

Courbes d'interaction

Tutoriel SectionPro : diagrammes d'interaction 2D classiques
avec vérification des combinaisons de charges

BridgeKernel · 2026

Introduction

Le module de courbes d'interaction calcule les diagrammes 2D classiques pour les sections en béton armé. En fixant une composante (N , M_z ou M_y) à une valeur choisie, SectionPro calcule la frontière de résistance dans le plan des deux composantes restantes. Les combinaisons de charges sont représentées sur le graphique : les charges à l'intérieur apparaissent en **vert** (vérifié), celles à l'extérieur en **rouge** (non vérifié). Cela permet une vérification visuelle directe sans coefficient de sécurité numérique.

Deux modes sont disponibles. En mode composante fixée, une composante est définie à une valeur spécifique (par exemple $N = 0$) et la courbe est tracée dans le plan restant. La valeur fixée doit se trouver dans le domaine de résistance, faute de quoi aucune courbe n'existe à ce niveau.

En mode enveloppe, SectionPro trace deux courbes : l'une à la valeur maximale de la composante fixée, l'autre à la valeur minimale. Cela permet de vérifier plusieurs cas de charge en une seule figure. Les valeurs de la composante fixée de toutes les combinaisons doivent rester dans le domaine de résistance. Dans ce mode, une troisième couleur est utilisée :

- **Vert** : à l'intérieur des deux courbes, vérifié aux deux extrêmes.
- **Rouge** : à l'extérieur des deux courbes, non vérifié aux deux extrêmes.
- **Gris** : entre les deux courbes, statut incertain. Une vérification plus précise est nécessaire : mode composante fixée à la valeur réelle, surface 3D, ou solveur d'équilibre interne.

Résultats calculés

Courbe d'interaction

Composante fixée (N , M_z ou M_y)
Frontière de résistance 2D fermée
Mode enveloppe (min/max)

Vérification visuelle

Points de charge sur le graphique
Vert (vérifié) / Rouge (non vérifié) / Gris (incertain)

Exports

PDF : courbe 2D + charges représentées
XLS : coordonnées de la courbe
TXT : résultats tabulaires (colonnes)

Section octogonale (Eurocode 2)

Données d'entrée

La géométrie de la section, les armatures et les lois matériaux sont identiques à celles des articles #4-6 :

Béton

- Section transversale octogonale
- $b_1 = 2\{, \}00$ m, $b_2 = 0\{, \}50$ m
- $h_1 = 1\{, \}00$ m, $h_2 = 0\{, \}60$ m

Armatures

- 48 barres, espacement uniforme 150 mm
- Diamètre $\varphi = 32$ mm, enrobage 50 mm

Lois matériaux (EC2)

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

Data

← Octagonal solid section

Concrete

Width b1 (m) 2 Width b2 (m) 0.5 Height h1 (m) 1 Height h2 (m) 0.6

Reinforcement

Mode: uniform spacing

Bar spacing (mm) 150 Bar diameter (mm) 32 Concrete cover (mm) 50 Layers (1 or 2) 1

Submit Infos

Diagram of an octagonal section with reinforcement bars.

Fig. 1. – Section transversale octogonale.

Courbes d'interaction

La première courbe montre la capacité en flexion biaxiale à $N = 0$ à l'état limite de service (ELS-C) ; la seconde montre l'interaction effort normal-flexion à $M_y = 0$ à l'état limite ultime (ELU-F).

