



Université de Tunis EL Manar

Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis



Conception et calcul d'un bâtiment de filtration d'acide phosphorique (ferme trapézoïdale), selon les EUROCODES.

Rapport de stage ingénieur

**Entreprise d'accueil : TECI – Tunisie Engineering et Construction
Industrielle**



Réalisé par : BARHOUMI Amani

Encadré par : M. GANNOUNI Hassen

Classe : 3AGC1

Année Universitaire : 2025/2026

Remerciements

Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde gratitude à Monsieur **GANNOUNI Hassen**, mon encadrant chez **TECI**, pour son accompagnement exceptionnel tout au long de ce stage. Sa disponibilité, sa bienveillance et son expertise ont grandement contribué à la réussite de ce projet.

Grâce à ses conseils avisés, à ses retours constructifs lors des réunions régulières et à sa pédagogie généreuse, j'ai pu progresser tant sur le plan technique que professionnel. Son engagement constant et sa rigueur ont été pour moi une véritable source d'inspiration.

Je suis honorée d'avoir eu l'opportunité de travailler sous sa direction et je mesure pleinement la valeur des compétences que j'ai pu acquérir à ses côtés. Je lui adresse mes remerciements les plus sincères pour sa confiance et son soutien indéfectible tout au long de cette expérience formatrice.

Je remercie également Monsieur **AMAMI Adel**, chef du département ingénierie, pour ses précieux conseils et son aide tout au long de ce stage.

Résumé

Dans le cadre de mon stage ingénieur chez **TECI – Tunisie Engineering et Construction Industrielle**, j'ai participé à la conception et au calcul d'un bâtiment industriel de filtration d'acide phosphorique, conforme aux **Eurocodes**. La structure mixte acier-béton comprend une charpente métallique à fermes trapézoïdales reposant sur un soubassement en béton armé.

La mission a consisté en la modélisation globale sous **RSA**, le pré-dimensionnement des éléments porteurs (poteaux, poutres, fermes, contre-ventements, fondations), et la vérification des assemblages boulonnés. Les charges permanentes, d'exploitation et climatiques (vent) ont été intégrées, avec une attention particulière portée à la stabilité (flambement, déversement) et à l'interaction acier-béton. Des feuilles Excel ont également été développées pour automatiser certaines vérifications normatives.

Ce projet m'a permis de maîtriser les étapes de conception, de la modélisation au contrôle de la stabilité, et d'acquérir une expérience technique et professionnelle en ingénierie des structures industrielles.

Mots-clés : Eurocodes ; RSA ; structure mixte ; charpente métallique ; béton armé ; pré-dimensionnement ; assemblages boulonnés ; flambement ; stabilité ; charges climatiques ; automatisation Excel ; ingénierie industrielle.

Abstract

As part of my engineering internship at **TECI – Tunisie Engineering et Construction Industrielle**, I took part in the design and structural analysis of an industrial building for phosphoric acid filtration, in compliance with the **Eurocodes**. The mixed steel-concrete structure consists of a trapezoidal truss steel frame resting on a reinforced concrete substructure.

The mission involved the global modeling using **RSA**, the pre-dimensioning of load-bearing elements (columns, beams, trusses, bracings, foundations), and the verification of bolted connections. Permanent, live, and climatic (wind) loads were considered, with particular attention paid to stability issues (buckling, lateral-torsional buckling) and the steel-concrete interaction. In addition, Excel spreadsheets were developed to automate certain code-based verifications.

This project allowed me to gain expertise in the design process, from modeling to stability checks, and to acquire valuable technical and professional experience in the field of industrial structural engineering.

Keywords : Eurocodes ; RSA ; mixed structure ; steel frame ; reinforced concrete ; pre-dimensioning ; bolted connections ; buckling ; stability ; climatic loads ; Excel automation ; industrial engineering.

Table des matières

1 Présentation de l'entreprise	3
1.1 Introduction	3
1.2 Présentation de l'entreprise d'accueil	3
1.2.1 Secteur d'activité	3
1.2.2 Projets	4
1.2.3 Informations supplémentaires	5
1.3 Conclusion	5
2 Présentation générale du projet	6
2.1 Introduction	6
2.2 Contexte et objectifs du projet	7
2.3 Description du bâtiment	8
2.3.1 Dimensions générales et Hypothèses de calculs : . .	8
2.4 Données de base et documents de référence	9
2.4.1 Données de base	9
2.4.2 Documents de référence :Documents techniques . .	10
2.5 Contraintes et exigences du projet :	14
2.5.1 Chargements	14
2.5.2 Combinaisons ELU ELS	16
2.6 Choix de la solution structurelle	17
2.6.1 Comparaison entre portique avec jarrets et ferme trapézoïdale	17
2.7 Conclusion	20
3 Conception et modélisation du bâtiment sur RSA	21
3.1 Introduction	21
3.2 Systèmes structuraux :	21
3.2.1 Enveloppes	21
3.2.2 Structures principales	21
3.2.3 structures secondaires	24
3.3 Dispositions constructifs :	26

3.3.1	Pannes	26
3.3.2	Lisses	27
3.4	Soubassement en béton armé :	28
3.4.1	Ferraillage :	30
3.5	Conclusion	31
4	Etudes des assemblages	32
4.1	Introduction	32
4.2	Workflow entre Robot Structural Analysis (RSA) et IDEA StatiCa :importation du modèle d'assemblage	32
4.2.1	Étapes du workflow	32
4.3	Calcul et vérification sur IDEA StatiCa	34
4.4	Les modes d'assemblage	35
4.4.1	Les encastrements	35
4.4.2	Rigidité des assemblages	39
4.5	Conclusion	39
5	Vérification , Calcul et Optimisation	41
5.1	Introduction	41
5.2	Vérifications	41
5.2.1	Contraintes	41
5.2.2	Déplacements	41
5.3	Calcul	42
5.3.1	Calcul et vérification manuelle des assemblages boulonnées : Excel (VBA)	42
5.3.2	Etude du vent selon NV 65 [1]	44
5.3.3	Calcul et dimensionnement des Lisses	58
5.4	Optimisation	62
5.4.1	Ajout d'éléments secondaires	62
5.4.2	Optimisation des espacements	63
5.4.3	Choix des sections et des profils	63
5.4.4	Utilisation de logiciels de modélisation et de calcul	63
5.4.5	Exemple d'optimisation des lisses	63
5.5	Conclusion	65

