

Surface d'interaction

Tutoriel SectionPro : domaines de résistance 3D en flexion déviée

BridgeKernel · 2026

Introduction

Vérifier une section en béton armé sous effort normal et flexion combinés est simple lorsque la flexion est uniaxiale : un seul diagramme d'interaction (N, M) décrit l'intégralité du domaine de résistance. En flexion déviée, en revanche, la résistance dépend simultanément de N , M_z et M_y , et aucune courbe 2D ne suffit. Le domaine de résistance complet devient une surface tridimensionnelle dans l'espace (N, M_z, M_y) .

SectionPro calcule cette surface d'interaction pour chaque état limite défini par l'utilisateur. Un point de charge à l'intérieur de la surface signifie que la section est sûre ; un point à l'extérieur signifie que la capacité est dépassée. La surface est affichée dans un visualiseur 3D interactif avec rotation, zoom et déplacement, et exportable en PDF, Excel et texte.

Cet article présente l'analyse de la surface d'interaction sur deux géométries et deux codes normatifs : une **section octogonale** (Eurocode 2) et une **section elliptique** (ACI 318), chacune analysée à l'ELU et à l'ELS.

Résultats calculés

SectionPro fournit trois catégories de résultats pour chaque surface d'interaction :

Domaine de résistance 3D

- Surface triangulée interactive
- Une surface par état limite
- Résolution du maillage ajustable
- Rotation, zoom, déplacement
- Opacité de la surface ajustable

Boîte englobante

- $N_{\min}, N_{\max}$: plage d'effort normal
- $M_{z, \min}, M_{z, \max}$: plage de moment
- $M_{y, \min}, M_{y, \max}$: plage de moment
- Capacité extrême par direction

Exports

- PDF : boîte englobante + vues 3D
- XLS : coordonnées du maillage + triangles
- TXT : coordonnées du maillage (colonnes)

Scénarios de test

Section octogonale (Eurocode 2). À l'ELU, le béton suit une loi parabole-rectangle avec $\gamma_c = 1.50$ et l'acier est élastoplastique avec écrouissage ($\gamma_s = 1.15$). À l'ELS, les deux matériaux sont élastiques linéaires avec des contraintes admissibles définies par l'utilisateur.

Section elliptique (ACI 318). À l'ELU, le béton suit le bloc rectangulaire équivalent de Whitney. La résistance de la section est réduite par des facteurs φ qui dépendent de l'état de déformation ($\varphi = 0.65$ à 0.90), avec un plafond supplémentaire $\varphi_N = 0.80$ sur l'effort de compression maximal. Pour des taux d'armatures inférieurs à 1 %, une réduction architecturale réduit davantage la contrainte du bloc. À l'ELS, les deux matériaux sont élastiques linéaires avec des contraintes admissibles définies par l'utilisateur.

Section octogonale (Eurocode 2)

Données d'entrée

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, 1 nappe

Lois de matériaux (EC2)

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

Data

← Octagonal solid section

Concrete

Width b1 (m): 2.00 Width b2 (m): 0.50 Height h1 (m): 1.00 Height h2 (m): 0.60

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 cross-section with reinforcement bars.

Fig. 1. – Section octogonale : géométrie et armatures.

ELU (Fondamental)