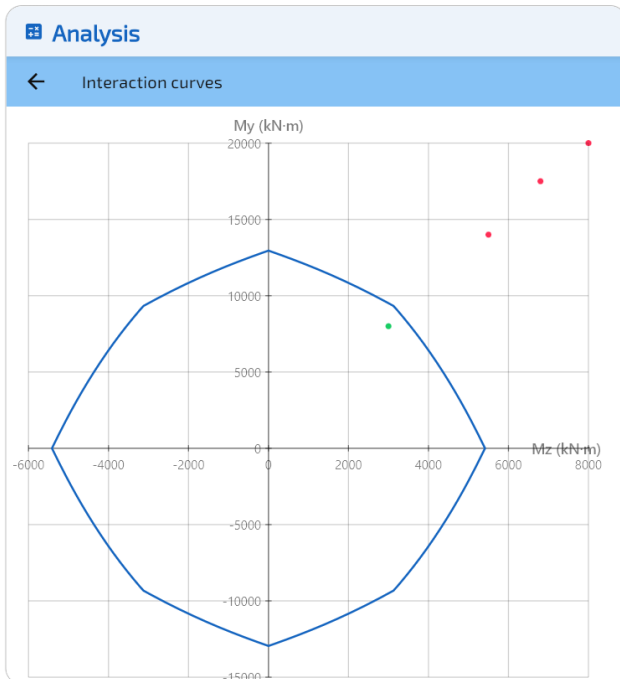


Fig. 2. – Service (caractéristique) : M_z - M_y à $N = 0$.

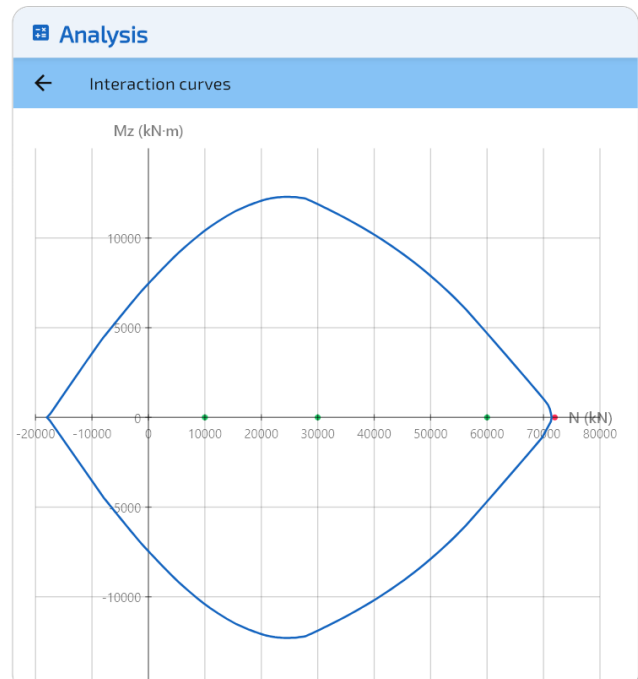


Fig. 3. – Ultime (fondamentale) : N - M_z à $M_y = 0$.

Les 30 combinaisons de charges sont identiques à celles de l'article sur les distances (15 ELU-F, 15 ELS-C). Toutes les charges vertes avaient $\eta < 1$ dans l'analyse 3D, et toutes les charges rouges avaient $\eta > 1$: les courbes 2D sont entièrement cohérentes avec les résultats de distances 3D.

Mode enveloppe

Le mode enveloppe exige que toutes les combinaisons aient leur composante fixée dans le domaine de résistance. Certaines des 30 charges originales dépassent la capacité de la section : par exemple, la charge #4 à l'ELU-F a $N = 72000$ kN alors que la résistance axiale est d'environ 70700 kN. Ces charges ne peuvent pas être utilisées en mode enveloppe ; un jeu de charges réduit est donc utilisé ici.

Les deux figures montrent l'enveloppe pour l'ELS (N comme composante fixée, plan M_z-M_y) et l'ELU (M_y comme composante fixée, plan $N-M_z$). Chaque enveloppe est constituée de deux courbes : l'une à la valeur minimale, l'autre à la valeur maximale de la composante fixée.