Table des figures

1.1	Secteurs d'activités de l'entreprise	4
1.2	Exemple de projets	4
1.3	Exemple de projets	5
2.1	Projet : bâtiment de filtration GAFSA	6
2.2	Projet : bâtiment de filtration GAFSA et ses extensions	7
2.3	Panneaux sandwich	7
2.4	Caractéristiques géométriques du projet	8
2.5	Normes de conception dans Autodesk Robot Structural Analysis (RSA).	10
2.6	Section transversale	11
2.7	Elevation	11
2.8	Section longitudinale	12
2.9	plan toiture	13
2.10	Charge de vent sur RSA	15
2.11	Cas de charges sur RSA	16
2.12	Combinaisons ELU ELS	17
2.13	Traverse avec jarrets	18
2.14	Ferme trapézoïdale	19
3.1	ferme trapézoïdale à treillis	23
3.2	éléments principales	23
3.3	Disposition panne	24
3.4	Disposition des lisses UPN selon la forte inertie	25
3.5	éléments secondaires	26
3.6	Répartition des panne	27
3.7	Répartition des lisses	28
3.8	Modélisation complète sur RSA	29
3.9	Modélisation complète sur RSA	30
3.10	Ferraillage poutre	30
3.11	Ferraillage poteau	31
4.1	Module complémentaire : Exportation vers IDEA StatiCa	33

4.2	Résultat d'exportation vers IDEA StatiCa	33
4.3	RSA - IDEA StatiCa	34
4.4	Logo IDEA StatiCa	34
4.5	Assemblage poutre poteau	35
4.6	Assemblage poutre poteau avec raidisseurs	36
4.7	Liaison poteau lisse	37
4.8	Encastrement poutre / poutre	37
4.9	Encastrement poutre / poutre	38
4.10	Disposition des trous	38
4.11	Encastrement Pied de poteau	39
5.1	contraintes	41
5.2	déplacement	42
5.3	Vérification du Boulonnage selon l'EUROCODE 3 sur Excel	44
5.4	Vérification du Boulonnage selon l'EUROCODE 3 sur Excel	44
5.5	Régions du vent en Tunisie	45
5.6	Coefficient de réduction D	48
5.7	position dans l'espace	49
5.8	Au vent / Sous vent	50
5.9	Constructions à façades parallèles présentant un décrochement en élévation	50
5.10	Détermination du coefficient γ_e	51
5.11	Diagramme R-III-6	52
5.12	Convension de signes	53
5.13	Convension de signe Ci	53
5.14	Détermination du coefficient γ_o	55
5.15	Résultats de calcul du vent W1 et W2	58
5.16	Charges sur les lisses	59
5.17	Exemple d'optimisation des lisses ELS	63
5.18	Exemple d'optimisation des lisses ELS	64
5.19	Vérification de la flèche ELS	64

Liste des tableaux

2.1	Dimensions de la charpente métallique et du béton	8
2.2	Hypothèses de calcul	9
2.3	Types de charges appliquées à la structure	15
2.4	Résumé des avantages et inconvénients	18
2.5	Résumé des avantages et inconvénients des structures en treillis	19
5.1	Caractéristiques du vent selon NV65	45
5.2	Pression dynamique de base (daN/m^2)	46
5.3	Coefficient de site selon la zone géographique	47
5.4	Valeurs limites des pressions dynamiques corrigées (daN/m^2)	49
5.5	Coefficients de pression pour les parois et la toiture	53
5.6	Actions intérieures	53
5.7	Coefficients de pression résultants (W_1)	54
5.8	Calcul de l'action du vent $W_1 : \text{daN}/\text{m}^2$	54
5.9	C_e : Actions extérieures	56
5.10	Actions intérieures	56
5.11	Coefficients de pression résultants (W_2)	56
5.12	Calcul de l'action du vent $W_2 : \text{daN}/\text{m}^2$ avec correction	57
5.13	Résumé des charges et combinaisons pour le dimensionnement des lisses	59
5.14	Caractéristiques géométriques et mécaniques du profilé UPN 220	61

Introduction Générale

Effectuer un stage est une étape clé dans le parcours de tout étudiant, permettant de concilier théorie et pratique. Dans ce contexte, j'ai eu l'opportunité d'effectuer un stage au sein de la Société TECI (Tunisie Engi neering et Construction Industrielle), du 01 juillet au 15 aout. Le choix de cette entreprise s'est imposé en raison de son expertise reconnue dans le domaine de la construction industrielle et de son rôle majeur dans la réalisation de projets complexes alliant innovation, performance structurelle et respect des normes internationales. Ce stage m'a offert l'opportunité de participer à un projet concret : la conception et le calcul d'un bâtiment industriel de filtration d'acide phosphorique, dont la structure repose sur une combinaison de béton armé pour le soubassement et de charpente métallique pour la superstructure. Cette approche mixte acier-béton a permis de répondre aux exigences de robustesse, de durabilité et de flexibilité du projet, tout en assurant une optimisation technique et économique. L'étude s'est appuyée sur les Eurocodes, normes de référence en ingénierie structurelle, afin de garantir la fiabilité des calculs et la conformité du projet aux standards internationaux. Elle a intégré plusieurs étapes essentielles, allant de la modélisation et du prédimensionnement des éléments porteurs à l'analyse des charges, en passant par l'étude des phénomènes d'instabilité, la vérification aux Etats Limites Ultimes (ELU) et aux Etats Limites de Service (ELS), ainsi que la conception des assemblages métalliques. Ce travail m'a permis non seulement d'acquérir une vision intégrée de la conception des structures industrielles, mais également de renforcer mes compétences dans l'utilisation des outils de modélisation numérique et de calcul, tout en développant une approche rigoureuse de l'ingénierie. Cette expérience a ainsi constitué une étape déterminante dans mon parcours, en consolidant mes connaissances académiques et en m'ouvrant sur les réalités du monde professionnel.

Chapitre 1

Présentation de l'entreprise

1.1 Introduction

Ce chapitre est dédié à la présentation de l'entreprise d'accueil, à son secteur d'activité ainsi qu'à ses principaux projets, tout en mettant en avant son rôle et son importance dans le domaine de la construction industrielle.

1.2 Présentation de l'entreprise d'accueil

Fondée en 1982, TECI « Tunisie Engineering et Construction Industrielle » est une société d'ingénierie pluridisciplinaire implantée à Tunis. La société **TECI** a été fondée afin de répondre aux besoins croissants en ingénierie, construction et solutions techniques dans le secteur du génie civil et de l'industrie.

