



La tour d'acier de 3000 mètres en France

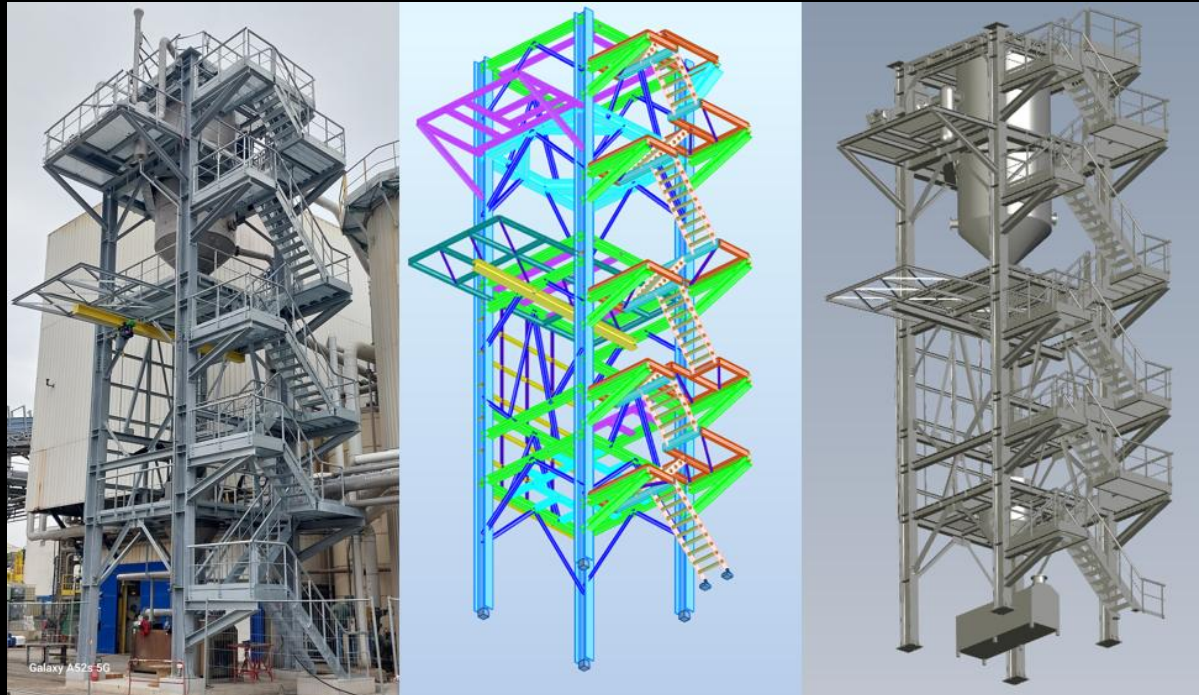
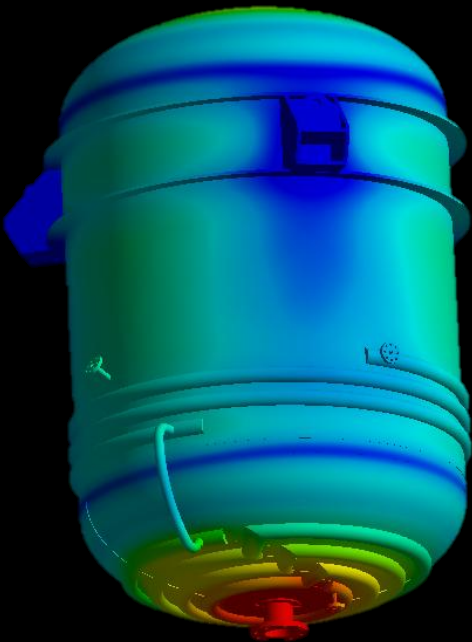
sebastien.besse@cgindustrie.com | 06 73 52 02 82

25/03/2025 – Paris Dock Pullman

www.cgindustrie.com

COMPAGNIE GÉNÉRALE DE L'INDUSTRIE (CGI)

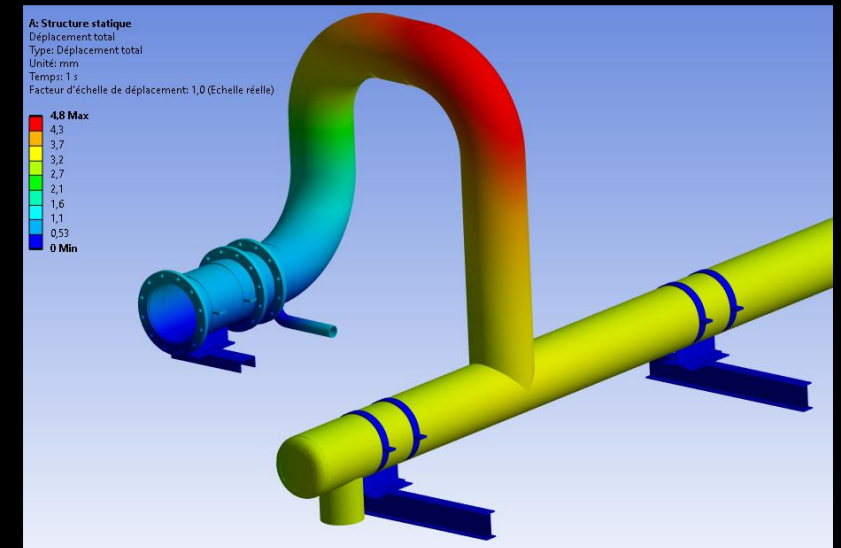
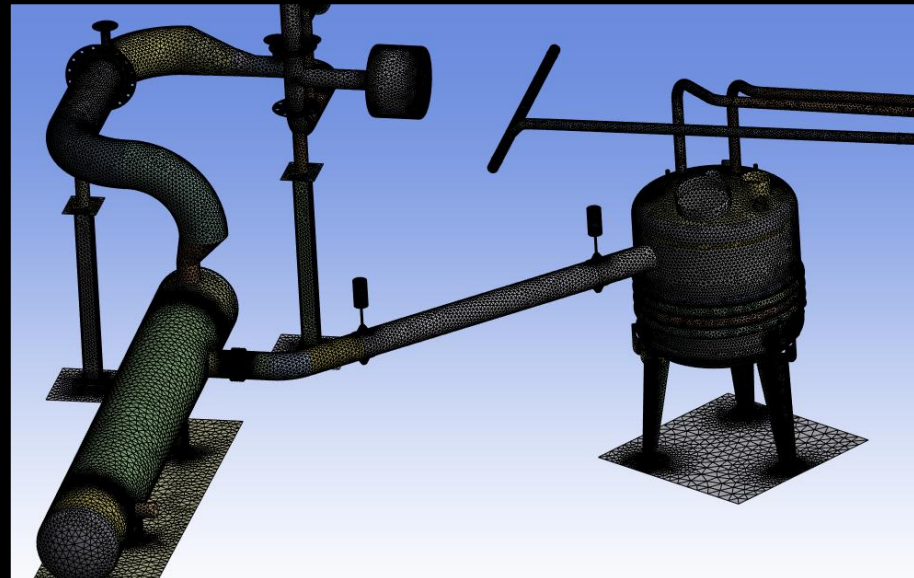
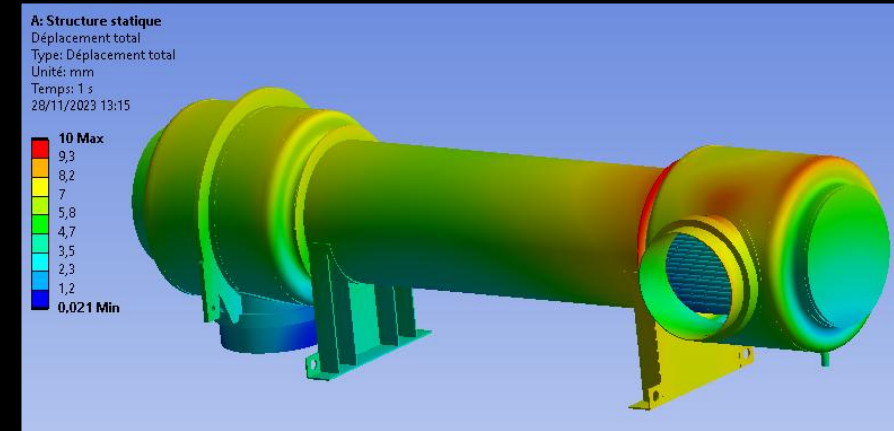
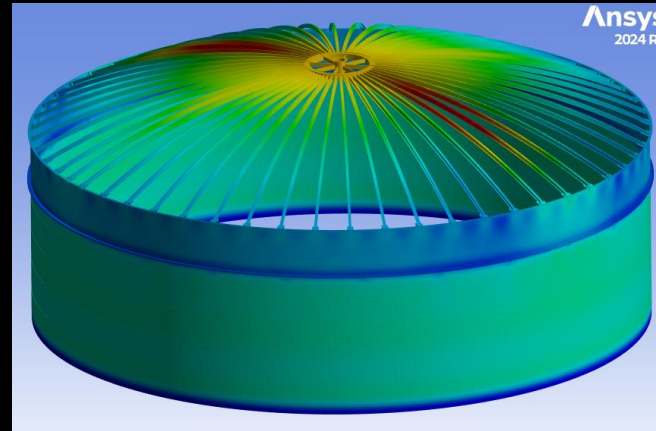
- Fondée en 2013 par Sébastien Besse
- Bureau de calculs mécaniques industriels : nos spécialités mais pas que, sont la charpente acier, la tuyauterie industrielle, les appareils à pression



UNION EUROPÉENNE
Fonds Européen de
Développement Régional

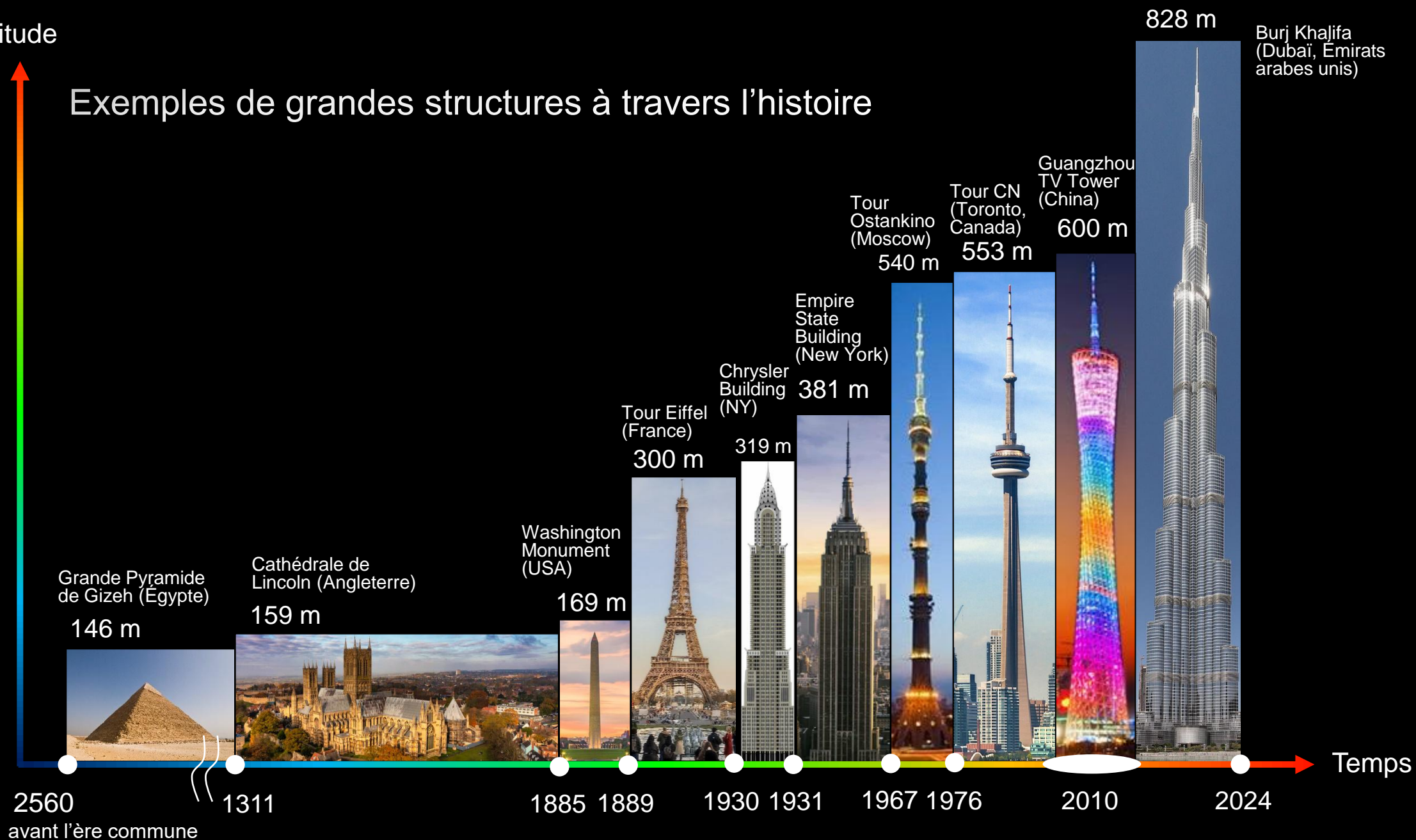


COMPAGNIE GÉNÉRALE DE L'INDUSTRIE (CGI)



Altitude

Exemples de grandes structures à travers l'histoire



Exemples de projets de tours de très grandes hauteurs

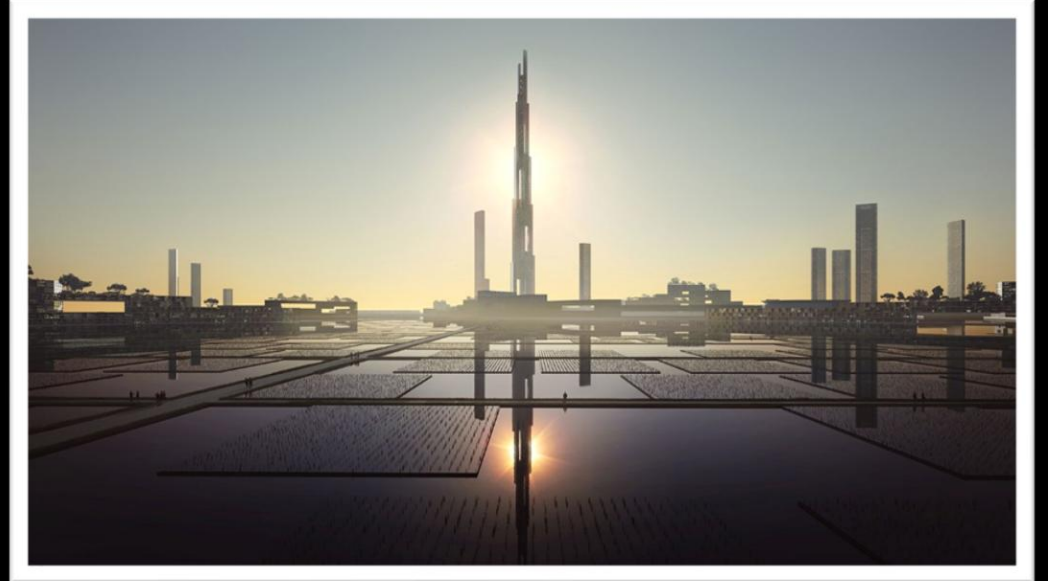
Tour Djeddah 1007 m
(Arabie Saoudite)



Oblisco Capitale 1000 m
(Egypte)



Sky Mile Tower 1700 m
Tokyo (Japan)



X-Seed 4000 (Tokyo, 1995)

