ σ ☐ ε ☐ N ☐ M ☐ V ☐ Q ☐ R ☐ S ☐ T ☐ U ☐ V ☐ W ☐ X ☐ Y ☐ Z ☐ σ ☐ ε ☐ N ☐ M ☐ V ☐ Q ☐ R ☐ S ☐ T ☐ U ☐ V ☐ W ☐ X ☐ Y ☐ Z ☐ σ ☐ ε ☐ N ☐ M ☐ V ☐ Q ☐ R ☐ S ☐ T ☐ U ☐ V ☐ W ☐ X ☐ Y ☐ Z ☐ σ ☐ ε ☐ N ☐ M ☐ V ☐ Q ☐ R ☐ S ☐ T ☐ U ☐ V ☐ W ☐ X ☐ Y ☐ Z ☐ σ ☐ ε ☐ N ☐ M ☐ V ☐ Q ☐ R ☐ S ☐ T ☐ U ☐ V ☐ W ☐ X ☐ Y ☐ Z ☐ σ ☐ ε ☐ N ☐ M ☐ V ☐ Q ☐ R ☐ S ☐ T ☐ U ☐ V ☐ W ☐ X ☐ Y ☐ Z ☐ σ ☐ ε ☐ N ☐ M ☐ V ☐ Q ☐ R ☐ S ☐ T ☐ U ☐ V ☐ W ☐ X ☐ Y ☐ Z ☐ σ ☐ ε ☐ N ☐ M ☐ V ☐ Q ☐ R ☐ S ☐ T ☐ U ☐ V ☐ W ☐ X ☐ Y ☐ Z ☐ σ ☐ ε ☐ N ☐ M ☐ V ☐ Q ☐ R ☐ S ☐ T ☐ U ☐ V ☐ W ☐ X ☐ Y ☐ Z ☐ σ ☐ ε ☐ N ☐ M ☐ V ☐ Q ☐ R ☐ S ☐ T ☐ U ☐ V ☐ W ☐ X ☐ Y ☐ Z ☐ σ ☐ ε ☐ N ☐ M ☐ V ☐ Q ☐ R ☐ S ☐ T ☐ U ☐ V ☐ W ☐ X ☐ Y ☐ Z ☐ σ ☐ ε ☐ N ☐ M ☐ V ☐ Q ☐ R ☐ S ☐ T ☐ U ☐ V ☐ W ☐ X ☐ Y ☐ Z ☐ σ ☐ ε ☐ N ☐ M ☐ V ☐ Q ☐ R ☐ S ☐ T ☐

Section personnalisée — Poutre en U

Données d'entrée

Cette section utilise la **géométrie solide personnalisée** : contour extérieur défini par des points XY, armatures fournies sous forme de tableau (x, y, φ) . C'est la procédure recommandée pour les géométries non standards.

Béton

- Poutre en U avec âmes inclinées
- Hauteur totale $h = 1,20$ m

Armatures

- Espacement uniforme 150 mm
- Hourdis inférieur : 11 armatures, diamètre 20 mm
- Âmes : 49 armatures, diamètre 12 mm
- 2 lits par âme

Lois de matériaux (BAEL 91)

- Béton : $f_{c28} = 30$ MPa, $\theta = 0,85$
- Acier fe500 : $f_e = 500$ MPa

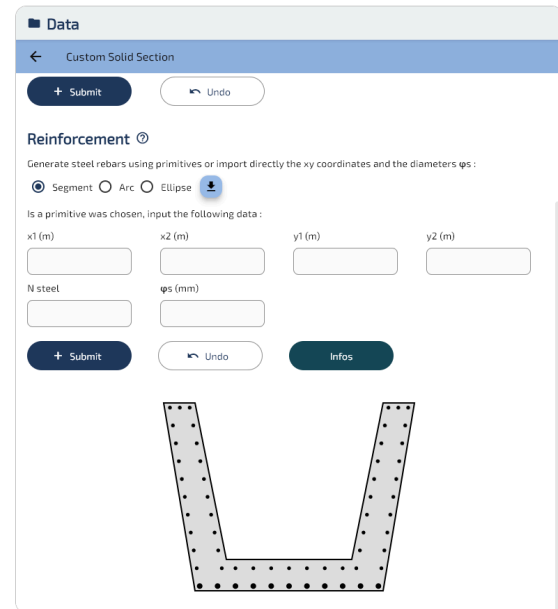


Fig. 11. – Poutre en U — géométrie et armatures.