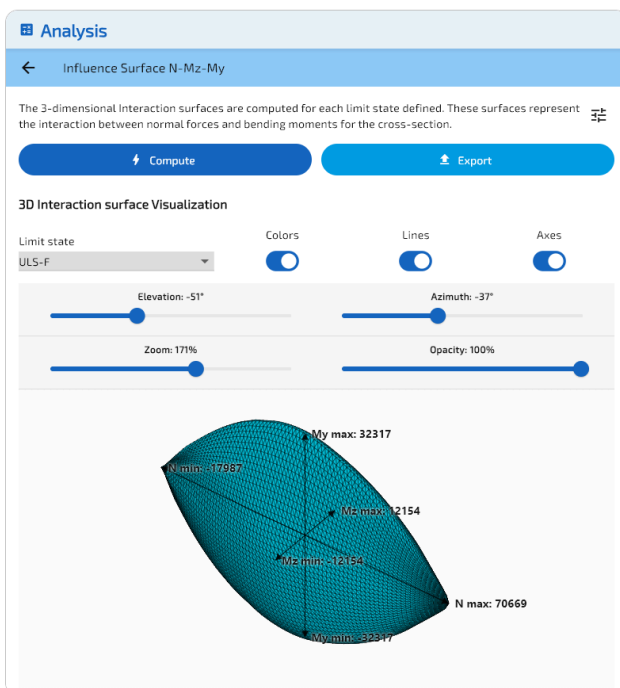


Fig. 2. – Surface d'interaction à l'ELU, triangles colorés.

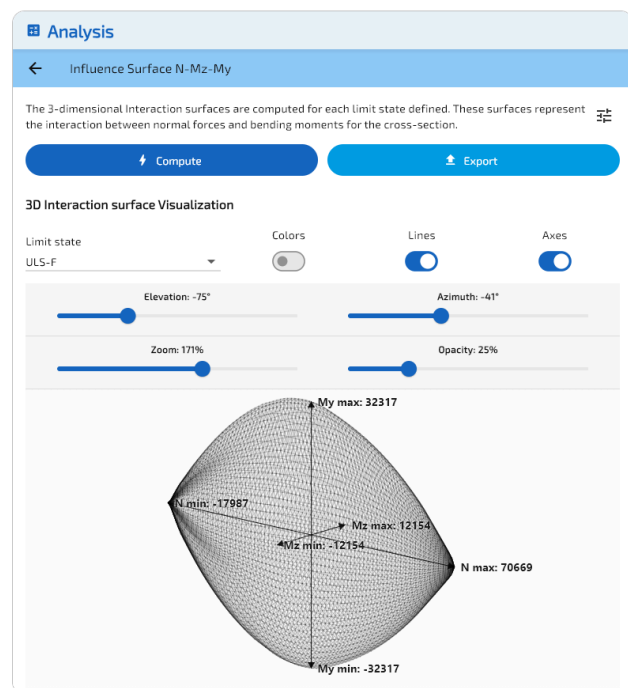


Fig. 3. – Surface d'interaction à l'ELU, vue filaire.

ELS (Caractéristique)

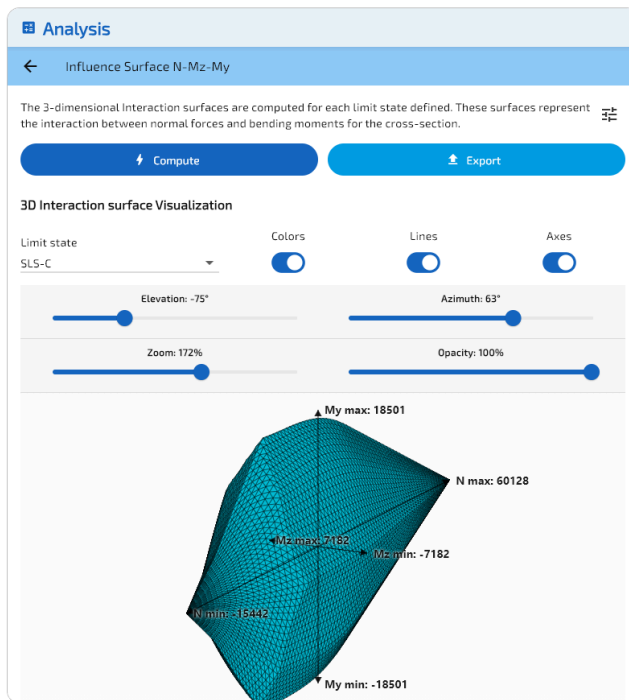


Fig. 4. – Surface d'interaction à l'ELS, triangles colorés.