130 *Journal of Urban Technology*

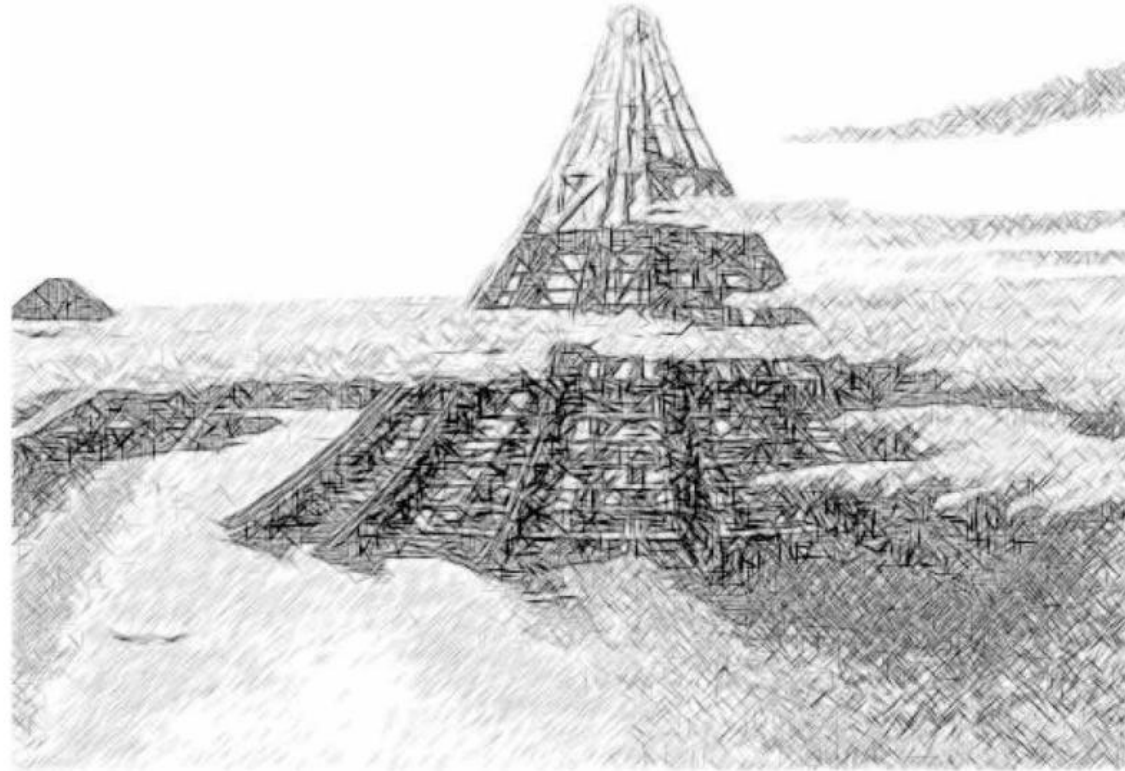
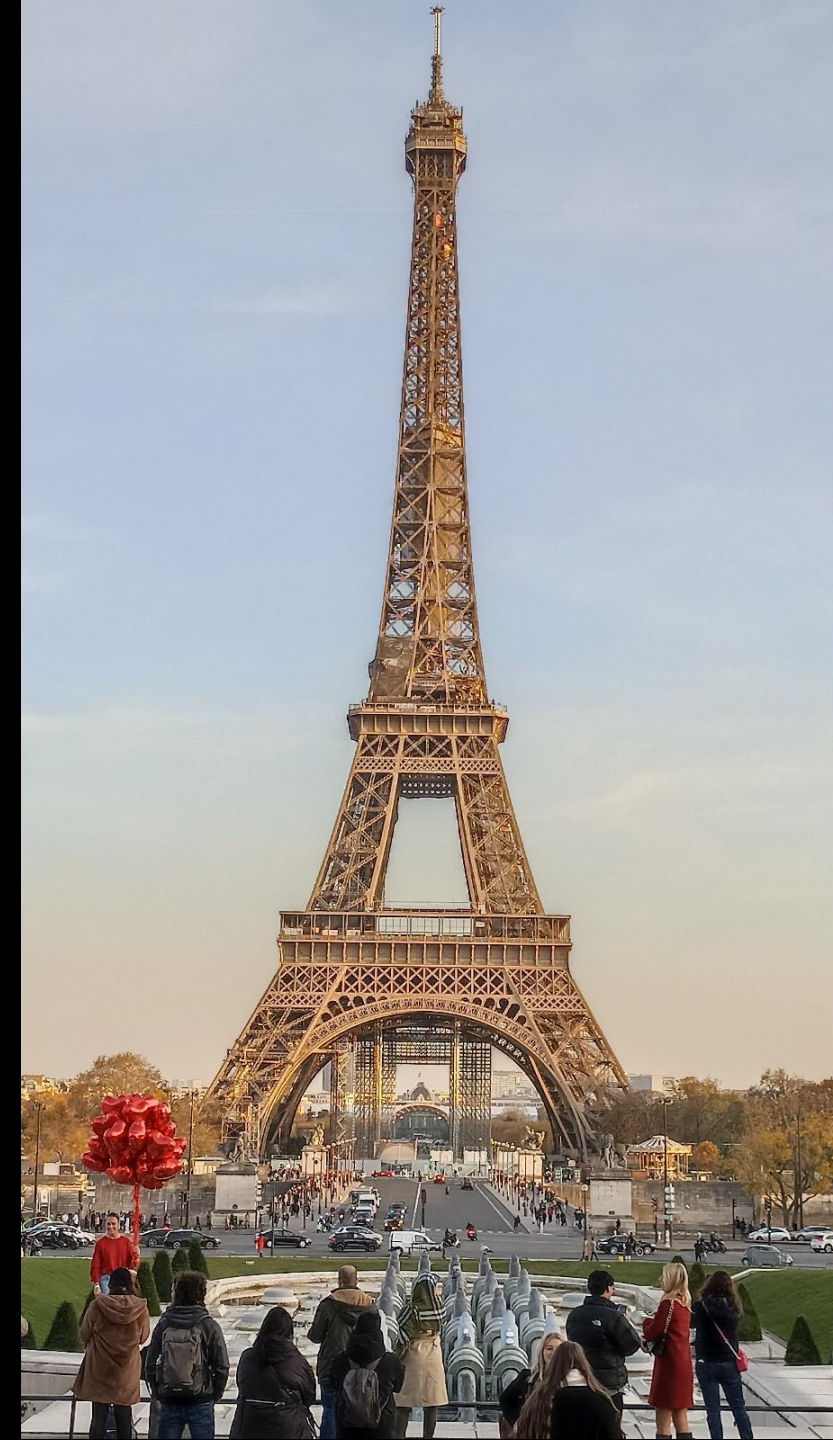
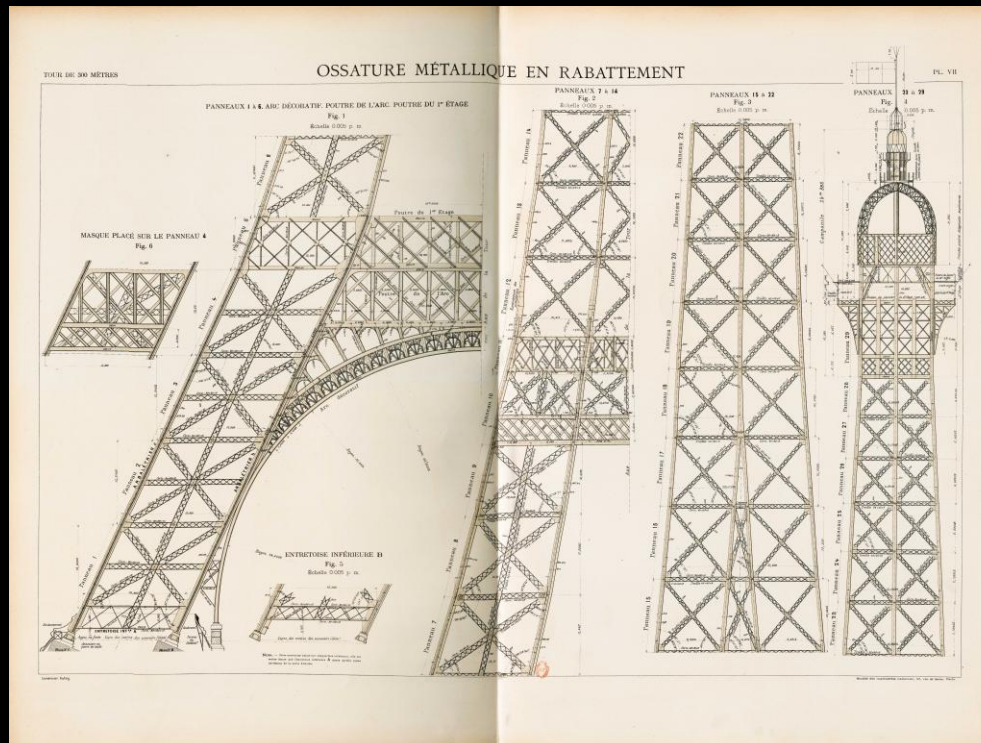
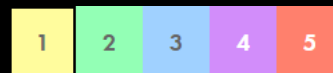
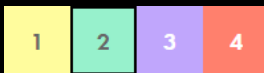


Figure 11. X-seed 4000, proposed by the Taisei Corporation, is a 4 km (2.485miles) height, and 6 km (3.728miles) wide sea-base structure. It contains 800 floors that could accommodate up to one million inhabitants.

Drawing by K. Al-Kodmany

Le « prototype » de la Tour Eiffel

- ▶ Construite en 1889 avec de la cornière, des plates et des rivets
- ▶ Conçue sans électricité ni les ordinateurs ni la méthode des éléments finis
- ▶ Eurocodes : vent zone 2, sismicité zone 1, neige zone A1

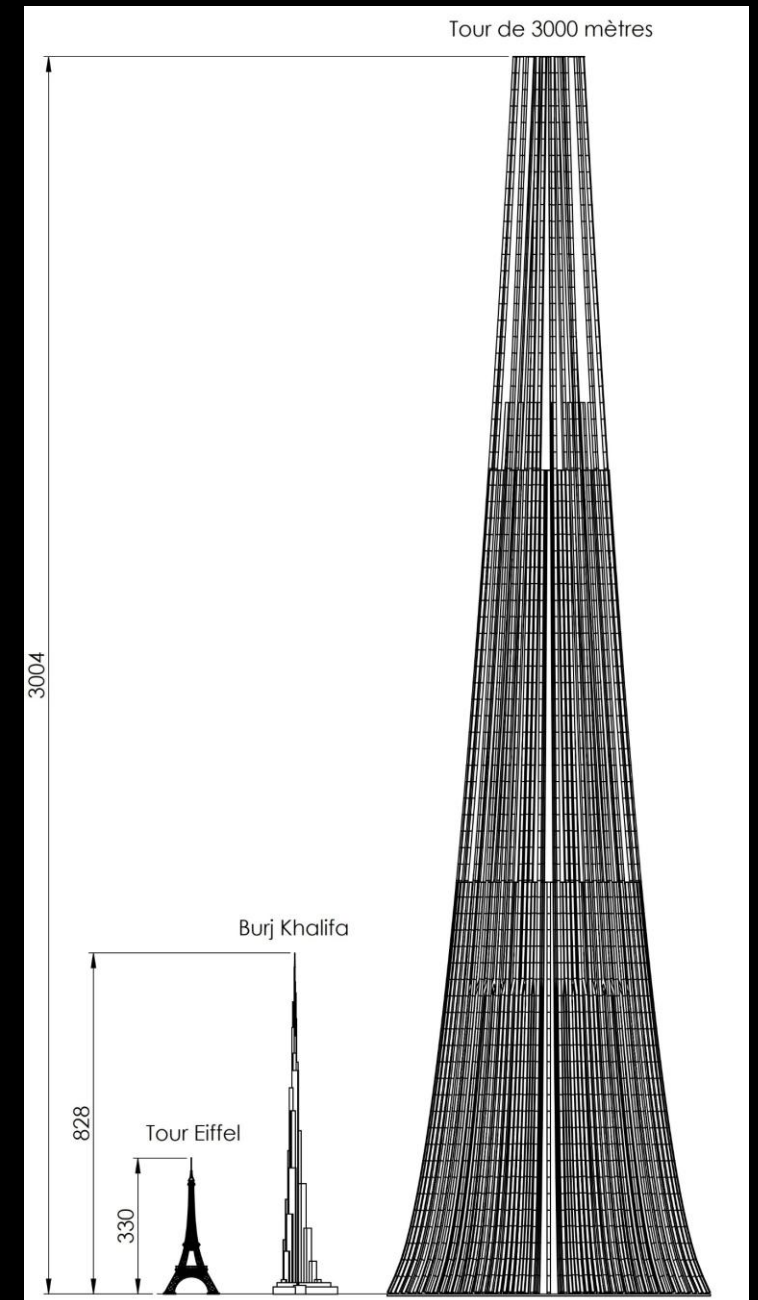


Pourquoi une tour de 3000 mètres n'est pas construite en 2025 ?

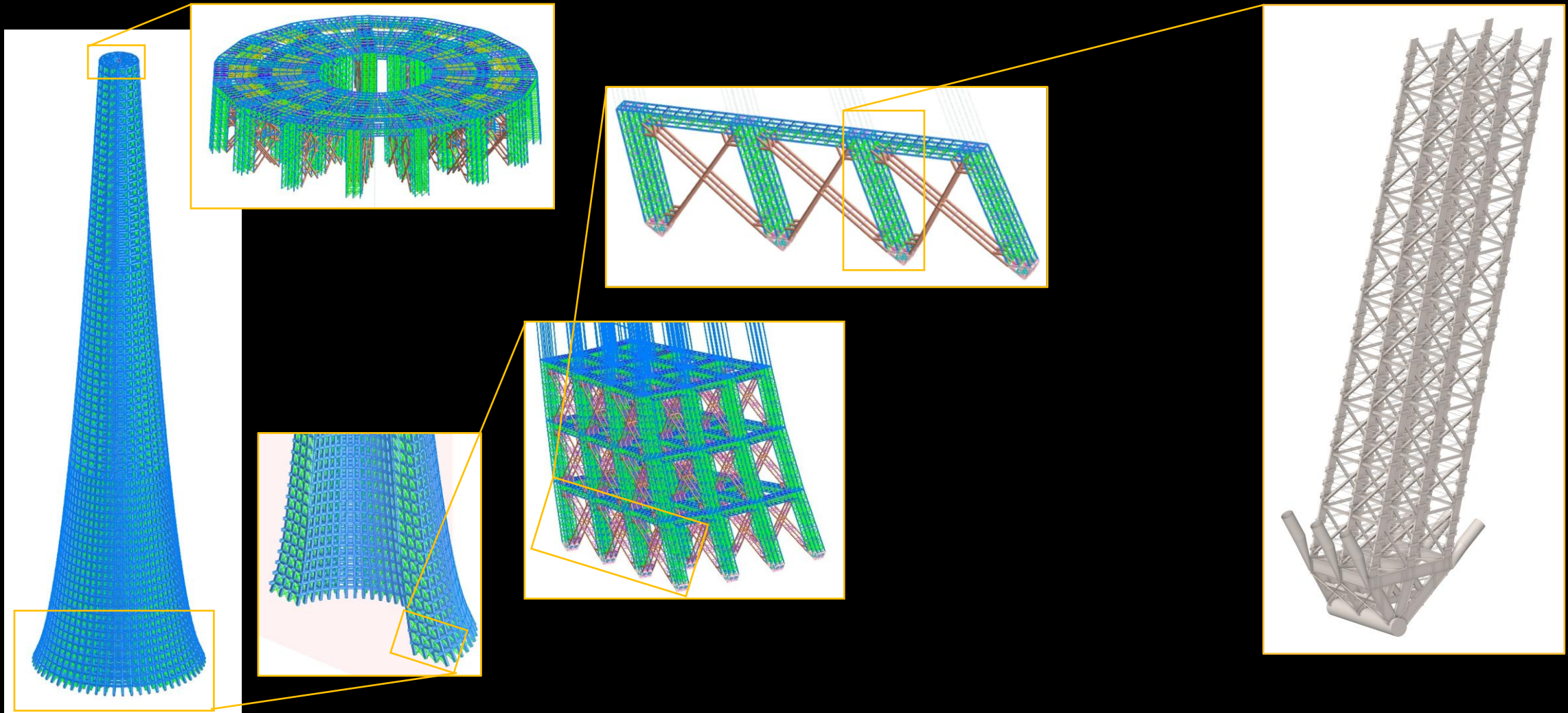
- ▶ Construire une tour de 3000 mètres de hauteur pose de nombreux défis techniques, économiques, environnementaux et logistiques. Voici quelques-unes des principales raisons pour lesquelles une telle structure n'a jamais été construite.
- ▶ Problèmes techniques et ingénierie
 - ▶ **Stabilité structurelle : résistance au vent et aux séismes**
 - ▶ Charges de compression sur les poteaux du rez-de-chaussée et risque de flambement
 - ▶ Matériaux
 - ▶ Ascenseurs
- ▶ Coût
- ▶ Problèmes environnementaux
- ▶ Logistique et accessibilité
- ▶ Limites humaines et confort