ELS — Flexion simple (M_z)

Charges imposées : $N = 0$ kN, $M_z = 1500$ kN · m, $M_y = 0$

Visualization of stresses and strains

Load 1 ☒ σ ☐ ε ☐ N ☐ ϕ ☐ θ ☐ γ ☐ α ☐ β ☐ δ ☐ ϵ ☐ ζ ☐ η ☐ ι ☐ κ ☐ λ ☐ μ ☐ ν ☐ ξ ☐ $\omicron$ ☐ π ☐ ρ ☐ σ ☐ τ ☐ υ ☐ ϕ ☐ χ ☐ ψ ☐ ω ☐ δ ☐ ϵ ☐ ζ ☐ η ☐ ι ☐ κ ☐ λ ☐ μ ☐ ν ☐ ξ ☐ $\omicron$ ☐ π ☐ ρ ☐ σ ☐ τ ☐ υ ☐ ϕ ☐ χ ☐ ψ ☐ ω ☐ δ ☐ ϵ ☐ ζ ☐ η ☐ ι ☐ κ ☐ λ ☐ μ ☐ ν ☐ ξ ☐ $\omicron$ ☐ π ☐ ρ ☐ σ ☐ τ ☐ υ ☐ ϕ ☐ χ ☐ ψ ☐ ω ☐ δ ☐ ϵ ☐ ζ ☐ η ☐ ι ☐ κ ☐ λ ☐ μ ☐ ν ☐ ξ ☐ $\omicron$ ☐ π ☐ ρ ☐ σ ☐ τ ☐ υ ☐ ϕ ☐ χ ☐ ψ ☐ ω ☐ δ ☐ ϵ ☐ ζ ☐ η ☐ ι ☐ κ ☐ λ ☐ μ ☐ ν ☐ ξ ☐ $\omicron$ ☐ π ☐ ρ ☐ σ ☐ τ ☐ υ ☐ ϕ ☐ χ ☐ ψ ☐ ω ☐ δ ☐ ϵ ☐ ζ ☐ η ☐ ι ☐ κ ☐ λ ☐ μ ☐ ν ☐ ξ ☐ $\omicron$ ☐ π ☐ ρ ☐ σ ☐ τ ☐ υ ☐ ϕ ☐ χ ☐ ψ ☐ ω ☐ δ ☐ ϵ ☐ ζ ☐ η ☐ ι ☐ κ ☐ λ ☐ μ ☐ ν ☐ ξ ☐ $\omicron$ ☐ π ☐ ρ ☐ σ ☐ τ ☐ υ ☐ ϕ ☐ χ ☐ ψ ☐ ω ☐ δ ☐ ϵ ☐ ζ ☐ η ☐ ι ☐ κ ☐ λ ☐ μ ☐ ν ☐ ξ ☐ $\omicron$ ☐ π ☐ ρ ☐ σ ☐ τ ☐ υ ☐ ϕ ☐ χ ☐ ψ ☐ ω ☐ δ ☐ ϵ ☐ ζ ☐ η ☐ ι ☐ κ ☐ λ ☐ μ ☐ ν ☐ ξ ☐ $\omicron$ ☐ π ☐ ρ ☐ σ ☐ τ ☐ υ ☐ ϕ ☐ χ ☐ ψ ☐ ω ☐ δ ☐ ϵ ☐ ζ ☐ η ☐ ι ☐ κ ☐ λ ☐ μ ☐ ν ☐ ξ ☐ $\omicron$ ☐ π ☐ ρ ☐ σ ☐ τ ☐ υ ☐ ϕ ☐ χ ☐ ψ ☐ ω ☐ δ ☐ ϵ ☐ ζ ☐ η ☐ ι ☐ κ ☐ λ ☐ μ ☐ ν ☐ ξ ☐ $\omicron$ ☐ π ☐ ρ ☐ σ ☐ τ ☐ υ ☐ ϕ ☐ χ ☐ ψ ☐ ω ☐ δ ☐ ϵ ☐ ζ ☐ η ☐ ι ☐ κ ☐ λ ☐ μ ☐ ν ☐ ξ ☐ $\omicron$ ☐ π ☐ ρ ☐ σ ☐ τ ☐ υ ☐ ϕ ☐ χ ☐ ψ ☐ ω ☐ δ ☐ ϵ ☐ ζ ☐ η ☐ ι ☐ κ ☐ λ ☐ μ ☐ ν ☐ ξ ☐ $\omicron$ ☐ π ☐ ρ ☐ σ ☐ τ ☐ υ ☐ ϕ ☐ χ ☐ ψ ☐ ω ☐ δ ☐ ϵ ☐ ζ ☐ η ☐ ι ☐ κ ☐ λ ☐ μ ☐ ν ☐ ξ ☐ $\omicron$ ☐ π ☐ ρ ☐ σ ☐ τ ☐ υ ☐ ϕ ☐ χ ☐ ψ ☐ ω ☐ δ ☐ ϵ ☐ ζ ☐ η ☐ ι ☐ κ ☐ λ ☐ μ ☐ ν ☐ ξ ☐ $\omicron$ ☐ π ☐ ρ ☐ σ ☐ τ ☐ υ ☐ ϕ ☐ χ ☐ ψ ☐ ω ☐ δ ☐ ϵ ☐ ζ ☐ η ☐ ι ☐ κ ☐ λ ☐ μ ☐ ν ☐ ξ ☐ $\omicron$ ☐ π ☐ ρ ☐ σ ☐ τ ☐ υ ☐ ϕ ☐ χ ☐ ψ ☐ ω ☐ δ ☐ ϵ ☐ ζ ☐ η ☐ ι ☐ κ ☐ λ ☐ μ ☐ ν ☐ ξ ☐ $\omicron$ ☐ π ☐ ρ ☐ σ ☐ τ ☐ υ ☐ ϕ ☐ χ ☐ ψ ☐ ω ☐ δ ☐ ϵ ☐ ζ ☐ η ☐ ι ☐ κ ☐ λ ☐ μ ☐ ν ☐ ξ ☐ $\omicron$ ☐ π ☐ ρ ☐ σ ☐ τ ☐ υ ☐ ϕ ☐ χ ☐ ψ ☐ ω ☐ δ ☐ ϵ ☐ ζ ☐ η ☐ ι ☐ κ ☐ λ ☐ μ ☐ ν ☐ ξ ☐ $\omicron$ ☐ π ☐ ρ ☐ σ ☐ τ ☐ υ ☐ ϕ ☐ χ ☐ ψ ☐ ω ☐ δ ☐ ϵ ☐ ζ ☐ η ☐ ι ☐ κ ☐ λ ☐ μ ☐ ν ☐ ξ ☐ $\omicron$ ☐ π ☐ ρ ☐ σ ☐ τ ☐ υ ☐ ϕ ☐ χ ☐ ψ ☐ ω ☐ δ ☐ ϵ ☐ ζ ☐ η ☐ ι ☐ κ ☐ λ ☐ μ ☐ ν ☐ ξ ☐ $\omicron$ ☐ π ☐ ρ ☐ σ ☐ τ ☐ υ ☐ ϕ ☐ χ ☐ ψ ☐ ω ☐ δ ☐ ϵ ☐ ζ ☐ η ☐ ι ☐ κ ☐ λ ☐ μ ☐ ν ☐ ξ ☐ $\omicron$ ☐ π ☐ ρ ☐ σ ☐ τ ☐ υ ☐ ϕ ☐ χ ☐ ψ ☐ ω ☐ δ ☐ ϵ ☐ ζ ☐ η ☐ ι ☐ κ ☐ λ ☐ μ ☐ ν ☐ ξ ☐ $\omicron$ ☐ π ☐ ρ ☐ σ ☐ τ ☐ υ ☐ ϕ ☐ χ ☐ ψ ☐ ω ☐ δ ☐ ϵ ☐ ζ ☐ η ☐ ι ☐ κ ☐ λ ☐ μ ☐ ν ☐ ξ ☐ $\omicron$ ☐ π ☐ ρ ☐ σ ☐ τ ☐ υ ☐ ϕ ☐ χ ☐ ψ ☐ ω ☐ δ ☐ ϵ ☐ ζ ☐ η ☐ ι ☐ κ ☐ λ ☐ μ ☐ ν ☐ ξ ☐ $\omicron$ ☐ π ☐ ρ ☐ σ ☐ τ ☐ υ ☐ ϕ ☐ χ ☐ ψ ☐ ω ☐ δ ☐ ϵ ☐ ζ ☐ η ☐ ι ☐ κ ☐ λ ☐ μ ☐ ν ☐ ξ ☐ $\omicron$ ☐ π ☐ ρ ☐ σ ☐ τ ☐ υ ☐ ϕ ☐ χ ☐ ψ ☐ ω ☐ δ ☐ ϵ ☐ ζ ☐ η ☐ ι ☐ κ ☐ λ ☐ μ ☐ ν ☐ ξ ☐ $\omicron$ ☐ π ☐ ρ ☐ σ ☐ τ ☐ υ ☐ ϕ ☐ χ ☐ ψ ☐ ω ☐ δ ☐ ϵ ☐ ζ ☐ η ☐ ι ☐ κ ☐ λ ☐ μ ☐ ν ☐ ξ ☐ $\omicron$ ☐ π ☐ ρ ☐ σ ☐ τ ☐ υ ☐ ϕ ☐ χ ☐ ψ ☐ ω ☐ δ ☐ ϵ ☐ ζ ☐ η ☐ ι ☐ κ ☐ λ ☐ μ ☐ ν ☐ ξ ☐ $\omicron$ ☐ π ☐ ρ ☐ σ ☐ τ ☐ υ ☐ ϕ ☐ χ ☐ ψ ☐ ω ☐ δ ☐ ϵ ☐ ζ ☐ η ☐ ι ☐ κ ☐ λ ☐ μ ☐ ν ☐ ξ ☐ $\omicron$ ☐ π ☐ ρ ☐ σ ☐ τ ☐ υ ☐ ϕ ☐ χ ☐ ψ ☐ ω ☐ δ ☐ ϵ ☐ ζ ☐ η ☐ ι ☐ κ ☐ λ ☐ μ ☐ ν ☐ ξ ☐ $\omicron$ ☐ π ☐ ρ ☐ σ ☐ τ ☐ υ ☐ ϕ ☐ χ ☐ ψ ☐ ω ☐ δ ☐ ϵ ☐ ζ ☐ η ☐ ι ☐ κ ☐ λ ☐ μ ☐ ν ☐ ξ ☐ $\omicron$ ☐ π ☐ ρ ☐ σ ☐ τ ☐ υ ☐ ϕ ☐ χ ☐ ψ ☐ ω ☐ δ ☐ ϵ ☐ ζ ☐ η ☐ ι ☐ κ ☐ λ ☐ μ ☐ ν ☐ ξ ☐ $\omicron$ ☐ π ☐ ρ ☐ σ ☐ τ ☐ υ ☐ ϕ ☐ χ ☐ ψ ☐ ω ☐ δ ☐ ϵ ☐ ζ ☐ η ☐ ι ☐ κ ☐ λ ☐ μ ☐ ν ☐ ξ ☐ $\omicron$ ☐ π ☐ ρ ☐ σ ☐ τ ☐ υ ☐ ϕ ☐ χ ☐ ψ ☐ ω ☐ δ ☐ ϵ ☐ ζ ☐ η ☐ ι ☐ κ ☐ λ ☐ μ ☐ ν ☐ ξ ☐ $\omicron$ ☐ π ☐ ρ ☐ σ ☐ τ ☐ υ ☐ ϕ ☐ χ ☐ ψ ☐ ω ☐ δ ☐ ϵ ☐ ζ ☐ η ☐ ι ☐ κ ☐ λ ☐ μ ☐ ν ☐ ξ ☐ $\omicron$ ☐ π ☐ ρ ☐ σ ☐ τ ☐ υ ☐ ϕ ☐ χ ☐ ψ ☐ ω ☐ δ ☐ ϵ ☐ ζ ☐ η ☐ ι ☐ κ ☐ λ ☐ μ ☐ ν ☐ ξ ☐ $\omicron$ ☐ π ☐ ρ ☐ σ ☐ τ ☐ υ ☐ ϕ ☐ χ ☐ ψ ☐ ω ☐ δ ☐ ϵ ☐ ζ ☐ η ☐ ι ☐ κ ☐ λ ☐ μ ☐ ν ☐ ξ ☐ $\omicron$ ☐ π ☐ ρ ☐ σ ☐ τ ☐ υ ☐ ϕ ☐ χ ☐ ψ ☐ ω ☐ δ ☐ ϵ ☐ ζ ☐ η ☐ ι ☐ κ ☐ λ ☐ μ ☐ ν ☐ ξ ☐ $\omicron$ ☐ π ☐ ρ ☐ σ ☐ τ ☐ υ ☐ ϕ ☐ χ ☐ ψ ☐ ω ☐ δ ☐ ϵ ☐ ζ ☐ η ☐ ι ☐ κ ☐ λ ☐ μ ☐ ν ☐ ξ ☐ $\omicron$ ☐ π ☐ ρ ☐ σ ☐ τ ☐ υ ☐ ϕ ☐ χ ☐ ψ ☐ ω ☐ δ ☐ ϵ ☐ ζ ☐ η ☐ ι ☐ κ ☐ λ ☐ μ ☐ ν ☐ ξ ☐ $\omicron$ ☐ π ☐ ρ ☐ σ ☐ τ ☐ υ ☐ ϕ ☐ χ ☐ ψ ☐ ω ☐ δ ☐ ϵ ☐ ζ ☐ η ☐ ι ☐ κ ☐ λ ☐ μ ☐ ν ☐ ξ ☐ $\omicron$ ☐ π ☐ ρ ☐ σ ☐ τ ☐ υ ☐ ϕ ☐ χ ☐ ψ ☐ ω ☐ δ ☐ ϵ ☐ ζ ☐ η ☐ ι ☐ κ ☐ λ ☐ μ ☐ ν ☐ ξ ☐ $\omicron$ ☐ π ☐ ρ ☐ σ ☐ τ ☐ υ ☐ ϕ ☐ χ

