

Sections avancées

Modélisation de sections complexes dans SectionPro

Application à une section de caisson de pont précontraint sur appui

BridgeKernel · 2026

Introduction

Les sections usuelles de poutres, poteaux et voiles se décrivent à partir d'un contour unique et d'un ferrailage homogène. Les ouvrages réels comportent souvent plusieurs matériaux, des évidements, des nappes d'armatures distinctes, des câbles de précontrainte ou des éléments métalliques intégrés. Leur analyse demande une représentation capable de conserver la géométrie et la loi de comportement propres à chaque composant.

Les sections avancées de SectionPro répondent à ce besoin. Une section avancée est construite comme un assemblage de domaines géométriques, d'armatures passives, d'aciers de précontrainte, de profilés et de tôles minces. Chaque composant reçoit la loi de matériau utilisée dans les analyses. Cette description alimente ensuite les calculs de caractéristiques mécaniques, les vérifications sous efforts imposés, le calcul d'ouverture des fissures et les domaines d'interaction.

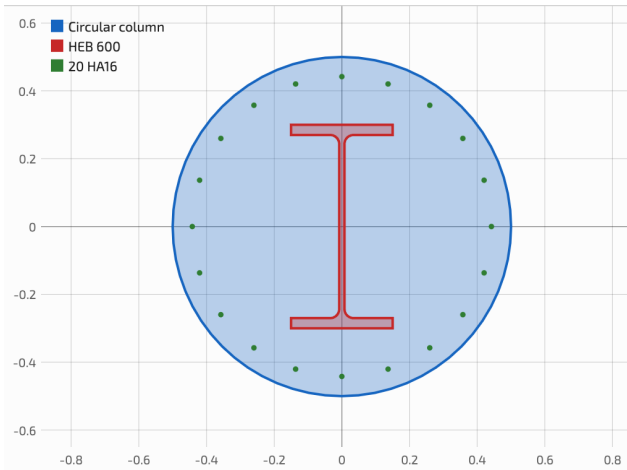
L'article présente d'abord le modèle de données d'une section avancée. Une section critique sur appui d'un caisson de pont précontraint sert ensuite d'exemple. Le choix de cette géométrie permet de réunir un domaine évidé, des armatures réparties sur plusieurs parements et des groupes de câbles dans un même modèle.

Définition d'une section avancée

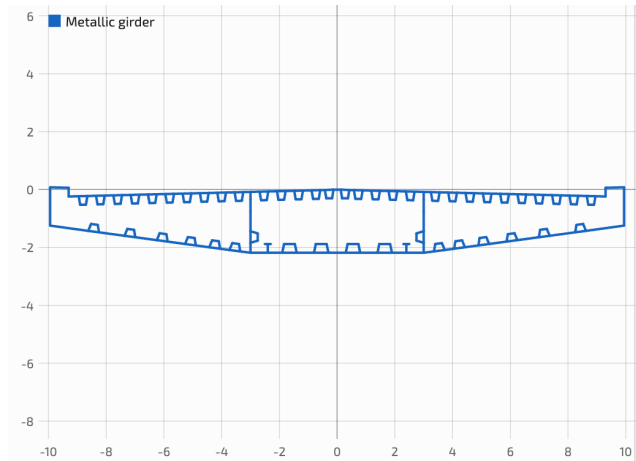
Une section avancée associe plusieurs familles d'objets mécaniques. Le calcul conserve leur position dans le repère de la section et évalue leur contribution à partir de la loi qui leur est affectée.

- Un domaine géométrique, ou GeoDomain, est défini par un contour extérieur et peut contenir plusieurs évidements. Une section peut réunir plusieurs domaines, chacun associé à sa propre loi de matériau.
- Les armatures passives sont organisées en lits indépendants. Chaque barre possède une position, un diamètre et une loi d'acier, ce qui permet de distinguer les nappes, les parements et les nuances.
- Les aciers de précontrainte sont regroupés par familles de câbles définies par leurs positions, leurs aires, leurs paramètres d'adhérence et leur état initial.

- Les profilés métalliques peuvent provenir de la bibliothèque intégrée de 535 références, qui couvre onze familles européennes : IPE, HEA, HEB, HEM, UNP, UPE, UAP, LNP, tubes carrés, rectangulaires et circulaires. Ils sont représentés soit par un GeoDomain intégrant leur surface réelle, avec les raccords courbes et les congés, soit par une décomposition en éléments TSP.
- Un élément TSP décrit la ligne moyenne droite ou courbe d'une tôle et son épaisseur. Sa contribution est obtenue par intégration linéique, avec une contrainte supposée uniforme dans l'épaisseur. Cette représentation convient aux tôles minces, aux profilés et aux caissons multicellulaires.
- Les lois de matériaux sont affectées directement aux composants. Elles peuvent provenir des modèles normatifs de SectionPro ou d'une relation générale contrainte-déformation définie par l'utilisateur pour les états limites étudiés.



