



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur
et de la Recherche Scientifique

Université A. MIRA, - Bejaïa –
Faculté de Technologie
Département de Génie Civil

Mémoire

Pour obtenir le diplôme de Master en Génie Civil
Option : Matériaux et Structure

Thème

ETUDE D'UN BATIMENT INDUSTRIEL

Présenté par

MR. CHERDOUH RAFIK

SOUTENU LE 18 – 09 - 2012 DEVANT LE JURY COMPOSE DE :

MR.	BOUZEROURA	MANSOUR	Président
MR.	RAMDANI	LYES	Rapporteur
MME.	CHIKH AMER	HABIBA	Examinatrice

Remerciements

Toute ma gratitude et remerciement vont à dieu le tout puissant qui ma donné la force, la patience, le courage et la volonté durant toutes mes études.

Je tiens spécialement a exprimé ma plus profonde gratitude et mes plus sincères remerciements à ma famille pour tout les sacrifices et toute la patience qu'elle a due fournir pour que je termine mes études.

Aussi avec une grande gratitude, je remercie mon promoteur Mr RAMDANI.L de m'avoir suivi et conseillé durant l'élaboration du ce projet, et les membres du jury qui ont bien voulu m'honorer en acceptant de juger mon travail.

Tous les enseignants qui ont contribués à ma formation durant tout mon cursus sont remerciés avec tout le respect et toute la gratitude que je leur avoue.

Je tiens également à remercier tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin à la réalisation de mon projet.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

Mes très chers parents qui m'ont guidé durant les moments les plus pénibles de ce long chemin, ma mère qui a été à mes côtés et ma soutenu durant toute ma vie, et mon père qui a sacrifié toute sa vie afin de me voir devenir ce que je suis. Un grand merci mes parents.

Mon cher frère, ma sœur, tous mes cousins et toute la famille.

Une spéciale à Ma grande mère, mon grand père, tous mes oncles et toutes mes tantes.

Tous mes très chers amis avec qui je garde de très bons souvenirs, et sans oublier "Echo" bien sur.

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE 1	PRESENTATION DE L'OUVRAGE.... 4
1.1 INTRODUCTION.....	4
1.2 DIMENSIONS DE L'OUVRAGE.....	4
1.3 REGLEMENT UTILISES	5
1.4 STABILITE DE LA STRUCTURE.....	5
1.5 MATERIAUX UTILISES.....	5
1.5.1 Acier de construction	5
1.5.2 Béton	6
1.5.3 Acier de ferrailage :.....	6
CHAPITRE 2	ACTIONS ET COMBINAISONS
D'ACTIONS.....	7
2.1 ACTIONS.....	7
2.2 COMBINAISONS D'ACTION SELON L'EUROCODE 3	8
2.2.1 Combinaisons aux ELU.....	8
2.2.2 Combinaisons aux ELS.....	9
2.3 COEFFICIENTS PARTIELS DE SECURITE γ	9
2.4 COEFFICIENTS DE COMBINAISON Ψ	9
2.5 VERIFICATIONS A EFFECTUER.....	10
2.6 VALEURS LIMITES DES DEFORMATIONS	10
2.6.1 Verticalement.....	11
2.6.2 Horizontalement	11
2.7 FACTEURS PARTIELS DE SECURITE.....	12
2.7.1 Acier de construction	12
2.7.2 Acier de ferrailage	13
2.7.3 Béton	13
CHAPITRE 3	ETUDE CLIMATIQUE14
3.1 CALCUL AU VENT	14
3.1.1 Introduction.....	14
3.1.2 Coefficient dynamique C_d	15
3.1.3 Coefficient de calcul	15
3.1.4 Vérification à la stabilité d'ensemble	18
3.2 CALCUL A LA NEIGE.....	30
3.2.1 Introduction.....	30
3.2.2 La charge de neige sur le sol.....	30
3.2.3 Coefficient de forme de la toiture.....	31
3.2.4 Calcul des charges de neige sur la toiture.....	31

3.3	CALCUL DE LA VARIATION DE TEMPERATURE.....	32
CHAPITRE 4		PRE DIMENSIONNEMENT ET
CALCUL DES ELEMENTS SECONDAIRES		33
4.1	CALCUL DES PANNES.....	33
4.1.1	Introduction.....	33
4.1.2	Détermination des sollicitations.....	34
4.1.3	Pré dimensionnement des pannes	38
4.1.4	Dimensionnement des pannes	39
4.1.5	Conclusion	45
4.2	CALCUL DES LIERNES.....	45
4.2.1	Introduction.....	45
4.2.2	Calcul de l'effort maximal revenant aux liernes.....	46
4.2.3	Dimensionnement des liernes	47
4.3	CALCUL DE L'ECHANTIGNOLLE	48
4.3.1	Introduction.....	48
4.3.2	Détermination des sollicitations.....	49
4.3.3	Dimensionnement de l'échantignolle.....	49
4.4	CALCUL DES LISSES DE BARDAGES.....	50
4.4.1	Introduction.....	50
4.4.2	Détermination des sollicitations.....	51
4.4.3	Pré dimensionnement des lisses de bardages	52
4.4.4	Dimensionnement des lisses de bardages	52
4.4.5	Conclusion	58
4.5	CALCUL DES POTELETS.....	58
4.5.1	Introduction.....	58
4.5.2	Déterminations des sollicitations	59
4.5.3	Pré dimensionnement des potelets.....	60
4.5.4	Dimensionnement des potelets.....	61
4.5.5	Conclusion	64
CHAPITRE 5		MODELISATION ET ANALYSE DE LA
STRUCTURE PAR LE LOGICIEL ROBOT		65
5.1	INTRODUCTION.....	65
5.2	MODELISATION DE LA STRUCTURE	66
5.3	ANALYSE DE LA STRUCTURE.....	66
5.3.1	Type d'Analyse	66
CHAPITRE 6		VERIFICATION DES ELEMENTS DE
LA STRUCTURE AVEC LE LOGICIEL ROBOT		76
6.1	INTRODUCTION.....	76
6.2	VERIFICATION DES ELEMENTS DE LA STRUCTURE.....	76
6.2.1	Vérification des traverses	76
6.2.2	Vérification des poteaux.....	79
6.2.3	Vérification des éléments de contreventement	82
6.2.4	Vérification des pannes.....	84
6.2.5	Vérification des lisses de bardage.....	87
6.3	VERIFICATION DES DEPLACEMENTS	89

CHAPITRE 7	VERIFICATION DES ASSEMBLAGES
AVEC LE LOGICIEL ROBOT SELON L'EC 3.....	91
7.1 INTRODUCTION.....	91
7.2 VERIFICATION DES ASSEMBLAGES.....	91
7.2.1 Assemblage Traverse - Traverse.....	91
7.2.2 Assemblage Traverse - Poteau.....	104
7.2.3 Assemblage Gousset – Contreventement.....	121
7.2.4 Assemblage Gousset - Membrane de treillis.....	134
7.2.5 Pied de poteau articulé.....	144
CHAPITRE 8	ETUDE DE L'INFRASTRUCTURE
AVEC LE LOGICIEL ROBOT.....	153
8.1 LES FONDATIONS.....	153
8.1.1 Données de base.....	153
8.1.2 Dimensionnement géotechnique.....	160
8.1.3 Dimensionnement Béton Armé.....	163
8.1.4 Quantitatif.....	165
8.2 LES LONGRINES.....	167
8.2.1 Pré-dimensionnement : (RPA § 10.1.1).....	167
8.2.2 Ferrailage.....	167
8.2.3 Armatures transversales.....	168
CONCLUSION GENERALE.....	169
BIBLIOGRAPHIE.....	171
ANNEXE A.....	172
ANNEXE B.....	175

TABLE DES FIGURES

Figure 1. Les différentes flèches existantes.....	11
Figure 2. Vue 3D de la structure.....	15
Figure 3. Les zones de pression et les valeurs correspondant à ces zones.	19
Figure 4. Les zones de pression et les valeurs correspondant à ces zones.	20
Figure 5. Les zones de pression et les valeurs correspondant à ces zones.	25
Figure 6. Les zones de pression et les valeurs correspondant à ces zones.	26
Figure 7. Représentation des charges statique de neige sur la toiture et sur le sol.	30
Figure 8. Distribution de la charge de neige par projection horizontale, et suivant rampant.....	32
Figure 9. Schéma statique des pannes.....	34
Figure 10. Schéma statique des pannes suivant les axes Y et Z.	34
Figure 11. Schéma statique des charges permanentes G sur les pannes.....	35
Figure 12. Schéma statique des surcharges d'entretien P sur les pannes.	35
Figure 13. Schéma statique des surcharges climatique du vent V sur les pannes...	36
Figure 14. Schéma statique des surcharges climatique de la neige sur les pannes.	36
Figure 15. Schéma statique de la lierne et des efforts lui revenant.	46
Figure 16. Schéma statique représentant la réaction R.	46
Figure 17. Schéma statique de l'échantignole tenant la panne sur la toiture.	48
Figure 18. Schéma statique des lisses de bardage.....	51
Figure 19. Représentation du potelet de pignon le plus haut et le plus chargé, et les charges qui lui reviennent.....	59
Figure 20. Représentation des charges et surcharges sur le potelet.....	60
Figure 21. Vue 3D de la structure a modélisée avec ROBOT	66
Figure 22. Schéma du spectre de réponse suivant X.	69
Figure 23. Schéma du spectre de réponse suivant Y.	70
Figure 24. La déformée du mode 1.	73
Figure 25. La déformée du mode 2.	74
Figure 26. La déformée du mode 3.	74
Figure 27. La déformée du mode 71.	75
Figure 28. La déformée du mode 178.....	75
Figure 29. illustration de la traverse la plus sollicitée.	77

Figure 30. Illustration de la mise en place et de la potion des entretoises sur la traverse	78
Figure 31. Illustration du poteau le plus sollicité.	80
Figure 32. Illustration de la barre élément de contreventement la plus sollicitée..	83
Figure 33. Illustration de la panne la plus sollicitée.	85
Figure 34. Illustration de la lisse de bardage la plus sollicitée.....	87
Figure 35. Schéma de l'assemblage Traverse - Traverse	91
Figure 36. Vue de l'assemblage Traverse – Traverse.....	103
Figure 37. Schéma de l'assemblage Traverse - Poteau.....	104
Figure 38. Vue de l'assemblage Traverse - Poteau.....	121
Figure 39. Schéma de l'assemblage Gousset – Contreventement	121
Figure 40. Vue de l'assemblage Gousset – Contreventement.....	133
Figure 41. Schéma de l'assemblage Gousset – Membrure de treillis.....	134
Figure 42. Vue de l'assemblage Gousset – Membrure de treillis.....	143
Figure 43. Schéma du Pied de poteau articulé	144
Figure 44. Vue du Pied de poteau articulé.....	152
Figure 45. Schéma de la géométrie de la fondation.	154
Figure 46. Vue 3D de la fondation avec le fut de réservation	166
Figure 47. Schémas de ferrailage des longrines.....	168

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1. Les valeurs des coefficients partiels de sécurité γ	9
Tableau 2. Les valeurs des coefficients de combinaison Ψ	10
Tableau 3. Les valeurs des C_{pe} pour les différentes zones de pression.	19
Tableau 4. Les valeurs des C_{pe} pour les différentes zones de pression.	20
Tableau 5. Les valeurs de pressions due au vent q_j , exercée sur chaque élément de surface j.	21
Tableau 6. Les valeurs de pressions due au vent q_j , exercée sur chaque élément de surface j.	21
Tableau 7. Les valeurs de pressions due au vent q_j , exercée sur chaque élément de surface j.	21
Tableau 8. Les valeurs des forces de frottement F_{fr}	22
Tableau 9. Les valeurs des forces de frottement F_{fr}	22
Tableau 10. Les valeurs des $q_j * S_j$	23
Tableau 11. Les valeurs des $q_j * S_j$	23
Tableau 12. Les valeurs des $q_j * S_j$	23
Tableau 13. Les valeurs des composantes de la force résultante R.	24
Tableau 14. Les valeurs des C_{pe} pour les différentes zones de pression.	25
Tableau 15. Les valeurs des C_{pe} pour les différentes zones de pression.	26
Tableau 16. Les valeurs de pressions due au vent q_j , exercée sur chaque élément de surface j.....	27
Tableau 17. Les valeurs de pressions due au vent q_j , exercée sur chaque élément de surface j.....	27
Tableau 18. Les valeurs de pressions due au vent q_j , exercée sur chaque élément de surface j.....	27
Tableau 19. Les valeurs des forces de frottement F_{fr}	28
Tableau 20. Les valeurs des forces de frottement F_{fr}	29
Tableau 21. Les valeurs des $q_j * S_j$	29
Tableau 22. Les valeurs des $q_j * S_j$	29
Tableau 23. Les valeurs des $q_j * S_j$	29
Tableau 24. Les valeurs des composantes de la force résultante R.	29

Tableau 25. Pourcentage de participation de masse.....	73
Tableau 26. Longueurs efficaces et paramètres - platine d'about	95
Tableau 27. Tableau récapitulatif des efforts :	100
Tableau 28. Rigidités des rangées de boulons.....	102
Tableau 29. Longueurs efficaces et paramètres – semelle du poteau.....	111
Tableau 30. Longueurs efficaces et paramètres – platine d'about	111
Tableau 31. Tableau récapitulatif des efforts	118
Tableau 32. Rigidités des rangées de boulons.....	120

NOTATIONS

A	Section brute d'une pièce
A_{net}	Section nette d'une pièce
A_{eff}	Section efficace d'une pièce
A_v	Aire de cisaillement
A_w	Section de l'âme d'une pièce
H	Hauteur de la section transversale
b	Largeur des semelles
r	Rayon du congé de raccordement
t_f	Épaisseur des semelles
t_w	Épaisseur de l'âme
$I_{y,z}$	Moment d'inertie
$i_{y,z}$	Rayon de giration d'une section
I_w	Facteur de gauchissement d'une section
I_t	Moment d'inertie de torsion
$W_{ply,z}$	Module de résistance plastique
$W_{ely,z}$	Module de résistance élastique
W_{eff}	Module élastique efficace de la section
N_{pl}	Effort normal de plastification
N_u	Effort normal ultime
N_{net}	Effort normal résistant
$M_{ply,z}$	Moment résistant plastique
$M_{ely,z}$	Moment résistant élastique
$M_{eff,z}$	Moment résistant de la section efficace
M_{cr}	Moment critique de déversement
$\lambda_{y,z}$	Élancement géométrique pour le module de flambement
$\lambda_{y,z}$	Élancement réduit pour le module de flambement
λ_{cr}	Élancement critique d'Euler
$X_{y,z}$	Coefficient de réduction de flambement
Ψ	Coefficient de scellement relatif a une armature
τ	Contrainte tangente
τ_μ	Contrainte tangente conventionnelle
τ_s	Contrainte tangentielle ou de cisaillement
\emptyset	Diamètre d'une armature transversale
N	Coefficient de poissant
μ_{ser}	Moment ultime à l'ELS
μ_{bu}	Moment réduit à l'ELU
α	Facteur d'imperfection pour le flambement

λ_{LT}	Élancement réduit de déversement
X_{LT}	Coefficient de réduction de déversement
α_{LT}	Facteur d'imperfection pour le déversement
$\beta_{M_{y,z}}$	Facteur de moment uniforme équivalent (flambement)
$\beta_{M_{LT}}$	Facteur de moment uniforme équivalent (déversement)
f_y	Resistance limite d'élasticité
f_u	Resistance limite de rupture
V_u	Effort tranchant de calcul
a et b	Largeur des poteaux
A et B	Largeur des semelles
G	Action permanente
Q	Action d'exploitation
e	L'excentricité de l'effort normal
h	Hauteur de la poutre et la semelle
S_t	Espacement des armatures transversales
L_f	Longueur de flambement

INTRODUCTION GENERALE

Les progrès techniques réalisés dans le domaine de la production métallique contribuèrent à l'apparition d'un nouveau matériau, appelé acier. Ce dernier, dérivant directement du fer, apparut à la fin du XIXe siècle, modifiant une fois encore l'environnement de la construction.

Les performances de ce nouveau matériau entraînèrent la modification des procédés d'assemblage, des techniques de laminage et des modèles de calcul. En effet, avec la soudure, on passe d'un assemblage riveté ponctuel à une liaison linéaire. C'est également avec l'apparition de l'acier que les dimensions des produits fabriqués en usine deviennent importantes. Il est alors possible d'obtenir des profilés d'une longueur supérieure à 6m.

L'utilisation de l'acier est de plus en plus massive en cette fin de XIXe siècle atteignant un taux de croissance très important.

De nos jours, la construction métallique est très utilisée dans les bâtiments et ouvrage les plus divers. La forme constructive d'un ouvrage est déterminée par l'ensemble de ses principaux éléments : poutres, fermes, poteaux, coques.

Les moyens d'assemblage tels que les soudures ou les boulons permettent de relier entre elles les pièces élémentaires, de formes diverses, constituant une charpente métallique. Les assemblages soudés et boulonnés représentent ainsi une composante essentielle de toute structure et méritent de ce fait une attention particulière.

De ce fait, mon projet de fin d'étude de Master s'est porté sur l'étude d'un ouvrage métallique. L'ouvrage en question est un hangar industriel dont l'implantation est prévue à Taharacht, Akbou, (w) Bejaia.

L'étude de la structure est menée essentiellement en utilisant le logiciel d'éléments finis Robot qui permet à la fois de modéliser, analyser et de dimensionner différents types de structure, ainsi après un pré dimensionnement des différents éléments de la structure, un modèle 3D de celle-ci est implanté dans le logiciel.

Ce travail est composé d'une introduction, d'une conclusion et de huit autres chapitres qui sont comme suit :

- Chapitre 1 : Présentation de l'ouvrage

Avant tout on commence par la présentation de l'ouvrage à étudié, les matériaux à utilisés, ainsi que les différentes réglementations à respecter.

- Chapitre 2 : Actions et combinaisons d'actions

Dans lequel sont énumérées toutes les différentes charges et surcharges qui sollicite la structure, toutes les différentes combinaisons de charges, et toutes les vérifications à faire.

- Chapitre 3 : Etude climatique

C'est la que sont estimé l'action du vent et celle de la neige qui seront éventuellement appliquées à notre ouvrage afin de les prendre on compte dans les calculs.

- Chapitre 4 : Pré dimensionnement et calcul des éléments secondaires

Dans lequel sont pré dimensionnes les éléments de l'ossature sous le chargement statique, et avec lesquels est réalisé ultérieurement un modèle 3D sous Robot.

- Chapitre 5 : Modélisation et analyse de la structure par le logiciel ROBOT

Où la structure est modélisée puis analysée avec le logiciel ROBOT et cela en essayons de rapprocher le plus possible notre modèle à la réalité.

- Chapitre 6 : Vérification des éléments de la structure avec le logiciel ROBOT

La vérification est effectuée sur l'élément de l'ossature au moyen des sollicitations obtenues du modèle 3D sous Robot.

- Chapitre 7 : Vérification des assemblages avec le logiciel ROBOT selon l'EC 3

Toutes les liaisons entre les différents éléments ont été réalisées au moyen d'assemblages calculés et dimensionnés selon les règles de l'art et la réglementation en vigueur.

- Chapitre 8 : Etude de l'infrastructure avec le logiciel ROBOT

Dans lequel sont calculées les fondations portant les poteaux de la structure, et les longrines reliant.

CHAPITRE 1

PRESENTATION DE L'OUVRAGE

1.1 Introduction

La présente étude consiste à dimensionner par calcul et vérification, la stabilité d'un hangar industriel de construction métallique de grande portée, dont l'ossature est formée par un système de barres constitué essentiellement de poutres, poteaux et traverses. (Voir les plans dans l'annexe B)

L'ouvrage sera implanté dans la région d'Akbou, (W. Bejaïa) qui est classée selon le règlement parasismique algérien 1999 version 2003 comme zone de moyenne sismicité, zone IIa.

1.2 Dimensions de l'ouvrage

Comme il sera illustré dans les plans joints dans l'annexe B :

- Le long-pan est constitué de 12 travées de 5 m chacune, avec une longueur totale de 60 m.
- Le pignon est constitué d'un portique de 45 m de portée.
- La hauteur du hangar est de 15 m.
- La hauteur des poteaux est de 12 m.
- La pente des versants est de 7.6°.

1.3 Règlement utilisés

Les règlements utilisés pour la réalisation de cette étude sont :

- Calcul des éléments selon l'Eurocode 3.
- Règles de conception et de calcul des structures en acier (CCM97), document technique réglementaire D.T.R-BC-2.44.
- Règles parasismiques algériennes (RPA 99) D.T.R-B.C-2.48.
- Charges permanentes et surcharges d'exploitation D.T.R-B.C-22.
- Règlement neige et vent (RNVA 99) D.T.R-C-2.47.
- Règles de calcul des fondations superficielles D.T.R-BC-2.33.

1.4 Stabilité de la structure

La stabilité de la structure dans le sens transversal est assurée par une succession de portiques transversaux en poteaux et traverses, renforcée par des poutres au vent de long-pan ;

Alors que la stabilité longitudinale est réalisée par des contreventements verticaux de long-pan et des poutres au vent de pignon.

1.5 Matériaux utilisés

1.5.1 Acier de construction

Le règlement CCM 97 est applicable aux structures en acier soudable dont les propriétés, les dimensions, la masse et les tolérances dimensionnelles et massiques sont conformes aux normes en vigueur.

❖ Les propriétés :

1.5.1.1 Résistance

Les nuances d'acier courantes et leurs résistances limites sont données par le tableau 3.1 du CCM 97.

La nuance choisie pour la réalisation de cet ouvrage est l'acier F_e E360.

1.5.1.2 Ductilité

L'acier de construction doit satisfaire les conditions suivantes :

- Le rapport : $f_u/f_y > 1.2$.
- La déformation ultime $\varepsilon_u \geq 20$ fois la déformation élastique.
- A la rupture, l'allongement sur une longueur de $5.65 * \sqrt{A_0}$, soit supérieur a 15%, avec A_0 section transversale initiale.

1.5.1.3 Coefficients de calcul de l'acier

- Module d'élasticité longitudinale : $E = 210000 \text{ MPA}$
- Module d'élasticité transversale : $G = E/2(1 + \mu) = 0.4.E$
- Coefficient de poisson : $\mu = 0.3$
- Coefficient de dilatation thermique : $\alpha = 12 * 10^6 \text{ par } c^\circ$
- Masse volumique : $\rho = 7850 \text{ Kg/m}^3$
- Limite élastique : $f_y = 355 \text{ MPa}$

1.5.2 Béton

Le béton utilisé pour les fondations est dosé à 350 Kg/m^3 de ciment ordinaire CPA 325 dont les caractéristiques sont :

- La résistance à la compression à 28 jours : $F_{c28} = 25 \text{ MPa}$.
- La résistance à la traction à 28 jours : $F_{t28} = 2.1 \text{ MPa}$.

1.5.3 Acier de ferrailage :

Les aciers utilisés pour constituer les pièces de béton armé sont :

- Barres à haute adhérence obtenue par laminage à chaud d'un acier naturellement dur.
- Fils à haute adhérence obtenue par laminage à chaud suivi d'un écrouissage par tréfilage.
- Treillis soudés formés par assemblages de barres ou de file lisse ou à haute adhérence.
- La caractéristique la plus importante des aciers est la limite élastique « Fe », cette valeur est donnée selon le type d'acier. (Les aciers utilisés dans notre cas sont des Fe 500)

CHAPITRE 2

ACTIONS ET COMBINAISONS D'ACTIONS

2.1 Actions

Les actions susceptibles de solliciter les constructions en générale sont :

- ❖ Les actions permanentes qui comprennent :
 - Le poids propre de la construction ; (pris en charge automatiquement par le logiciel utilisé).
 - Le poids propre des équipements.
 - Poids, poussées et pressions des terres.
- ❖ Les actions variables qui comprennent :
 - Les charges d'exploitation.
 - Les charges appliquées en cours d'exécution.
- ❖ Les actions climatiques :
 - Le vent.
 - La neige.
 - La variation de température.
- ❖ Les actions accidentelles :
 - Le séisme.
 - Les explosions.
 - Les chocs.

Notation :

- Action permanente 'G'.
- Surcharge d'exploitation 'Q'.
- Action du vent 'V'.
- Action de la neige 'N'.
- Gradient de température 'T'.
- Action du séisme 'E'.

La vérification de la structure se fait sous les combinaisons les plus défavorables des actions citées précédemment multipliées par des coefficients de pondération fixés par les règlements : (EC 3, CCM 97, RPA 99 et RNVA 99).

2.2 Combinaisons d'action selon l'Eurocode 3

Les actions sont combinées entre elles et leurs valeurs sont affectées de divers coefficients, qui sont :

- Les coefficients partiels de sécurité γ , attachés aux actions tant permanentes que variables (voir plus loin § 4) ;
- Les coefficients de combinaison Ψ , attachés aux seules actions variables, qui ne sont pas des coefficients de sécurité, mais uniquement des facteurs liés à la probabilité d'occurrence de la combinaison de plusieurs actions variables, dont les variables ne peuvent être maximales simultanément (voir plus loin § 5).

2.2.1 Combinaisons aux ELU

2.2.1.1 Combinaison fondamentale

Elle comprend les actions permanentes G, une action variable 'de base' Q_1 avec sa valeur nominale et éventuellement d'autres actions variables d'accompagnement' Q avec valeurs de combinaison $\Psi_0 * Q$.

$$\sum \gamma_G * G + \gamma_{Q_1} * Q_1 + \sum \gamma_Q * \Psi_0 * Q$$

2.2.1.2 Combinaison simplifiée

$$\sum \gamma_G * G + \gamma_Q * Q \quad \text{ou :} \quad \sum \gamma_G * G + 0.9 * \sum \gamma_Q * Q$$

2.2.2 Combinaisons aux ELS

2.2.2.1 Combinaisons rares

$$\sum G + Q_1 + \sum \Psi_0 * Q$$

2.2.2.2 Combinaisons fréquentes

$$\sum G + \Psi_1 * Q_1 + \sum \Psi_2 * Q$$

2.2.2.3 Combinaisons quasi-permanentes

$$\sum G + \sum \Psi_2 * Q$$

2.3 Coefficients partiels de sécurité γ

Tableau 1. Les valeurs des coefficients partiels de sécurité γ

	Actions permanentes	Actions variables
Effet défavorable	$\gamma_G = 1.35$	$\gamma_Q = 1.5$
Effet favorable	$\gamma_G = 1.00$	$\gamma_Q = 0$

2.4 Coefficients de combinaison Ψ

Une action variable possède plusieurs valeurs 'représentatives', qui dépendent de sa durée d'application et de sa fréquence. Ce sont :

- Valeur nominale : Q .
- Valeur de combinaison : $\Psi_0 * Q$.
- Valeur fréquente : $\Psi_1 * Q$.
- Valeur quasi-permanente : $\Psi_2 * Q$.

Les valeurs des coefficients Ψ figurent dans le tableau suivant :

Tableau 2. Les valeurs des coefficients de combinaison Ψ .

Charge d'exploitation Q	Bâtiments non industriels			
	Nature du local	Ψ_0	Ψ_1	Ψ_2
	Locaux à places assises ou couchées-réunion-classes-dortoirs-restaurants	0.67	0.65	0.40
	Locaux de transit-halles diverses-expositions			
	Locaux à places debout et utilisation périodique-réunion-culte-sport-danse		0.75	0.25
	Autres	0.78		
	Parcs de stationnement		0.90	0.80
	Archives			
	Bâtiments industriels			
	Nature des charges	Ψ_0	Ψ_1	Ψ_2
Poids des installations, unités de productions (y compris coefficient dynamique)	0.87	1	1	
Effet des matériels roulants lourds	0.87	1	0	
Charge uniforme équivalente (personnel, approvisionnements, déchets, matériels roulants légers)	0.67	0.77	0.65	
Neige S	altitude < 500 m	0.67	0.15	0
	altitude > 500 m	0.67	0.30	0.10
Vent W		0.67	0.20	0
Température T		0.53	0.50	0

2.5 Vérifications à effectuer

Les vérifications à faire sous les combinaisons précédentes sont :

❖ A l'ELU :

- Vérification à la résistance des sections transversales.
- Vérification à la résistance des éléments (aux instabilités)
- Vérification à la résistance des assemblages.
- Vérification à la stabilité globale de l'ossature.

❖ A l'ELS :

- Vérification des flèches et des déplacements.

2.6 Valeurs limites des déformations

Les valeurs limites des déformations des structures métalliques ne sont pas imposées réglementairement et brutalement, car elles dépendent de divers critères, propres à chaque construction : l'installation de ponts roulants,

d'ascenseurs, de façades vitrées, etc., ou l'existence de cloisons, de carrelages, etc., ne toléreront que des déformations très limitées. En revanche, un simple entrepôt n'exigera pas une grande rigidité des structures.

Si ces choix n'ont pas été exprimés au niveau des cahiers des charges, l'Eurocode 3 recommande des limites, qui sont les suivantes, et qui restent approximatives :

2.6.1 Verticalement

- Toitures en général : $f < l/200$, avec: $\delta_2 < l/250$,
- Planchers en général : $f < l/250$, avec: $\delta_2 < l/300$,
- Planchers supportant des poteaux : $f < l/400$, avec: $\delta_2 < l/500$.

2.6.2 Horizontalement

- Poteaux de portiques en général : $\Delta < l/300$,
- Poteaux de portiques avec pont roulant : $\Delta < l/500$.

Sachant que : $f = \delta_1 + \delta_2 - \delta_0$.

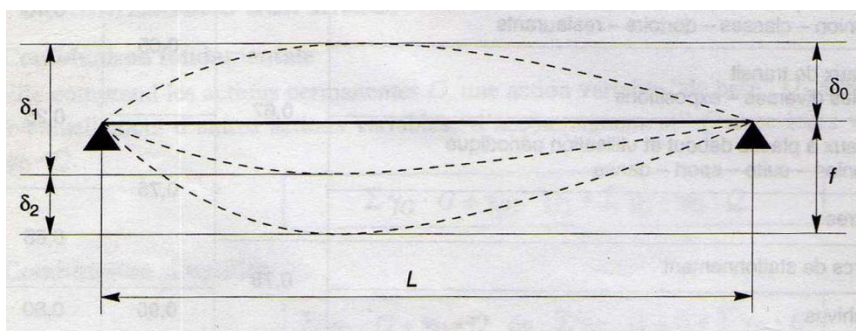


Figure 1. Les différentes flèches existantes.

Avec :

f : Flèche dans l'état final, par rapport à la droite reliant les appuis,

δ_0 : Pré-cintrage (contre-flèche) de la poutre non chargée,

δ_1 : Variation de la flèche de la poutre due aux charges permanentes immédiatement après la mise en charge,

δ_2 : Variation de la flèche de la poutre due aux charges variables augmentée de toute déformation dans le temps due aux charges permanentes.

2.7 Facteurs partiels de sécurité

2.7.1 Acier de construction

La résistance de calcul est obtenue en appliquant un facteur partiel de sécurité γ_M à la résistance réelle, dont les valeurs sont les suivantes :

2.7.1.1 Résistance des sections transversales

- Section de classe 1,2 ou 3 : $\gamma_{M0} = 1.1$.
- Section de classe 4 : $\gamma_{M1} = 1.1$.
- Section nette au droit des trous de fixation : $\gamma_{M2} = 1.25$.

2.7.1.2 Résistance des éléments

- Dans le calcul aux instabilités : $\gamma_{M1} = 1.1$.

2.7.1.3 Les assemblages

❖ Boulons ordinaires :

- Cas de cisaillement : $\gamma_{MB} = 1.25$.
- Cas de traction : $\gamma_{MB} = 1.5$.

❖ Boulons précontraints :

ELU :

- Trous nominaux : $\gamma_{MB} = 1.25$.
- Trous oblongs : $\gamma_{MB} = 1.40$.

ELS :

- Trous nominaux : $\gamma_{MB} = 1.1$.
- Trous oblongs : Pas de vérification à l'ELS.

❖ Assemblage par soudure :

- Acier FeE 360 : $\gamma_{MB} = 1.25$.
- Acier FeE 430 : $\gamma_{MB} = 1.30$.
- Acier FeE 510 : $\gamma_{MB} = 1.35$.

2.7.2 Acier de ferrailage

- Situation durable : $\gamma_s = 1.15$.
- Situation accidentelle : $\gamma_s = 1$.

2.7.3 Béton

- Situation durable : $\gamma_b = 1.5$.
- Situation accidentelle : $\gamma_b = 1.15$.

CHAPITRE 3

ETUDE CLIMATIQUE

3.1 Calcul au vent

3.1.1 Introduction

L'étude au vent nous permet de déterminer les efforts de pression dus au vent agissant sur l'ensemble d'une construction, ce qui revient donc à déterminer les efforts dus au vent à chaque niveau, pour cela il existe un règlement (RNVA 99) qui nous donne les différentes méthodes de calcul de ces efforts.

D'après le RNVA 99 (§3.1, Chapitre 1), les actions du vent sont classées comme des actions libres variable. Et on admet qu'il peut souffler dans toutes les directions horizontales sous un angle vertical pouvant varier de $\pm 10^\circ$ par rapport au plan horizontal.

Les valeurs des pressions des vents dépendent d'un certain nombre de facteurs :

- La région ;
- Le site d'implantation ;
- catégorie de la construction et des ses proportions d'ensembles.

Le calcul doit être effectué séparément pour les deux directions du vent, qui sont perpendiculaires aux parois verticales de la construction, à savoir :

- Vent perpendiculaire à la façade principale (Sens V1)
- Vent parallèle à la façade principale (Sens V2)

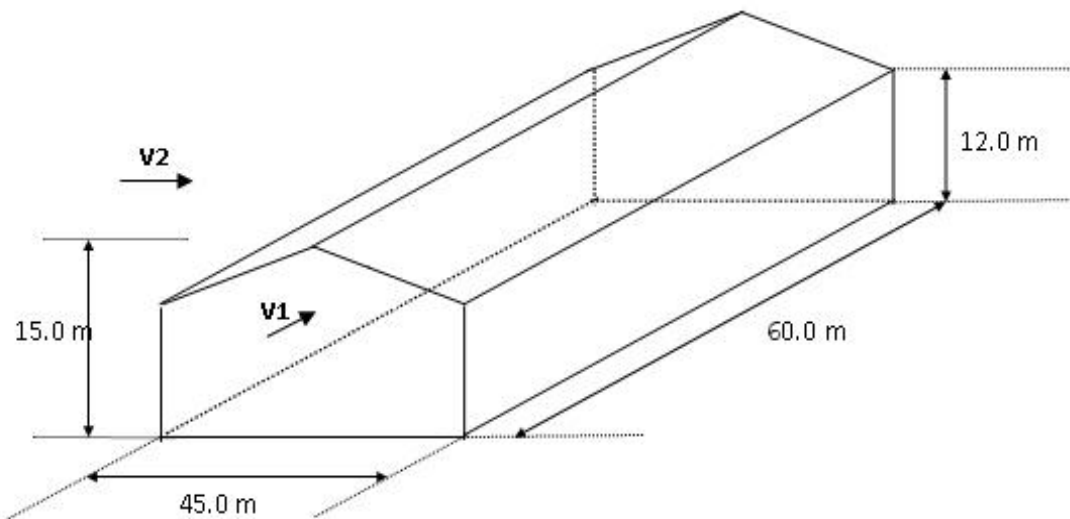


Figure 2. Vue 3D de la structure.

3.1.2 Coefficient dynamique C_d

Notre structure est de type bâtiment métallique de moins de 200 m de hauteur (15 m) ; donc nous pouvons utiliser l'abaque de la figure 3.2, (Chapitre 3, RNVA 99).

Ce qui nous donne :

- Vent perpendiculaire à la façade principale : Sens V1 :

$$\text{On a : } \begin{cases} b = 45 \text{ m} \\ h = 15 \text{ m} \end{cases} \rightarrow C_d \approx 0.904.$$

- Vent parallèle à la façade principale : Sens V2 :

$$\text{On a : } \begin{cases} b = 60 \text{ m} \\ h = 15 \text{ m} \end{cases} \rightarrow C_d \approx 0.895.$$

D'où la structure est considérée de nature d'une construction peu sensible aux excitations dynamique, et cela dans les deux directions du vent ($C_d < 1.2$), (Chapitre 1, RNVA 99).

3.1.3 Coefficient de calcul

3.1.3.1 Facteur de site

- ❖ Catégorie de terrain :

La construction est située dans une région lisse et sans obstacle (un terrain de catégorie I), donc on aura les paramètres suivant :

→ $\{K_t = 0.17 ; z_0 = 0.01 \text{ m} ; z_{min} = 2 \text{ m} ; \varepsilon = 0.11,$ (Tableau 2.4, Chapitre 2, RNVA 99).

Avec : K_t : Facteur de terrain ;

z_0 : Paramètre de rugosité ;

z_{min} : Hauteur minimale ;

ε : Coefficient utilisé pour le calcul du coefficient C_d .

❖ Coefficient de rugosité $C_r(z)$:

Il est donné par les formules suivantes, (Formule 2.15, Chapitre 2, RNVA 99) :

$$\text{si } z_{min} \leq z \leq 200 \text{ m} \rightarrow C_r(z) = K_t * \ln\left(\frac{z}{z_0}\right).$$

$$\text{si } z < z_{min} \rightarrow C_r(z) = K_t * \ln\left(\frac{z_{min}}{z_0}\right).$$

Avec : z : Hauteur considérée.

D'où on aura :

- Niveau 1 ($0 < z < 6 \text{ m}$) → $z = 3 \text{ m}$ → $C_r(z) = 0.17 * \ln(3/0.01)$
= 0.97
- Niveau 2 ($6 < z < 12 \text{ m}$) → $z = 9 \text{ m}$ → $C_r(z) = 0.17 * \ln(6/0.01)$
= 1.09
- Niveau 3 ($12 < z < 15 \text{ m}$) → $z = 15 \text{ m}$ → $C_r(z) = 0.17 * \ln(15/0.01)$
= 1.24

❖ Coefficient de topographie $C_t(z)$:

La construction est sur un site aux alentours des vallées et oueds sans effet d'entonnoir ; donc : $C_t(z) = 1$, (Tableau 2.5, Chapitre 2, RNVA 99).

3.1.3.2 Coefficient d'exposition $C_e(z)$

La structure est considérée comme étant peu sensible aux excitations dynamiques dans les deux directions ($C_d < 1.2$), donc :

$$C_e(z) = C_t(z)^2 * C_r(z)^2 * \left(1 + \frac{7 * K_t}{C_t(z) * C_r(z)}\right),$$

(Formule 2.13, Chapitre 2, RNVA 99) :

D'où on aura :

- Niveau 1 → $C_e(z) = 2.095$
- Niveau 2 → $C_e(z) = 2.485$
- Niveau 3 → $C_e(z) = 3.013$

3.1.3.3 La pression dynamique de référence q_{ref}

Le projet est implanté à Akbou (Bejaia), qui correspond à la zone I, d'où on a : $q_{ref} = 375 \text{ N/m}^2$, (Tableau 2.3, Chapitre 2, RNVA 99).

3.1.3.4 Calcul de la pression dynamique $q_{dyn}(z_j)$

La structure est sans plancher intermédiaire, et est de plus de 10 m, donc on la considère comme étant constituée de n élément de surface, de hauteur égale à h_i ;

n et h_i sont donnés par les formules suivante : (Formule 2.11, Chapitre 2, RNVA 99).

$$n = E \left[\frac{h}{3} \right] = E \left[\frac{15}{3} \right] = E[5] = 5 ;$$
$$\Rightarrow h_i = \frac{h}{n} = \frac{15}{5} = 3 \text{ m.}$$

Pour notre cas et pour faciliter un peu les calculs on considère 3 niveaux (n=3), avec : $h_1 = 6 \text{ m}$; $h_2 = 6 \text{ m}$; $h_3 = 3 \text{ m}$.

Elle est donnée par la formule suivante :

$$q_{dyn}(z_j) = q_{ref} * C_e(z_j). \quad (\text{Formule 2.12, Chapitre 2, RNVA 99}).$$

Avec : z_j : Distance verticale mesurée a partir du niveau du sol au centre de l'élément j si cet élément de surface est verticale ;

Hauteur totale de la construction si cet élément de surface j fait partie de la toiture.

D'où on aura :

- Niveau 1 → $q_{dyn}(z_j) = 785.625 \text{ N/m}^2$.
- Niveau 2 → $q_{dyn}(z_j) = 931.875 \text{ N/m}^2$.
- Niveau 3 → $q_{dyn}(z_j) = 1129.875 \text{ N/m}^2$.

3.1.4 Vérification à la stabilité d'ensemble

Pour la détermination de l'action du vent, on considère la catégorie I de construction vu que nous avons un bâtiment industriel

La construction est rectangulaire, donc on considérera les deux directions du vent :

3.1.4.1 Vent perpendiculaire à la façade principale (Sens V1)

1. Coefficient de pression extérieure C_{pe} :

Il s'obtient à partir des formules suivantes, (Formule 5.1, Chapitre 5, RNVA 99) :

$$C_{pe} = C_{pe,1}, \quad \rightarrow \text{si } S \leq 1 \text{ m}^2;$$

$$C_{pe} = C_{pe,1} + (C_{pe,10} - C_{pe,1}) * \log_{10}(S), \rightarrow \text{si } 1 \text{ m}^2 < S < 10 \text{ m}^2;$$

$$C_{pe} = C_{pe,10}, \quad \rightarrow \text{si } S \geq 10 \text{ m}^2.$$

Avec : S : La surface chargée de paroi considérée.

❖ Parois verticale :

La division des parois se fait suivant la figure 5.1, (Chapitre 5, RNVA 99) :

Dans notre cas et pour cette direction du vent on a :

$$d = 60 \text{ m}; \quad b = 45 \text{ m}; \quad h = 12 \text{ m};$$

$$\text{et } e = \min(b; 2 * h) = 24 \text{ m}.$$

$$\text{d'ou on a : } d = 60 \text{ m} > e = 24 \text{ m}; \quad \rightarrow \frac{e}{5} = \frac{24}{5} = 4.8 \text{ m}.$$

Les zones de pression et les valeurs correspondant à ces zones sont données sur la figure ci-dessous :

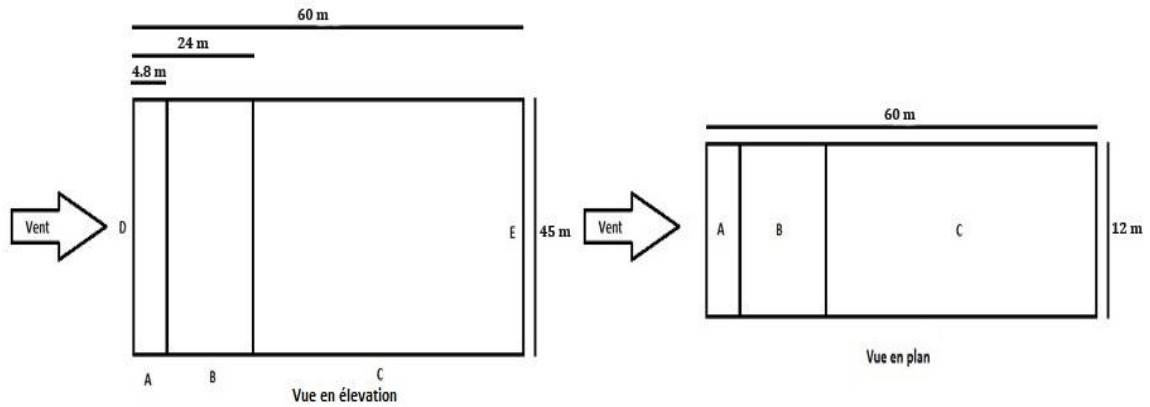


Figure 3. Les zones de pression et les valeurs correspondant à ces zones.

Pour le calcul de C_{pe} , Les valeurs des $C_{pe,1}$ et $C_{pe,10}$ sont données par le tableau 5.1, (Chapitre 5, RNVA 99) :

Tableau 3. Les valeurs des C_{pe} pour les différentes zones de pression.

Zones de pression	A	B	C	D	E
S (m ²)	57.6	230.4	432	540	540
$C_{pe,?}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,10}$
C_{pe}	-1	-0.8	-0.5	+0.8	-0.3

❖ Toiture :

$$\text{On a : } \tan \alpha = \frac{h - 12}{b/2} = \frac{3}{22.5} = 0.133 \rightarrow \alpha \approx 7.6^\circ > 4^\circ.$$

→ La toiture est considérée comme une toiture à deux versants (§ 1.1.3, Chapitre 2, RNVA 99), donc :

La division de la toiture se fait suivant la figure 5.4, (Chapitre 5, RNVA 99) :

Dans notre cas et pour cette direction du vent on a :

$$d = 60 \text{ m}; \quad b = 45 \text{ m}; \quad h = 12 \text{ m};$$

$$\text{et } e = \min(b; 2 * h) = 24 \text{ m.}$$

$$\text{d'ou on a : } \frac{e}{2} = \frac{24}{2} = 12 \text{ m}; \quad \frac{e}{4} = \frac{24}{4} = 6 \text{ m}; \quad \frac{e}{10} = \frac{24}{10} = 2.4 \text{ m.}$$

Les zones de pression et les valeurs correspondant à ces zones sont données sur la figure ci-dessous :

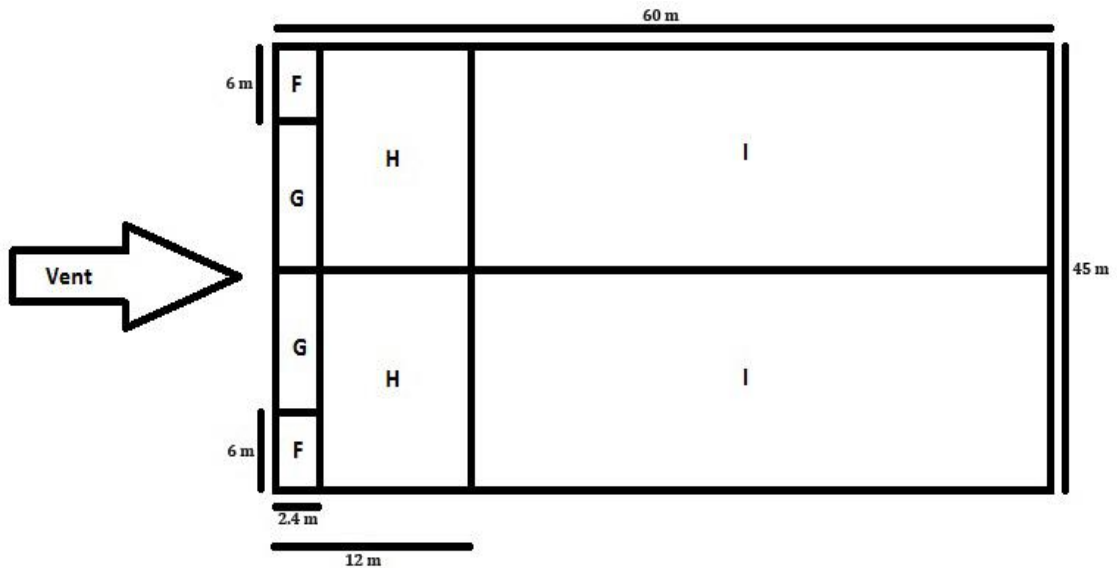


Figure 4. Les zones de pression et les valeurs correspondant à ces zones.

Pour le calcul de C_{pe} , Les valeurs des $C_{pe,1}$ et $C_{pe,10}$ sont données par le tableau 5.4, (Chapitre 5, RNVA 99) :

Pour une pente de $\alpha = 7.6^\circ$; On interpole entre les valeurs ($\alpha = 5^\circ$ et $\alpha = 15^\circ$) :

Tableau 4. Les valeurs des C_{pe} pour les différentes zones de pression.

Zones de pression	F	G	H	I
S (m ²)	14.4	39.6	216	1080
$C_{pe,?}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,10}$
C_{pe}	-1.522	-1.3	-0.674	-0.5

2. Coefficient de pression intérieure C_{pi} :

D'après le RNVA 99 (§ 2.2.1, Chapitre 5), et comme on a une construction sans cloisons intérieures pour laquelle μ_p ne peut pas être déterminé (dossier technique incomplet), les valeurs suivantes de C_{pi} peuvent être utilisées : $C_{pi,1} = +0.8$ et $C_{pi,2} = -0.5$.

3. Calcul de la pression due au vent q_j :

Elle est donnée par la formule suivante, (Formule 2.1, Chapitre 2, RNVA 99) :

$$q_j = C_d * W(z_j);$$

Avec : $W(z_j)$: La pression nette exercée sur l'élément de surface j, calculée à la hauteur z_j relative à l'élément de surface j ; et elle est donnée par :

$W(z_j) = q_{dyn}(z_j) * (C_{pe} - C_{pi})$; (§ 1.2.2.2, Formule 2.2, Chapitre 2, RNVA 99).

D'où on aura :

$$q_j = C_d * q_{dyn}(z_j) * (C_{pe} - C_{pi}).$$

❖ Parois verticale :

▪ Niveau 1 :

Tableau 5. Les valeurs de pressions due au vent q_j , exercée sur chaque élément de surface j.

Zone de pression	C_d	$d_{dyn}(N/m^2)$	C_{pe}	$C_{pi,1}$	$C_{pi,2}$	$q_{j,1}(N/m^2)$	$q_{j,2}(N/m^2)$
A	0.904	785.625	-1	+0.8	-0.5	-1278.369	-355.103
B	0.904	785.625	-0.8	+0.8	-0.5	-1136.328	-213.062
C	0.904	785.625	-0.5	+0.8	-0.5	-923.266	0
D	0.904	785.625	+0.8	+0.8	-0.5	0	923.266
E	0.904	785.625	-0.3	+0.8	-0.5	-781.225	142.041

▪ Niveau 2 :

Tableau 6. Les valeurs de pressions due au vent q_j , exercée sur chaque élément de surface j.

Zone de pression	C_d	$d_{dyn}(N/m^2)$	C_{pe}	$C_{pi,1}$	$C_{pi,2}$	$q_{j,1}(N/m^2)$	$q_{j,2}(N/m^2)$
A	0.904	931.875	-1	+0.8	-0.5	-1516.347	-421.207
B	0.904	931.875	-0.8	+0.8	-0.5	-1347.864	-252.724
C	0.904	931.875	-0.5	+0.8	-0.5	-1092.139	0
D	0.904	931.875	+0.8	+0.8	-0.5	0	1095.139
E	0.904	931.875	-0.3	+0.8	-0.5	-926.656	168.483

❖ Toiture :

Tableau 7. Les valeurs de pressions due au vent q_j , exercée sur chaque élément de surface j.

Zone de pression	C_d	$d_{dyn}(N/m^2)$	C_{pe}	$C_{pi,1}$	$C_{pi,2}$	$q_{j,1}(N/m^2)$	$q_{j,2}(N/m^2)$
F	0.904	1129.875	-1.522	+0.8	-0.5	-2371.707	-1043.878
G	0.904	1129.875	-1.3	+0.8	-0.5	-2144.9547	-817.126
H	0.904	1129.875	-0.674	+0.8	-0.5	-1505.5539	-177.725
I	0.904	1129.875	-0.5	+0.8	-0.5	-1327.829	0

4. Force de frottement F_{fr} :

Dans notre cas et pour cette direction du vent on a :

$$d = 60 \text{ m}; \quad b = 45 \text{ m}; \quad h = 12 \text{ m};$$

$$\text{et } \frac{d}{b} = \frac{60}{45} = 1.33; \quad \frac{d}{h} = \frac{60}{12} = 5.$$

$$\text{D'ou on a : } \frac{d}{b} = 1.33 < 3; \text{ mais : } \frac{d}{h} = 5 > 3.$$

Donc d'après le RNVA 99 (§ 1.4.2, Chapitre 2), les forces de frottement doivent être calculées.

Et la force de frottement F_{fr} est donnée par la formule suivante :

$$F_{fr} = \sum (q_{dyn}(z_j) * C_{fr,j} * S_{fr,j});$$

(Formule 2.8, Chapitre 2, RNVA 99).

Avec : j : Indique un élément de surface parallèle à la direction du vent ;

z_j : La hauteur du centre de l'élément j ;

$C_{fr,j}$: Le coefficient de frottement pour l'élément de surface j ;

Il est donné par le RNVA 99 (Tableau 2.1, Chapitre 2) :

Dans notre cas : $C_{fr,j} = 0.01$.

$S_{fr,j}$: L'aire de l'élément de surface j.

Elle est donnée par le RNVA 99 (Tableau 2.2, Chapitre 2) :

Dans notre cas :

Parois verticales : $S_{fr,j}(1^{er} \text{ niveau}) = (d * h) * 2 = (100 * 6) * 2 = 1200 \text{ m}^2$

$S_{fr,j}(2^{eme} \text{ niveau}) = (d * h) * 2 = (100 * 6) * 2 = 1200 \text{ m}^2$

Toiture : $S_{fr,j}(Toiture) = (b / \cos \alpha) * d = (45 / \cos 7.6^\circ) * 100$
 $= 4539.88 \text{ m}^2$

D'où on aura :

- Parois verticale :

Tableau 8. Les valeurs des forces de frottement F_{fr} .

Le niveau	$q_{dyn}(z_j)(\text{N}/\text{m}^2)$	$C_{fr,j}$	$S_{fr,j}(\text{m}^2)$	$F_{fr}(\text{N})$
1 ^{er} niveau	785.625	0.01	1200	9427.5
2 ^{eme} niveau	931.875	0.01	1200	11182.5

- Toiture :

Tableau 9. Les valeurs des forces de frottement F_{fr} .

Le niveau	$q_{dyn}(z_j)(\text{N}/\text{m}^2)$	$C_{fr,j}$	$S_{fr,j}(\text{m}^2)$	$F_{fr}(\text{N})$
Toiture	1129.875	0.01	4539.88	51294.97

5. Force résultante R :

Selon le RNVA 99 (§ 2.1.1, Chapitre 2), la force résultante R se décompose en deux forces :

- Une force globale horizontale F_w qui correspond à la résultante des forces horizontales agissant sur les parois verticales de la construction et de la composante horizontale des forces appliquées à la toiture ;
- Une force de soulèvement F_u qui est la composante verticale des forces appliquées à la toiture.

Et elle est donnée par la formule suivante (Formule 2.9, Chapitre 2, RNVA 99) :

$$R = \sum (q_j * S_j) + \sum F_{fr,j}.$$

D'où on aura :

- 1^{er} niveau :

Tableau 10. Les valeurs des $q_j * S_j$.

Zone de pression	$S_j(m^2)$	$q_j(N/m^2)$	$q_j * S_j(N)$
D	270	923.266	249281.82
E	270	-781.225	-210930.75

- 2^{eme} niveau :

Tableau 11. Les valeurs des $q_j * S_j$.

Zone de pression	$S_j(m^2)$	$q_j(N/m^2)$	$q_j * S_j(N)$
D	270	1095.139	295687.53
E	270	-926.656	-250197.12

- Toiture :

Tableau 12. Les valeurs des $q_j * S_j$.

Zone de pression	$S_j(m^2)$	$q_j(N/m^2)$	$q_j * S_j(N)$
F	14.4	-2371.707	-34152.58
G	39.6	-2144.9547	-84940.21
H	216	-1505.5539	-325199.64
I	1980	-1327.829	-2629101.42

Et on aura :

Tableau 13. Les valeurs des composantes de la force résultante R.

Le niveau	$q_j * S_j(N)$	$F_{fr,j}(N)$	$F_w(N)$	$F_u(N)$
1 ^{er} niveau	38351.07	9427.5	47778.57	0
2 ^{eme} niveau	45490.41	11182.5	56672.91	0
Toiture	-3073393.85	51294.97	0	-3022098.88

Donc : $R = -2917647.4 N$.

6. Excentricité de la force globale horizontale e :

Pour tenir compte de la torsion, le RNVA 99 (§ 2.2.1, Chapitre 2) stipule qu'une excentricité e de la force globale horizontale F_w doit être introduite.