1.2.1 Secteur d'activité

TECI opère aussi bien à l'échelle nationale qu'internationale et bénéficie d'un actif de plusieurs centaines de références de prestations et services de haute qualité, pour des projets Industriels appartenant principalement aux secteurs des phosphates et engrains chimiques, du pétrole et énergie, du ciment et matériaux de construction, de la chimie et agroalimentaire. Forte de sa longue expérience et de la confiance que lui témoignent ses clients, TECI a développé des compétences dans tous les domaines industriels et de service. Son champ d'activité couvre notamment les secteurs industriels suivants :

- **Mines et minéraux, Phosphates et Engrais**
- **Pétrole et Gaz**
- **Ciments et matériaux de construction**
- **Chimie industrielle**
- **Agro-Industrie**
- **Environnement et social**
- **Traitements des eaux**

— Energie



Mines et Minéraux,
Phosphates et
Engrais



Pétrole & Gaz



Ciment et Matériaux
de Construction



Chimie industrielle



Agro – Industrie



Environnement et
social



Traitement des Eaux



Energie

FIGURE 1.1 – Secteurs d'activités de l'entreprise

1.2.2 Projets

TECI a réalisé plus de 1000 projets :

- **Projet GSFC**
- **GCT – Projet TSP**
- **Projet Sels de Tataouine**
- **Projet M'dhilla 2**



Projet Sels de Tataouine



Projet M'dhilla 2

FIGURE 1.2 – Exemple de projets



FIGURE 1.3 – Exemple de projets

1.2.3 Informations supplémentaires

Adresse : Centre Urbain Nord – BP 207 – Tunis cedex 1080

GSM : (+216) 70 148 900

Horaire : Lundi-Vendredi, 9am - 6pm

Mail : teci@teci.com.tn

1.3 Conclusion

En résumé, TECI Tunisie occupe une place importante dans le secteur de l'ingénierie et de la construction industrielle en Tunisie. Grâce à son savoir-faire et à la diversité de ses projets, l'entreprise constitue un environnement professionnel favorable à l'apprentissage et au développement de compétences techniques et organisationnelles.

Chapitre 2

Présentation générale du projet

2.1 Introduction

Le projet porte sur la conception d'une unité de filtration d'acide phosphorique intégrée dans un complexe industriel.

De dimensions $35 \times 45,55$ m et 16.05 m de hauteur libre, le bâtiment est destiné à accueillir des équipements de grande taille ainsi que des passerelles d'accès. Pour répondre aux contraintes d'un environnement corrosif, une structure mixte a été retenue : un soubassement en béton armé et une superstructure métallique composée de fermes trapézoïdales, permettant une grande portée et une bonne rigidité latérale.



FIGURE 2.1 – Projet : bâtiment de filtration GAFSA

La figure 2.1 illustre clairement l'emplacement , la nature et la complexité du projet de filtration d'acide phosphorique à GAFSA .



FIGURE 2.2 – Projet : bâtiment de filtration GAFSA et ses extensions

La figure 2.2 montre les divers extensions de ce projet.

La toiture est constituée de panneaux sandwichs isolés, fixés sur les pannes secondaires métalliques.



FIGURE 2.3 – Panneaux sandwich

Des lanterneaux sont également prévus pour permettre l'éclairage naturel et la ventilation. Les façades sont fermées équipées de bardages métalliques .

Ce bâtiment est conçu selon les normes Eurocodes, avec une attention particulière portée à la résistance aux charges industrielles spécifiques et à la facilité de maintenance.

2.2 Contexte et objectifs du projet

Le projet, confié à l'entreprise TECI, consiste à concevoir et dimensionner un bâtiment industriel mixte acier-béton répondant aux normes Eurocodes. Les objectifs portent sur la stabilité et la sécurité de l'ouvrage, l'optimisation du poids et du coût, la prise en compte des instabilités, la modélisation sous Robot Structural Analysis, le pré-dimensionnement des éléments en béton armé et en acier, ainsi que la vérification des assem-

blages.

Le projet illustre un cas concret de conception d'un ouvrage industriel complexe, intégrant contraintes techniques, économiques et normatives propres au secteur chimique.

2.3 Description du bâtiment

2.3.1 Dimensions générales et Hypothèses de calculs :

Dimensions générales :

Le tableau ci-dessous 2.1 regroupe les dimensions détaillé du projet ;

TABLE 2.1 – Dimensions de la charpente métallique et du béton

Charpente métallique		
largeur(m)	longueur(m)	hauteur(m)
35	45.55	16.05
Béton		
largeur(m)	longueur(m)	hauteur(m)
35	45.55	7.2

Inclinaison (pente de la toiture) $\alpha=5,71^\circ$.



FIGURE 2.4 – Caractéristiques géométriques du projet

Hypothèses de calculs :

Après la présentation des dimensions générales de l'ouvrage, les hypothèses de calcul adoptées sont résumées dans le tableau suivant 2.2.

TABLE 2.2 – Hypothèses de calcul

Paramètre	Valeur
Nuance de l'acier	S275
Pieds de poteaux	Encastrées
Module d'élasticité transversale G	$0,8 \times 10^5$ MPa
Module d'élasticité E	$2,1 \times 10^5$ MPa

2.4 Données de base et documents de référence

2.4.1 Données de base

Les données de base regroupent l'ensemble des informations techniques, géométriques et fonctionnelles nécessaires pour la conception et le calcul de la structure étudiée. Elles comprennent :

- **Nature de l'ouvrage** : Bâtiment industriel de filtration d'acide phosphorique.
- **Localisation du projet** : GAFSA-M'dhilla :(Région III)
- **Hypothèses de charges** :charges permanentes (poids propre des éléments de structure, poids du bardage), charges d'exploitation(charge de maintenance , charge de poussière), charges climatiques (vent)
- **Matériaux utilisés** :
 - profilés métalliques : S275(E28)
 - béton armé (classe C30/35)
- **Contraintes particulières** : exigences de durabilité (exposition aux produits chimiques), conditions d'exécution (levage, assemblage), normes de sécurité applicables.
- **Normes** :
 - Acier : Eurocode 3 (NF EN 1993-1-1 + 1-8 pour les assemblages).
 - Béton armé : Eurocode 2 (NF EN 1992-1-1).

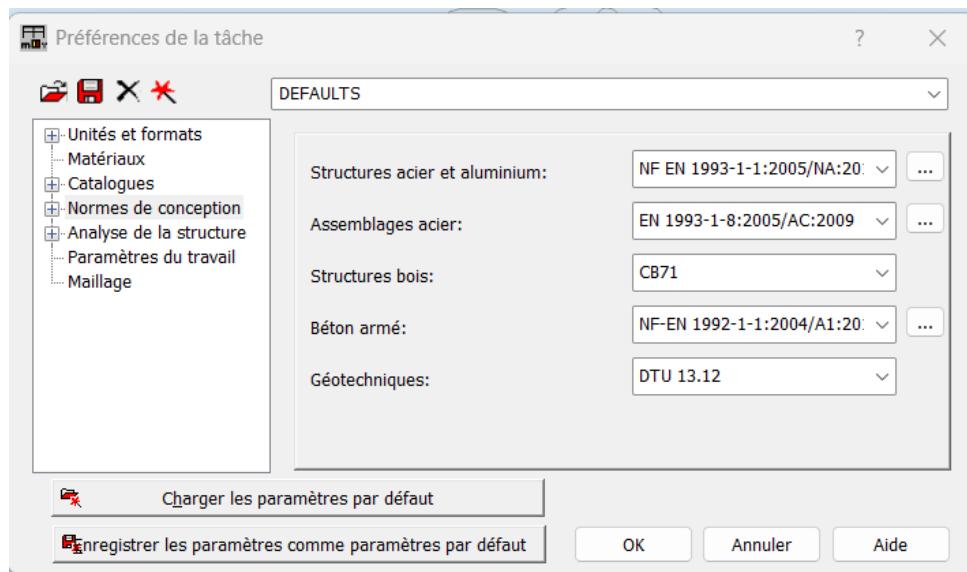


FIGURE 2.5 – Normes de conception dans Autodesk Robot Structural Analysis (RSA).