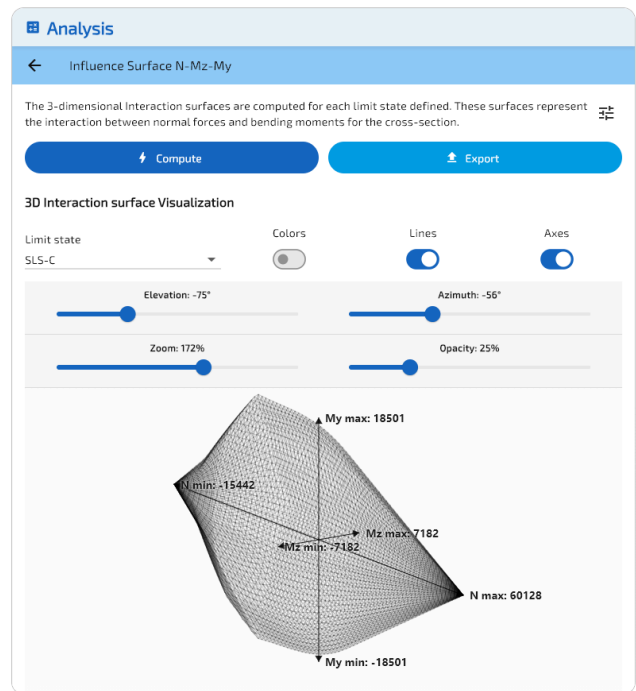


Fig. 5. – Surface d'interaction à l'ELS, vue filaire.

Boîte englobante

	Effort normal N (kN)	Moment M_z (kN·m)	Moment M_y (kN·m)
ELU min	-17987	-12154	-32317
ELU max	70669	12154	32317
ELS min	-15442	-7182	-18501
ELS max	60128	7182	18501

- La section est plus large que haute ($b_1 = 2.00$ m, $h_1 = 1.00$ m), de sorte que les valeurs extrêmes de M_y sont nettement supérieures à celles de M_z : l'axe fort est l'axe vertical (flexion transversale).
- La surface ELU est plus grande que la surface ELS dans toutes les directions, car la loi non linéaire parabole-rectangle de l'EC2 avec $\gamma_c = 1.50$ offre une capacité supérieure à la loi élastique linéaire de l'ELS.

Section elliptique (ACI 318)

Données d'entrée

Béton

- Section transversale elliptique
- Largeur = 3.00 m (axe fort)
- Hauteur = 2.00 m (axe faible)

Armatures

- 40 barres le long du périmètre
- Diamètre $\varphi = 40$ mm
- Enrobage 50 mm, 1 nappe

Lois de matériaux (ACI 318)

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

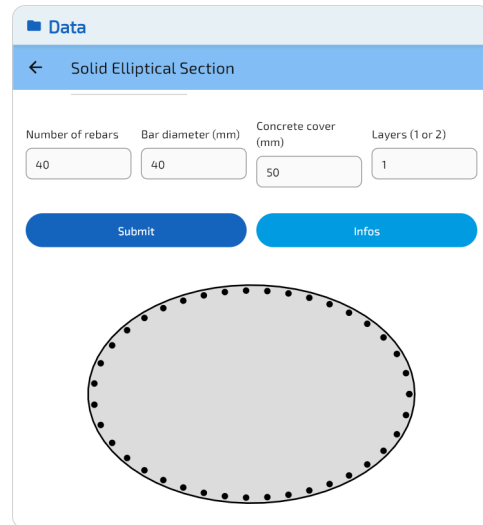


Fig. 6. – Section elliptique : géométrie et armatures.

À l'ELU, la distribution des contraintes dans le béton est remplacée par le bloc rectangulaire équivalent de Whitney, où $\beta_1 = 0.832$ relie la profondeur du bloc à la profondeur de l'axe neutre.

La surface brute est ensuite pondérée par des facteurs φ dépendant de l'état de déformation : $\varphi = 0.90$ en traction et $\varphi = 0.65$ en compression, avec un plafond $\varphi_N = 0.80$ sur la compression axiale maximale. Le taux d'armatures ($\rho = 1.07\%$) dépassant le seuil architectural de 1 %, aucune réduction supplémentaire ne s'applique.