Poteau mixte : béton, profilé HEB et armatures passives.

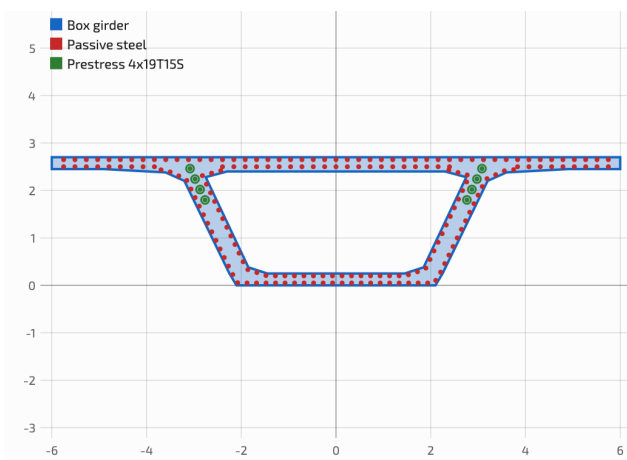


Tablier métallique : 267 éléments TSP et 51 cellules de Bredt.

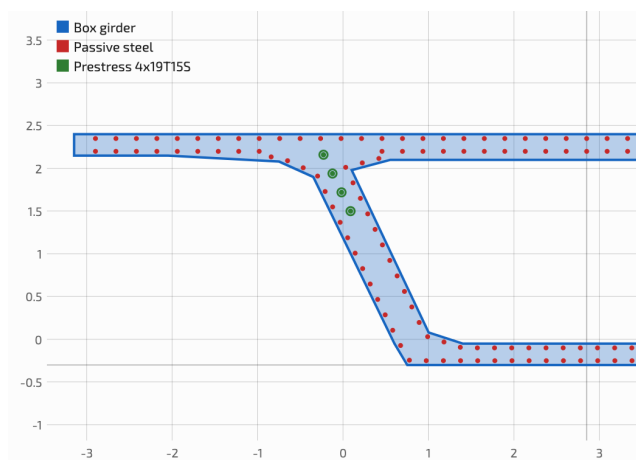
Fig. 1. – Exemples de sections avancées affichées dans SectionPro.

Exemple : caisson de pont

La section étudiée correspond à une coupe critique sur appui d'un caisson monocellulaire. Elle mesure 12,00 m de largeur et 2,70 m de hauteur. Le hourdis supérieur, les âmes inclinées, les goussets et le hourdis inférieur forment un domaine de béton unique. La cellule centrale est définie comme un vide intérieur.



(a) Vue globale de la section.



(b) Détail du gousset supérieur gauche.

Fig. 2. – Modèle SectionPro : domaine de béton, armatures passives et groupes de précontrainte.

Composant	Matériau	Définition dans l'exemple
GeoDomain 1	Béton C45/55	Contour du caisson, une cellule intérieure, aire brute de 6,759 m ²
Armatures passives	B500B	186 barres HA16 réparties à 50 mm des parements
Précontrainte	Y1860	8 unités 19T15S, quatre suivant chaque âme, aire de 2 850 mm ² par unité et gaines de 100 mm

La section comporte 186 barres passives et huit unités de précontrainte. Les quatre gaines de chaque âme sont alignées suivant sa direction et se prolongent dans le gousset supérieur. Les coordonnées sont générées par script, puis enregistrées dans le fichier de section avancée. Le même fichier est utilisé pour toutes les analyses présentées ci-après.

Torseurs de charges et précontrainte

Le torseur global appliqué à la section résulte des charges permanentes G , des surcharges Q et de la précontrainte P : $\mathbf{S} = \mathbf{S}_G + \mathbf{S}_Q + \mathbf{S}_P$.

Pour la section étudiée, le modèle structural en éléments finis établi sur notre logiciel LFEM fournit les torseurs $G + Q$ suivants, en MN et MN · m : $\mathbf{S}_{G+Q}^{\text{ELS}} = (0; -58,650; 0)$ et $\mathbf{S}_{G+Q}^{\text{ELU}} = (0; -92,650; 0)$.