L'excentricité e de la force globale horizontale F_w doit être prise égale à :

$$e = \pm b/10, \quad (\S 2.2.1, \text{Chapitre 2, RNVA 99}).$$

$$\text{Donc : } e = \pm 45/10 = \pm 4.5 m.$$

3.1.4.2 Vent parallèle à la façade principale (sens V2)

On suit les mêmes étapes que pour le vent de sens V1 :

1. Coefficient de pression extérieure C_{pe} :

❖ Parois verticale :

La division des parois se fait suivant la figure 5.1, (Chapitre 5, RNVA 99) :

Dans notre cas et pour cette direction du vent on a :

$$d = 45 m ; \quad b = 60 m ; \quad h = 12 m ;$$

$$\text{et } e = \min(b ; 2 * h) = 24 m.$$

$$\text{d'ou on a : } d = 45 m > e = 24 m ; \quad \rightarrow \frac{e}{5} = \frac{24}{5} = 4.8 m.$$

Les zones de pression et les valeurs correspondant à ces zones sont données sur la figure ci-dessous :

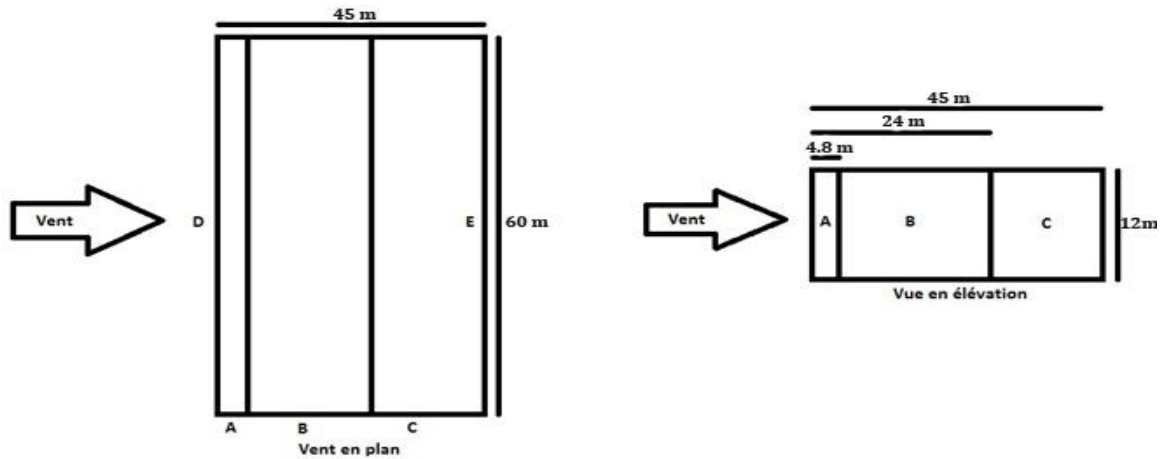


Figure 5. Les zones de pression et les valeurs correspondant à ces zones.

Pour le calcul de C_{pe} , Les valeurs des $C_{pe,1}$ et $C_{pe,10}$ sont données par le tableau 5.1, (Chapitre 5, RNVA 99) :

Tableau 14. Les valeurs des C_{pe} pour les différentes zones de pression.

Zones de pression	A	B	C	D	E
S (m ²)	57.6	230.4	252	720	720
$C_{pe,?}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,10}$
C_{pe}	-1	-0.8	-0.5	+0.8	-0.3

❖ Toiture :

La division de la toiture se fait suivant la figure 5.4, (Chapitre 5, RNVA 99) :

Dans notre cas et pour cette direction du vent on a :

$$d = 45 \text{ m}; \quad b = 60 \text{ m}; \quad h = 12 \text{ m};$$

$$\text{et } e = \min(b; 2 * h) = 24 \text{ m}.$$

$$\text{d'ou on a : } \frac{e}{4} = \frac{24}{4} = 6 \text{ m}; \quad \frac{e}{10} = \frac{24}{10} = 2.4 \text{ m}.$$

Les zones de pression et les valeurs correspondant à ces zones sont données sur la figure ci-dessous :

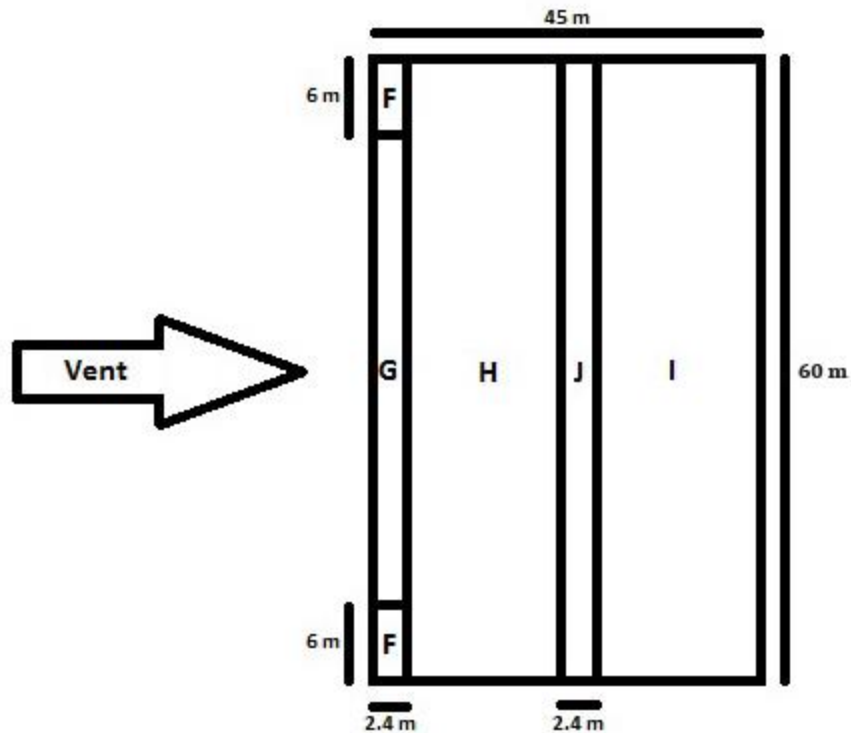


Figure 6. Les zones de pression et les valeurs correspondant à ces zones.

Pour le calcul de C_{pe} , Les valeurs des $C_{pe,1}$ et $C_{pe,10}$ sont données par le tableau 5.4, (Chapitre 5, RNVA 99) :

Pour une pente de $\alpha = 7.6^\circ$; On interpole entre les valeurs ($\alpha = 5^\circ$ et $\alpha = 15^\circ$) :

Tableau 15. Les valeurs des C_{pe} pour les différentes zones de pression.

Zones de pression	F	G	H	I	J
S (m ²)	14.4	115.2	1206	1206	144
$C_{pe,?}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,10}$
C_{pe}	-1.492	-1.096	-0.522	-0.326	-0.482

2. Coefficient de pression intérieure C_{pi} :

D'après le RNVA 99 (§ 2.2.1, Chapitre 5), et comme on a une construction sans cloisons intérieures pour laquelle μ_p ne peut pas être déterminé (dossier technique incomplet), les valeurs suivantes de C_{pi} peuvent être utilisées : $C_{pi,1} = +0.8$ et $C_{pi,2} = -0.5$.

3. Calcul de la pression due au vent q_j :

Elle est donnée par la formule suivante, (Formule 2.1, Chapitre 2, RNVA 99) :

$$q_j = C_d * W(z_j);$$

Avec : $W(z_j)$: La pression nette exercée sur l'élément de surface j, calculée à la hauteur z_j relative à l'élément de surface j ; et elle est donnée par :

$$W(z_j) = q_{dyn}(z_j) * (C_{pe} - C_{pi}) ; \quad (\S 1.2.2.2, \text{Formule 2.2, Chapitre 2, RNVA 99}).$$

D'où on aura :

$$q_j = C_d * q_{dyn}(z_j) * (C_{pe} - C_{pi}).$$

❖ Parois verticale :

▪ Niveau 1 :

Tableau 16. Les valeurs de pressions due au vent q_j , exercée sur chaque élément de surface j.

Zone de pression	C_d	$d_{dyn}(N/m^2)$	C_{pe}	$C_{pi,1}$	$C_{pi,2}$	$q_{j,1}(N/m^2)$	$q_{j,2}(N/m^2)$
A	0.870	785.625	-1	+0.8	-0.5	-1230.289	-341.747
B	0.870	785.625	-0.8	+0.8	-0.5	-1093.59	-205.048
C	0.870	785.625	-0.5	+0.8	-0.5	-888.542	0
D	0.870	785.625	+0.8	+0.8	-0.5	0	888.542
E	0.870	785.625	-0.3	+0.8	-0.5	-751.843	136.699

▪ Niveau 2 :

Tableau 17. Les valeurs de pressions due au vent q_j , exercée sur chaque élément de surface j.

Zone de pression	C_d	$d_{dyn}(N/m^2)$	C_{pe}	$C_{pi,1}$	$C_{pi,2}$	$q_{j,1}(N/m^2)$	$q_{j,2}(N/m^2)$
A	0.870	931.875	-1	+0.8	-0.5	-1459.316	-405.366
B	0.870	931.875	-0.8	+0.8	-0.5	-1297.17	-243.219
C	0.870	931.875	-0.5	+0.8	-0.5	-1053.95	0
D	0.870	931.875	+0.8	+0.8	-0.5	0	1053.95
E	0.870	931.875	-0.3	+0.8	-0.5	-891.804	162.146

❖ Toiture :

Tableau 18. Les valeurs de pressions due au vent q_j , exercée sur chaque élément de surface j.

Zone de pression	C_d	$d_{dyn}(N/m^2)$	C_{pe}	$C_{pi,1}$	$C_{pi,2}$	$q_{j,1}(N/m^2)$	$q_{j,2}(N/m^2)$
F	0.870	1129.875	-1.492	+0.8	-0.5	-2253.016	-975.127
G	0.870	1129.875	-1.096	+0.8	-0.5	-1863.751	-585.863
H	0.870	1129.875	-0.522	+0.8	-0.5	-1299.514	-21.626
I	0.870	1129.875	-0.326	+0.8	-0.5	-1106.848	171.04
J	0.870	1129.875	-0.482	+0.8	-0.5	-1260.195	17.694

4. Force de frottement F_{fr} :

Dans notre cas et pour cette direction du vent on a :

$$d = 45 \text{ m} ; \quad b = 60 \text{ m} ; \quad h = 12 \text{ m} ;$$

$$\text{et } \frac{d}{b} = \frac{45}{60} = 0.75 ; \quad \frac{d}{h} = \frac{45}{12} = 3.75.$$

$$\text{D'ou on a : } \frac{d}{b} = 0.75 < 3 ; \text{ mais : } \frac{d}{h} = 3.75 > 3.$$

Donc d'après le RNVA 99 (§ 1.4.2, Chapitre 2), les forces de frottement doivent être calculées.

Et la force de frottement F_{fr} est donnée par la formule suivante :

$$F_{fr} = \sum (q_{dyn}(z_j) * C_{fr,j} * S_{fr,j}) ;$$

(Formule 2.8, Chapitre 2, RNVA 99).

Avec : j : Indique un élément de surface parallèle à la direction du vent ;

z_j : La hauteur du centre de l'élément j ;

$C_{fr,j}$: Le coefficient de frottement pour l'élément de surface j ;

Il est donné par le RNVA 99 (Tableau 2.1, Chapitre 2) :

Dans notre cas : $C_{fr,j} = 0.01$.

$S_{fr,j}$: L'aire de l'élément de surface j.

Elle est donnée par le RNVA 99 (Tableau 2.2, Chapitre 2) :

Dans notre cas :

Parois verticales : $S_{fr,j}(1^{er} \text{ niveau}) = (d * h) * 2 = (45 * 6) * 2 = 540 \text{ m}^2$

$S_{fr,j}(2^{eme} \text{ niveau}) = (d * h) * 2 = (45 * 6) * 2 = 540 \text{ m}^2$

Toiture : $S_{fr,j}(Toiture) = (d/2) * (h - 12) = (45/2) * (15 - 12)$
 $= 67.5 \text{ m}^2$

D'où on aura :

- Parois verticale :

Tableau 19. Les valeurs des forces de frottement F_{fr} .

Le niveau	$q_{dyn}(z_j)(\text{N}/\text{m}^2)$	$C_{fr,j}$	$S_{fr,j}(\text{m}^2)$	$F_{fr}(\text{N})$
1 ^{er} niveau	785.625	0.01	540	4242.375
2 ^{eme} niveau	931.875	0.01	540	5032.125

- Toiture :

Tableau 20. Les valeurs des forces de frottement F_{fr} .

Le niveau	$q_{dyn}(z_j)(N/m^2)$	$C_{fr,j}$	$S_{fr,j}(m^2)$	$F_{fr}(N)$
Toiture	1129.875	0.01	67.5	762.666

5. Force résultante R :

Et elle est donnée par la formule suivante (Formule 2.9, Chapitre 2, RNVA 99) :

$$R = \sum (q_j * S_j) + \sum F_{fr,j}.$$

D'où on aura :

- 1^{er} niveau :

Tableau 21. Les valeurs des $q_j * S_j$.

Zone de pression	$S_j(m^2)$	$q_j(N/m^2)$	$q_j * S_j(N)$
D	600	888.542	533125.2
E	600	-751.843	-451105.8

- 2^{eme} niveau :

Tableau 22. Les valeurs des $q_j * S_j$.

Zone de pression	$S_j(m^2)$	$q_j(N/m^2)$	$q_j * S_j(N)$
D	600	1053.95	632370
E	600	-891.804	-535082.4

- Toiture :

Tableau 23. Les valeurs des $q_j * S_j$.

Zone de pression	$S_j(m^2)$	$q_j(N/m^2)$	$q_j * S_j(N)$
F	14.4	-2253.016	-32443.43
G	211.2	-1863.751	-393624.211
H	2010	-1299.514	-2612023.14
I	2010	-1106.848	-2224764.48
J	240	-1260.195	-302446.8

Et on aura :

Tableau 24. Les valeurs des composantes de la force résultante R.

Le niveau	$q_j * S_j(N)$	$F_{fr,j}(N)$	$F_w(N)$	$F_u(N)$
1 ^{er} niveau	82019.4	4242.375	86261.775	0
2 ^{eme} niveau	97287.6	5032.125	102319.725	0
Toiture	-5565302.061	762.666	0	-5564539.395

Donc : $R = -5375957.895 N$.

6. Excentricité de la force globale horizontale e :

Pour tenir compte de la torsion, le RNVA 99 (§ 2.2.1, Chapitre 2) stipule qu'une excentricité e de la force globale horizontale F_w doit être introduite.

L'excentricité e de la force globale horizontale F_w doit être prise égale à :

$$e = \pm b/10, \quad (\text{§ 2.2.1, Chapitre 2, RNVA 99}).$$

$$\text{Donc : } e = \pm 60/10 = \pm 6 \text{ m.}$$

3.2 Calcul à la neige

3.2.1 Introduction

Dans le calcul qui suit on définit les valeurs représentatives de la charge statique de neige sur toute surface située au-dessus du sol et soumise à l'accumulation de neige et notamment sur la toiture.

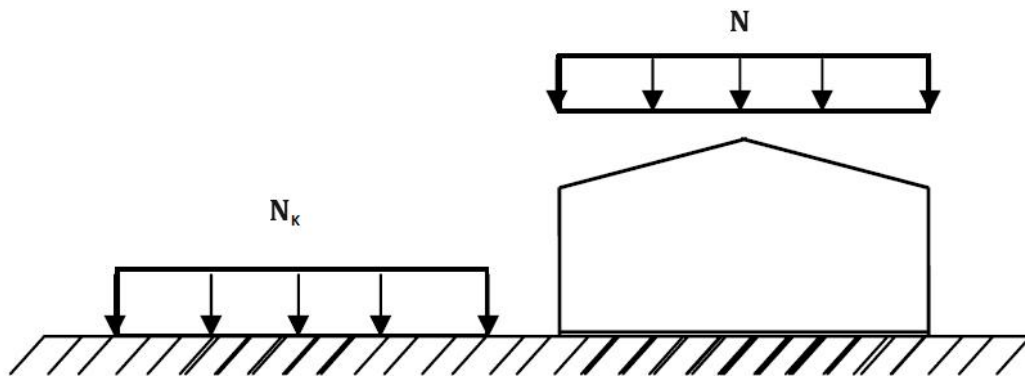


Figure 7. Représentation des charges statique de neige sur la toiture et sur le sol.

3.2.2 La charge de neige sur le sol

La charge de neige sur le sol N_k est fonction de la localisation géographique et de l'altitude du lieu considéré.

Dans notre cas :

- Le projet est implanté à Akbou (Bejaia) qui est classée en zone A selon la classification de RNVA 99.
- L'altitude du projet est d'environ 200 m.

Donc N_k est donnée par la formule suivante : (§ 4.2, RNVA 99).

$$N_k = \frac{0.07 * H + 15}{100} = \frac{0.07 * 200 + 15}{100} = 0.29 \frac{KN}{m^2}$$

$$= 290 N/m.$$

3.2.3 Coefficient de forme de la toiture

Il est fonction de la forme de la toiture.

Dans notre cas le bâtiment a une toiture à deux versants avec une pente α de :
 $0^\circ < \alpha \approx 7.6^\circ < 15^\circ$.

D'où l'on aura le coefficient de pente $\mu = 0.8$ (Tableau 6.2, § 6.2.2.2, RNVA 99).

3.2.4 Calcul des charges de neige sur la toiture

La charge caractéristique de neige N par unité de surface en projection horizontale de toiture soumise à l'accumulation de la neige s'obtient par la formule suivante :

$$N = N_k * \mu = 290 * 0.8 = 232 \frac{N}{m^2},$$

(Formule 1, § 3.1.1, RNVA 99).

Remarque :

- La charge de neige normale N_n est équivalente à la charge de neige N :

$$N_n = N = 232 N/m^2.$$

- La charge de neige extrême N_e est égale à 5/3 la charge de neige normale N_n :

$$N_e = \frac{5}{3} * N_n = \frac{5}{3} * 232 = 386.67 N/m^2.$$

Et la figure suivante nous montre la distribution de la charge de neige par projection horizontale, et suivant rampant :

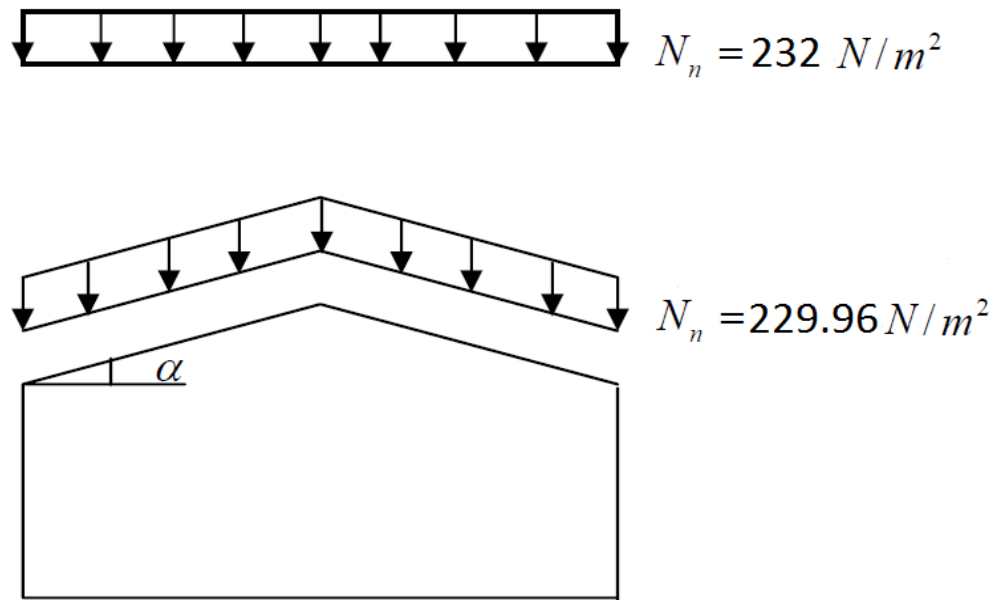


Figure 8. Distribution de la charge de neige par projection horizontale, et suivant rampant.

3.3 Calcul de la variation de température

Selon le CCM 97, on adopte dans le cas d'une construction située à l'air libre au nord de l'Algérie, une variation uniforme de température qui est de 35 °C à -15 °C.

La température de montage est prise égale à 20 °C.

D'où le gradient de température est :

$$\Delta T^+ = 35 - 20 = 15 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

$$\Delta T^- = 20 + 15 = 35 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Les déformations à considérer, sont évaluées en admettant un coefficient de dilatation thermique $\alpha = 12 * 10^{-6} \text{ } 1/^\circ\text{C}$.

CHAPITRE 4

PRE DIMENSIONNEMENT ET CALCUL DES ELEMENTS SECONDAIRES

4.1 Calcul des pannes

4.1.1 Introduction

Les pannes sont des éléments qui ont pour rôle de transmettre les charges et surcharges s'appliquant sur la couverture aux traverses des portiques. Les pannes sont disposées parallèlement à la ligne de faîtage, et du fait qu'elles sont posées inclinées d'un angle α compte tenue de la pente des versants donc travaillent en flexion déviée.

Dans notre cas on a :

- La pente du versant est égale à $\alpha = 7.6^\circ$;
- Les fermes sont espacées de (portée de la panne) 5.00 m ;
- L'écartement des pannes suivant l'horizontal est de 2.50 m ;
- L'écartement des pannes suivant le versant (entre axe) est de 2.52 m ;
- Le nombre de pannes est de $n = (22.7/2.52) + 1 = 10$.

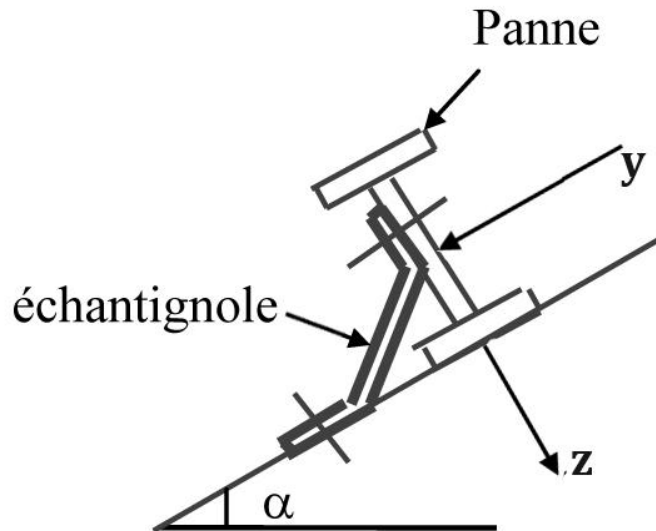


Figure 9. Schéma statique des pannes.

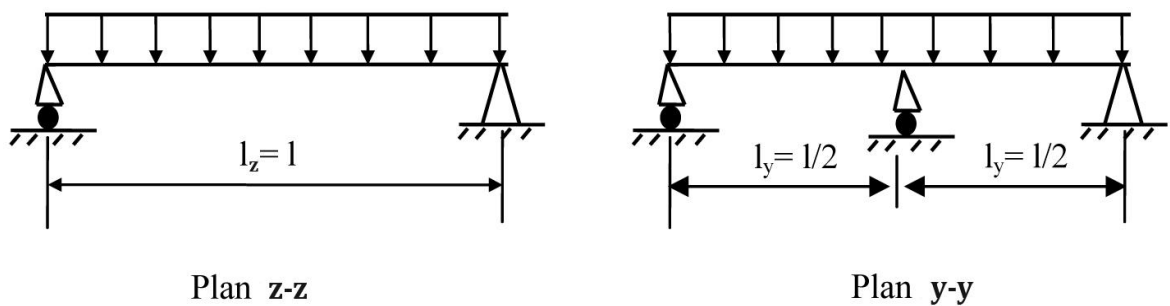


Figure 10. Schéma statique des pannes suivant les axes Y et Z.

4.1.2 Détermination des sollicitations

4.1.2.1 Evaluation des charges et surcharges

1. Charges permanentes (G) :

- Poids propre de la panne (estimé).....20 Kg/ml ;
- Poids propre de la couverture (panneau sandwich).....14 Kg/m² ;
- Poids des accessoires de pose.....5 Kg/m² ;

D'où on a : $G = (14 + 5) * 2.52 + 20 = 67.88 \text{ Kg/ml}$.

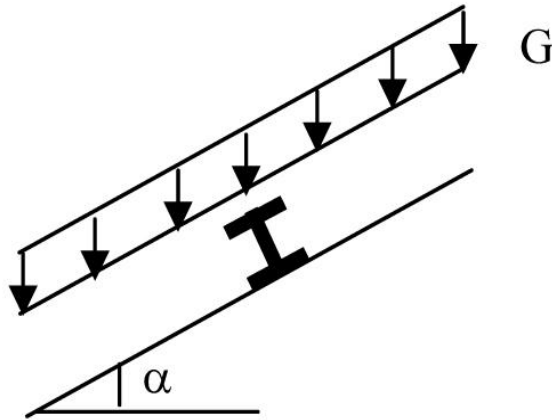


Figure 11. Schéma statique des charges permanentes G sur les pannes.

2. Surcharges d'entretien (P) :

Le poids propre du personnel d'entretien et de leur matériel est donné par deux charges concentrées de 100 Kg, chacune situées à 1/3 et 2/3 de la portée de la panne.

La charge uniformément répartie P due aux surcharges d'entretien est obtenue en égalisant les deux moments maximaux du à P et aux charges ponctuelles P' :

$$M_{max} = \frac{P' * l}{3} = \frac{P * l^2}{8} \Rightarrow P = \frac{8 * P'}{3 * l} \Rightarrow P = \frac{8 * 100}{3 * 10} \Rightarrow P = 26.67 \text{ Kg/ml.}$$

D'où on a : $P = 26.67 \text{ Kg/ml.}$

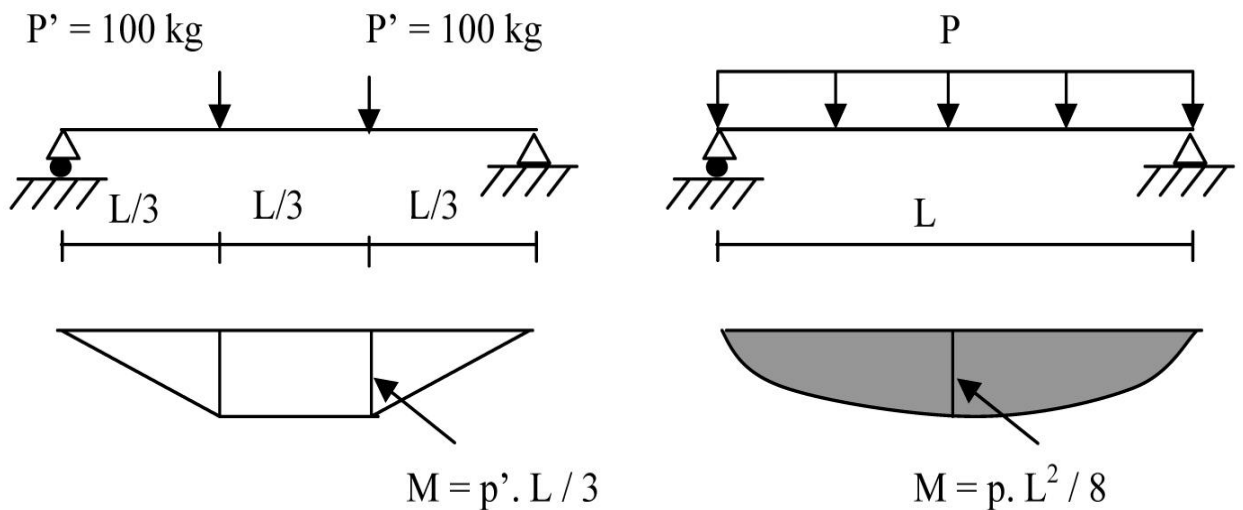


Figure 12. Schéma statique des surcharges d'entretien P sur les pannes.

3. Surcharges climatique du vent (V) : (perpendiculaire au versant)

Vent normal : $V = -237.17 \text{ Kg/m}^2$ (vers le haut).

D'où on a :

$$V = -237.17 * 2.52 = -597.668 \text{ Kg/ml.}$$

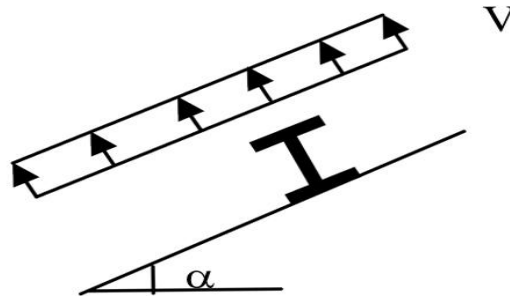


Figure 13. Schéma statique des surcharges climatique du vent V sur les pannes.

4. Surcharge climatique de neige (N) :

Charge de neige normale : $N_n = 23.2 \text{ Kg/m}^2$.

D'où on a :

$$N_n = 23.2 * \cos 7.6 * 2.52 = 57.95 \text{ Kg/m.}$$

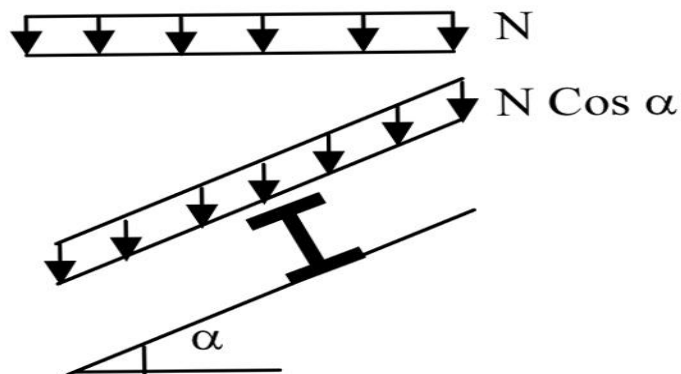


Figure 14. Schéma statique des surcharges climatique de la neige sur les pannes.

4.1.2.2 Charge appliquées

- $G = 67.88 \text{ Kg/ml.}$
- $Q = P = 26.67 \text{ Kg/ml.}$
- $V = -597.668 \text{ Kg/ml.}$
- $N_n = 57.95 \text{ Kg/m.}$

4.1.2.3 Décomposition des charges

Suivant l'axe Z :

- $G_z = G * \cos 7.6^\circ = 67.88 * \cos 7.6^\circ = 67.28 \text{ Kg/ml}$.
- $Q_z = Q * \cos 7.6^\circ = 26.67 * \cos 7.6^\circ = 26.43 \text{ Kg/ml}$.
- $V_z = V = -597.668 \text{ Kg/ml}$.
- $N_z = N_n * \cos 7.6^\circ = 57.95 * \cos 7.6^\circ = 57.44 \text{ Kg/m}$.

Suivant l'axe Y :

- $G_y = G * \sin 7.6^\circ = 67.88 * \sin 7.6^\circ = 8.97 \text{ Kg/ml}$.
- $Q_y = Q * \sin 7.6^\circ = 26.67 * \sin 7.6^\circ = 3.52 \text{ Kg/ml}$.
- $V_y = 0 \text{ Kg/ml}$.
- $N_y = N_n * \sin 7.6^\circ = 57.95 * \sin 7.6^\circ = 7.66 \text{ Kg/m}$.

4.1.2.4 Combinaisons de charge les plus défavorables

❖ ELU :

Suivant l'axe Z :

- $1.35 * G_z + 1.5 * Q_z = (1.35 * 67.28) + (1.5 * 26.43) = 130.47 \text{ Kg/ml}$
- $1.35 * G_z + 1.5 * N_z = (1.35 * 67.28) + (1.5 * 57.44) = 176.98 \text{ Kg/ml}$
- $G_z + 1.5 * V_z = 67.28 - (1.5 * 597.668) = -829.22 \text{ Kg/ml}$;

Suivant l'axe Y :

- $1.35 * G_y + 1.5 * Q_y = (1.35 * 8.97) + (1.5 * 3.52) = 17.38 \text{ Kg/ml}$;
- $1.35 * G_y + 1.5 * N_y = (1.35 * 8.97) + (1.5 * 7.66) = 23.59 \text{ Kg/ml}$;

❖ ELS :

Suivant l'axe Z :

- $G_z + Q_z = 67.28 + 26.43 = 93.71 \text{ Kg/ml}$;
- $G_z + N_z = 67.28 + 57.44 = 124.72 \text{ Kg/ml}$;
- $G_z + V_z = 67.28 - 597.668 = -530.38 \text{ Kg/ml}$;

Suivant l'axe Y :

- $G_y + Q_y = 8.97 + 3.52 = 12.49 \text{ Kg/ml}$;
- $G_y + N_y = 8.97 + 7.66 = 16.63 \text{ Kg/ml}$;

4.1.3 Pré dimensionnement des pannes

Le pré dimensionnement se fait par la condition de flèche :

Le calcul de la flèche se fait par les combinaisons de charges et surcharges de services (non pondérées) :

Les combinaisons de calcul à l'ELS sont :

- $G_z + V_z = 67.28 - 597.668 = -530.38 \text{ Kg/ml}$;
- $G_y + N_y = 8.97 + 7.66 = 16.63 \text{ Kg/ml}$;

La vérification à faire est : $f \leq f_{ad}$.

- Flèche verticale : (sur deux appuis)

$$f_z \leq f_{ad} \Rightarrow \frac{5}{384} * \frac{q_z * l^4}{E * I_y} \leq \frac{l}{200} \Rightarrow I_y \geq \frac{200 * 5}{384} * \frac{q_z * l^4}{E * l}$$

$$\Rightarrow I_y \geq \frac{200 * 5}{384} * \frac{530.38 * 10^{-2} * 500^4}{2.1 * 10^6 * 500}$$

$$\Rightarrow I_y \geq 822.14 \text{ cm}^4$$

On choisit un : IPE 160 (avec : $I_y = 869 \text{ cm}^4$) ;

- Flèche latérale : (sur trois appuis)

$$f_y \leq f_{ad} \Rightarrow \frac{2.05}{384} * \frac{q_y * \left(\frac{l}{2}\right)^4}{E * I_z} \leq \frac{l}{200} \Rightarrow I_z \geq \frac{200 * 2.05}{384} * \frac{q_y * \left(\frac{l}{2}\right)^4}{E * \frac{l}{2}}$$

$$\Rightarrow I_z \geq \frac{200 * 2.05}{384} * \frac{16.63 * 10^{-2} * 250^4}{2.1 * 10^6 * 250}$$

$$\Rightarrow I_z \geq 1.32 \text{ cm}^4$$

Donc on garde l'IPE 160 (avec : $I_z = 68.3 \text{ cm}^4$).

D'où on aura le poids propre réel (G) :

$$G = (14 + 5) * 2.52 + 15.8 = 63.68 \text{ Kg/ml}.$$

Avec :

- $G_z = G * \cos 7.6^\circ = 63.68 * \cos 7.6^\circ = 63.12 \text{ Kg/ml}$.
- $G_y = G * \sin 7.6^\circ = 63.68 * \sin 7.6^\circ = 8.42 \text{ Kg/ml}$.

4.1.4 Dimensionnement des pannes

❖ Les combinaisons de calcul à l'ELU sont :

$$1 \rightarrow \begin{cases} 1.35 * G_z + 1.5 * N_z = (1.35 * 63.12) + (1.5 * 57.44) = 171.37 \text{ Kg/ml} \\ 1.35 * G_y + 1.5 * N_y = (1.35 * 8.42) + (1.5 * 7.66) = 22.86 \text{ Kg/ml} \end{cases}$$

$$2 \rightarrow \begin{cases} G_z + 1.5 * V_z & = 63.12 - (1.5 * 597.668) = -833.38 \text{ Kg/ml} \\ 1.35 * G_y & = 1.35 * 8.42 = 11.37 \text{ Kg/ml} \end{cases}$$

❖ Détermination des sollicitations :

- Moments :

$$1 \rightarrow \begin{cases} M_y = \frac{q_z * l^2}{8} = \frac{171.37 * 5^2}{8} = 535.537 \text{ Kg.m} \\ M_z = \frac{q_y * \left(\frac{l}{2}\right)^2}{8} = \frac{22.86 * \left(\frac{5}{2}\right)^2}{8} = 17.86 \text{ Kg.m} \end{cases}$$

$$2 \rightarrow \begin{cases} M_y = \frac{q_z * l^2}{8} = \frac{833.38 * 5^2}{8} = 2604.31 \text{ Kg.m} \\ M_z = \frac{q_y * \left(\frac{l}{2}\right)^2}{8} = \frac{11.37 * \left(\frac{5}{2}\right)^2}{8} = 8.88 \text{ Kg.m} \end{cases}$$

- Efforts tranchants :

Effort tranchant du à (G) : $V_G = (G_z * l)/2 = (63.12 * 5)/2 = 157.8 \text{ Kg}$.

Effort tranchant du à (Q) : $V_Q = P' * \cos 7.6^\circ = 100 * \cos 7.6^\circ = 99.12 \text{ Kg}$.

Effort tranchant du à (V) : $V_V = (V_z * l)/2 = (-597.668 * 5)/2$
 $= -1494.17 \text{ Kg}$.

Effort tranchant du à (N) : $V_N = (N_z * l)/2 = (57.44 * 5)/2 = 143.6 \text{ Kg}$.

1^{ère} combinaison :

$V_z = 1.35 * V_G + 1.5 * V_N = (1.35 * 157.8) + (1.5 * 143.6) = 428.43 \text{ Kg}$.

2^{ème} combinaison:

$V_z = V_G + 1.5 * V_V = 157.8 - (1.5 * 1494.17) = -2083.45 \text{ Kg}$.

❖ Principe de dimensionnement :

Les pannes sont dimensionnées par le calcul pour satisfaire aux conditions suivantes :

4.1.4.1 Vérification au moment ultime

Calcul en plasticité : (Section de classe 1 et 2)

$$\text{La vérification à faire est : } \left(\frac{M_Y}{M_{pl,y}} \right)^\alpha + \left(\frac{M_Z}{M_{pl,z}} \right)^\beta \leq 1.0.$$

Où α et β sont des constantes qui placent en sécurité si elles sont prises égales à l'unité, mais qui peuvent prendre les valeurs suivantes :

Pour les sections en I et H : $\alpha = 2$ et $\beta = 5 * n \geq 1$ avec $n = N/N_{pl}$;

Dans notre cas l'effort normal $N = 0 \Rightarrow \beta = 1$.

Et pour notre profilé (IPE 160) on a :

On tire pour un IPE 160 :

$$b = 82 \text{ mm} \quad ; \quad h_i = 145.2 \text{ mm} \quad ;$$

$$t_f = 7.4 \text{ mm} \quad ; \quad t_w = 5 \text{ mm}.$$

$$W_{el,y} = 109 \text{ cm}^3 \quad ; \quad W_{el,z} = 16.7 \text{ cm}^3 \quad ;$$

$$W_{pl,y} = 124 \text{ cm}^3 \quad ; \quad W_{pl,z} = 26.1 \text{ cm}^3.$$

❖ La classe de la section :

▪ Vérification de la semelle :

$$\text{La vérification à faire est : } \frac{b}{2 * t_f} \leq 10 * \varepsilon.$$

$$\text{Avec : } \varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = \sqrt{\frac{235}{235}} = 1;$$

$$\Rightarrow \frac{b}{2 * t_f} \leq 10 * \varepsilon \Rightarrow \frac{82}{2 * 7.4} \leq 10 * 1 \Rightarrow 5.54 \leq 10 \dots \dots \dots \text{Vérifier.}$$

▪ Vérification de l'âme :

$$\text{La vérification à faire est : } \frac{h_i}{t_w} \leq 72 * \varepsilon.$$

$$\Rightarrow \frac{h_i}{t_w} \leq 72 * \varepsilon \Rightarrow \frac{145.2}{5} \leq 72 * 1 \Rightarrow 29.04 \leq 72 \dots \dots \dots \text{Vérifier.}$$

Donc la section est de classe 1.

D'où on aura :

$$M_{pl,y} = \frac{W_{pl,y} * f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{124 * 2350 * 10^{-2}}{1.1} = 2649.09 \text{ Kg.m};$$

$$M_{pl,z} = \frac{W_{pl,z} * f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{26.1 * 2350 * 10^{-2}}{1.1} = 557.59 \text{ Kg.m.}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} 1 \rightarrow \left(\frac{M_Y}{M_{pl,y}}\right)^\alpha + \left(\frac{M_Z}{M_{pl,z}}\right)^\beta \leq 1 \Rightarrow \left(\frac{535.537}{2649.09}\right)^2 + \left(\frac{17.86}{557.59}\right)^1 \leq 1 \\ \hspace{15em} \Rightarrow 0.07 \leq 1 \dots \dots \text{Vérifier.} \\ 2 \rightarrow \left(\frac{M_Y}{M_{pl,y}}\right)^\alpha + \left(\frac{M_Z}{M_{pl,z}}\right)^\beta \leq 1 \Rightarrow \left(\frac{2604.31}{2649.09}\right)^2 + \left(\frac{8.88}{557.59}\right)^1 \leq 1 \\ \hspace{15em} \Rightarrow 0.98 \leq 1 \dots \dots \text{Vérifier.} \end{cases}$$

4.1.4.2 Vérification au cisaillement

La vérification à faire est : $V_z \leq V_{pl,z}$.

$$\text{avec : } V_{pl,z} = \frac{A_{vz} * \frac{f_y}{\sqrt{3}}}{\gamma_M};$$

Et on tire pour un IPE 160 :

$$A_{vz} = 9.66 \text{ cm}^2.$$

D'où on aura :

$$V_{pl,z} = \frac{A_{vz} * \frac{f_y}{\sqrt{3}}}{\gamma_M} = \frac{9.66 * \frac{2350}{\sqrt{3}}}{1.1} = 11914.935 \text{ Kg.}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} 1 \rightarrow V_z \leq V_{pl,z} \Rightarrow 428.43 \text{ Kg} \leq 11914.935 \text{ Kg} \dots \dots \dots \text{Vérifier.} \\ 2 \rightarrow V_z \leq V_{pl,z} \Rightarrow 2083.45 \text{ Kg} \leq 11914.935 \text{ Kg} \dots \dots \dots \text{Vérifier.} \end{cases}$$

4.1.4.3 Vérification au déversement

La vérification à faire est : $M_{uy} \leq M_{dev}$, (Chapitre 5.5.2, Eurocode 3).

$$\text{Avec : } M_{dev} = X_{LT} * \beta_w * \frac{W_{pl,y} * f_y}{\gamma_{M1}};$$

Tel que : $\beta_w = 1$ (pour une section de classe 1 ou 2).

Le coefficient de réduction X_{LT} pour le déversement est déterminé en fonction de l'élançement réduit $\bar{\lambda}_{LT}$ de l'élément vis-à-vis du déversement et à pour valeur :

$$X_{LT} = \frac{1}{\varphi_{LT} + [\varphi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2]^{0.5}}, \quad \text{mais : } X_{LT} \leq 1.$$

- L'élançement réduit $\bar{\lambda}_{LT}$ est donnée par la formule suivante : (§ F.2, Annexe F de l'Eurocode)

$$\bar{\lambda}_{LT} = \left[\frac{\beta_w * W_{pl,y} * f_y}{M_{cr}} \right]^{0.5} = \left[\frac{\lambda_{LT}}{\lambda_1} \right] * [\beta_w]^{0.5};$$

$$\text{Où : } \lambda_1 = \pi * \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 93.9 * \varepsilon; \quad \text{et : } \varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = \sqrt{\frac{235}{235}} = 1;$$

$$\Rightarrow \lambda_1 = 93.9 * \varepsilon = 93.9 * 1 = 93.9.$$

$$\text{Et : } \lambda_{LT} = \frac{\frac{L}{i_z}}{C_1^{0.5} * \left[1 + \frac{1}{20} * \left(\frac{\frac{L}{i_z}}{\frac{h}{t_f}} \right)^2 \right]^{0.25}};$$

Et on tire pour un IPE 160 :

$$i_z = 1.84 \text{ cm}; \quad h = 16 \text{ cm}; \quad t_f = 0.74 \text{ cm};$$

$$\text{et } W_{pl,y} = 124 \text{ cm}^3.$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow \lambda_{LT} &= \frac{\frac{L}{i_z}}{C_1^{0.5} * \left[1 + \frac{1}{20} * \left(\frac{\frac{L}{i_z}}{\frac{h}{t_f}} \right)^2 \right]^{0.25}} \\ &= \frac{\frac{500}{1.84}}{1.132^{0.5} * \left[1 + \frac{1}{20} * \left(\frac{\frac{500}{1.84}}{\frac{16}{0.74}} \right)^2 \right]^{0.25}} = 147.88. \end{aligned}$$

$$\text{D'où on aura : } \bar{\lambda}_{LT} = \left[\frac{\lambda_{LT}}{\lambda_1} \right] * [\beta_w]^{0.5} = \left[\frac{147.88}{93.9} \right] * [1]^{0.5} = 1.57.$$

- φ_{LT} est donné par la formule suivante :

$$\varphi_{LT} = 0.5 * [1 + \alpha_{LT} * (\bar{\lambda}_{LT} - 0.2) + \bar{\lambda}_{LT}^2];$$

Où : $\alpha_{LT} = 0.21$, (on a un profil laminé).

D'où on aura :

$$\begin{aligned} \varphi_{LT} &= 0.5 * [1 + \alpha_{LT} * (\bar{\lambda}_{LT} - 0.2) + \bar{\lambda}_{LT}^2] \\ &= 0.5 * [1 + 0.21 * (1.57 - 0.2) + 1.57^2] = 1.88. \end{aligned}$$

- X_{LT} :

$$\begin{aligned} \Rightarrow X_{LT} &= \frac{1}{\varphi_{LT} + [\varphi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2]^{0.5}} = \frac{1}{1.88 + [1.88^2 - 1.57^2]^{0.5}} \\ &= 0.34. \end{aligned}$$

Donc on aura :

$$\begin{aligned} M_{dev} &= X_{LT} * \beta_w * \frac{W_{pl,y} * f_y}{\gamma_{M1}} \\ &= 0.34 * 1 * \frac{124 * 2350 * 10^{-2}}{1.1} = 907.56 \text{ Kg.m.} \end{aligned}$$

Ce qui fait que :

- { 1 → $M_{uy,1} \leq M_{dev} \Rightarrow 535.537 \leq 907.56$ *vérifier.*
 { 2 → $M_{uy,2} \leq M_{dev} \Rightarrow 2604.31 \leq 907.56$ *non vérifier.*

On augmente la section : (soit IPE 270)

Et on tire pour un IPE 270 :

$$i_z = 3.02 \text{ cm}; \quad h = 27 \text{ cm}; \quad t_f = 1.02 \text{ cm};$$

$$\text{et } W_{pl,y} = 484 \text{ cm}^3.$$

$$\lambda_{LT} = \frac{\frac{L}{i_z}}{C_1^{0.5} * \left[1 + \frac{1}{20} * \left(\frac{\frac{L}{i_z}}{\frac{h}{t_f}} \right)^2 \right]^{0.25}}$$

$$= \frac{\frac{500}{3.02}}{1.132^{0.5} * \left[1 + \frac{1}{20} * \left(\frac{500}{\frac{3.02}{1.02}} \right)^2 \right]^{0.25}} = 118.67.$$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \left[\frac{\lambda_{LT}}{\lambda_1} \right] * [\beta_w]^{0.5} = \left[\frac{118.67}{93.9} \right] * [1]^{0.5} = 1.26.$$

$$\begin{aligned} \varphi_{LT} &= 0.5 * \left[1 + \alpha_{LT} * (\bar{\lambda}_{LT} - 0.2) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right] \\ &= 0.5 * \left[1 + 0.21 * (1.26 - 0.2) + 1.26^2 \right] = 1.41. \end{aligned}$$

$$X_{LT} = \frac{1}{\varphi_{LT} + \left[\varphi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2 \right]^{0.5}} = \frac{1}{1.41 + \left[1.41^2 - 1.26^2 \right]^{0.5}} = 0.49.$$

Donc on aura :

$$\begin{aligned} M_{dev} &= X_{LT} * \beta_w * \frac{W_{pl,y} * f_y}{\gamma_{M1}} \\ &= 0.49 * 1 * \frac{484 * 2350 * 10^{-2}}{1.1} = 5078.7 \text{ Kg.m.} \end{aligned}$$

Ce qui fait que :

$$\begin{cases} 1 \rightarrow M_{uy,1} \leq M_{dev} \Rightarrow 535.537 \leq 5078.7 \dots\dots\dots \text{vérifier.} \\ 2 \rightarrow M_{uy,2} \leq M_{dev} \Rightarrow 2604.31 \leq 5078.7 \dots\dots\dots \text{vérifier.} \end{cases}$$

Donc on garde le : IPE 270

D'où on aura le poids propre réel (G) :

$$G = (14 + 5) * 2.52 + 36.1 = 83.98 \text{ Kg/ml.}$$

Avec :

- $G_z = G * \cos 7.6^\circ = 83.98 * \cos 7.6^\circ = 83.24 \text{ Kg/ml.}$
- $G_y = G * \sin 7.6^\circ = 83.98 * \sin 7.6^\circ = 11.1 \text{ Kg/ml.}$

Et :

- $V_G = (G_z * l) / 2 = (83.24 * 5) / 2 = 208.1 \text{ Kg.}$

4.1.4.4 Vérification à la flèche

Le calcul de la flèche se fait par la combinaison de charges et surcharges de services (non pondérées) :

Les combinaisons de calcul à l'ELS sont :

- $G_z + V_z = 83.24 - 597.668 = -514.428 \text{ Kg/ml}$;
- $G_y + N_y = 11.1 + 7.66 = 18.76 \text{ Kg/ml}$;

Et on tire pour un IPE 270 :

$$I_y = 5790 \text{ cm}^4; \quad I_z = 420 \text{ cm}^4.$$

La vérification à faire est : $f \leq f_{ad}$.

- Flèche verticale : (sur deux appuis)

$$\begin{aligned} f_z \leq f_{ad} &\Rightarrow \frac{5}{384} * \frac{Q_z * l^4}{E * I_y} \leq \frac{l}{200} \\ &\Rightarrow \frac{5}{384} * \frac{514.428 * 10^{-2} * 500^4}{2.1 * 10^6 * 5790} \leq \frac{500}{200} \\ &\Rightarrow 0.344 \leq 2.5 \dots \dots \dots \text{vérifier.} \end{aligned}$$

- Flèche latérale : (sur trois appuis)

$$\begin{aligned} f_y \leq f_{ad} &\Rightarrow \frac{2.05}{384} * \frac{Q_y * \left(\frac{l}{2}\right)^4}{E * I_z} \leq \frac{l}{200} \\ &\Rightarrow \frac{2.05}{384} * \frac{18.76 * 10^{-2} * 250^4}{2.1 * 10^6 * 420} \leq \frac{250}{200} \\ &\Rightarrow 0.004 \leq 1.25 \dots \dots \dots \text{Vérifier.} \end{aligned}$$

4.1.5 Conclusion

Le profilé choisit IPE 270 convient pour les pannes.

4.2 Calcul des liernes

4.2.1 Introduction

Les liernes sont des tirants qui fonctionnent en traction, ils sont généralement formés de barre ronde ou de petite cornières, leurs rôle principal est d'éviter la déformation latérale des pannes.

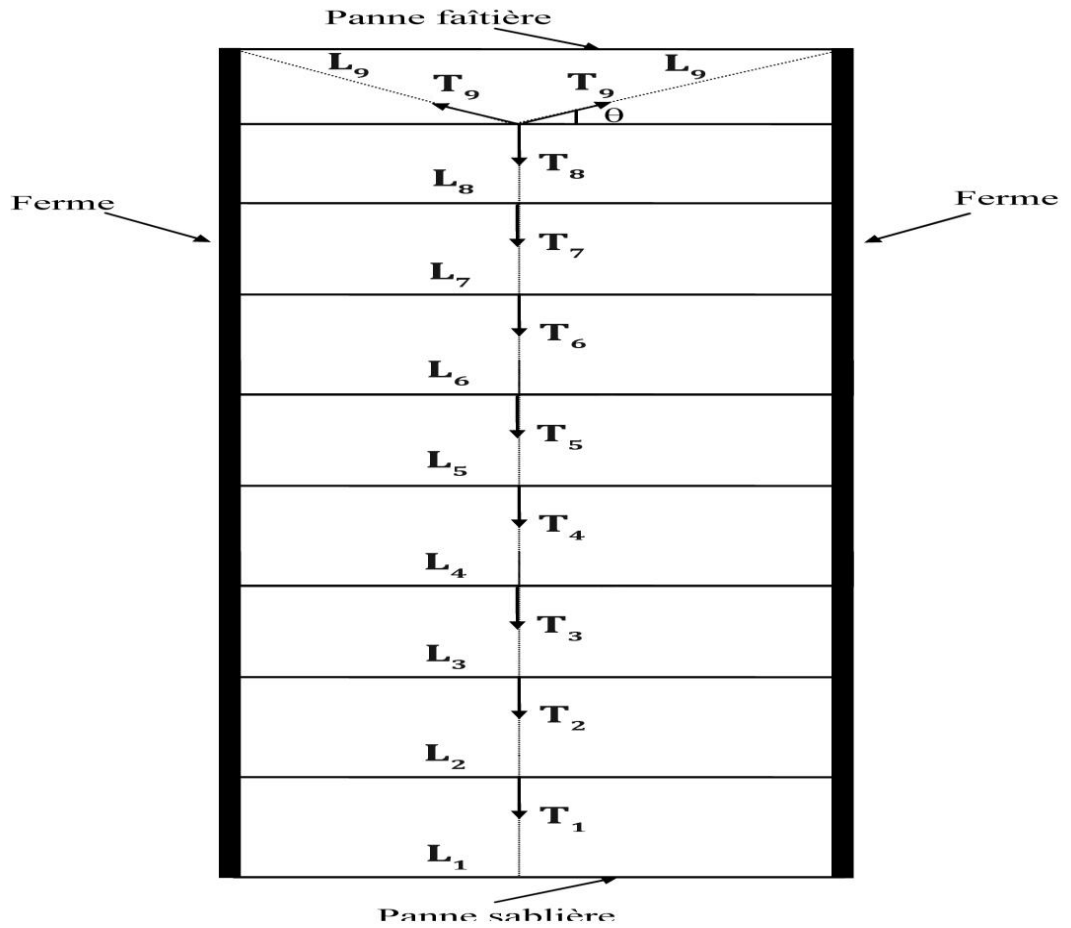


Figure 15. Schéma statique de la lierne et des efforts lui revenant.

4.2.2 Calcul de l'effort maximal revenant aux liernes

❖ La réaction R au niveau de la lierne :

$$R = 1.25 * Q_y * \frac{l}{2} = 1.25 * 18.76 * \frac{5}{2} = 58.625 \text{ Kg.}$$

$$Q_y = 18.76 \text{ kg/ml}$$

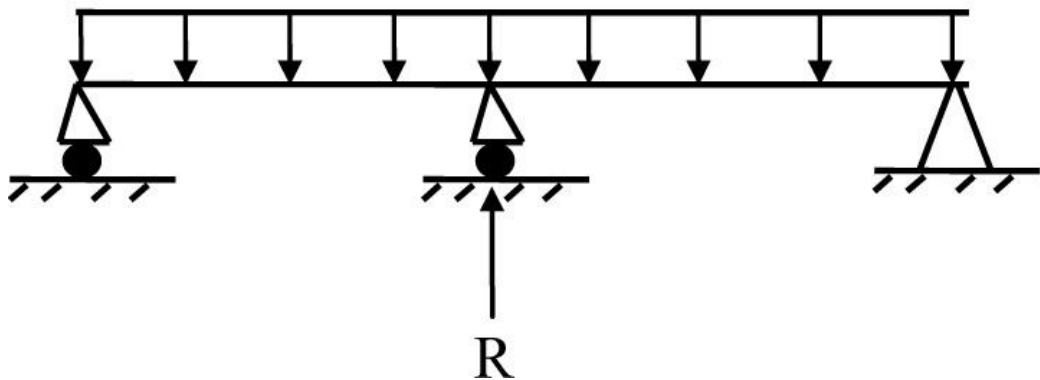


Figure 16. Schéma statique représentant la réaction R.

- L'effort de traction dans le tronçon de lierne L_1 provenant de la panne sablière :

$$T_1 = \frac{R}{2} = \frac{58.625}{2} = 29.31 \text{ Kg.}$$

- L'effort dans le tronçon L_2 :

$$T_2 = R + T_1 = 58.625 + 29.31 = 87.93 \text{ Kg.}$$

- L'effort dans le tronçon L_3 :

$$T_3 = R + T_2 = 58.625 + 87.93 = 146.56 \text{ Kg.}$$

- L'effort dans le tronçon L_4 :

$$T_4 = R + T_3 = 58.625 + 146.56 = 205.18 \text{ Kg.}$$

- L'effort dans le tronçon L_5 :

$$T_5 = R + T_4 = 58.625 + 205.18 = 263.81 \text{ Kg.}$$

- L'effort dans le tronçon L_6 :

$$T_6 = R + T_5 = 58.625 + 263.81 = 322.43 \text{ Kg.}$$

- L'effort dans le tronçon L_7 :

$$T_7 = R + T_6 = 58.625 + 322.43 = 381.06 \text{ Kg.}$$

- L'effort dans le tronçon L_8 :

$$T_8 = R + T_7 = 58.625 + 381.06 = 439.68 \text{ Kg.}$$

- L'effort dans le tronçon L_9 (Bretelle) :

On a : $T_8 = 2 * T_9 * \sin \theta$.

Avec : $\theta = \arctg 2.52/5 = 26.748^\circ$.

$$\Rightarrow T_9 = \frac{T_8}{2 * \sin \theta} = \frac{439.68}{2 * \sin 26.748^\circ} = 488.468 \text{ Kg.}$$

Remarque :

Les efforts de traction sollicitant les liernes ne peuvent pas être attachés aux pannes faitières, qui périraient transversalement. Ils sont donc transmis aux fermes par des tirants en diagonales (bretelles).