ELU

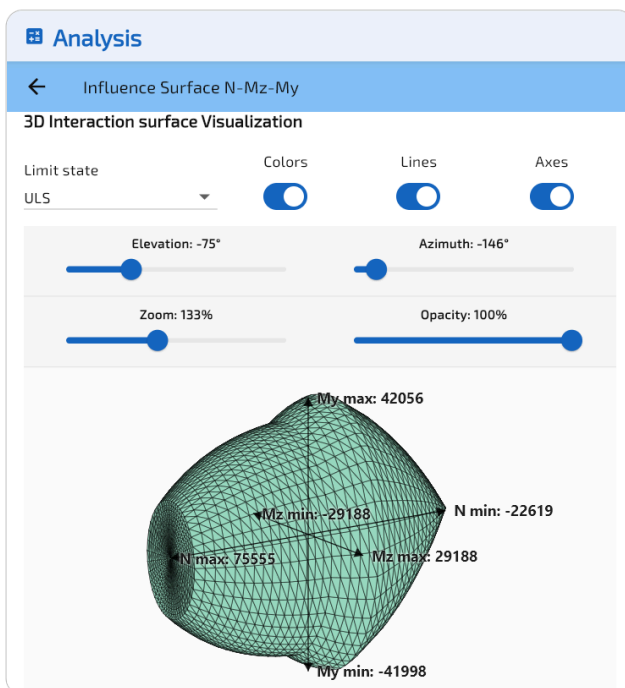


Fig. 7. – Surface d'interaction à l'ELU, triangles colorés.

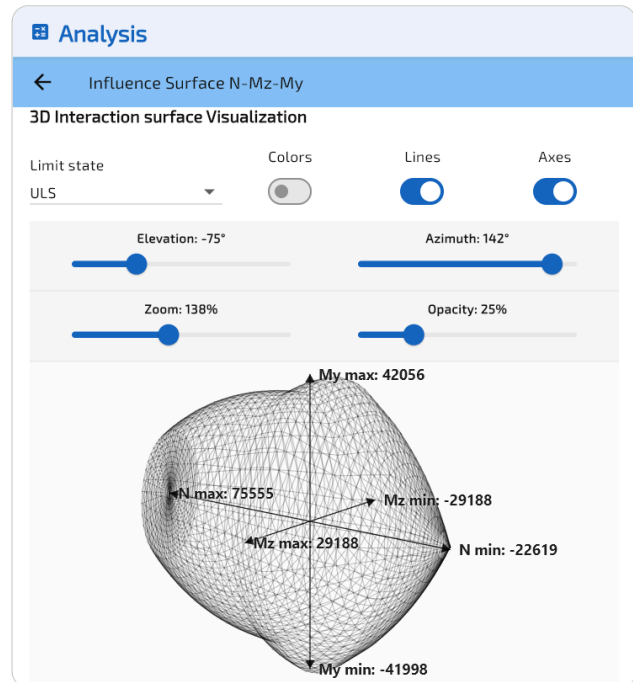


Fig. 8. – Surface d'interaction à l'ELU, vue filaire.

ELS

À l'ELS, le bloc de Whitney et les facteurs φ ne s'appliquent plus. Le béton et l'acier suivent des lois élastiques linéaires, limitées par des contraintes admissibles définies par l'utilisateur ($\sigma_c = 11.5$ MPa, $\sigma_s = 250$ MPa). La faible contrainte admissible du béton comparée à la contrainte du bloc à l'ELU ($0.85f'_c = 25.5$ MPa) explique la surface ELS plus petite.