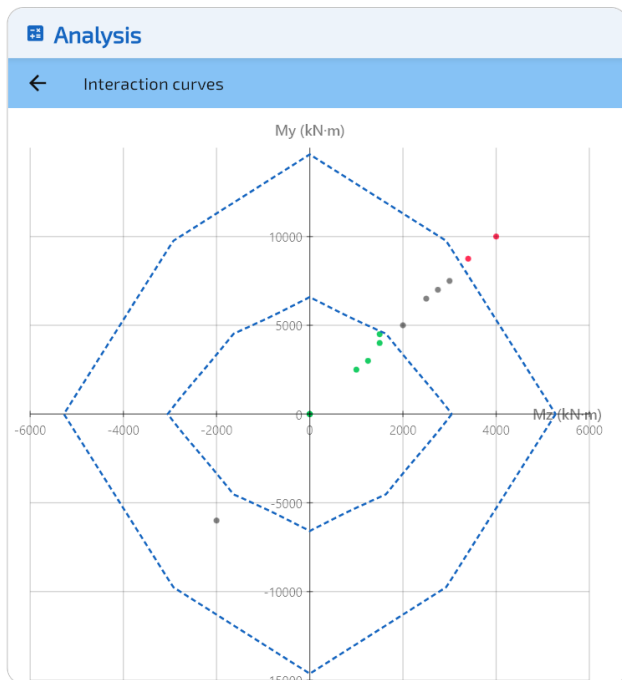


Fig. 4. – Service : enveloppe sur N .

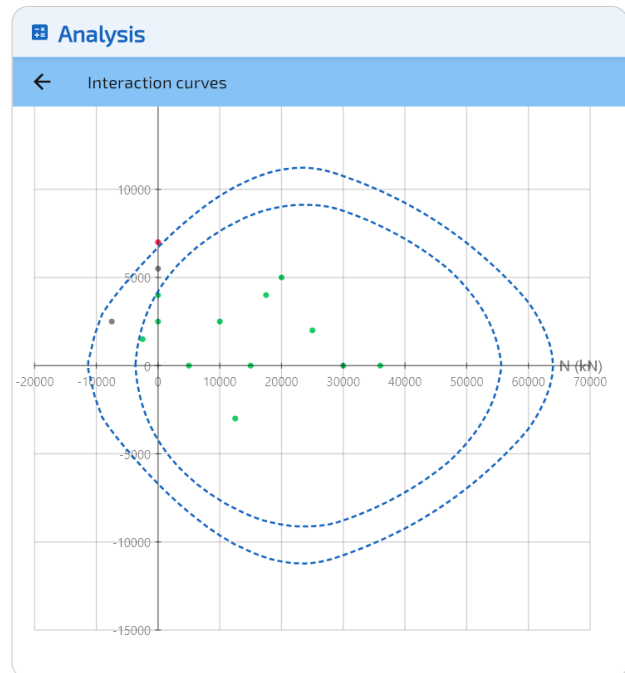


Fig. 5. – Ultime : enveloppe sur M_y .

Les marqueurs verts se trouvent à l'intérieur des deux courbes : vérifiés aux deux extrêmes de la composante fixée. Les marqueurs rouges dépassent la capacité aux deux extrêmes. Les marqueurs gris se situent entre les deux courbes : vérifiés pour un extrême mais pas l'autre. Leur statut est ambigu : l'ingénieur doit les vérifier en mode composante fixée à la valeur réelle de la charge, ou utiliser la surface 3D ou le solveur d'équilibre interne.

Section elliptique (ACI 318)

Données d'entrée

Béton

- Section transversale elliptique
- Largeur = 3{,}00 m, Hauteur = 2{,}00 m

Armatures

- 40 barres le long du périmètre
- Diamètre $\varphi = 40$ mm, enrobage 50 mm

Lois matériaux (ACI 318)

- Béton : $f'_c = 30$ MPa
- Acier : $f_y = 500$ MPa

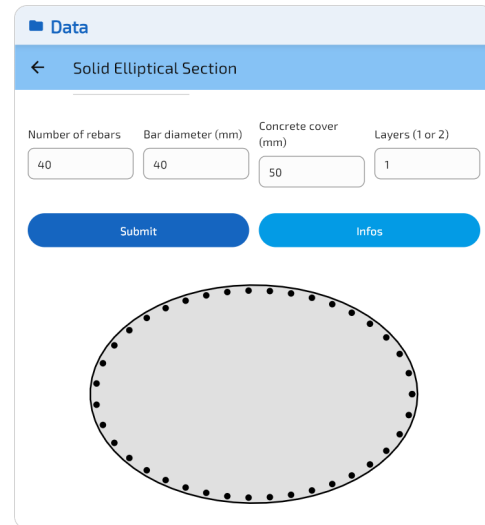


Fig. 6. – Section transversale elliptique.