4.2.3 Dimensionnement des liernes

Le tronçon le plus sollicité est : L_9 avec : $T_9 = 488.468 \text{ Kg.}$

Traction simple :

Il faut vérifier la relation suivante : $N \leq N_{pl}$.

$$\text{Avec : } N = T_9 = 488.468 \text{ Kg}; \quad \text{Et : } N_{pl} = \frac{A * f_y}{\gamma_{M1}}$$

D'où on a :

$$N \leq N_{pl} \Rightarrow T_9 \leq \frac{A * f_y}{\gamma_{M1}} \Rightarrow A \geq \frac{T_9 * \gamma_{M1}}{f_y}$$

$$\Rightarrow A \geq \frac{488.468 * 1.1}{2350} \Rightarrow A \geq 0.23 \text{ cm}^2.$$

$$\text{Avec : } A = \frac{\pi * \phi^2}{4};$$

$$\Rightarrow \phi \geq \sqrt{\frac{4 * 0.23}{\pi}} \Rightarrow \phi \geq 0.54 \text{ cm}.$$

Soit une barre ronde de diamètre : $\phi = 0.6 \text{ cm}$.

Mais pour des raisons pratiques et pour plus de sécurité, on opte pour une barre de diamètre : $\phi = 1 \text{ cm} = 10 \text{ mm}$.

4.3 Calcul de l'échantignolle

4.3.1 Introduction

Les échantignoles servent à attacher les pannes aux fermes en traverses. Le principal effort de résistance de l'échantignolle est le moment de renversement dû au chargement (soulèvement du vent essentiellement)

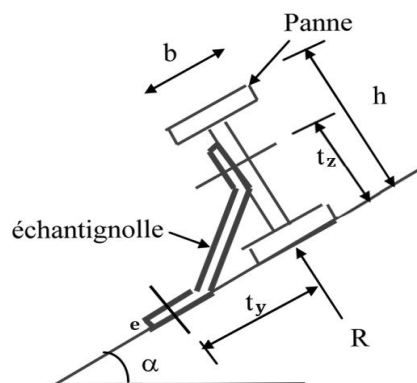


Figure 17. Schéma statique de l'échantignolle tenant la panne sur la toiture.

4.3.2 Détermination des sollicitations

4.3.2.1 Calcul des réactions R_z et R_y

$$R_{ZG} = 2 * V_G = 2 * 208.1 = 416.2 \text{ Kg.}$$

$$R_{YG} = 2 * \frac{G_y * l}{2} = 2 * \frac{11.1 * 5}{2} = 55.5 \text{ Kg.}$$

$$R_{ZP'} = P' * \cos 7.6^\circ = 100 * \cos 7.6^\circ = 99.12 \text{ Kg.}$$

$$R_{YP'} = P' * \sin 7.6^\circ = 100 * \sin 7.6^\circ = 13.22 \text{ Kg.}$$

$$R_{ZV} = 2 * V_z * \frac{l}{2} = 2 * (-597.668) * \frac{5}{2} = -2988.34 \text{ Kg.}$$

D'où on aura :

$$\left\{ \begin{array}{l} 1 \rightarrow V_z = 1.35 * R_{ZG} + 1.5 * R_{ZP'} = 1.35 * 416.2 + 1.5 * 99.12 = 148.68 \text{ Kg.} \\ V_y = 1.35 * R_{YG} + 1.5 * R_{YP'} = 1.35 * 55.5 + 1.5 * 13.22 = 94.755 \text{ Kg.} \\ 2 \rightarrow V_z = R_{ZG} + 1.5 * R_{ZV} = 416.2 - 1.5 * 2988.34 = -4066.31 \text{ Kg.} \\ V_y = 1.35 * R_{YG} = 1.35 * 55.5 = 74.925 \text{ Kg.} \end{array} \right.$$

4.3.2.2 Les bras de levier

Et on tire pour un IPE 270 : $b = 13.5 \text{ cm}$; $h = 27 \text{ cm}$.

$$\Rightarrow t_z = \frac{h}{2} = \frac{27}{2} = 13.5 \text{ cm.}$$

$$\Rightarrow 2 * \frac{b}{2} \leq t_y \leq 3 * \frac{b}{2} \Rightarrow 2 * \frac{13.5}{2} \leq t_y \leq 3 * \frac{13.5}{2} \\ \Rightarrow 13.5 \leq t_y \leq 20.25 \text{ cm.}$$

Donc soit : $\begin{cases} t_z = 13.5 \text{ cm.} \\ t_y = 20.5 \text{ cm.} \end{cases}$

4.3.2.3 Les moments de renversement

On a : $M_r = V_z * t_y + V_y * t_z$.

$$\Rightarrow \begin{cases} 1 \rightarrow M_r = 148.68 * 20.5 - 94.755 * 13.5 = 4327.13 \text{ Kg.cm} \\ 2 \rightarrow M_r = 4066.31 * 20.5 + 74.925 * 13.5 = 84370.84 \text{ Kg.cm} \end{cases}$$

4.3.3 Dimensionnement de l'échantignolle

Flexion simple :

la vérification à faire est : $M \leq M_{el}$.

$$\text{avec : } M = M_r; \quad M_{el} = \frac{W_{el} * f_y}{\gamma_{M1}}$$

Calcul de l'épaisseur de l'échantignolle :

On a :

$$\begin{aligned} M \leq M_{el} \Rightarrow M_r &\leq \frac{W_{el} * f_y}{\gamma_{M1}} \Rightarrow W_{el} \geq \frac{M_r * \gamma_{M1}}{f_y} \\ &\Rightarrow W_{el} \geq \frac{84370.84 * 1.1}{2350} \\ &\Rightarrow W_{el} \geq 39.49 \text{ cm}^3 \end{aligned}$$

$$\text{Avec : } W_{el} = \frac{a * e^2}{6}; \quad (\text{pour les sections rectangulaires}).$$

$$\Rightarrow e \geq \sqrt{\frac{6 * W_{el}}{a}} \Rightarrow e \geq \sqrt{\frac{6 * 39.49}{30}} \Rightarrow e \geq 2.81 \text{ cm.}$$

Soit : $e = 4 \text{ cm}$.

Remarque :

La largeur de l'échantignolle ($a = 30 \text{ cm}$) est calculée après avoir dimensionné la section des traverses qui forment les portiques.

4.4 Calcul des lisses de bardages

4.4.1 Introduction

Les lisses de bardages sont constituées de poutrelles profilées en IPE, UAP ou de profils minces pliés. Elles sont disposées horizontalement, et portent sur les poteaux de portiques ou éventuellement sur des potelets intermédiaires.

Les lisses de bardages sont destinées à reprendre les efforts du vent sur le bardage, et sont posées naturellement pour présenter leur inertie maximale dans le plan horizontal.

L'entre axe des lisses de bardages est déterminé par la portée admissible des bacs de bardages.

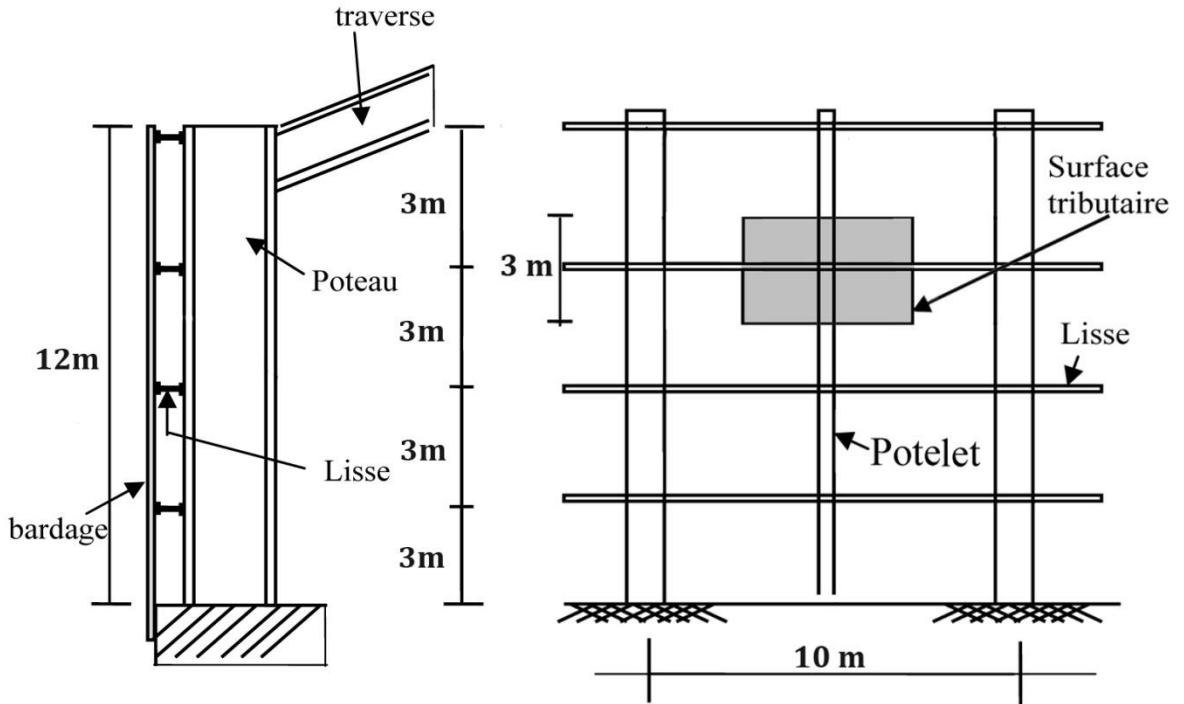


Figure 18. Schéma statique des lisses de bardage.

4.4.2 Détermination des sollicitations

Dans notre cas on a :

- Les lisses de bardages sont de longueur 5.0 m ;
- L'entre axe entre les lisses de bardages est de 3.0 m ;

4.4.2.1 Evaluation des charges et surcharges

1. Charges permanentes (G) : (perpendiculaire à l'âme)

- Le poids du bardage supporté (panneau sandwich).....14 Kg/m² ;
- Le poids des accessoires de pose.....5 Kg/m².
- Le poids propre de la lisse de bardage (à déterminer).

D'où on a : $G = (14 + 5) * 3 = 57 \text{ Kg/ml}$.

2. Surcharges climatique du vent (V) : (dans le plan de l'âme)

Vent normal : $V = -151.635 \text{ Kg/m}^2$ (voir étude au vent).

D'où on a :

$$V_n = -151.635 * 3 = -454.905 \text{ Kg/ml}.$$

4.4.3 Pré dimensionnement des lisses de bardages

Le pré dimensionnement se fait par la condition de flèche :

La vérification à faire est : $f \leq f_{ad}$.

- Flèche latérale : (sous le vent (V))

$$\begin{aligned}f_z \leq f_{ad} &\Rightarrow \frac{5}{384} * \frac{q_z * l^4}{E * I_y} \leq \frac{l}{200} \\&\Rightarrow I_y \geq \frac{200 * 5}{384} * \frac{q_z * l^4}{E * l} \\&\Rightarrow I_y \geq \frac{200 * 5}{384} * \frac{454.905 * 10^{-2} * 500^4}{2.1 * 10^6 * 500} \\&\Rightarrow I_y \geq 705.14 \text{ cm}^4\end{aligned}$$

On choisit un : IPE 160 (avec : $I_y = 869 \text{ cm}^4$);

D'où on aura le poids propre réel (G) :

$$G = (14 + 5) * 3 + 15.8 = 72.8 \text{ Kg/ml.}$$

4.4.4 Dimensionnement des lisses de bardages

❖ Détermination des sollicitations :

- Moments :

$$1 \rightarrow \begin{cases} M_z = \frac{G * l^2}{8} = \frac{72.8 * 5^2}{8} = 227.5 \text{ Kg.m.} \\ M_y = \frac{V_n * l^2}{8} = \frac{454.905 * 5^2}{8} = 1421.57 \text{ Kg.m.} \end{cases}$$

- Efforts tranchants :

$$1 \rightarrow \begin{cases} V_y = V_G = \frac{G * l}{2} = \frac{72.8 * 5}{2} = 182 \text{ Kg.} \\ V_z = V_V = \frac{V_n * l}{2} = \frac{-454.905 * 5}{2} = -1137.26 \text{ Kg} \end{cases}$$

❖ Principe de dimensionnement :

Les lisses de bardages sont dimensionnées par le calcul pour satisfaire aux conditions suivantes :

4.4.4.1 Vérification au moment ultime

Calcul en plasticité : (Section de classe 1 et 2)

$$\text{La vérification à faire est : } \left(\frac{M_y}{M_{pl,y}} \right)^\alpha + \left(\frac{M_z}{M_{pl,z}} \right)^\beta \leq 1.0.$$

Où α et β sont des constantes qui placent en sécurité si elles sont prises égales à l'unité, mais qui peuvent prendre les valeurs suivantes :

Pour les sections en I et H : $\alpha = 2$ et $\beta = 5 * n \geq 1$ avec $n = N/N_{pl}$;

Dans notre cas l'effort normal $N = 0 \Rightarrow \beta = 1$.

Et pour notre profilé (IPE 160) on a :

On tire pour un IPE 160 :

$$b = 82 \text{ mm} \quad ; \quad h_i = 145.2 \text{ mm} \quad ; \quad t_f = 7.4 \text{ mm} \quad ; \quad t_w = 5 \text{ mm}.$$

$$W_{el,y} = 109 \text{ cm}^3 \quad ; \quad W_{el,z} = 16.7 \text{ cm}^3;$$

$$W_{pl,y} = 124 \text{ cm}^3 \quad ; \quad W_{pl,z} = 26.1 \text{ cm}^3.$$

❖ La classe de la section :

- Vérification de la semelle :

$$\text{La vérification à faire est : } \frac{b}{2 * t_f} \leq 10 * \varepsilon.$$

$$\text{Avec : } \varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = \sqrt{\frac{235}{235}} = 1;$$

$$\Rightarrow \frac{b}{2 * t_f} \leq 10 * \varepsilon \Rightarrow \frac{82}{2 * 7.4} \leq 10 * 1 \Rightarrow 5.54 \leq 10 \dots \dots \dots \text{Vérifier.}$$

- Vérification de l'âme :

$$\text{La vérification à faire est : } \frac{h_i}{t_w} \leq 72 * \varepsilon.$$

$$\Rightarrow \frac{h_i}{t_w} \leq 72 * \varepsilon \Rightarrow \frac{145.2}{5} \leq 72 * 1 \Rightarrow 29.04 \leq 72 \dots \dots \dots \text{Vérifier.}$$

Donc la section est de classe 1.

D'où on aura :

$$M_{pl,y} = \frac{W_{pl,y} * f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{124 * 2350 * 10^{-2}}{1.1} = 2649.09 \text{ Kg. m};$$

$$M_{pl,z} = \frac{W_{pl,z} * f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{26.1 * 2350 * 10^{-2}}{1.1} = 557.59 \text{ Kg. m.}$$

$$\Rightarrow \left(\frac{M_y}{M_{pl,y}} \right)^\alpha + \left(\frac{M_z}{M_{pl,z}} \right)^\beta \leq 1 \Rightarrow \left(\frac{1421.57}{2649.09} \right)^2 + \left(\frac{227.5}{557.59} \right)^1 \leq 1$$

$$\Rightarrow 0.695 \leq 1 \dots \dots \dots \text{Vérifier.}$$

4.4.4.2 Vérification au cisaillement

La vérification à faire est : $V_z \leq V_{pl,z}$.

$$\text{Avec : } V_{pl,z} = \frac{A_{vz} * \frac{f_y}{\sqrt{3}}}{\gamma_M};$$

Et on tire pour un IPE 160 :

$$A_{vz} = 9.66 \text{ cm}^2.$$

D'où on aura :

$$V_{pl,z} = \frac{A_{vz} * \frac{f_y}{\sqrt{3}}}{\gamma_M} = \frac{9.66 * \frac{2350}{\sqrt{3}}}{1.1} = 11914.93 \text{ Kg.}$$

$$V_z \leq V_{pl,z} \Rightarrow 1137.26 \text{ Kg} \leq 11914.93 \text{ Kg} \dots \dots \dots \text{Vérifier.}$$

4.4.4.3 Vérification au déversement

La vérification à faire est : $M_{uy} \leq M_{dev}$, (Chapitre 5.5.2, Eurocode 3).

$$\text{Avec : } M_{dev} = X_{LT} * \beta_w * \frac{W_{pl,y} * f_y}{\gamma_{M1}};$$

Tel que : $\beta_w = 1$ (pour une section de classe 1 ou 2).

Le coefficient de réduction X_{LT} pour le déversement est déterminé en fonction de L'élanement réduit $\bar{\lambda}_{LT}$ de l'élément vis-à-vis du déversement et à pour valeur :

$$X_{LT} = \frac{1}{\varphi_{LT} + [\varphi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2]^{0.5}}, \quad \text{mais : } X_{LT} \leq 1.$$

- L'élanement réduit $\bar{\lambda}_{LT}$ est donnée par la formule suivante : (§ F.2, Annexe F de l'Eurocode)

$$\bar{\lambda}_{LT} = \left[\frac{\beta_w * W_{pl,y} * f_y}{M_{cr}} \right]^{0.5} = \left[\frac{\lambda_{LT}}{\lambda_1} \right] * [\beta_w]^{0.5};$$

$$\text{Où : } \lambda_1 = \pi * \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 93.9 * \varepsilon; \quad \text{et : } \varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = \sqrt{\frac{235}{235}} = 1;$$

$$\Rightarrow \lambda_1 = 93.9 * \varepsilon = 93.9 * 1 = 93.9.$$

$$\text{Et : } \lambda_{LT} = \frac{\frac{L}{i_z}}{C_1^{0.5} * \left[1 + \frac{1}{20} * \left(\frac{\frac{L}{i_z}}{\frac{h}{t_f}} \right)^2 \right]^{0.25}};$$

Et on tire pour un IPE 160 :

$$i_z = 1.84 \text{ cm}; \quad h = 16 \text{ cm}; \quad t_f = 0.74 \text{ cm};$$

$$\text{et } W_{pl,y} = 124 \text{ cm}^3.$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow \lambda_{LT} &= \frac{\frac{L}{i_z}}{C_1^{0.5} * \left[1 + \frac{1}{20} * \left(\frac{\frac{L}{i_z}}{\frac{h}{t_f}} \right)^2 \right]^{0.25}} \\ &= \frac{\frac{500}{1.84}}{1.132^{0.5} * \left[1 + \frac{1}{20} * \left(\frac{\frac{500}{1.84}}{\frac{16}{0.74}} \right)^2 \right]^{0.25}} = 147.88. \end{aligned}$$

$$\text{D'où on aura : } \bar{\lambda}_{LT} = \left[\frac{\lambda_{LT}}{\lambda_1} \right] * [\beta_w]^{0.5} = \left[\frac{147.88}{93.9} \right] * [1]^{0.5} = 1.57.$$

- φ_{LT} est donné par la formule suivante :

$$\varphi_{LT} = 0.5 * \left[1 + \alpha_{LT} * (\bar{\lambda}_{LT} - 0.2) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right];$$

$$\text{Où : } \alpha_{LT} = 0.21, \quad (\text{on a un profil laminé}).$$

D'où on aura :

$$\varphi_{LT} = 0.5 * [1 + 0.21 * (1.57 - 0.2) + 1.57^2] = 1.88.$$

▪ X_{LT} :

$$\begin{aligned}\Rightarrow X_{LT} &= \frac{1}{\varphi_{LT} + [\varphi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2]^{0.5}} \\ &= \frac{1}{1.88 + [1.88^2 - 1.57^2]^{0.5}} = 0.34.\end{aligned}$$

Donc on aura :

$$\begin{aligned}M_{dev} &= X_{LT} * \beta_w * \frac{W_{pl,y} * f_y}{\gamma_{M1}} \\ &= 0.34 * 1 * \frac{124 * 2350 * 10^{-2}}{1.1} = 905.13 \text{ Kg.m.}\end{aligned}$$

Ce qui fait que :

$$M_{uy} \leq M_{dev} \Rightarrow 1421.57 \leq 905.13 \dots \dots \dots \text{ non vérifier.}$$

On augmente la section : (soit IPE 200)

Et on tire pour un IPE 200 :

$$i_z = 2.24 \text{ cm}; \quad h = 22 \text{ cm}; \quad t_f = 0.85 \text{ cm};$$

$$\text{et } W_{pl,y} = 221 \text{ cm}^3.$$

$$\begin{aligned}\lambda_{LT} &= \frac{\frac{L}{i_z}}{C_1^{0.5} * \left[1 + \frac{1}{20} * \left(\frac{\frac{L}{i_z}}{\frac{h}{t_f}} \right)^2 \right]^{0.25}} \\ &= \frac{\frac{500}{2.24}}{1.132^{0.5} * \left[1 + \frac{1}{20} * \left(\frac{\frac{500}{2.24}}{\frac{22}{0.85}} \right)^2 \right]^{0.25}} = 142.34.\end{aligned}$$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \left[\frac{\lambda_{LT}}{\lambda_1} \right] * [\beta_w]^{0.5} = \left[\frac{142.34}{93.9} \right] * [1]^{0.5} = 1.51.$$

$$\begin{aligned}\varphi_{LT} &= 0.5 * \left[1 + \alpha_{LT} * (\bar{\lambda}_{LT} - 0.2) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right] \\ &= 0.5 * \left[1 + 0.21 * (1.51 - 0.2) + 1.51^2 \right] = 1.78.\end{aligned}$$

$$X_{LT} = \frac{1}{\varphi_{LT} + [\varphi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2]^{0.5}} = \frac{1}{1.78 + [1.78^2 - 1.51^2]^{0.5}} = 0.36.$$

Donc on aura :

$$M_{dev} = X_{LT} * \beta_w * \frac{W_{pl,y} * f_y}{\gamma_{M1}}$$

$$= 0.36 * 1 * \frac{221 * 2350 * 10^{-2}}{1.1} = 1721.15 \text{ Kg.m.}$$

Ce qui fait que :

$$M_{uy} \leq M_{dev} \Rightarrow 1421.57 \leq 1721.15 \dots\dots\dots \text{vérifier.}$$

Donc on garde le : IPE 200

D'où on aura le poids propre réel (G) :

$$G = (14 + 5) * 3 + 22.4 = 79.4 \text{ Kg/ml.}$$

Avec :

$$M_z = \frac{G * l^2}{8} = \frac{79.4 * 5^2}{8} = 248.125 \text{ Kg/ml.}$$

$$V_y = V_G = \frac{G * l}{2} = \frac{79.4 * 5}{2} = 198.5 \text{ Kg.}$$

4.4.4.4 Vérification à la flèche

Et on tire pour un IPE 200 :

$$I_y = 1943 \text{ cm}^4; \quad I_z = 142 \text{ cm}^4.$$

La vérification à faire est : $f \leq f_{ad}$.

- Flèche latérale : (sous le vent (V))

$$f_z \leq f_{ad} \Rightarrow \frac{5}{384} * \frac{q_z * l^4}{E * I_y} \leq \frac{l}{200}$$

$$\Rightarrow \frac{5}{384} * \frac{454.905 * 10^{-2} * 500^4}{2.1 * 10^6 * 1943} \leq \frac{500}{200}$$

$$\Rightarrow 0.9 \leq 5 \dots\dots\dots \text{Vérifier.}$$

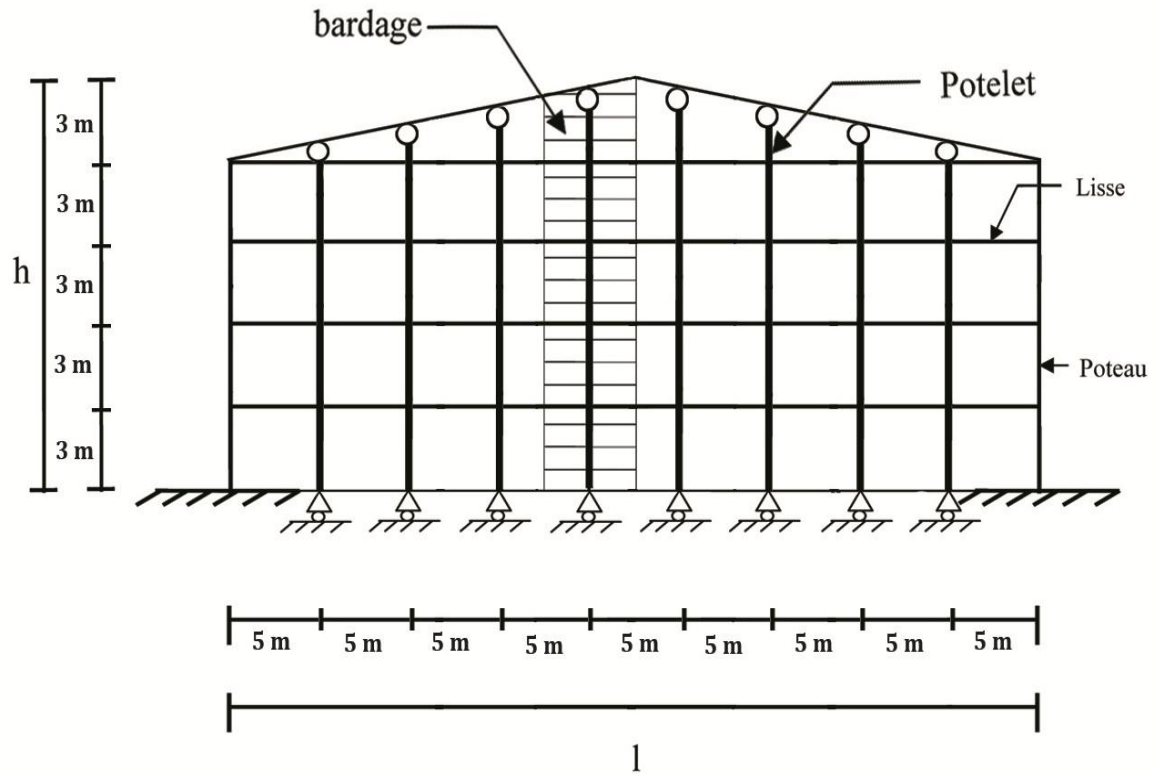


Figure 19. Représentation du potelet de pignon le plus haut et le plus chargé, et les charges qui lui reviennent.

4.5.2 Déterminations des sollicitations

Dans notre cas on a :

Le potelet le plus chargé a pour hauteur l_p :

Avec : $l_p = l_{p_1} + l_{p_2}$; tel que : $l_{p_1} = 12 \text{ m}$;

$$l_{p_2} = \frac{3}{22.5} * 20 = 2.67 \text{ m.}$$

$$\Rightarrow l_p = l_{p_1} + l_{p_2} = 12 + 2.67 = 14.67 \text{ m.}$$

4.5.2.1 Evaluation des charges et surcharges

1. Charges permanentes (G) : (verticales concentrées)

- Le poids propre de la lisse de bardage (IPE 200).....22.4 Kg/ml ;
- Le poids du bardage supporté (panneau sandwich).....14 Kg/m² ;
- Le poids propre du potelet (à déterminer).

D'où on a : $G = (22.4 * 5 * 4) + (14 * 5 * 14.67) = 1474.9 \text{ Kg.}$

2. Surcharges climatiques du vent (V) : (suivant le plan de l'âme)
 Vent normal : $V = -145.93 \text{ Kg/m}^2$ (voir étude au vent).

D'où on a :

$$V_n = -145.93 * 5 = -729.65 \text{ Kg/ml.}$$

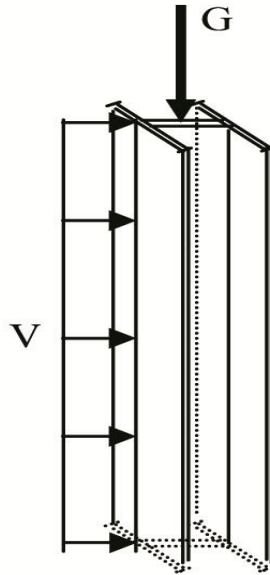


Figure 20. Représentation des charges et surcharges sur le potelet.

4.5.3 Pré dimensionnement des potelets

Le pré dimensionnement se fait par la condition de flèche :

La vérification à faire est : $f \leq f_{ad}$.

- Flèche latérale : (sous le vent (V))

$$\begin{aligned} f_z \leq f_{ad} &\Rightarrow \frac{5}{384} * \frac{q_z * l^4}{E * I_y} \leq \frac{l}{200} \\ &\Rightarrow I_y \geq \frac{200 * 5}{384} * \frac{q_z * l^4}{E * l} \\ &\Rightarrow I_y \geq \frac{200 * 5}{384} * \frac{729.65 * 10^{-2} * 1467^4}{2.1 * 10^6 * 1467} \\ &\Rightarrow I_y \geq 28566.32 \text{ cm}^4 \end{aligned}$$

On choisit un : HEB 320 (avec : $I_y = 30820 \text{ cm}^4$) ;

D'où on aura le poids propre réel (G) :

$$G = (22.4 * 5 * 4) + (14 * 5 * 14.67) + (127 * 14.67) = 3337.99 \text{ Kg.}$$

4.5.4 Dimensionnement des potelets

❖ Détermination des sollicitations :

▪ Moment :

$$M_y = \frac{V_n * l^2}{8} = \frac{729.65 * 14.67^2}{8} = 19628.39 \text{ Kg.m.}$$

▪ Effort tranchant :

$$V_z = V_V = \frac{V_n * l}{2} = \frac{-729.65 * 5}{2} = -1824.125 \text{ Kg.}$$

▪ Effort normal :

$$N_x = G = 3337.99 \text{ Kg.}$$

❖ Principe de dimensionnement :

Les potelets sont dimensionnés par le calcul pour satisfaire aux conditions suivantes :

4.5.4.1 Vérification au cisaillement

La vérification à faire est : $V_z \leq V_{pl,z}$.

$$\text{avec : } V_{pl,z} = \frac{A_{vz} * \frac{f_y}{\sqrt{3}}}{\gamma_M} ;$$

Et on tire pour un HEB 320 :

$$A_{vz} = 51.77 \text{ cm}^2.$$

D'où on aura :

$$V_{pl,z} = \frac{A_{vz} * \frac{f_y}{\sqrt{3}}}{\gamma_M} = \frac{51.77 * \frac{2350}{\sqrt{3}}}{1.1} = 63854.677 \text{ Kg.}$$

$$V_z \leq V_{pl,z} \Rightarrow 1824.125 \text{ Kg} \leq 63854.677 \text{ Kg} \dots \dots \dots \text{Vérifier.}$$

4.5.4.2 Vérification au flambement (sous N)

On tire pour un HEB 320 :

$$i_y = 13.82 \text{ cm} ; \quad i_z = 7.57 \text{ cm} ; \quad A = 161.3 \text{ cm}^2.$$

Calcul de l'élanement : il est donné par la formule suivante : $\lambda = l/i$;

Avec : l : longueur de flambement ; longueur entre appuis.

Tel que : $l_z = 14.67 \text{ m}$; $l_y = 3 \text{ m}$.

$$\Rightarrow \begin{cases} \lambda_z = \frac{l_z}{i_z} = \frac{1467}{7.57} = 193.79 \\ \lambda_y = \frac{l_y}{i_y} = \frac{300}{13.82} = 21.7 \end{cases}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \bar{\lambda}_z = \frac{\lambda_z}{93.9} = \frac{193.79}{93.9} = 2.06 \\ \bar{\lambda}_y = \frac{\lambda_y}{93.9} = \frac{21.7}{93.9} = 0.23 \end{cases}$$

D'où on a :

$\bar{\lambda}_{max} = \bar{\lambda}_z = 2.06 > 0.2 \rightarrow$ La vérification au flambement est nécessaire.

Et d'après le § 5.5.1 de l'Eurocode :

$$\text{La vérification à faire est : } N \leq X * \beta_A * A * \frac{f_y}{\gamma_{M1}}$$

Tel que : $\beta_A = 1$ (pour une section de classe 1,2 ou 3).

Le coefficient de réduction X pour le mode flambement, pour les éléments à section transversale constante, sollicités en compression axiale constante est déterminé en fonction de L'élancement réduit $\bar{\lambda}$ et à pour valeur :

$$X = \frac{1}{\varphi + [\varphi^2 - \bar{\lambda}^2]^{0.5}}, \quad \text{mais : } X \leq 1.$$

- L'élancement réduit $\bar{\lambda}$ est données par la formule suivante :

$$\bar{\lambda} = \left[\beta_A * A * \frac{f_y}{N_{cr}} \right]^{0.5} = \left[\frac{\lambda}{\lambda_1} \right] * [\beta_A]^{0.5};$$

$$\text{Où : } \lambda_1 = \pi * \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 93.9 * \varepsilon; \quad \text{et : } \varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = \sqrt{\frac{235}{235}} = 1;$$

$$\Rightarrow \lambda_1 = 93.9 * \varepsilon = 93.9 * 1 = 93.9.$$

$$\Rightarrow \bar{\lambda} = \left[\frac{\lambda}{\lambda_1} \right] * [\beta_A]^{0.5} = \left[\frac{2.06}{93.9} \right] * [1]^{0.5} = 0.022.$$

- φ est donné par la formule suivante :

$$\varphi = 0.5 * [1 + \alpha * (\bar{\lambda} - 0.2) + \bar{\lambda}^2];$$

Où : α (facteur d'imperfection) = 0.21, (on a un profil laminé).

D'où on aura :

$$\begin{aligned}\varphi &= 0.5 * [1 + \alpha * (\bar{\lambda} - 0.2) + \bar{\lambda}^2] \\ &= 0.5 * [1 + 0.21 * (0.022 - 0.2) + 0.022^2] = 0.48.\end{aligned}$$

▪ X :

$$\Rightarrow X = \frac{1}{\varphi + [\varphi^2 - \bar{\lambda}^2]^{0.5}} = \frac{1}{0.48 + [0.48^2 - 0.022^2]^{0.5}} = 1.039.$$

Donc on aura :

$$\begin{aligned}N \leq X * \beta_A * A * \frac{f_y}{\gamma_{M1}} &\Rightarrow 3337.99 \leq 1.039 * 1 * 161.3 * \frac{2350 * 10^{-2}}{1.1} \\ &\Rightarrow 3337.99 \leq 3581.89 \text{ Kg} \dots \dots \dots \text{vérifier.}\end{aligned}$$

4.5.4.3 Vérification à l'influence de l'effort normal

On tire pour un HEB 320 :

$$h = 32 \text{ cm}; \quad t_f = 2.05 \text{ cm}; \quad t_w = 1.15 \text{ cm} \quad \text{et} \quad A = 161.3 \text{ cm}^2.$$

La vérification à faire est : $N \leq \min(0.25 * N_{pl}; \quad 0.5 * A_w * f_y)$:

$$\text{Avec : } 0.25 * N_{pl} = 0.25 * A * f_y = 0.25 * 161.3 * 2350 = 94763.75 \text{ Kg};$$

$$\begin{aligned}0.5 * A_w * f_y &= 0.5 * ((32 - (2 * 2.05)) * 1.15) * 2350 \\ &= 37699.875 \text{ Kg};\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Rightarrow \min(0.25 * N_{pl}; \quad 0.5 * A_w * f_y) &= \min(94763.75; \quad 37699.875) \\ &= 37699.875 \text{ Kg}\end{aligned}$$

Ce qui fait que :

$$\begin{aligned}N \leq \min(0.25 * N_{pl}; \quad 0.5 * A_w * f_y) \\ \Rightarrow 1.35 * N_x \leq \min(0.25 * N_{pl}; \quad 0.5 * A_w * f_y) \\ \Rightarrow 1.35 * 3337.99 \leq 37699.875 \\ \Rightarrow 4506.28 \leq 37699.875 \text{ Kg} \dots \dots \dots \text{vérifier.}\end{aligned}$$

4.5.4.4 Vérification à la flèche

La vérification à la flèche est toujours vérifiée ; (déjà faite lors de l'étape du pré dimensionnement) (le profilé n'a pas changé).

4.5.5 Conclusion

Le profilé choisit HEB 320 convient pour les potelets.

CHAPITRE 5

MODELISATION ET ANALYSE DE LA STRUCTURE PAR LE LOGICIEL ROBOT

5.1 Introduction

La vérification de la stabilité et de la résistance d'ensemble de la structure, relève de l'analyse globale élastique, qui a été privilégiée par le DTR et le CCM 97, Car elle est la plus commode et la plus ré pondue pour une meilleure approche de la réalité, et cela est permis par la disponibilité de logiciels de plus en plus performants.

L'analyse de la structure est faite par le logiciel de calcul ROBOT.

❖ Description du logiciel :

Le logiciel ROBOT est un logiciel de calcul efficace qui permet, en utilisant la méthode des éléments finis la résolution des problèmes complexes par une analyse élastique statique et/ou dynamique.

❖ Principe de la méthode des éléments finis :

Le principe de base de la méthode des éléments finis est :

- De remplacer le problème continu par un problème discret, c'est à dire, remplacer le problème de degrés de liberté infini par un problème de degré de liberté fini.
- Remplacer le système d'équations différentielles aux dérivées partielles, par un système d'équations algébriques équivalent facilement solvable.

5.2 Modélisation de la structure

La structure est modélisée en utilisant des éléments poutres et barres, reliant les nœuds entre eux, et en définissant les caractéristiques géométriques et mécaniques des différents éléments.

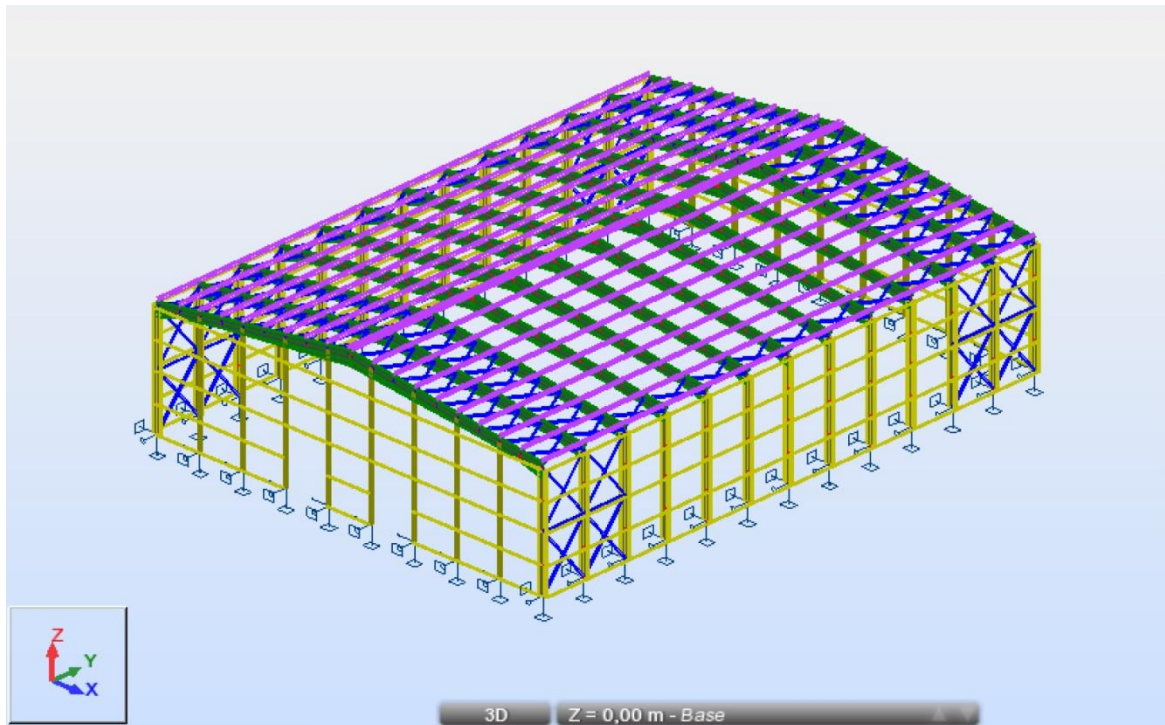


Figure 21. Vue 3D de la structure a modélisée avec ROBOT

5.3 Analyse de la structure

5.3.1 Type d'Analyse

L'analyse élastique globale, peut être statique ou dynamique, selon la satisfaction des conditions posées par les règlements en vigueur, sur les cas de chargement.

5.3.1.1 Les chargements statiques

- le poids propre de la structure.
- Les effets dus aux actions climatiques (selon le RNVA 99) sont des chargements statiques.

5.3.1.2 Les chargements dynamiques

- Les effets sismiques.

Dans notre cas on opte pour la méthode dynamique spectrale.

1. Méthode de calcul :

La méthode la plus couramment employée pour le calcul dynamique des structures, est basée sur l'utilisation des spectres de réponse.

❖ Principe de la méthode spectrale :

Le principe de cette méthode est de rechercher pour chaque mode de vibration, le maximum d'effets engendrés dans les structures, par les forces sismiques, représentées par un spectre de réponse de calcul, ces effets sont par la suite combinés pour obtenir la réponse de la structure.

❖ Spectre de réponse de calcul :

L'action sismique est représentée selon le RPA 99 par le spectre suivant :

$$\frac{S_a}{g} = \begin{cases} 1.25 * A * \left[1 + \frac{T}{T_1} * \left(2.5 * n * \frac{Q}{R} - 1 \right) \right] & 0 \leq T \leq T_1 \\ 2.5 * n * (1.25 * A) * \left(\frac{Q}{R} \right) & T_1 \leq T \leq T_2 \\ 2.5 * n * (1.25 * A) * \left(\frac{Q}{R} \right) * \left(\frac{T_2}{T} \right)^{\frac{2}{3}} & T_2 \leq T \leq 3.0 \text{ s} \\ 2.5 * n * (1.25 * A) * \left(\frac{Q}{R} \right) * \left(\frac{T_2}{3} \right)^{\frac{2}{3}} * \left(\frac{3}{T} \right)^{\frac{5}{3}} & T > 3.0 \text{ s} \end{cases}$$

Avec :

A : coefficient d'accélération de zone :

$$\begin{cases} \text{Zone IIa} \\ \text{Groupe d'usage 3} \end{cases} \rightarrow A = 0.10$$

D : facteur d'amplification dynamique moyen :

$$D = \begin{cases} 2.5 * n & 0 \leq T \leq T_2 \\ 2.5 * n * \left(\frac{T_2}{T} \right)^{\frac{2}{3}} & T_2 \leq T \leq 3.0 \text{ s} \\ 2.5 * n * \left(\frac{T_2}{3} \right)^{\frac{2}{3}} * \left(\frac{3}{T} \right)^{\frac{5}{3}} & T \geq 3.0 \text{ s} \end{cases}$$

Avec :

T :

$$T = C_T * h_n * 3/4$$

Tel que :

$$h_n = 15 \text{ m.}$$

$$C_{T_x} = 0.085 \text{ (Portiques autostables en acier).}$$

$$C_{T_y} = 0.05 \text{ (Contreventement assuré par des palées triangulées).}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} T_x = 0.085 * 15^{\frac{3}{4}} = 0.648 \\ T_y = 0.05 * 15^{\frac{3}{4}} = 0.381 \end{cases}$$

$T_1 ; T_2$: Périodes caractéristiques associées à la catégorie de site :

$$\text{On a un site } S_3 \text{ (site meuble)} \rightarrow \begin{cases} T_1 = 0.15 \text{ s} \\ T_2 = 0.5 \text{ s} \end{cases}$$

$$\text{D'où on a : } T_y = 0.381 < T_2 = 0.5 < T_x = 0.648 < 3.0 \text{ s.}$$

n : facteur de correction d'amortissement :

On a : $\varepsilon = 4\% \neq 5\%$ (portique en acier avec remplissage léger) :

$$\Rightarrow n = \sqrt{\frac{7}{2 + \varepsilon}} \geq 0.7 \Rightarrow n = 1.08 > 0.7$$

D'où on aura :

$$\rightarrow \begin{cases} D_x = 2.5 * n * \left(\frac{T_2}{T}\right)^{\frac{2}{3}} = 2.5 * 1.08 * \left(\frac{0.5}{0.648}\right)^{\frac{2}{3}} = 2.27 \\ D_y = 2.5 * n = 2.5 * 1.08 = 2.7 \end{cases}$$

R : coefficient de comportement global de la structure :

→ Sens longitudinal : $R_y = 4$ (contreventement par palées triangulées en X)

→ Sens transversal : $R_x = 4$ (contreventement par portique auto stable ordinaire)

Q : facteur de qualité :

$$Q = 1 + \sum_1^6 P_a$$

Critère " q " :	P_a
Conditions minimales sur les files porteuses :	0
Redondance en plan :	0
Régularité en plan :	0
Régularité en élévation :	0
Contrôle de qualité des matériaux :	0
Contrôle de la qualité de l'exécution :	0

D'où :

$$Q = 1 + \sum_1^6 P_a = 1 + 0 = 1$$

- Schématisation du spectre de réponse suivant X et Y :

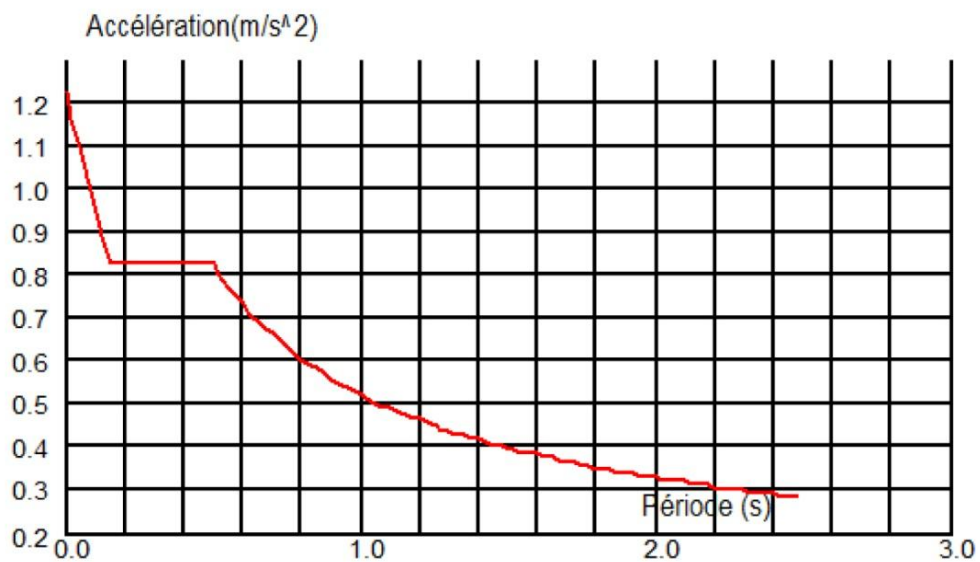


Figure 22. Schéma du spectre de réponse suivant X.



Figure 23. Schéma du spectre de réponse suivant Y.

Compte tenu de la complexité de ce type de structure et du nombre élevé de modes à considérer, l'emploi du logiciel de calcul ROBOT s'avère indispensable.

❖ Nombre de modes de vibrations à considérer :

Pour les structures représentées par des modèles plans dans deux directions orthogonales, le nombre de modes de vibration à retenir dans chacune des deux directions d'excitation doit être tel que :

- 1- La somme des masses modales effectives pour les modes retenus soit égale à 90 % au moins de la masse totale de la structure.
- 2- Ou que tous les modes ayant une masse modale effective supérieure à 5% de la masse totale de la structure soient retenus pour la détermination de la réponse totale de la structure.

Le minimum de modes à retenir est de trois (03) dans chaque direction considérée.

Dans le cas où les conditions décrites ci-dessus ne peuvent pas être satisfaites à cause de l'influence importante des modes de torsion, le nombre minimal de modes (K) à retenir doit être tel que :

$$K \geq 3 * \sqrt{N} \quad \text{et} \quad T_K \leq 0.2 \text{ s.}$$

Où :

N est le nombre de niveaux au dessus du sol et T_K la période du mode K.

❖ Résultante des forces sismiques de calcul

La résultante des forces sismiques à la base V_t obtenue par combinaison des valeurs modales ne doit pas être inférieure à 80% de la résultante des forces sismiques déterminée par la méthode statique équivalente V pour une valeur de la période fondamentale donnée par la formule empirique appropriée.

Si $V_t < 0.80 * V$, il faudra augmenter tous les paramètres de la réponse (forces, déplacements, moments,...) dans le rapport $0.80 * V/V_t$.

▪ Calcul de la force sismique totale à la base V :

Elle est donnée par la formule suivante :

$$V = \frac{A * D * Q}{R} * W$$

Avec :

W : poids total de la structure :

est égal à la somme des poids W_i , calculés à chaque niveau (i) :

$$W = \sum_{i=1}^n W_i \quad \text{Avec : } W_i = W_{Gi} + \beta * W_{Qi}$$

W_{Gi} : poids dû aux charges permanentes et à celles des équipements fixes éventuels, solidaires de la structure.

W_{Qi} : charges d'exploitation.

β : coefficient de pondération, fonction de la nature et de la durée de la charge d'exploitation.

Dans notre cas : $\beta = 0.5$

$$\Rightarrow W = W_1 = W_{G1} + \beta * W_{Q1} = 5621.36 + 0.5 * 240 = 5741.36 \text{ KN.}$$

Donc on aura :

$$\begin{cases} V_x = \frac{A * D_x * Q}{R_x} * W \Rightarrow V_x = \frac{0.1 * 2.27 * 1}{4} * 5741.36 = 325.82 \text{ KN} \\ V_y = \frac{A * D_y * Q}{R_y} * W \Rightarrow V_y = \frac{0.1 * 2.7 * 1}{4} * 5741.36 = 387.54 \text{ KN} \end{cases}$$

- Calcul de la force sismique totale à la base V_t :

On a : $V_{tx} = 297.76 \text{ KN}$; $V_{ty} = 237.87 \text{ KN}$.

Donc on doit avoir : $V_t \geq 0.80 * V$

$$\Rightarrow \begin{cases} V_{tx} \geq 0.80 * V_x \\ V_{ty} \geq 0.80 * V_y \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} 297.76 \geq 0.80 * 325.82 \\ 237.87 \geq 0.80 * 387.54 \end{cases}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} 297.76 \geq 260.65 \text{ KN} \dots \dots \dots \text{vérifié} \\ 237.87 \geq 310.03 \text{ KN} \dots \dots \dots \text{non vérifié} \end{cases}$$

Dans ce cas où la condition donnée par le RPA 99 n'est pas vérifiée par rapport à l'axe Y, il faudra multiplier tous les paramètres de la réponse (forces, déplacements, moments,...) par le facteur de pondération donné par $0.80 * V/V_t$.

$$\Rightarrow 0.8 * \frac{V_y}{V_{ty}} = 0.8 * \frac{387.54}{237.87} = 1.31$$

Dans notre cas au lieu de multiplier tous les paramètres de la réponse par un facteur de pondération de 1.31 suivant Y, on ajoute directement ce dernier aux paramètres du spectre de réponse. (on aura un V_{ty} égale à 311.6 KN)

2. Résultat de calcul :

- ❖ Pourcentage de participation de masse :

Les 90% du pourcentage de participation de masse ne sont atteintes qu'au bout du 71^{eme} mode suivant l'axe X, et du 178^{eme} mode suivant l'axe Y.

Pour représenter le comportement de la structure, on considère les 5 modes de vibration suivant :

Tableau 25. Pourcentage de participation de masse

Mode	T (s)	Masses cumulées suivant X	Masses cumulées suivant Y	Masses cumulées suivant Z
1	0.86	88.41	0.00	0.00
2	0.81	88.41	8.83	0.00
3	0.80	88.41	27.82	0.00
.				
.				
71	0.18	90.00	81.67	39.38
.				
.				
178	0.06	92.35	91.94	47.23

❖ Les réponses modales de la structure:

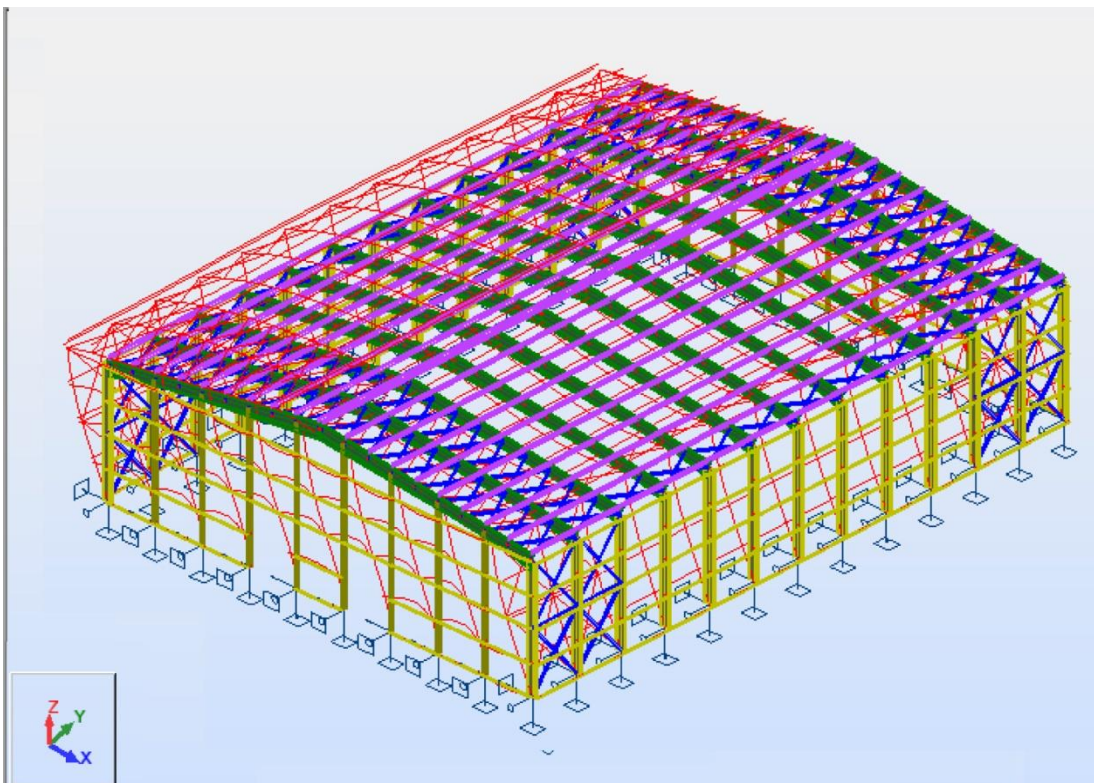


Figure 24. La déformée du mode 1.

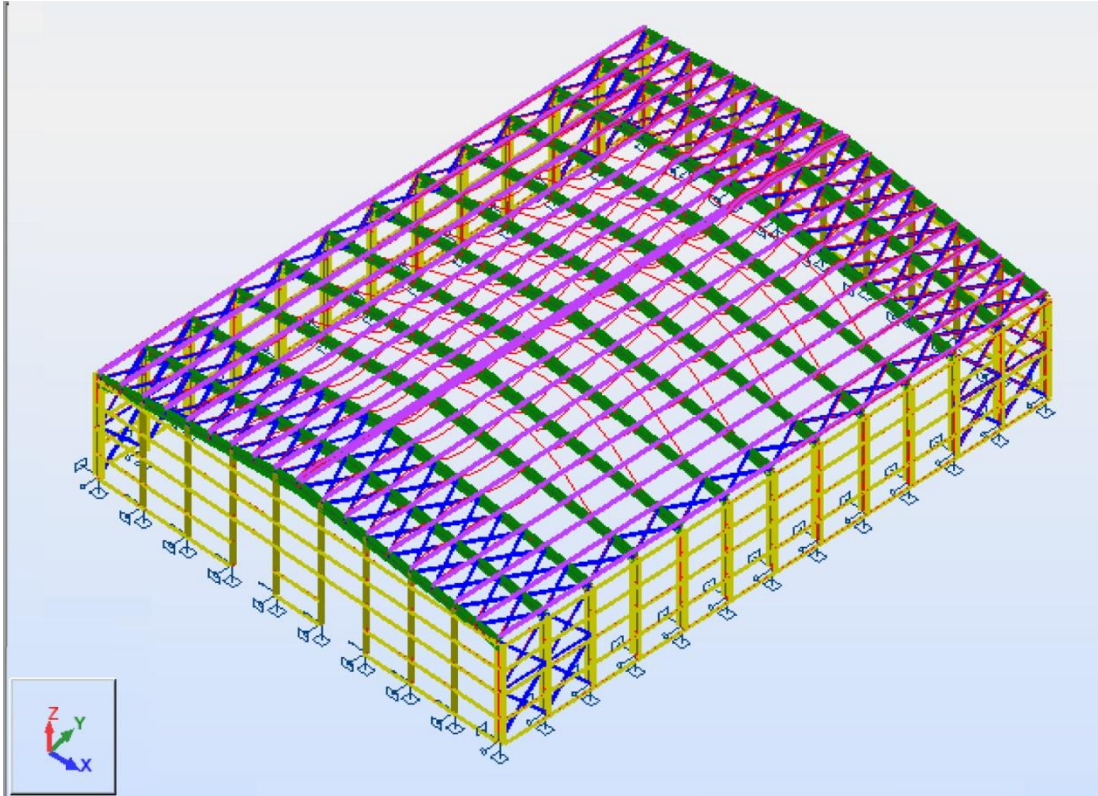


Figure 25. La déformée du mode 2.