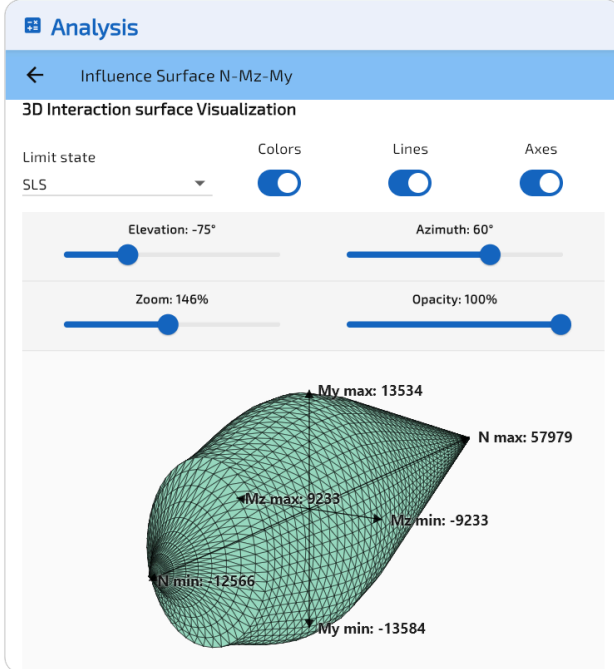


Fig. 9. – Surface d'interaction à l'ELS, triangles colorés.

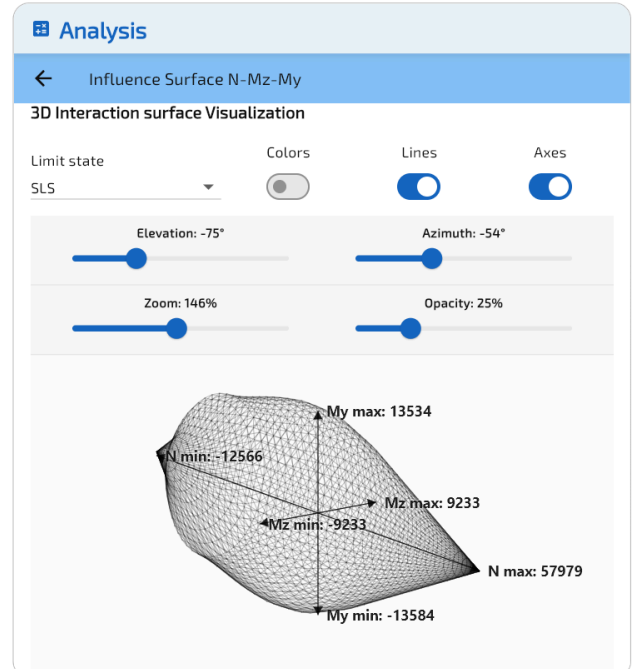


Fig. 10. – Surface d'interaction à l'ELS, vue filaire.

Boîte englobante

	Effort normal N (kN)	Moment M_z (kN·m)	Moment M_y (kN·m)
ELU min	-22619	-29188	-41998
ELU max	75555	29188	42056
ELS min	-12566	-9233	-13584
ELS max	57979	9233	13534

- La section est plus large que haute (3.00×2.00 m), de sorte que les valeurs extrêmes de M_y sont supérieures à celles de M_z , mais la différence est moins prononcée que pour la section octogonale et la surface conserve une forme assez arrondie grâce à la géométrie elliptique lisse.
- La surface ELU est plus grande que la surface ELS en compression, comme attendu. Les facteurs φ de l'ACI ($\varphi = 0.65$ pour les sections contrôlées par la compression, $\varphi_N = 0.80$) réduisent la capacité nominale d'un facteur effectif de 0.52, et avec $\rho = 1.07\%$ la contrainte complète du bloc de Whitney ($0.85f'_c = 25.5$ MPa) est mobilisée. À l'ELS, le béton est limité à la contrainte admissible ($\sigma_c = 11.5$ MPa), ce qui résulte en une capacité en compression plus faible.

Export

SectionPro exporte les données de la surface d'interaction en trois formats. Le rapport PDF contient la boîte englobante et deux vues 3D. Le fichier Excel fournit deux feuilles par état limite : coordonnées des nœuds (N , M_z , M_y) et connectivité des triangles, permettant de reconstruire la surface dans tout outil externe. Un export texte liste les coordonnées en colonnes à largeur fixe.