2.4.2 Documents de référence :Documents techniques

Dans le cadre du projet, plusieurs documents techniques constituent la base de travail et de référence pour les études et la conception de la structure. Parmi les principaux documents, on cite :

- **Plans architecturaux**

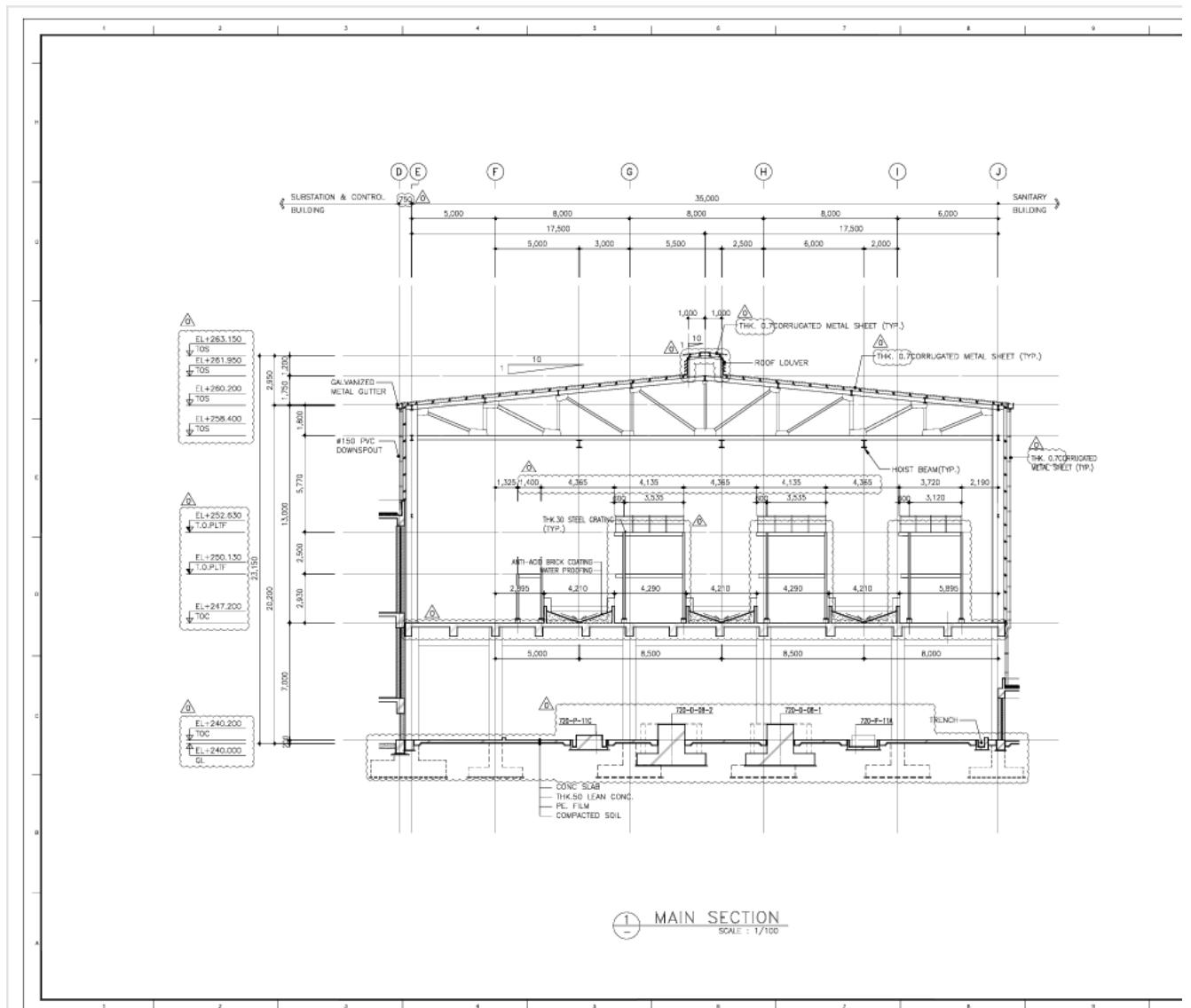


FIGURE 2.6 – Section transversale

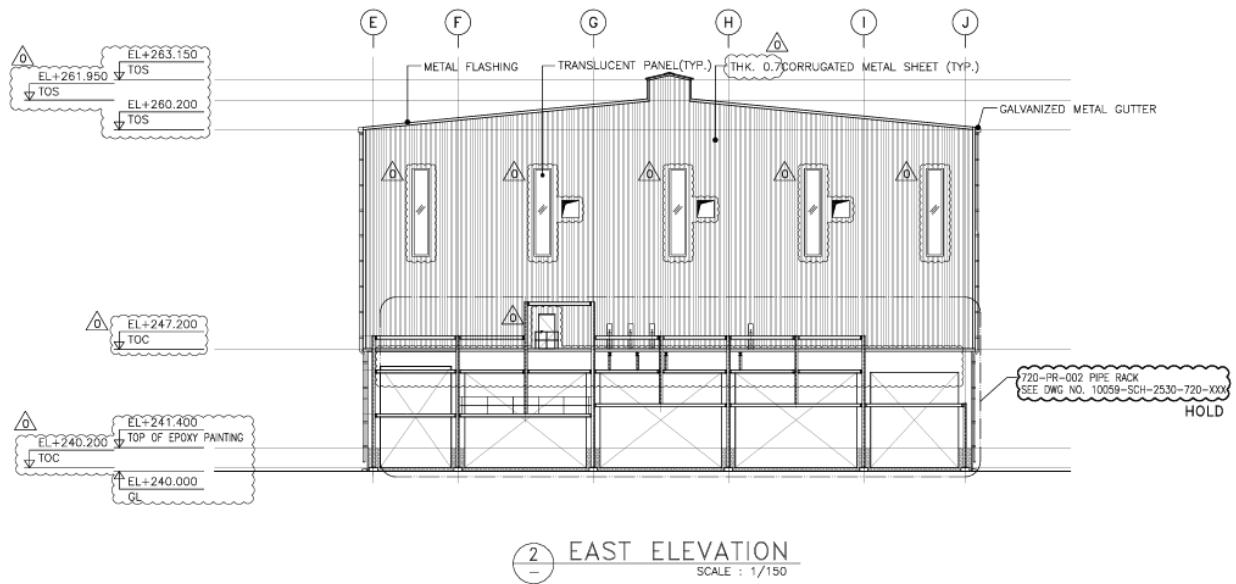