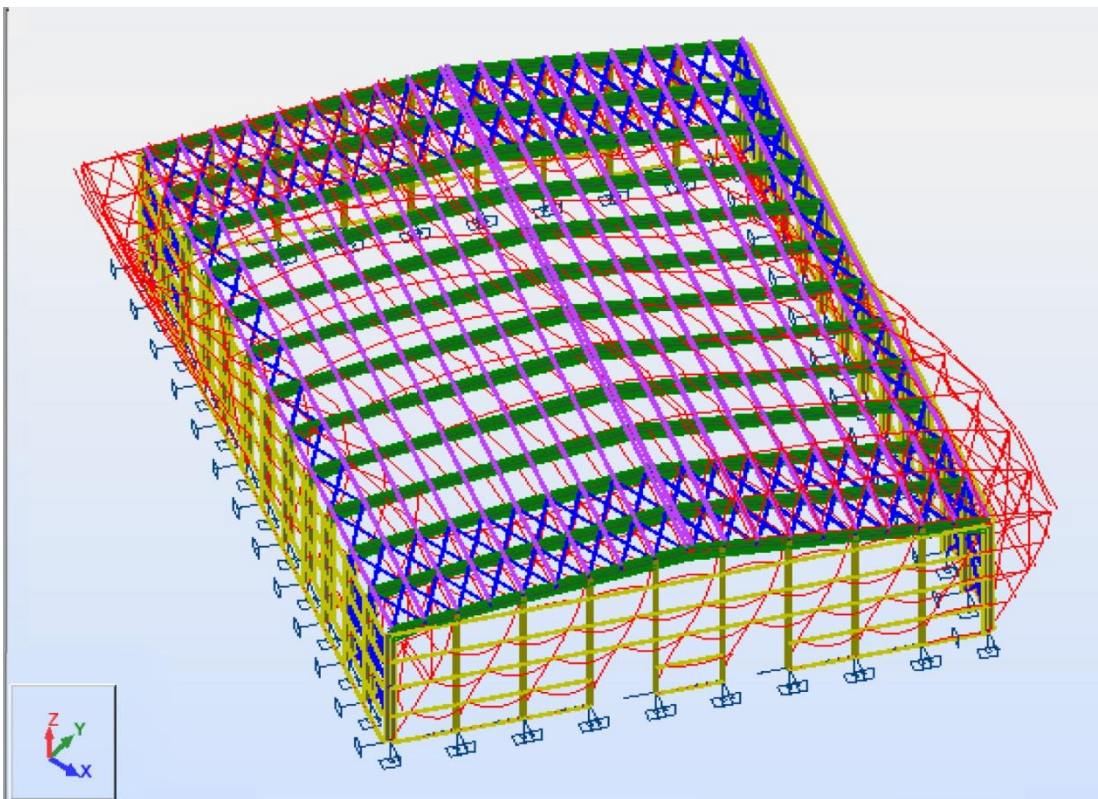


Figure 26. La déformée du mode 3.

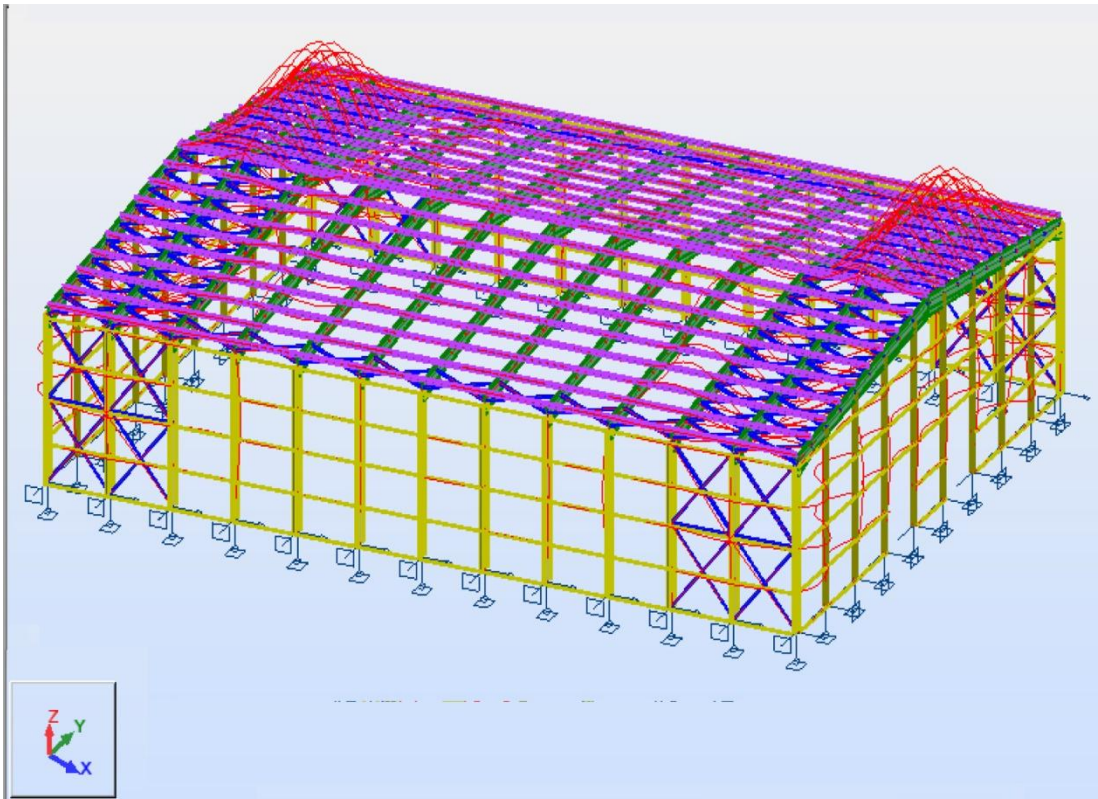


Figure 27. La déformée du mode 71.

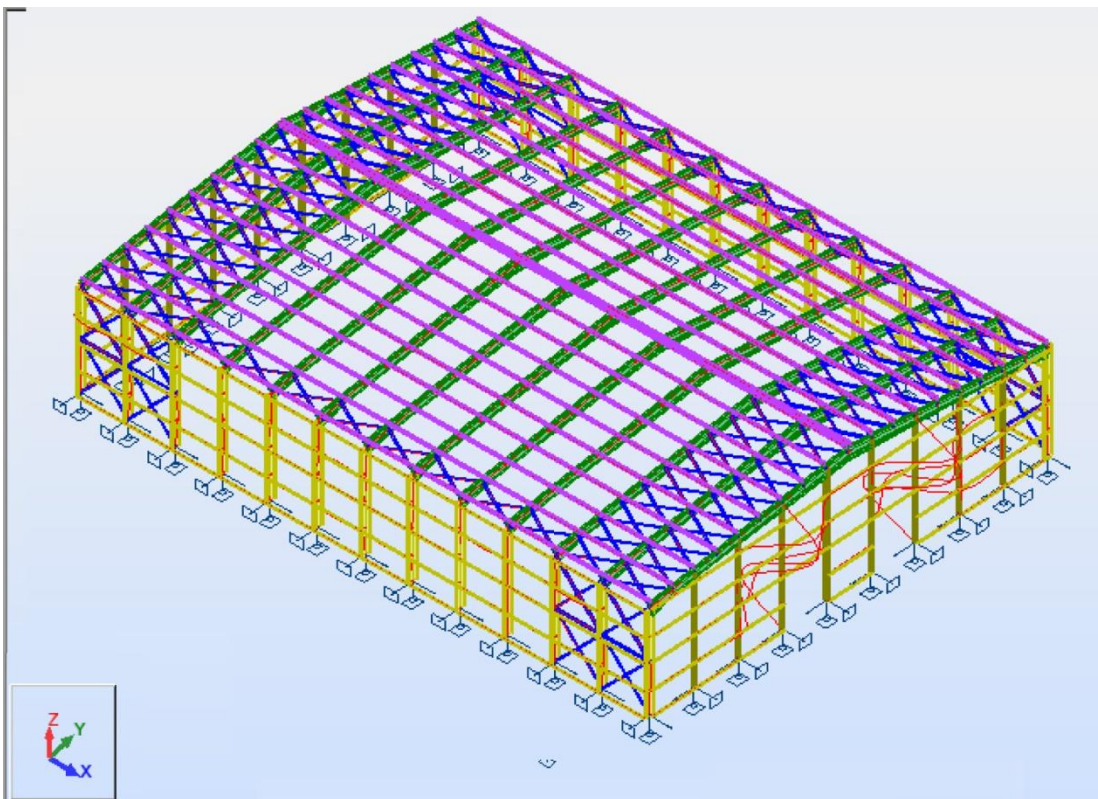


Figure 28. La déformée du mode 178.

CHAPITRE 6

VERIFICATION DES ELEMENTS DE LA STRUCTURE AVEC LE LOGICIEL ROBOT

6.1 Introduction

L'étude de portique nécessite au préalable l'évaluation de toutes les charges (permanentes, d'exploitations, sismiques et climatiques variables), les sollicitations obtenues servent à la vérification des éléments de la structure, au calcul des assemblages ainsi qu'à celui de l'infrastructure.

6.2 Vérification des éléments de la structure

6.2.1 Vérification des traverses

La verification se fait pour la traverse la plus sollicitée;

Et dans notre cas : la traverse la plus sollicitée est celle intermediaire n° 29 comme illustré en rouge sur la figure suivante :

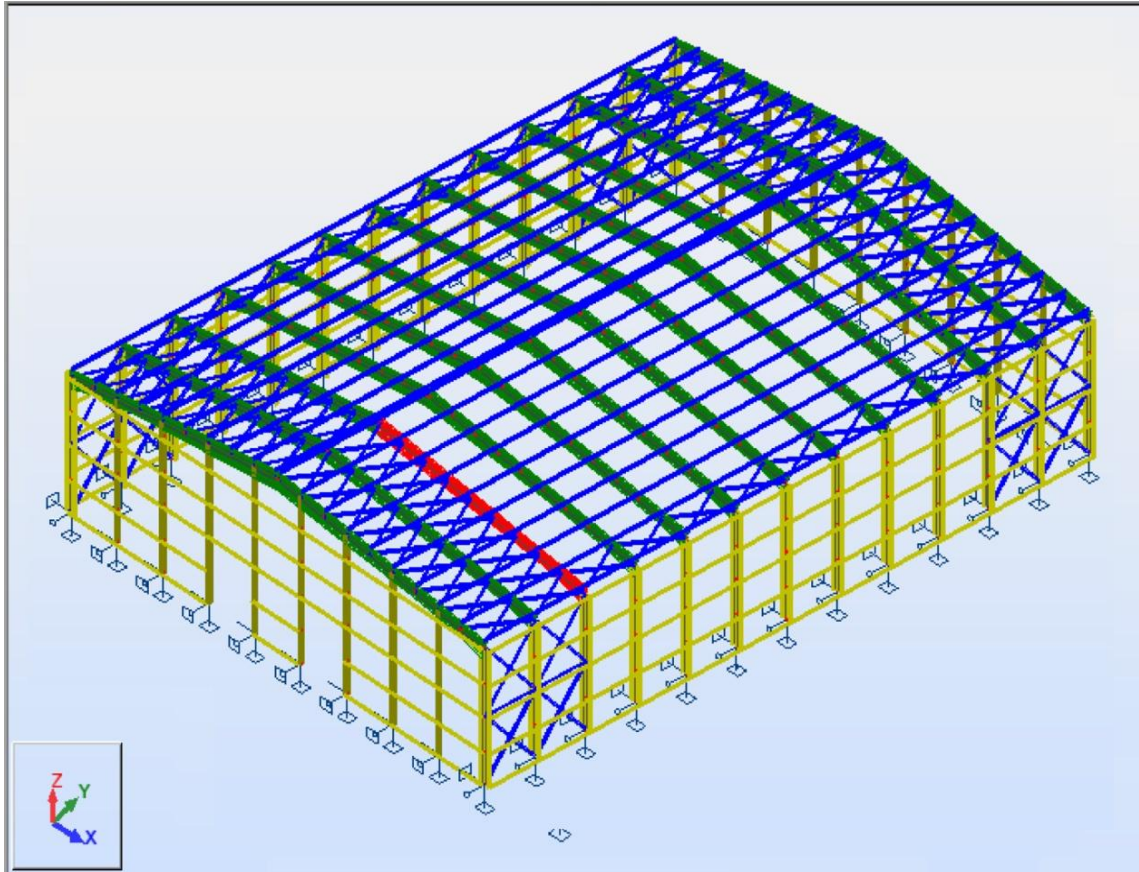


Figure 29. illustration de la traverse la plus sollicitée.

6.2.1.1 Chargements

Le cas de charge le plus décisif est la combinaison suivante :

$$1.35 * (G_0 + G_1) + 1.00 * (Q + N) + 1.5 * V_x^- + 0.80 * T^-$$

6.2.1.2 Matériau

L'acier utilisé est un acier ACIER E36 avec $f_y = 355 \text{ MPa}$

6.2.1.3 Paramètres de la section Traverse PRS

$h = 146.5 \text{ cm}$	$b = 30.0 \text{ cm}$	
$t_w = 3.0 \text{ cm}$	$t_f = 3.5 \text{ cm}$	
$g_{M_0} = 1.00$	$g_{M_1} = 1.00$	
$A_y = 210 \text{ cm}^2$	$A_z = 418.5 \text{ cm}^2$	$A_x = 723 \text{ cm}^2$
$I_y = 1792319.36 \text{ cm}^4$	$I_z = 23931 \text{ cm}^4$	$I_x = 2381.64 \text{ cm}^4$
$W_{el,y} = 23544.26 \text{ cm}^3$	$W_{el,z} = 1595.4 \text{ cm}^3$	

6.2.1.4 Efforts internes et résistances ultimes

$$N, Ed = 525.92 \text{ KN} \quad N_c, Rd = 25666.5 \text{ KN} \quad N_b, Rd = 25666.5 \text{ KN}$$

$$M_y, Ed = 2719.41 \text{ KN.m} \quad M_{y,el}, Rd = 8358.21 \text{ KN.m}$$

$$M_{y,c}, Rd = 8358.21 \text{ KN.m}$$

$$M_z, Ed = 342.07 \text{ KN.m} \quad M_{z,el}, Rd = 566.37 \text{ KN.m}$$

$$M_{z,c}, Rd = 566.37 \text{ KN.m}$$

$$V_y, Ed = 0.33 \text{ KN} \quad V_{y,T}, Rd = 3613.6 \text{ KN} \quad V_z, Ed = 75.31 \text{ KN}$$

$$V_{z,T}, Rd = 7413.65 \text{ KN}$$

$$T_t, Ed = -45.65 \text{ KN.m}$$

La section est de classe 3.

6.2.1.5 Paramètres de déversement

Le déversement de la semelle supérieure est empêché par les pannes qui sont fixées sur la traverse, alors que celui de la semelle inférieure sous le vent de soulèvement avec la combinaison $G + 1.5V$ est considéré comme inexistant grâce aux entretoises mises en place comme indiqué sur la figure suivante :

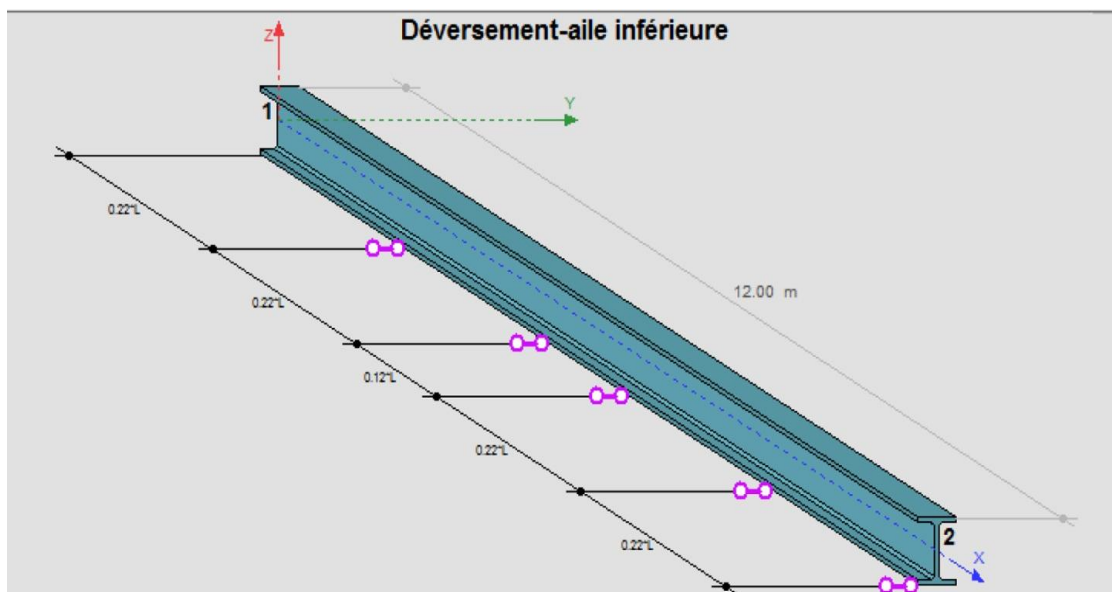


Figure 30. Illustration de la mise en place et de la position des entretoises sur la traverse.

6.2.1.6 Paramètres de flambement

La traverse n'est pas soumise au phénomène de flambement, ni suivant Y, ni suivant Z.

6.2.1.7 Formules de vérification

❖ Contrôle de la résistance de la section :

$$\frac{N, Ed}{N_c, Rd} + \frac{M_z, Ed}{M_{y,c}, Rd} + \frac{M_z, Ed}{M_{z,c}, Rd} = 0.95 < 1 \quad (6.2.9.3. (1)).$$

$$\frac{\sqrt{(\sigma_x, Ed)^2 + 3 * (\tau_y, Ed + \tau_{ty}, Ed)^2}}{\left(\frac{f_y}{\gamma_{M_0}}\right)} = 0.51 < 1 \quad (6.2.1. (5))$$

$$\frac{V_y, Ed}{V_{y,T}, Rd} = 0 < 1 \quad (6.2.6 - 7)$$

$$\frac{V_z, Ed}{V_{z,T}, Rd} = 0.01 < 1 \quad (6.2.6 - 7)$$

$$\frac{\tau_{ty}, Ed}{\left(\frac{f_y}{\sqrt{3} * \gamma_{M_0}}\right)} = 0.37 < 1 \quad (6.2.6)$$

$$\frac{\tau_{tz}, Ed}{\left(\frac{f_y}{\sqrt{3} * \gamma_{M_0}}\right)} = 0.32 < 1 \quad (6.2.6)$$

6.2.1.8 Déplacements limites

❖ Flèches :

- Cas de charge décisif : $G_0 + G_1 + Q + V_x^- + N + T^+$

$$u_y = 0.4 \text{ cm} < u_{y,max} = \frac{L}{200} = 11.3 \text{ cm} \dots \dots \dots \text{verifié}$$

- Cas de charge décisif : $G_0 + G_1 + Q + V_x^- + N + T^-$

$$u_z = 3.1 \text{ cm} < u_{z,max} = \frac{L}{200} = 11.3 \text{ cm} \dots \dots \dots \text{verifié}$$

Donc le profilé choisi est correct, et convient pour les traverses.

6.2.2 Vérification des poteaux

La vérification se fait pour le poteau le plus sollicité

Et dans notre cas : le poteau le plus sollicité est celui intermédiaire n° 31 comme illustré en rouge sur la figure suivante :

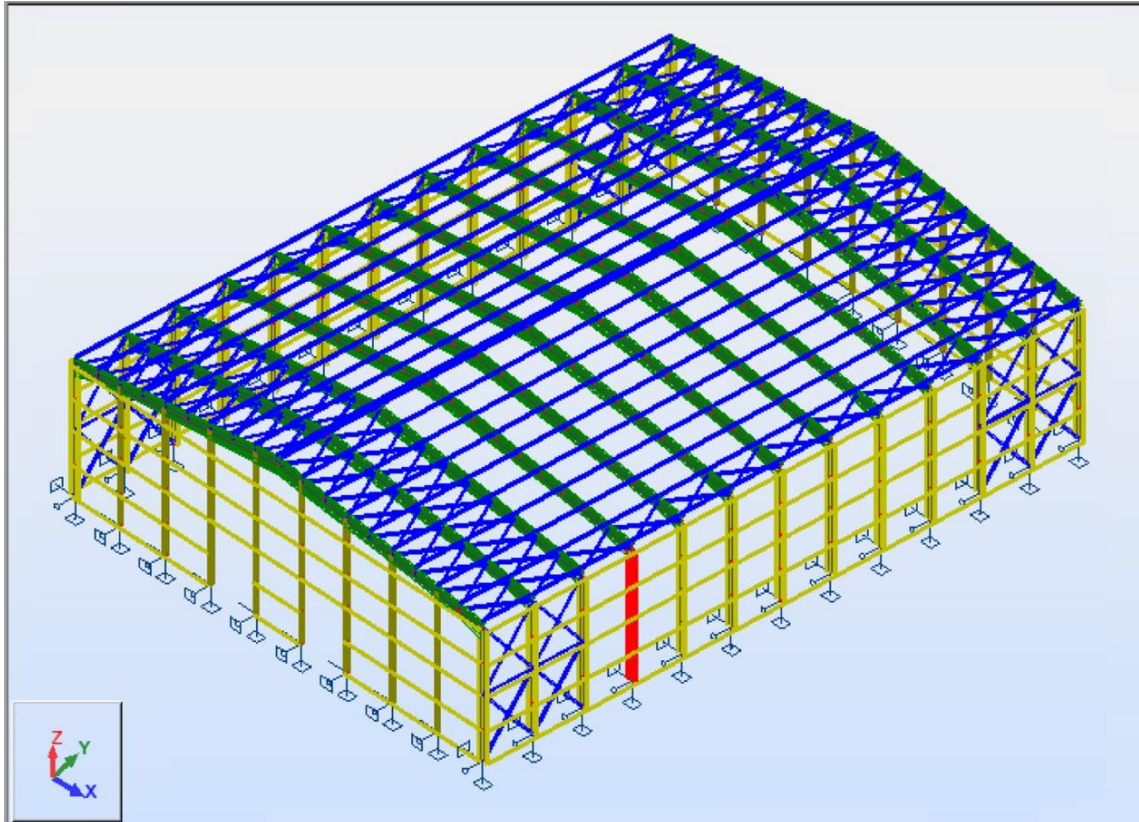


Figure 31. Illustration du poteau le plus sollicité.

6.2.2.1 Chargements

Le cas de charge le plus décisif est la combinaison suivante :

$$1.35 * (G_0 + G_1) + 1.00 * (Q + N) + 1.5 * V_x^- + 0.80 * T^+$$

6.2.2.2 Matériau

L'acier utilisé est un acier ACIER E36 avec $f_y = 355$ MPa

6.2.2.3 Paramètres de la section HEB 900

$$h = 90 \text{ cm}$$

$$b = 30.0 \text{ cm}$$

$$t_w = 1.8 \text{ cm}$$

$$t_f = 3.5 \text{ cm}$$

$$g_{M_0} = 1.00$$

$$g_{M_1} = 1.00$$

$$A_y = 228.83 \text{ cm}^2$$

$$A_z = 188.75 \text{ cm}^2$$

$$A_x = 371.28 \text{ cm}^2$$

$$I_y = 494065 \text{ cm}^4$$

$$I_z = 15815.9 \text{ cm}^4$$

$$I_x = 1137.47 \text{ cm}^4$$

$$W_{pl,y} = 12584.6 \text{ cm}^3$$

$$W_{pl,z} = 1658.37 \text{ cm}^3$$

6.2.2.4 Efforts internes et résistances ultimes

$$N, Ed = 627.97 \text{ KN} \quad N_c, Rd = 13180.3 \text{ KN} \quad N_b, Rd = 1975.37 \text{ KN}$$

$$M_y, Ed = 3120.15 \text{ KN.m} \quad M_{y,pl}, Rd = 4467.53 \text{ KN.m}$$

$$M_{y,c}, Rd = 4467.53 \text{ KN.m} \quad M_{y,N}, Rd = 4467.53 \text{ KN.m}$$

$$M_z, Ed = 24.73 \text{ KN.m} \quad M_{z,pl}, Rd = 588.72 \text{ KN.m}$$

$$M_{z,c}, Rd = 588.72 \text{ KN.m} \quad M_{z,N}, Rd = 588.72 \text{ KN.m}$$

$$V_y, Ed = -74.96 \text{ KN} \quad V_{y,T}, Rd = 3384.16 \text{ KN}$$

$$V_z, Ed = 327.06 \text{ KN} \quad V_{z,T}, Rd = 3342.81 \text{ KN}$$

$$T_t, Ed = -39.91 \text{ KN.m}$$

La section est de classe 1.

6.2.2.5 Paramètres de déversement

Le poteau n'est pas soumis au phénomène de déversement.

6.2.2.6 Paramètres de flambement

- Suivant Y :

$$L_y = 12 \text{ m} \quad L_{am_y} = 0.43$$

$$L_{cr,y} = 12 \text{ m} \quad X_y = 0.94$$

$$L_{amy} = 32.9 \quad k_{yy} = 0.83$$

- Suivant Z :

$$L_z = 12 \text{ m} \quad L_{am_z} = 2.41$$

$$L_{cr,z} = 12 \text{ m} \quad X_z = 0.15$$

$$L_{amz} = 183.86 \quad k_{yz} = 0.75$$

6.2.2.7 Formules de vérification

- ❖ Contrôle de la résistance de la section :

$$\frac{N, Ed}{N_c, Rd} = 0.05 < 1 \quad (6.2.4. (1)).$$

$$\left(\frac{M_y, Ed}{M_{y,N}, Rd} \right)^2 + \left(\frac{M_z, Ed}{M_{z,N}, Rd} \right)^1 = 0.53 < 1 \quad (6.2.9.1. (6)).$$

$$\frac{V_y, Ed}{V_y, T, Rd} = 0.02 < 1 \quad (6.2.6 - 7)$$

$$\frac{V_z, Ed}{V_z, T, Rd} = 0.1 < 1 \quad (6.2.6 - 7)$$

$$\frac{\tau_{ty}, Ed}{\left(\frac{f_y}{\sqrt{3} * g_{M_0}}\right)} = 0.6 < 1 \quad (6.2.6)$$

$$\frac{\tau_{tz}, Ed}{\left(\frac{f_y}{\sqrt{3} * g_{M_0}}\right)} = 0.32 < 1 \quad (6.2.6)$$

❖ Contrôle de la stabilité globale de la barre :

$$\lambda_y = 32.9 < \lambda_{max} = 210 \quad \lambda_z = 183.86 < \lambda_{max} = 210 \quad \dots\dots\dots \text{Stable}$$

$$\frac{N, Ed}{\frac{X_y * N, Rk}{g_{M_1}}} + \frac{k_{yy} * M_y, Ed}{\frac{X_{Lt} * M_y, Rk}{g_{M_1}}} + \frac{k_{yz} * M_z, Ed}{\frac{M_z, Rk}{g_{M_1}}} = 0.66 < 1 \quad (6.3.3. (4)).$$

$$\frac{N, Ed}{\frac{X_z * N, Rk}{g_{M_1}}} + \frac{k_{zy} * M_y, Ed}{\frac{X_{Lt} * M_y, Rk}{g_{M_1}}} + \frac{k_{zz} * M_z, Ed}{\frac{M_z, Rk}{g_{M_1}}} = 0.62 < 1 \quad (6.3.3. (4)).$$

6.2.2.8 Déplacements limites

❖ Déplacements :

- Cas de charge décisif : $G_0 + G_1 + Q + V_x^- + N + T^+$

$$V_x = 2.1 \text{ cm} < V_{x,max} = \frac{L}{150} = 8 \text{ cm} \dots\dots\dots \text{Vérfifié.}$$

- Cas de charge décisif : $G_0 + G_1 + Q + V_y^- + N + T^-$

$$V_y = 0.3 \text{ cm} < V_{y,max} = \frac{L}{150} = 8 \text{ cm} \dots\dots\dots \text{Vérfifié.}$$

Donc le profilé choisi est correct, et convient pour les poteaux.

6.2.3 Vérification des éléments de contreventement

La vérification se fait pour la barre la plus sollicitée

Et dans notre cas : la barre la plus sollicitée est la n° 358 comme illustré en rouge sur la figure suivante :

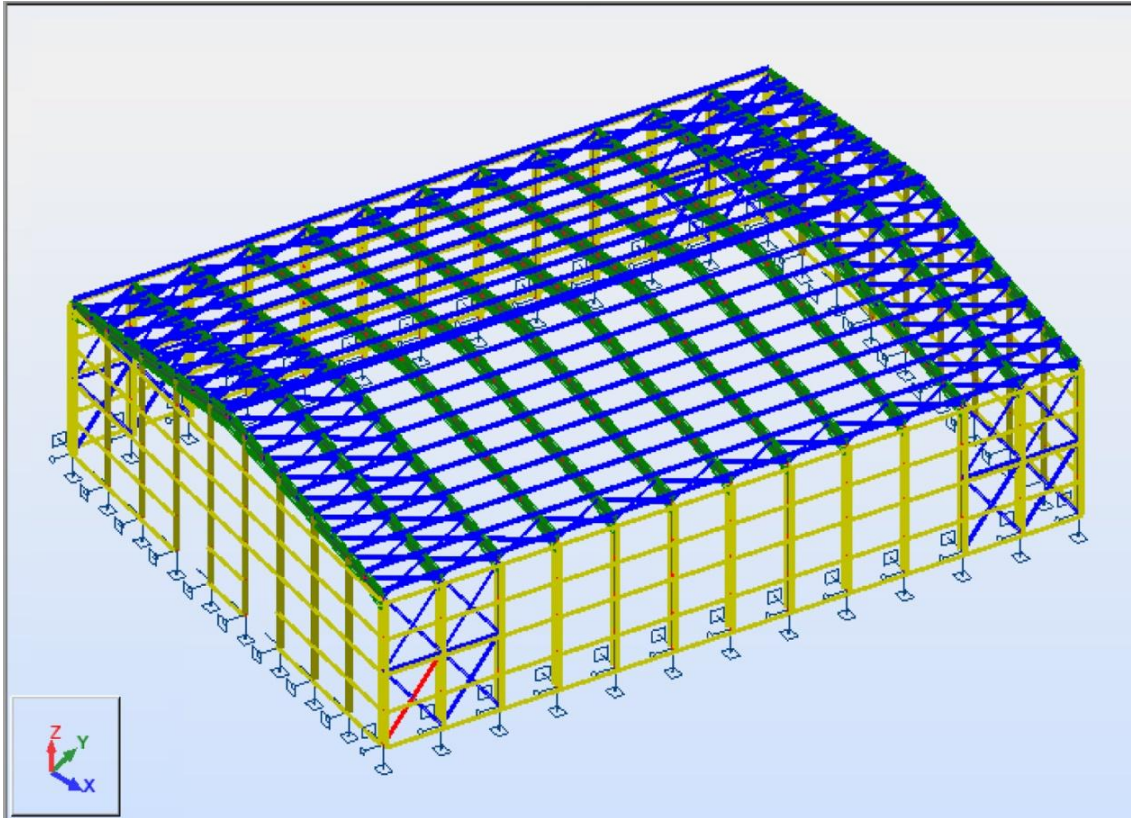


Figure 32. Illustration de la barre élément de contreventement la plus sollicitée.

6.2.3.1 Chargements

Le cas de charge le plus décisif est la combinaison suivante :

$$1.35 * (G_0 + G_1) + 1.00 * (Q + V_x^- + N) + 1.5 * T^+$$

6.2.3.2 MATERIAU :

L'acier utilisé est un acier ACIER E36 avec $f_y = 355 \text{ MPa}$

6.2.3.3 Paramètres de la section CAE 180*18 :

$$h = 18 \text{ cm}$$

$$b = 18 \text{ cm}$$

$$t_w = 1.8 \text{ cm}$$

$$t_f = 1.8 \text{ cm}$$

$$g_{M_0} = 1.00$$

$$g_{M_1} = 1.00$$

$$A_y = 32.4 \text{ cm}^2$$

$$A_z = 32.4 \text{ cm}^2$$

$$A_x = 61.91 \text{ cm}^2 \quad A_{\text{eff}} = 61.91 \text{ cm}^2$$

$$I_y = 1866 \text{ cm}^4$$

$$I_z = 1866 \text{ cm}^4$$

$$I_x = 66.48 \text{ cm}^4$$

$$W_{\text{el},y} = 144.65 \text{ cm}^3$$

$$W_{\text{el},z} = 144.65 \text{ cm}^3$$

6.2.3.4 Efforts internes et résistances ultimes :

$$N, Ed = 411.05 \text{ KN} \quad N_c, Rd = 2197.72 \text{ KN} \quad N_b, Rd = 522.33 \text{ KN}$$

La section est de classe 4.

6.2.3.5 Paramètres de déversement :

La barre n'est pas soumise au phénomène de déversement.

6.2.3.6 Paramètres de flambement

- Suivant Y :

$$L_y = 7.81 \text{ m} \quad L_{am_y} = 1.86$$

$$L_{cr,y} = 7.81 \text{ m} \quad X_y = 0.24$$

$$L_{amy} = 142.26$$

- Suivant Z :

$$L_z = 7.81 \text{ m} \quad L_{am_z} = 1.86$$

$$L_{cr,z} = 7.81 \text{ m} \quad X_z = 0.24$$

$$L_{amz} = 142.26$$

6.2.3.7 Formules de vérification

- ❖ Contrôle de la résistance de la section :

$$\frac{N, Ed}{N_c, Rd} = 0.19 < 1 \quad (6.2.4. (1)).$$

- ❖ Contrôle de la stabilité globale de la barre :

$$\lambda_y = 142.26 < \lambda_{max} = 210 \quad \lambda_z = 142.26 < \lambda_{max} = 210 \quad \text{.....Stable}$$

$$\frac{N, Ed}{N_b, Rd} = 0.79 < 1 \quad (6.3.1.1. (1)).$$

Donc le profilé choisi est correct, et convient pour les barres éléments de contreventement.

6.2.4 Vérification des pannes

La vérification se fait pour la panne la plus sollicitée

Et dans notre cas : la panne la plus sollicitée est la n° 142 comme illustré en rouge sur la figure suivante :

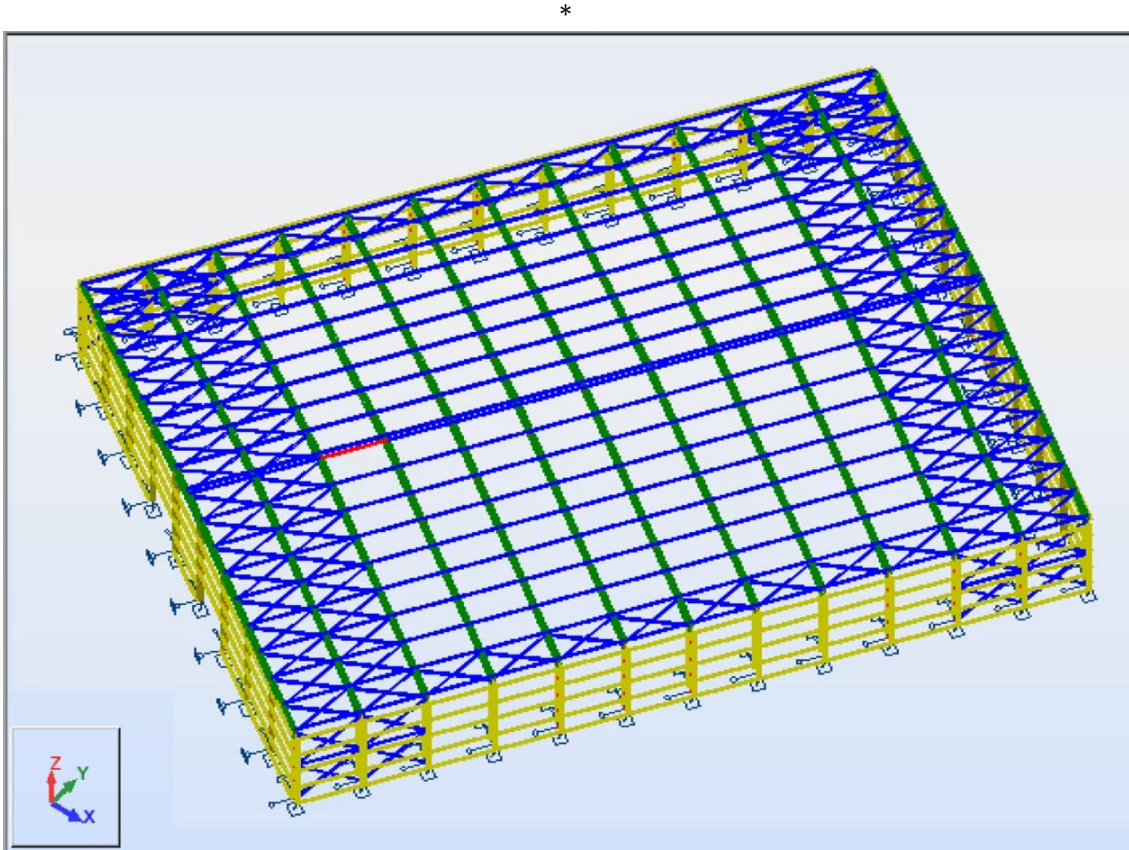


Figure 33. Illustration de la panne la plus sollicitée.

6.2.4.1 Chargements

Le cas de charge le plus décisif est la combinaison suivante :

$$1.35 * (G_0 + G_1) + 1.00 * (Q + N) + 1.5 * V_x^- + 0.8 * T^+$$

6.2.4.2 Matériau

L'acier utilisé est un acier ACIER E36 avec $f_y = 355 \text{ MPa}$

6.2.4.3 Paramètres de la section IPE 270

$$h = 27 \text{ cm}$$

$$b = 13.5 \text{ cm}$$

$$t_w = 0.7 \text{ cm}$$

$$t_f = 1 \text{ cm}$$

$$g_{M_0} = 1.00$$

$$g_{M_1} = 1.00$$

$$A_y = 31.45 \text{ cm}^2$$

$$A_z = 22.14 \text{ cm}^2$$

$$A_x = 45.94 \text{ cm}^2$$

$$I_y = 5789.78 \text{ cm}^4$$

$$I_z = 419.87 \text{ cm}^4$$

$$I_x = 14.93 \text{ cm}^4$$

$$W_{el,y} = 428.87 \text{ cm}^3$$

$$W_{el,z} = 62.2 \text{ cm}^3$$

6.2.4.4 Efforts internes et résistances ultimes

$$N, Ed = 247.87 \text{ KN} \quad N_c, Rd = 1631.05 \text{ KN} \quad N_b, Rd = 1631.05 \text{ KN}$$

$$V_y, Ed = 0.36 \text{ KN} \quad V_{y,c}, Rd = 644.63 \text{ KN}$$

$$V_z, Ed = 13.91 \text{ KN} \quad V_{z,c}, Rd = 453.74 \text{ KN}$$

La section est de classe 3.

6.2.4.5 Paramètres de déversement

La panne n'est pas soumise au phénomène de déversement.

6.2.4.6 Paramètres de flambement

La panne n'est pas soumise au phénomène de flambement, ni suivant Y, ni suivant Z.

6.2.4.7 Formules de vérification

❖ Contrôle de la résistance de la section :

$$\frac{N, Ed}{N_c, Rd} = 0.15 < 1 \quad (6.2.4. (1)).$$

$$\frac{\sqrt{(\sigma_x, Ed)^2 + 3 * (\tau_z, Ed)^2}}{\left(\frac{f_y}{\gamma_{M_0}}\right)} = 0.16 < 1 \quad (6.2.1. (5))$$

$$\frac{V_y, Ed}{V_{y,c}, Rd} = 0 < 1 \quad (6.2.6. (1))$$

$$\frac{V_z, Ed}{V_{z,c}, Rd} = 0.03 < 1 \quad (6.2.6. (1))$$

6.2.4.8 Déplacements limites

❖ Flèches :

- Cas de charge décisif : $G_0 + G_1 + Q + V_x^- + N + T^+$

$$u_y = 0.1 \text{ cm} < u_{y,max} = \frac{L}{200} = 2.5 \text{ cm} \dots \dots \dots \text{verifié}$$

- Cas de charge décisif : $G_0 + G_1 + Q + V_x^- + N + T^-$

$$u_z = 0.3 \text{ cm} < u_{z,max} = \frac{L}{200} = 2.5 \text{ cm} \dots \dots \dots \text{verifié}$$

Donc le profilé choisi est correct, et convient pour les pannes.

6.2.5 Vérification des lisses de bardage

La vérification se fait pour la lisse de bardage la plus sollicitée

Et dans notre cas : la lisse de bardage la plus sollicitée est la n° 10 comme illustré en rouge sur la figure suivante :

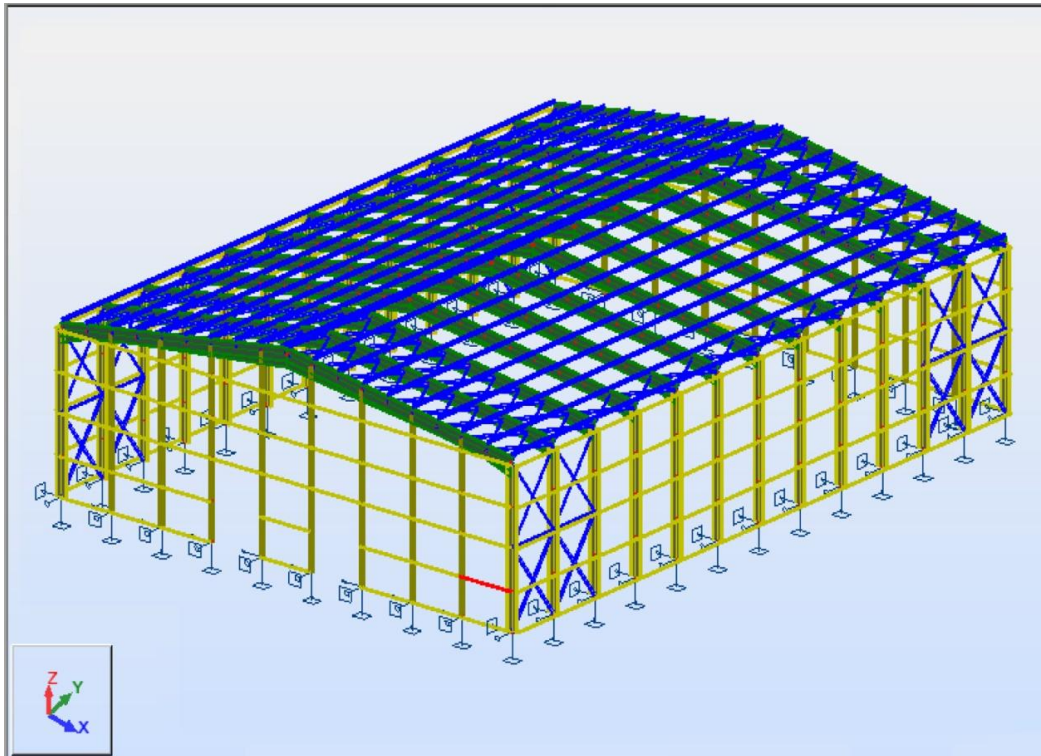


Figure 34. Illustration de la lisse de bardage la plus sollicitée.

6.2.5.1 Chargements

Le cas de charge le plus décisif est la combinaison suivante :

$$1.35 * (G_0 + G_1) + 1.00 * (Q + N) + 1.5 * V_y^- + 0.8 * T^+$$

6.2.5.2 Matériau

L'acier utilisé est un acier ACIER E36 avec $f_y = 355$ MPa

6.2.5.3 Paramètres de la section IPE 200

$$h = 20 \text{ cm}$$

$$b = 10 \text{ cm}$$

$$t_w = 0.6 \text{ cm}$$

$$t_f = 0.9 \text{ cm}$$

$$g_{M_0} = 1.00$$

$$g_{M_1} = 1.00$$

$$A_y = 19.58 \text{ cm}^2$$

$$A_z = 14 \text{ cm}^2$$

$$A_x = 28.48 \text{ cm}^2$$

$$I_y = 1943.17 \text{ cm}^4$$

$$I_z = 142.37 \text{ cm}^4$$

$$I_x = 6.46 \text{ cm}^4$$

$$W_{pl,y} = 220.66 \text{ cm}^3 \quad W_{pl,z} = 44.61 \text{ cm}^3$$

6.2.5.4 Efforts internes et résistances ultimes

$$\begin{aligned} N, Ed &= 5.92 \text{ KN} & N_c, Rd &= 1011.19 \text{ KN} & N_b, Rd &= 1011.19 \text{ KN} \\ M_y, Ed &= 20.52 \text{ KN.m} & M_{y,pl}, Rd &= 78.33 \text{ KN.m} & M_{y,c}, Rd &= 78.33 \text{ KN.m} \\ M_y, N, Rd &= 78.33 \text{ KN.m} \\ M_z, Ed &= -3.33 \text{ KN.m} & M_{z,pl}, Rd &= 15.84 \text{ KN.m} & M_{z,c}, Rd &= 15.84 \text{ KN.m} \\ M_z, N, Rd &= 15.84 \text{ KN.m} \end{aligned}$$

La section est de classe 1.

6.2.5.5 Paramètres de déversement

La lisse de bardage n'est pas soumise au phénomène de déversement.

6.2.5.6 Paramètres de flambement

La lisse de bardage n'est pas soumise au phénomène de flambement, ni suivant Y, ni suivant Z.

6.2.5.7 Formules de vérification

❖ Contrôle de la résistance de la section :

$$\frac{N, Ed}{N_c, Rd} = 0.01 < 1 \quad (6.2.4. (1)).$$

$$\left(\frac{M_y, Ed}{M_y, N, Rd} \right)^2 + \left(\frac{M_z, Ed}{M_z, N, Rd} \right)^1 = 0.28 < 1 \quad (6.2.9.1. (6)).$$

6.2.5.8 Déplacements limites

❖ Flèches :

- Cas de charge décisif : $G_0 + G_1 + Q + V_y^+ + N + T^+$

$$u_y = 2.1 \text{ cm} < u_{y,max} = \frac{L}{200} = 2.5 \text{ cm} \dots \dots \dots \text{verifié}$$

- Cas de charge décisif : $G_0 + G_1 + V_y^-$

$$u_z = 0.9 \text{ cm} < u_{z,max} = \frac{L}{200} = 2.5 \text{ cm} \dots \dots \dots \text{verifié}$$

Donc le profilé choisi est correct, et convient pour les lisse de bardage.

6.3 Vérification des déplacements

Le D.T.R RPA 99 v2003 précise que le déplacement horizontal est calculé sous les forces sismiques seules (Art. 4.4.3), et préconise de limiter les déplacements relatifs latéraux d'un étage par rapport aux étages qui lui sont adjacents à 1% de la hauteur d'étage (Art. 5.10).

Le déplacement horizontal de chaque niveau k de la structure est calculé comme suit : $\delta_k = R \cdot \delta_{ek}$

Avec : δ_{ek} : Déplacement dû aux forces sismiques

$$(\delta_{ek,x} = 1.2 \text{ cm} ; \delta_{ek,y} = 0.6 \text{ cm}).$$

R : Coefficient de comportement ($R_x = R_y = 4$)

Le déplacement relatif du niveau k par rapport au niveau $k-1$ est donné par :

$$\Delta_k = \delta_k - \delta_{k-1} \quad \text{Avec : } \Delta_k < 1\% * h_k \quad (\text{RPA Art. 5.10})$$

Dans notre cas toute la structure est un RDC, donc :

- Déplacements selon le sens X :

On a :

$$\delta_{k,x} = R_x * \delta_{ek,x} = 4 * 1.2 = 4.8 \text{ cm}$$

$$\delta_{k-1,x} = R_x * \delta_{ek-1,x} = 4 * 0 = 0 \text{ cm}$$

$$\Rightarrow \Delta_{k,x} = \delta_{k,x} - \delta_{k-1,x} = 4.8 - 0 = 4.8 \text{ cm}$$

Et on a :

$$\Delta_{k,x} < 1\% * h_k \Rightarrow 4.8 < 1\% * 1500 \Rightarrow 4.8 < 15 \text{ cm}$$

Vérifier.

- Déplacements selon le sens Y :

On a :

$$\delta_{k,y} = R_y * \delta_{ek,y} = 4 * 0.6 = 2.4 \text{ cm}$$

$$\delta_{k-1,y} = R_y * \delta_{ek-1,y} = 4 * 0 = 0 \text{ cm}$$

$$\Rightarrow \Delta_{k,y} = \delta_{k,y} - \delta_{k-1,y} = 2.4 - 0 = 2.4 \text{ cm}$$

Et on a :

$$\Delta_{k,y} < 1\% * h_k \Rightarrow 2.4 < 1\% * 1500 \Rightarrow 2.4 < 15 \text{ cm}$$

Vérifier.

→Donc les déplacements sont tous vérifiés.

CHAPITRE 7

VERIFICATION DES ASSEMBLAGES AVEC LE LOGICIEL ROBOT SELON L'EC 3

7.1 Introduction

Un assemblage est un dispositif qui permet de réunir et de solidariser plusieurs pièces entre elles, en assurant la transmission et la répartition des diverses sollicitations entre les pièces.

7.2 Vérification des assemblages

7.2.1 Assemblage Traverse - Traverse

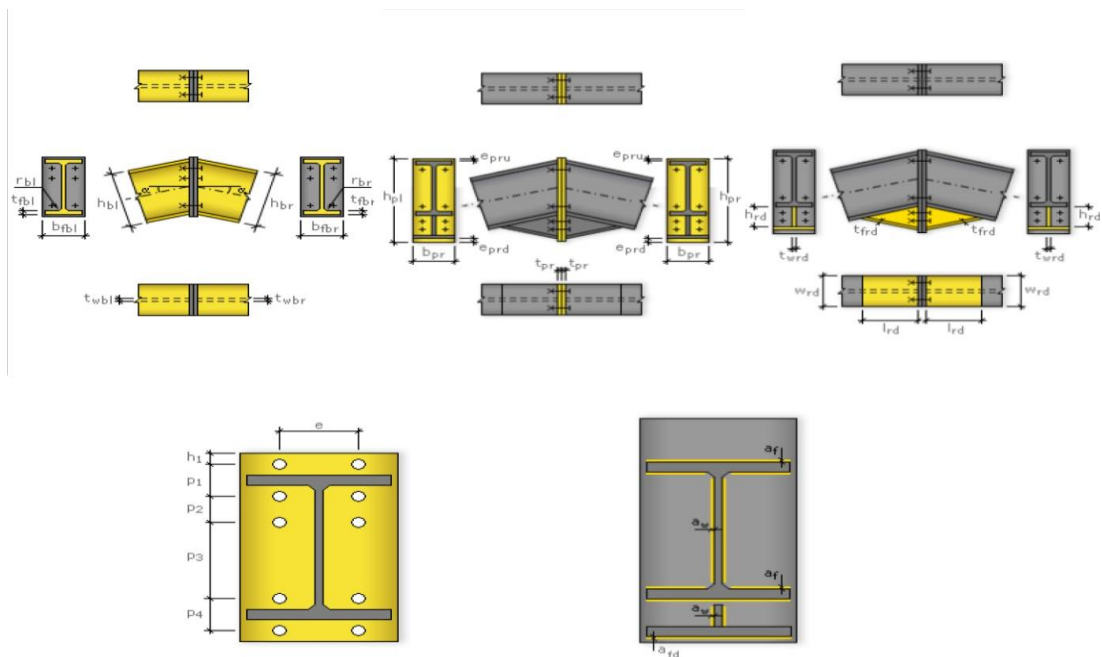


Figure 35. Schéma de l'assemblage Traverse - Traverse

7.2.1.1 Général

Nœud de la structure : 53

Barres de la structure : 32 et 33

7.2.1.2 Géométrie

1. Poutre côté gauche :

Profilé : Traverse PRS

Barre N° : 32

$\alpha =$	-172,4	[Deg]	Angle d'inclinaison
$h_{bl} =$	970	[mm]	Hauteur de la section de la poutre
$b_{fbl} =$	300	[mm]	Largeur de la section de la poutre
$t_{wbl} =$	30	[mm]	Epaisseur de l'âme de la section de la poutre
$t_{fbl} =$	35	[mm]	Epaisseur de l'aile de la section de la poutre
$A_{bl} =$	480,00	[cm ²]	Aire de la section de la poutre
$I_{xbl} =$	641432,50	[cm ⁴]	Moment d'inertie de la poutre

Matériau : ACIER E36

$f_{yb} = 355,00$ [MPa] Résistance

2. Poutre côté droite :

Profilé : Traverse PRS

Barre N° : 33

$\alpha =$	-7,6	[Deg]	Angle d'inclinaison
$h_{br} =$	970	[mm]	Hauteur de la section de la poutre
$b_{fbr} =$	300	[mm]	Largeur de la section de la poutre
$t_{wbr} =$	30	[mm]	Epaisseur de l'âme de la section de la poutre
$t_{fbr} =$	35	[mm]	Epaisseur de l'aile de la section de la poutre
$A_{br} =$	480,00	[cm ²]	Aire de la section de la poutre
$I_{xbr} =$	641432,50	[cm ⁴]	Moment d'inertie de la poutre

Matériau : ACIER E36

$f_{yb} = 355,00$ [MPa] Résistance

3. Boulons :

$d = 30$ [mm] Diamètre du boulon

Classe = HR 10.9 Classe du boulon

$d =$	30	[mm]	Diamètre du boulon
$F_{tRd} =$	484,70	[kN]	Résistance du boulon à la traction
$n_h =$	2		Nombre de colonnes des boulons
$n_v =$	7		Nombre de rangées des boulons
$h_1 =$	160	[mm]	Pince premier boulon-extrémité supérieure
Ecartement $e_i = 135$ [mm]			
Entraxe $p_i = 180; 180; 180; 180; 230; 210$ [mm]			

4. Platine :

$h_{pr} =$	1499	[mm]	Hauteur de la platine
$b_{pr} =$	320	[mm]	Largeur de la platine
$t_{pr} =$	35	[mm]	Épaisseur de la platine

Matériau : ACIER E36

$f_{ypr} = 355,00$ [MPa] Résistance

5. Jarret inférieur :

$w_{rd} =$	300	[mm]	Largeur de la platine
$t_{frd} =$	35	[mm]	Épaisseur de l'aile
$h_{rd} =$	500	[mm]	Hauteur de la platine
$t_{wrd} =$	30	[mm]	Épaisseur de l'âme
$l_{rd} =$	7500	[mm]	Longueur de la platine
$\alpha_d =$	-3,8	[Deg]	Angle d'inclinaison

Matériau : ACIER E36

$f_{ybu} = 235,00$ [MPa] Résistance

6. Soudures d'angle :

$a_w =$	20	[mm]	Soudure âme
$a_f =$	25	[mm]	Soudure semelle
$a_{fd} =$	5	[mm]	Soudure horizontale

7. Coefficients de matériau :

$\gamma_{M0} =$	1,00	Coefficient de sécurité partiel [2.2]
$\gamma_{M1} =$	1,00	Coefficient de sécurité partiel [2.2]
$\gamma_{M2} =$	1,25	Coefficient de sécurité partiel [2.2]
$\gamma_{M3} =$	1,25	Coefficient de sécurité partiel [2.2]

7.2.1.3 Efforts

- Etat limite ultime :

Cas : Combinaison : $1.35 * (G_0 + G_1) + 1 * (Q + N) + 1.5 * V_x^- + 0.8 * T^-$

$M_{b1,Ed} = -2998,39$ [kN*m] Moment fléchissant dans la poutre droite

$V_{b1,Ed} = -81,09$ [kN] Effort tranchant dans la poutre droite

$N_{b1,Ed} = -275,05$ [kN] Effort axial dans la poutre droite

7.2.1.4 Résultats

1. Résistances de la poutre :

- ❖ Compression :

$A_b = 480,00$ [cm²] Aire de la section

$N_{cb,Rd} = A_b f_{yb} / \gamma_{M0}$

$N_{cb,Rd} = 17040,00$ [kN] Résistance de calcul de la section à la compression

- ❖ Cisaillement :

$A_{vb} = 420,00$ [cm²] Aire de la section au cisaillement

$V_{cb,Rd} = A_{vb} (f_{yb} / \sqrt{3}) / \gamma_{M0}$

$V_{cb,Rd} = 8608,29$ [kN] Résistance de calcul de la section au cisaillement

$V_{b1,Ed} / V_{cb,Rd} \leq 1,0$ $0,01 < 1,00$ vérifié.