Contraintes et déformations

σ_c	-13,82 MPa
$\sigma_{s, \min}$	-194,19 MPa
$\sigma_{s, \max}$	302,23 MPa
ε_c	-1,036‰
$\varepsilon_{s, \min}$	-0,971‰
$\varepsilon_{s, \max}$	1,511‰
FS	1,209
Vérification	KO

Efforts internes

N_c	1593,2 kN
N_t	-1593,2 kN
x_C	0,000 m
y_C	0,571 m
x_T	0,000 m
y_T	-0,371 m
z	0,942 m

Convergence

N_{iter}	4
Tol	$2,26 \times 10^{-13}$
N_{int}	0,0 kN
$M_{z, \text{int}}$	1500,0 kN · m
$M_{y, \text{int}}$	0,0 kN · m
ε_0	$0,543 \times 10^{-3}$
κ_x	$-2,177 \times 10^{-3}$
κ_y	$0,000 \times 10^{-3}$

À l'ELS, la vérification est KO : $\sigma_{s, \max} = 302,2$ MPa dépasse la contrainte admissible BAEL $\bar{\sigma}_s = 250,0$ MPa (fissuration préjudiciable, $\eta = 1,60$), donnant FS = 1,209.

ELU — Flexion biaxiale ($M_y + M_z$)

Charges imposées : $N = 0$ kN, $M_z = 2000$ kN · m, $M_y = 500$ kN · m

Visualization of stresses and strains

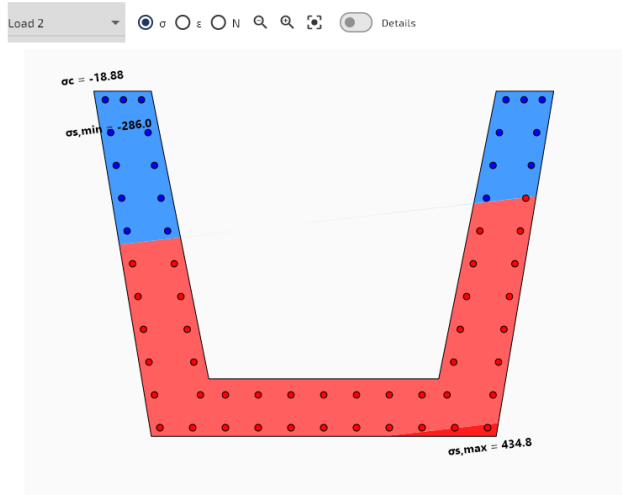


Fig. 14. — Distribution des contraintes.