Courbes d'interaction

La première courbe montre la capacité en flexion biaxiale à $N = 0$ à l'état limite de service ; la seconde montre l'interaction effort normal–flexion à $M_y = 0$ à l'état limite ultime. Le bloc de contraintes Whitney et les facteurs φ sont appliqués nativement à la courbe ultime.

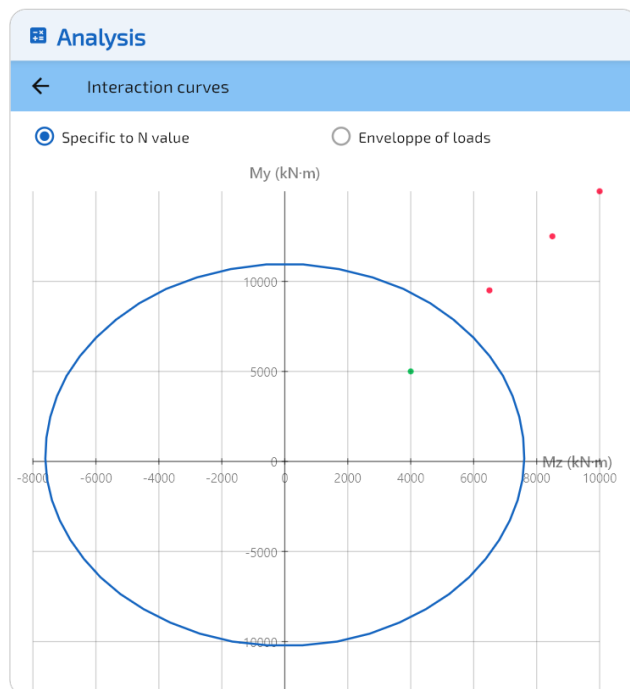


Fig. 7. – Service : M_z – M_y à $N = 0$.

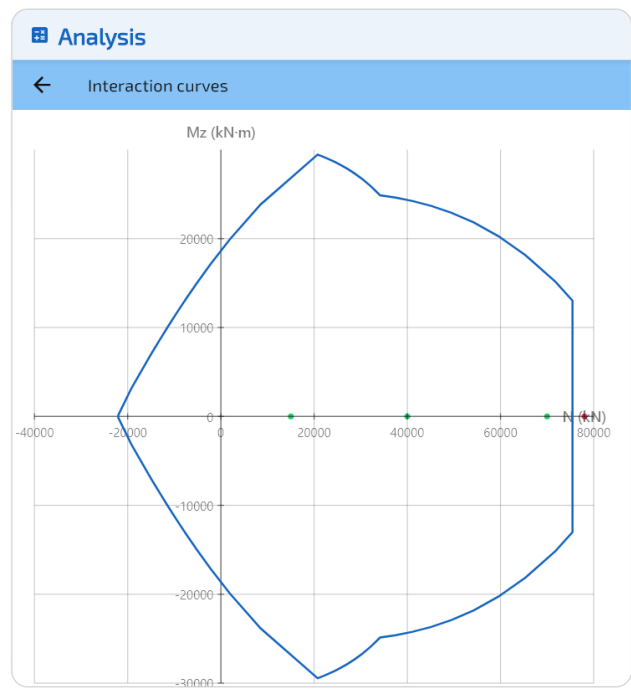


Fig. 8. – Ultime : N – M_z à $M_y = 0$ (Whitney).

La courbe ultime (droite) illustre les effets du bloc Whitney selon l'ACI 318. L'effort de compression maximal est plafonné à $\varphi P_{n,max}$: limite verticale plate sur la droite du diagramme, où la courbe s'arrête au lieu de continuer. Ce plafond reflète la réduction imposée par la norme ($\varphi_c \times 0{,}80$ pour les poteaux à armatures transversales). La zone de transition entre les régions contrôlées en

traction ($\varphi = 0\{\, , 90\}$) et en compression ($\varphi = 0\{\, , 65\}$) est visible comme un changement de courbure au voisinage du point équilibré. La courbe de service (gauche) utilise des lois élastiques linéaires sans facteurs de réduction, donnant une forme lisse et symétrique.

Mode enveloppe

Le même jeu de charges réduit est utilisé. L’enveloppe calcule deux courbes aux valeurs minimale et maximale de la composante fixée : N pour le contour M_z – M_y (service) et M_y pour le contour N – M_z (ultime, Whitney). La même classification en trois couleurs s’applique.