FIGURE 2.7 – Elevation

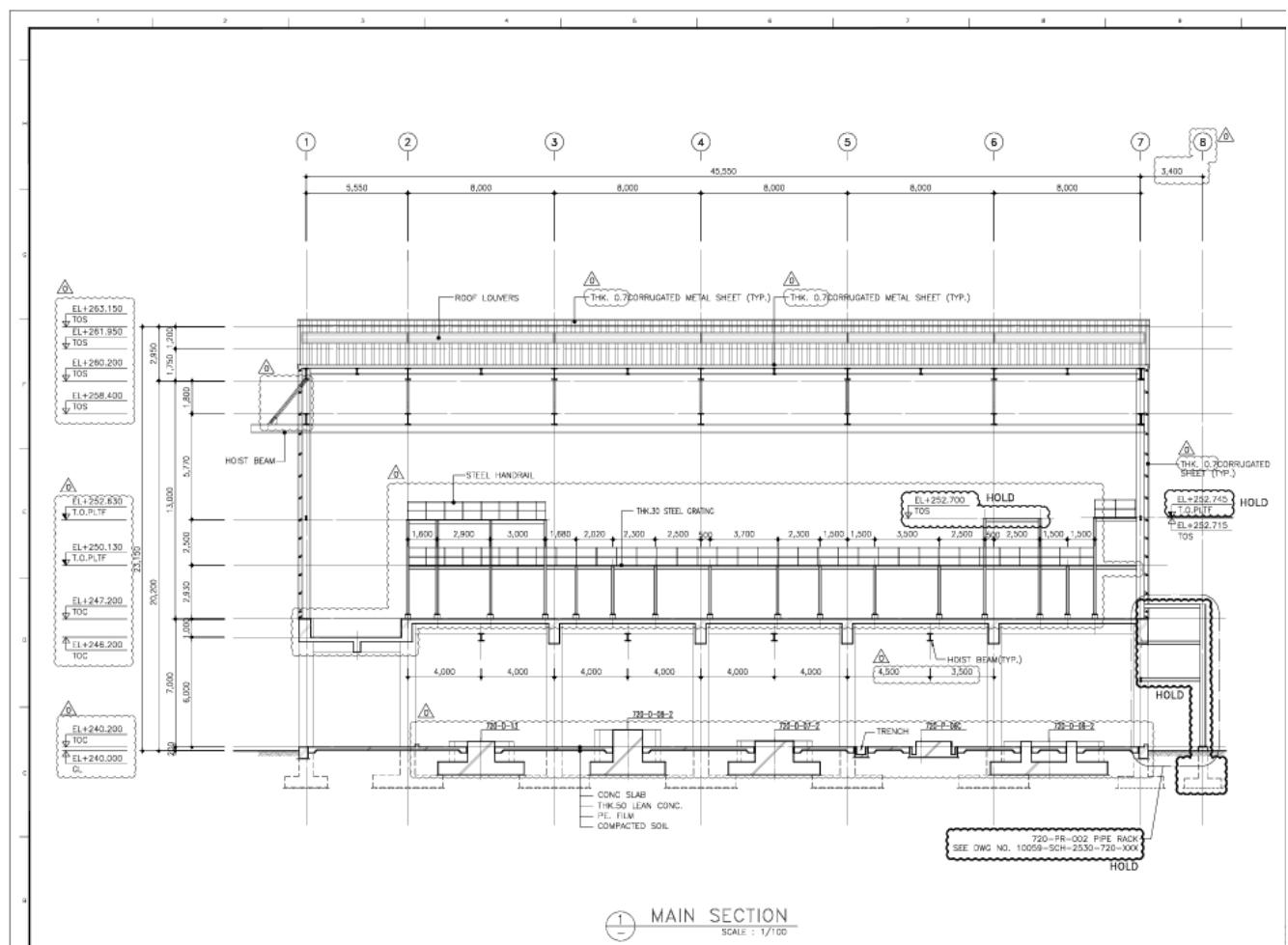


FIGURE 2.8 – Section longitudinale

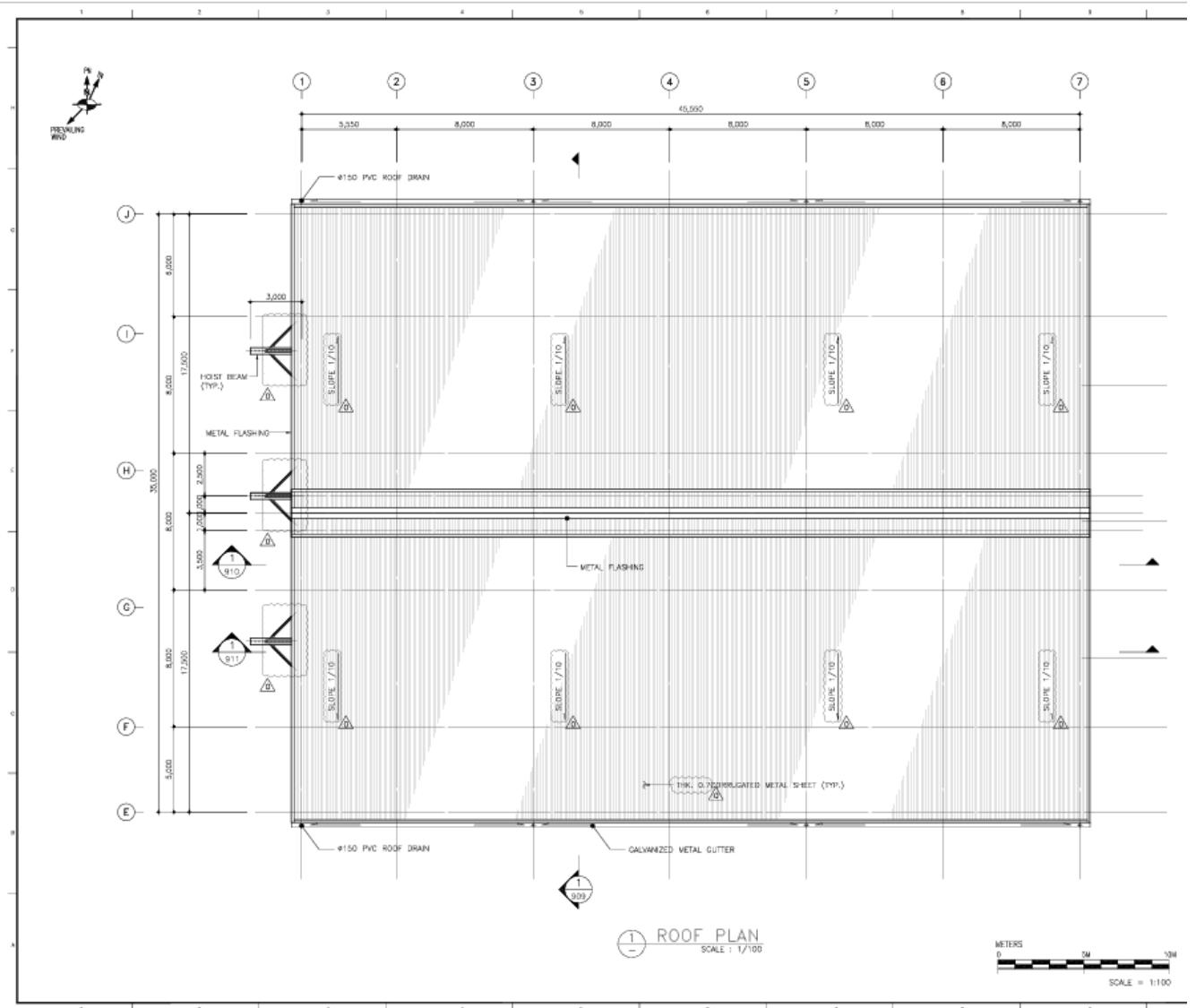


FIGURE 2.9 – plan toiture

Les plans architecturaux fixent la géométrie globale de l'ouvrage, la distribution des espaces et les différents niveaux, ce qui facilite la modélisation tout en assurant une parfaite conformité du modèle étudié avec le projet réel.