Visualization of stresses and strains

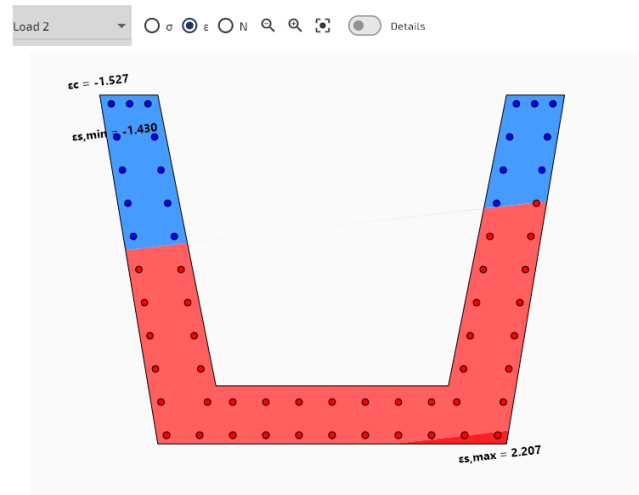


Fig. 15. — Distribution des déformations.

Contraintes et déformations

σ_c	-18,88 MPa
$\sigma_{s, \min}$	-286,01 MPa
$\sigma_{s, \max}$	434,78 MPa
ε_c	-1,527‰
$\varepsilon_{s, \min}$	-1,430‰
$\varepsilon_{s, \max}$	2,207‰
FS	0,436
Vérification	OK

Efforts internes

N_c	2158,2 kN
N_t	-2158,2 kN
x_C	-0,192 m
y_C	0,562 m
x_T	0,039 m
y_T	-0,365 m
z	0,955 m

Convergence

N_{iter}	4
Tol	$5,50 \times 10^{-9}$
N_{int}	0,0 kN
$M_{z, \text{int}}$	2000,0 kN · m
$M_{y, \text{int}}$	500,0 kN · m
ε_0	$0,772 \times 10^{-3}$
κ_x	$-2,811 \times 10^{-3}$
κ_y	$-0,325 \times 10^{-3}$

Validation des résultats

Vérification de l'équilibre interne

Les charges imposées (N, M_y, M_z) sont les **données d'entrée**. SectionPro détermine l'état de déformation $(\varepsilon_0, \kappa_y, \kappa_z)$ par résolution itérative, puis intègre les contraintes pour obtenir les efforts **internes** $(N_{\text{int}}, M_{y,\text{int}}, M_{z,\text{int}})$. À convergence :

$$N_{\text{int}} \approx N \qquad M_{y,\text{int}} \approx M_y \qquad M_{z,\text{int}} \approx M_z$$

Section	Charge	N (kN)	N_{int} (kN)	M_z (kN·m)	$M_{z,\text{int}}$ (kN·m)	Δ
Hexagonale	ELS	500,0	500,0	1000,0	1000,0	0,00 %
	ELU	2000,0	2000,0	3000,0	3000,0	0,00 %
Carrée cr.	ELS	−400,0	−400,0	900,0	900,0	0,00 %
	ELU	0,0	0,0	6000,0	6000,0	0,00 %
Poutre en U	ELS	0,0	0,0	1500,0	1500,0	0,00 %
	ELU	0,0	0,0	2000,0	2000,0	0,00 %

L'équilibre interne est satisfait à la précision machine pour les six cas de charge — trois géométries, trois normes, lois linéaires (ELS) et non linéaires (ELU).

Benchmark de performance — 100 000 cas de charge

Nous exécutons 100 000 cas de charge sur **chacune des trois sections** (ELS/ELU, linéaire/non linéaire, uniaxial/biaxial, OK/KO). Le benchmark mesure le temps de calcul pur, hors interface. Convergence obtenue pour les 300 000 cas.

Métrique	Hexagonale	Carrée creuse	Poutre en U
Cas de charge	100 000	100 000	100 000
Temps de calcul	0,173 s	0,304 s	0,260 s
Débit	578 000 charges/s	329 000 charges/s	385 000 charges/s

Les trois sections sont traitées en moins de 0,3 seconde — des débits de 329 000 à 578 000 cas de charge par seconde. Cela rend SectionPro adapté aux vérifications systématiques de grandes enveloppes de charges générées par des logiciels éléments finis, où des milliers de combinaisons de charges doivent être vérifiées en une seule passe.