- ❖ Flexion – Moment plastique (Sans renforts) :

$W_{plb} = 17609,25$ [cm³] Facteur plastique de la section

$M_{b,pl,Rd} = W_{plb} f_{yb} / \gamma_{M0}$

$M_{b,pl,Rd} = 6251,28$ [kN*m] Résistance plastique de la section à la flexion

- ❖ Flexion au contact de la plaque avec l'élément assemble :

$W_{pl} = 24758,05$ [cm³] Facteur plastique de la section

$M_{cb,Rd} = W_{pl} f_{yb} / \gamma_{M0}$

$M_{cb,Rd} = 8789,11$ [kN*m] Résistance de calcul de la section à la flexion

- ❖ Aile et âme en compression :

$M_{cb,Rd} = 8789,11$ [kN*m] Résistance de calcul de la section à la flexion

$h_f = 1443$ [mm] Distance entre les centres de gravité des ailes

$F_{c,fb,Rd} = M_{cb,Rd} / h_f$

$F_{c,fb,Rd} = 6089,16$ [kN] Résistance de l'aile et de l'âme comprimées

❖ Ame ou aile du renfort en compression – Niveau de l'aile inférieure de la poutre :

▪ Pression diamétrale :

$\beta = 7,6$ [Deg] Angle entre la platine d'about et la poutre

$\gamma = 3,8$ [Deg] Angle d'inclinaison du renfort

$b_{\text{eff,c,wb}} = 920$ [mm] Largeur efficace de l'âme à la compression

$A_{\text{vb}} = 270,00$ [cm²] Aire de la section au cisaillement

$\omega = 0,65$ Coefficient réducteur

$\sigma_{\text{com,Ed}} = 0,00$ [MPa] Contrainte de compression maximale dans l'âme

$k_{\text{wc}} = 1,00$ Coefficient réducteur

$F_{\text{c,wb,Rd1}} = [\omega k_{\text{wc}} b_{\text{eff,c,wb}} t_{\text{wb}} f_{\text{yb}} / \gamma_{\text{M0}}] \cos(\gamma) / \sin(\gamma - \beta)$

$F_{\text{c,wb,Rd1}} = 95716,85$ [kN] Résistance de l'âme de la poutre

▪ Flambement :

$d_{\text{wb}} = 841$ [mm] Hauteur de l'âme comprimée

$\lambda_{\text{p}} = 1,12$ Elancement de plaque

$\rho = 0,73$ Coefficient réducteur pour le flambement de l'élément

$F_{\text{c,wb,Rd2}} = [\omega k_{\text{wc}} \rho b_{\text{eff,c,wb}} t_{\text{wb}} f_{\text{yb}} / \gamma_{\text{M1}}] \cos(\gamma) / \sin(\gamma - \beta)$

$F_{\text{c,wb,Rd2}} = 70029,40$ [kN] Résistance de l'âme de la poutre

▪ Résistance de l'aile du renfort :

$F_{\text{c,wb,Rd3}} = b_{\text{b}} t_{\text{b}} f_{\text{yb}} / (0.8 * \gamma_{\text{M0}})$

$F_{\text{c,wb,Rd3}} = 4659,38$ [kN] Résistance de l'aile du renfort

Résistance finale :

$F_{\text{c,wb,Rd,low}} = \text{Min} (F_{\text{c,wb,Rd1}}, F_{\text{c,wb,Rd2}}, F_{\text{c,wb,Rd3}})$

$F_{\text{c,wb,Rd,low}} = 4659,38$ [kN] Résistance de l'âme de la poutre

2. Paramètres géométriques de l'assemblage :

❖ Longueurs efficaces et paramètres - platine d'about :

Tableau 26. Longueurs efficaces et paramètres - platine d'about

Nr	m	m_x	e	e_x	p	$l_{\text{eff,cp}}$	$l_{\text{eff,nc}}$	$l_{\text{eff,1}}$	$l_{\text{eff,2}}$	$l_{\text{eff,cp,g}}$	$l_{\text{eff,nc,g}}$	$l_{\text{eff,1,g}}$	$l_{\text{eff,2,g}}$
1	30	-	93	-	210	188	232	188	232	304	219	219	219
2	30	-	93	-	220	188	235	188	235	440	220	220	220
3	30	-	93	-	205	188	235	188	235	410	205	205	205
4	30	-	93	-	180	188	235	188	235	360	180	180	180

Nr	m	m _x	e	e _x	p	l _{eff,cp}	l _{eff,nc}	l _{eff,1}	l _{eff,2}	l _{eff,cp,g}	l _{eff,nc,g}	l _{eff,1,g}	l _{eff,2,g}
5	30	-	93	-	180	188	235	188	235	360	180	180	180
6	30	-	93	-	180	188	235	188	235	360	180	180	180
7	30	-	93	-	180	188	235	188	235	274	208	208	208

m – Distance du boulon de l'âme

m_x – Distance du boulon de l'aile de la poutre

e – Pince entre le boulon et le bord extérieur

e_x – Pince entre le boulon et le bord extérieur horizontal

p – Entraxe des boulons

l_{eff,cp} – Longueur efficace pour un boulon dans les mécanismes circulaires

l_{eff,nc} – Longueur efficace pour un boulon dans les méca non circ

l_{eff,1} – Longueur efficace pour un boulon pour le mode 1

l_{eff,2} – Longueur efficace pour un boulon pour le mode 2

l_{eff,cp,g} – Longueur efficace pour un groupe de boulons dans les méca circ

l_{eff,nc,g} – Longueur efficace pour un groupe de boulons dans les méca non circ

l_{eff,1,g} – Longueur efficace pour un groupe de boulons pour le mode 1

l_{eff,2,g} – Longueur efficace pour un groupe de boulons pour le mode 2

3. Résistance de l'assemblage à la compression :

$$N_{j,Rd} = \text{Min} (N_{cb,Rd} / 2, F_{c,wb,Rd,low})$$

$$N_{j,Rd} = 9318,75 \text{ [kN]} \quad \text{Résistance de l'assemblage à la compression}$$

$$N_{b1,Ed} / N_{j,Rd} \leq 1,0 \quad 0,03 < 1,00 \quad \text{vérifié.}$$

4. Résistance de l'assemblage à la flexion :

$$F_{t,Rd} = 484,70 \text{ [kN]} \quad \text{Résistance du boulon à la traction}$$

$$B_{p,Rd} = 1175,65 \text{ [kN]} \quad \text{Résistance du boulon au poinçonnement}$$

F_{t,fc,Rd} – résistance de la semelle du poteau à la flexion

F_{t,wc,Rd} – résistance de l'âme du poteau à la traction

F_{t,ep,Rd} – résistance de la platine fléchie à la flexion

F_{t,wb,Rd} – résistance de l'âme à la traction

$$F_{t,fc,Rd} = \text{Min} (F_{T,1,fc,Rd}, F_{T,2,fc,Rd}, F_{T,3,fc,Rd})$$

$$F_{t,wc,Rd} = \omega b_{eff,t,wc} t_{wc} f_{yc} / \gamma_{M0}$$

$$F_{t,ep,Rd} = \text{Min} (F_{T,1,ep,Rd}, F_{T,2,ep,Rd}, F_{T,3,ep,Rd})$$

$$F_{t,wb,Rd} = b_{eff,t,wb} t_{wb} f_{yb} / \gamma_{M0}$$

❖ Résistance de la rangée de boulons n°1 :

$F_{t1,Rd,comp}$ - Formule	$F_{t1,Rd,comp}$	Composant
$F_{t1,Rd} = \text{Min} (F_{t1,Rd,comp})$	969,41	Résistance d'une rangée de boulon
$F_{t,ep,Rd(1)} = 969,41$	969,41	Platine d'about - traction
$F_{t,wb,Rd(1)} = 1998,95$	1998,95	Ame de la poutre - traction
$B_{p,Rd} = 2351,29$	2351,29	Boulons au cisaillement/poinçonnement
$F_{c,fb,Rd} = 6089,16$	6089,16	Aile de la poutre - compression

❖ Résistance de la rangée de boulons n°2 :

$F_{t2,Rd,comp}$ - Formule	$F_{t2,Rd,comp}$	Composant
$F_{t2,Rd} = \text{Min} (F_{t2,Rd,comp})$	969,41	Résistance d'une rangée de boulon
$F_{t,ep,Rd(2)} = 969,41$	969,41	Platine d'about - traction
$F_{t,wb,Rd(2)} = 1998,95$	1998,95	Ame de la poutre - traction
$B_{p,Rd} = 2351,29$	2351,29	Boulons au cisaillement/poinçonnement
$F_{c,fb,Rd} - \sum_1^1 F_{tj,Rd} = 6089,16 - 969,41$	5119,75	Aile de la poutre - compression
$F_{t,ep,Rd(2+1)} - \sum_1^1 F_{tj,Rd} = 1938,82 - 969,41$	969,41	Platine d'about - traction - groupe
$F_{t,wb,Rd(2+1)} - \sum_1^1 F_{tj,Rd} = 4679,58 - 969,41$	3710,17	Ame de la poutre - traction - groupe

- Réduction supplémentaire de la résistance d'une rangée de boulons :

$$F_{t2,Rd} = F_{t1,Rd} h_2/h_1$$

$$F_{t2,Rd} = 811,88 \text{ [kN]} \quad \text{Résistance réduite d'une rangée de boulon}$$

❖ Résistance de la rangée de boulons n°3 :

$F_{t3,Rd,comp}$ - Formule	$F_{t3,Rd,comp}$	Composant
$F_{t3,Rd} = \text{Min} (F_{t3,Rd,comp})$	969,41	Résistance d'une rangée de boulon
$F_{t,ep,Rd(3)} = 969,41$	969,41	Platine d'about - traction
$F_{t,wb,Rd(3)} = 1998,95$	1998,95	Ame de la poutre - traction
$B_{p,Rd} = 2351,29$	2351,29	Boulons au cisaillement/poinçonnement
$F_{c,fb,Rd} - \sum_1^2 F_{tj,Rd} = 6089,16 - 1781,29$	4307,86	Aile de la poutre - compression
$F_{t,ep,Rd(3+2)} - \sum_2^2 F_{tj,Rd} = 1938,82 - 811,88$	1126,93	Platine d'about - traction - groupe
$F_{t,wb,Rd(3+2)} - \sum_2^2 F_{tj,Rd} = 4526,25 - 811,88$	3714,37	Ame de la poutre - traction - groupe
$F_{t,ep,Rd(3+2+1)} - \sum_2^1 F_{tj,Rd} = 2908,22 - 1781,29$	1126,93	Platine d'about - traction - groupe
$F_{t,wb,Rd(3+2+1)} - \sum_2^1 F_{tj,Rd} = 6862,83 - 1781,29$	5081,54	Ame de la poutre - traction - groupe

- Réduction supplémentaire de la résistance d'une rangée de boulons :

$$F_{t3,Rd} = F_{t1,Rd} h_3/h_1$$

$$F_{t3,Rd} = 639,36 \text{ [kN]} \quad \text{Résistance réduite d'une rangée de boulon}$$

$$F_{t3,Rd} = F_{t2,Rd} h_3/h_2$$

$$F_{t3,Rd} = 639,36 \text{ [kN]} \quad \text{Résistance réduite d'une rangée de boulon}$$

❖ Résistance de la rangée de boulons n°4 :

$F_{t4,Rd,comp}$ - Formule	$F_{t4,Rd,comp}$	Composant
$F_{t4,Rd} = \text{Min} (F_{t4,Rd,comp})$	969,41	Résistance d'une rangée de boulon
$F_{t,ep,Rd(4)} = 969,41$	969,41	Platine d'about - traction
$F_{t,wb,Rd(4)} = 1998,95$	1998,95	Ame de la poutre - traction
$B_{p,Rd} = 2351,29$	2351,29	Boulons au cisaillement/poinçonnement
$F_{c,fb,Rd} - \sum_1^3 F_{tj,Rd} = 6089,16 - 2420,65$	3668,51	Aile de la poutre - compression
$F_{t,ep,Rd(4+3)} - \sum_3^3 F_{tj,Rd} = 1938,82 - 639,36$	1299,46	Platine d'about - traction - groupe
$F_{t,wb,Rd(4+3)} - \sum_3^3 F_{tj,Rd} = 4100,25 - 639,36$	3460,89	Ame de la poutre - traction - groupe
$F_{t,ep,Rd(4+3+2)} - \sum_3^2 F_{tj,Rd} = 2908,22 - 1451,24$	1456,98	Platine d'about - traction - groupe
$F_{t,wb,Rd(4+3+2)} - \sum_3^2 F_{tj,Rd} = 6443,25 - 1451,24$	4992,01	Ame de la poutre - traction - groupe
$F_{t,ep,Rd(4+3+2+1)} - \sum_3^1 F_{tj,Rd} = 3877,63 - 2420,65$	1456,98	Platine d'about - traction - groupe
$F_{t,wb,Rd(4+3+2+1)} - \sum_3^1 F_{tj,Rd} = 8779,83 - 2420,65$	6359,18	Ame de la poutre - traction - groupe

- Réduction supplémentaire de la résistance d'une rangée de boulons :

$$F_{t4,Rd} = F_{t1,Rd} h_4/h_1$$

$$F_{t4,Rd} = 504,34 \text{ [kN]} \quad \text{Résistance réduite d'une rangée de boulon}$$

$$F_{t4,Rd} = F_{t2,Rd} h_4/h_2$$

$$F_{t4,Rd} = 504,34 \text{ [kN]} \quad \text{Résistance réduite d'une rangée de boulon}$$

❖ Résistance de la rangée de boulons n°5 :

$F_{t5,Rd,comp}$ - Formule	$F_{t5,Rd,comp}$	Composant
$F_{t5,Rd} = \text{Min} (F_{t5,Rd,comp})$	969,41	Résistance d'une rangée de boulon
$F_{t,ep,Rd(5)} = 969,41$	969,41	Platine d'about - traction
$F_{t,wb,Rd(5)} = 1998,95$	1998,95	Ame de la poutre - traction
$B_{p,Rd} = 2351,29$	2351,29	Boulons au cisaillement/poinçon
$F_{c,fb,Rd} - \sum_1^4 F_{tj,Rd} = 6089,16 - 2924,99$	3164,17	Aile de la poutre - compression
$F_{t,ep,Rd(5+4)} - \sum_4^4 F_{tj,Rd} = 1938,82 - 504,34$	1434,48	Platine d'about - traction - groupe
$F_{t,wb,Rd(5+4)} - \sum_4^4 F_{tj,Rd} = 3834,00 - 504,34$	3329,66	Ame de la poutre - traction - groupe
$F_{t,ep,Rd(5+4+3)} - \sum_4^3 F_{tj,Rd} = 2908,22 - 1143,69$	1764,53	Platine d'about - traction - groupe
$F_{t,wb,Rd(5+4+3)} - \sum_4^3 F_{tj,Rd} = 6017,25 - 1143,69$	4873,56	Ame de la poutre - traction - groupe
$F_{t,ep,Rd(5+4+3+2)} - \sum_4^2 F_{tj,Rd} = 3877,63 - 1955,58$	1922,05	Platine d'about - traction - groupe
$F_{t,wb,Rd(5+4+3+2)} - \sum_4^2 F_{tj,Rd} = 8360,25 - 1955,58$	6404,67	Ame de la poutre - traction - groupe
$F_{t,ep,Rd(5+4+3+2+1)} - \sum_4^1 F_{tj,Rd} = 4847,04 - 2924,99$	1922,05	Platine d'about - traction - groupe
$F_{t,wb,Rd(5+4+3+2+1)} - \sum_4^1 F_{tj,Rd} = 10696,83 - 2924,99$	7771,84	Ame de la poutre - traction - groupe

- Réduction supplémentaire de la résistance d'une rangée de boulons :

$$F_{t5,Rd} = F_{t1,Rd} h_5/h_1$$

$$F_{t5,Rd} = 369,32 \text{ [kN]} \quad \text{Résistance réduite d'une rangée de boulon}$$

$$F_{t5,Rd} = F_{t2,Rd} h_5/h_2$$

$F_{t5,Rd} = 369,32$ [kN] Résistance réduite d'une rangée de boulon

❖ Résistance de la rangée de boulons n°6 :

$F_{t6,Rd,comp}$ - Formule	$F_{t6,Rd,comp}$	Composant
$F_{t6,Rd} = \text{Min}(F_{t6,Rd,comp})$	969,41	Résistance d'une rangée de boulon
$F_{t,ep,Rd(6)} = 969,41$	969,41	Platine d'about - traction
$F_{t,wb,Rd(6)} = 1998,95$	1998,95	Ame de la poutre - traction
$B_{p,Rd} = 2351,29$	2351,29	Boulons au cisaillement/poinçon
$F_{c,fb,Rd} - \sum_1^5 F_{tj,Rd} = 6089,16 - 3294,30$	2794,86	Aile de la poutre - compression
$F_{t,ep,Rd(6+5)} - \sum_5^5 F_{tj,Rd} = 1938,82 - 369,32$	1569,50	Platine d'about - traction - groupe
$F_{t,wb,Rd(6+5)} - \sum_5^5 F_{tj,Rd} = 3834,00 - 369,32$	3464,68	Ame de la poutre - traction - groupe
$F_{t,ep,Rd(6+5+4)} - \sum_5^4 F_{tj,Rd} = 2908,22 - 873,65$	2034,57	Platine d'about - traction - groupe
$F_{t,wb,Rd(6+5+4)} - \sum_5^4 F_{tj,Rd} = 5751,00 - 873,65$	4877,35	Ame de la poutre - traction - groupe
$F_{t,ep,Rd(6+5+4+3)} - \sum_5^3 F_{tj,Rd} = 3877,63 - 1513,01$	2364,62	Platine d'about - traction - groupe
$F_{t,wb,Rd(6+5+4+3)} - \sum_5^3 F_{tj,Rd} = 7934,25 - 1513,01$	6421,24	Ame de la poutre - traction - groupe
$F_{t,ep,Rd(6+5+4+3+2)} - \sum_5^2 F_{tj,Rd} = 4847,04 - 2324,89$	2522,15	Platine d'about - traction - groupe
$F_{t,wb,Rd(6+5+4+3+2)} - \sum_5^2 F_{tj,Rd} = 10277,25 - 2324,89$	7952,36	Ame de la poutre - traction - groupe
$F_{t,ep,Rd(6+5+4+3+2+1)} - \sum_5^1 F_{tj,Rd} = 5816,45 - 3294,30$	2522,15	Platine d'about - traction - groupe
$F_{t,wb,Rd(6+5+4+3+2+1)} - \sum_5^1 F_{tj,Rd} = 12613,83 - 3294,30$	9319,53	Ame de la poutre - traction - groupe

▪ Réduction supplémentaire de la résistance d'une rangée de boulons :

$$F_{t6,Rd} = F_{t1,Rd} h_6/h_1$$

$F_{t6,Rd} = 234,29$ [kN] Résistance réduite d'une rangée de boulon

$$F_{t6,Rd} = F_{t2,Rd} h_6/h_2$$

$F_{t6,Rd} = 234,29$ [kN] Résistance réduite d'une rangée de boulon

❖ Résistance de la rangée de boulons n°7 :

$F_{t7,Rd,comp}$ - Formule	$F_{t7,Rd,comp}$	Composant
$F_{t7,Rd} = \text{Min}(F_{t7,Rd,comp})$	969,41	Résistance d'une rangée de boulon
$F_{t,ep,Rd(7)} = 969,41$	969,41	Platine d'about - traction
$F_{t,wb,Rd(7)} = 1998,95$	1998,95	Ame de la poutre - traction
$B_{p,Rd} = 2351,29$	2351,29	Boulons au cisaillement/poinçon
$F_{c,fb,Rd} - \sum_1^6 F_{tj,Rd} = 6089,16 - 3528,60$	2560,56	Aile de la poutre - compression
$F_{t,ep,Rd(7+6)} - \sum_6^6 F_{tj,Rd} = 1938,82 - 234,29$	1704,52	Platine d'about - traction - groupe
$F_{t,wb,Rd(7+6)} - \sum_6^6 F_{tj,Rd} = 4127,49 - 234,29$	3893,19	Ame de la poutre - traction - groupe
$F_{t,ep,Rd(7+6+5)} - \sum_6^5 F_{tj,Rd} = 2908,22 - 603,61$	2304,61	Platine d'about - traction - groupe

$F_{t7,Rd,comp}$ - Formule	$F_{t7,Rd,comp}$	Composant
$F_{t,wb,Rd(7+6+5)} - \sum_6^5 F_{tj,Rd} = 6044,49 - 603,61$	5440,88	Ame de la poutre - traction - groupe
$F_{t,ep,Rd(7+6+5+4)} - \sum_6^4 F_{tj,Rd} = 3877,63 - 1107,95$	2769,69	Platine d'about - traction - groupe
$F_{t,wb,Rd(7+6+5+4)} - \sum_6^4 F_{tj,Rd} = 7961,49 - 1107,95$	6853,54	Ame de la poutre - traction - groupe
$F_{t,ep,Rd(7+6+5+4+3)} - \sum_6^3 F_{tj,Rd} = 4847,04 - 1747,30$	3099,74	Platine d'about - traction - groupe
$F_{t,wb,Rd(7+6+5+4+3)} - \sum_6^3 F_{tj,Rd} = 10144,74 - 1747,30$	8397,44	Ame de la poutre - traction - groupe
$F_{t,ep,Rd(7+6+5+4+3+2)} - \sum_6^2 F_{tj,Rd} = 5816,45 - 2559,19$	3257,26	Platine d'about - traction - groupe
$F_{t,wb,Rd(7+6+5+4+3+2)} - \sum_6^2 F_{tj,Rd} = 12487,74 - 2559,19$	9928,55	Ame de la poutre - traction - groupe
$F_{t,ep,Rd(7+6+5+4+3+2+1)} - \sum_6^1 F_{tj,Rd} = 6785,86 - 3528,60$	3257,26	Platine d'about - traction - groupe
$F_{t,wb,Rd(7+6+5+4+3+2+1)} - \sum_6^1 F_{tj,Rd} = 14824,32 - 3528,60$	11295,72	Ame de la poutre - traction - groupe

- Réduction supplémentaire de la résistance d'une rangée de boulons :

$$F_{t7,Rd} = F_{t1,Rd} h_7/h_1$$

$$F_{t7,Rd} = 99,27 \text{ [kN]} \quad \text{Résistance réduite d'une rangée de boulon}$$

$$F_{t7,Rd} = F_{t2,Rd} h_7/h_2$$

$$F_{t7,Rd} = 99,27 \text{ [kN]} \quad \text{Résistance réduite d'une rangée de boulon}$$

- ❖ Tableau récapitulatif des efforts :

Tableau 27. Tableau récapitulatif des efforts :

Nr	h_j	$F_{tj,Rd}$	$F_{t,fc,Rd}$	$F_{t,wc,Rd}$	$F_{t,ep,Rd}$	$F_{t,wb,Rd}$	$F_{t,Rd}$	$B_{p,Rd}$
1	1292	969,41	-	-	969,41	1998,95	969,41	2351,29
2	1082	811,88	-	-	969,41	1998,95	969,41	2351,29
3	852	639,36	-	-	969,41	1998,95	969,41	2351,29
4	672	504,34	-	-	969,41	1998,95	969,41	2351,29
5	492	369,32	-	-	969,41	1998,95	969,41	2351,29
6	312	234,29	-	-	969,41	1998,95	969,41	2351,29
7	132	99,27	-	-	969,41	1998,95	969,41	2351,29

- ❖ Résistance de l'assemblage à la flexion M_j, Rd :

$$M_{j,Rd} = \sum h_j F_{tj,Rd}$$

$$M_{j,Rd} = 3283,74 \text{ [kN*m]} \quad \text{Résistance de l'assemblage à la flexion}$$

$$M_{b1,Ed} / M_{j,Rd} \leq 1,0 \quad 0,91 < 1,00 \quad \text{vérifié.}$$

5. Résistance de l'assemblage au cisaillement :

$\alpha_v =$	0,60	Coefficient pour le calcul de $F_{v,Rd}$
$\beta_{Lf} =$	0,88	Coefficient réducteur pour les assemblages longs
$F_{v,Rd} =$	358,97	[kN] Résistance d'un boulon au cisaillement
$F_{t,Rd,max} =$	484,70	[kN] Résistance d'un boulon à la traction
$F_{b,Rd,int} =$	1039,50	[kN] Résistance du boulon intérieur en pression diam
$F_{b,Rd,ext} =$	1039,50	[kN] Résistance du boulon de rive en pression diam

Nr	$F_{tj,Rd,N}$	$F_{tj,Ed,N}$	$F_{tj,Rd,M}$	$F_{tj,Ed,M}$	$F_{tj,Ed}$	$F_{vj,Rd}$
1	969,41	-39,29	969,41	885,17	845,88	270,47
2	969,41	-39,29	811,88	741,33	702,04	346,56
3	969,41	-39,29	639,36	583,80	544,51	429,90
4	969,41	-39,29	504,34	460,51	421,22	495,12
5	969,41	-39,29	369,32	337,22	297,93	560,34
6	969,41	-39,29	234,29	213,94	174,64	625,56
7	969,41	-39,29	99,27	90,65	51,35	690,78

$F_{tj,Rd,N}$ – Résistance d'une rangée de boulons à la traction pure

$F_{tj,Ed,N}$ – Effort dans une rangée de boulons dû à l'effort axial

$F_{tj,Rd,M}$ – Résistance d'une rangée de boulons à la flexion pure

$F_{tj,Ed,M}$ – Effort dans une rangée de boulons dû au moment

$F_{tj,Ed}$ – Effort de traction maximal dans la rangée de boulons

$F_{vj,Rd}$ – Résistance réduite d'une rangée de boulon

$$F_{tj,Ed,N} = N_{j,Ed} F_{tj,Rd,N} / N_{j,Rd}$$

$$F_{tj,Ed,M} = M_{j,Ed} F_{tj,Rd,M} / M_{j,Rd}$$

$$F_{tj,Ed} = F_{tj,Ed,N} + F_{tj,Ed,M}$$

$$F_{vj,Rd} = \text{Min} (n_h F_{v,Rd} (1 - F_{tj,Ed} / (1.4 n_h F_{t,Rd,max})), n_h F_{v,Rd}, n_h F_{b,Rd})$$

$$V_{j,Rd} = n_h \sum_{i=1}^n F_{vj,Rd}$$

$$V_{j,Rd} = 3418,72 \text{ [kN]} \quad \text{Résistance de l'assemblage au cisaillement}$$

$$V_{b1,Ed} / V_{j,Rd} \leq 1,0 \quad 0,02 < 1,00 \quad \text{vérifié.}$$

6. Résistance des soudures :

$$A_w = 819,16 \text{ [cm}^2\text{]} \quad \text{Aire de toutes les soudures}$$

$$A_{wy} = 270,00 \text{ [cm}^2\text{]} \quad \text{Aire des soudures horizontales}$$

$$A_{wz} = 549,16 \text{ [cm}^2\text{]} \quad \text{Aire des soudures verticales}$$

$$I_{wy} = 1628499,60 \text{ [cm}^4\text{]} \quad \text{Moment d'inertie du système de soudures}$$

$A_w = 819,16$ [cm²] Aire de toutes les soudures
 $\sigma_{\perp \max} = \tau_{\perp \max} = -95,21$ [MPa] Contrainte normale dans la soudure
 $\sigma_{\perp} = \tau_{\perp} = -95,21$ [MPa] Contraintes dans la soudure verticale
 $\tau_{II} = -1,48$ [MPa] Contrainte tangentielle
 $\beta_w = 0,90$ Coefficient de corrélation

$$\sqrt{[\sigma_{\perp, \max}^2 + 3 * (\tau_{\perp, \max}^2)]} \leq f_u / (\beta_w * \gamma_{M2}) \quad 190.42 < 440 \quad \text{vérifié.}$$

$$\sqrt{[\sigma_{\perp}^2 + 3 * (\tau_{\perp}^2 + \tau_{II}^2)]} \leq f_u / (\beta_w * \gamma_{M2}) \quad 193.6 < 440 \quad \text{vérifié.}$$

$$\sigma_{\perp} \leq 0.9 * f_u / \gamma_{M2} \quad 95.21 < 356.4 \quad \text{vérifié.}$$

7. Rigidité de l'assemblage :

$k_1 = \infty$ Coefficient de rigidité du panneau d'âme du poteau en cisaillement

$k_2 = \infty$ Coefficient de rigidité du panneau d'âme du poteau en compression

$k_3 = \infty$ Coefficient de rigidité du panneau d'âme du poteau en traction

$t_{\text{wash}} = 6$ [mm] Epaisseur de la plaquette

$h_{\text{head}} = 21$ [mm] Hauteur de la tête du boulon

$h_{\text{nut}} = 30$ [mm] Hauteur de l'écrou du boulon

$L_b = 108$ [mm] Longueur du boulon

$k_{10} = 8$ [mm] Coefficient de rigidité des boulons

❖ Rigidités des rangées de boulons :

Tableau 28. Rigidités des rangées de boulons

Nr	h _j	k ₃	k ₄	k ₅	k _{eff,j}	k _{eff,j} h _j	k _{eff,j} h _j ²
					Somme	380,16	34420,35
1	1292	∞	∞	272	8	101,66	13137,90
2	1082	∞	∞	272	8	85,14	9215,11
3	852	∞	∞	272	8	67,05	5714,78
4	672	∞	∞	261	8	52,76	3547,15
5	492	∞	∞	261	8	38,63	1902,10
6	312	∞	∞	261	8	24,51	765,53
7	132	∞	∞	272	8	10,41	137,78

$$k_{\text{eff},j} = 1 / (\sum_{i=1}^5 (1 / k_{i,j}))$$

$$z_{\text{eq}} = \sum_j k_{\text{eff},j} h_j^2 / \sum_j k_{\text{eff},j} h_j$$

$$z_{\text{eq}} = 905 \text{ [mm] Bras de levier équivalent}$$

$$k_{eq} = \sum_j k_{eff,j} h_j / z_{eq}$$

$k_{eq} = 42$ [mm] Coefficient de rigidité équivalent du système de boulons

$$S_{j,ini} = E z_{eq}^2 k_{eq}$$

$S_{j,ini} = 7228273,40$ [kN*m] Rigidité en rotation initiale

$\mu = 2,34$ Coefficient de rigidité de l'assemblage

$$S_j = S_{j,ini} / \mu$$

$S_j = 3091620,18$ [kN*m] Rigidité en rotation finale

- Classification de l'assemblage par rigidité :

$S_{j,rig} = 474729,07$ [kN*m] Rigidité de l'assemblage rigide

$S_{j,pin} = 29670,57$ [kN*m] Rigidité de l'assemblage articulé

$S_{j,ini} \geq S_{j,rig}$ RIGIDE

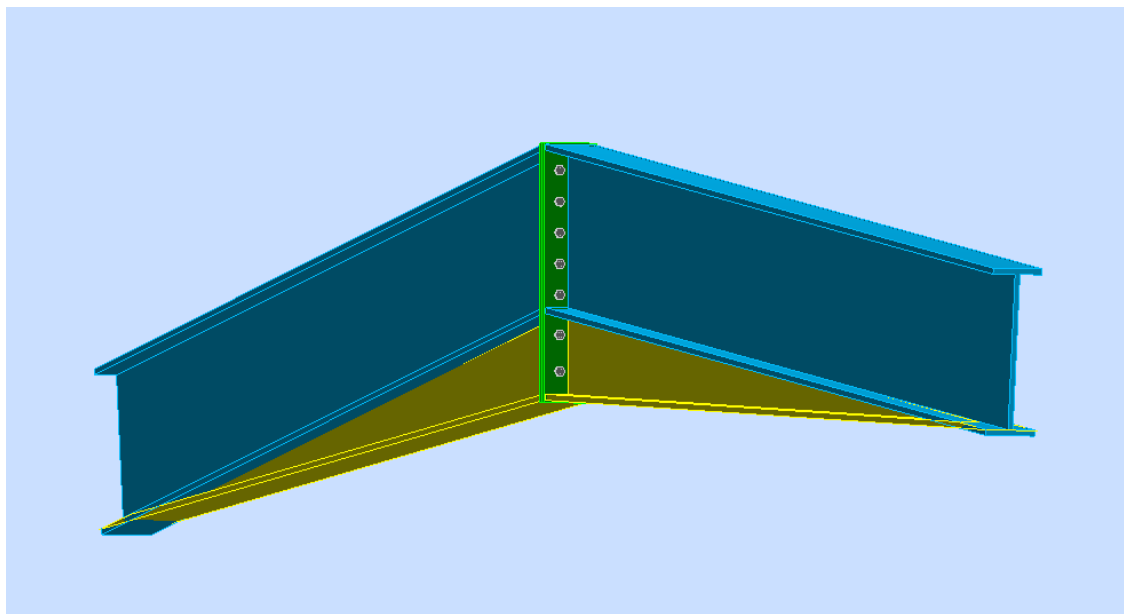


Figure 36. Vue de l'assemblage Traverse – Traverse

7.2.2 Assemblage Traverse - Poteau

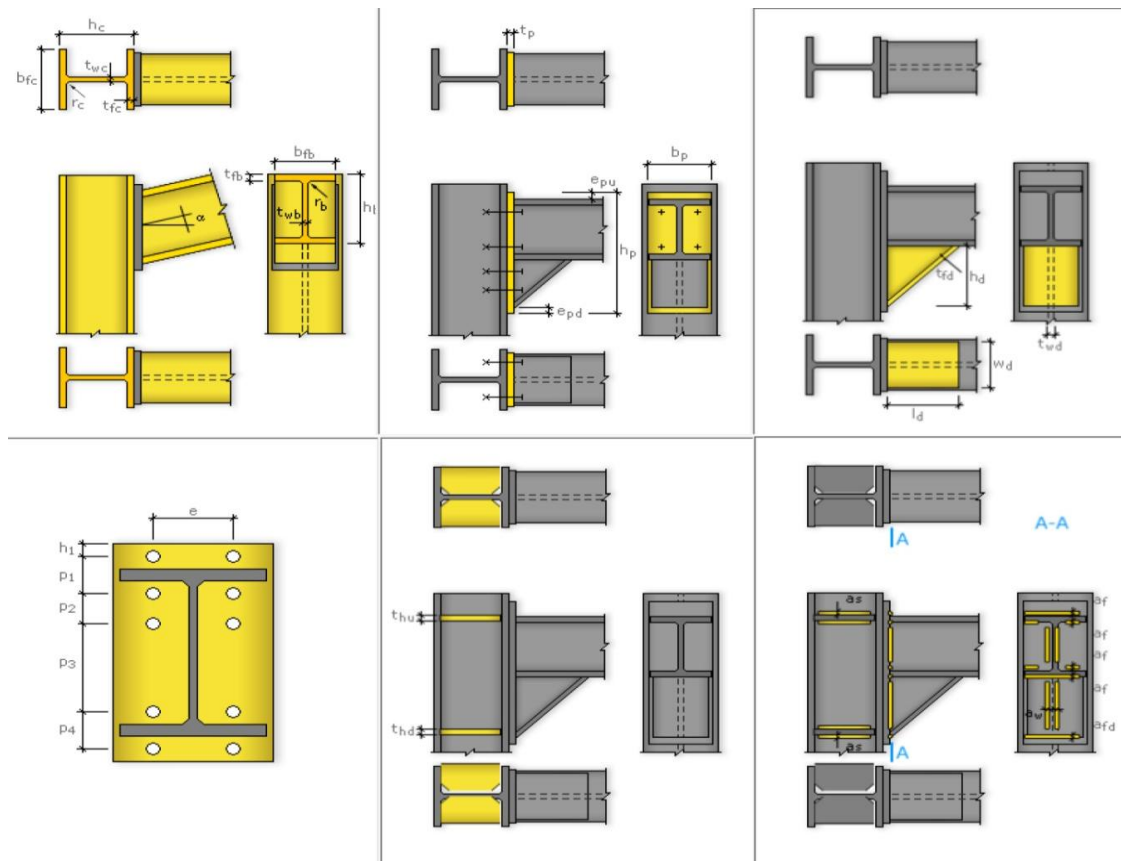


Figure 37. Schéma de l'assemblage Traverse - Poteau

7.2.2.1 Général

Nœud de la structure : 52

Barres de la structure : 31 et 33

7.2.2.2 Géométrie

1. Poteau :

Profilé : HEB 900

Barre N° : 31

$\alpha = -90,0$

[Deg] Angle d'inclinaison

$h_c = 900$

[mm] Hauteur de la section du poteau

$b_{fc} = 300$

[mm] Largeur de la section du poteau

$t_{wc} = 19$

[mm] Epaisseur de l'âme de la section du poteau

$t_{fc} = 35$

[mm] Epaisseur de l'aile de la section du poteau

$r_c = 30$

[mm] Rayon de congé de la section du poteau

Profilé : HEB 900

$A_c = 371,28$ [cm²] Aire de la section du poteau

$I_{xc} = 494065,00$ [cm⁴] Moment d'inertie de la section du poteau

Matériau : ACIER E36

$f_{yc} = 355,00$ [MPa] Résistance

2. Poutre :

Profilé : Traverse PRS

Barre N° : 33

$\alpha = 7,6$ [Deg] Angle d'inclinaison

$h_b = 970$ [mm] Hauteur de la section de la poutre

$b_f = 300$ [mm] Largeur de la section de la poutre

$t_{wb} = 30$ [mm] Epaisseur de l'âme de la section de la poutre

$t_{fb} = 35$ [mm] Epaisseur de l'aile de la section de la poutre

$r_b = 0$ [mm] Rayon de congé de la section de la poutre

$A_b = 480,00$ [cm²] Aire de la section de la poutre

$I_{xb} = 641432,50$ [cm⁴] Moment d'inertie de la poutre

Matériau : ACIER E36

$f_{yb} = 355,00$ [MPa] Résistance

3. Boulons :

$d = 30$ [mm] Diamètre du boulon

Classe = HR 10.9 Classe du boulon

$F_{tRd} = 484,70$ [kN] Résistance du boulon à la traction

$n_h = 2$ Nombre de colonnes des boulons

$n_v = 7$ Nombre de rangées des boulons

$h_1 = 160$ [mm] Pince premier boulon-extrémité supérieure

Ecartement $e_i = 135$ [mm]

Entraxe $p_i = 180; 180; 180; 180; 230; 210$ [mm]

4. Platine :

$h_p = 1499$ [mm] Hauteur de la platine

$b_p = 300$ [mm] Largeur de la platine

$t_p = 35$ [mm] Epaisseur de la platine

Matériau : ACIER E36

$f_{yp} = 355,00$ [MPa] Résistance

5. *Jarret inférieur :*

$w_d = 300$ [mm] Largeur de la platine
 $t_{fd} = 35$ [mm] Epaisseur de l'aile
 $h_d = 500$ [mm] Hauteur de la platine
 $t_{wd} = 35$ [mm] Epaisseur de l'âme
 $l_d = 3000$ [mm] Longueur de la platine
 $\alpha = 16,8$ [Deg] Angle d'inclinaison

Matériau : ACIER E36

$f_{ybu} = 235,00$ [MPa] Résistance

6. *Raidisseur poteau :*

▪ Supérieur :

$h_{su} = 830$ [mm] Hauteur du raidisseur
 $b_{su} = 141$ [mm] Largeur du raidisseur
 $t_{hu} = 20$ [mm] Epaisseur du raidisseur

Matériau : ACIER E36

$f_{ysu} = 355,00$ [MPa] Résistance

▪ Inférieur :

$h_{sd} = 830$ [mm] Hauteur du raidisseur
 $b_{sd} = 141$ [mm] Largeur du raidisseur
 $t_{hd} = 20$ [mm] Epaisseur du raidisseur

Matériau : ACIER E36

$f_{ysu} = 355,00$ [MPa] Résistance

7. *Soudures d'angle :*

$a_w = 20$ [mm] Soudure âme
 $a_f = 25$ [mm] Soudure semelle
 $a_s = 20$ [mm] Soudure du raidisseur
 $a_{fd} = 5$ [mm] Soudure horizontale

8. *Coefficients de matériau :*

$\gamma_{M0} = 1,00$ Coefficient de sécurité partiel [2.2]

$\gamma_{M1} = 1,00$ Coefficient de sécurité partiel [2.2]

$\gamma_{M0} = 1,00$ Coefficient de sécurité partiel [2.2]

$\gamma_{M2} = 1,25$ Coefficient de sécurité partiel [2.2]

$\gamma_{M3} = 1,25$ Coefficient de sécurité partiel [2.2]

7.2.2.3 Efforts

- Etat limite ultime :

Cas : Combinaison : $1.35 * (G_0 + G_1) + 1 * (Q + N) + 1.5 * V_x^- + 0.8 * T^+$

$M_{b1,Ed} = 3120,15$ [kN*m] Moment fléchissant dans la poutre droite

$V_{b1,Ed} = -627,97$ [kN] Effort tranchant dans la poutre droite

$N_{b1,Ed} = -327,06$ [kN] Effort axial dans la poutre droite

$M_{c1,Ed} = 3120,15$ [kN*m] Moment fléchissant dans la poteau inférieur

$V_{c1,Ed} = -327,06$ [kN] Effort tranchant dans le poteau inférieur

$N_{c1,Ed} = -627,97$ [kN] Effort axial dans le poteau inférieur

7.2.2.4 Résultats

1. Résistances de la poutre :

- ❖ Compression :

$A_b = 480,00$ [cm²] Aire de la section

$N_{cb,Rd} = A_b f_{yb} / \gamma_{M0}$

$N_{cb,Rd} = 17040,00$ [kN] Résistance de calcul de la section à la compression

- ❖ Cisaillement :

$A_{vb} = 445,00$ [cm²] Aire de la section au cisaillement

$V_{cb,Rd} = A_{vb} (f_{yb} / \sqrt{3}) / \gamma_{M0}$

$V_{cb,Rd} = 9120,69$ [kN] Résistance de calcul de la section au cisaillement

$V_{b1,Ed} / V_{cb,Rd} \leq 1,0$ $0,07 < 1,00$ vérifié.

- ❖ Flexion – Moment plastique (Sans renforts) :

$W_{plb} = 17609,25$ [cm³] Facteur plastique de la section

$M_{b,pl,Rd} = W_{plb} f_{yb} / \gamma_{M0}$

$M_{b,pl,Rd} = 6251,28$ [kN*m] Résistance plastique de la section à la flexion

- ❖ Flexion au contact de la plaque avec l'élément assemble :

$W_{pl} = 25048,45$ [cm³] Facteur plastique de la section

$M_{cb,Rd} = W_{pl} f_{yb} / \gamma_{M0}$

$M_{cb,Rd} = 8892,20$ [kN*m] Résistance de calcul de la section à la flexion

❖ Aile et âme en compression :

$M_{cb,Rd} = 8892,20$ [kN*m] Résistance de calcul de la section à la flexion

$h_f = 1443$ [mm] Distance entre les centres de gravité des ailes

$F_{c,fb,Rd} = M_{cb,Rd} / h_f$

$F_{c,fb,Rd} = 6163,74$ [kN] Résistance de l'aile et de l'âme comprimées

❖ Ame ou aile du renfort en compression – Niveau de l'aile inférieure de la poutre :

▪ Pression diamétrale :

$\beta = 7,6$ [Deg] Angle entre la platine d'about et la poutre

$\gamma = 16,8$ [Deg] Angle d'inclinaison du renfort

$b_{eff,c,wb} = 614$ [mm] Largeur efficace de l'âme à la compression

$A_{vb} = 270,00$ [cm²] Aire de la section au cisaillement

$\omega = 0,79$ Coefficient réducteur pour l'interaction

$\sigma_{com,Ed} = 211,26$ [MPa] Contrainte de compression maximale dans l'âme

$k_{wc} = 1,00$ Coefficient réducteur

$F_{c,wb,Rd1} = [\omega k_{wc} b_{eff,c,wb} t_{wb} f_{yb} / \gamma_{M0}] \cos(\gamma) / \sin(\gamma - \beta)$

$F_{c,wb,Rd1} = 30954,47$ [kN] Résistance de l'âme de la poutre

▪ Flambement :

$d_{wb} = 841$ [mm] Hauteur de l'âme comprimée

$\lambda_p = 0,92$ Elancement de plaque

$\rho = 0,85$ Coefficient réducteur pour le flambement de l'élément

$F_{c,wb,Rd2} = [\omega k_{wc} \rho b_{eff,c,wb} t_{wb} f_{yb} / \gamma_{M1}] \cos(\gamma) / \sin(\gamma - \beta)$

$F_{c,wb,Rd2} = 26387,42$ [kN] Résistance de l'âme de la poutre

▪ Résistance de l'aile du renfort

$F_{c,wb,Rd3} = b_b t_b f_{yb} / (0.8 * \gamma_{M0})$

$F_{c,wb,Rd3} = 4659,38$ [kN] Résistance de l'aile du renfort

▪ Résistance finale :

$F_{c,wb,Rd,low} = \text{Min} (F_{c,wb,Rd1}, F_{c,wb,Rd2}, F_{c,wb,Rd3})$

$F_{c,wb,Rd,low} = 4659,38$ [kN] Résistance de l'âme de la poutre

2. Résistances du poteau :

❖ Panneau d'âme en cisaillement :

$$\begin{aligned}M_{b1,Ed} &= 3120,15 \text{ [kN*m]} && \text{Moment fléchissant dans la poutre droite} \\M_{b2,Ed} &= 0,00 \text{ [kN*m]} && \text{Moment fléchissant dans la poutre gauche} \\V_{c1,Ed} &= -327,06 \text{ [kN]} && \text{Effort tranchant dans le poteau inférieur} \\V_{c2,Ed} &= 0,00 \text{ [kN]} && \text{Effort tranchant dans le poteau supérieur} \\z &= 1220 \text{ [mm]} && \text{Bras de levier} \\V_{wp,Ed} &= (M_{b1,Ed} - M_{b2,Ed}) / z - (V_{c1,Ed} - V_{c2,Ed}) / 2 \\V_{wp,Ed} &= 2720,36 \text{ [kN]} && \text{Panneau d'âme en cisaillement} \\A_{vs} &= 188,75 \text{ [cm}^2\text{]} && \text{Aire de cisaillement de l'âme du poteau} \\A_{vc} &= 188,75 \text{ [cm}^2\text{]} && \text{Aire de la section au cisaillement} \\d_s &= 1459 \text{ [mm]} && \text{Distance entre les CDG des raidisseurs} \\M_{pl,fc,Rd} &= 32,62 \text{ [kN*m]} && \text{Résistance plastique de l'aile du poteau} \\M_{pl,stu,Rd} &= 10,65 \text{ [kN*m]} && \text{Résistance plas du raidisseur trans sup} \\M_{pl,sti,Rd} &= 10,65 \text{ [kN*m]} && \text{Résistance plastique du raidisseur trans inf} \\V_{wp,Rd} &= 0.9 (A_{vs} * f_{y,wc}) / (\sqrt{3} \gamma_{M0}) + \text{Min}(4 M_{pl,fc,Rd} / d_s, (2 M_{pl,fc,Rd} + M_{pl,stu,Rd} + M_{pl,sti,Rd}) / d_s) \\V_{wp,Rd} &= 3541,09 \text{ [kN]} && \text{Résistance du panneau d'âme au cisaillement} \\V_{wp,Ed} / V_{wp,Rd} &< 1,0 && 0,77 < 1,00 \quad \text{vérifié.}\end{aligned}$$

❖ Ame en compression transversale – Niveau de l'aile inférieure de la poutre :

▪ Pression diamétrale :

$$\begin{aligned}t_{wc} &= 19 \text{ [mm]} && \text{Epaisseur efficace de l'âme du poteau} \\b_{eff,c,wc} &= 502 \text{ [mm]} && \text{Largeur efficace de l'âme à la compression} \\A_{vc} &= 188,75 \text{ [cm}^2\text{]} && \text{Aire de la section au cisaillement} \\ \omega &= 0,87 && \text{Coefficient réducteur pour l'interaction} \\k_{wc} &= 0,97 && \text{Coefficient réducteur} \\A_s &= 56,30 \text{ [cm}^2\text{]} && \text{Aire de la section du raidisseur renforçant l'âme} \\F_{c,wc,Rd1} &= \omega k_{wc} b_{eff,c,wc} t_{wc} f_{yc} / \gamma_{M0} + A_s f_{ys} / \gamma_{M0} \\F_{c,wc,Rd1} &= 4781,55 \text{ [kN]} && \text{Résistance de l'âme du poteau}\end{aligned}$$

- Flambement :

$d_{wc} = 770$ [mm] Hauteur de l'âme comprimée
 $\lambda_p = 1,29$ Elancement de plaque
 $\rho = 0,66$ Coefficient réducteur pour le flambement de l'élément
 $\lambda_s = 8,61$ Elancement du raidisseur
 $\chi_s = 1,00$ Coefficient de flambement du raidisseur

$$F_{c,wc,Rd2} = \omega k_{wc} \rho b_{eff,c,wc} t_{wc} f_{yc} / \gamma_{M1} + A_s \chi_s f_{ys} / \gamma_{M1}$$

$F_{c,wc,Rd2} = 3823,63$ [kN] Résistance de l'âme du poteau

- Résistance finale :

$$F_{c,wc,Rd,low} = \text{Min} (F_{c,wc,Rd1}, F_{c,wc,Rd2})$$

$F_{c,wc,Rd} = 3823,63$ [kN] Résistance de l'âme du poteau

- ❖ Ame en traction transversale – Niveau de l'aile inférieure de la poutre :

- Pression diamétrale :

$t_{wc} = 19$ [mm] Epaisseur efficace de l'âme du poteau
 $b_{eff,c,wc} = 501$ [mm] Largeur efficace de l'âme à la compression
 $A_{vc} = 188,75$ [cm²] Aire de la section au cisaillement
 $\omega = 0,87$ Coefficient réducteur pour
 $k_{wc} = 0,97$ Coefficient réducteur
 $A_s = 56,30$ [cm²] Aire de la section du raidisseur renforçant l'âme

$$F_{c,wc,Rd1} = \omega k_{wc} b_{eff,c,wc} t_{wc} f_{yc} / \gamma_{M0} + A_s f_{ys} / \gamma_{M0}$$

$F_{c,wc,Rd1} = 4776,29$ [kN] Résistance de l'âme du poteau

- Flambement :

$d_{wc} = 770$ [mm] Hauteur de l'âme comprimée
 $\lambda_p = 1,29$ Elancement de plaque
 $\rho = 0,66$ Coefficient réducteur pour le flambement de l'élément
 $\lambda_s = 8,61$ Elancement du raidisseur
 $\chi_s = 1,00$ Coefficient de flambement du raidisseur

$$F_{c,wc,Rd2} = \omega k_{wc} \rho b_{eff,c,wc} t_{wc} f_{yc} / \gamma_{M1} + A_s \chi_s f_{ys} / \gamma_{M1}$$

$F_{c,wc,Rd2} = 3822,03$ [kN] Résistance de l'âme du poteau

- Résistance finale :

$$F_{c,wc,Rd,upp} = \text{Min} (F_{c,wc,Rd1} , F_{c,wc,Rd2})$$

$$F_{c,wc,Rd,upp} = 3822,03 \text{ [kN]} \quad \text{Résistance de l'âme du poteau}$$

3. Paramètres géométriques de l'assemblage :

- ❖ Longueurs efficaces et paramètres – semelle du poteau :

Tableau 29. Longueurs efficaces et paramètres – semelle du poteau

Nr	M	m_x	e	e_x	p	$l_{eff,cp}$	$l_{eff,nc}$	$l_{eff,1}$	$l_{eff,2}$	$l_{eff,cp,g}$	$l_{eff,nc,g}$	$l_{eff,1,g}$	$l_{eff,2,g}$
1	34	-	83	-	180	215	238	215	238	288	208	208	208
2	34	-	83	-	180	215	240	215	240	360	180	180	180
3	34	-	83	-	180	215	240	215	240	360	180	180	180
4	34	-	83	-	180	215	240	215	240	360	180	180	180
5	34	-	83	-	205	215	240	215	240	410	205	205	205
6	34	-	83	-	220	215	240	215	240	440	220	220	220
7	34	-	83	-	210	215	238	215	238	318	223	223	223

- ❖ Longueurs efficaces et paramètres - platine d'about :

Tableau 30. Longueurs efficaces et paramètres – platine d'about

Nr	m	m_x	e	e_x	p	$l_{eff,cp}$	$l_{eff,nc}$	$l_{eff,1}$	$l_{eff,2}$	$l_{eff,cp,g}$	$l_{eff,nc,g}$	$l_{eff,1,g}$	$l_{eff,2,g}$
1	30	-	83	-	180	188	221	188	221	274	200	200	200
2	30	-	83	-	180	188	223	188	223	360	180	180	180
3	30	-	83	-	180	188	223	188	223	360	180	180	180
4	30	-	83	-	180	188	223	188	223	360	180	180	180
5	30	-	83	-	205	188	223	188	223	410	205	205	205
6	30	-	83	-	220	188	223	188	223	440	220	220	220
7	30	-	83	-	210	188	223	188	223	304	216	216	216

m – Distance du boulon de l'âme

m_x – Distance du boulon de l'aile de la poutre

e – Pince entre le boulon et le bord extérieur

e_x – Pince entre le boulon et le bord extérieur horizontal

p – Entraxe des boulons

$l_{eff,cp}$ – Longueur efficace pour un boulon dans les mécanismes circ

$l_{eff,nc}$ – Longueur efficace pour un boulon dans les mécanismes non circ

$l_{eff,1}$ – Longueur efficace pour un boulon pour le mode 1

$l_{eff,2}$ – Longueur efficace pour un boulon pour le mode 2

$l_{eff,cp,g}$ – Longueur efficace pour un groupe de boulons dans les méca circ

m – Distance du boulon de l'âme

$l_{eff,nc,g}$ – Longueur efficace pour un groupe de boulons dans les méca circ

$l_{eff,1,g}$ – Longueur efficace pour un groupe de boulons pour le mode 1

$l_{eff,2,g}$ – Longueur efficace pour un groupe de boulons pour le mode 2

4. Résistance de l'assemblage à la compression :

$$N_{j,Rd} = \text{Min} (N_{cb,Rd} 2 F_{c,wb,Rd,low} , 2 F_{c,wc,Rd,low} , 2 F_{c,wc,Rd,upp})$$

$$N_{j,Rd} = 7644,06 \text{ [kN]} \quad \text{Résistance de l'assemblage à la compression}$$

$$N_{b1,Ed} / N_{j,Rd} \leq 1,0 \quad 0,04 < 1,00 \quad \text{vérifié.}$$

5. Résistance de l'assemblage à la flexion :

$$F_{t,Rd} = 484,70 \text{ [kN]} \quad \text{Résistance du boulon à la traction}$$

$$B_{p,Rd} = 1175,65 \text{ [kN]} \quad \text{Résistance du boulon au cisaillement par poinçon}$$

$F_{t,fc,Rd}$ – résistance de la semelle du poteau à la flexion

$F_{t,wc,Rd}$ – résistance de l'âme du poteau à la traction

$F_{t,ep,Rd}$ – résistance de la platine fléchie à la flexion

$F_{t,wb,Rd}$ – résistance de l'âme à la traction

$$F_{t,fc,Rd} = \text{Min} (F_{T,1,fc,Rd} , F_{T,2,fc,Rd} , F_{T,3,fc,Rd})$$

$$F_{t,wc,Rd} = \omega b_{eff,t,wc} t_{wc} f_{yc} / \gamma_{M0}$$

$$F_{t,ep,Rd} = \text{Min} (F_{T,1,ep,Rd} , F_{T,2,ep,Rd} , F_{T,3,ep,Rd})$$

$$F_{t,wb,Rd} = b_{eff,t,wb} t_{wb} f_{yb} / \gamma_{M0}$$

❖ Résistance de la rangée de boulons n°1 :

$F_{t1,Rd,comp}$ - Formule	$F_{t1,Rd,comp}$	Composant
$F_{t1,Rd} = \text{Min} (F_{t1,Rd,comp})$	969,41	Résistance d'une rangée de boulon
$F_{t,fc,Rd(1)} = 969,41$	969,41	Aile du poteau - traction
$F_{t,wc,Rd(1)} = 1374,14$	1374,14	Ame du poteau - traction
$F_{t,ep,Rd(1)} = 969,41$	969,41	Platine d'about - traction
$F_{t,wb,Rd(1)} = 1998,95$	1998,95	Ame de la poutre - traction
$B_{p,Rd} = 2351,29$	2351,29	Boulons au cisaillement/poinçonnement
$V_{wp,Rd}/\beta = 3541,09$	3541,09	Panneau d'âme - compression
$F_{c,wc,Rd} = 3823,63$	3823,63	Ame du poteau - compression
$F_{c,fb,Rd} = 6163,74$	6163,74	Aile de la poutre - compression
$F_{c,wb,Rd} = 4659,38$	4659,38	Ame de la poutre - compression

❖ Résistance de la rangée de boulons n°2 :

$F_{t2,Rd,comp}$ - Formule	$F_{t2,Rd,comp}$	Composant
$F_{t2,Rd} = \text{Min} (F_{t2,Rd,comp})$	969,41	Résistance d'une rangée de boulon
$F_{t,fc,Rd(2)} = 969,41$	969,41	Aile du poteau - traction
$F_{t,wc,Rd(2)} = 1374,14$	1374,14	Ame du poteau - traction
$F_{t,ep,Rd(2)} = 969,41$	969,41	Platine d'about - traction
$F_{t,wb,Rd(2)} = 1998,95$	1998,95	Ame de la poutre - traction
$B_{p,Rd} = 2351,29$	2351,29	Boulons au cisaillement/poinçonnement
$V_{wp,Rd}/\beta - \sum_1^1 F_{ti,Rd} = 3541,09 - 969,41$	2571,68	Panneau d'âme - compression
$F_{c,wc,Rd} - \sum_1^1 F_{tj,Rd} = 3823,63 - 969,41$	2854,22	Ame du poteau - compression
$F_{c,fb,Rd} - \sum_1^1 F_{tj,Rd} = 6163,74 - 969,41$	5194,33	Aile de la poutre - compression
$F_{c,wb,Rd} - \sum_1^1 F_{tj,Rd} = 4659,38 - 969,41$	3689,97	Ame de la poutre - compression
$F_{t,fc,Rd(2+1)} - \sum_1^1 F_{tj,Rd} = 1938,82 - 969,41$	969,41	Aile du poteau - traction - groupe
$F_{t,wc,Rd(2+1)} - \sum_1^1 F_{tj,Rd} = 2340,04 - 969,41$	1370,63	Ame du poteau - traction - groupe
$F_{t,ep,Rd(2+1)} - \sum_1^1 F_{tj,Rd} = 1938,82 - 969,41$	969,41	Platine d'about - traction - groupe
$F_{t,wb,Rd(2+1)} - \sum_1^1 F_{tj,Rd} = 4045,21 - 969,41$	3075,80	Ame de la poutre - traction - groupe