— **Catalogues de profils métalliques** Dans la conception des structures en acier, le choix des sections joue un rôle essentiel dans le dimensionnement et l'optimisation de la structure. Les catalogues de profils métalliques regroupent l'ensemble des sections normalisées utilisées en construction métallique.

Dans Robot Structural Analysis, les catalogues de profils sont intégrés et permettent de sélectionner rapidement les sections normalisées correspondant aux normes européennes .

— **EUROCODES , Normes et Règles :**

Eurocodes (normes européennes harmonisées) :

- Eurocode 0 – EN 1990 : Bases de calcul des structures
- Eurocode 1 – EN 1991 : Actions sur les structures
- Eurocode 2 – EN 1992 : Calcul des structures en béton
- Eurocode 3 – EN 1993 : Calcul des structures en acier
- [2] -Eurocode 4 – EN 1994 : Calcul des structures mixtes acier-béton

Normes françaises complémentaires :

NV65 modifiées 1999 – Règles Neige et Vent-’Eurocode 1 – EN 1991-1-3 (neige) et EN 1991-1-4 (vent)

2.5 Contraintes et exigences du projet :

2.5.1 Chargements

Le dimensionnement de la structure repose sur l'identification et la combinaison des différentes charges qui peuvent agir au cours de son exploitation. Ces charges sont classées en plusieurs catégories selon leur nature et leur durée d'application .

Dans le cadre de ce projet, les charges considérées sont les suivantes :

— **Chargements permanents (G) :**

- Poids propre des éléments de structure (poutres, poteaux, contre-ventements, etc.),
- Poids du bardage et des éléments fixes associés.

— **Chargements d'exploitation (Q) :**

- Charge de maintenance (liée à la présence ponctuelle d'intervenants sur la structure),
- Charge de poussière (dépôts liés à l'environnement industriel).

— **Chargements climatiques :**

- Charge de vent : elle constitue une action déterminante dans la conception des charpentes métalliques. Dans ce projet, la génération des charges de vent a été effectuée automatiquement par le logiciel **Autodesk Robot Structural Analysis (RSA)** conformément aux dispositions de la norme **NV65** comme le montre la figure 2.10.

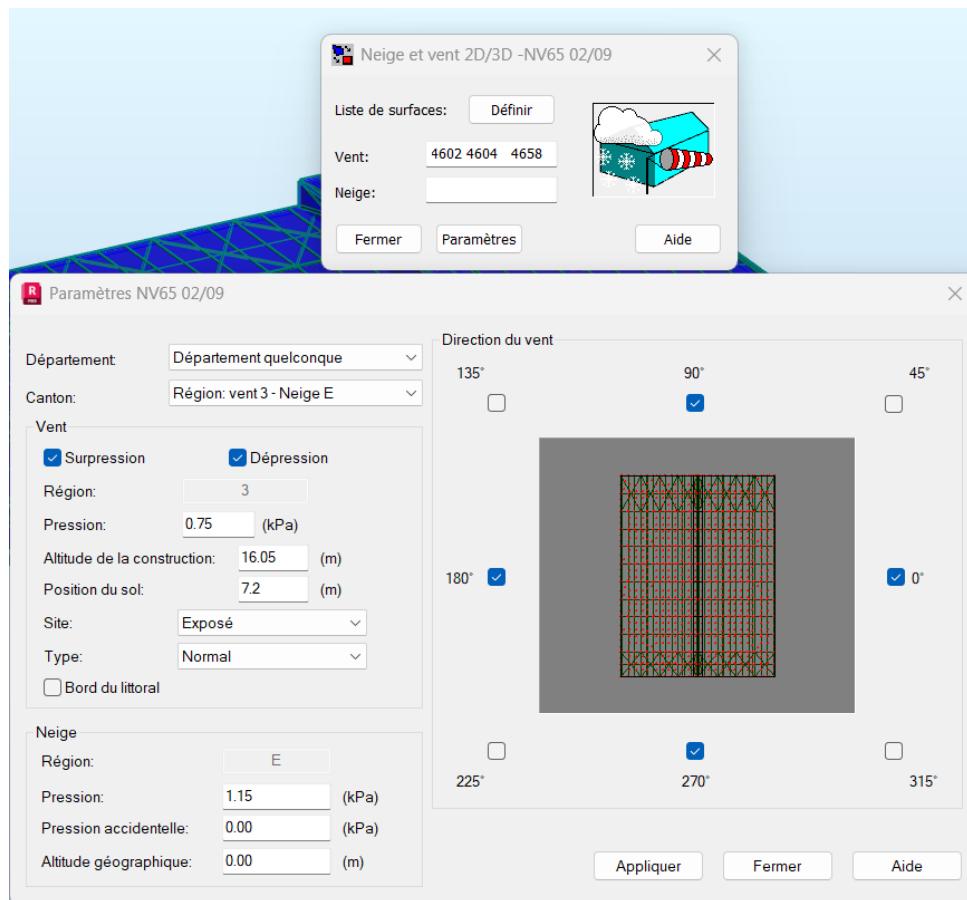


FIGURE 2.10 – Charge de vent sur RSA

Un tableau récapitulatif des charges appliquées à la structure est présenté ci-après :2.3

TABLE 2.3 – Types de charges appliquées à la structure

Type de charge	Cas de charge	Valeur
Charges permanentes	Poids propre de la structure	–
	Poids de la couverture et du bardage	0.1 kPa
Charges d'exploitation	Maintenance	0.25 kPa
	Dépôt de poussière	0.2 kPa
Charges climatiques	Charge du vent	–

La figure 2.11 illustre les différents cas de charges sur RSA .