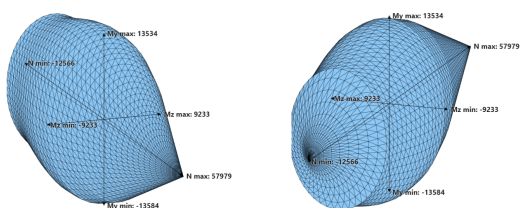
INFLUENCE SURFACE CALCULATION RESULTS

GENERATED BY THE SECTIONPRO SOFTWARE ON : 2026-03-16 22:30

Below are figures allowing 3D visualization of the resistance domains of the studied reinforced concrete section. The bounding boxes represent the extreme values of the resisting forces.

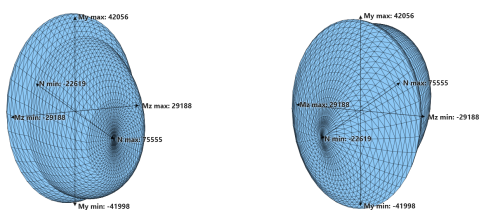
SLS : Serviceability limit state

Bounding box	Axial force N (kN)	Moment Mz (kN-m)	Moment My (kN-m)
Minimum value	-12566	-9232.7	-13584
Maximum value	57979	9232.7	13534



ULS : Ultimate limit state

Bounding box	Axial force N (kN)	Moment Mz (kN-m)	Moment My (kN-m)
Minimum value	-22619	-29188	-41998
Maximum value	75555	29188	42056



GENERATED BY THE SECTIONPRO SOFTWARE

INFLUENCE SURFACE CALCULATION RESULTS

GENERATED BY THE SECTIONPRO SOFTWARE ON : 2026-03-16 22:32

INFLUENCE SURFACE NODES

ID	SLS N kN	SLS Mz kN-m	SLS My kN-m	ULS N kN	ULS Mz kN-m	ULS My kN-m
1	-12566.37	0.00	455.54	-22619.47	0.00	819.97
2	-11126.67	735.28	403.35	-19892.39	2557.77	811.22
3	-11126.67	729.70	297.26	-19892.39	2516.78	108.24
4	-11126.67	714.06	192.56	-19892.39	2391.21	-557.84
5	-11126.67	689.11	90.35	-19892.39	2204.62	-1146.42
6	-11126.67	655.70	-8.52	-19892.39	1989.45	-1625.51
7	-11126.67	613.41	-104.44	-19892.39	1741.43	-2023.96
8	-11126.67	562.89	-196.03	-19892.39	1489.98	-2328.95
9	-11126.67	501.17	-280.80	-19892.39	1275.81	-2547.72
10	-11126.67	429.11	-355.88	-19892.39	926.37	-2780.14
11	-11126.67	348.12	-422.33	-19892.39	704.46	-2900.77
12	-11126.67	257.87	-478.01	-19892.39	455.63	-2996.54
13	-11126.67	158.72	-517.58	-19892.39	281.52	-3046.76
14	-11126.67	53.15	-534.98	-19892.39	78.28	-3072.02
15	-11126.67	-54.09	-534.86	-19892.39	-78.28	-3072.02
16	-11126.67	-159.62	-517.22	-19892.39	-281.52	-3046.76
17	-11126.67	-258.70	-477.68	-19892.39	-455.63	-2996.54
18	-11126.67	-348.90	-421.81	-19892.39	-704.46	-2900.77
19	-11126.67	-429.75	-355.24	-19892.39	-926.37	-2780.14
20	-11126.67	-501.72	-280.06	-19892.39	-1275.81	-2547.72
21	-11126.67	-563.41	-195.32	-19892.39	-1489.98	-2328.95
22	-11126.67	-613.84	-103.63	-19892.39	-1741.43	-2023.96
23	-11126.67	-656.03	-7.68	-19892.39	-1989.45	-1625.51
24	-11126.67	-689.34	91.23	-19892.39	-2204.62	-1146.42
25	-11126.67	-714.20	193.48	-19892.39	-2391.21	-557.84
26	-11126.67	-729.84	298.18	-19892.39	-2516.78	108.24
27	-11126.67	-735.33	404.28	-19892.39	-2557.77	811.22
28	-11126.67	-732.29	510.75	-19892.39	-2511.26	1542.12
29	-11126.67	-720.56	617.04	-19892.39	-2384.84	2227.62
30	-11126.67	-700.44	722.57	-19892.39	-2200.96	2795.51
31	-11126.67	-671.42	826.17	-19892.39	-1977.22	3277.78
32	-11126.67	-630.20	926.34	-19892.39	-1738.23	3662.90
33	-11126.67	-579.44	1021.31	-19892.39	-1507.85	3960.63
34	-11126.67	-518.39	1111.70	-19892.39	-1238.45	4214.13
35	-11126.67	-447.15	1195.20	-19892.39	-1039.81	4368.97
36	-11126.67	-364.46	1268.31	-19892.39	-770.16	4517.62
37	-11126.67	-269.76	1325.50	-19892.39	-572.99	4603.18
38	-11126.67	-166.18	1367.41	-19892.39	-322.42	4665.74
39	-11126.67	-55.99	1391.86	-19892.39	-122.30	4694.04
40	-11126.67	56.98	1391.86	-19892.39	122.30	4694.04
41	-11126.67	167.13	1367.14	-19892.39	322.42	4665.74
42	-11126.67	270.60	1325.03	-19892.39	572.99	4603.18
43	-11126.67	365.22	1267.64	-19892.39	770.16	4517.62
44	-11126.67	447.84	1194.58	-19892.39	1039.81	4368.97
45	-11126.67	518.97	1110.97	-19892.39	1238.45	4214.13
46	-11126.67	579.90	1020.51	-19892.39	1507.85	3960.63
47	-11126.67	630.56	925.45	-19892.39	1738.23	3662.90
48	-11126.67	671.68	825.27	-19892.39	1977.22	3277.78
49	-11126.67	700.69	721.67	-19892.39	2200.96	2795.51
50	-11126.67	720.72	616.12	-19892.39	2384.84	2227.62
51	-11126.67	732.34	508.81	-19892.39	2511.26	1542.12
52	-11126.67	735.28	403.35	-19892.39	2557.77	811.22
53	-9686.97	1470.57	351.16	-17165.31	5075.23	836.95