Réduction supplémentaire de la résistance d'une rangée de boulons :

$$F_{t2,Rd} = F_{t1,Rd} h_2/h_1$$

$$F_{t2,Rd} = 836,24 \text{ [kN]} \quad \text{Résistance réduite d'une rangée de boulon}$$

❖ Résistance de la rangée de boulons n°3 :

$F_{t3,Rd,comp}$ - Formule	$F_{t3,Rd,comp}$	Composant
$F_{t3,Rd} = \text{Min} (F_{t3,Rd,comp})$	969,41	Résistance d'une rangée de boulon
$F_{t,fc,Rd(3)} = 969,41$	969,41	Aile du poteau - traction
$F_{t,wc,Rd(3)} = 1374,14$	1374,14	Ame du poteau - traction
$F_{t,ep,Rd(3)} = 969,41$	969,41	Platine d'about - traction
$F_{t,wb,Rd(3)} = 1998,95$	1998,95	Ame de la poutre - traction
$B_{p,Rd} = 2351,29$	2351,29	Boulons au cisaillement/poinçonnement
$V_{wp,Rd}/\beta - \sum_1^2 F_{ti,Rd} = 3541,09 - 1805,65$	1735,44	Panneau d'âme - compression
$F_{c,wc,Rd} - \sum_1^2 F_{tj,Rd} = 3823,63 - 1805,65$	2017,98	Ame du poteau - compression
$F_{c,fb,Rd} - \sum_1^2 F_{tj,Rd} = 6163,74 - 1805,65$	4358,09	Aile de la poutre - compression
$F_{c,wb,Rd} - \sum_1^2 F_{tj,Rd} = 4659,38 - 1805,65$	2853,73	Ame de la poutre - compression
$F_{t,fc,Rd(3+2)} - \sum_2^2 F_{tj,Rd} = 1938,82 - 836,24$	1102,58	Aile du poteau - traction - groupe
$F_{t,wc,Rd(3+2)} - \sum_2^2 F_{tj,Rd} = 2193,45 - 836,24$	1357,21	Ame du poteau - traction - groupe
$F_{t,fc,Rd(3+2+1)} - \sum_2^1 F_{tj,Rd} = 2908,22 - 1805,65$	1102,58	Aile du poteau - traction - groupe
$F_{t,wc,Rd(3+2+1)} - \sum_2^1 F_{tj,Rd} = 3151,12 - 1805,65$	1345,48	Ame du poteau - traction - groupe
$F_{t,ep,Rd(3+2)} - \sum_2^2 F_{tj,Rd} = 1938,82 - 836,24$	1102,58	Platine d'about - traction - groupe
$F_{t,wb,Rd(3+2)} - \sum_2^2 F_{tj,Rd} = 3834,00 - 836,24$	2997,76	Ame de la poutre - traction - groupe
$F_{t,ep,Rd(3+2+1)} - \sum_2^1 F_{tj,Rd} = 2908,22 - 1805,65$	1102,58	Platine d'about - traction - groupe

$F_{t3,Rd,comp}$ - Formule	$F_{t3,Rd,comp}$	Composant
$F_{t,wb,Rd(3+2+1)} - \sum_2^1 F_{tj,Rd} = 5962,21 - 1805,65$	4156,56	Ame de la poutre - traction - groupe

Réduction supplémentaire de la résistance d'une rangée de boulons :

$$F_{t3,Rd} = F_{t1,Rd} h_3/h_1$$

$$F_{t3,Rd} = 703,07 \text{ [kN]} \quad \text{Résistance réduite d'une rangée de boulon}$$

$$F_{t3,Rd} = F_{t2,Rd} h_3/h_2$$

$$F_{t3,Rd} = 703,07 \text{ [kN]} \quad \text{Résistance réduite d'une rangée de boulon}$$

❖ Résistance de la rangée de boulons n°4 :

$F_{t4,Rd,comp}$ - Formule	$F_{t4,Rd,comp}$	Composant
$F_{t4,Rd} = \text{Min}(F_{t4,Rd,comp})$	969,41	Résistance d'une rangée de boulon
$F_{t,fc,Rd(4)} = 969,41$	969,41	Aile du poteau - traction
$F_{t,wc,Rd(4)} = 1374,14$	1374,14	Ame du poteau - traction
$F_{t,ep,Rd(4)} = 969,41$	969,41	Platine d'about - traction
$F_{t,wb,Rd(4)} = 1998,95$	1998,95	Ame de la poutre - traction
$B_{p,Rd} = 2351,29$	2351,29	Boulons au cisaillement/poinçonnement
$V_{wp,Rd}/\beta - \sum_1^3 F_{ti,Rd} = 3541,09 - 2508,72$	1032,37	Panneau d'âme - compression
$F_{c,wc,Rd} - \sum_1^3 F_{tj,Rd} = 3823,63 - 2508,72$	1314,91	Ame du poteau - compression
$F_{c,fb,Rd} - \sum_1^3 F_{tj,Rd} = 6163,74 - 2508,72$	3655,02	Aile de la poutre - compression
$F_{c,wb,Rd} - \sum_1^3 F_{tj,Rd} = 4659,38 - 2508,72$	2150,66	Ame de la poutre - compression
$F_{t,fc,Rd(4+3)} - \sum_3^3 F_{tj,Rd} = 1938,82 - 703,07$	1235,75	Aile du poteau - traction - groupe
$F_{t,wc,Rd(4+3)} - \sum_3^3 F_{tj,Rd} = 2193,45 - 703,07$	1490,38	Ame du poteau - traction - groupe
$F_{t,fc,Rd(4+3+2)} - \sum_3^2 F_{tj,Rd} = 2908,22 - 1539,31$	1368,91	Aile du poteau - traction - groupe
$F_{t,wc,Rd(4+3+2)} - \sum_3^2 F_{tj,Rd} = 3036,41 - 1539,31$	1497,10	Ame du poteau - traction - groupe
$F_{t,fc,Rd(4+3+2+1)} - \sum_3^1 F_{tj,Rd} = 3877,63 - 2508,72$	1368,91	Aile du poteau - traction - groupe
$F_{t,wc,Rd(4+3+2+1)} - \sum_3^1 F_{tj,Rd} = 3770,37 - 2508,72$	1261,66	Ame du poteau - traction - groupe
$F_{t,ep,Rd(4+3)} - \sum_3^3 F_{tj,Rd} = 1938,82 - 703,07$	1235,75	Platine d'about - traction - groupe
$F_{t,wb,Rd(4+3)} - \sum_3^3 F_{tj,Rd} = 3834,00 - 703,07$	3130,93	Ame de la poutre - traction - groupe
$F_{t,ep,Rd(4+3+2)} - \sum_3^2 F_{tj,Rd} = 2908,22 - 1539,31$	1368,91	Platine d'about - traction - groupe
$F_{t,wb,Rd(4+3+2)} - \sum_3^2 F_{tj,Rd} = 5751,00 - 1539,31$	4211,69	Ame de la poutre - traction - groupe
$F_{t,ep,Rd(4+3+2+1)} - \sum_3^1 F_{tj,Rd} = 3877,63 - 2508,72$	1368,91	Platine d'about - traction - groupe
$F_{t,wb,Rd(4+3+2+1)} - \sum_3^1 F_{tj,Rd} = 7879,21 - 2508,72$	5370,49	Ame de la poutre - traction - groupe

Réduction supplémentaire de la résistance d'une rangée de boulons :

$$F_{t4,Rd} = F_{t1,Rd} h_4/h_1$$

$$F_{t4,Rd} = 569,90 \text{ [kN]} \quad \text{Résistance réduite d'une rangée de boulon}$$

$$F_{t4,Rd} = F_{t2,Rd} h_4/h_2$$

$$F_{t4,Rd} = 569,90 \text{ [kN]} \quad \text{Résistance réduite d'une rangée de boulon}$$

❖ Résistance de la rangée de boulons n°5 :

$F_{t5,Rd,comp}$ - Formule	$F_{t5,Rd,comp}$	Composant
$F_{t5,Rd} = \text{Min} (F_{t5,Rd,comp})$	462, 47	Résistance d'une rangée de boulon
$F_{t,fc,Rd(5)} = 969,41$	969, 41	Aile du poteau - traction
$F_{t,wc,Rd(5)} = 1374,14$	1374, 14	Ame du poteau - traction
$F_{t,ep,Rd(5)} = 969,41$	969, 41	Platine d'about - traction
$F_{t,wb,Rd(5)} = 1998,95$	1998, 95	Ame de la poutre - traction
$B_{p,Rd} = 2351,29$	2351, 29	Boulons au cisaillement/poinçon
$V_{wp,Rd}/\beta - \sum 1^4 F_{ti,Rd} = 3541,09 - 3078,62$	462, 47	Panneau d'âme - compression
$F_{c,wc,Rd} - \sum 1^4 F_{tj,Rd} = 3823,63 - 3078,62$	745, 01	Ame du poteau - compression
$F_{c,fb,Rd} - \sum 1^4 F_{tj,Rd} = 6163,74 - 3078,62$	3085, 12	Aile de la poutre - compression
$F_{c,wb,Rd} - \sum 1^4 F_{tj,Rd} = 4659,38 - 3078,62$	1580, 76	Ame de la poutre - compression
$F_{t,fc,Rd(5+4)} - \sum 4^4 F_{tj,Rd} = 1938,82 - 569,90$	1368, 91	Aile du poteau - traction - groupe
$F_{t,wc,Rd(5+4)} - \sum 4^4 F_{tj,Rd} = 2322,64 - 569,90$	1752, 74	Ame du poteau - traction - groupe
$F_{t,fc,Rd(5+4+3)} - \sum 4^3 F_{tj,Rd} = 2908,22 - 1272,97$	1635, 25	Aile du poteau - traction - groupe
$F_{t,wc,Rd(5+4+3)} - \sum 4^3 F_{tj,Rd} = 3137,56 - 1272,97$	1864, 59	Ame du poteau - traction - groupe
$F_{t,fc,Rd(5+4+3+2)} - \sum 4^2 F_{tj,Rd} = 3877,63 - 2109,21$	1768, 42	Aile du poteau - traction - groupe
$F_{t,wc,Rd(5+4+3+2)} - \sum 4^2 F_{tj,Rd} = 3760,19 - 2109,21$	1650, 98	Ame du poteau - traction - groupe
$F_{t,fc,Rd(5+4+3+2+1)} - \sum 4^1 F_{tj,Rd} = 4847,04 - 3078,62$	1768, 42	Aile du poteau - traction - groupe
$F_{t,wc,Rd(5+4+3+2+1)} - \sum 4^1 F_{tj,Rd} = 4285,14 - 3078,62$	1206, 52	Ame du poteau - traction - groupe
$F_{t,ep,Rd(5+4)} - \sum 4^4 F_{tj,Rd} = 1938,82 - 569,90$	1368, 91	Platine d'about - traction - groupe
$F_{t,wb,Rd(5+4)} - \sum 4^4 F_{tj,Rd} = 4100,25 - 569,90$	3530, 35	Ame de la poutre - traction - groupe
$F_{t,ep,Rd(5+4+3)} - \sum 4^3 F_{tj,Rd} = 2908,22 - 1272,97$	1635, 25	Platine d'about - traction - groupe
$F_{t,wb,Rd(5+4+3)} - \sum 4^3 F_{tj,Rd} = 6017,25 - 1272,97$	4744, 28	Ame de la poutre - traction - groupe
$F_{t,ep,Rd(5+4+3+2)} - \sum 4^2 F_{tj,Rd} = 3877,63 - 2109,21$	1768, 42	Platine d'about - traction - groupe
$F_{t,wb,Rd(5+4+3+2)} - \sum 4^2 F_{tj,Rd} = 7934,25 - 2109,21$	5825, 04	Ame de la poutre - traction - groupe
$F_{t,ep,Rd(5+4+3+2+1)} - \sum 4^1 F_{tj,Rd} = 4847,04 - 3078,62$	1768, 42	Platine d'about - traction - groupe
$F_{t,wb,Rd(5+4+3+2+1)} - \sum 4^1 F_{tj,Rd} = 10062,46 - 3078,62$	6983, 84	Ame de la poutre - traction - groupe

Réduction supplémentaire de la résistance d'une rangée de boulons :

$$F_{t5,Rd} = F_{t1,Rd} h_5/h_1$$

$$F_{t5,Rd} = 436,73 \text{ [kN]} \quad \text{Résistance réduite d'une rangée de boulon}$$

$$F_{t5,Rd} = F_{t2,Rd} h_5/h_2$$

$$F_{t5,Rd} = 436,73 \text{ [kN]} \quad \text{Résistance réduite d'une rangée de boulon}$$

❖ Résistance de la rangée de boulons n°6 :

$F_{t6,Rd,comp}$ - Formule	$F_{t6,Rd,comp}$	Composant
$F_{t6,Rd} = \text{Min} (F_{t6,Rd,comp})$	25, 74	Résistance d'une rangée de boulon
$F_{t,fc,Rd(6)} = 969,41$	969, 41	Aile du poteau - traction

$F_{t6,Rd,comp}$ - Formule	$F_{t6,Rd,comp}$	Composant
$F_{t,wc,Rd(6)} = 1374,14$	1374,14	Ame du poteau - traction
$F_{t,ep,Rd(6)} = 969,41$	969,41	Platine d'about - traction
$F_{t,wb,Rd(6)} = 1998,95$	1998,95	Ame de la poutre - traction
$B_{p,Rd} = 2351,29$	2351,29	Boulons au cisaillement/poinçon
$V_{wp,Rd}/\beta - \sum_1^5 F_{tj,Rd} = 3541,09 - 3515,35$	25,74	Panneau d'âme - compression
$F_{c,wc,Rd} - \sum_1^5 F_{tj,Rd} = 3823,63 - 3515,35$	308,28	Ame du poteau - compression
$F_{c,fb,Rd} - \sum_1^5 F_{tj,Rd} = 6163,74 - 3515,35$	2648,39	Aile de la poutre - compression
$F_{c,wb,Rd} - \sum_1^5 F_{tj,Rd} = 4659,38 - 3515,35$	1144,02	Ame de la poutre - compression
$F_{t,fc,Rd(6+5)} - \sum_5^5 F_{tj,Rd} = 1938,82 - 436,73$	1502,08	Aile du poteau - traction - groupe
$F_{t,wc,Rd(6+5)} - \sum_5^5 F_{tj,Rd} = 2521,27 - 436,73$	2084,54	Ame du poteau - traction - groupe
$F_{t,fc,Rd(6+5+4)} - \sum_5^4 F_{tj,Rd} = 2908,22 - 1006,63$	1901,59	Aile du poteau - traction - groupe
$F_{t,wc,Rd(6+5+4)} - \sum_5^4 F_{tj,Rd} = 3291,62 - 1006,63$	2284,98	Ame du poteau - traction - groupe
$F_{t,fc,Rd(6+5+4+3)} - \sum_5^3 F_{tj,Rd} = 3877,63 - 1709,71$	2167,93	Aile du poteau - traction - groupe
$F_{t,wc,Rd(6+5+4+3)} - \sum_5^3 F_{tj,Rd} = 3875,57 - 1709,71$	2165,87	Ame du poteau - traction - groupe
$F_{t,fc,Rd(6+5+4+3+2)} - \sum_5^2 F_{tj,Rd} = 4847,04 - 2545,94$	2301,10	Aile du poteau - traction - groupe
$F_{t,wc,Rd(6+5+4+3+2)} - \sum_5^2 F_{tj,Rd} = 4309,27 - 2545,94$	1763,33	Ame du poteau - traction - groupe
$F_{t,fc,Rd(6+5+4+3+2+1)} - \sum_5^1 F_{tj,Rd} = 5816,45 - 3515,35$	2301,10	Aile du poteau - traction - groupe
$F_{t,wc,Rd(6+5+4+3+2+1)} - \sum_5^1 F_{tj,Rd} = 4673,11 - 3515,35$	1157,75	Ame du poteau - traction - groupe
$F_{t,ep,Rd(6+5)} - \sum_5^5 F_{tj,Rd} = 1938,82 - 436,73$	1502,08	Platine d'about - traction - groupe
$F_{t,wb,Rd(6+5)} - \sum_5^5 F_{tj,Rd} = 4526,25 - 436,73$	4089,52	Ame de la poutre - traction - groupe
$F_{t,ep,Rd(6+5+4)} - \sum_5^4 F_{tj,Rd} = 2908,22 - 1006,63$	1901,59	Platine d'about - traction - groupe
$F_{t,wb,Rd(6+5+4)} - \sum_5^4 F_{tj,Rd} = 6443,25 - 1006,63$	5436,62	Ame de la poutre - traction - groupe
$F_{t,ep,Rd(6+5+4+3)} - \sum_5^3 F_{tj,Rd} = 3877,63 - 1709,71$	2167,93	Platine d'about - traction - groupe
$F_{t,wb,Rd(6+5+4+3)} - \sum_5^3 F_{tj,Rd} = 8360,25 - 1709,71$	6650,54	Ame de la poutre - traction - groupe
$F_{t,ep,Rd(6+5+4+3+2)} - \sum_5^2 F_{tj,Rd} = 4847,04 - 2545,94$	2301,10	Platine d'about - traction - groupe
$F_{t,wb,Rd(6+5+4+3+2)} - \sum_5^2 F_{tj,Rd} = 10277,25 - 2545,94$	7731,31	Ame de la poutre - traction - groupe
$F_{t,ep,Rd(6+5+4+3+2+1)} - \sum_5^1 F_{tj,Rd} = 5816,45 - 3515,35$	2301,10	Platine d'about - traction - groupe
$F_{t,wb,Rd(6+5+4+3+2+1)} - \sum_5^1 F_{tj,Rd} = 12405,46 - 3515,35$	8890,10	Ame de la poutre - traction - groupe

❖ Résistance de la rangée de boulons n°7 :

$F_{t7,Rd,comp}$ - Formule	$F_{t7,Rd,comp}$	Composant
$F_{t7,Rd} = \text{Min}(F_{t7,Rd,comp})$	0,00	Résistance d'une rangée de boulon
$F_{t,fc,Rd(7)} = 969,41$	969,41	Aile du poteau - traction
$F_{t,wc,Rd(7)} = 1374,14$	1374,14	Ame du poteau - traction
$F_{t,ep,Rd(7)} = 969,41$	969,41	Platine d'about - traction
$F_{t,wb,Rd(7)} = 1998,95$	1998,95	Ame de la poutre - traction
$B_{p,Rd} = 2351,29$	2351,29	Boulons au cisaillement/poinçon

$F_{t7,Rd,comp}$ - Formule	$F_{t7,Rd,comp}$	Composant
$V_{wp,Rd}/\beta - \sum_1^6 F_{tj,Rd} = 3541,09 - 3541,09$	0,00	Panneau d'âme - compression
$F_{c,wc,Rd} - \sum_1^6 F_{tj,Rd} = 3823,63 - 3541,09$	282,54	Ame du poteau - compression
$F_{c,fb,Rd} - \sum_1^6 F_{tj,Rd} = 6163,74 - 3541,09$	2622,65	Aile de la poutre - compression
$F_{c,wb,Rd} - \sum_1^6 F_{tj,Rd} = 4659,38 - 3541,09$	1118,28	Ame de la poutre - compression
$F_{t,fc,Rd(7+6)} - \sum_6^6 F_{tj,Rd} = 1938,82 - 25,74$	1913,08	Aile du poteau - traction - groupe
$F_{t,wc,Rd(7+6)} - \sum_6^6 F_{tj,Rd} = 2608,83 - 25,74$	2583,09	Ame du poteau - traction - groupe
$F_{t,fc,Rd(7+6+5)} - \sum_5^5 F_{tj,Rd} = 2908,22 - 462,47$	2445,75	Aile du poteau - traction - groupe
$F_{t,wc,Rd(7+6+5)} - \sum_5^5 F_{tj,Rd} = 3447,95 - 462,47$	2985,48	Ame du poteau - traction - groupe
$F_{t,fc,Rd(7+6+5+4)} - \sum_4^4 F_{tj,Rd} = 3877,63 - 1032,37$	2845,26	Aile du poteau - traction - groupe
$F_{t,wc,Rd(7+6+5+4)} - \sum_4^4 F_{tj,Rd} = 3992,14 - 1032,37$	2959,77	Ame du poteau - traction - groupe
$F_{t,fc,Rd(7+6+5+4+3)} - \sum_3^3 F_{tj,Rd} = 4847,04 - 1735,44$	3111,60	Aile du poteau - traction - groupe
$F_{t,wc,Rd(7+6+5+4+3)} - \sum_3^3 F_{tj,Rd} = 4395,52 - 1735,44$	2660,08	Ame du poteau - traction - groupe
$F_{t,fc,Rd(7+6+5+4+3+2)} - \sum_2^2 F_{tj,Rd} = 5816,45 - 2571,68$	3244,77	Aile du poteau - traction - groupe
$F_{t,wc,Rd(7+6+5+4+3+2)} - \sum_2^2 F_{tj,Rd} = 4694,64 - 2571,68$	2122,95	Ame du poteau - traction - groupe
$F_{t,fc,Rd(7+6+5+4+3+2+1)} - \sum_1^1 F_{tj,Rd} = 6785,86 - 3541,09$	3244,77	Aile du poteau - traction - groupe
$F_{t,wc,Rd(7+6+5+4+3+2+1)} - \sum_1^1 F_{tj,Rd} = 4948,42 - 3541,09$	1407,33	Ame du poteau - traction - groupe
$F_{t,ep,Rd(7+6)} - \sum_6^6 F_{tj,Rd} = 1938,82 - 25,74$	1913,08	Platine d'about - traction - groupe
$F_{t,wb,Rd(7+6)} - \sum_6^6 F_{tj,Rd} = 4646,68 - 25,74$	4620,94	Ame de la poutre - traction - groupe
$F_{t,ep,Rd(7+6+5)} - \sum_5^5 F_{tj,Rd} = 2908,22 - 462,47$	2445,75	Platine d'about - traction - groupe
$F_{t,wb,Rd(7+6+5)} - \sum_5^5 F_{tj,Rd} = 6829,93 - 462,47$	6367,46	Ame de la poutre - traction - groupe
$F_{t,ep,Rd(7+6+5+4)} - \sum_4^4 F_{tj,Rd} = 3877,63 - 1032,37$	2845,26	Platine d'about - traction - groupe
$F_{t,wb,Rd(7+6+5+4)} - \sum_4^4 F_{tj,Rd} = 8746,93 - 1032,37$	7714,55	Ame de la poutre - traction - groupe
$F_{t,ep,Rd(7+6+5+4+3)} - \sum_3^3 F_{tj,Rd} = 4847,04 - 1735,44$	3111,60	Platine d'about - traction - groupe
$F_{t,wb,Rd(7+6+5+4+3)} - \sum_3^3 F_{tj,Rd} = 10663,93 - 1735,44$	8928,48	Ame de la poutre - traction - groupe
$F_{t,ep,Rd(7+6+5+4+3+2)} - \sum_2^2 F_{tj,Rd} = 5816,45 - 2571,68$	3244,77	Platine d'about - traction - groupe

$F_{t7,Rd,comp}$ - Formule	$F_{t7,Rd,comp}$	Composant
$F_{t,wb,Rd(7+6+5+4+3+2)} - \sum_6^2 F_{tj,Rd} = 12580,93 - 2571,68$	10009,24	Ame de la poutre - traction - groupe
$F_{t,ep,Rd(7+6+5+4+3+2+1)} - \sum_6^1 F_{tj,Rd} = 6785,86 - 3541,09$	3244,77	Platine d'about - traction - groupe
$F_{t,wb,Rd(7+6+5+4+3+2+1)} - \sum_6^1 F_{tj,Rd} = 14709,13 - 3541,09$	11168,04	Ame de la poutre - traction - groupe

❖ Tableau récapitulatif des efforts :

Tableau 31. Tableau récapitulatif des efforts

Nr	h_j	$F_{tj,Rd}$	$F_{t,fc,Rd}$	$F_{t,wc,Rd}$	$F_{t,ep,Rd}$	$F_{t,wb,Rd}$	$F_{t,Rd}$	$B_{p,Rd}$
1	1310	969,41	969,41	1374,14	969,41	1998,95	969,41	2351,29
2	1130	836,24	969,41	1374,14	969,41	1998,95	969,41	2351,29
3	950	703,07	969,41	1374,14	969,41	1998,95	969,41	2351,29
4	770	569,90	969,41	1374,14	969,41	1998,95	969,41	2351,29
5	590	436,73	969,41	1374,14	969,41	1998,95	969,41	2351,29
6	360	25,74	969,41	1374,14	969,41	1998,95	969,41	2351,29
7	150	-	969,41	1374,14	969,41	1998,95	969,41	2351,29

❖ Résistance de l'assemblage à la flexion M_j, Rd :

$$M_{j,Rd} = \sum h_j F_{tj,Rd}$$

$$M_{j,Rd} = 3589,68 \text{ [kN*m]} \text{ Résistance de l'assemblage à la flexion}$$

$$M_{b1,Ed} / M_{j,Rd} \leq 1,0 \quad 0,87 < 1,00 \quad \text{vérifié.}$$

6. Résistance de l'assemblage au cisaillement :

$$\alpha_v = 0,60 \quad \text{Coefficient pour le calcul de } F_{v,Rd}$$

$$\beta_{Lf} = 0,88 \quad \text{Coefficient réducteur pour les assemblages longs}$$

$$F_{v,Rd} = 358,97 \text{ [kN]} \text{ Résistance d'un boulon au cisaillement}$$

$$F_{t,Rd,max} = 484,70 \text{ [kN]} \text{ Résistance d'un boulon à la traction}$$

$$F_{b,Rd,int} = 1039,50 \text{ [kN]} \text{ Résistance du boulon intérieur en pression diam}$$

$$F_{b,Rd,ext} = 1039,50 \text{ [kN]} \text{ Résistance du boulon de rive en pression diamétrale}$$

Nr	$F_{tj,Rd,N}$	$F_{tj,Ed,N}$	$F_{tj,Rd,M}$	$F_{tj,Ed,M}$	$F_{tj,Ed}$	$F_{vj,Rd}$
1	969,41	-46,72	969,41	842,61	795,89	296,92
2	969,41	-46,72	836,24	726,86	680,14	358,15
3	969,41	-46,72	703,07	611,11	564,39	419,38
4	969,41	-46,72	569,90	495,36	448,63	480,61
5	969,41	-46,72	436,73	379,61	332,88	541,85
6	969,41	-46,72	25,74	22,37	-24,35	717,94
7	969,41	-46,72	969,41	0,00	-46,72	717,94

$F_{tj,Rd,N}$ – Résistance d'une rangée de boulons à la traction pure

$F_{tj,Ed,N}$ – Effort dans une rangée de boulons dû à l'effort axial

$F_{tj,Rd,M}$ – Résistance d'une rangée de boulons à la flexion pure

$F_{tj,Ed,M}$ – Effort dans une rangée de boulons dû au moment

$F_{tj,Ed}$ – Effort de traction maximal dans la rangée de boulons

$F_{vj,Rd}$ – Résistance réduite d'une rangée de boulon

$$F_{tj,Ed,N} = N_{j,Ed} F_{tj,Rd,N} / N_{j,Rd}$$

$$F_{tj,Ed,M} = M_{j,Ed} F_{tj,Rd,M} / M_{j,Rd}$$

$$F_{tj,Ed} = F_{tj,Ed,N} + F_{tj,Ed,M}$$

$$F_{vj,Rd} = \text{Min} (n_h F_{v,Rd} (1 - F_{tj,Ed} / (1.4 n_h F_{t,Rd,max})), n_h F_{v,Rd}, n_h F_{b,Rd})$$

$$V_{j,Rd} = n_h \sum 1^n F_{vj,Rd}$$

$$V_{j,Rd} = 3532,80 \text{ [kN]} \quad \text{Résistance de l'assemblage au cisaillement}$$

$$V_{b1,Ed} / V_{j,Rd} \leq 1,0 \quad 0,18 < 1,00 \quad \text{vérifié.}$$

7. Résistance des soudures :

$$A_w = 816,07 \quad [\text{cm}^2] \text{ Aire de toutes les soudures}$$

$$A_{wy} = 267,50 \quad [\text{cm}^2] \text{ Aire des soudures horizontales}$$

$$A_{wz} = 548,57 \quad [\text{cm}^2] \text{ Aire des soudures verticales}$$

$$I_{wy} = 1618486,05 \text{ [cm}^4\text{]} \text{ Moment d'inertie du système de soudures}$$

$$\sigma_{\perp,max} = \tau_{\perp,max} = -98,29 \quad [\text{MPa}] \text{ Contrainte normale dans la soudure}$$

$$\sigma_{\perp} = \tau_{\perp} = -98,29 \quad [\text{MPa}] \text{ Contraintes dans la soudure verticale}$$

$$\tau_{II} = -11,45 \quad [\text{MPa}] \text{ Contrainte tangentielle}$$

$$\beta_w = 0,90 \quad \text{Coefficient de corrélation}$$

$$\sqrt{[\sigma_{\perp,max}^2 + 3 * (\tau_{\perp,max}^2)]} \leq f_u / (\beta_w * \gamma_{M2}) \quad 196.59 < 440 \quad \text{vérifié.}$$

$$\sqrt{[\sigma_{\perp}^2 + 3 * (\tau_{\perp}^2 + \tau_{II}^2)]} \leq f_u / (\beta_w * \gamma_{M2}) \quad 199.21 < 440 \quad \text{vérifié.}$$

$$\sigma_{\perp} \leq 0.9 * f_u / \gamma_{M2} \quad 98.29 < 356.4 \quad \text{vérifié.}$$

8. Rigidité de l'assemblage :

$$k_1 = \infty \quad \text{Coefficient de rigidité du panneau d'âme du poteau en cisaillement}$$

$$k_2 = \infty \quad \text{Coefficient de rigidité du panneau d'âme du poteau en compression}$$

$$k_3 = \infty \quad \text{Coefficient de rigidité du panneau d'âme du poteau en traction}$$

$$t_{wash} = 6 \quad [\text{mm}] \text{ Epaisseur de la plaquette}$$

$t_{wash} = 6$ [mm] Epaisseur de la plaquette
 $h_{head} = 21$ [mm] Hauteur de la tête du boulon
 $h_{nut} = 30$ [mm] Hauteur de l'écrou du boulon
 $L_b = 108$ [mm] Longueur du boulon
 $k_{10} = 8$ [mm] Coefficient de rigidité des boulons

❖ Rigidités des rangées de boulons :

Tableau 32. Rigidités des rangées de boulons

Nr	Hj	k ₃	k ₄	k ₅	k _{eff,j}	k _{eff,j} h _j	k _{eff,j} h _j ²
					Somme	114,15	10800,42
1	1310	3	200	272	2	30,06	3938,38
2	1130	3	173	261	2	23,28	2631,79
3	950	3	173	261	2	19,58	1860,32
4	770	3	173	261	2	15,87	1222,33
5	590	3	197	272	2	13,38	789,89
6	360	3	207	272	2	8,46	304,68
7	150	3	207	272	2	3,53	53,03

$$k_{eff,j} = 1 / (\sum_3^5 (1 / k_{i,j}))$$

$$z_{eq} = \sum_j k_{eff,j} h_j^2 / \sum_j k_{eff,j} h_j$$

$$z_{eq} = 946$$
 [mm] Bras de levier équivalent

$$k_{eq} = \sum_j k_{eff,j} h_j / z_{eq}$$

$$k_{eq} = 12$$
 [mm] Coefficient de rigidité équivalent du système de boulons

$$S_{j,ini} = E z_{eq}^2 / \sum_i (1 / k_1 + 1 / k_2 + 1 / k_{eq})$$

$$S_{j,ini} = 2268087,90$$
 [kN*m] Rigidité en rotation initiale

$$\mu = 2,05$$
 Coefficient de rigidité de l'assemblage

$$S_j = S_{j,ini} / \mu$$

$$S_j = 1108132,96$$
 [kN*m] Rigidité en rotation finale

▪ Classification de l'assemblage par rigidité :

$$S_{j,rig} = 474729,07$$
 [kN*m] Rigidité de l'assemblage rigide

$$S_{j,pin} = 29670,57$$
 [kN*m] Rigidité de l'assemblage articulé

$$S_{j,ini} \geq S_{j,rig}$$
 RIGIDE

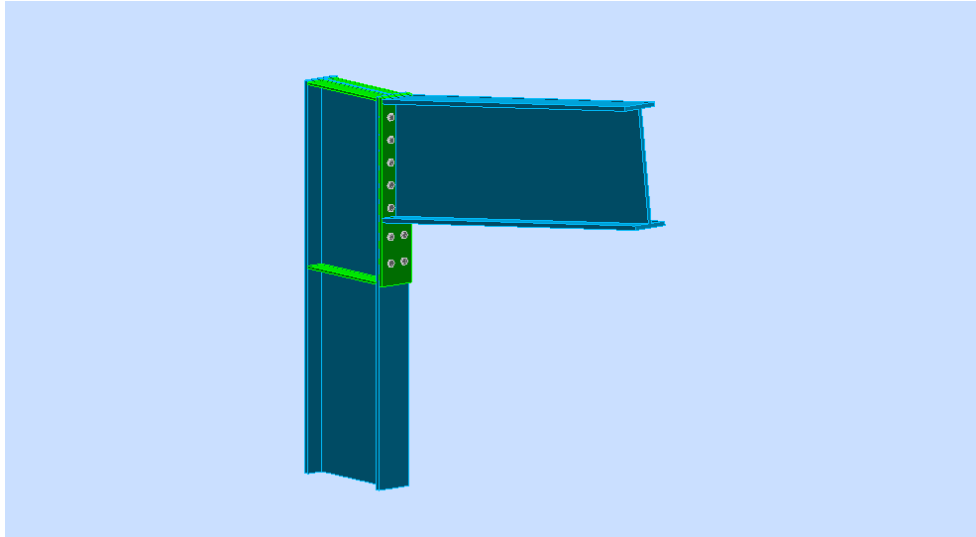


Figure 38. Vue de l'assemblage Traverse - Poteau

7.2.3 Assemblage Gousset – Contreventement

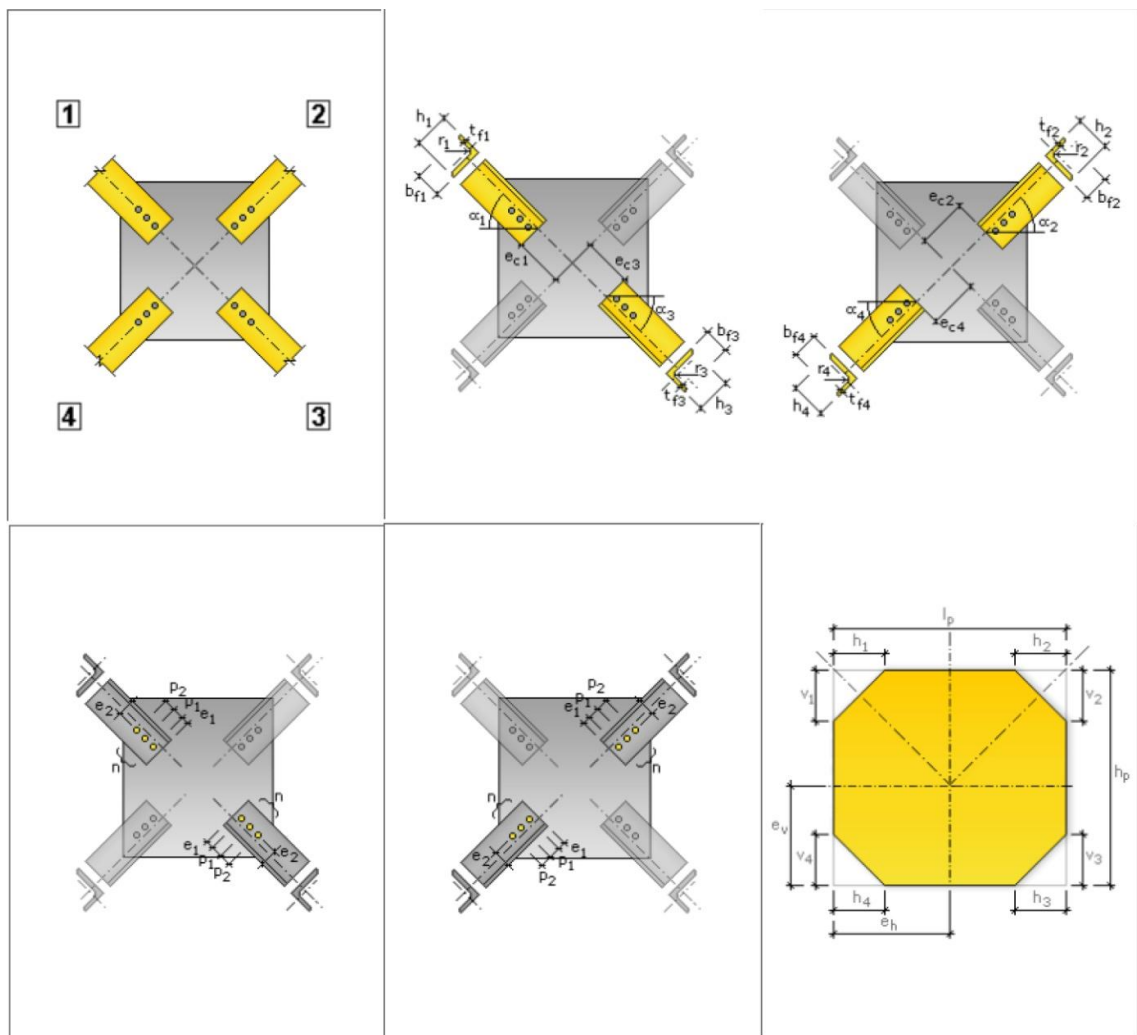


Figure 39. Schéma de l'assemblage Gousset – Contreventement

7.2.3.1 Général

Nœud de la structure : 6

Barres de la structure : 294, 316, 305 et 327

7.2.3.2 Géométrie

1. Barres :

		Barre 1	Barre 2	Barre 3	Barre 4	
Barre N° :		294	316	305	327	
Profilé :		CAE 180x18	CAE 180x18	CAE 180x18	CAE 180x18	
	h	180	180	180	180	mm
	b _f	180	180	180	180	mm
	t _w	18	18	18	18	mm
	t _f	18	18	18	18	mm
	r	18	18	18	18	mm
	A	61,91	61,91	61,91	61,91	cm ²
Matériau :		ACIER E36	ACIER E36	ACIER E36	ACIER E36	
	f _y	355,00	355,00	355,00	355,00	MPa
	f _u	495,00	495,00	495,00	495,00	MPa
Angle	α	50,2	50,2	50,2	50,2	Deg
Longueur	l	0,00	0,00	0,00	0,00	m

2. Boulons :

▪ Barre 1 :

Classe = 10.9

Classe du boulon

d = 18 [mm]

Diamètre du boulon

d₀ = 20 [mm]

Diamètre du trou de boulon

A_s = 1,92 [cm²]

Aire de la section efficace du boulon

A_v = 2,54 [cm²]

Aire de la section du boulon

f_{yb} = 670,00 [MPa]

Limite de plasticité

f_{ub} = 1000,00 [MPa]

Résistance du boulon à la traction

n = 4

Nombre de colonnes des boulons

Espacement des boulons 60 ; 60 ; 60 [mm]

e₁ = 40 [mm] Distance du centre de gravité

e₂ = 90 [mm]

e_c = 150 [mm]

▪ Barre 2 :

Classe =	10.9		Classe du boulon
d =	18	[mm]	Diamètre du boulon
d ₀ =	20	[mm]	Diamètre du trou de boulon
A _s =	1,92	[cm ²]	Aire de la section efficace du boulon
A _v =	2,54	[cm ²]	Aire de la section du boulon
f _{yb} =	670,00	[MPa]	Limite de plasticité
f _{ub} =	1000,00	[MPa]	Résistance du boulon à la traction
n =	4		Nombre de colonnes des boulons
Espacement des boulons	60 ; 60 ; 60		[mm]
e ₁ =	40	[mm]	
e ₂ =	90	[mm]	
e _c =	150	[mm]	

▪ Barre 3 :

Classe =	10.9		Classe du boulon
d =	18	[mm]	Diamètre du boulon
d ₀ =	20	[mm]	Diamètre du trou de boulon
A _s =	1,92	[cm ²]	Aire de la section efficace du boulon
A _v =	2,54	[cm ²]	Aire de la section du boulon
f _{yb} =	670,00	[MPa]	Limite de plasticité
f _{ub} =	1000,00	[MPa]	Résistance du boulon à la traction
n =	4		Nombre de colonnes des boulons
Espacement des boulons	60 ; 60 ; 60		[mm]
e ₁ =	40	[mm]	
e ₂ =	90	[mm]	
e _c =	150	[mm]	

▪ Barre 4 :

Classe =	10.9		Classe du boulon
d =	18	[mm]	Diamètre du boulon
d ₀ =	20	[mm]	Diamètre du trou de boulon
A _s =	1,92	[cm ²]	Aire de la section efficace du boulon
A _v =	2,54	[cm ²]	Aire de la section du boulon

Classe =	10.9	Classe du boulon
$f_{yb} =$	670,00 [MPa]	Limite de plasticité
$f_{ub} =$	1000,00 [MPa]	Résistance du boulon à la traction
$n =$	4	Nombre de colonnes des boulons
Espacement des boulons	60; 60; 60 [mm]	
$e_1 =$	40 [mm]	
$e_2 =$	90 [mm]	
$e_c =$	150 [mm]	

3. Gousset :

$l_p =$	700 [mm]	Longueur de la platine
$h_p =$	700 [mm]	Hauteur de la platine
$t_p =$	10 [mm]	Epaisseur de la platine

▪ Paramètre :

$h_1 =$	80 [mm]	Grugeage
$v_1 =$	80 [mm]	Grugeage
$h_2 =$	80 [mm]	Grugeage
$v_2 =$	80 [mm]	Grugeage
$h_3 =$	80 [mm]	Grugeage
$v_3 =$	80 [mm]	Grugeage
$h_4 =$	80 [mm]	Grugeage
$v_4 =$	80 [mm]	Grugeage

▪ Centre de gravité de la tôle par rapport au centre de gravité des barres (0;0) :

$$e_v = 350 \text{ [mm]}$$

$$e_H = 350 \text{ [mm]}$$

Matériau : ACIER E36

$$f_y = 355,00 \text{ [MPa]} \text{ Résistance}$$

4. Coefficients de matériau :

$$\gamma_{M0} = 1,00 \quad \text{Coefficient de sécurité partiel [2.2]}$$

$$\gamma_{M2} = 1,25 \quad \text{Coefficient de sécurité partiel [2.2]}$$

7.2.3.3 Efforts

Cas : Combinaison : $1.35 * (G_0 + G_1) + 1 * (Q + N + V_x^-) + 1.5 * T^+$

$$N_{b1,Ed} = 213,83 \text{ [kN]} \quad \text{Effort axial}$$

$$N_{b2,Ed} = -408,44 \text{ [kN]} \quad \text{Effort axial}$$

$$N_{b3,Ed} = 212,49 \text{ [kN]} \quad \text{Effort axial}$$

$$N_{b4,Ed} = -409,79 \text{ [kN]} \quad \text{Effort axial}$$

7.2.3.4 Résultats

1. Barre 1 :

❖ Résistance des boulons :

$F_{v,Rd} = 122,15 \text{ [kN]}$ Résistance de la tige d'un boulon au cisaillement

$$F_{v,Rd} = 0.6 * f_{ub} * A_v * m / \gamma_{M2}$$

▪ Pression du boulon sur la barre :

Direction x :

$$k_{1x} = 2,50 \quad \text{Coefficient pour le calcul de } F_{b,Rd}; k_{1x} = \min[2.8 * (e_2/d_0) - 1.7, 2.5]$$

$$k_{1x} > 0.0 \quad 2,50 > 0,00 \quad \text{vérifié.}$$

$$\alpha_{bx} = 0,67 \quad \alpha_{bx} = \min[e_1/(3*d_0), p_1/(3*d_0) - 0.25, f_{ub}/f_u, 1]$$

$$\alpha_{bx} > 0.0 \quad 0,67 > 0,00 \quad \text{vérifié.}$$

$$F_{b,Rd1x} = 213,84 \text{ [kN]}$$

$$F_{b,Rd1x} = k_{1x} * \alpha_{bx} * f_u * d * t_i / \gamma_{M2}$$

Direction z :

$$k_{1z} = 2,50 \quad \text{Coefficient pour le calcul de } F_{b,Rd}$$

$$k_{1z} = \min[2.8 * (e_1/d_0) - 1.7, 1.4 * (p_1/d_0) - 1.7, 2.5]$$

$$k_{1z} > 0.0 \quad 2,50 > 0,00 \quad \text{vérifié.}$$

$$\alpha_{bz} = 1,00 \quad \text{Coefficient pour le calcul de } F_{b,Rd} \quad \alpha_{bz} = \min[e_2/(3*d_0), f_{ub}/f_u, 1]$$

$$\alpha_{bz} = \min[e_2/(3*d_0), f_{ub}/f_u, 1]$$

$$\alpha_{bz} > 0.0 \quad 1,00 > 0,00 \quad \text{vérifié.}$$

$F_{b,Rd1z} = 320,76 \text{ [kN]}$ Résistance d'un boulon en pression diamétrale

$$F_{b,Rd1z} = k_{1z} * \alpha_{bz} * f_u * d * t_i / \gamma_{M2}$$

- Pression du boulon sur la platine :

Direction x :

$$k_{1x} = 2,50 \quad \text{Coefficient pour le calcul de } F_{b,Rd}$$

$$k_1 = \min[2.8*(e_2/d_0) - 1.7, 2.5]$$

$$k_{1x} > 0.0 \quad 2,50 > 0,00 \quad \text{vérifié.}$$

$$\alpha_{bx} = 0,75 \quad \text{Coefficient dépendant de l'espacement des boulons}$$

$$\alpha_{bx} = \min[e_1/(3*d_0), p_1/(3*d_0) - 0.25, f_{ub}/f_u, 1]$$

$$\alpha_{bx} > 0.0 \quad 0,75 > 0,00 \quad \text{vérifié.}$$

$$F_{b,Rd2x} = 133,65 \text{ [kN]}$$

$$F_{b,Rd2x} = k_1 * \alpha_b * f_u * d * t_i / \gamma_{M2}$$

Direction z :

$$k_{1z} = 2,50 \quad \text{Coefficient pour le calcul de } F_{b,Rd}$$

$$k_{1z} = \min[2.8*(e_1/d_0) - 1.7, 1.4*(p_1/d_0) - 1.7, 2.5]$$

$$k_{1z} > 0.0 \quad 2,50 > 0,00 \quad \text{vérifié.}$$

$$\alpha_{bz} = 1,00 \quad \text{Coefficient pour le calcul de } F_{b,Rd}$$

$$\alpha_{bz} = \min[e_2/(3*d_0), f_{ub}/f_u, 1]$$

$$\alpha_{bz} > 0.0 \quad 1,00 > 0,00 \quad \text{vérifié.}$$

$$F_{b,Rd2z} = 178,20 \text{ [kN]} \quad \text{Résistance d'un boulon en pression diamétrale}$$

$$F_{b,Rd2z} = k_{1z} * \alpha_{bz} * f_u * d * t_i / \gamma_{M2}$$

- ❖ Vérification de l'assemblage pour les efforts agissant sur les boulons :

- Cisaillement des boulons :

$$e = 39 \quad \text{[mm]}$$

$$M_0 = 8,33 \quad \text{[kN*m]}$$

$$M_0 = N_{b1,Ed} * e$$

$$F_{NSd} = 53,46 \quad \text{[kN]}$$

$$F_{NSd} = N_{b1,Ed} / n$$

$$F_{MSd} = 41,65 \quad \text{[kN]}$$

$$F_{MSd} = M_0 * x_{max} / \xi^2$$

$$F_{x,Ed} = 53,46 \quad \text{[kN]}$$

$$F_{x,Ed} = F_{NSd}$$

$$F_{z,Ed} = 41,65 \quad \text{[kN]}$$

$$F_{z,Ed} = F_{MSd}$$

$$F_{Rdx} = 122,15 \text{ [kN]}$$

$$F_{Rdx} = \min(F_{vRd}, F_{bRd1x}, F_{bRd2x})$$

$$F_{Rdz} = 122,15 \text{ [kN]}$$

$$F_{Rdz} = \min(F_{vRd}, F_{bRd1z}, F_{bRd2z})$$

$$|F_{x,Ed}| \leq F_{Rdx} \quad |53,46| < 122,15 \quad \text{vérifié.}$$

$$|F_{z,Ed}| \leq F_{Rdz} \quad |41,65| < 122,15 \quad \text{vérifié.}$$

❖ Vérification de la section de la poutre affaiblie par les trous :

$$\begin{aligned} \beta_3 &= 0,54 && \text{[Tableau 3.8]} \\ A_{net} &= 58,31 \text{ [cm}^2\text{]} && A_{net} = A - d_0 * t_{f1} \\ N_{u,Rd} &= 1246,85 \text{ [kN]} && N_{u,Rd} = (\beta_3 * A_{net} * f_{u1}) / \gamma_{M2} \\ N_{pl,Rd} &= 1977,95 \text{ [kN]} && N_{pl,Rd} = (0.9 * A * f_{y1}) / \gamma_{M2} \\ |F_{x,Ed}| &\leq F_{Rdx} \quad |213,83| < 1246,85 && \text{vérifié.} \\ |F_{z,Ed}| &\leq F_{Rdz} \quad |213,83| < 1977,95 && \text{vérifié.} \end{aligned}$$

❖ Vérification de la barre pour le cisaillement de bloc :

$$\begin{aligned} A_{nt} &= 14,40 \text{ [cm}^2\text{]} \\ A_{nv} &= 27,00 \text{ [cm}^2\text{]} \\ V_{effRd} &= 838,51 \text{ [kN]} && V_{effRd} = 0.5 * f_u * A_{nt} / \gamma_{M2} + (1/\sqrt{3}) * f_y * A_{nv} / \gamma_{M0} \\ |N_{b1,Ed}| &\leq V_{effRd} \quad |213,83| < 838,51 && \text{vérifié.} \end{aligned}$$

2. Barre 2 :

❖ Résistance des boulons :

$F_{v,Rd} = 122,15 \text{ [kN]}$ Résistance de la tige d'un boulon au cisaillement

$$F_{v,Rd} = 0.6 * f_{ub} * A_v * m / \gamma_{M2}$$

▪ Pression du boulon sur la barre :

Direction x :

$$k_{1x} = 2,50 \quad \text{Coefficient pour le calcul de } F_{b,Rd}; k_{1x} = \min[2.8 * (e_2/d_0) - 1.7, 2.5]$$

$$k_{1x} > 0.0 \quad 2,50 > 0,00 \quad \text{vérifié.}$$

$$\alpha_{bx} = 0,67 \quad \alpha_{bx} = \min[e_1/(3*d_0), p_1/(3*d_0) - 0.25, f_{ub}/f_u, 1]$$

$$\alpha_{bx} > 0.0 \quad 0,67 > 0,00 \quad \text{vérifié.}$$

$$F_{b,Rd1x} = 213,84 \text{ [kN]}$$

$$F_{b,Rd1x} = k_{1x} * \alpha_{bx} * f_u * d * t_i / \gamma_{M2}$$

Direction z :

$$k_{1z} = 2,50 \quad \text{Coefficient pour le calcul de } F_{b,Rd}$$

$$k_{1z} = \min[2.8 * (e_1/d_0) - 1.7, 1.4 * (p_1/d_0) - 1.7, 2.5]$$

$$k_{1z} > 0.0 \quad 2,50 > 0,00 \quad \text{vérifié.}$$

$$\alpha_{bz} = 1,00 \quad \text{Coefficient pour le calcul de } F_{b,Rd} \quad \alpha_{bz} = \min[e_2/(3*d_0), f_{ub}/f_u, 1]$$

$$\alpha_{bz} = \min[e_2/(3*d_0), f_{ub}/f_u, 1]$$

$$\alpha_{bz} > 0.0 \quad 1,00 > 0,00 \quad \text{vérifié.}$$

$F_{b,Rd1z} = 320,76$ [kN] Résistance d'un boulon en pression diamétrale

$$F_{b,Rd1z} = k_{1z} \cdot \alpha_{bz} \cdot f_u \cdot d \cdot t_i / \gamma_{M2}$$

- Pression du boulon sur la platine :

Direction x :

$$k_{1x} = 2,50 \quad \text{Coefficient pour le calcul de } F_{b,Rd}$$

$$k_{1x} = \min[2.8 \cdot (e_2/d_0) - 1.7, 2.5]$$

$$k_{1x} > 0.0 \quad 2,50 > 0,00 \quad \text{vérifié.}$$

$\alpha_{bx} = 0,75$ Coefficient dépendant de l'espacement des boulons

$$\alpha_{bx} = \min[e_1/(3 \cdot d_0), p_1/(3 \cdot d_0) - 0.25, f_{ub}/f_u, 1]$$

$$\alpha_{bx} > 0.0 \quad 0,75 > 0,00 \quad \text{vérifié.}$$

$$F_{b,Rd2x} = 133,65$$
 [kN]

$$F_{b,Rd2x} = k_{1x} \cdot \alpha_{bx} \cdot f_u \cdot d \cdot t_i / \gamma_{M2}$$

Direction z :

$$k_{1z} = 2,50 \quad \text{Coefficient pour le calcul de } F_{b,Rd}$$

$$k_{1z} = \min[2.8 \cdot (e_1/d_0) - 1.7, 1.4 \cdot (p_1/d_0) - 1.7, 2.5]$$

$$k_{1z} > 0.0 \quad 2,50 > 0,00 \quad \text{vérifié.}$$

$\alpha_{bz} = 1,00$ Coefficient pour le calcul de $F_{b,Rd}$

$$\alpha_{bz} = \min[e_2/(3 \cdot d_0), f_{ub}/f_u, 1]$$

$$\alpha_{bz} > 0.0 \quad 1,00 > 0,00 \quad \text{vérifié.}$$

$F_{b,Rd2z} = 178,20$ [kN] Résistance d'un boulon en pression diamétrale

$$F_{b,Rd2z} = k_{1z} \cdot \alpha_{bz} \cdot f_u \cdot d \cdot t_i / \gamma_{M2}$$

- ❖ Vérification de l'assemblage pour les efforts agissant sur les boulons :

- Cisaillement des boulons :

$$e = 39 \quad [\text{mm}]$$

$$M_0 = -15,91 \quad [\text{kN} \cdot \text{m}]$$

$$F_{NSd} = -102,11 \quad [\text{kN}]$$

$$F_{MSd} = -79,56 \quad [\text{kN}]$$

$$F_{x,Ed} = -102,11 \quad [\text{kN}]$$

$$F_{z,Ed} = -79,56 \quad [\text{kN}]$$

$$F_{Rdx} = 122,15 \quad [\text{kN}]$$

$$F_{Rdz} = 122,15 \quad [\text{kN}]$$

$$M_0 = N_{b2,Ed} \cdot e$$

$$F_{NSd} = N_{b2,Ed} / n$$

$$F_{MSd} = M_0 \cdot x_{\max} / \sum x_i^2$$

$$F_{x,Ed} = F_{NSd}$$

$$F_{z,Ed} = F_{MSd}$$

$$F_{Rdx} = \min(F_{vRd}, F_{bRd1x}, F_{bRd2x})$$

$$F_{Rdz} = \min(F_{vRd}, F_{bRd1z}, F_{bRd2z})$$

$$|F_{x,Ed}| \leq F_{Rdx} \quad |-102,11| < 122,15 \quad \text{vérifié.}$$

$$|F_{z,Ed}| \leq F_{Rdz} \quad |-79,56| < 122,15 \quad \text{vérifié.}$$

❖ Vérification de la section de la poutre affaiblie par les trous :

$$\beta_3 = 0,54 \quad [\text{Tableau 3.8}]$$

$$A_{net} = 58,31 \quad [\text{cm}^2] \quad A_{net} = A - d_0 * t_{f1}$$

$$N_{u,Rd} = 1246,85 \quad [\text{kN}] \quad N_{u,Rd} = (\beta_3 * A_{net} * f_{u1}) / \gamma_{M2}$$

$$N_{pl,Rd} = 1977,95 \quad [\text{kN}] \quad N_{pl,Rd} = (0.9 * A * f_{y1}) / \gamma_{M2}$$

$$|F_{x,Ed}| \leq F_{Rdx} \quad |-408,44| < 1246,85 \quad \text{vérifié.}$$

$$|F_{z,Ed}| \leq F_{Rdz} \quad |-408,44| < 1977,95 \quad \text{vérifié.}$$

❖ Vérification de la barre pour le cisaillement de bloc :

$$A_{nt} = 14,40 \quad [\text{cm}^2]$$

$$A_{nv} = 27,00 \quad [\text{cm}^2]$$

$$V_{effRd} = 838,51 \quad [\text{kN}] \quad V_{effRd} = 0.5 * f_u * A_{nt} / \gamma_{M2} + (1/\sqrt{3}) * f_y * A_{nv} / \gamma_{M0}$$

$$|N_{b1,Ed}| \leq V_{effRd} \quad |-408,44| < 838,51 \quad \text{vérifié.}$$

3. Barre 3 :

❖ Résistance des boulons :

$F_{v,Rd} = 122,15 \quad [\text{kN}]$ Résistance de la tige d'un boulon au cisaillement

$$F_{v,Rd} = 0.6 * f_{ub} * A_v * m / \gamma_{M2}$$

▪ Pression du boulon sur la barre :

Direction x :

$$k_{1x} = 2,50 \quad \text{Coefficient pour le calcul de } F_{b,Rd}; k_{1x} = \min[2.8 * (e_2/d_0) - 1.7, 2.5]$$

$$k_{1x} > 0.0 \quad 2,50 > 0,00 \quad \text{vérifié.}$$

$$\alpha_{bx} = 0,67 \quad \alpha_{bx} = \min[e_1/(3*d_0), p_1/(3*d_0) - 0.25, f_{ub}/f_u, 1]$$

$$\alpha_{bx} > 0.0 \quad 0,67 > 0,00 \quad \text{vérifié.}$$

$$F_{b,Rd1x} = 213,84 \quad [\text{kN}]$$

$$F_{b,Rd1x} = k_{1x} * \alpha_{bx} * f_u * d * t_i / \gamma_{M2}$$

Direction z :

$$k_{1z} = 2,50 \quad \text{Coefficient pour le calcul de } F_{b,Rd}$$

$$k_{1z} = \min[2.8 * (e_1/d_0) - 1.7, 1.4 * (p_1/d_0) - 1.7, 2.5]$$

$$k_{1z} > 0.0 \quad 2,50 > 0,00 \quad \text{vérifié.}$$

$$\alpha_{bz} = 1,00 \quad \text{Coefficient pour le calcul de } F_{b,Rd} \alpha_{bz} = \min[e_2/(3*d_0), f_{ub}/f_u, 1]$$

$$\alpha_{bz} = \min[e_2/(3*d_0), f_{ub}/f_u, 1]$$

$$\alpha_{bz} > 0.0 \quad 1,00 > 0,00 \quad \text{vérifié.}$$

$F_{b,Rd1z} = 320,76$ [kN] Résistance d'un boulon en pression diamétrale

$$F_{b,Rd1z} = k_{1z} * \alpha_{bz} * f_u * d * t_i / \gamma_{M2}$$

- Pression du boulon sur la platine :

Direction x :

$$k_{1x} = 2,50 \quad \text{Coefficient pour le calcul de } F_{b,Rd}$$

$$k_1 = \min[2.8*(e_2/d_0) - 1.7, 2.5]$$

$$k_{1x} > 0.0 \quad 2,50 > 0,00 \quad \text{vérifié.}$$

$\alpha_{bx} = 0,75$ Coefficient dépendant de l'espacement des boulons

$$\alpha_{bx} = \min[e_1/(3*d_0), p_1/(3*d_0) - 0.25, f_{ub}/f_u, 1]$$

$$\alpha_{bx} > 0.0 \quad 0,75 > 0,00 \quad \text{vérifié.}$$

$$F_{b,Rd2x} = 133,65$$
 [kN]

$$F_{b,Rd2x} = k_1 * \alpha_b * f_u * d * t_i / \gamma_{M2}$$

Direction z :

$$k_{1z} = 2,50 \quad \text{Coefficient pour le calcul de } F_{b,Rd}$$

$$k_{1z} = \min[2.8*(e_1/d_0) - 1.7, 1.4*(p_1/d_0) - 1.7, 2.5]$$

$$k_{1z} > 0.0 \quad 2,50 > 0,00 \quad \text{vérifié.}$$

$\alpha_{bz} = 1,00$ Coefficient pour le calcul de $F_{b,Rd}$

$$\alpha_{bz} = \min[e_2/(3*d_0), f_{ub}/f_u, 1]$$

$$\alpha_{bz} > 0.0 \quad 1,00 > 0,00 \quad \text{vérifié.}$$

$F_{b,Rd2z} = 178,20$ [kN] Résistance d'un boulon en pression diamétrale

$$F_{b,Rd2z} = k_{1z} * \alpha_{bz} * f_u * d * t_i / \gamma_{M2}$$

- ❖ Vérification de l'assemblage pour les efforts agissant sur les boulons :

- Cisaillement des boulons :

$$e = 39 \quad [\text{mm}]$$

$$M_0 = 8,28 \quad [\text{kN*m}]$$

$$F_{NSd} = 53,12 \quad [\text{kN}]$$

$$F_{MSd} = 41,39 \quad [\text{kN}]$$

$$F_{x,Ed} = 53,12 \quad [\text{kN}]$$

$$F_{z,Ed} = 41,39 \quad [\text{kN}]$$

$$F_{Rdx} = 122,15 \quad [\text{kN}]$$

$$M_0 = N_{b3,Ed} * e$$

$$F_{NSd} = N_{b3,Ed} / n$$

$$F_{MSd} = M_0 * x_{\max} / \sum X_i^2$$

$$F_{x,Ed} = F_{NSd}$$

$$F_{z,Ed} = F_{MSd}$$

$$F_{Rdx} = \min(F_{vRd}, F_{bRd1x}, F_{bRd2x})$$

$$e = 39 \quad [\text{mm}]$$

$$F_{Rdz} = 122,15 \quad [\text{kN}]$$

$$F_{Rdz} = \min(F_{vRd}, F_{bRd1z}, F_{bRd2z})$$

$$|F_{x,Ed}| \leq F_{Rdx} \quad |53,12| < 122,15 \quad \text{vérifié.}$$

$$|F_{z,Ed}| \leq F_{Rdz} \quad |41,39| < 122,15 \quad \text{vérifié.}$$

❖ Vérification de la section de la poutre affaiblie par les trous :

$$\beta_3 = 0,54$$

[Tableau 3.8]

$$A_{net} = 58,31 \quad [\text{cm}^2]$$

$$A_{net} = A - d_0 * t_{f1}$$

$$N_{u,Rd} = 1246,85 \quad [\text{kN}]$$

$$N_{u,Rd} = (\beta_3 * A_{net} * f_{u1}) / \gamma_{M2}$$

$$N_{pl,Rd} = 1977,95 \quad [\text{kN}]$$

$$N_{pl,Rd} = (0,9 * A * f_{y1}) / \gamma_{M2}$$

$$|F_{x,Ed}| \leq F_{Rdx} \quad |212,49| < 1246,85$$

vérifié.

$$|F_{z,Ed}| \leq F_{Rdz} \quad |212,49| < 1977,95$$

vérifié.