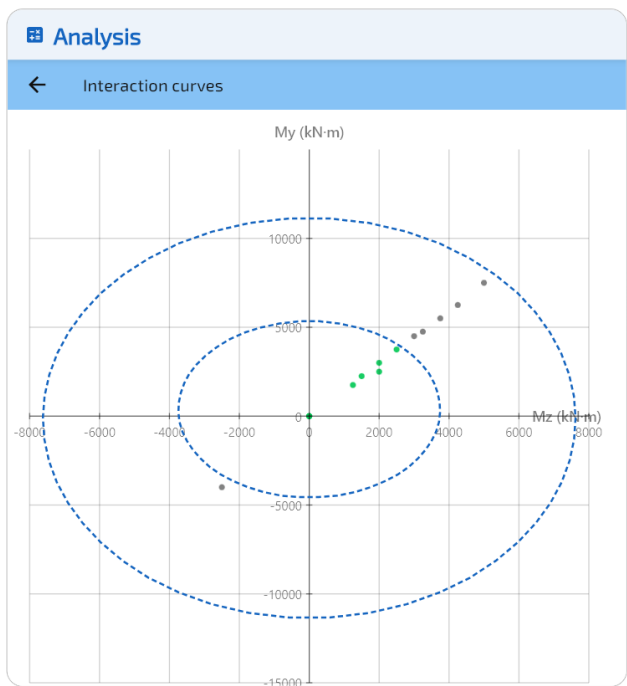


Fig. 9. – Service : enveloppe sur N .

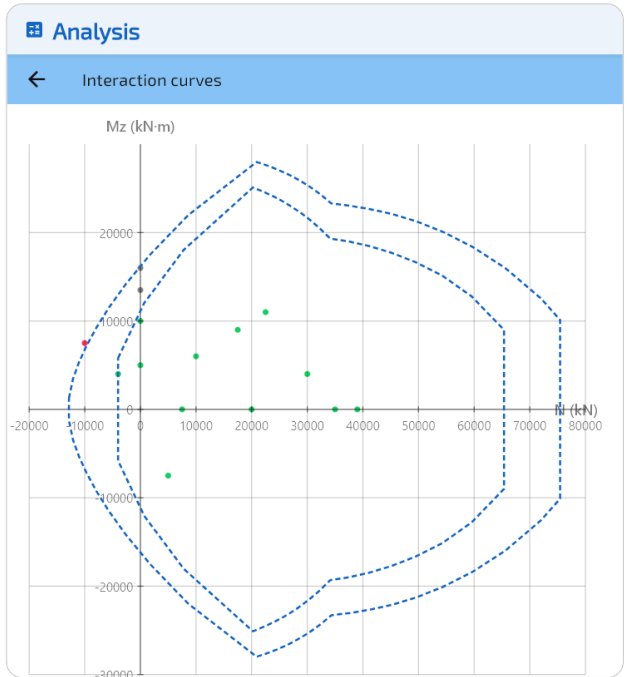


Fig. 10. – Ultime : enveloppe sur M_y (Whitney).

Performances

Le calcul dépend de la résolution de maillage choisie. Des résolutions plus élevées produisent des courbes plus lisses au prix de temps de calcul plus longs. Le tableau ci-dessous indique le temps total (médiane de 3 exécutions) pour les deux sections.

Résolution de maillage	Section octogonale EC2 (ms)	Section elliptique ACI (ms)
51 × 50	8,5	6,5
101 × 100	11,0	7,0
201 × 200	14,5	9,0

Tous les calculs restent inférieurs à 15 ms même à la résolution la plus élevée, ce qui rend les courbes d’interaction pratiquement instantanées pour l’ingénieur.

Conclusion

Les courbes d’interaction 2D fournissent les diagrammes classiques qui complètent la surface 3D :

- Les charges représentées montrent immédiatement lesquelles sont vérifiées (vert) et lesquelles dépassent la capacité (rouge), sans coefficient de sécurité numérique.