Dans SectionPro, la précontrainte intervient à deux niveaux. Son action sur la structure, comprenant l'effet isostatique et l'éventuel effet hyperstatique, doit être introduite dans le torseur des charges. La symétrie horizontale de la section et du tracé annule ici le moment selon y , d'où $\mathbf{S}_P = (N_P, M_{z,P}^{\text{iso}} + M_{z,P}^{\text{hyper}}, 0)$.

La tension effective du câble définit l'état initial associé à l'action de précontrainte. Pour la réponse résistante, l'état de déformation d'équilibre modifie ensuite la contrainte des câbles : leur allongement produit une surtension qui accroît leur contribution résistante, tandis que leur raccourcissement entraîne une détente.

Pour l'exemple, la tension effective après pertes vaut 1116 MPa. L'action correspondante produit un effort normal de 25,445 MN. À la section d'appui, les câbles sont situés au-dessus du centre de gravité : le moment isostatique vaut donc +8,994 MN · m. Le même modèle donne, pour ce tracé, un moment hyperstatique de même signe de +4,400 MN · m. Le moment de précontrainte introduit dans la section vaut ainsi +13,394 MN · m.

Torseur final	N [MN]	M_z [MN·m]	M_y [MN·m]
ELS	25,445	-45,256	0,000
ELU	25,445	-79,256	0,000

Résultats sur le modèle complet

Caractéristiques mécaniques

SectionPro calcule les caractéristiques de la section brute, nette et homogénéisée. Dans cet exemple, la section nette est obtenue en déduisant uniquement les gaines de précontrainte ; les armatures passives

sont conservées. Dans la section homogénéisée, les aciers passifs et actifs sont affectés du coefficient $n = 5$.

Section	A [m ²]	y_G [m]	I_{zz} [m ⁴]	I_{yy} [m ⁴]
Brute	6,7590	1,7765	6,4096	55,5258
Nette	6,6962	1,7732	6,3979	54,9883
Homogénéisée	6,9598	1,7777	6,5809	57,1632

Les propriétés de torsion et de cisaillement de la section brute sont regroupées ci-dessous.

J [m ⁴]	A_{sy} [m ²]	A_{sz} [m ²]	y_T [m]	Γ [m ⁶]
13,6059	1,5031	4,5502	1,3508	6,5277

Le champ représenté ci-dessous correspond aux contraintes de cisaillement produites par un moment de torsion unitaire.

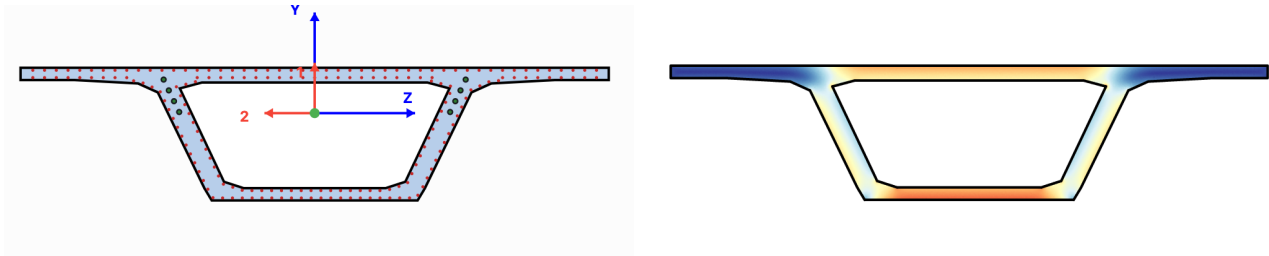


Fig. 3. – Repères central et principal (gauche) et champ de cisaillement sous torsion unitaire (droite).

Équilibre à l'ELS et à l'ELU

Le solveur détermine l'état de déformation de la section qui équilibre les sollicitations extérieures. Les contraintes sont alors obtenues à partir des lois de comportement respectives du béton, des aciers passifs et des câbles. Les résultats présentés correspondent à l'ELS caractéristique et à l'ELU fondamental.

Pour les câbles, la contrainte finale est évaluée à partir de la déformation cumulée $\varepsilon_0 + \Delta\varepsilon_1 + \Delta\varepsilon_2$. Le terme ε_0 est la déformation associée à la tension effective de 1116 MPa, $\Delta\varepsilon_1$ traduit l'éventuelle décompression du béton adjacent au câble et $\Delta\varepsilon_2$ correspond à la déformation obtenue par l'équilibre de la section. L'effet de décompression est activé dans l'exemple.