Export

SectionPro exporte les résultats en **PDF**, **texte** (colonnes à largeur fixe) et **Excel** (.xlsx) : contraintes, déformations, efforts internes, convergence et figures de distribution.

STRESS AND STRAIN VERIFICATION RESULTS $\sigma - \epsilon$

GENERATED BY THE SECTIONPRO SOFTWARE ON : 2026-03-04 13:27

Load case #1 is the most unfavorable

Stresses and strains $\sigma - \epsilon$

σ and ϵ are the stresses and strains of concrete and steel (indices c and s). The safety factor reflects the ratio between maximum strain and limit strain. SF>1 therefore indicates non-verification of the material.

Param	Unit	#1	#2
σ_c	MPa	-13.82	-18.88
$\sigma_{s,min}$	MPa	-194.19	-286.01
$\sigma_{s,max}$	MPa	302.23	434.78
ϵ_c	‰	-1.036	-1.527
$\epsilon_{s,min}$	‰	-0.971	-1.430
$\epsilon_{s,max}$	‰	1.511	2.207
SF	-	1.209	0.436
Check	-	Ko	Ok

Internal forces

N_c and N_t are the compression and tension forces resulting from the integration of stresses over the section. The application coordinates of these forces are given by x, y . The lever arm z is the distance between these forces.

Param	Unit	#1	#2
N_c	kN	1593.2	2158.2
N_t	kN	-1593.2	-2158.2
x_c	m	0.000	-0.192
y_c	m	0.571	0.561
x_t	m	0.000	0.039
y_t	m	-0.371	-0.365
z	m	0.942	0.955

Convergence

Given below are the number of iterations necessary for convergence of the solution algorithm, the tolerance achieved, the internal forces (N, M_z, M_y) and the deformation state of the section ($\epsilon_{sx}, \epsilon_{sy}$).

Param	Unit	#1	#2
N_{iter}	-	4	4
Tol	-	9.99e-9	9.99e-9
N_{int}	kN	0.0	0.0
$M_{z,int}$	kN-m	1500.0	2000.0
$M_{y,int}$	kN-m	-0.0	500.00
ϵ_{sx}	‰	0.543	0.772
ϵ_{sy}	‰	-2.177	-2.811
ϵ_{xy}	‰	-0.000	-0.325

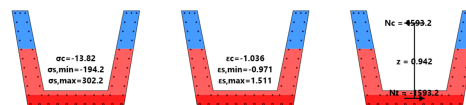
GENERATED BY THE SECTIONPRO SOFTWARE

STRESS AND STRAIN VERIFICATION RESULTS $\sigma - \epsilon$

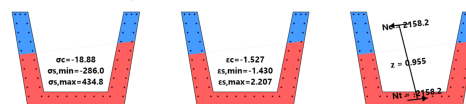
GENERATED BY THE SECTIONPRO SOFTWARE ON : 2026-03-04 13:27

Given below are figures representing graphically the previous tabular results.

Load case n°1 - Safety Factor = 1.209 (σ, ϵ and N_c, N_t)



Load case n°2 - Safety Factor = 0.436 (σ, ϵ and N_c, N_t)



GENERATED BY THE SECTIONPRO SOFTWARE

Fig. 16. – Export PDF — page 1 : tableaux de résultats.

Fig. 17. – Export PDF — page 2 : figures.

Conclusion

L'analyse identifie correctement les dépassements de capacité, avec un équilibre interne à la précision machine dans tous les cas. Les trois sections couvrent trois normes (EC2, NBR-6118, BAEL 91), trois géométries, deux types de lois de matériaux et deux états de flexion.

Section	Cas de charge	Norme	Vérification	Équilibre Δ
Hexagonale	ELS (linéaire)	EC2	OK	0,00 %
	ELU (non linéaire)	EC2	KO	0,00 %
Carrée cr.	ELS (linéaire)	NBR-6118	OK	0,00 %
	ELU (non linéaire)	NBR-6118	OK	0,00 %
Poutre en U	ELS (linéaire)	BAEL 91	KO	0,00 %
	ELU (non linéaire)	BAEL 91	OK	0,00 %

Le benchmark montre des temps de 0,17 à 0,30 s par section (329 000 à 578 000 cas/s), avec convergence pour les 300 000 cas. SectionPro est adapté aux vérifications d'enveloppes issues de logiciels éléments finis.