- La classification Intérieur/Extérieur de l'évaluation des distances 3D est entièrement cohérente avec la position sur la courbe 2D.
- Les courbes 2D pour l'ACI 318 sont calculées avec le bloc Whitney et les facteurs φ nativement.
- Le mode enveloppe vérifie plusieurs cas de charge en une seule figure avec la classification trois couleurs (vert/gris/rouge).
- Les courbes sont générées en millisecondes, même à haute résolution.

Le module ne calcule pas de coefficient de sécurité numérique (η) par charge : cela est fourni par le module des distances (Article #5). Une version future pourra combiner les deux : courbe 2D visuelle avec valeurs de η annotées directement sur le graphique.

Export

SectionPro exporte les courbes d'interaction aux formats PDF, TXT et XLS. Le rapport PDF inclut la courbe 2D avec les points de charge et un tableau de résultats joint.

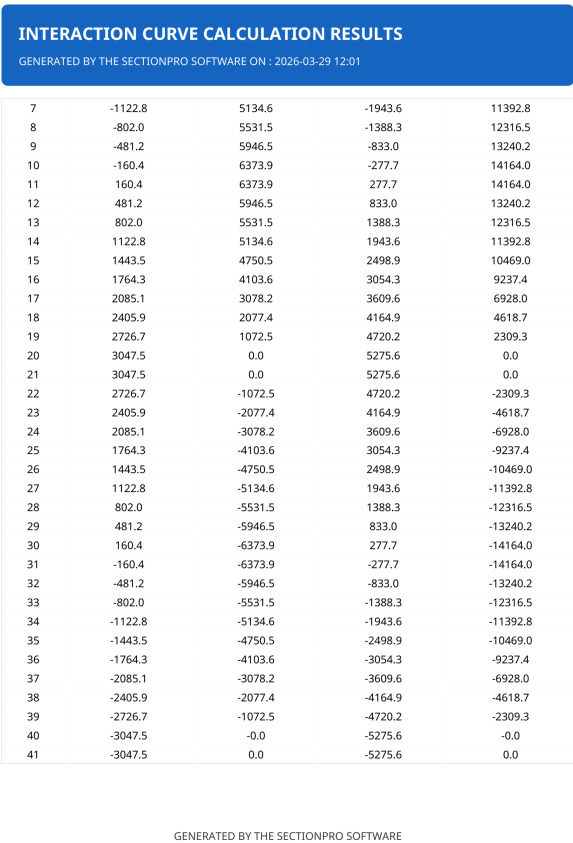
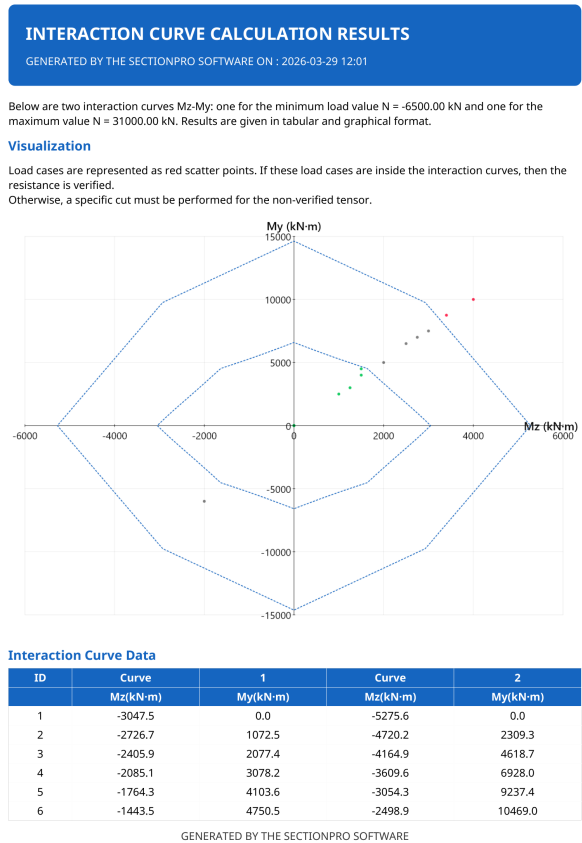


Fig. 11. – Export PDF, page 1 : courbe d'interaction avec les charges.

Fig. 12. – Export PDF, page 2 : coordonnées de la courbe.