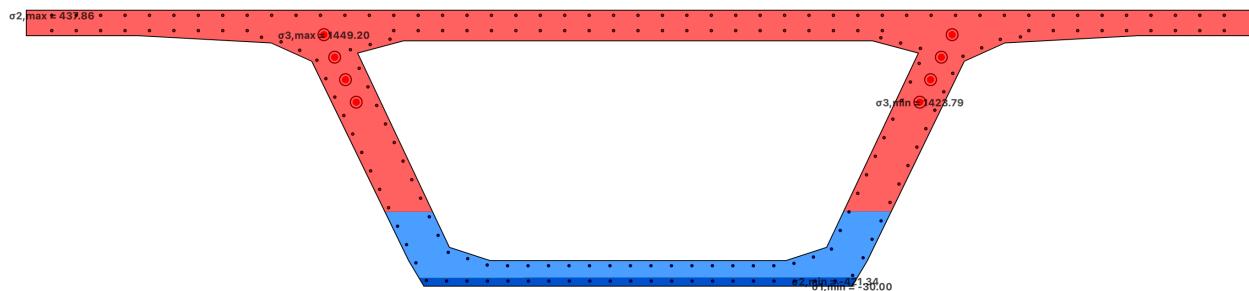


Fig. 4. – Champ de contraintes normales à l'ELU obtenu lors de la vérification NR du torseur final.

Résultat	Unité	ELS caractéristique	ELU fondamental
Béton			
Déformation minimale, $\varepsilon_{b, \min}$	‰	-0,531	-2,262
Contrainte minimale, $\sigma_{b, \min}$	MPa	-19,264	-30,000
Aciers passifs			
Déformation minimale, $\varepsilon_{s, \min}$	‰	-0,512	-2,107
Déformation maximale, $\varepsilon_{s, \max}$	‰	0,495	5,946
Contrainte minimale, $\sigma_{s, \min}$	MPa	-102,31	-421,34
Contrainte maximale, $\sigma_{s, \max}$	MPa	99,09	437,86
Précontrainte			
Déformation minimale, $\varepsilon_{p, \min}$	‰	0,166	3,297
Contrainte totale minimale, $\sigma_{p, \min}$	MPa	1148,32	1423,79
Surtension minimale, $\Delta\sigma_{p, \min}$	MPa	32,32	307,79
Déformation maximale, $\varepsilon_{p, \max}$	‰	0,422	5,352
Contrainte totale maximale, $\sigma_{p, \max}$	MPa	1198,23	1449,20
Surtension maximale, $\Delta\sigma_{p, \max}$	MPa	82,23	333,20
Résolution			
Itérations		4	6
Résidu de convergence		$1,0 \times 10^{-11}$	$4,7 \times 10^{-7}$
Convergence		Oui	Oui

À l'ELU fondamental, le béton du hourdis inférieur atteint localement son palier plastique en compression, tandis qu'une zone tendue importante se développe dans le hourdis supérieur et la partie haute des âmes. Les câbles sont fortement mobilisés, avec une surtension comprise entre 307,8 et 333,2 MPa.

À l'ELS caractéristique, les vérifications de contraintes sont satisfaites, avec une compression maximale du béton de 19,264 MPa, une traction maximale des armatures passives de 99,09 MPa et une contrainte totale maximale des câbles de 1198,23 MPa ; l'ouverture $w_k = 0,174$ mm, bien qu'évaluée ici sous la combinaison caractéristique, reste faible.

Domaines d'interaction

La géométrie avancée et les lois de matériaux servent également au calcul des domaines de résistance. La courbe $N-M_z$ représente la coupe du domaine pour $M_y = 0$. La surface $N-M_z-M_y$ étend le calcul à toutes les directions de flexion.

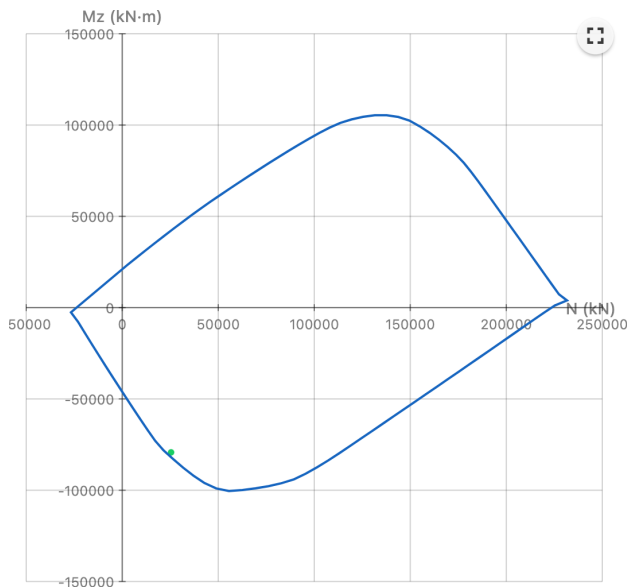


Fig. 5. – Courbe d'interaction N - M_z à l'ELU pour $M_y = 0$ et position du torseur final.