Cas	Préfixe	Nom du cas	Nature	Type d'analyse
1	LL1	poids propre de la structure	Structurelle	Statique linéaire
2	LL11	poids bardage	Structurelle	Statique linéaire
3	LL12	poussière		Statique linéaire
4	LL121	entretien		Statique linéaire
5		ELU		Statique linéaire
6		ELU+		Statique linéaire
7		ELU-		Statique linéaire
8		ELS		Statique linéaire
9		ELS+		Statique linéaire
10		ELS-		Statique linéaire
11		ELS:CAR		Statique linéaire
12		ELS:CAR+		Statique linéaire
13		ELS:CAR-		Statique linéaire
14		ELS:FRE		Statique linéaire
15		ELS:FRE+		Statique linéaire
16		ELS:FRE-		Statique linéaire
17		ELS:QPR		Statique linéaire
18		ELS:QPR+		Statique linéaire
19		ELS:QPR-		Statique linéaire
20	V0(+)	Vent 0 deg sur.(+)	vent	Statique linéaire
21	V0(-)	Vent 0 deg dép.(-)	vent	Statique linéaire
22	V90(+)	Vent 90 deg sur.(+)	vent	Statique linéaire
23	V90(-)	Vent 90 deg dép.(-)	vent	Statique linéaire
24	V180(+)	Vent 180 deg sur.(+)	vent	Statique linéaire
25	V180(-)	Vent 180 deg dép.(-)	vent	Statique linéaire
26	V270(+)	Vent 270 deg sur.(+)	vent	Statique linéaire
27	V270(-)	Vent 270 deg dép.(-)	vent	Statique linéaire

FIGURE 2.11 – Cas de charges sur RSA

2.5.2 Combinaisons ELU ELS

Dans le cadre du dimensionnement, les charges définies précédemment doivent être combinées suivant les règles de l'Eurocode. On distingue principalement :

- **À l'ELU (État Limite Ultime)** : les charges sont pondérées par des coefficients partiels de sécurité afin de vérifier la résistance et la stabilité de la structure.
- **À l'ELS (État Limite de Service)** : les charges sont appliquées sans majoration excessive, afin de contrôler les déformations, flèches et vibrations pour garantir le confort et la durabilité de l'ouvrage.

Ainsi, les combinaisons de charges permettent de représenter les situations les plus défavorables possibles, tout en assurant à la fois la sécurité structurelle (ELU) et le bon fonctionnement en service (ELS).2.12.

Combinaison/Comp.	Définition
ELU/ 1	$1*1.35 + 2*1.35 + 3*1.50 + 4*1.50$
ELU/ 2	$1*1.35 + 2*1.35$
ELU/ 3	$1*1.35 + 2*1.35 + 3*1.50$
ELU/ 4	$1*1.35 + 2*1.35 + 4*1.50$
ELU/ 5	$1*1.00 + 2*1.00 + 3*1.50 + 4*1.50$
ELU/ 6	$1*1.00 + 2*1.00$
ELU/ 7	$1*1.00 + 2*1.00 + 3*1.50$
ELU/ 8	$1*1.00 + 2*1.00 + 4*1.50$
ELS:CAR/ 1	$1*1.00 + 2*1.00 + 3*1.00 + 4*1.00$
ELS:CAR/ 2	$1*1.00 + 2*1.00$
ELS:CAR/ 3	$1*1.00 + 2*1.00 + 3*1.00$
ELS:CAR/ 4	$1*1.00 + 2*1.00 + 4*1.00$
ELS:FRE/ 5	$1*1.00 + 2*1.00 + 3*0.50 + 4*0.50$
ELS:FRE/ 6	$1*1.00 + 2*1.00$
ELS:FRE/ 7	$1*1.00 + 2*1.00 + 3*0.50$
ELS:FRE/ 8	$1*1.00 + 2*1.00 + 4*0.50$
ELS:QPR/ 9	$1*1.00 + 2*1.00 + 3*0.30 + 4*0.30$
ELS:QPR/ 10	$1*1.00 + 2*1.00$
ELS:QPR/ 11	$1*1.00 + 2*1.00 + 3*0.30$
ELS:QPR/ 12	$1*1.00 + 2*1.00 + 4*0.30$
ELS:CAR/ 1	$1*1.00 + 2*1.00 + 3*1.00 + 4*1.00$
ELS:CAR/ 2	$1*1.00 + 2*1.00$
ELS:CAR/ 3	$1*1.00 + 2*1.00 + 3*1.00$
ELS:CAR/ 4	$1*1.00 + 2*1.00 + 4*1.00$
ELS:FRE/ 1	$1*1.00 + 2*1.00 + 3*0.50 + 4*0.50$
ELS:FRE/ 2	$1*1.00 + 2*1.00$
ELS:FRE/ 3	$1*1.00 + 2*1.00 + 3*0.50$
ELS:FRE/ 4	$1*1.00 + 2*1.00 + 4*0.50$
ELS:QPR/ 1	$1*1.00 + 2*1.00 + 3*0.30 + 4*0.30$
ELS:QPR/ 2	$1*1.00 + 2*1.00$
ELS:QPR/ 3	$1*1.00 + 2*1.00 + 3*0.30$
ELS:QPR/ 4	$1*1.00 + 2*1.00 + 4*0.30$

FIGURE 2.12 – Combinaisons ELU ELS

2.6 Choix de la solution structurelle

2.6.1 Comparaison entre portique avec jarrets et ferme trapézoïdale

Dans le cadre de la conception des bâtiments industriels, le choix du système porteur de la toiture est essentiel. Deux solutions couramment employées sont le portique avec jarrets et la ferme trapézoïdale.