Fig. 11. – Export PDF : boîte englobante et vues 3D.

Fig. 12. – Export Excel : coordonnées des nœuds et triangles.

Performance

Le calcul de la surface d'interaction est instantané en pratique. Le tableau ci-dessous présente les temps de calcul purs (hors rendu graphique) mesurés sur un PC de bureau pour les deux sections de cet article, à trois résolutions de maillage (25×25 , 50×50 et 100×100).

Section	Grossier (1.2k tri)	Moyen (4.9k tri)	Fin (19.8k tri)
Octogonale – EC2	7 ms	17 ms	24 ms
Elliptique – ACI 318	7 ms	6 ms	10 ms

L'Eurocode 2 définit six états limites (trois ELU, trois ELS), chacun avec ses propres lois de matériaux et contraintes admissibles, de sorte que le noyau de calcul produit six surfaces en un seul appel. L'ACI 318 utilise deux états limites (ELU et ELS), calculés en deux appels séparés. Toutes les surfaces sont calculées en moins de 25 ms, même à la résolution la plus fine.

Conclusion

La surface d'interaction offre une vue complète du domaine de résistance d'une section en béton armé sous flexion déviée. L'ingénieur peut visualiser l'enveloppe de capacité et évaluer immédiatement si ses combinaisons de charges se trouvent à l'intérieur ou à l'extérieur du domaine. C'est ce que fait le module de vérification de SectionPro : il projette chaque combinaison sur la surface et renvoie le coefficient de sécurité, ce qui fera l'objet du prochain article.

Les deux exemples illustrent comment la géométrie et le code normatif façonnent le domaine de résistance. Les formats d'export (PDF, Excel, texte) fournissent les données nécessaires aux notes de calcul ou au post-traitement externe.