Le tableau suivant donne la boîte englobante de la surface d'interaction, définie par les valeurs minimale et maximale de chacune de ses trois composantes.

Composante	Minimum	Maximum
N	-26,70 MN	231,62 MN
M_z	-100,41 MN · m	105,35 MN · m
M_y	-287,82 MN · m	287,82 MN · m

Les capacités positive et négative suivant M_y coïncident, conformément à la symétrie transversale de la section. L'écart suivant M_z traduit la différence de géométrie et d'aciers entre les hourdis supérieur et inférieur. Le torseur final se situe au voisinage immédiat de la frontière du domaine de résistance. Le module d'évaluation des distances entre les sollicitations et le domaine donne $FS = 0,983$, valeur légèrement inférieure à l'unité mais très proche de la limite.

Performance

Le tableau ci-dessous présente les temps d'exécution des appels au noyau de SectionPro sur le modèle du caisson. Ces valeurs excluent l'interface graphique et le rendu des résultats.

Analyse	Temps de calcul
Caractéristiques mécaniques	28,3 ms
État de contraintes et de déformations	0,73 ms
Calcul d'ouverture des fissures	2,38 ms
Courbe d'interaction N - M_z , 200 points	1,11 ms
Surface d'interaction N - M_z - M_y , maillage 50×50	208 ms

Ces résultats illustrent l'un des points forts de SectionPro : l'optimisation poussée du noyau maintient des temps de calcul très faibles, y compris pour les analyses non linéaires et la construction de domaines de résistance tridimensionnels. Cette rapidité permet d'enchaîner les vérifications et les

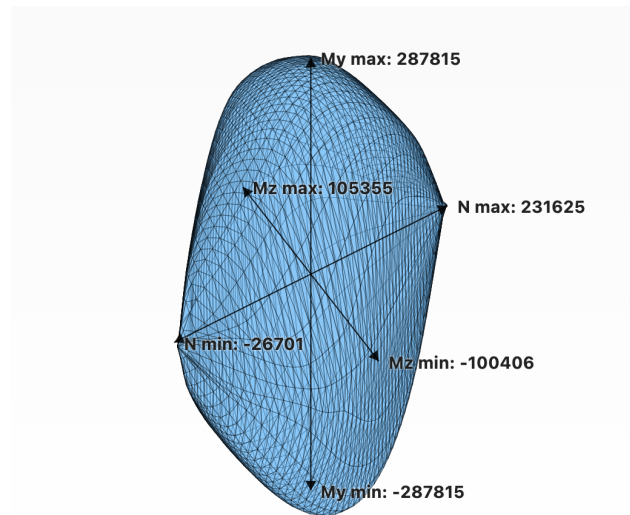


Fig. 6. – Surface d'interaction N - M_z - M_y à l'ELU.

variantes avec une réponse quasi immédiate, et contribue directement à la fluidité de l'expérience utilisateur.

| Conclusion

Les sections avancées réunissent dans un même modèle plusieurs domaines géométriques et leurs évidements, des lits d'armatures passives, des groupes d'aciers de précontrainte, des profilés métalliques et des tôles minces. Chaque composant conserve sa loi de matériau pour les différents états limites.

Le caisson étudié constitue une application de cette représentation. Sa coupe sur appui réunit un domaine de béton évidé, des armatures réparties sur les parements et des unités de précontrainte suivant les âmes. La précontrainte intervient dans les torseurs de charges par ses effets isostatiques et hyperstatiques. La contribution résistante des câbles est évaluée à partir de leur surtension, en tenant compte de l'état initial de précontrainte, de l'éventuelle décompression du béton adjacent et de la déformation d'équilibre de la section.

Le mode avancé permet ainsi de traiter pratiquement toute section droite, quelles que soient la complexité de sa géométrie et la nature des matériaux qui la composent. Cette généralité reste naturellement inscrite dans les hypothèses de l'analyse de section, notamment la conservation des sections planes et la compatibilité des déformations entre composants liés. Grâce à l'optimisation du noyau de calcul, ces modèles détaillés conservent des temps de réponse quasi instantanés.