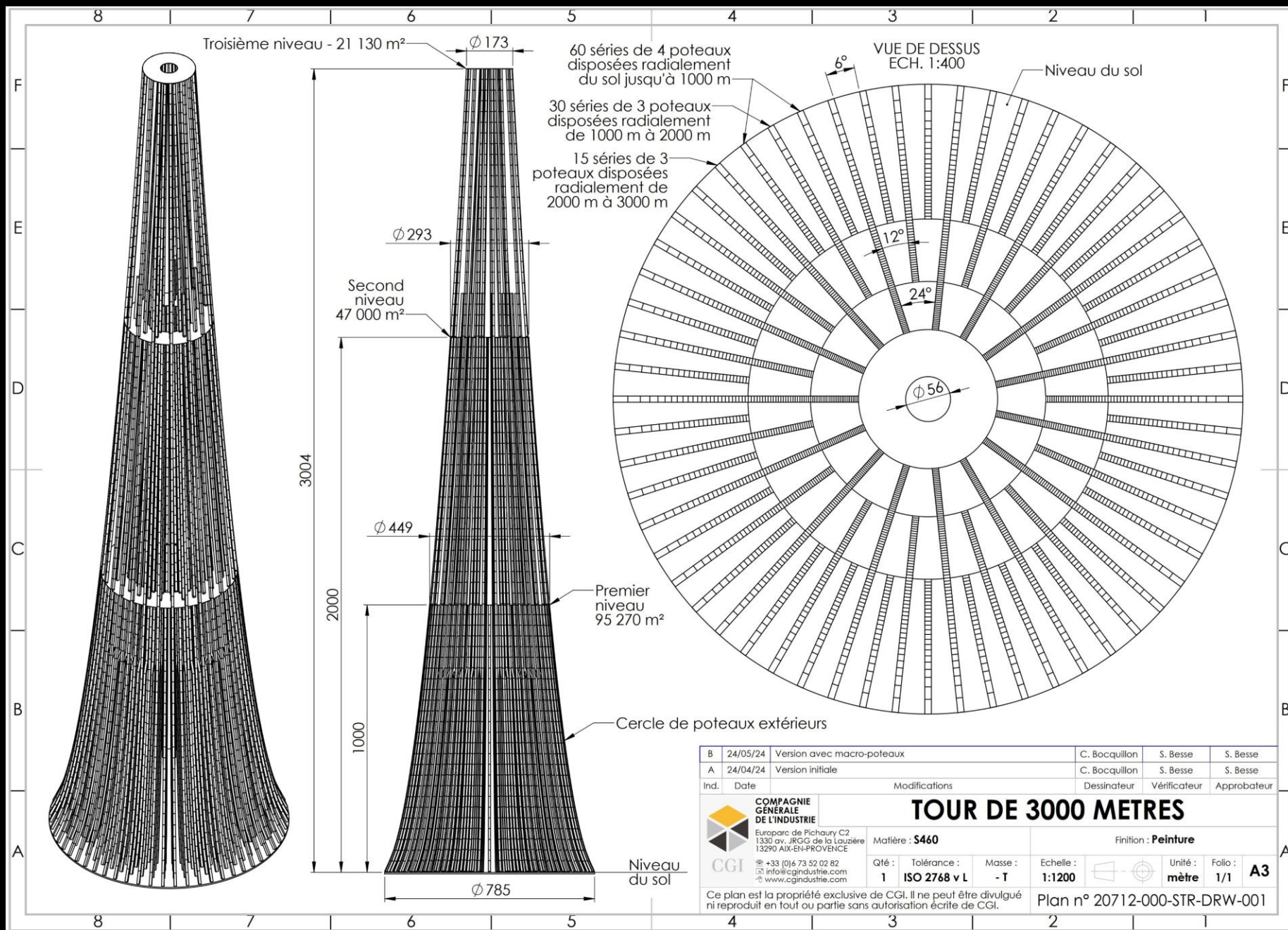
La tour de 3000 mètres

- ▶ Hauteur : 3000 mètres
- ▶ Fonction : centre commercial (70%) + tourisme (30%)
- ▶ Planchers : 4 (RDC, 1000, 2000, 3000 mètres)
- ▶ Structure en dentelle pour réduire les charges de vent
- ▶ Poids : ~ 750 000 tons (hors fondations)
- ▶ Matériau : acier au carbone S460
- ▶ Utilité sociale :
 - ▶ Centre d'observation des incendies
 - ▶ Observatoire astronomique à 3000 mètres
 - ▶ Zone de rassemblement de la population en cas d'inondation
 - ▶ Fermes agricoles
 - ▶ Zone de base jump
 - ▶ Plancher en verre



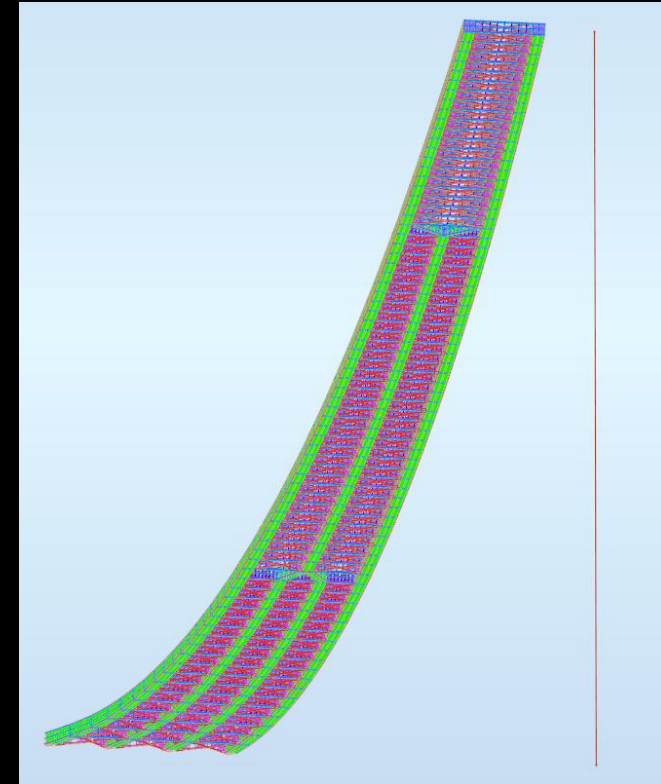
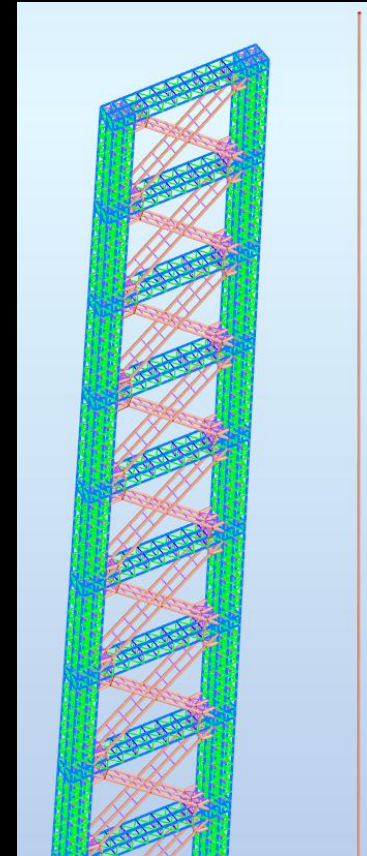
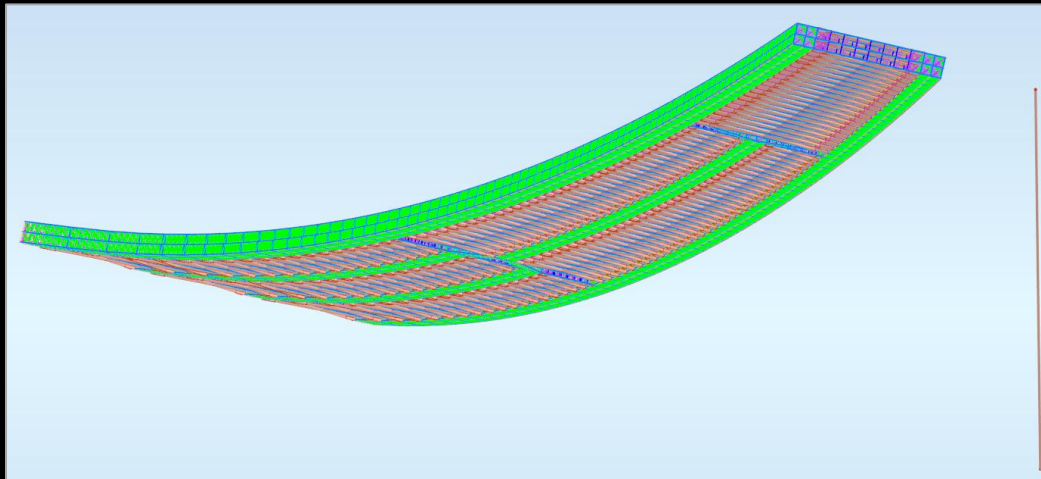
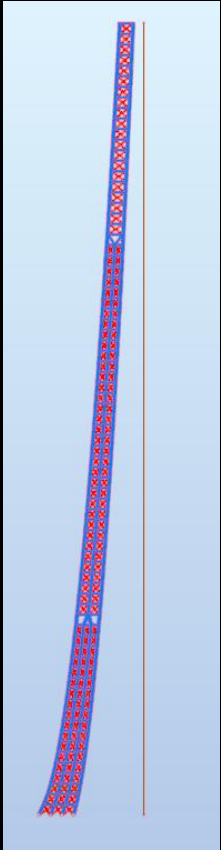
Géométrie





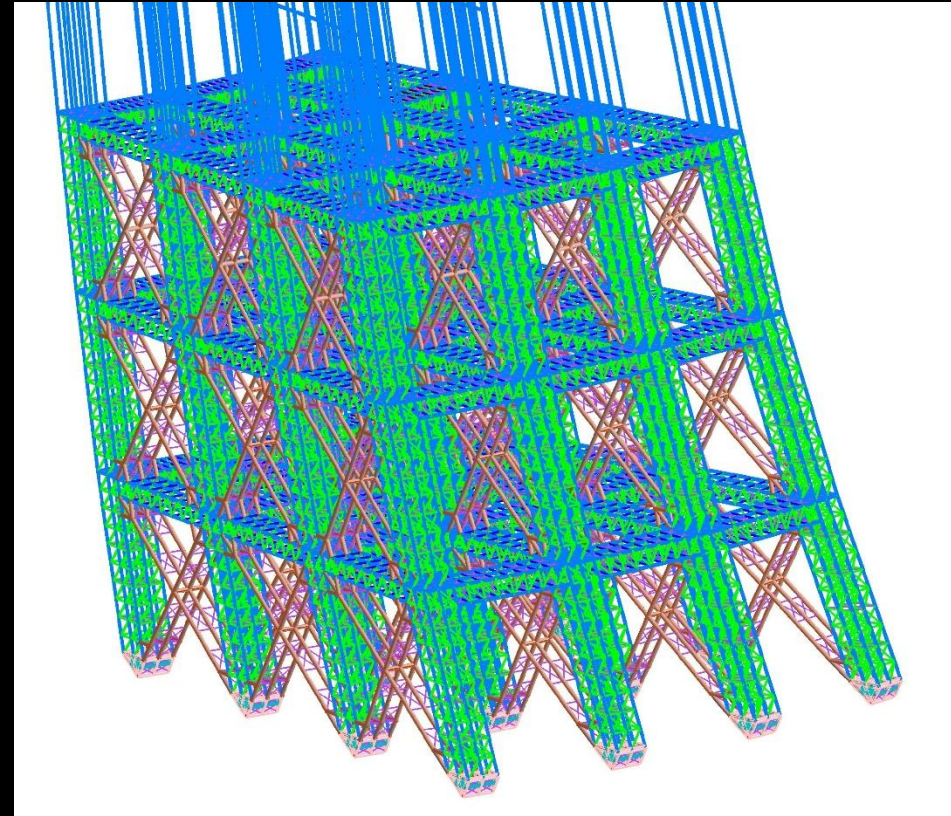
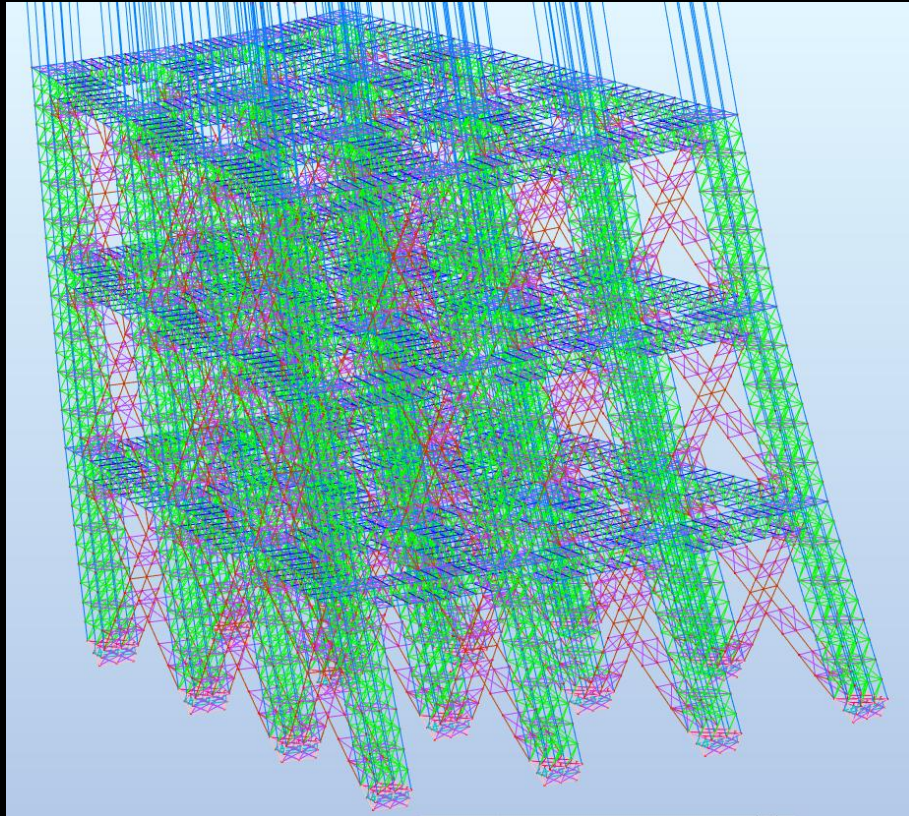
Vues 3D (0°, de $z = 0$ à 3000 m) 75 niveaux de 40 mètres

- 115 000 éléments poutres / 34 000 noeuds



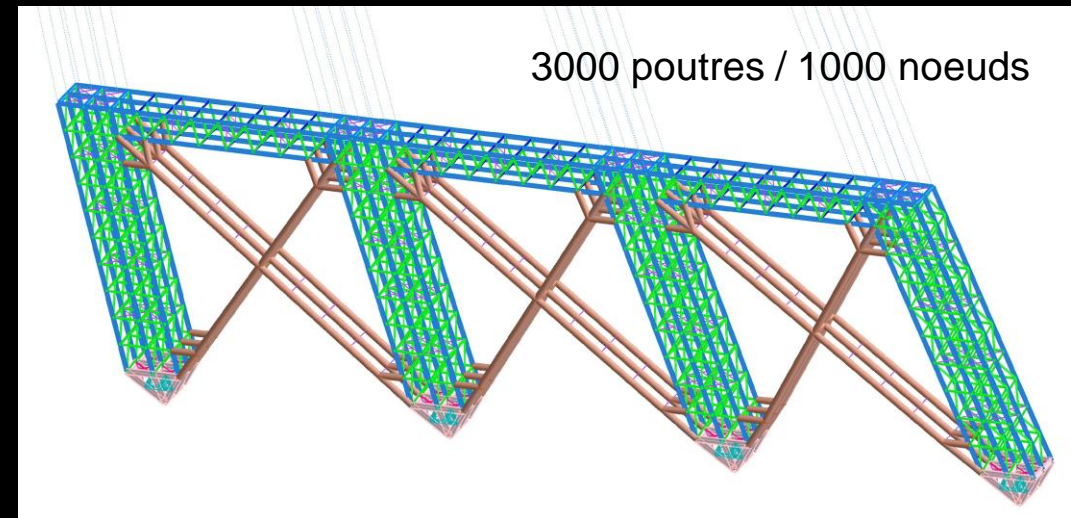
Vue 3D (de 0 à 18°, de z = 0 à 120 m)

- 26 000 éléments poutres / 12 000 noeuds



Logiciels et ressources informatiques

- ▶ Plus de 30 millions de poutres
- ▶ Impossibilité de faire un modèle 3D réaliste sur un ordinateur en 2025 même en éléments poutres
- ▶ Calculs réalisés avec Robot Structural Analysis et ANSYS Mechanical (4CAD)
- ▶ Modélisation du premier tronçon de 40 mètres
- ▶ Code de calculs : Eurocodes 0, 1, 3, 8
- ▶ Méthode des éléments finis avec ANSYS Mechanical
- ▶ Résolution de millions of degrés of liberté en secondes
- ▶ Devrait être avec la théorie élastique linéaire et un matériau linéaire
- ▶ Symétrie cylindrique
- ▶ Longueur de flambement : 1 mètre