❖ Vérification de la barre pour le cisaillement de bloc :

$$A_{nt} = 14,40 \quad [\text{cm}^2]$$

$$A_{nv} = 27,00 \quad [\text{cm}^2]$$

$$V_{effRd} = 838,51 \quad [\text{kN}]$$

$$V_{effRd} = 0,5 * f_u * A_{nt} / \gamma_{M2} + (1/\sqrt{3}) * f_y * A_{nv} / \gamma_{M0}$$

$$|N_{b1,Ed}| \leq V_{effRd}$$

$$|212,49| < 838,51$$

vérifié.

4. Barre 4 :

❖ Résistance des boulons :

$$F_{v,Rd} = 122,15 \quad [\text{kN}] \quad \text{Résistance de la tige d'un boulon au cisaillement}$$

$$F_{v,Rd} = 0,6 * f_{ub} * A_v * m / \gamma_{M2}$$

▪ Pression du boulon sur la barre :

Direction x :

$$k_{1x} = 2,50 \quad \text{Coefficient pour le calcul de } F_{b,Rd}; k_{1x} = \min[2,8 * (e_2/d_0) - 1,7, 2,5]$$

$$k_{1x} > 0,0$$

$$2,50 > 0,00$$

vérifié.

$$\alpha_{bx} = 0,67$$

$$\alpha_{bx} = \min[e_1/(3*d_0), p_1/(3*d_0) - 0,25, f_{ub}/f_u, 1]$$

$$\alpha_{bx} > 0,0$$

$$0,67 > 0,00$$

vérifié.

$$F_{b,Rd1x} = 213,84 \quad [\text{kN}]$$

$$F_{b,Rd1x} = k_{1x} * \alpha_{bx} * f_u * d * t_i / \gamma_{M2}$$

Direction z :

$$k_{1z} = 2,50 \quad \text{Coefficient pour le calcul de } F_{b,Rd}$$

$$k_{1z} = \min[2,8 * (e_1/d_0) - 1,7, 1,4 * (p_1/d_0) - 1,7, 2,5]$$

$$k_{1z} > 0.0 \quad 2,50 > 0,00 \quad \text{vérifié.}$$

$$\alpha_{bz} = 1,00 \quad \text{Coefficient pour le calcul de } F_{b,Rd} \alpha_{bz} = \min[e_2/(3*d_0), f_{ub}/f_u, 1]$$

$$\alpha_{bz} = \min[e_2/(3*d_0), f_{ub}/f_u, 1]$$

$$\alpha_{bz} > 0.0 \quad 1,00 > 0,00 \quad \text{vérifié.}$$

$$F_{b,Rd1z} = 320,76 \text{ [kN]} \quad \text{Résistance d'un boulon en pression diamétrale}$$

$$F_{b,Rd1z} = k_{1z} * \alpha_{bz} * f_u * d * t_i / \gamma_{M2}$$

- Pression du boulon sur la platine :

Direction x :

$$k_{1x} = 2,50 \quad \text{Coefficient pour le calcul de } F_{b,Rd}$$

$$k_1 = \min[2.8*(e_2/d_0) - 1.7, 2.5]$$

$$k_{1x} > 0.0 \quad 2,50 > 0,00 \quad \text{vérifié.}$$

$$\alpha_{bx} = 0,75 \quad \text{Coefficient dépendant de l'espacement des boulons}$$

$$\alpha_{bx} = \min[e_1/(3*d_0), p_1/(3*d_0) - 0.25, f_{ub}/f_u, 1]$$

$$\alpha_{bx} > 0.0 \quad 0,75 > 0,00 \quad \text{vérifié.}$$

$$F_{b,Rd2x} = 133,65 \text{ [kN]}$$

$$F_{b,Rd2x} = k_1 * \alpha_b * f_u * d * t_i / \gamma_{M2}$$

Direction z :

$$k_{1z} = 2,50 \quad \text{Coefficient pour le calcul de } F_{b,Rd}$$

$$k_{1z} = \min[2.8*(e_1/d_0) - 1.7, 1.4*(p_1/d_0) - 1.7, 2.5]$$

$$k_{1z} > 0.0 \quad 2,50 > 0,00 \quad \text{vérifié.}$$

$$\alpha_{bz} = 1,00 \quad \text{Coefficient pour le calcul de } F_{b,Rd}$$

$$\alpha_{bz} = \min[e_2/(3*d_0), f_{ub}/f_u, 1]$$

$$\alpha_{bz} > 0.0 \quad 1,00 > 0,00 \quad \text{vérifié.}$$

$$F_{b,Rd2z} = 178,20 \text{ [kN]} \quad \text{Résistance d'un boulon en pression diamétrale}$$

$$F_{b,Rd2z} = k_{1z} * \alpha_{bz} * f_u * d * t_i / \gamma_{M2}$$

- ❖ Vérification de l'assemblage pour les efforts agissant sur les boulons :

- Cisaillement des boulons :

$$e = 39 \quad \text{[mm]}$$

$$M_0 = -15,96 \text{ [kN*m]} \quad M_0 = N_{b4,Ed} * e$$

$$F_{NSd} = -102,45 \text{ [kN]} \quad F_{NSd} = N_{b4,Ed} / n$$

$$F_{MSd} = -79,82 \text{ [kN]} \quad F_{MSd} = M_0 * x_{max} / \sum X_i^2$$

$$F_{x,Ed} = -102,45 \text{ [kN]} \quad F_{x,Ed} = F_{NSd}$$

$$e = 39 \quad [\text{mm}]$$

$$F_{z,Ed} = -79,82 \quad [\text{kN}]$$

$$F_{z,Ed} = F_{MSd}$$

$$F_{Rdx} = 122,15 \quad [\text{kN}]$$

$$F_{Rdx} = \min(F_{vRd}, F_{bRd1x}, F_{bRd2x})$$

$$F_{Rdz} = 122,15 \quad [\text{kN}]$$

$$F_{Rdz} = \min(F_{vRd}, F_{bRd1z}, F_{bRd2z})$$

$$|F_{x,Ed}| \leq F_{Rdx} \quad |-102,45| < 122,15 \quad \text{vérifié.}$$

$$|F_{z,Ed}| \leq F_{Rdz} \quad |-79,82| < 122,15 \quad \text{vérifié.}$$

❖ Vérification de la section de la poutre affaiblie par les trous :

$$\beta_3 = 0,54$$

[Tableau 3.8]

$$A_{net} = 58,31 \quad [\text{cm}^2]$$

$$A_{net} = A - d_0 * t_{f1}$$

$$N_{u,Rd} = 1246,85 \quad [\text{kN}]$$

$$N_{u,Rd} = (\beta_3 * A_{net} * f_{u1}) / \gamma_{M2}$$

$$N_{pl,Rd} = 1977,95 \quad [\text{kN}]$$

$$N_{pl,Rd} = (0,9 * A * f_{y1}) / \gamma_{M2}$$

$$|F_{x,Ed}| \leq F_{Rdx} \quad |-409,79| < 1246,85 \quad \text{vérifié.}$$

$$|F_{z,Ed}| \leq F_{Rdz} \quad |-409,79| < 1977,95 \quad \text{vérifié.}$$

❖ Vérification de la barre pour le cisaillement de bloc :

$$A_{nt} = 14,40 \quad [\text{cm}^2]$$

$$A_{nv} = 27,00 \quad [\text{cm}^2]$$

$$V_{effRd} = 838,51 \quad [\text{kN}]$$

$$V_{effRd} = 0,5 * f_u * A_{nt} / \gamma_{M2} + (1/\sqrt{3}) * f_y * A_{nv} / \gamma_{M0}$$

$$|N_{b1,Ed}| \leq V_{effRd} \quad |-409,79| < 838,51 \quad \text{vérifié.}$$

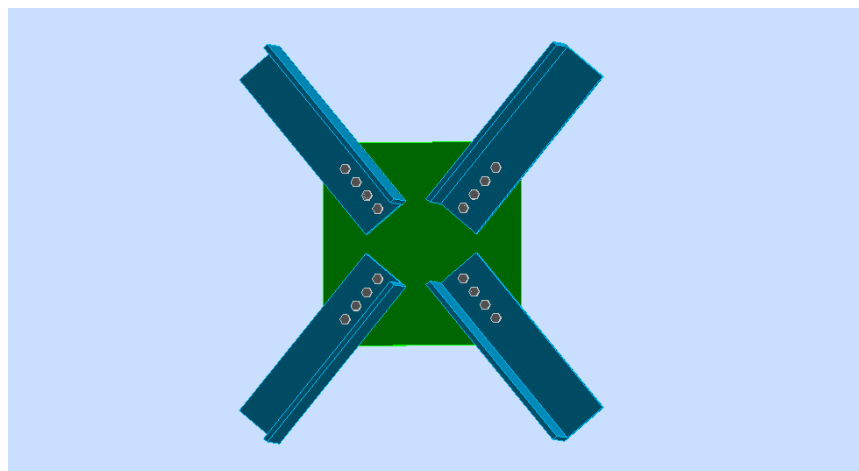


Figure 40. Vue de l'assemblage Gousset – Contreventement

7.2.4 Assemblage Gousset - Membrane de treillis

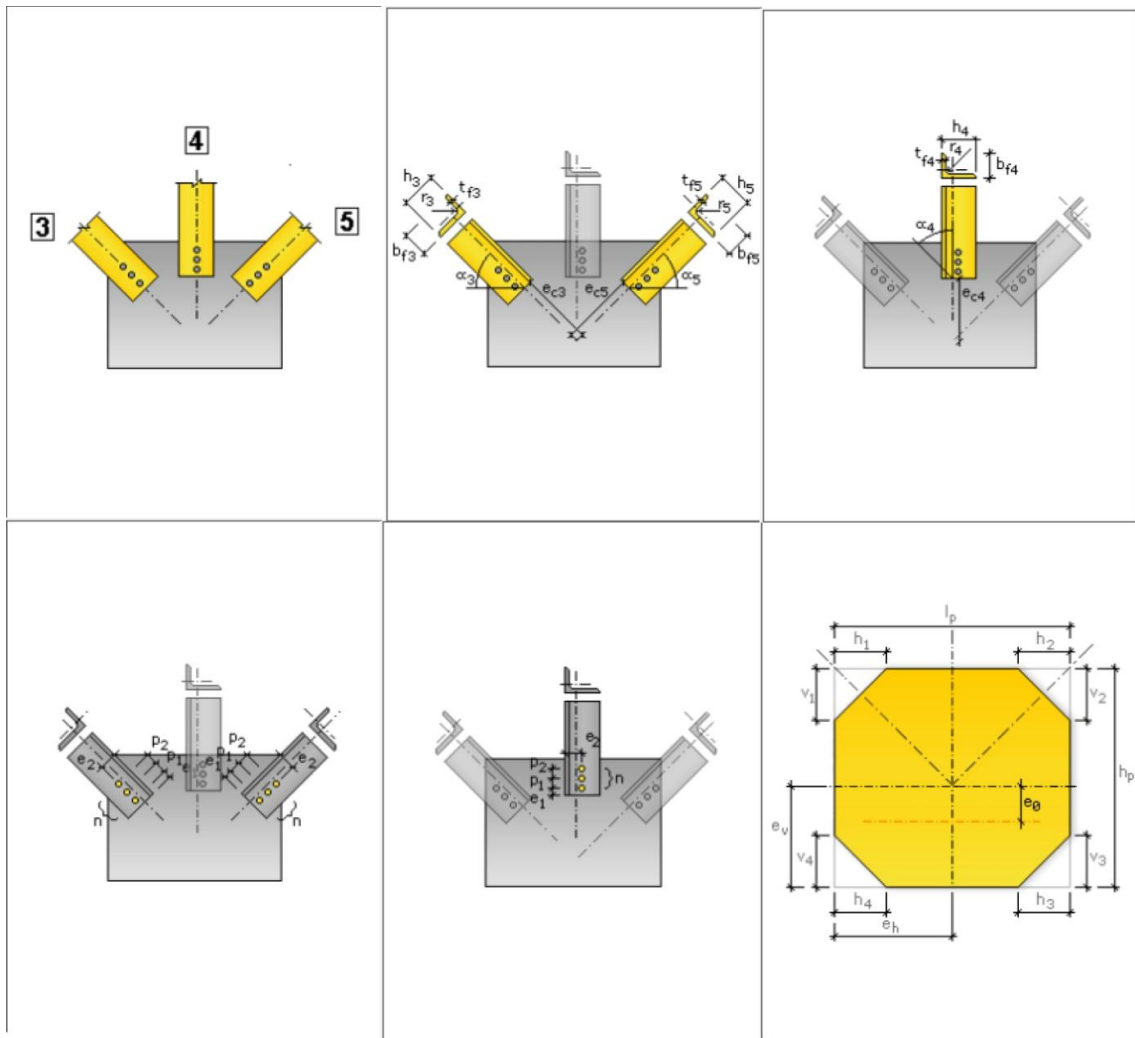


Figure 41. Schéma de l'assemblage Gousset – Membrane de treillis

7.2.4.1 Général

Nœud de la structure : 575

Barres de la structure : 356, 358 et 316

7.2.4.2 Géométrie

1. Barres :

	Barre 3	Barre 4	Barre 5	
Barre N° :	356	358	316	
Profilé :	CAE 180x18	CAE 180x18	CAE 180x18	
	h	180	180	180 mm
	b _f	180	180	180 mm
	t _w	18	18	18 mm
	t _f	18	18	18 mm

		Barre 3	Barre 4	Barre 5	
	r	18	18	18	mm
	A	61,91	61,91	61,91	cm ²
Matériau :		ACIER E36	ACIER E36	ACIER E36	
	f _y	355,00	355,00	355,00	MPa
	f _u	495,00	495,00	495,00	MPa
Angle	α	90,0	39,8	140,2	Deg
Longueur	l	5,00	3,91	3,91	m

2. Boulons :

▪ Barre 3 :

Classe =	10.9		Classe du boulon
d =	18	[mm]	Diamètre du boulon
d ₀ =	20	[mm]	Diamètre du trou de boulon
A _s =	1,92	[cm ²]	Aire de la section efficace du boulon
A _v =	2,54	[cm ²]	Aire de la section du boulon
f _{yb} =	670,00	[MPa]	Limite de plasticité
f _{ub} =	1000,00	[MPa]	Résistance du boulon à la traction
n =	4		Nombre de colonnes des boulons
Espacement des boulons	60 ; 60 ; 60 [mm]		
e ₁ =	40	[mm]	
e ₂ =	90	[mm]	
e _c =	200	[mm]	

▪ Barre 4 :

Classe =	10.9		Classe du boulon
d =	18	[mm]	Diamètre du boulon
d ₀ =	20	[mm]	Diamètre du trou de boulon
A _s =	1,92	[cm ²]	Aire de la section efficace du boulon
A _v =	2,54	[cm ²]	Aire de la section du boulon
f _{yb} =	670,00	[MPa]	Limite de plasticité
f _{ub} =	1000,00	[MPa]	Résistance du boulon à la traction
n =	4		Nombre de colonnes des boulons
Espacement des boulons	60 ; 60 ; 60 [mm]		
e ₁ =	40	[mm]	

$$e_1 = 40 \quad [\text{mm}]$$

$$e_2 = 90 \quad [\text{mm}]$$

$$e_c = 150 \quad [\text{mm}]$$

▪ Barre 5 :

$$\text{Classe} = 10.9$$

Classe du boulon

$$d = 18 \quad [\text{mm}]$$

Diamètre du boulon

$$d_0 = 20 \quad [\text{mm}]$$

Diamètre du trou de boulon

$$A_s = 1,92 \quad [\text{cm}^2]$$

Aire de la section efficace du boulon

$$A_v = 2,54 \quad [\text{cm}^2]$$

Aire de la section du boulon

$$f_{yb} = 670,00 \quad [\text{MPa}]$$

Limite de plasticité

$$f_{ub} = 1000,00 \quad [\text{MPa}]$$

Résistance du boulon à la traction

$$n = 4$$

Nombre de colonnes des boulons

$$\text{Espacement des boulons} \quad 60; 60; 60 \quad [\text{mm}]$$

$$e_1 = 40 \quad [\text{mm}]$$

$$e_2 = 90 \quad [\text{mm}]$$

$$e_c = 150 \quad [\text{mm}]$$

3. Gousset :

$$l_p = 800 \quad [\text{mm}]$$

Longueur de la platine

$$h_p = 550 \quad [\text{mm}]$$

Hauteur de la platine

$$t_p = 10 \quad [\text{mm}]$$

Epaisseur de la platine

▪ Paramètre :

$$h_1 = 80 \quad [\text{mm}] \quad \text{Grugeage}$$

$$v_1 = 80 \quad [\text{mm}] \quad \text{Grugeage}$$

$$h_2 = 80 \quad [\text{mm}] \quad \text{Grugeage}$$

$$v_2 = 80 \quad [\text{mm}] \quad \text{Grugeage}$$

$$h_3 = 80 \quad [\text{mm}] \quad \text{Grugeage}$$

$$v_3 = 80 \quad [\text{mm}] \quad \text{Grugeage}$$

$$h_4 = 80 \quad [\text{mm}] \quad \text{Grugeage}$$

$$v_4 = 80 \quad [\text{mm}] \quad \text{Grugeage}$$

- Centre de gravité de la tôle par rapport au centre de gravité des barres (0;225) :

$$e_v = 50 \quad [\text{mm}]$$

$$e_H = 400 \quad [\text{mm}]$$

$$e_0 = 0 \quad [\text{mm}]$$

Matériau : ACIER E36

$$f_y = 355,00 \text{ [MPa]} \text{ Résistance}$$

4. Coefficients de matériau :

$$\gamma_{M0} = 1,00 \quad \text{Coefficient de sécurité partiel [2.2]}$$

$$\gamma_{M2} = 1,25 \quad \text{Coefficient de sécurité partiel [2.2]}$$

7.2.4.3 Efforts

Cas : Combinaison : $1.35 * (G_0 + G_1) + 1 * (Q + N + V_x^-) + 1.5 * T^+$

$$N_{b3,Ed} = 47,57 \quad [\text{kN}] \quad \text{Effort axial}$$

$$N_{b4,Ed} = 195,16 \quad [\text{kN}] \quad \text{Effort axial}$$

$$N_{b5,Ed} = -406,51 \quad [\text{kN}] \quad \text{Effort axial}$$

7.2.4.4 Résultats

1. Barre 3 :

❖ Résistance des boulons :

$F_{v,Rd} = 122,15 \text{ [kN]}$ Résistance de la tige d'un boulon au cisaillement

$$F_{v,Rd} = 0.6 * f_{ub} * A_v * m / \gamma_{M2}$$

- Pression du boulon sur la barre :

Direction x :

$$k_{1x} = 2,50 \quad \text{Coefficient pour le calcul de } F_{b,Rd}; k_{1x} = \min[2.8 * (e_2/d_0) - 1.7, 2.5]$$

$$k_{1x} > 0.0 \quad 2,50 > 0,00 \quad \text{vérifié.}$$

$$\alpha_{bx} = 0,67 \quad \alpha_{bx} = \min[e_1/(3*d_0), p_1/(3*d_0) - 0.25, f_{ub}/f_u, 1]$$

$$\alpha_{bx} > 0.0 \quad 0,67 > 0,00 \quad \text{vérifié.}$$

$$F_{b,Rd1x} = 213,84 \text{ [kN]}$$

$$F_{b,Rd1x} = k_{1x} * \alpha_{bx} * f_u * d * t_i / \gamma_{M2}$$

Direction z :

$$k_{1z} = 2,50 \quad \text{Coefficient pour le calcul de } F_{b,Rd}$$

$$k_{1z} = \min[2.8 * (e_1/d_0) - 1.7, 1.4 * (p_1/d_0) - 1.7, 2.5]$$

$$k_{1z} > 0.0 \quad 2,50 > 0,00 \quad \text{vérifié.}$$

$$\alpha_{bz} = 1,00 \quad \text{Coefficient pour le calcul de } F_{b,Rd} \quad \alpha_{bz} = \min[e_2/(3*d_0), f_{ub}/f_u, 1]$$

$$\alpha_{bz} = \min[e_2/(3*d_0), f_{ub}/f_u, 1]$$

$$\alpha_{bz} > 0.0 \quad 1,00 > 0,00 \quad \text{vérifié.}$$

$$F_{b,Rd1z} = 320,76 \text{ [kN]} \quad \text{Résistance d'un boulon en pression diamétrale}$$

$$F_{b,Rd1z} = k_{1z} * \alpha_{bz} * f_u * d * t_i / \gamma_{M2}$$

- Pression du boulon sur la platine :

Direction x :

$$k_{1x} = 2,50 \quad \text{Coefficient pour le calcul de } F_{b,Rd}$$

$$k_1 = \min[2.8*(e_2/d_0) - 1.7, 2.5]$$

$$k_{1x} > 0.0 \quad 2,50 > 0,00 \quad \text{vérifié.}$$

$$\alpha_{bx} = 0,75 \quad \text{Coefficient dépendant de l'espacement des boulons}$$

$$\alpha_{bx} = \min[e_1/(3*d_0), p_1/(3*d_0) - 0.25, f_{ub}/f_u, 1]$$

$$\alpha_{bx} > 0.0 \quad 0,75 > 0,00 \quad \text{vérifié.}$$

$$F_{b,Rd2x} = 133,65 \text{ [kN]}$$

$$F_{b,Rd2x} = k_1 * \alpha_b * f_u * d * t_i / \gamma_{M2}$$

Direction z :

$$k_{1z} = 2,50 \quad \text{Coefficient pour le calcul de } F_{b,Rd}$$

$$k_{1z} = \min[2.8*(e_1/d_0) - 1.7, 1.4*(p_1/d_0) - 1.7, 2.5]$$

$$k_{1z} > 0.0 \quad 2,50 > 0,00 \quad \text{vérifié.}$$

$$\alpha_{bz} = 1,00 \quad \text{Coefficient pour le calcul de } F_{b,Rd}$$

$$\alpha_{bz} = \min[e_2/(3*d_0), f_{ub}/f_u, 1]$$

$$\alpha_{bz} > 0.0 \quad 1,00 > 0,00 \quad \text{vérifié.}$$

$$F_{b,Rd2z} = 178,20 \text{ [kN]} \quad \text{Résistance d'un boulon en pression diamétrale}$$

$$F_{b,Rd2z} = k_{1z} * \alpha_{bz} * f_u * d * t_i / \gamma_{M2}$$

- ❖ Vérification de l'assemblage pour les efforts agissant sur les boulons :

- Cisaillement des boulons :

$$e = 39 \quad \text{[mm]}$$

$$M_0 = 1,85 \quad \text{[kN*m]} \quad M_0 = N_{b4,Ed} * e$$

$$F_{NSd} = 11,89 \quad \text{[kN]} \quad F_{NSd} = N_{b4,Ed} / n$$

$$F_{MSd} = 9,27 \quad \text{[kN]} \quad F_{MSd} = M_0 * x_{max} / \sum x_i^2$$

$$F_{x,Ed} = 11,89 \quad \text{[kN]} \quad F_{x,Ed} = F_{NSd}$$

$$e = 39 \quad [\text{mm}]$$

$$F_{z,Ed} = 9,27 \quad [\text{kN}]$$

$$F_{z,Ed} = F_{MSd}$$

$$F_{Rdx} = 122,15 \quad [\text{kN}]$$

$$F_{Rdx} = \min(F_{vRd}, F_{bRd1x}, F_{bRd2x})$$

$$F_{Rdz} = 122,15 \quad [\text{kN}]$$

$$F_{Rdz} = \min(F_{vRd}, F_{bRd1z}, F_{bRd2z})$$

$$|F_{x,Ed}| \leq F_{Rdx} \quad |11,89| < 122,15 \quad \text{vérifié.}$$

$$|F_{z,Ed}| \leq F_{Rdz} \quad |9,27| < 122,15 \quad \text{vérifié.}$$

❖ Vérification de la section de la poutre affaiblie par les trous :

$$\beta_3 = 0,54$$

[Tableau 3.8]

$$A_{net} = 58,31 \quad [\text{cm}^2]$$

$$A_{net} = A - d_0 * t_{f1}$$

$$N_{u,Rd} = 1246,85 \quad [\text{kN}]$$

$$N_{u,Rd} = (\beta_3 * A_{net} * f_{u1}) / \gamma_{M2}$$

$$N_{pl,Rd} = 1977,95 \quad [\text{kN}]$$

$$N_{pl,Rd} = (0,9 * A * f_{y1}) / \gamma_{M2}$$

$$|F_{x,Ed}| \leq F_{Rdx} \quad |47,57| < 1246,85$$

vérifié.

$$|F_{z,Ed}| \leq F_{Rdz} \quad |47,57| < 1977,95$$

vérifié.

❖ Vérification de la barre pour le cisaillement de bloc :

$$A_{nt} = 14,40 \quad [\text{cm}^2]$$

$$A_{nv} = 27,00 \quad [\text{cm}^2]$$

$$V_{effRd} = 838,51 \quad [\text{kN}]$$

$$V_{effRd} = 0,5 * f_u * A_{nt} / \gamma_{M2} + (1/\sqrt{3}) * f_y * A_{nv} / \gamma_{M0}$$

$$|N_{b1,Ed}| \leq V_{effRd}$$

$$|47,57| < 838,51$$

vérifié.

2. Barre 4 :

❖ Résistance des boulons :

$$F_{v,Rd} = 122,15 \quad [\text{kN}] \quad \text{Résistance de la tige d'un boulon au cisaillement}$$

$$F_{v,Rd} = 0,6 * f_{ub} * A_v * m / \gamma_{M2}$$

▪ Pression du boulon sur la barre :

Direction x :

$$k_{1x} = 2,50 \quad \text{Coefficient pour le calcul de } F_{b,Rd}; k_{1x} = \min[2,8 * (e_2/d_0) - 1,7, 2,5]$$

$$k_{1x} > 0,0 \quad 2,50 > 0,00 \quad \text{vérifié.}$$

$$\alpha_{bx} = 0,67 \quad \alpha_{bx} = \min[e_1/(3*d_0), p_1/(3*d_0) - 0,25, f_{ub}/f_u, 1]$$

$$\alpha_{bx} > 0,0 \quad 0,67 > 0,00 \quad \text{vérifié.}$$

$$F_{b,Rd1x} = 213,84 \quad [\text{kN}]$$

$$F_{b,Rd1x} = k_{1x} * \alpha_{bx} * f_u * d * t_i / \gamma_{M2}$$

Direction z :

$k_{1z} = 2,50$ Coefficient pour le calcul de $F_{b,Rd}$

$$k_{1z} = \min[2.8 \cdot (e_1/d_0) - 1.7, 1.4 \cdot (p_1/d_0) - 1.7, 2.5]$$

$$k_{1z} > 0.0 \quad 2,50 > 0,00 \quad \text{vérifié.}$$

$\alpha_{bz} = 1,00$ Coefficient pour le calcul de $F_{b,Rd}$ $\alpha_{bz} = \min[e_2/(3 \cdot d_0), f_{ub}/f_u, 1]$

$$\alpha_{bz} = \min[e_2/(3 \cdot d_0), f_{ub}/f_u, 1]$$

$$\alpha_{bz} > 0.0 \quad 1,00 > 0,00 \quad \text{vérifié.}$$

$F_{b,Rd1z} = 320,76$ [kN] Résistance d'un boulon en pression diamétrale

$$F_{b,Rd1z} = k_{1z} \cdot \alpha_{bz} \cdot f_u \cdot d \cdot t_i / \gamma_{M2}$$

- Pression du boulon sur la platine :

Direction x :

$k_{1x} = 2,50$ Coefficient pour le calcul de $F_{b,Rd}$

$$k_{1x} = \min[2.8 \cdot (e_2/d_0) - 1.7, 2.5]$$

$$k_{1x} > 0.0 \quad 2,50 > 0,00 \quad \text{vérifié.}$$

$\alpha_{bx} = 0,75$ Coefficient dépendant de l'espacement des boulons

$$\alpha_{bx} = \min[e_1/(3 \cdot d_0), p_1/(3 \cdot d_0) - 0.25, f_{ub}/f_u, 1]$$

$$\alpha_{bx} > 0.0 \quad 0,75 > 0,00 \quad \text{vérifié.}$$

$F_{b,Rd2x} = 133,65$ [kN]

$$F_{b,Rd2x} = k_{1x} \cdot \alpha_{bx} \cdot f_u \cdot d \cdot t_i / \gamma_{M2}$$

Direction z :

$k_{1z} = 2,50$ Coefficient pour le calcul de $F_{b,Rd}$

$$k_{1z} = \min[2.8 \cdot (e_1/d_0) - 1.7, 1.4 \cdot (p_1/d_0) - 1.7, 2.5]$$

$$k_{1z} > 0.0 \quad 2,50 > 0,00 \quad \text{vérifié.}$$

$\alpha_{bz} = 1,00$ Coefficient pour le calcul de $F_{b,Rd}$

$$\alpha_{bz} = \min[e_2/(3 \cdot d_0), f_{ub}/f_u, 1]$$

$$\alpha_{bz} > 0.0 \quad 1,00 > 0,00 \quad \text{vérifié.}$$

$F_{b,Rd2z} = 178,20$ [kN] Résistance d'un boulon en pression diamétrale

$$F_{b,Rd2z} = k_{1z} \cdot \alpha_{bz} \cdot f_u \cdot d \cdot t_i / \gamma_{M2}$$

- ❖ Vérification de l'assemblage pour les efforts agissant sur les boulons :

- Cisaillement des boulons :

$$e = 39 \quad [\text{mm}]$$

$$M_0 = 7,6 \quad [\text{kN} \cdot \text{m}]$$

$$M_0 = N_{b4,Ed} \cdot e$$

$$e = 39 \quad [\text{mm}]$$

$$F_{NSd} = 48,79 \quad [\text{kN}]$$

$$F_{MSd} = 38,01 \quad [\text{kN}]$$

$$F_{x,Ed} = 48,79 \quad [\text{kN}]$$

$$F_{z,Ed} = 38,01 \quad [\text{kN}]$$

$$F_{Rdx} = 122,15 \quad [\text{kN}]$$

$$F_{Rdz} = 122,15 \quad [\text{kN}]$$

$$|F_{x,Ed}| \leq F_{Rdx} \quad |48,79| < 122,15 \quad \text{vérifié.}$$

$$|F_{z,Ed}| \leq F_{Rdz} \quad |38,01| < 122,15 \quad \text{vérifié.}$$

$$F_{NSd} = N_{b4,Ed}/n$$

$$F_{MSd} = M_0 * x_{\max} / \sum x_i^2$$

$$F_{x,Ed} = F_{NSd}$$

$$F_{z,Ed} = F_{MSd}$$

$$F_{Rdx} = \min(F_{vRd}, F_{bRd1x}, F_{bRd2x})$$

$$F_{Rdz} = \min(F_{vRd}, F_{bRd1z}, F_{bRd2z})$$

❖ Vérification de la section de la poutre affaiblie par les trous :

$$\beta_3 = 0,54$$

[Tableau 3.8]

$$A_{\text{net}} = 58,31 \quad [\text{cm}^2]$$

$$A_{\text{net}} = A - d_0 * t_{f1}$$

$$N_{u,Rd} = 1246,85 \quad [\text{kN}]$$

$$N_{u,Rd} = (\beta_3 * A_{\text{net}} * f_{u1}) / \gamma_{M2}$$

$$N_{pl,Rd} = 1977,95 \quad [\text{kN}]$$

$$N_{pl,Rd} = (0,9 * A * f_{y1}) / \gamma_{M2}$$

$$|F_{x,Ed}| \leq F_{Rdx} \quad |195,16| < 1246,85$$

vérifié.

$$|F_{z,Ed}| \leq F_{Rdz} \quad |195,16| < 1977,95$$

vérifié.

❖ Vérification de la barre pour le cisaillement de bloc :

$$A_{nt} = 14,40 \quad [\text{cm}^2]$$

$$A_{nv} = 27,00 \quad [\text{cm}^2]$$

$$V_{\text{effRd}} = 838,51 \quad [\text{kN}]$$

$$V_{\text{effRd}} = 0,5 * f_u * A_{nt} / \gamma_{M2} + (1/\sqrt{3}) * f_y * A_{nv} / \gamma_{M0}$$

$$|N_{b1,Ed}| \leq V_{\text{effRd}} \quad |195,16| < 838,51$$

vérifié.

3. Barre 5 :

❖ Résistance des boulons :

$$F_{v,Rd} = 122,15 \quad [\text{kN}] \quad \text{Résistance de la tige d'un boulon au cisaillement}$$

$$F_{v,Rd} = 0,6 * f_{ub} * A_v * m / \gamma_{M2}$$

▪ Pression du boulon sur la barre :

Direction x :

$$k_{1x} = 2,50 \quad \text{Coefficient pour le calcul de } F_{b,Rd}; k_{1x} = \min[2,8 * (e_2/d_0) - 1,7, 2,5]$$

$$k_{1x} > 0,0 \quad 2,50 > 0,00 \quad \text{vérifié.}$$

$$\alpha_{bx} = 0,67 \quad \alpha_{bx} = \min[e_1/(3*d_0), p_1/(3*d_0) - 0,25, f_{ub}/f_u, 1]$$

$$\alpha_{bx} > 0,0 \quad 0,67 > 0,00 \quad \text{vérifié.}$$

$$F_{b,Rd1x} = 213,84 \quad [\text{kN}]$$

$$F_{b,Rd1x} = k_{1x} \cdot \alpha_{bx} \cdot f_u \cdot d \cdot t_i / \gamma_{M2}$$

Direction z :

$$k_{1z} = 2,50 \quad \text{Coefficient pour le calcul de } F_{b,Rd}$$

$$k_{1z} = \min[2.8 \cdot (e_1/d_0) - 1.7, 1.4 \cdot (p_1/d_0) - 1.7, 2.5]$$

$$k_{1z} > 0.0 \quad 2,50 > 0,00 \quad \text{vérifié.}$$

$$\alpha_{bz} = 1,00 \quad \text{Coefficient pour le calcul de } F_{b,Rd} \quad \alpha_{bz} = \min[e_2/(3 \cdot d_0), f_{ub}/f_u, 1]$$

$$\alpha_{bz} = \min[e_2/(3 \cdot d_0), f_{ub}/f_u, 1]$$

$$\alpha_{bz} > 0.0 \quad 1,00 > 0,00 \quad \text{vérifié.}$$

$F_{b,Rd1z} = 320,76$ [kN] Résistance d'un boulon en pression diamétrale

$$F_{b,Rd1z} = k_{1z} \cdot \alpha_{bz} \cdot f_u \cdot d \cdot t_i / \gamma_{M2}$$

- Pression du boulon sur la platine :

Direction x :

$$k_{1x} = 2,50 \quad \text{Coefficient pour le calcul de } F_{b,Rd}$$

$$k_{1x} = \min[2.8 \cdot (e_2/d_0) - 1.7, 2.5]$$

$$k_{1x} > 0.0 \quad 2,50 > 0,00 \quad \text{vérifié.}$$

$$\alpha_{bx} = 0,75 \quad \text{Coefficient dépendant de l'espacement des boulons}$$

$$\alpha_{bx} = \min[e_1/(3 \cdot d_0), p_1/(3 \cdot d_0) - 0.25, f_{ub}/f_u, 1]$$

$$\alpha_{bx} > 0.0 \quad 0,75 > 0,00 \quad \text{vérifié.}$$

$$F_{b,Rd2x} = 133,65$$
 [kN]

$$F_{b,Rd2x} = k_{1x} \cdot \alpha_{bx} \cdot f_u \cdot d \cdot t_i / \gamma_{M2}$$

Direction z :

$$k_{1z} = 2,50 \quad \text{Coefficient pour le calcul de } F_{b,Rd}$$

$$k_{1z} = \min[2.8 \cdot (e_1/d_0) - 1.7, 1.4 \cdot (p_1/d_0) - 1.7, 2.5]$$

$$k_{1z} > 0.0 \quad 2,50 > 0,00 \quad \text{vérifié.}$$

$$\alpha_{bz} = 1,00 \quad \text{Coefficient pour le calcul de } F_{b,Rd}$$

$$\alpha_{bz} = \min[e_2/(3 \cdot d_0), f_{ub}/f_u, 1]$$

$$\alpha_{bz} > 0.0 \quad 1,00 > 0,00 \quad \text{vérifié.}$$

$F_{b,Rd2z} = 178,20$ [kN] Résistance d'un boulon en pression diamétrale

$$F_{b,Rd2z} = k_{1z} \cdot \alpha_{bz} \cdot f_u \cdot d \cdot t_i / \gamma_{M2}$$

❖ Vérification de l'assemblage pour les efforts agissant sur les boulons :

- Cisaillement des boulons :

$$e = 39 \quad [\text{mm}]$$

$$M_0 = -15,84 \quad [\text{kN}\cdot\text{m}]$$

$$F_{NSd} = -101,63 \quad [\text{kN}]$$

$$F_{MSd} = -79,18 \quad [\text{kN}]$$

$$F_{x,Ed} = -101,63 \quad [\text{kN}]$$

$$F_{z,Ed} = -79,18 \quad [\text{kN}]$$

$$F_{Rdx} = 122,15 \quad [\text{kN}]$$

$$F_{Rdz} = 122,15 \quad [\text{kN}]$$

$$|F_{x,Ed}| \leq F_{Rdx} \quad |-101,63| < 122,15 \quad \text{vérifié.}$$

$$|F_{z,Ed}| \leq F_{Rdz} \quad |-79,18| < 122,15 \quad \text{vérifié.}$$

$$M_0 = N_{b4,Ed} \cdot e$$

$$F_{NSd} = N_{b4,Ed} / n$$

$$F_{MSd} = M_0 \cdot x_{\max} / \sum x_i^2$$

$$F_{x,Ed} = F_{NSd}$$

$$F_{z,Ed} = F_{MSd}$$

$$F_{Rdx} = \min(F_{vRd}, F_{bRd1x}, F_{bRd2x})$$

$$F_{Rdz} = \min(F_{vRd}, F_{bRd1z}, F_{bRd2z})$$

❖ Vérification de la section de la poutre affaiblie par les trous :

$$\beta_3 = 0,54$$

[Tableau 3.8]

$$A_{\text{net}} = 58,31 \quad [\text{cm}^2]$$

$$A_{\text{net}} = A - d_0 \cdot t_{f1}$$

$$N_{u,Rd} = 1246,85 \quad [\text{kN}]$$

$$N_{u,Rd} = (\beta_3 \cdot A_{\text{net}} \cdot f_{u1}) / \gamma_{M2}$$

$$N_{pl,Rd} = 1977,95 \quad [\text{kN}]$$

$$N_{pl,Rd} = (0,9 \cdot A \cdot f_{y1}) / \gamma_{M2}$$

$$|F_{x,Ed}| \leq F_{Rdx} \quad |-406,51| < 1246,85 \quad \text{vérifié.}$$

$$|F_{z,Ed}| \leq F_{Rdz} \quad |-406,51| < 1977,95 \quad \text{vérifié.}$$

❖ Vérification de la barre pour le cisaillement de bloc :

$$A_{nt} = 14,40 \quad [\text{cm}^2]$$

$$A_{nv} = 27,00 \quad [\text{cm}^2]$$

$$V_{\text{effRd}} = 838,51 \quad [\text{kN}]$$

$$V_{\text{effRd}} = 0,5 \cdot f_u \cdot A_{nt} / \gamma_{M2} + (1/\sqrt{3}) \cdot f_y \cdot A_{nv} / \gamma_{M0}$$

$$|N_{b1,Ed}| \leq V_{\text{effRd}} \quad |-406,51| < 838,51 \quad \text{vérifié.}$$

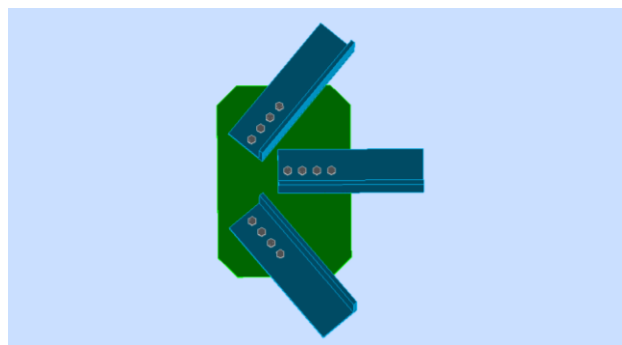


Figure 42. Vue de l'assemblage Gousset - Membrure de treillis

7.2.5 Pied de poteau articulé

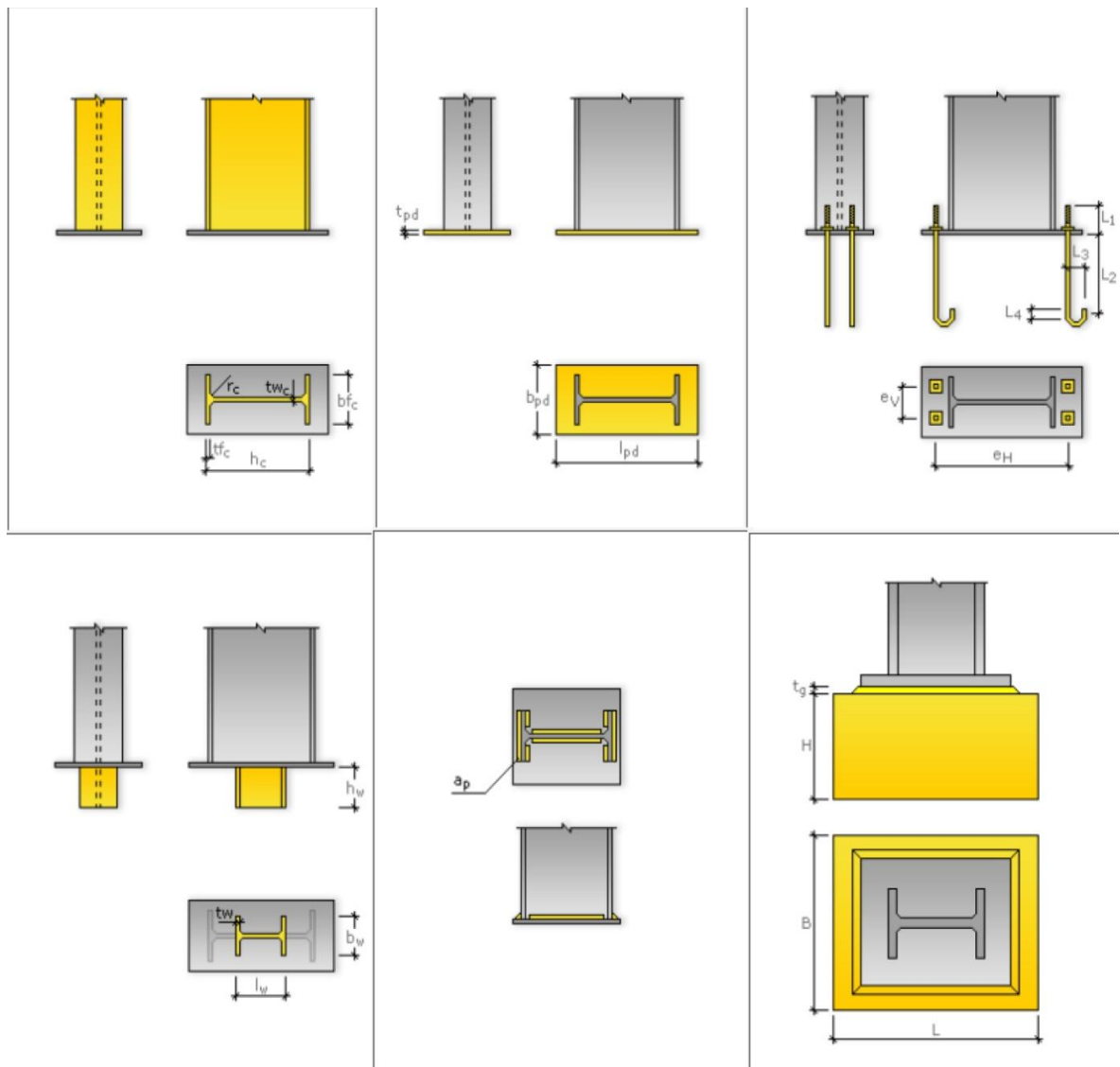


Figure 43. Schéma du Pied de poteau articulé

7.2.5.1 Général

Nœud de la structure : 51

Barres de la structure : 31

7.2.5.2 Géométrie

1. Poteau :

Profilé : HEB 900

Barre N° : 31

$L_c = 12,00$ [m] Longueur du poteau

$\alpha = 0,0$ [Deg] Angle d'inclinaison

$L_c =$	12,00	[m]	Longueur du poteau
$h_c =$	900	[mm]	Hauteur de la section du poteau
$b_{fc} =$	300	[mm]	Largeur de la section du poteau
$t_{wc} =$	19	[mm]	Epaisseur de l'âme de la section du poteau
$t_{fc} =$	35	[mm]	Epaisseur de l'aile de la section du poteau
$r_c =$	30	[mm]	Rayon de congé de la section du poteau
$A_c =$	371,28	[cm ²]	Aire de la section du poteau
$I_{yc} =$	494065,00	[cm ⁴]	Moment d'inertie de la section du poteau

Matériau : ACIER E36

$f_{yc} = 355,00$ [MPa] Résistance

$f_{uc} = 495,00$ [MPa] Résistance ultime du matériau

2. Platine de prescellement :

$l_{pd} = 920$ [mm] Longueur

$b_{pd} = 320$ [mm] Largeur

$t_{pd} = 20$ [mm] Epaisseur

Matériau : ACIER E36

$f_{ypd} = 355,00$ [MPa] Résistance

$f_{upd} = 495,00$ [MPa] Résistance ultime du matériau

3. Ancrage :

Classe = 10.9 Classe de tiges d'ancrage

$f_{yb} = 670,00$ [MPa] Limite de plasticité du matériau du boulon

$f_{ub} = 1000,00$ [MPa] Résistance du matériau du boulon à la traction

$d = 22$ [mm] Diamètre du boulon

$A_b = 3,03$ [cm²] Aire de section efficace du boulon

$n_H = 1$ Nombre de colonnes des boulons

$n_V = 2$ Nombre de rangées des boulons

$e_H = 0$ [mm] Ecartement

$e_V = 150$ [mm] Entraxe

▪ Dimensions des tiges d'ancrage :

$L_1 = 100$ [mm]

$L_2 = 500$ [mm]

$L_3 = 150$ [mm]

$$L_1 = 100 \quad [\text{mm}]$$

$$L_4 = 120 \quad [\text{mm}]$$

▪ **Plaque :**

$$l_{wd} = 100 \quad [\text{mm}] \quad \text{Longueur}$$

$$b_{wd} = 100 \quad [\text{mm}] \quad \text{Largeur}$$

$$t_{wd} = 10 \quad [\text{mm}] \quad \text{Epaisseur}$$

4. *Coefficients de matériau :*

$$\gamma_{M0} = 1,00 \quad \text{Coefficient de sécurité partiel}$$

$$\gamma_{M2} = 1,25 \quad \text{Coefficient de sécurité partiel}$$

$$\gamma_C = 1,50 \quad \text{Coefficient de sécurité partiel}$$

5. *Semelle isolée :*

$$L = 1200 \quad [\text{mm}] \quad \text{Longueur de la semelle}$$

$$B = 600 \quad [\text{mm}] \quad \text{Largeur de la semelle}$$

$$H = 600 \quad [\text{mm}] \quad \text{Hauteur de la semelle}$$

▪ **Béton :**

Classe **BETON25**

$$f_{ck} = 25,00 \quad [\text{MPa}] \quad \text{Résistance caractéristique à la compression}$$

▪ **Mortier de calage :**

$$t_g = 30 \quad [\text{mm}] \quad \text{Epaisseur du mortier de calage}$$

$$f_{ck,g} = 12,00 \quad [\text{MPa}] \quad \text{Résistance caractéristique à la compression}$$

$$C_{f,d} = 0,30 \quad \text{Coef. de frottement entre la plaque d'assise et le béton}$$

6. *Soudures :*

$$a_p = 10 \quad [\text{mm}] \quad \text{Plaque principale du pied de poteau}$$

7.2.5.3 Efforts

$$\text{Cas : Combinaison : } 1.35 * (G_0 + G_1) + 1 * (Q + N) + 1.5 * V_x^+ + 0.8 * T^-$$

$$N_{j,Ed} = -265,74 \quad [\text{kN}] \quad \text{Effort axial}$$

$$V_{j,Ed,y} = 6,23 \quad [\text{kN}] \quad \text{Effort tranchant}$$

$$V_{j,Ed,z} = -127,69 \quad [\text{kN}] \quad \text{Effort tranchant}$$

$$M_{j,Ed,y} = 0,00 \quad [\text{kN*m}] \quad \text{Moment fléchissant}$$

$$M_{j,Ed,z} = 8,56 \quad [\text{kN*m}] \quad \text{Moment fléchissant}$$

7.2.5.4 Résultats

1. Zone comprimée :

❖ Compression du béton :

$f_{cd} = 16,67$ [MPa] Résistance de calcul à la compression

$f_j = 17,38$ [MPa] Résistance de calcul du matériau du joint

$c = t_p \sqrt{(f_{yp}/(3*f_j*\gamma_{M0}))}$

$c = 52$ [mm] Largeur de l'appui additionnelle

$b_{eff} = 97$ [mm] Largeur efficace de la semelle de tronçon T

$l_{eff} = 320$ [mm] Longueur efficace de la semelle de tronçon en T

$A_{c0} = 311,02$ [cm²] Zone de contact de la plaque d'assise avec la fondation

$A_{c1} = 1749,46$ [cm²] Aire de calcul maximale de la répartition de la charge

$F_{rd,u} = A_{c0}*f_{cd}*\sqrt{(A_{c1}/A_{c0})} \leq 3*A_{c0}*f_{cd}$

$A_{c1} = 1749,46$ [cm²] Aire de calcul maximale de la répartition de la charge

$\beta_j = 0,67$ Coefficient réducteur pour la compression

$f_{jd} = \beta_j * F_{rd,u} / (b_{eff} * l_{eff})$

$f_{jd} = 26,35$ [MPa] Résistance de calcul du matériau du joint

$A_{c,n} = 1513,70$ [cm²] Aire de compression efficace

$A_{c,y} = 311,02$ [cm²] Aire de flexion My

$A_{c,z} = 311,02$ [cm²] Aire de flexion Mz

$F_{c,Rd,i} = A_{c,i} * f_{jd}$

$F_{c,Rd,n} = 3988,95$ [kN] Résistance du béton à la compression

$F_{c,Rd,y} = 819,60$ [kN] Résistance du béton à la flexion My

$F_{c,Rd,z} = 819,60$ [kN] Résistance du béton à la flexion Mz

❖ Aile et âme du poteau en compression :