Méthode de calcul global

► Poids total

$$P_{tot} = \alpha P_1 = P_1 \sum_{i=1}^N \prod_{k=0}^{i-1} (1 - t_k)^k$$

$$t_k = \frac{e(z)}{e(z=0)} \times \frac{D_m(z)}{D_m(z=0)}$$

Facteur α

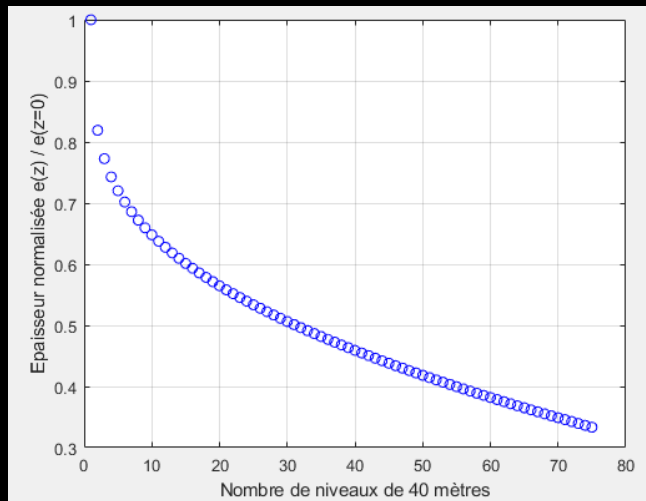
N nombre de niveau de 40 mètres ($N = 75$)

P_1 poids du premier niveau ($z = 0$ à 40 mètres)

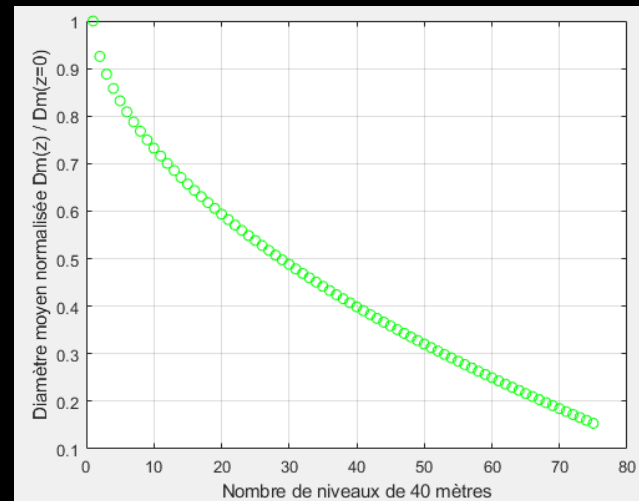
t_k taux de réduction du niveau $k - 1$ au niveau k

$e(z)$ épaisseur apparente de la tour suivant z

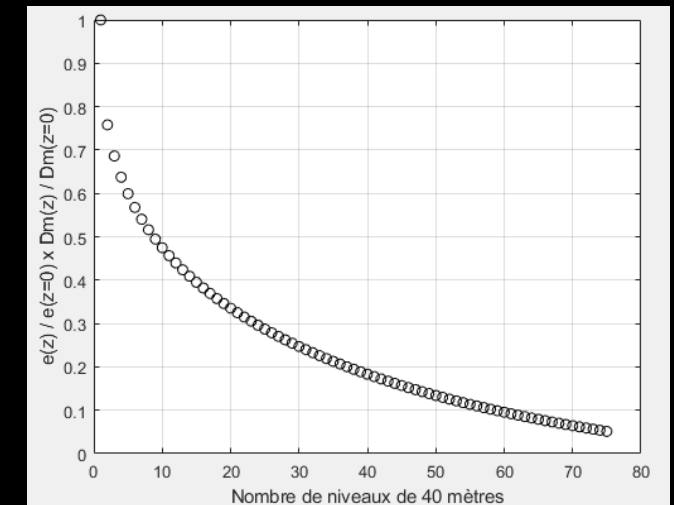
$D_m(z)$ diamètre moyen de la tour suivant z



X



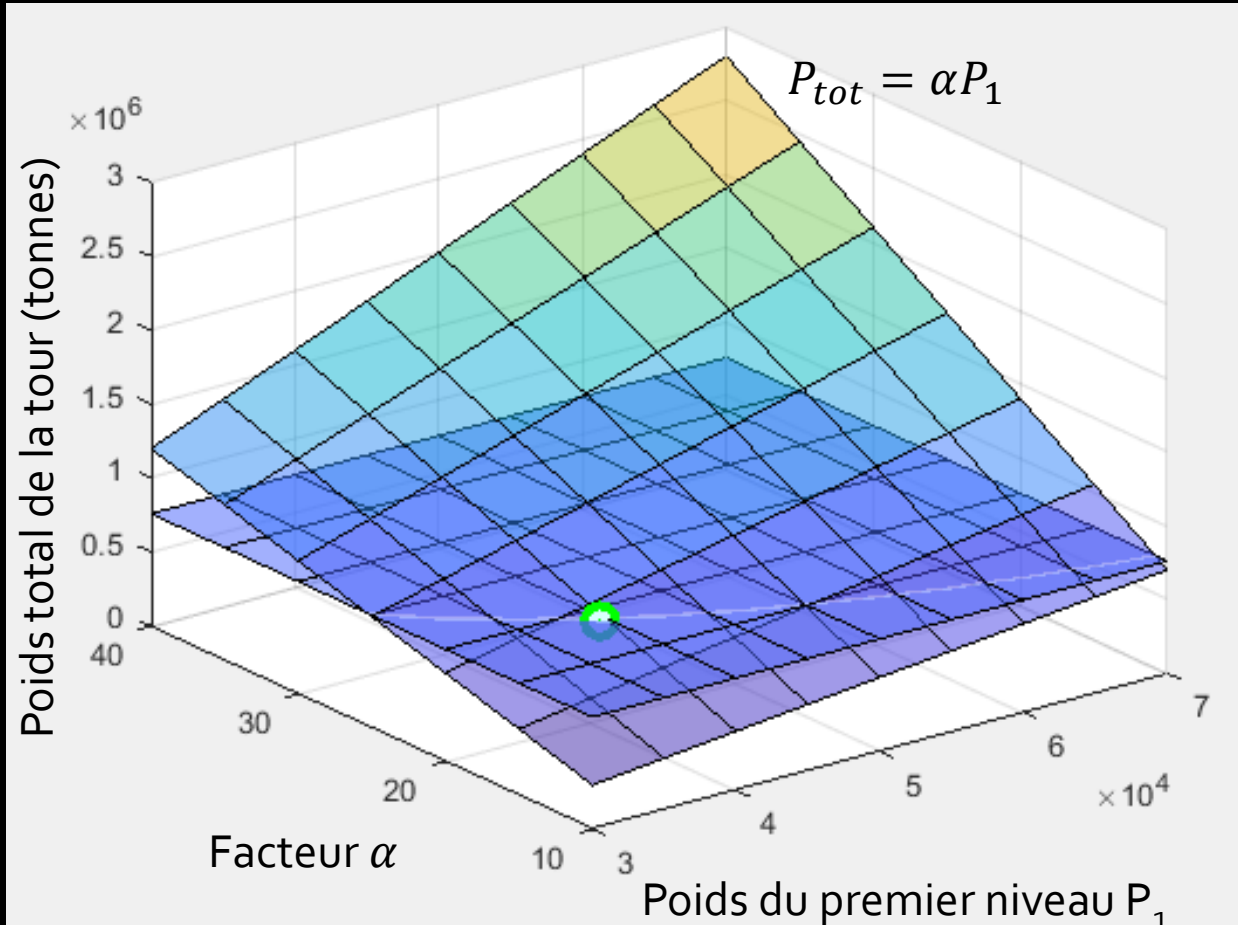
=



$$P_{tot} < P_1 + 60 \times 4 \times 3000 \text{ tonnes}$$

$$P_{tot} < 39\,612 \text{ tonnes} + 60 \times 4 \times 3000 \text{ tonnes} = 759\,612 \text{ tonnes}$$

► Surface de poids total



$$(P_1, \alpha, P_{tot}) =$$

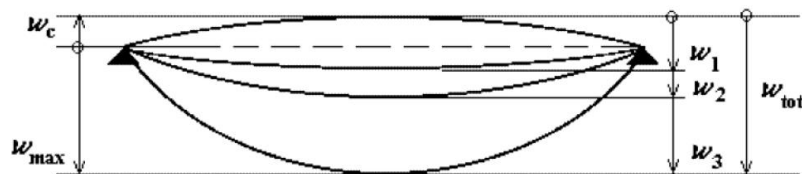
$$(39\,612 \text{ tonnes}, 18.866, 747\,320 \text{ tonnes})$$

Etat Limite Ultime (ELU)

- Acier S460
- Taux de travail maximal : 99 %
- Contrainte maximale : 454 MPa
(< 460 MPa)

Pièce	Profil	Matériau	Lay	Laz	Ratio	Cas
479	OK IPE 600	S 460 M	2.06	10.73	0.99	39 ELU/13=1*1.35 + 2*1.05 + 3*1.50
529	OK IPE 600	S 460 M	2.06	10.73	0.99	39 ELU/13=1*1.35 + 2*1.05 + 3*1.50
321	OK IPE 600	S 460 M	2.06	10.73	0.98	110 ACC:SEV4=1*1.00 + 2*0.30 + 8*-1.00
519	OK IPE 600	S 460 M	2.06	10.73	0.97	39 ELU/13=1*1.35 + 2*1.05 + 3*1.50
550	OK IPE 600	S 460 M	2.06	10.73	0.95	39 ELU/13=1*1.35 + 2*1.05 + 3*1.50
410	OK IPE 600	S 460 M	2.06	10.73	0.95	39 ELU/13=1*1.35 + 2*1.05 + 3*1.50
509	OK IPE 600	S 460 M	2.06	10.73	0.93	39 ELU/13=1*1.35 + 2*1.05 + 3*1.50
311	OK IPE 600	S 460 M	2.06	10.73	0.93	110 ACC:SEV4=1*1.00 + 2*0.30 + 8*-1.00
272	OK IPE 600	S 460 M	2.06	10.73	0.92	47 ELU/21=1*1.35 + 2*1.05 + 5*1.50
301	OK IPE 600	S 460 M	2.06	10.73	0.91	110 ACC:SEV4=1*1.00 + 2*0.30 + 8*-1.00
551	OK IPE 600	S 460 M	2.06	10.73	0.90	39 ELU/13=1*1.35 + 2*1.05 + 3*1.50
282	OK IPE 600	S 460 M	2.06	10.73	0.90	47 ELU/21=1*1.35 + 2*1.05 + 5*1.50
400	OK IPE 600	S 460 M	2.06	10.73	0.89	110 ACC:SEV4=1*1.00 + 2*0.30 + 8*-1.00
262	OK IPE 600	S 460 M	2.06	10.73	0.89	47 ELU/21=1*1.35 + 2*1.05 + 5*1.50
390	OK IPE 600	S 460 M	2.06	10.73	0.88	110 ACC:SEV4=1*1.00 + 2*0.30 + 8*-1.00
548	OK IPE 600	S 460 M	2.06	10.73	0.87	39 ELU/13=1*1.35 + 2*1.05 + 3*1.50
558	OK IPE 600	S 460 M	2.06	10.73	0.87	39 ELU/13=1*1.35 + 2*1.05 + 3*1.50
539	OK IPE 600	S 460 M	2.06	10.73	0.86	39 ELU/13=1*1.35 + 2*1.05 + 3*1.50
461	OK IPE 600	S 460 M	2.06	10.73	0.84	39 ELU/13=1*1.35 + 2*1.05 + 3*1.50
552	OK IPE 600	S 460 M	2.06	10.73	0.84	39 ELU/13=1*1.35 + 2*1.05 + 3*1.50
9	OK IPE 600	S 460 M	2.06	10.73	0.83	51 ELU/25=1*1.35 + 2*1.05 + 6*1.50
273	OK IPE 600	S 460 M	2.06	10.73	0.82	110 ACC:SEV4=1*1.00 + 2*0.30 + 8*-1.00
553	OK IPE 600	S 460 M	2.06	10.73	0.81	39 ELU/13=1*1.35 + 2*1.05 + 3*1.50
372	OK IPE 600	S 460 M	2.06	10.73	0.81	39 ELU/13=1*1.35 + 2*1.05 + 3*1.50
263	OK IPE 600	S 460 M	2.06	10.73	0.80	47 ELU/21=1*1.35 + 2*1.05 + 5*1.50
540	OK IPE 600	S 460 M	2.06	10.73	0.80	39 ELU/13=1*1.35 + 2*1.05 + 3*1.50
520	OK IPE 600	S 460 M	2.06	10.73	0.79	39 ELU/13=1*1.35 + 2*1.05 + 3*1.50
541	OK IPE 600	S 460 M	2.06	10.73	0.78	39 ELU/13=1*1.35 + 2*1.05 + 3*1.50
521	OK IPE 600	S 460 M	2.06	10.73	0.77	39 ELU/13=1*1.35 + 2*1.05 + 3*1.50
274	OK IPE 600	S 460 M	2.06	10.73	0.77	110 ACC:SEV4=1*1.00 + 2*0.30 + 8*-1.00
554	OK IPE 600	S 460 M	2.06	10.73	0.76	39 ELU/13=1*1.35 + 2*1.05 + 3*1.50
542	OK IPE 600	S 460 M	2.06	10.73	0.76	39 ELU/13=1*1.35 + 2*1.05 + 3*1.50
469	OK IPE 600	S 460 M	2.06	10.73	0.76	39 ELU/13=1*1.35 + 2*1.05 + 3*1.50
522	OK IPE 600	S 460 M	2.06	10.73	0.76	39 ELU/13=1*1.35 + 2*1.05 + 3*1.50
528	OK IPE 600	S 460 M	2.06	10.73	0.75	39 ELU/13=1*1.35 + 2*1.05 + 3*1.50
283	OK IPE 600	S 460 M	2.06	10.73	0.75	51 ELU/25=1*1.35 + 2*1.05 + 6*1.50
264	OK IPE 600	S 460 M	2.06	10.73	0.75	110 ACC:SEV4=1*1.00 + 2*0.30 + 8*-1.00
380	OK IPE 600	S 460 M	2.06	10.73	0.75	39 ELU/13=1*1.35 + 2*1.05 + 3*1.50
842 Poutre st	OK IPE 200	S 460 M	48.43	178.90	0.74	51 ELU/25=1*1.35 + 2*1.05 + 6*1.50
543	OK IPE 600	S 460 M	2.06	10.73	0.74	39 ELU/13=1*1.35 + 2*1.05 + 3*1.50
265	OK IPE 600	S 460 M	2.06	10.73	0.74	47 ELU/21=1*1.35 + 2*1.05 + 5*1.50
987 Poutre st	OK IPE 200	S 460 M	48.43	178.90	0.74	47 ELU/21=1*1.35 + 2*1.05 + 5*1.50
518	OK IPE 600	S 460 M	2.06	10.73	0.74	39 ELU/13=1*1.35 + 2*1.05 + 3*1.50
547	OK IPE 600	S 460 M	2.06	10.73	0.74	39 ELU/13=1*1.35 + 2*1.05 + 3*1.50
523	OK IPE 600	S 460 M	2.06	10.73	0.74	39 ELU/13=1*1.35 + 2*1.05 + 3*1.50
557	OK IPE 600	S 460 M	2.06	10.73	0.74	39 ELU/13=1*1.35 + 2*1.05 + 3*1.50

Etat Limite de Service (ELS)



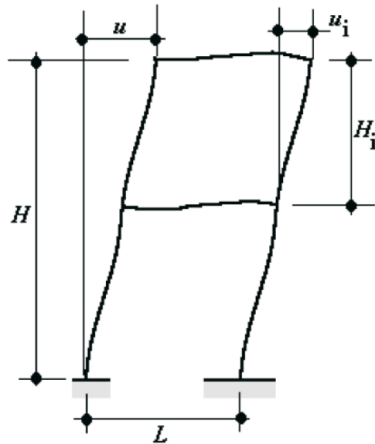
Légende

- w_c Contreflèche dans l'élément structural non chargé
- w_1 Partie initiale de la flèche sous les charges permanentes de la combinaison d'actions correspondante selon les expressions (6.14a) à (6.16b).
- w_2 Partie à long terme de la flèche sous les charges permanentes.
- w_3 Partie additionnelle de la flèche due aux actions variables de la combinaison d'actions correspondante d'après les expressions (6.14a) à (6.16b).
- w_{tot} Flèche totale, soit somme de w_1 , w_2 , w_3 .
- w_{max} Flèche résiduelle totale compte tenu de la contreflèche.