$CL = 4,00$ Classe de la section

$W_{el,y} = 10979,22$ [cm³] Facteur élastique de la section

$M_{c,Rd,y} = 3897,62$ [kN*m] Résistance de calcul de la section à la flexion

$h_{f,y} = 865$ [mm] Distance entre les centres de gravité des ailes

$F_{c,fc,Rd,y} = M_{c,Rd,y} / h_{f,y}$

$F_{c,fc,Rd,y} = 4505,92$ [kN] Résistance de l'aile et de l'âme comprimées

$W_{el,z} = 1054,39$ [cm³] Facteur élastique de la section

$W_{el,z} = 1054,39 \text{ [cm}^3\text{]}$ Facteur élastique de la section
 $M_{c,Rd,z} = 374,31 \text{ [kN*m]}$ Résistance de calcul de la section à la flexion
 $h_{f,z} = 160 \text{ [mm]}$ Distance entre les centres de gravité des ailes
 $F_{c,fc,Rd,z} = M_{c,Rd,z} / h_{f,z}$
 $F_{c,fc,Rd,z} = 2339,44 \text{ [kN]}$ Résistance de l'aile et de l'âme comprimées

❖ Résistance de la semelle dans la zone comprimée :

$N_{j,Rd} = F_{c,Rd,n}$
 $N_{j,Rd} = 3988,95 \text{ [kN]}$ Résistance de la semelle à la compression axiale
 $F_{C,Rd,y} = \min(F_{C,Rd,y}, F_{c,fc,Rd,y})$
 $F_{C,Rd,y} = 819,60 \text{ [kN]}$ Résistance de la semelle dans la zone comprimée
 $F_{C,Rd,z} = \min(F_{C,Rd,z}, F_{c,fc,Rd,z})$
 $F_{C,Rd,z} = 819,60 \text{ [kN]}$ Résistance de la semelle dans la zone comprimée

2. Contrôle de la résistance de l'assemblage :

$N_{j,Ed} / N_{j,Rd} \leq 1,0 \text{ (6.24)}$ $0,07 < 1,00$ vérifié

$e_y = 0 \text{ [mm]}$ Excentricité de l'effort axial

$z_{c,y} = 411 \text{ [mm]}$ Bras de levier $F_{C,Rd,y}$

$z_{t,y} = 0 \text{ [mm]}$ Bras de levier $F_{T,Rd,y}$

$M_{j,Rd,y} = 674,37 \text{ [kN*m]}$ Résistance de l'assemblage à la flexion

$M_{j,Ed,y} / M_{j,Rd,y} \leq 1,0 \text{ (6.23)}$ $0,00 < 1,00$ vérifié

$e_z = 32 \text{ [mm]}$ Excentricité de l'effort axial

$z_{c,z} = 80 \text{ [mm]}$ Bras de levier $F_{C,Rd,z}$

$z_{t,z} = 75 \text{ [mm]}$ Bras de levier $F_{T,Rd,z}$

$M_{j,Rd,z} = 37,66 \text{ [kN*m]}$ Résistance de l'assemblage à la flexion

$M_{j,Ed,z} / M_{j,Rd,z} \leq 1,0 \text{ (6.23)}$ $0,00 < 1,00$ vérifié

$M_{j,Ed,y} / M_{j,Rd,y} + M_{j,Ed,z} / M_{j,Rd,z} \leq 1,0$ $0,00 < 1,00$ vérifié

3. Cisaillement :

❖ Pression du boulon d'ancrage sur la plaque d'assise :

▪ Cisaillement par l'effort $V_{j,Ed,y}$:

$\alpha_{d,y} = 1,18$ Coef. d'emplacement des boulons en direction du cisaillement

$\alpha_{b,y} = 1,00$ Coef. pour les calculs de la résistance $F_{1,vb,Rd}$

$k_{1,y} = 2,50$ Coef. d'emplacement des boulons

$$F_{1,vb,Rd,y} = k_{1,y} * \alpha_{b,y} * f_{up} * d * t_p / \gamma_{M2}$$

$$F_{1,vb,Rd,y} = 435,60 \text{ [kN]} \quad \text{Résistance du boulon d'ancrage à la pression}$$

- Cisaillement par l'effort V_j, Ed, z :

$$\alpha_{d,z} = 6,39 \quad \text{Coef. d'emplacement des boulons en direction du cisaillement}$$

$$\alpha_{b,z} = 1,00 \quad \text{Coef. pour les calculs de la résistance } F_{1,vb,Rd}$$

$$k_{1,z} = 2,50 \quad \text{Coef. d'emplacement des boulons}$$

$$F_{1,vb,Rd,z} = k_{1,z} * \alpha_{b,z} * f_{up} * d * t_p / \gamma_{M2}$$

$$F_{1,vb,Rd,z} = 435,60 \text{ [kN]} \quad \text{Résistance du boulon d'ancrage à la pression}$$

- ❖ Cisaillement du boulon d'ancrage :

$$\alpha_b = 0,25 \quad \text{Coef. pour les calculs de la résistance } F_{2,vb,Rd}$$

$$A_{bv} = 3,80 \text{ [cm}^2\text{]} \quad \text{Aire de section efficace du boulon}$$

$$f_{ub} = 1000,00 \text{ [MPa]} \quad \text{Résistance du matériau du boulon à la traction}$$

$$\gamma_{M2} = 1,25 \quad \text{Coefficient de sécurité partiel}$$

$$F_{2,vb,Rd} = \alpha_b * f_{ub} * A_{bv} / \gamma_{M2}$$

$$F_{2,vb,Rd} = 75,42 \text{ [kN]} \quad \text{Résistance du boulon au cisaillement}$$

$$\alpha_M = 2,00 \quad \text{Coef. dépendant de l'ancrage du boulon}$$

$$M_{Rk,s} = 1,05 \text{ [kN*m]} \quad \text{Résistance caractéristique de l'ancrage à la flexion}$$

$$l_{sm} = 46 \text{ [mm]} \quad \text{Longueur du bras de levier}$$

$$\gamma_{Ms} = 1,20 \quad \text{Coefficient de sécurité partiel}$$

$$F_{v,Rd,sm} = \alpha_M * M_{Rk,s} / (l_{sm} * \gamma_{Ms})$$

$$F_{v,Rd,sm} = 38,06 \text{ [kN]} \quad \text{Résistance du boulon au cisaillement}$$

- ❖ Rupture du béton par effet de levier :

$$N_{Rk,c} = 108,33 \text{ [kN]} \quad \text{Résistance de calc. pour le soulèvement}$$

$$k_3 = 2,00 \quad \text{Coef. dépendant de la longueur de l'ancrage}$$

$$\gamma_{Mc} = 2,16 \quad \text{Coefficient de sécurité partiel}$$

$$F_{v,Rd,cp} = k_3 * N_{Rk,c} / \gamma_{Mc}$$

$$F_{v,Rd,cp} = 100,31 \text{ [kN]} \quad \text{Résistance du béton à l'effet de levier}$$

- ❖ Ecrasement du bord du béton :

- Cisaillement par l'effort V_j, Ed, y :

$$V_{Rk,c,y}^0 = 286,15 \text{ [kN]} \quad \text{Résistance caractéristique du boulon d'ancrage}$$

$$\psi_{A,V,y} = 1,00$$

$V_{Rk,c,y}^0 = 286,15$ [kN] Résistance caractéristique du boulon d'ancrage
 $\psi_{h,V,y} = 1,00$ Coef. dépendant de l'épaisseur de la fondation
 $\psi_{s,V,y} = 1,00$ Coef. d'influence des bords parallèles à l'effort de cisail
 $\psi_{ec,V,y} = 1,00$ Coef. d'irrégularité de la répartition de l'effort tranch
 $\psi_{\alpha,V,y} = 1,00$ Coef. dépendant de l'angle d'action de l'effort tranch
 $\psi_{ucr,V,y} = 1,00$ Coef. dépendant du mode de ferrailage
 $\gamma_{Mc} = 2,16$ Coefficient de sécurité partiel

$$F_{v,Rd,c,y} = V_{Rk,c,y}^0 * \psi_{A,V,y} * \psi_{h,V,y} * \psi_{s,V,y} * \psi_{ec,V,y} * \psi_{\alpha,V,y} * \psi_{ucr,V,y} / \gamma_{Mc}$$

$F_{v,Rd,c,y} = 132,48$ [kN] Résistance du béton pour l'écrasement du bord

- Cisaillement par l'effort V_j, Ed, z :

$V_{Rk,c,z}^0 = 1246,10$ [kN] Résistance caractéristique du boulon d'ancrage

$\psi_{A,V,z} = 0,17$
 $\psi_{h,V,z} = 1,14$ Coef. dépendant de l'épaisseur de la fondation
 $\psi_{s,V,z} = 0,77$ Coef d'influence des bords parallèles à l'effort de cisa
 $\psi_{ec,V,z} = 1,00$ Coef. d'irrégularité de la répartition de l'effort tranch
 $\psi_{\alpha,V,z} = 1,00$ Coef. dépendant de l'angle d'action de l'effort tranch
 $\psi_{ucr,V,z} = 1,00$ Coef. dépendant du mode de ferrailage
 $\gamma_{Mc} = 2,16$ Coefficient de sécurité partiel

$$F_{v,Rd,c,z} = V_{Rk,c,z}^0 * \psi_{A,V,z} * \psi_{h,V,z} * \psi_{s,V,z} * \psi_{ec,V,z} * \psi_{\alpha,V,z} * \psi_{ucr,V,z} / \gamma_{Mc}$$

$F_{v,Rd,c,z} = 85,30$ [kN] Résistance du béton pour l'écrasement du bord

- ❖ Glissement de la semelle :

$C_{f,d} = 0,30$ Coef. de frottement entre la plaque d'assise et le béton

$N_{c,Ed} = 265,74$ [kN] Effort de compression

$$F_{f,Rd} = C_{f,d} * N_{c,Ed}$$

$F_{f,Rd} = 79,72$ [kN] Résistance au glissement

- ❖ Contrôle du cisaillement :

$$V_{j,Rd,y} = n_b * \min(F_{1,vb,Rd,y}, F_{2,vb,Rd}, F_{v,Rd,sm}, F_{v,Rd,cp}, F_{v,Rd,c,y}) + F_{f,Rd}$$

$V_{j,Rd,y} = 155,85$ [kN] Résistance de l'assemblage au cisaillement

$$V_{j,Ed,y} / V_{j,Rd,y} \leq 1,0 \quad 0,04 < 1,00 \quad \text{vérifié.}$$

$$V_{j,Rd,z} = n_b * \min(F_{1,vb,Rd,z}, F_{2,vb,Rd}, F_{v,Rd,sm}, F_{v,Rd,cp}, F_{v,Rd,c,z}) + F_{f,Rd}$$

$V_{j,Rd,z} = 155,85$ [kN] Résistance de l'assemblage au cisaillement

$$V_{j,Ed,z} / V_{j,Rd,z} \leq 1,0 \quad 0,82 < 1,00 \quad \text{vérifié.}$$

$$V_{j,Ed,y} / V_{j,Rd,y} + V_{j,Ed,z} / V_{j,Rd,z} \leq 1,0 \quad 0,86 < 1,00 \quad \text{vérifié.}$$

4. Soudures entre le poteau et la plaque d'assise :

$\sigma_{\perp} = 15,35$ [MPa] Contrainte normale dans la soudure

$\tau_{\perp} = 15,35$ [MPa] Contrainte tangentielle perpendiculaire

$\tau_{yII} = 0,54$ [MPa] Contrainte tangentielle parallèle à $V_{j,Ed,y}$

$\tau_{zII} = -7,69$ [MPa] Contrainte tangentielle parallèle à $V_{j,Ed,z}$

$\beta_w = 0,90$ Coefficient dépendant de la résistance

$$\sigma_{\perp} / (f_u / \gamma_{M2}) \leq 1 \quad 0,04 < 1. \quad \text{vérifié.}$$

$$\sqrt{[\sigma_{\perp}^2 + 3 * (\tau_{yII}^2 + \tau_{\perp}^2)] / [f_u / (\beta_w * \gamma_{M2})]} \leq 1 \quad 0,07 < 1 \quad \text{vérifié.}$$

$$\sqrt{[\sigma_{\perp}^2 + 3 * (\tau_{zII}^2 + \tau_{\perp}^2)] / [f_u / (\beta_w * \gamma_{M2})]} \leq 1 \quad 0,04 < 1 \quad \text{vérifié.}$$

5. Rigidité de l'assemblage :

Moment fléchissant $M_{j,Ed,y}$:

$b_{eff} = 97$ [mm] Largeur efficace de la semelle de tronçon T

$l_{eff} = 320$ [mm] Longueur efficace de la semelle de tronçon en T

$$k_{13,y} = E_c * \sqrt{(b_{eff} * l_{eff})} / (1,275 * E)$$

$k_{13,y} = 21$ [mm] Coef. de rigidité du béton comprimé

$l_{eff} = 325$ [mm] Longueur efficace pour un boulon pour le mode 2

$m = 58$ [mm] Pince boulon-bord de renforcement

$$k_{15,y} = 0,425 * l_{eff} * t_p^3 / (m^3)$$

$k_{15,y} = 6$ [mm] Coef. de rigidité de la plaque d'assise en traction

$L_b = 247$ [mm] Longueur efficace du boulon d'ancrage

$$k_{16,y} = 1,6 * A_b / L_b$$

$k_{16,y} = 2$ [mm] Coef. de rigidité du boulon d'ancrage en traction

$\lambda_{0,y} = 0,43$ Elancement du poteau

$S_{j,ini,y} = 1498295,13$ [kN*m] Rigidité en rotation initiale

$\lambda_{0,y} \leq 0,5$ RIGIDE

Moment fléchissant $M_{j,Ed,z}$:

$$k_{13,z} = E_c * \sqrt{(A_{c,z})} / (1,275 * E)$$

$k_{13,z} = 21$ [mm] Coef. de rigidité du béton comprimé

$l_{eff} = 325$ [mm] Longueur efficace pour un boulon pour le mode 2

$m = 58$ [mm] Pince boulon-bord de renforcement

$k_{15,z} = 0.425 * l_{eff} * t_p^3 / (m^3)$

$k_{15,z} = 6$ [mm] Coef. de rigidité de la plaque d'assise en traction

$L_b = 247$ [mm] Longueur efficace du boulon d'ancrage

$k_{16,z} = 1.6 * A_b / L_b$

$k_{16,z} = 2$ [mm] Coef. de rigidité du boulon d'ancrage en traction

$\lambda_{0,z} = 2,41$ Elancement du poteau

$S_{j,ini,z} = 56655,31$ [kN*m] Rigidité en rotation initiale

$S_{j,rig,z} = 83033,48$ [kN*m] Rigidité de l'assemblage rigide

$S_{j,ini,z} < S_{j,rig,z}$ SEMI-RIGIDE

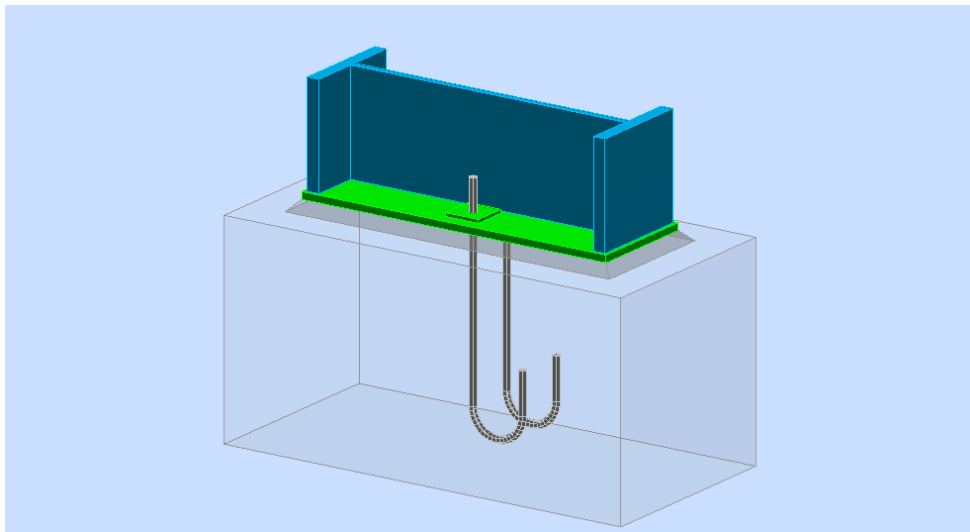


Figure 44. Vue du Pied de poteau articulé

CHAPITRE 8

ETUDE DE L'INFRASTRUCTURE AVEC LE LOGICIEL ROBOT

8.1 Les fondations

La fondation est la base de l'ouvrage qui se trouve en contact direct avec le sol, et qui a pour rôle de transmettre à celui-ci, les efforts provenant des éléments de la superstructure.

Le dimensionnement des fondations est conditionné par le site d'implantation et les caractéristiques du béton utilisé.

8.1.1 Données de base

8.1.1.1 Principes

- Norme pour les calculs géotechniques: DTU 13.12
- Norme pour les calculs béton armé: BAEL 91 mod. 99
- Forme de la semelle : libre

8.1.1.2 Géométrie

$A = 5,00$ (m)	$a = 1,20$ (m)
$B = 2,50$ (m)	$b = 0,60$ (m)
$h_1 = 1,20$ (m)	$e_x = 0,00$ (m)
$h_2 = 1,00$ (m)	$e_y = 0,00$ (m)
$h_4 = 0,05$ (m)	

$$a' = 60,0 \text{ (cm)} \quad b' = 20,0 \text{ (cm)}$$

$$R_a = 90,0 \text{ (cm)} \quad R_b = 30,0 \text{ (cm)}$$

$$R_p = 80,0 \text{ (cm)}$$

$$R_c = 5,0 \text{ (cm)} \quad R_e = 10,0 \text{ (cm)}$$

$$c_1 = 5,0 \text{ (cm)} \quad c_2 = 3,0 \text{ (cm)}$$

Clé :

$$R_d = 0,10 \text{ (m)} \quad L_d = 1,00 \text{ (m)} \quad d = 12,0 \text{ (mm)}$$

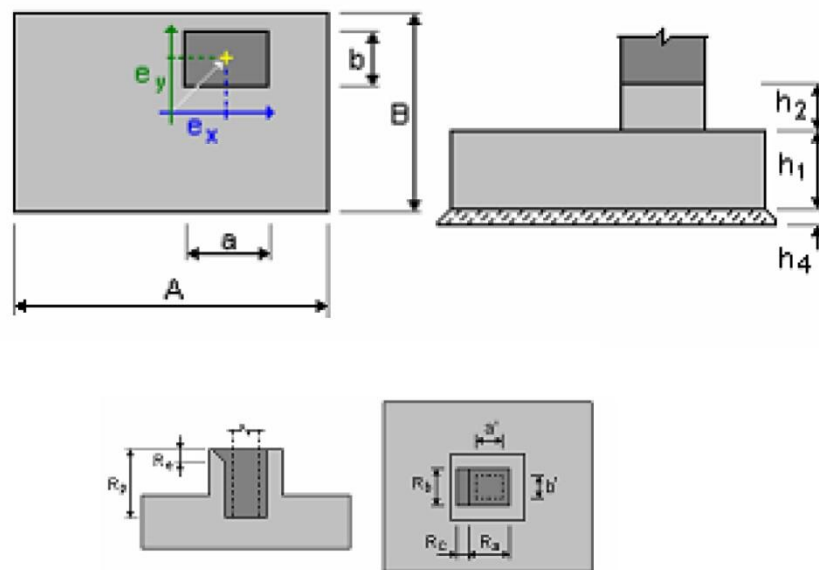


Figure 45. Schéma de la géométrie de la fondation.

8.1.1.3 Matériaux

- Béton : BETON; résistance caractéristique = 25,00 MPa

Poids volumique = 2501,36 (kg/m³)

- Aciers longitudinaux : Type HA 500 résistance caractéristique = 500,00 MPa
- Aciers transversaux : Type HA 500 résistance caractéristique = 500,00 MPa

8.1.1.4 Chargements

- Charges sur la semelle :

Cas	Nature	N (kN)	Fx (kN)	Fy (kN)	Mx (kN*m)	My (kN*m)
Combinaison 1	de calcul	278,80	119,41	-3,64	0,90	0,00
Combinaison 2	de calcul	286,91	122,18	-3,62	0,84	0,00
Combinaison 3	de calcul	264,09	128,96	-3,65	0,96	0,00
Combinaison 4	de calcul	272,99	117,20	-7,99	5,13	0,00
Combinaison 5	de calcul	280,45	118,14	6,25	-8,63	0,00
Combinaison 6	de calcul	288,56	120,91	6,27	-8,68	0,00
Combinaison 7	de calcul	265,74	127,69	6,23	-8,56	0,00
Combinaison 8	de calcul	276,09	114,82	10,55	-12,73	0,00
Combinaison 9	de calcul	567,46	160,49	-2,92	-1,35	-0,00
Combinaison 10	de calcul	575,57	163,26	-2,90	-1,41	-0,00
Combinaison 11	de calcul	697,08	190,59	-2,57	-2,42	-0,00
Combinaison 12	de calcul	561,66	158,28	-7,26	2,88	-0,00
Combinaison 13	de calcul	569,12	159,22	6,97	-10,88	-0,00
Combinaison 14	de calcul	577,22	161,99	6,99	-10,94	-0,00
Combinaison 15	de calcul	698,74	189,32	7,32	-11,94	-0,00
Combinaison 16	de calcul	564,76	155,90	11,27	-14,98	-0,00
Combinaison 17	de calcul	594,67	153,97	1,95	-5,91	-0,00
Combinaison 18	de calcul	206,82	97,42	-5,19	3,04	0,00
Combinaison 19	de calcul	208,88	95,83	7,17	-8,87	0,00
Combinaison 20	de calcul	495,48	138,50	-4,47	0,79	-0,00
Combinaison 21	de calcul	497,55	136,91	7,89	-11,12	-0,00
Combinaison 22	de calcul	459,96	121,11	1,58	-4,78	-0,00
Combinaison 23	de calcul	294,97	92,89	-4,12	2,61	0,00
Combinaison 24	de calcul	303,08	95,67	-4,10	2,56	0,00
Combinaison 25	de calcul	288,35	89,20	-4,38	3,53	0,00
Combinaison 26	de calcul	289,17	90,69	-8,47	6,85	0,00
Combinaison 27	de calcul	296,63	91,62	5,76	-6,91	0,00
Combinaison 28	de calcul	304,74	94,40	5,78	-6,97	0,00
Combinaison 29	de calcul	290,00	87,93	5,50	-5,99	0,00
Combinaison 30	de calcul	292,27	88,31	10,06	-11,01	0,00
Combinaison 31	de calcul	302,16	97,26	-3,04	-1,37	0,00
Combinaison 32	de calcul	310,27	100,03	-3,02	-1,43	0,00
Combinaison 33	de calcul	299,13	95,74	-2,75	-2,44	0,00
Combinaison 34	de calcul	296,35	95,05	-7,38	2,86	0,00
Combinaison 35	de calcul	303,81	95,99	6,85	-10,89	0,00
Combinaison 36	de calcul	311,92	98,76	6,87	-10,95	0,00
Combinaison 37	de calcul	300,78	94,47	7,13	-11,97	0,00
Combinaison 38	de calcul	299,45	92,67	11,15	-14,99	0,00
Combinaison 39	de calcul	196,71	59,12	1,77	-5,94	0,00
Combinaison 40	de calcul	222,99	70,90	-5,68	4,75	0,00
Combinaison 41	de calcul	225,06	69,32	6,68	-7,15	0,00

Combinaison 42	de calcul	230,18	75,27	-4,59	0,77	0,00
Combinaison 43	de calcul	232,24	73,68	7,77	-11,14	0,00
Combinaison 44	de calcul	194,66	57,88	1,46	-4,80	0,00
Combinaison 45	de calcul	206,33	49,64	0,65	-3,21	0,00
Combinaison 46	de calcul	204,99	58,42	-1,91	-10,54	-0,00
Combinaison 47	de calcul	157,12	34,92	0,48	-2,48	0,00
Combinaison 48	de calcul	147,77	53,69	0,86	-1,56	0,00
Combinaison 49	de calcul	156,00	42,24	-1,66	-8,59	-0,00
Combinaison 50	de calcul	148,89	46,38	3,00	4,55	0,00

8.1.1.5 Liste de combinaisons

- 1/ ELU : Combinaison 1 : N=278,80 Mx=0,90 Fx=119,41 Fy=-3,64
- 2/ ELU : Combinaison 2 : N=286,91 Mx=0,84 Fx=122,18 Fy=-3,62
- 3/ ELU : Combinaison 3 : N=264,09 Mx=0,96 Fx=128,96 Fy=-3,65
- 4/ ELU : Combinaison 4 : N=272,99 Mx=5,13 Fx=117,20 Fy=-7,99
- 5/ ELU : Combinaison 5 : N=280,45 Mx=-8,63 Fx=118,14 Fy=6,25
- 6/ ELU : Combinaison 6 : N=288,56 Mx=-8,68 Fx=120,91 Fy=6,27
- 7/ ELU : Combinaison 7 : N=265,74 Mx=-8,56 Fx=127,69 Fy=6,23
- 8/ ELU : Combinaison 8 : N=276,09 Mx=-12,73 Fx=114,82 Fy=10,55
- 9/ ELU : Combinaison 9 : N=567,46 Mx=-1,35 Fx=160,49 Fy=-2,92
- 10/ ELU : Combinaison 10 : N=575,57 Mx=-1,41 Fx=163,26 Fy=-2,90
- 11/ ELU : Combinaison 11 : N=697,08 Mx=-2,42 Fx=190,59 Fy=-2,57
- 12/ ELU : Combinaison 12 : N=561,66 Mx=2,88 Fx=158,28 Fy=-7,26
- 13/ ELU : Combinaison 13 : N=569,12 Mx=-10,88 Fx=159,22 Fy=6,97
- 14/ ELU : Combinaison 14 : N=577,22 Mx=-10,94 Fx=161,99 Fy=6,99
- 15/ ELU : Combinaison 15 : N=698,74 Mx=-11,94 Fx=189,32 Fy=7,32
- 16/ ELU : Combinaison 16 : N=564,76 Mx=-14,98 Fx=155,90 Fy=11,27
- 17/ ELU : Combinaison 17 : N=594,67 Mx=-5,91 Fx=153,97 Fy=1,95
- 18/ ELU : Combinaison 23 : N=294,97 Mx=2,61 Fx=92,89 Fy=-4,12
- 19/ ELU : Combinaison 24 : N=303,08 Mx=2,56 Fx=95,67 Fy=-4,10
- 20/ ELU : Combinaison 25 : N=288,35 Mx=3,53 Fx=89,20 Fy=-4,38

21/ ELU : Combinaison 26 : N=289,17 Mx=6,85 Fx=90,69 Fy=-8,47
 22/ ELU : Combinaison 27 : N=296,63 Mx=-6,91 Fx=91,62 Fy=5,76
 23/ ELU : Combinaison 28 : N=304,74 Mx=-6,97 Fx=94,40 Fy=5,78
 24/ ELU : Combinaison 29 : N=290,00 Mx=-5,99 Fx=87,93 Fy=5,50
 25/ ELU : Combinaison 30 : N=292,27 Mx=-11,01 Fx=88,31 Fy=10,06
 26/ ELU : Combinaison 31 : N=302,16 Mx=-1,37 Fx=97,26 Fy=-3,04
 27/ ELU : Combinaison 32 : N=310,27 Mx=-1,43 Fx=100,03 Fy=-3,02
 28/ ELU : Combinaison 33 : N=299,13 Mx=-2,44 Fx=95,74 Fy=-2,75
 29/ ELU : Combinaison 34 : N=296,35 Mx=2,86 Fx=95,05 Fy=-7,38
 30/ ELU : Combinaison 35 : N=303,81 Mx=-10,89 Fx=95,99 Fy=6,85
 31/ ELU : Combinaison 36 : N=311,92 Mx=-10,95 Fx=98,76 Fy=6,87
 32/ ELU : Combinaison 37 : N=300,78 Mx=-11,97 Fx=94,47 Fy=7,13
 33/ ELU : Combinaison 38 : N=299,45 Mx=-14,99 Fx=92,67 Fy=11,15
 34/ ELU : Combinaison 39 : N=196,71 Mx=-5,94 Fx=59,12 Fy=1,77
 35/ ELS : Combinaison 18 : N=206,82 Mx=3,04 Fx=97,42 Fy=-5,19
 36/ ELS : Combinaison 19 : N=208,88 Mx=-8,87 Fx=95,83 Fy=7,17
 37/ ELS : Combinaison 20 : N=495,48 Mx=0,79 Fx=138,50 Fy=-4,47
 38/ ELS : Combinaison 21 : N=497,55 Mx=-11,12 Fx=136,91 Fy=7,89
 39/ ELS : Combinaison 22 : N=459,96 Mx=-4,78 Fx=121,11 Fy=1,58
 40/ ELS : Combinaison 40 : N=222,99 Mx=4,75 Fx=70,90 Fy=-5,68
 41/ ELS : Combinaison 41 : N=225,06 Mx=-7,15 Fx=69,32 Fy=6,68
 42/ ELS : Combinaison 42 : N=230,18 Mx=0,77 Fx=75,27 Fy=-4,59
 43/ ELS : Combinaison 43 : N=232,24 Mx=-11,14 Fx=73,68 Fy=7,77
 44/ ELS : Combinaison 44 : N=194,66 Mx=-4,80 Fx=57,88 Fy=1,46
 45/ ACC : Combinaison 45 : N=206,33 Mx=-3,21 Fx=49,64 Fy=0,65
 46/ ACC : Combinaison 46 : N=204,99 Mx=-10,54 Fx=58,42 Fy=-1,91
 47/ ACC : Combinaison 47 : N=157,12 Mx=-2,48 Fx=34,92 Fy=0,48

48/ ACC : Combinaison 48 : N=147,77 Mx=-1,56 Fx=53,69 Fy=0,86
49/ ACC : Combinaison 49 : N=156,00 Mx=-8,59 Fx=42,24 Fy=-1,66
50/ ACC : Combinaison 50 : N=148,89 Mx=4,55 Fx=46,38 Fy=3,00
51/* ELU : Combinaison 1 : N=278,80 Mx=0,90 Fx=119,41 Fy=-3,64
52/* ELU : Combinaison 2 : N=286,91 Mx=0,84 Fx=122,18 Fy=-3,62
53/* ELU : Combinaison 3 : N=264,09 Mx=0,96 Fx=128,96 Fy=-3,65
54/* ELU : Combinaison 4 : N=272,99 Mx=5,13 Fx=117,20 Fy=-7,99
55/* ELU : Combinaison 5 : N=280,45 Mx=-8,63 Fx=118,14 Fy=6,25
56/* ELU : Combinaison 6 : N=288,56 Mx=-8,68 Fx=120,91 Fy=6,27
57/* ELU : Combinaison 7 : N=265,74 Mx=-8,56 Fx=127,69 Fy=6,23
58/* ELU : Combinaison 8 : N=276,09 Mx=-12,73 Fx=114,82 Fy=10,55
59/* ELU : Combinaison 9 : N=567,46 Mx=-1,35 Fx=160,49 Fy=-2,92
60/* ELU : Combinaison 10 : N=575,57 Mx=-1,41 Fx=163,26 Fy=-2,90
61/* ELU : Combinaison 11 : N=697,08 Mx=-2,42 Fx=190,59 Fy=-2,57
62/* ELU : Combinaison 12 : N=561,66 Mx=2,88 Fx=158,28 Fy=-7,26
63/* ELU : Combinaison 13 : N=569,12 Mx=-10,88 Fx=159,22 Fy=6,97
64/* ELU : Combinaison 14 : N=577,22 Mx=-10,94 Fx=161,99 Fy=6,99
65/* ELU : Combinaison 15 : N=698,74 Mx=-11,94 Fx=189,32 Fy=7,32
66/* ELU : Combinaison 16 : N=564,76 Mx=-14,98 Fx=155,90 Fy=11,27
67/* ELU : Combinaison 17 : N=594,67 Mx=-5,91 Fx=153,97 Fy=1,95
68/* ELU : Combinaison 23 : N=294,97 Mx=2,61 Fx=92,89 Fy=-4,12
69/* ELU : Combinaison 24 : N=303,08 Mx=2,56 Fx=95,67 Fy=-4,10
70/* ELU : Combinaison 25 : N=288,35 Mx=3,53 Fx=89,20 Fy=-4,38
71/* ELU : Combinaison 26 : N=289,17 Mx=6,85 Fx=90,69 Fy=-8,47
72/* ELU : Combinaison 27 : N=296,63 Mx=-6,91 Fx=91,62 Fy=5,76
73/* ELU : Combinaison 28 : N=304,74 Mx=-6,97 Fx=94,40 Fy=5,78
74/* ELU : Combinaison 29 : N=290,00 Mx=-5,99 Fx=87,93 Fy=5,50

75/* ELU : Combinaison 30 : N=292,27 Mx=-11,01 Fx=88,31 Fy=10,06
76/* ELU : Combinaison 31 : N=302,16 Mx=-1,37 Fx=97,26 Fy=-3,04
77/* ELU : Combinaison 32 : N=310,27 Mx=-1,43 Fx=100,03 Fy=-3,02
78/* ELU : Combinaison 33 : N=299,13 Mx=-2,44 Fx=95,74 Fy=-2,75
79/* ELU : Combinaison 34 : N=296,35 Mx=2,86 Fx=95,05 Fy=-7,38
80/* ELU : Combinaison 35 : N=303,81 Mx=-10,89 Fx=95,99 Fy=6,85
81/* ELU : Combinaison 36 : N=311,92 Mx=-10,95 Fx=98,76 Fy=6,87
82/* ELU : Combinaison 37 : N=300,78 Mx=-11,97 Fx=94,47 Fy=7,13
83/* ELU : Combinaison 38 : N=299,45 Mx=-14,99 Fx=92,67 Fy=11,15
84/* ELU : Combinaison 39 : N=196,71 Mx=-5,94 Fx=59,12 Fy=1,77
85/* ELS : Combinaison 18 : N=206,82 Mx=3,04 Fx=97,42 Fy=-5,19
86/* ELS : Combinaison 19 : N=208,88 Mx=-8,87 Fx=95,83 Fy=7,17
87/* ELS : Combinaison 20 : N=495,48 Mx=0,79 Fx=138,50 Fy=-4,47
88/* ELS : Combinaison 21 : N=497,55 Mx=-11,12 Fx=136,91 Fy=7,89
89/* ELS : Combinaison 22 : N=459,96 Mx=-4,78 Fx=121,11 Fy=1,58
90/* ELS : Combinaison 40 : N=222,99 Mx=4,75 Fx=70,90 Fy=-5,68
91/* ELS : Combinaison 41 : N=225,06 Mx=-7,15 Fx=69,32 Fy=6,68
92/* ELS : Combinaison 42 : N=230,18 Mx=0,77 Fx=75,27 Fy=-4,59
93/* ELS : Combinaison 43 : N=232,24 Mx=-11,14 Fx=73,68 Fy=7,77
94/* ELS : Combinaison 44 : N=194,66 Mx=-4,80 Fx=57,88 Fy=1,46
95/* ACC : Combinaison 45 : N=206,33 Mx=-3,21 Fx=49,64 Fy=0,65
96/* ACC : Combinaison 46 : N=204,99 Mx=-10,54 Fx=58,42 Fy=-1,91
97/* ACC : Combinaison 47 : N=157,12 Mx=-2,48 Fx=34,92 Fy=0,48
98/* ACC : Combinaison 48 : N=147,77 Mx=-1,56 Fx=53,69 Fy=0,86
99/* ACC : Combinaison 49 : N=156,00 Mx=-8,59 Fx=42,24 Fy=-1,66
100/* ACC : Combinaison 50 : N=148,89 Mx=4,55 Fx=46,38 Fy=3,00

8.1.2 Dimensionnement géotechnique

8.1.2.1 Principes

Dimensionnement de la fondation sur :

- Capacité de charge
- Glissement
- Renversement
- Soulèvement

8.1.2.2 Sol

- Contraintes dans le sol : ELU = 0.15 (MPa) ELS = 0.10 (MPa)

Niveau du sol : $N1 = 0,00$ (m)

Niveau maximum de la semelle : $Na = 0,00$ (m)

Niveau du fond de fouille : $Nf = -2,20$ (m)

- Argiles et limons fermes

Niveau du sol : 0.00 (m)

Poids volumique: 2039.43 (kg/m³)

Poids volumique unitaire: 2692.05 (kg/m³)

Angle de frottement interne : 30.0 (Deg)

Cohésion : 0.02 (MPa)

8.1.2.3 États limites

- ❖ Calcul des contraintes :

Type de sol sous la fondation : Uniforme

Combinaison dimensionnante ELU : COMB15 $N=698,74$ $M_x=-11,94$

$F_x=189,32$ $F_y=7,32$

Coefficients de chargement : 1.35 * poids de la fondation

1.35 * poids du sol

Résultats de calculs : au niveau du sol

Poids de la fondation et du sol au-dessus de la fondation : $G_r = 838,64$ (kN)

Charge dimensionnante :

$$N_r = 1537,37 \text{ (kN)} \quad M_x = -28,04 \text{ (kN*m)} \quad M_y = 416,50 \text{ (kN*m)}$$

Dimensions équivalentes de la fondation :

$$B' = 1$$

$$L' = 1$$

Épaisseur du niveau : $D_{min} = 2,20 \text{ (m)}$

❖ Méthode de calculs de la contrainte de rupture : pressiométrique de contrainte (DTU 13.12, 3.22) :

$$q_u = 0.30 \text{ (MPa)}$$

$$\text{Butée de calcul du sol : } q_{lim} = q_u / \gamma_f = 0.15 \text{ (MPa)} \quad \gamma_f = 2,00$$

$$\text{Contrainte dans le sol : } q_{ref} = 0.15 \text{ (MPa)}$$

$$\text{Coefficient de sécurité : } q_{lim} / q_{ref} = 1.03 > 1$$

❖ Soulèvement :

▪ Soulèvement ELU :

$$\begin{aligned} \text{Combinaison dimensionnante : ELU : COMB39} \quad N=196,71 \quad M_x=-5,94 \\ F_x=59,12 \quad F_y=1,77 \end{aligned}$$

Coefficients de chargement : $1.00 * \text{ poids de la fondation}$

$1.00 * \text{ poids du sol}$

Poids de la fondation et du sol au-dessus de la fondation : $G_r = 621,21 \text{ (kN)}$

Charge dimensionnante:

$$N_r = 817,92 \text{ (kN)} \quad M_x = -9,83 \text{ (kN*m)} \quad M_y = 130,07 \text{ (kN*m)}$$

Surface de contact $s = 100,00 \text{ (\%)}$

$$s_{lim} = 10,00 \text{ (\%)}$$

▪ Soulèvement ELS :

$$\begin{aligned} \text{Combinaison défavorable : ELS : COMB44} \quad N=194,66 \quad M_x=-4,80 \\ F_x=57,88 \quad F_y=1,46 \end{aligned}$$

Coefficients de chargement : 1.00 * poids de la fondation

1.00 * poids du sol

Poids de la fondation et du sol au-dessus de la fondation : $G_r = 621,21$ (kN)

Charge dimensionnante :

$N_r = 815,87$ (kN) $M_x = -8,01$ (kN*m) $M_y = 127,33$ (kN*m)

Surface de contact $s = 100,00$ (%)

$s_{lim} = 100,00$ (%)

❖ Glissement :

Combinaison dimensionnante : ELU : COMB11 $N=697,08$ $M_x=-2,42$

$F_x=190,59$ $F_y=-2,57$

Coefficients de chargement : 1.00 * poids de la fondation

1.00 * poids du sol

Poids de la fondation et du sol au-dessus de la fondation : $G_r = 621,21$ (kN)

Charge dimensionnante :

$N_r = 1318,29$ (kN) $M_x = 3,23$ (kN*m) $M_y = 419,30$ (kN*m)

Dimensions équivalentes de la fondation : $A = 5,00$ (m) $B = 2,50$ (m)

Surface du glissement : $12,50$ (m²)

Cohésion : $C = 0,02$ (MPa)

Coefficient de frottement fondation - sol: $\text{tg}(\varphi) = 0,58$

Valeur de la force de glissement : $F = 190,61$ (kN)

Valeur de la force empêchant le glissement de la fondation :

- su niveau du sol : $F_{(stab)} = 909,15$ (kN)

Stabilité au glissement : $4,77 > 1$

❖ Renversement :

▪ Autour de l'axe OX :

Combinaison dimensionnante : ELU : COMB38 $N=299,45$ $M_x=-14,99$

$F_x=92,67$ $F_y=11,15$

Coefficients de chargement : 1.00 * poids de la fondation

1.00 * poids du sol

Poids de la fondation et du sol au-dessus de la fondation : $G_r = 621,21$ (kN)

Charge dimensionnante:

$$N_r = 920,66 \text{ (kN)} \quad M_x = -39,52 \text{ (kN*m)} \quad M_y = 203,87 \text{ (kN*m)}$$

Moment stabilisateur : $M_{stab} = 1150,83$ (kN*m)

Moment de renversement : $M_{renv} = 39,52$ (kN*m)

Stabilité au renversement : $29.12 > 1$

- Autour de l'axe OY :

Combinaison défavorable : ELU : COMB3 $N=264,09$ $M_x=0,96$

$F_x=128,96$ $F_y=-3,65$

Coefficients de chargement : 1.00 * poids de la fondation

1.00 * poids du sol

Poids de la fondation et du sol au-dessus de la fondation : $G_r = 621,21$ (kN)

Charge dimensionnante:

$$N_r = 885,30 \text{ (kN)} \quad M_x = 8,99 \text{ (kN*m)} \quad M_y = 283,72 \text{ (kN*m)}$$

Moment stabilisateur : $M_{stab} = 2213,25$ (kN*m)

Moment de renversement : $M_{renv} = 283,72$ (kN*m)

Stabilité au renversement : $7.801 > 1$

8.1.3 Dimensionnement Béton Armé

8.1.3.1 Principes

Milieu : agressif

Condition de non-fragilité

8.1.3.2 Analyse du poinçonnement et du cisaillement

- ❖ Cisaillement :

Combinaison dimensionnante ELU : COMB11 $N=697,08$ $M_x=-2,42$

$F_x=190,59$ $F_y=-2,57$

Coefficients de chargement : $1.00 * \text{ poids de la fondation}$

$1.00 * \text{ poids du sol}$

Charge dimensionnante :

$$N_r = 1318,29 \text{ (kN)} \quad M_x = 3,23 \text{ (kN*m)} \quad M_y = 419,30 \text{ (kN*m)}$$

Longueur du périmètre critique : $2,50 \text{ (m)}$

Effort tranchant : $168,62 \text{ (kN)}$

Hauteur efficace de la section : $h_{\text{eff}} = 1,14 \text{ (m)}$

Surface de cisaillement : $A = 2,85 \text{ (m}^2\text{)}$

Contrainte de cisaillement : $0,06 \text{ (MPa)}$

Contrainte de cisaillement admissible : $1,17 \text{ (MPa)}$

Coefficient de sécurité : $19,72 > 1$

8.1.3.3 Ferrailage théorique

❖ Semelle isolée :

▪ Aciers inférieurs :

$$\text{ELU : COMB11} \quad N=697,08 \quad M_x=-2,42 \quad F_x=190,59 \quad F_y=-2,57$$

$$M_y = 554,21 \text{ (kN*m)} \quad A_{sx} = 12,70 \text{ (cm}^2\text{/m)}$$

$$\text{ELU : COMB15} \quad N=698,74 \quad M_x=-11,94 \quad F_x=189,32 \quad F_y=7,32$$

$$M_x = 210,77 \text{ (kN*m)} \quad A_{sy} = 12,17 \text{ (cm}^2\text{/m)}$$

$$A_{s \text{ min}} = 12,70 \text{ (cm}^2\text{/m)}$$

▪ Aciers supérieurs :

$$A'_{sx} = 0,00 \text{ (cm}^2\text{/m)}$$

$$A'_{sy} = 0,00 \text{ (cm}^2\text{/m)}$$

$$A_{s \text{ min}} = 0,00 \text{ (cm}^2\text{/m)}$$

❖ Fût :

$$\text{Aciers longitudinaux : } A = 15,00 \text{ (cm}^2\text{)} \quad A_{\text{min.}} = 14,40 \text{ (cm}^2\text{)}$$

$$A = 2 * (A_{sx} + A_{sy})$$

$$A_{sx} = 2,70 \text{ (cm}^2\text{)} \quad A_{sy} = 4,80 \text{ (cm}^2\text{)}$$

8.1.3.4 Ferrailage réel

❖ Semelle isolée :

- Aciers inférieurs :

En X :

$$21 \text{ HA } 14 \quad l = 4,90 \text{ (m)} \quad e = 1^* - 2,45$$

En Y :

$$41 \text{ HA } 14 \quad l = 2,40 \text{ (m)} \quad e = 0,12$$

❖ Fût :

- Aciers longitudinaux

En X :

$$2 \text{ HA } 14 \quad l = 8,83 \text{ (m)} \quad e = 1^* - 0,54 + 1^* 1,08$$

En Y :

$$2 \text{ HA } 14 \quad l = 9,54 \text{ (m)} \quad e = 1^* - 0,56$$

- Aciers transversaux

$$6 \text{ HA } 6 \quad l = 3,48 \text{ (m)} \quad e = 1^* 0,57$$

8.1.4 Quantitatif

❖ Volume de Béton = 15,50 (m³)

❖ Surface de Coffrage = 23,80 (m²)

❖ Acier HA 500

- Poids total = 293,27 (kg)
- Densité = 18,92 (kg/m³)
- Diamètre moyen = 13,3 (mm)
- Liste par diamètres :

Diamètre	Longueur (m)	Poids (kg)
6	20,87	4,63
14	238,04	287,75
12	1,00	0,89

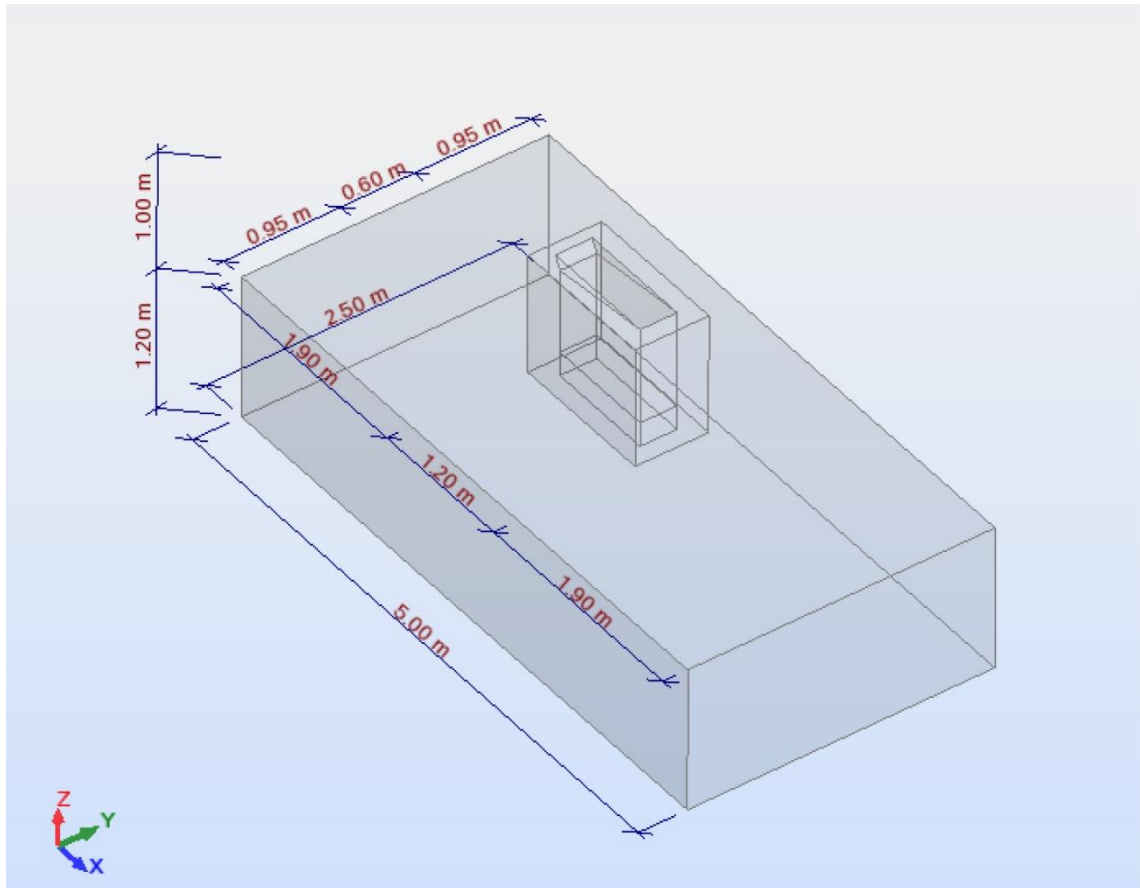


Figure 46. Vue 3D de la fondation avec le fut de réservation

8.2 Les longrines

Les longrines sont des éléments appartenant à l'infrastructure et qui servent à rigidifier l'ensemble des semelles on s'opposant à leurs déplacements relatif dans le plan horizontal, elles sont soumises à des forces axiales de tractions comme défini dans le RPA 99.

8.2.1 Pré-dimensionnement : (RPA § 10.1.1)

Dans notre cas et pour un sol situé dans un site de catégorie 3 (S3), les dimensions minimales de la section transversale des longrines exigées par le RPA 99 sont de : 25*30 (cm)

Les dimensions suivantes ont été adoptées : 35*40 (cm)

8.2.2 Ferrailage

Les longrines doivent être calculées pour résister à la traction sous l'action d'une force égale à :

$$F = \frac{N}{\alpha} \geq 20 \text{ KN} \quad (\text{RPA § 10.1.1b}).$$

Avec :

N : Effort normal ultime du poteau le plus sollicité.

α : Coefficient fonction de la zone sismique et de la catégorie du site considérée.

$$\rightarrow \begin{cases} \text{Zone IIa} \\ \text{Site S3} \end{cases} \Rightarrow \alpha = 12 \quad (\text{RPA § 10.1.1b}).$$

$$\Rightarrow F = \frac{N}{\alpha} = \frac{581.01}{12} = 48.42 \geq 20 \text{ KN}$$

D'où on aura :

$$A_s = \frac{F}{\sigma_{st}}$$

Avec : $\sigma_{st} = f_e/\gamma_s = 3480 \text{ Kg/cm}^3$.

$$\Rightarrow A_s = \frac{F}{\sigma_{st}} = \frac{48.42}{34.80} = 1.39 \text{ cm}^2$$

- Ferrailage minimal :

Les recommandations du RPA99 nous imposent une section minimale de 0,6% de la section du béton.

Tel que : $A_{min} = 0.6\% * b * h = 0.006 * 35 * 40 = 8.4 \text{ cm}^2$

Donc on ferraille avec $A_{min} = 8.4 \text{ cm}^2$

Soit : $6\phi 16 \Rightarrow A_s = 12.06 \text{ cm}^2$.

8.2.3 Armatures transversales

Soit des cadres de diamètre $\phi 8$ dont l'espacement maximal est donné par le RPA 99 :

$$S_T < \min(20 \text{ cm}; 15\phi) = \min(20 \text{ cm}; 30.15 \text{ cm})$$

$$\Rightarrow S_T < 20 \text{ cm}$$

Donc on opte pour des cadres espacés de 15 cm en travée, et de 10 cm en zone nodale.

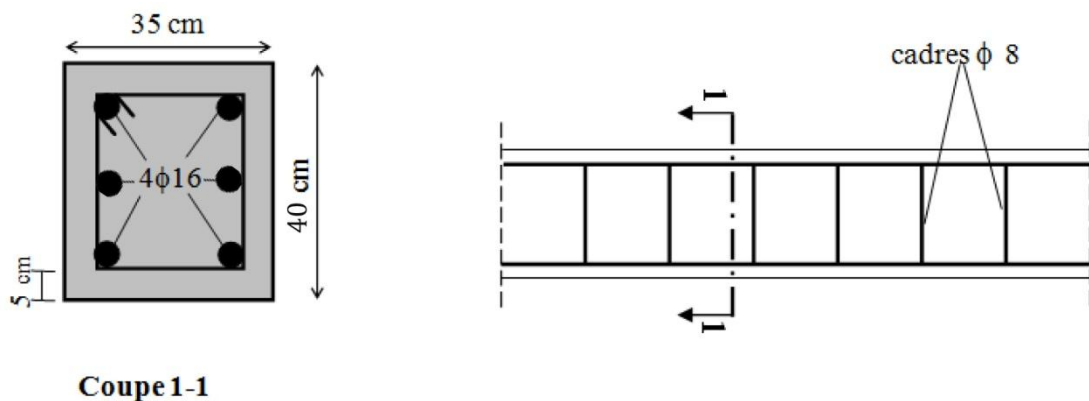


Figure 47. Schémas de ferrailage des longrines.

NB :

Pour les longrines transversales (45 m) on dispose des socles à chaque 5 m de longueur sur le long de tout la longrine.

CONCLUSION GENERALE

L'étude de ce projet ma permis, d'une part d'acquérir de nouvelles connaissances concernant le domaine de la construction métallique et d'approfondir nos connaissances déjà acquises durant notre cursus sur la réglementation en vigueur.

Par ailleurs, cette étude ma permis d'arriver à certaines conclusions qui sont :

- Le dimensionnement des différents éléments de la structure s'est fait avec le calcul statique, sans tenir compte des surcharges sismiques et cela est du à la légèreté de notre structure.
- Les actions du vent sont les plus défavorables dans les structures métalliques.
- Durant l'étude de la structure, on remarque que la plupart des poutres sont dimensionnées vis-à-vis du diversement et cela est dû au risque majeur que peut produire ce phénomène.
- L'acier permet de construire des ouvrages très importants du point de vue capacité portante, légèreté et rapidité d'exécution. Ce qui permet de construire sur des sols ayant une faible capacité portante.
- La forme de la structure joue un rôle très important sur la disposition des poteaux (orientation des axes fort et faible)
- La stabilité d'ensemble est obtenue à partir de la rigidité des connexions et de l'utilisation de systèmes de contreventement.
- Une bonne maîtrise de codes de calcul comme EC3 et EC4, ainsi que les logiciels de modélisation comme Robot, sont très importants pour une meilleure précision et optimisation d'éléments constructifs.

- La modélisation doit, autant que possible, englober tous les éléments de la structure secondaire soit ils ou structuraux, ce qui permet d'avoir un comportement de la structure proche du réel.

En notation finale, remarquez que ce projet qui est ma toute première expérience pratique m'est très bénéfique et j'espère que ce modeste travail sera un guide pour les futures promotions.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] B.T .S Construction métallique Aide Projet ;
- [2] Règlement Neige et Vent Algérien (RNVA 99) ;
- [3] DTR BC 2.2 (Charges et Surcharges d'exploitation) ;
- [4] Calcul des éléments résistants d'une construction métallique,
Lahlou DAHMANI, office des publications universitaires, 2009.
- [5] Calcul des éléments selon l'Eurocode 3 ;
- [6] Calcul des structures Métalliques selon L'Eurocode 3, Jean Morel,
Editions Eyrolles Paris, troisième tirage 2008
- [7] Règles Parasismiques Algériennes (RPA 99 modifié 2003) ;
- [8] Règles de conception et de calcul des structures en acier (CCM97) ;
- [9] Euro code 3-4 et document d'application nationale, préface de jacques
BROZZOTI. Eyrolles 1996
- [10] Construction métallique : Exemple numérique adopté aux eurocodes
JAQUES Brozzetti, MANFRED A.Hirt, ROLT Bez, 1° Ed. Lausanne : Presse
polytechnique et universitaire romandes, 1995.
- [11] Technique d'ingénieur (revue scientifique et technique) ;
- [12] Béton armé aux états limites (BAEL 91) ;
- [13] Règles de calcul des fondations superficielles (DTR-BC 2.3.3.1.) ;

ANNEXE A

[1] Rapport du sol (Document joint) ;

[2] Lieu d'implantation du projet (Document joint) ;



ANNEXE B

- [1] Vue de face (Document joint) ;
- [2] Vue en plan (Document joint) ;
- [3] Plan des fondations (Document joint) ;