Pièce	Profil	Matériau	Ratio(uy)	Cas (uy)	Ratio(uz)	Cas (uz)
1045	OK IPE 600	S 460 M	0.31	67 ELS:CAR/13=1*1.00 + 2*0.70 + 6*1.00	0.01	63 ELS:CAR/9=1*1.00 + 2*0.70 + 4*1.00
1024	OK IPE 600	S 460 M	0.31	67 ELS:CAR/13=1*1.00 + 2*0.70 + 6*1.00	0.00	63 ELS:CAR/9=1*1.00 + 2*0.70 + 4*1.00
1038	OK IPE 600	S 460 M	0.30	67 ELS:CAR/13=1*1.00 + 2*0.70 + 6*1.00	0.01	63 ELS:CAR/9=1*1.00 + 2*0.70 + 4*1.00
865	OK IPE 600	S 460 M	0.30	67 ELS:CAR/13=1*1.00 + 2*0.70 + 6*1.00	0.01	63 ELS:CAR/9=1*1.00 + 2*0.70 + 4*1.00
899	OK IPE 600	S 460 M	0.29	67 ELS:CAR/13=1*1.00 + 2*0.70 + 6*1.00	0.01	63 ELS:CAR/9=1*1.00 + 2*0.70 + 4*1.00
885	OK IPE 600	S 460 M	0.29	67 ELS:CAR/13=1*1.00 + 2*0.70 + 6*1.00	0.01	63 ELS:CAR/9=1*1.00 + 2*0.70 + 4*1.00
757	OK IPE 600	S 460 M	0.28	65 ELS:CAR/11=1*1.00 + 2*0.70 + 5*1.00	0.00	63 ELS:CAR/9=1*1.00 + 2*0.70 + 4*1.00
741	OK IPE 600	S 460 M	0.28	65 ELS:CAR/11=1*1.00 + 2*0.70 + 5*1.00	0.01	63 ELS:CAR/9=1*1.00 + 2*0.70 + 4*1.00
1050	OK IPE 600	S 460 M	0.28	67 ELS:CAR/13=1*1.00 + 2*0.70 + 6*1.00	0.01	61 ELS:CAR/7=1*1.00 + 2*0.70 + 3*1.00
1029	OK IPE 600	S 460 M	0.27	67 ELS:CAR/13=1*1.00 + 2*0.70 + 6*1.00	0.01	61 ELS:CAR/7=1*1.00 + 2*0.70 + 3*1.00
749	OK IPE 600	S 460 M	0.27	65 ELS:CAR/11=1*1.00 + 2*0.70 + 5*1.00	0.01	63 ELS:CAR/9=1*1.00 + 2*0.70 + 4*1.00
1043	OK IPE 600	S 460 M	0.27	67 ELS:CAR/13=1*1.00 + 2*0.70 + 6*1.00	0.01	61 ELS:CAR/7=1*1.00 + 2*0.70 + 3*1.00
870	OK IPE 600	S 460 M	0.26	67 ELS:CAR/13=1*1.00 + 2*0.70 + 6*1.00	0.01	63 ELS:CAR/9=1*1.00 + 2*0.70 + 4*1.00
904	OK IPE 600	S 460 M	0.26	67 ELS:CAR/13=1*1.00 + 2*0.70 + 6*1.00	0.02	63 ELS:CAR/9=1*1.00 + 2*0.70 + 4*1.00
890	OK IPE 600	S 460 M	0.26	67 ELS:CAR/13=1*1.00 + 2*0.70 + 6*1.00	0.02	63 ELS:CAR/9=1*1.00 + 2*0.70 + 4*1.00
746	OK IPE 600	S 460 M	0.25	67 ELS:CAR/13=1*1.00 + 2*0.70 + 6*1.00	0.02	63 ELS:CAR/9=1*1.00 + 2*0.70 + 4*1.00
762	OK IPE 600	S 460 M	0.25	67 ELS:CAR/13=1*1.00 + 2*0.70 + 6*1.00	0.01	63 ELS:CAR/9=1*1.00 + 2*0.70 + 4*1.00
1033	OK IPE 600	S 460 M	0.25	65 ELS:CAR/11=1*1.00 + 2*0.70 + 5*1.00	0.00	65 ELS:CAR/11=1*1.00 + 2*0.70 + 5*1.00
999	OK IPE 600	S 460 M	0.25	65 ELS:CAR/11=1*1.00 + 2*0.70 + 5*1.00	0.00	67 ELS:CAR/13=1*1.00 + 2*0.70 + 6*1.00
12047 Poutre stab IPE200_12047	OK IPE 200	S 460 M	0.25	65 ELS:CAR/11=1*1.00 + 2*0.70 + 5*1.00	0.04	67 ELS:CAR/13=1*1.00 + 2*0.70 + 6*1.00
12046 Poutre stab IPE200_12046	OK IPE 200	S 460 M	0.25	65 ELS:CAR/11=1*1.00 + 2*0.70 + 5*1.00	0.05	65 ELS:CAR/11=1*1.00 + 2*0.70 + 5*1.00

Etat Limite de Service (ELS)

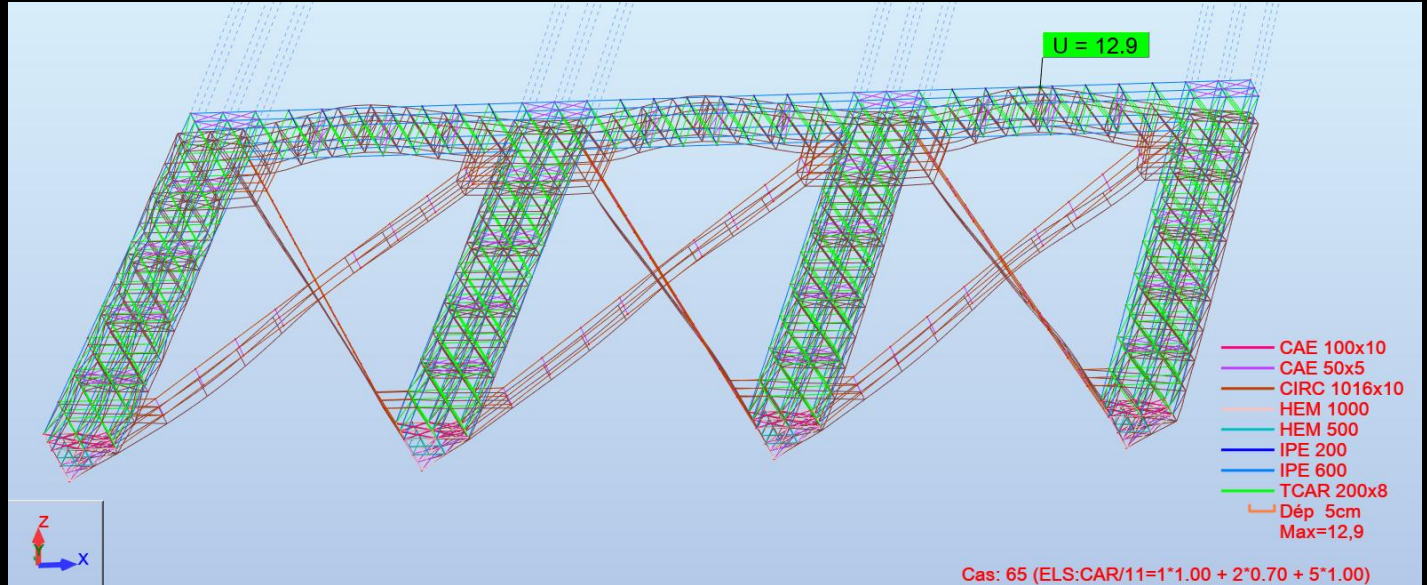
130 mm



Légende

u Déplacement horizontal général sur la hauteur H du bâtiment

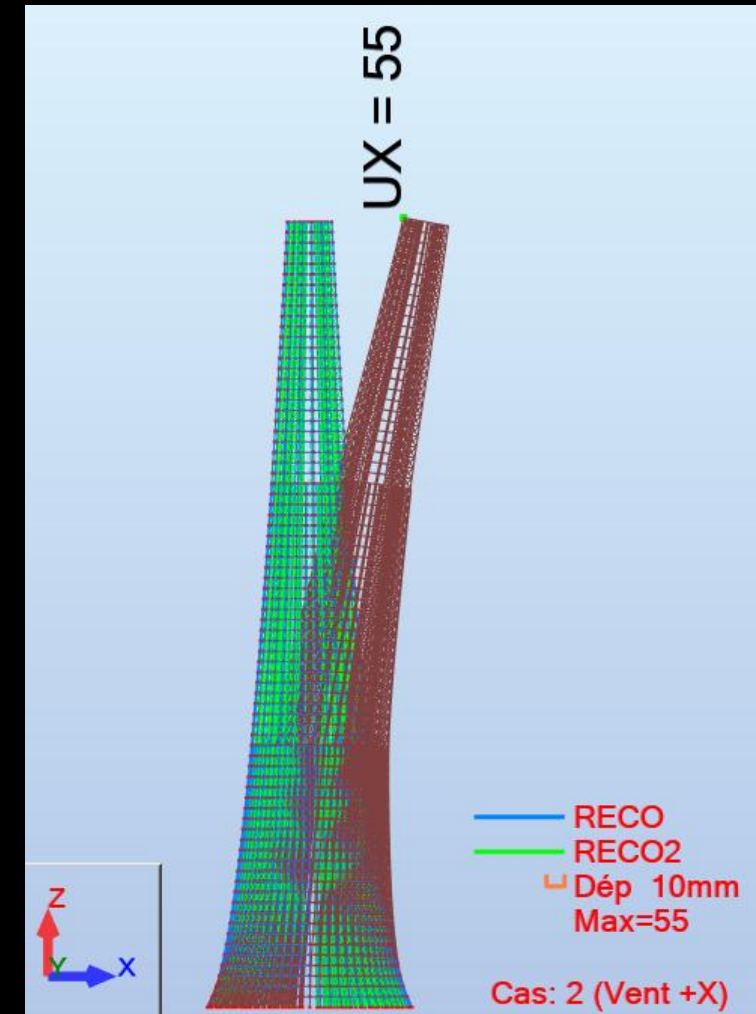
u_i Déplacement horizontal sur la hauteur H_i d'un étage



Pièce	Profil	Matériau	Ratio(vx)	Cas (vx)	Ratio(vy)▲	Cas (vy)
267	OK IPE 600	S 460 M	0.07	61 ELS:CAR/7=1*1.00 + 2*0.70 + 3*1.00	0.18	65 ELS:CAR/11=1*1.00 + 2*0.70 + 5*1.00
232	OK IPE 600	S 460 M	0.11	63 ELS:CAR/9=1*1.00 + 2*0.70 + 4*1.00	0.17	65 ELS:CAR/11=1*1.00 + 2*0.70 + 5*1.00
282	OK IPE 600	S 460 M	0.14	63 ELS:CAR/9=1*1.00 + 2*0.70 + 4*1.00	0.17	65 ELS:CAR/11=1*1.00 + 2*0.70 + 5*1.00
272	OK IPE 600	S 460 M	0.14	63 ELS:CAR/9=1*1.00 + 2*0.70 + 4*1.00	0.17	65 ELS:CAR/11=1*1.00 + 2*0.70 + 5*1.00
209	OK IPE 600	S 460 M	0.05	61 ELS:CAR/7=1*1.00 + 2*0.70 + 3*1.00	0.16	65 ELS:CAR/11=1*1.00 + 2*0.70 + 5*1.00
219	OK IPE 600	S 460 M	0.06	61 ELS:CAR/7=1*1.00 + 2*0.70 + 3*1.00	0.16	65 ELS:CAR/11=1*1.00 + 2*0.70 + 5*1.00
273	OK IPE 600	S 460 M	0.11	63 ELS:CAR/9=1*1.00 + 2*0.70 + 4*1.00	0.16	67 ELS:CAR/13=1*1.00 + 2*0.70 + 6*1.00
277	OK IPE 600	S 460 M	0.07	61 ELS:CAR/7=1*1.00 + 2*0.70 + 3*1.00	0.15	65 ELS:CAR/11=1*1.00 + 2*0.70 + 5*1.00
242	OK IPE 600	S 460 M	0.11	63 ELS:CAR/9=1*1.00 + 2*0.70 + 4*1.00	0.15	65 ELS:CAR/11=1*1.00 + 2*0.70 + 5*1.00
229	OK IPE 600	S 460 M	0.07	61 ELS:CAR/7=1*1.00 + 2*0.70 + 3*1.00	0.15	65 ELS:CAR/11=1*1.00 + 2*0.70 + 5*1.00
222	OK IPE 600	S 460 M	0.09	63 ELS:CAR/9=1*1.00 + 2*0.70 + 4*1.00	0.15	65 ELS:CAR/11=1*1.00 + 2*0.70 + 5*1.00
234	OK IPE 600	S 460 M	0.09	63 ELS:CAR/9=1*1.00 + 2*0.70 + 4*1.00	0.15	65 ELS:CAR/11=1*1.00 + 2*0.70 + 5*1.00
212	OK IPE 600	S 460 M	0.10	63 ELS:CAR/9=1*1.00 + 2*0.70 + 4*1.00	0.14	65 ELS:CAR/11=1*1.00 + 2*0.70 + 5*1.00

Déflexion horizontale due au vent à $z = 3000$ m

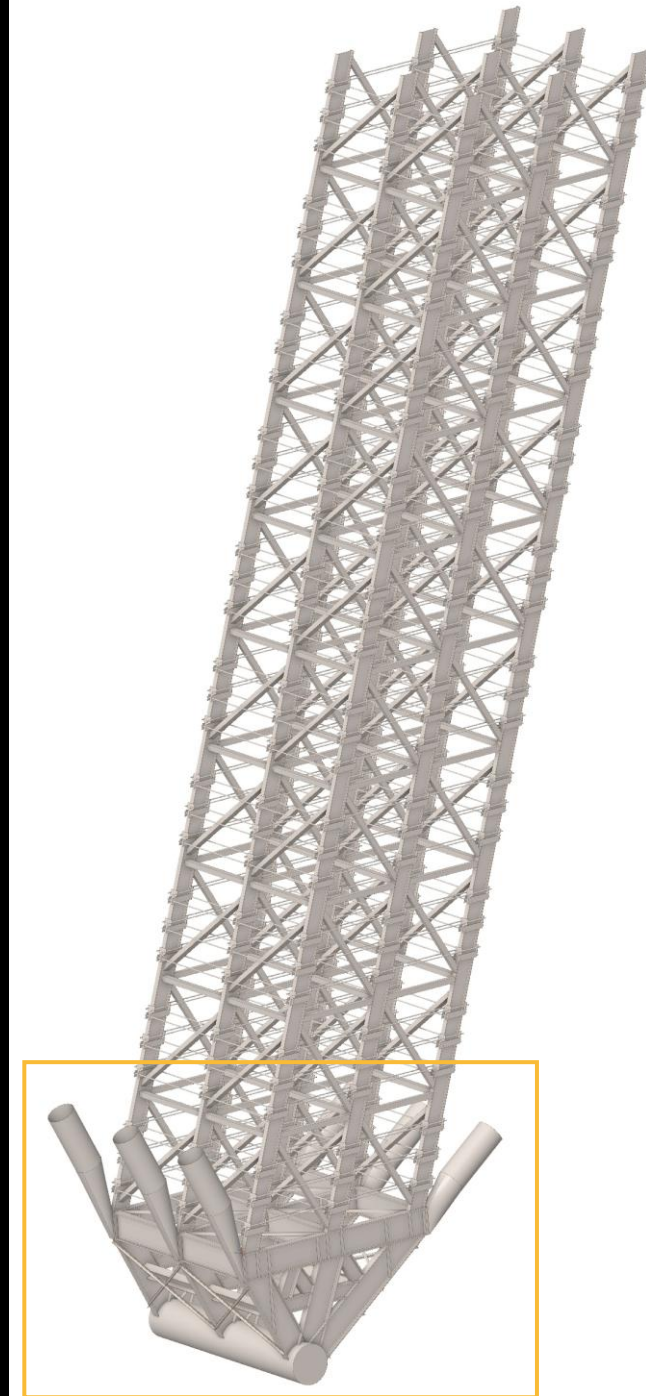
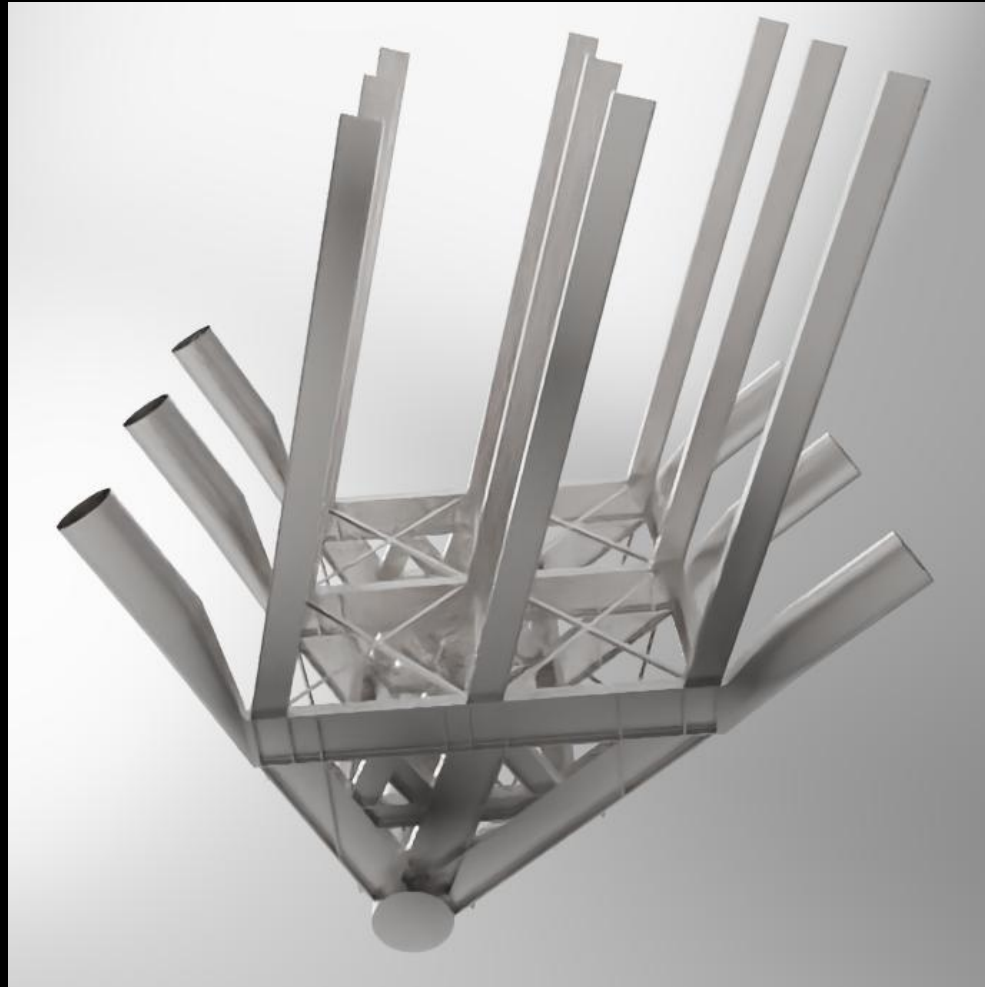
- Déflexion due au vent, basé sur 300 daN/m^2
- Pour la Tour Eiffel, Eurocode : $H / 150$
 - $H / 150 = 300\,000 \text{ mm} / 150 = 2 \text{ mètres}$
 - Experimental : max 130 mm (tempête, 1999)
 - La tour Eiffel respecte un critère $H / 2300$
- La Tour de 3000 m respecte un critère $H / 54\,000$



Supports articulés en pieds de poteaux (160 tonnes x 240 supports)

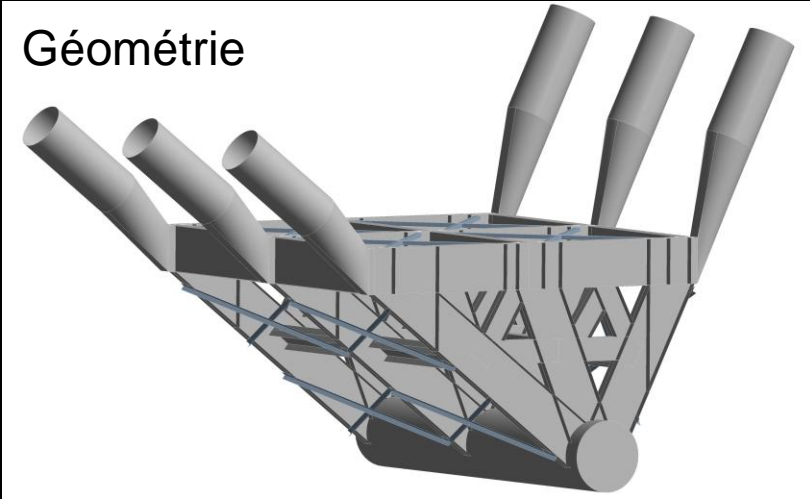
- IPE 600
- HEM 1000
- HEM 500
- CAE 100x10
- BAR 1500
- DN1000
- acier S460

(tonnage de tous les supports
≈ 6500 éléphants)

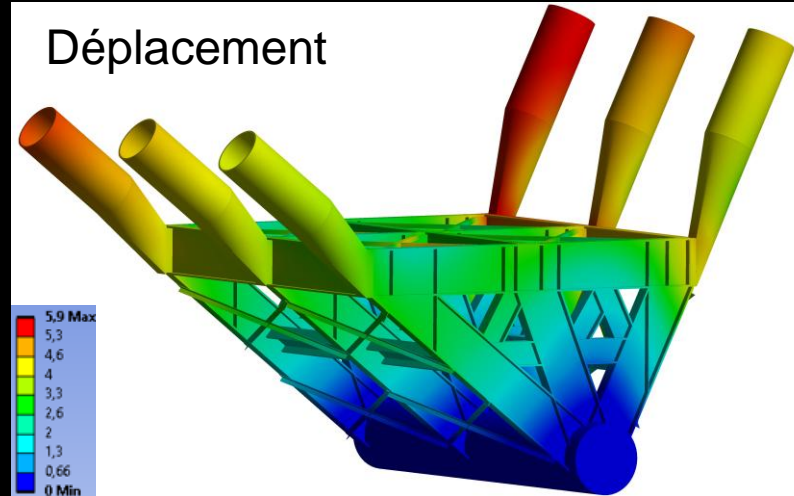


Calculs mécaniques des articulations

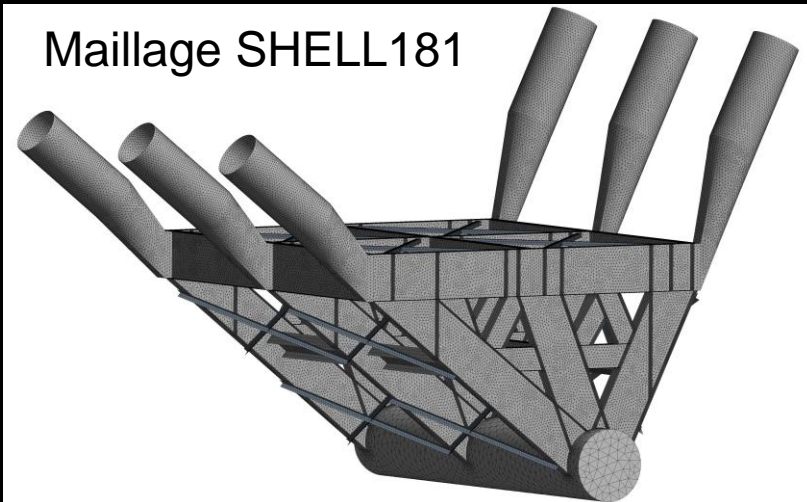
Géométrie



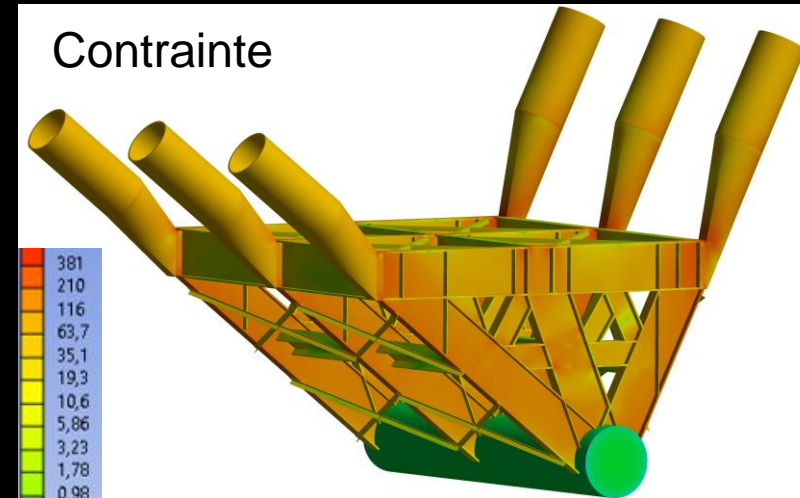
Déplacement



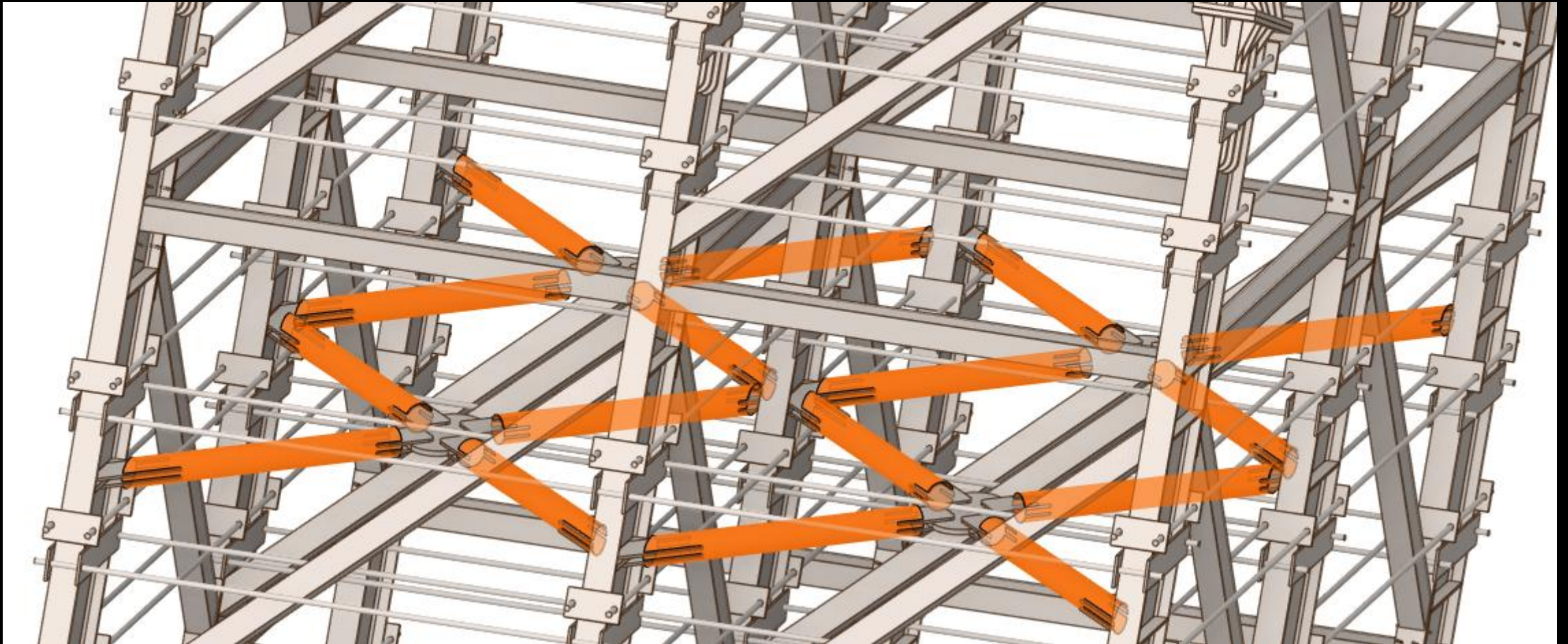
Maillage SHELL181



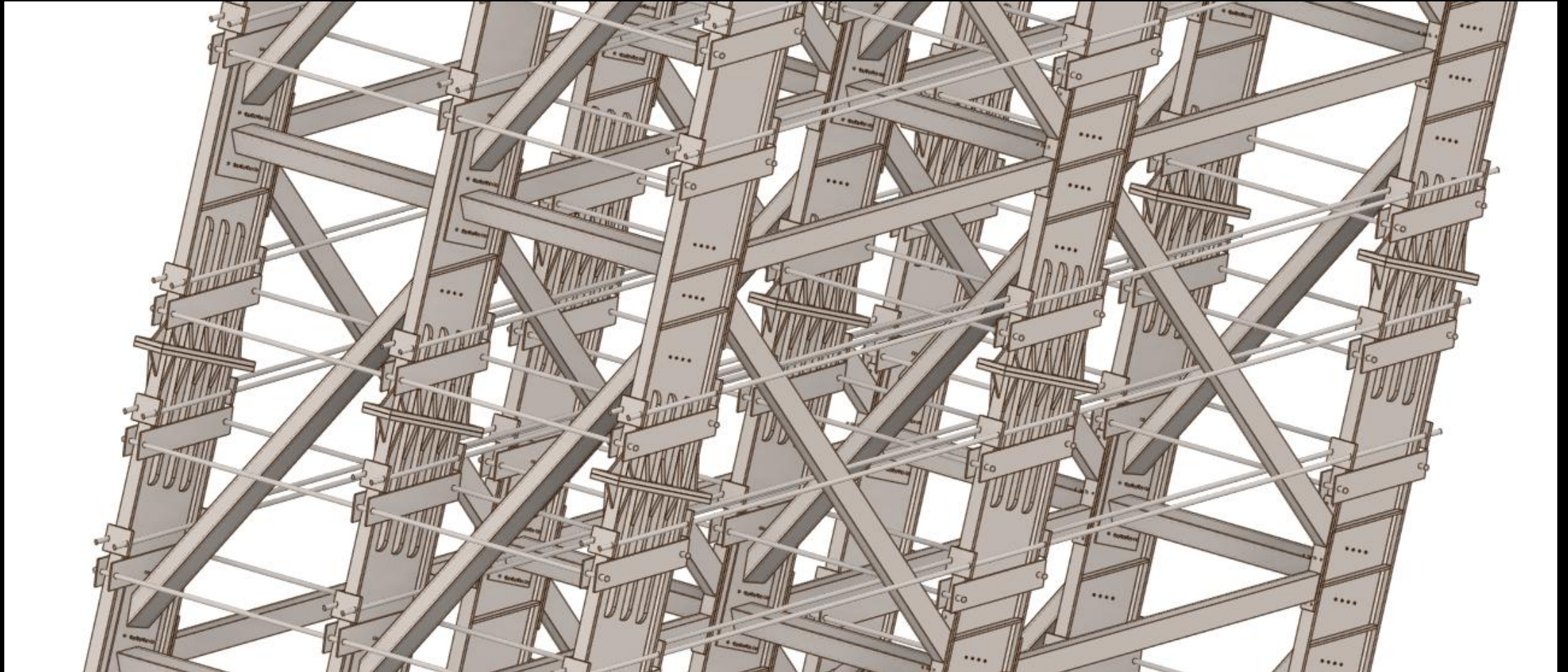
Contrainte



Croix de stabilité dans le macro-poteau



Détails des assemblages des 9 poteaux IPE600



Analyse modale et méthode du spectre de réponse (RSM)

- Méthode du mode de superposition
- 15 modes
- Combinaison de la réponse modale avec la méthode Complete Quadratic Combination (CQC)

$$R = \sqrt{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \left(R_i R_j \frac{(\omega_i + \omega_j)^2 \xi^2}{(\omega_i - \omega_j)^2 + (\omega_i + \omega_j)^2 \xi^2} \right)}$$

ξ ratio d'amortissement constant

- Correction de la masse manquante : force due à la masse manquante

$$F = M \left\{ \{1\} - \sum_{i=1}^m \Gamma_i \{\phi_i\} \right\} S_{A \max}$$

M masse totale

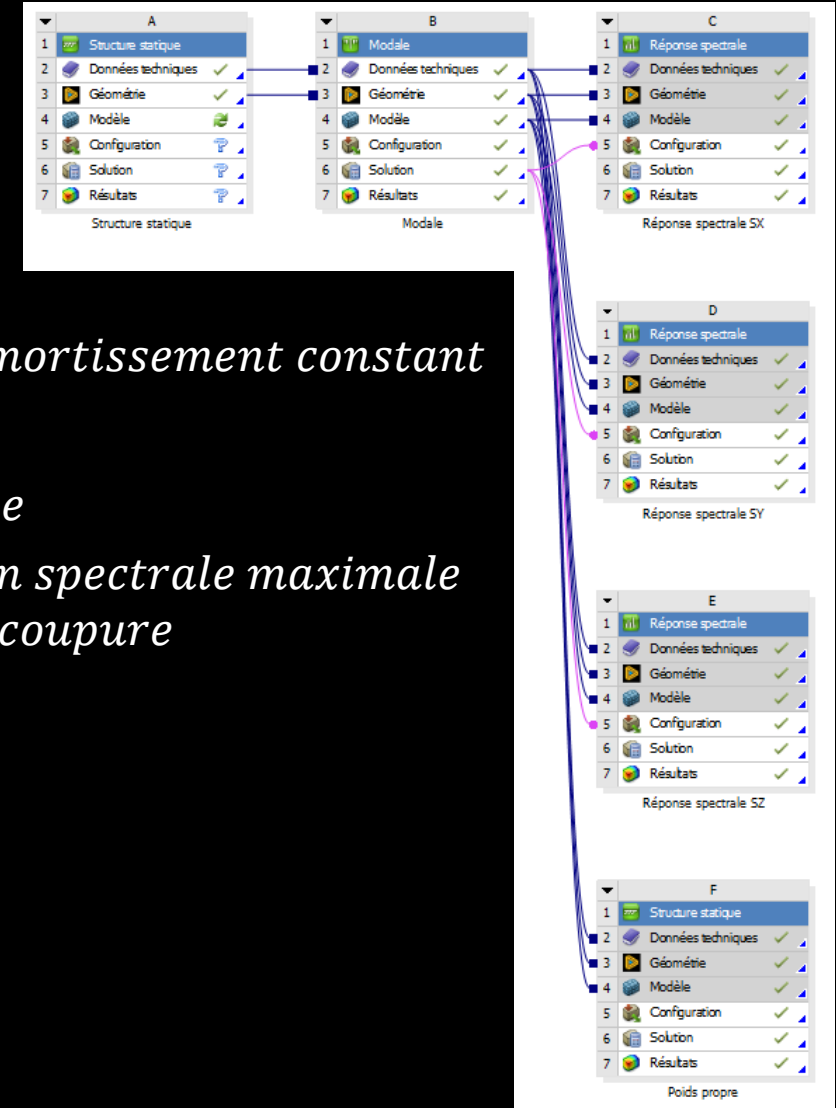
$S_{A \max}$ accélération spectrale maximale à la fréquence de coupure

- Combinaison spatiale (réponse dynamique triaxiale)
 - La réponse maximale due au séisme sera la plus grande parmi les trois suivants :

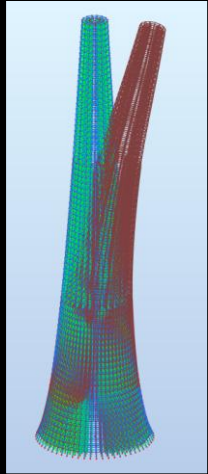
$$R = \pm R_x \pm 0.4 R_y \pm 0.4 R_z$$

$$R = \pm R_y \pm 0.4 R_z \pm 0.4 R_x$$

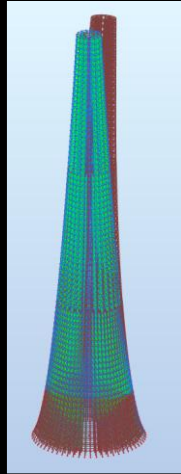
$$R = \pm R_z \pm 0.4 R_x \pm 0.4 R_y$$



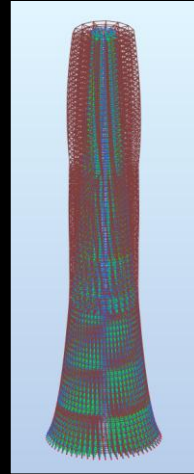
Analyse modale : résultats préliminaires



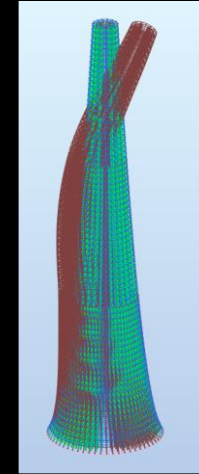
N°1 : 0.05 Hz



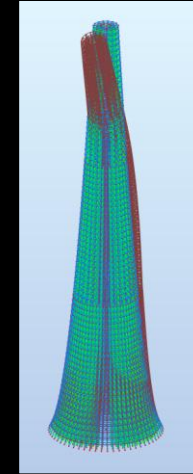
N°2 : 0.05 Hz



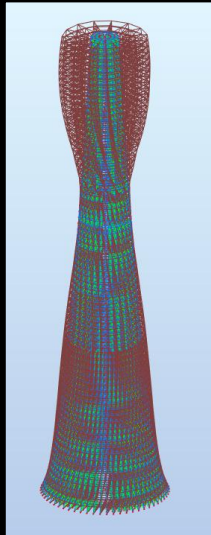
N°3 : 0.11 Hz



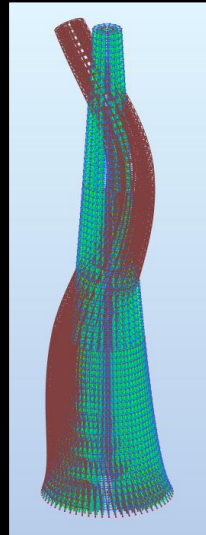
N°4 : 0.11 Hz



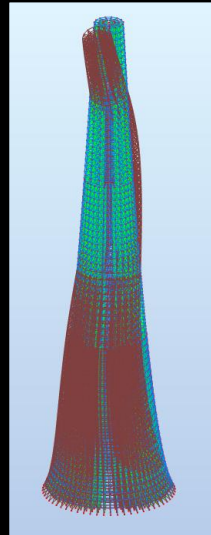
N°5 : 0.11 Hz



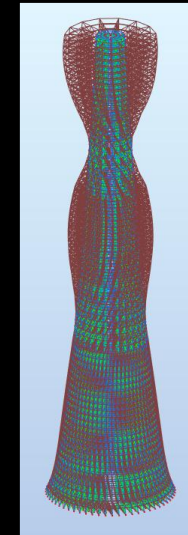
N°6 : 0.17 Hz



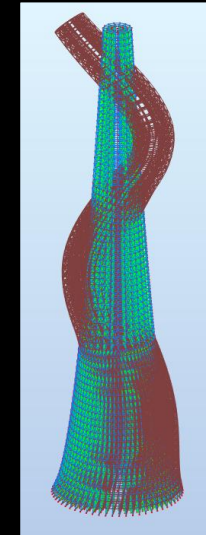
N°7 : 0.18 Hz



N°8 : 0.18 Hz



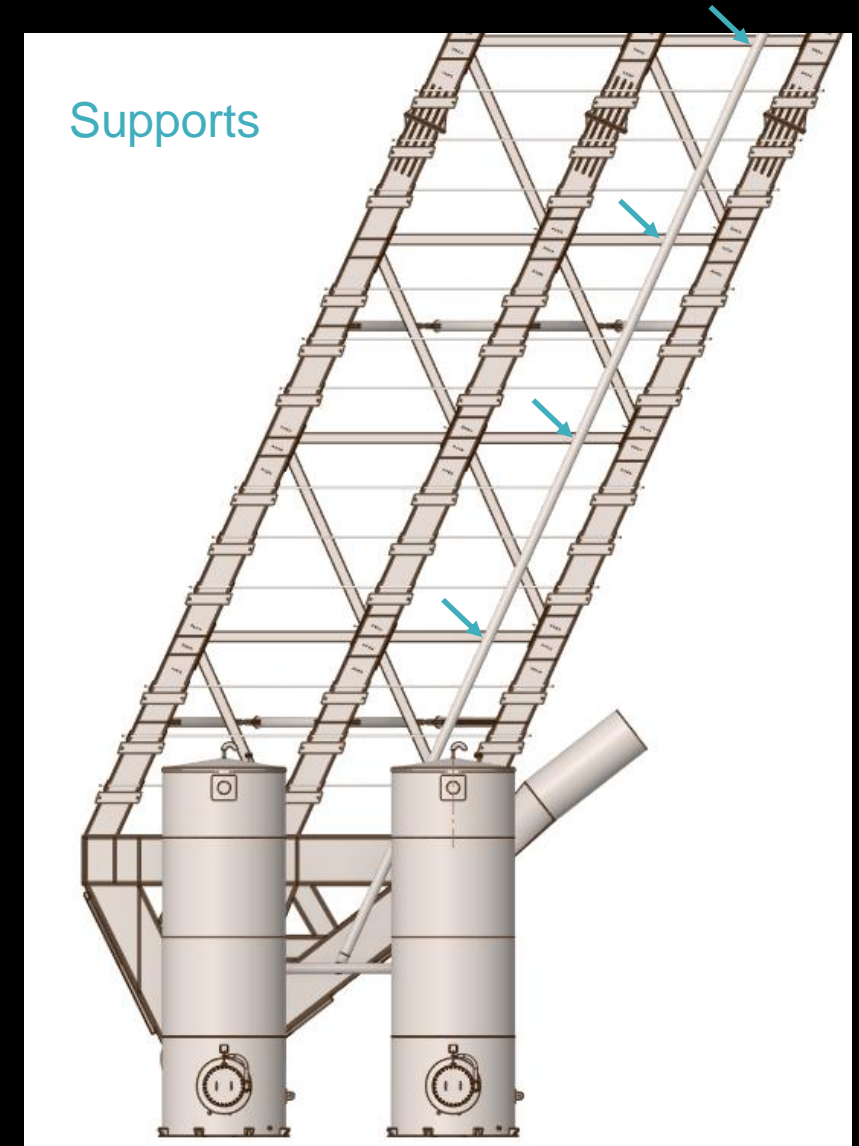
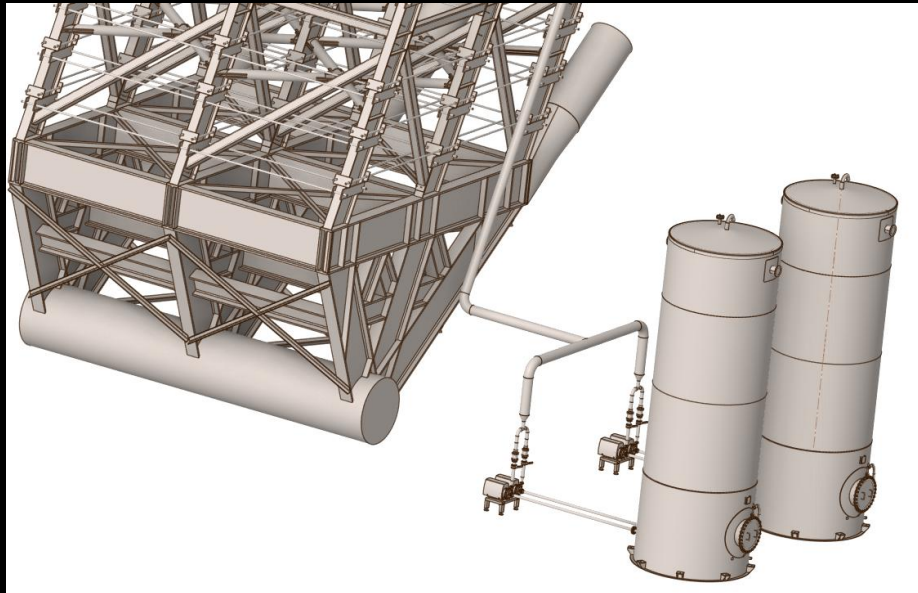
N°9 : 0.24 Hz



N°10 : 0.28 Hz

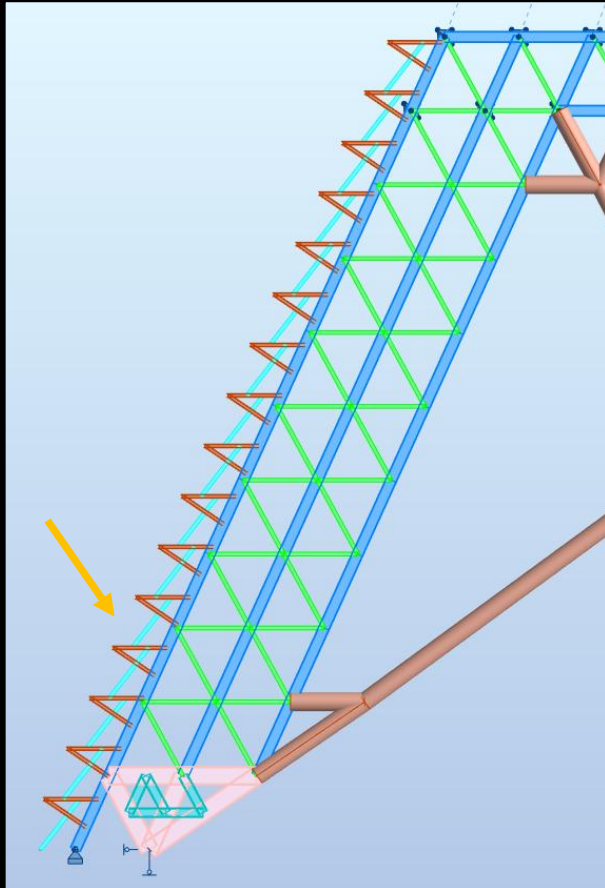
Réservoirs, tuyauteries sous pression et pompes

- 1 bar tous les 10 mètres d'altitude (eau) (hors pertes de charge)
- Pompes de relevage tous les 40 mètres
- Supports sur les traverses tous les 4 m
- Réservoirs suivant CODRES Div.1 2023
- Tuyauteries suivant CODETI Div.1 2023

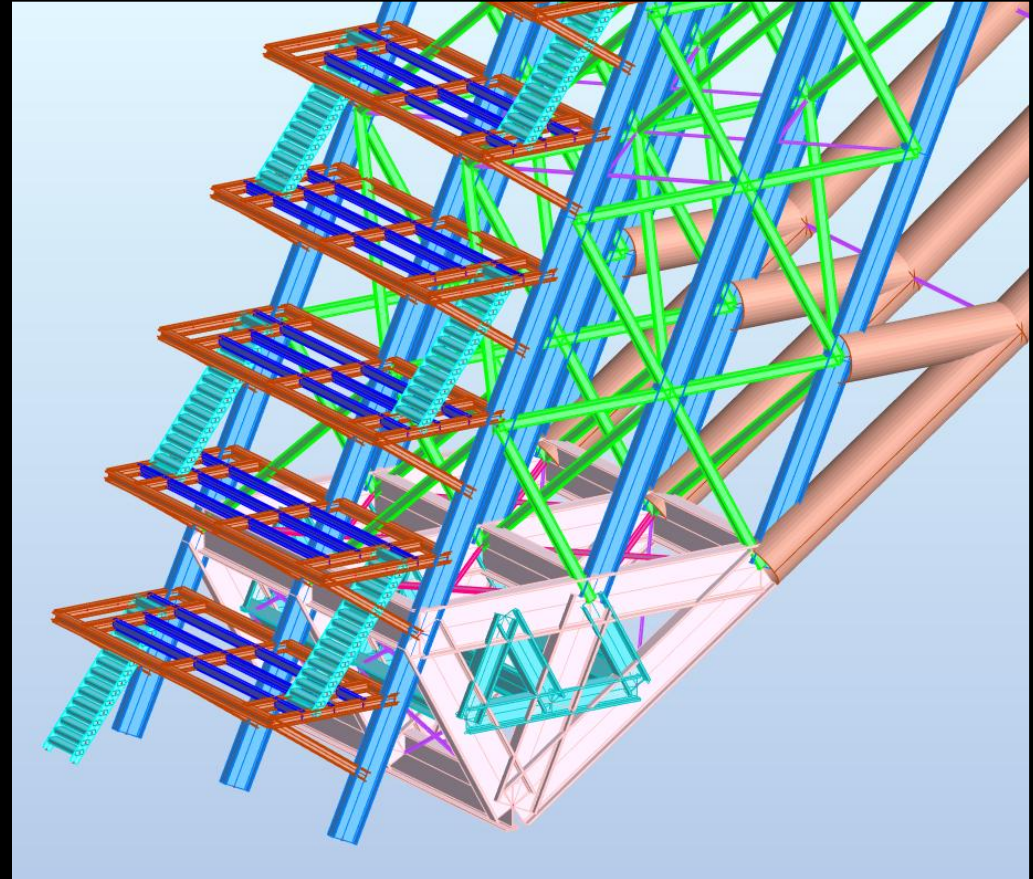


Escaliers et passerelles d'accès

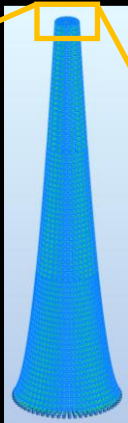
Vue de côté



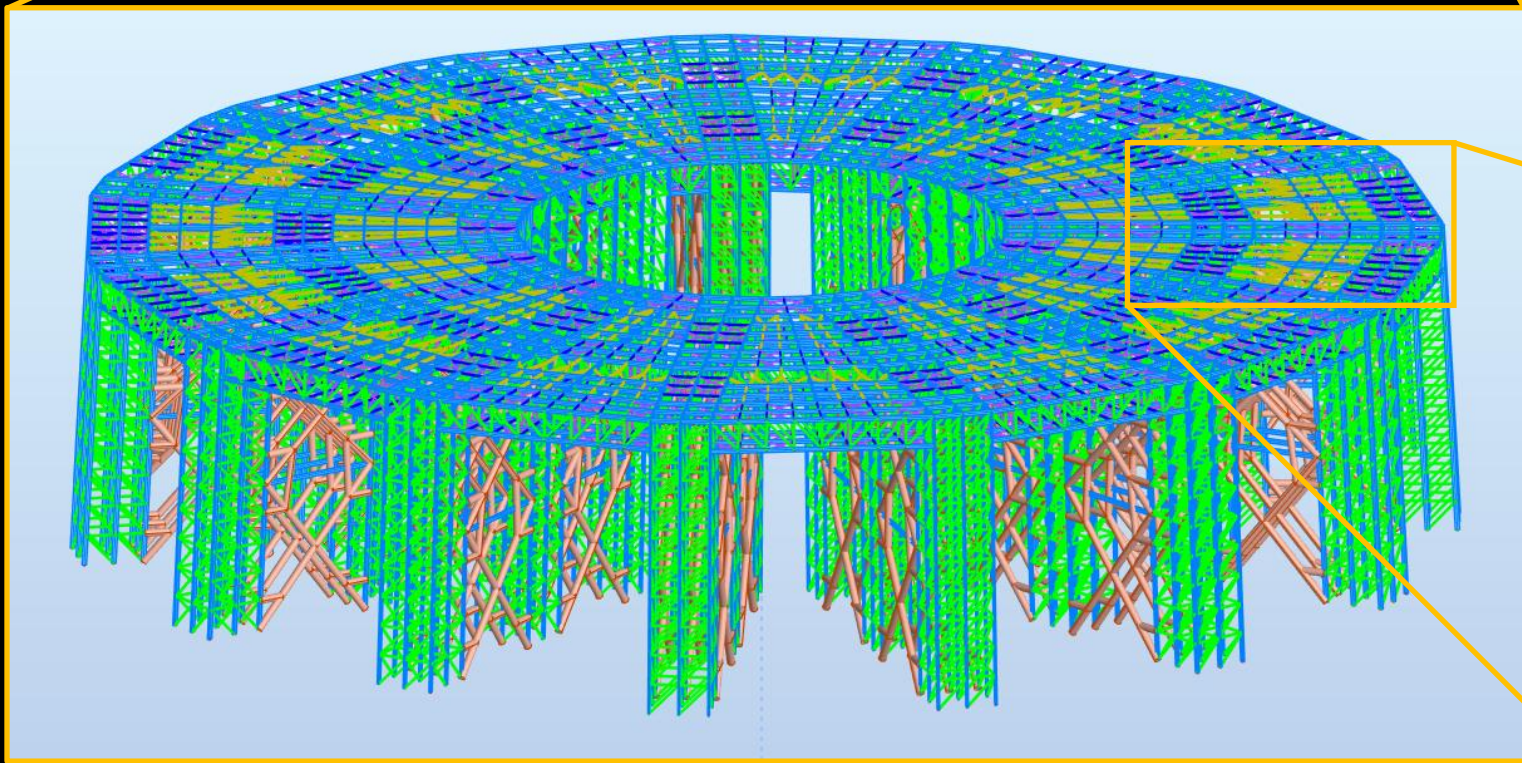
Vue en perspective



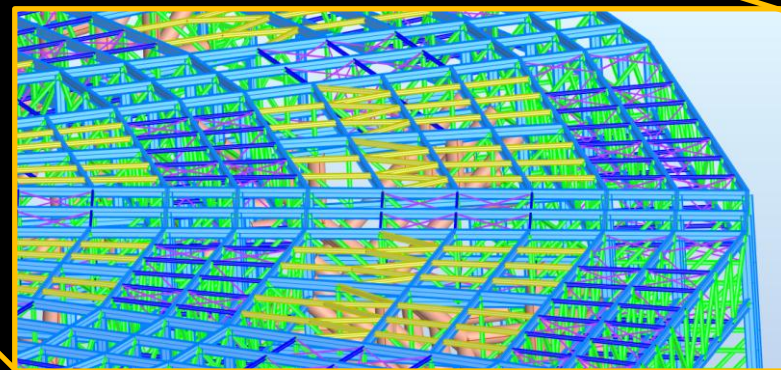
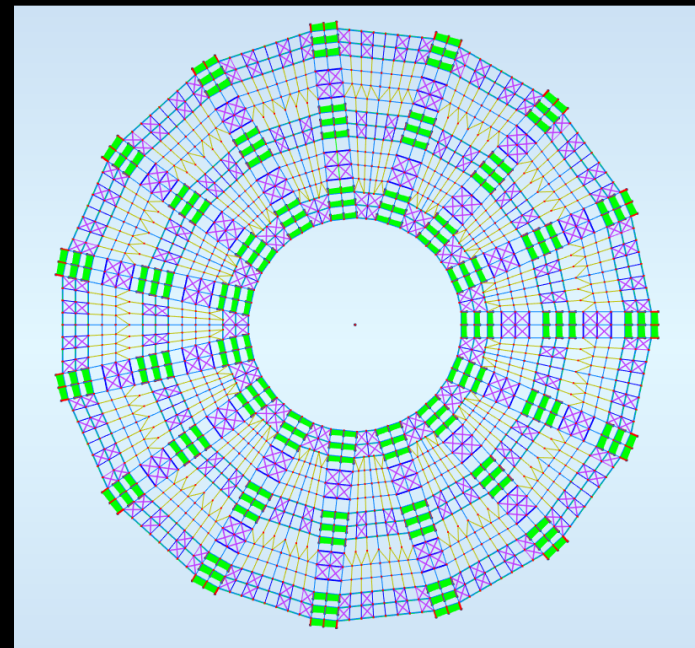
Plancher $z = +3000$ m
(10 300 tonnes)



Vue en perspective (23 000 éléments poutres, 8 000 noeuds)

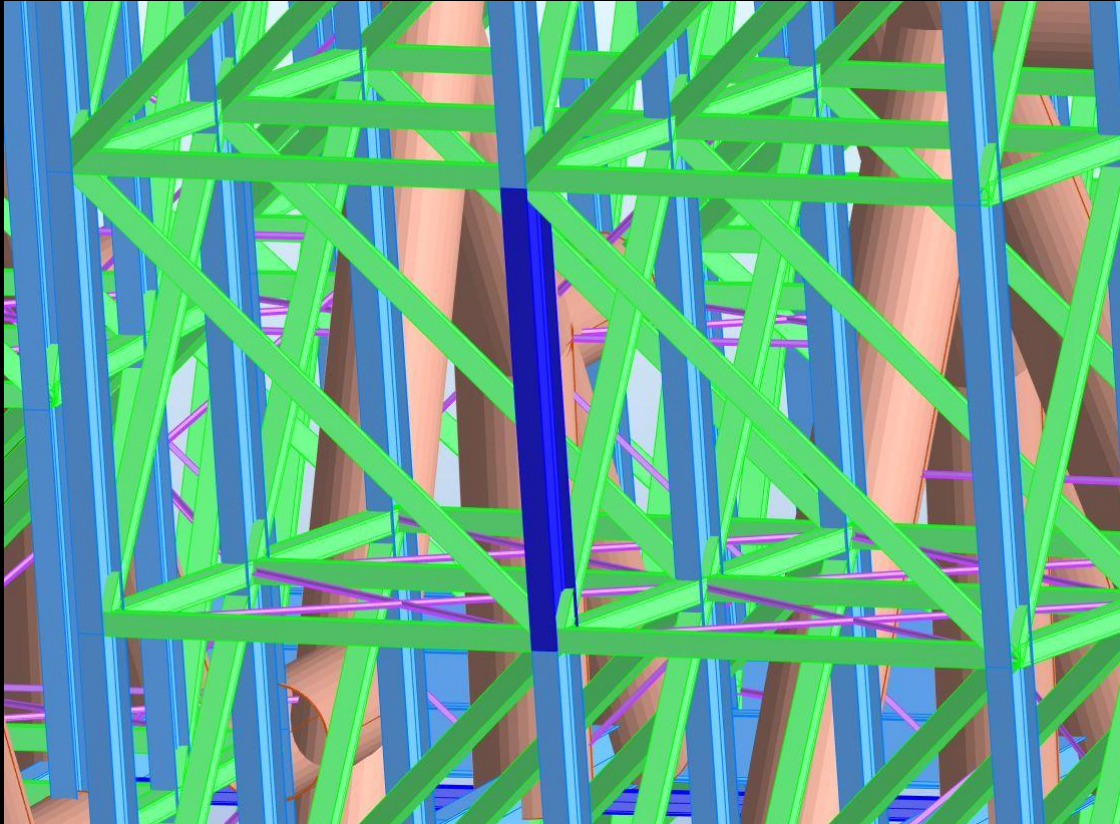


Vue aérienne

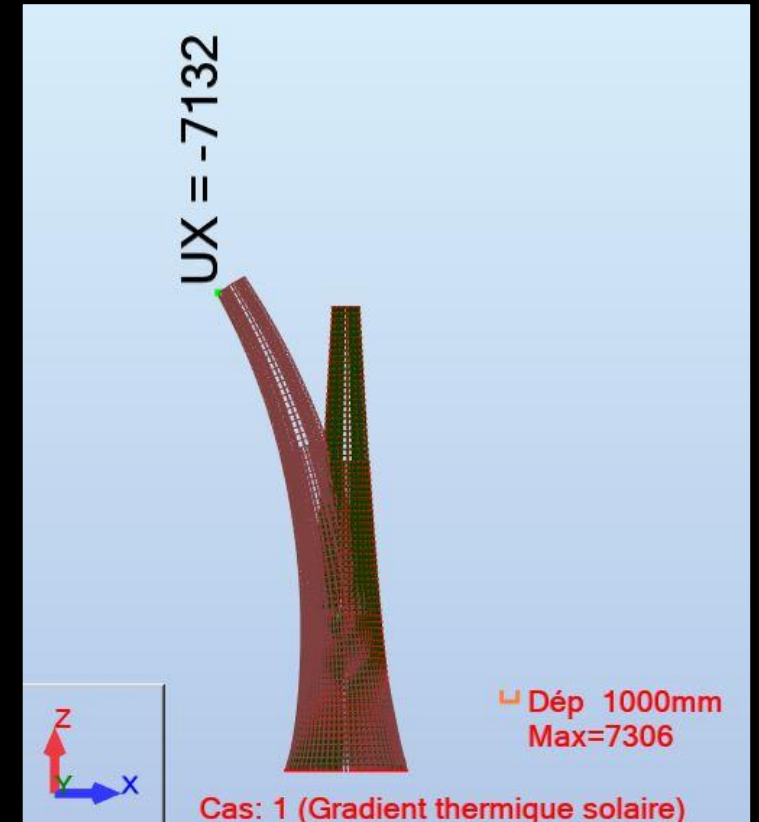


Gradient thermique causé par le soleil, négligeable

- L'ombrage par les poutres limite significativement le gradient thermique causé par le soleil



25°C/60°C gradient thermique
(ne se produit jamais)



Je vous laisserai avec cette question

- Comment cette structure peut-elle être intégrée aux besoins socio-écologiques et à la durabilité du futur ?



Références

1. Baker, W.F., Korista, S., & Novak, L., Structural Design and Construction of the Burj Khalifa. Council on Tall Buildings and Urban Habitat, 2007.
2. Ali, M.M., & Moon, K. S., The Role of Structural Engineering in the Design of Tall Buildings. Architectural Science Review, 2007. 50(3): p. 205-223.
3. Smith, B.S., & Coull, A., Case Study: The Structural Design of the Jin Mao Tower. International Journal of High-Rise Buildings, 1991.
4. Charnish, B., & McNamara, R., Seismic Design of High-Rise Steel Buildings: A Case Study of the Petronas Towers. Structural Design of Tall and Special Buildings, 2002. 11(4): p. 243-260.
5. Slavid, R. Structural Challenges in the Design of the Shard, London. in Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings. 2012.
6. Smith, R.J., & Gill, P., Design and Construction of the Kingdom Tower. Structural Design of Tall and Special Buildings, 2014. 23(12): p. 897-911.
7. Klemencic, R., & Fry, J., Advanced Structural Systems for Tall Buildings: A Case Study of the Willis Tower. Journal of Structural Engineering, 2001. 127(5): p. 573-582.
8. Thornton, C.H., & DeCastro, F., Innovative Design and Construction Techniques for the Shanghai World Financial Center. CTBUH Journal, 2008. 3: p. 34-41.
9. Imai, K., & Yoshimoto, S., Structural Analysis and Design of the Tokyo Skytree. Journal of Structural Engineering, 2011. 137(12): p. 1529-1539.
10. Irwin, P., & Kilpatrick, J., Wind Engineering Challenges in the Design of the Guangzhou International Finance Center. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2010. 98(12): p. 863-876.
11. Salmon, C.G., Johnson, J. E., Steel Structures: Design and Behavior. 1996: Prentice Hall.
12. Chen, W.F., Toma, S., Advanced Analysis and Design of Steel Frames. 1994: CRC Press.
13. McCormac, J.C., Nelson, J. K., Structural Steel Design: A Practice-Oriented Approach. 2006: Prentice Hall.
14. (CEN), C.E.d.N., Eurocode 3: Design of Steel Structures. EN 1993-1-1. 2005.
15. André, J., Simões da Silva, L., Guide des Eurocodes : Introduction aux Eurocodes structurels et utilisation en France. 2010: Eyrolles.
16. Bouchair, A., Godart, B. , Application des Eurocodes aux Structures en Acier. 2012: Presses des Ponts.
17. Martin, L., Leblois, T., Conception et Calcul des Structures Métalliques selon l'Eurocode 3. 2014: Dunod.
18. Zienkiewicz, O.C., Taylor, R. L., Zhu, J. Z., The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals. 2005: Butterworth-Heinemann.
19. Gallagher, R.H., Zienkiewicz, O. C., The Finite Element Method in Engineering Science. 1973: McGraw-Hill.
20. Ghali, A., Neville, A. M., Brown, T. G., Structural Analysis: A Unified Classical and Matrix Approach. 2009: CRC Press.
21. Bathe, K.J., Finite Element Procedures. 1996: Prentice Hall.
22. Chandrupatla, T.R., Belegundu, A. D., Introduction to Finite Elements in Engineering. 2011: Prentice Hall.
23. Cook, R.D., Malkus, D. S., Plesha, M. E., Witt, R. J., Concepts and Applications of Finite Element Analysis. 2002: John Wiley & Sons.
24. Lagaros, N.D., Tsompanakis, Y. Structural Optimization: Proceedings of the International Conference on Engineering Optimization. 2007.
25. Arora, J.S., Introduction to Optimum Design. 2011: Academic Press.
26. Grama, L., & Saka, M. P. , Design Optimization of Steel Structures. 2016: CRC Press.
27. Bendsoe, M.P., Sigmund, O. , Topology Optimization: Theory, Methods, and Applications. 2004: Springer.
28. Timoshenko, S.P., Gere, J. M., Theory of Elastic Stability. 1961: McGraw-Hill.
29. Bazant, Z.P., Cedolin, L., Stability of Structures: Elastic, Inelastic, Fracture, and Damage Theories. 1991: Oxford University Pres.
30. Galambos, T.V., Structural Stability of Steel: Concepts and Applications for Structural Engineers. 1998: John Wiley & Sons.
31. Singer, J., Arbocz, J., Weller, T., Buckling Experiments: Experimental Methods in Buckling of Thin-Walled Structures, Volume 1: Basic Concepts, Columns, Beams, and Plates. 2002: John Wiley & Sons.
32. Besse, S., Note de calculs de la tour de 3000 mètres, CGI, 2024.