1. Portique avec jarrets :

Traverse principale

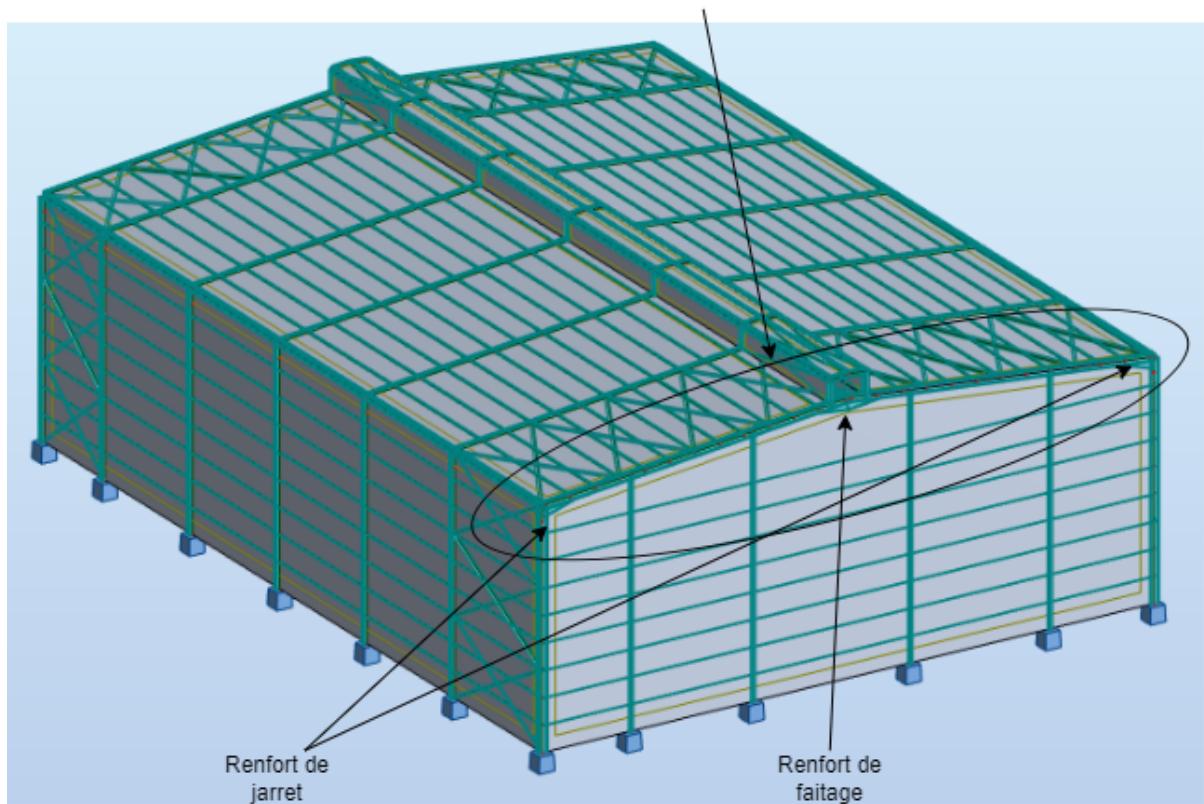


FIGURE 2.13 – Traverse avec jarrets

Le portique est constitué de poteaux et de poutres reliés rigidement. Les jarrets, disposés en diagonale à la base ou au niveau de la liaison poutre-poteau, ont pour rôle de renforcer la rigidité du système et de limiter les déplacements horizontaux.

Avantages	<ul style="list-style-type: none"> — Simplicité de conception et de montage — Bonne rigidité globale (faible à moyenne portée) — Réduction du nombre d'éléments secondaires
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> — Sections plus importantes ⇒ augmentation de la quantité d'acier — Esthétique moins favorable pour grandes portées — Transmission d'efforts plus complexes au niveau des fondations (moments importants)

TABLE 2.4 – Résumé des avantages et inconvénients

2. Ferme trapézoïdale :

Ferme trapézoïdale à treillis

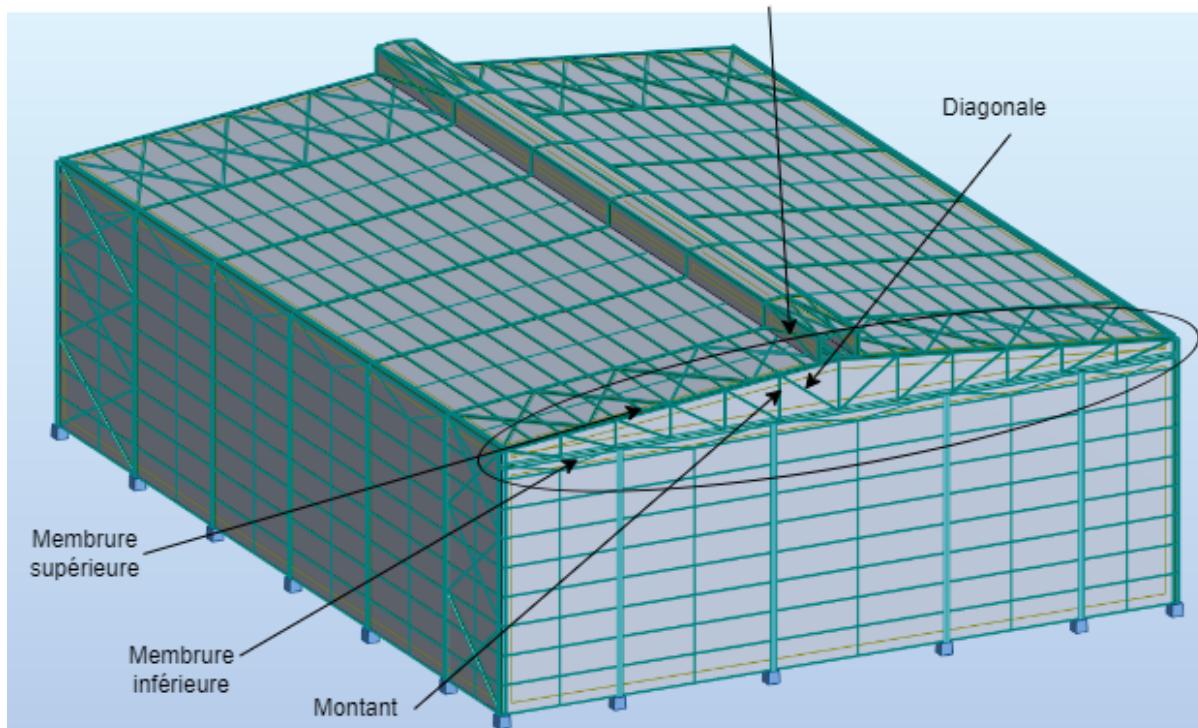


FIGURE 2.14 – Ferme trapézoïdale

La ferme est un treillis métallique composé de membrures supérieures et inférieures, ainsi que de montants et diagonales. La forme trapézoïdale est adaptée aux toitures inclinées.

Avantages	<ul style="list-style-type: none"> — Optimisation de l'utilisation de l'acier grâce au fonctionnement en treillis — Possibilité de couvrir de grandes portées ($> 20\text{--}25$ m) sans poteaux intermédiaires — Stabilité accrue grâce à la triangulation
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> — Complexité accrue de fabrication et d'assemblage — Nécessité d'un plus grand nombre de contreventements et de pannes — Temps de montage plus long

TABLE 2.5 – Résumé des avantages et inconvénients des structures en treillis

3. Conclusion comparative : Le portique avec jarrets convient aux petites et moyennes portées grâce à sa simplicité et son économie, tandis que la ferme trapézoïdale est privilégiée pour les grandes portées afin d'optimiser l'acier et limiter les déformations.

Dans notre projet (portée de 35 m), le choix s'est porté sur la ferme trapézoïdale.

2.7 Conclusion

Dans ce chapitre, une présentation générale du projet a été effectuée afin de situer le cadre de l'étude et d'introduire les éléments essentiels nécessaires à la compréhension de la suite du travail. Après avoir décrit la nature et les caractéristiques principales du bâtiment, les dimensions générales et les données de base ont été établies conformément aux prescriptions réglementaires. Les documents de référence, notamment les Eurocodes et normes associées, ont également été recensés, constituant ainsi le socle méthodologique de l'analyse.

Par ailleurs, l'identification des différentes charges, permanentes et variables, ainsi que leur combinaison selon les dispositions normatives, a permis de définir les sollicitations de calcul qui seront prises en compte dans les phases ultérieures. Le choix de la solution structurelle a également été présenté et justifié au regard des contraintes techniques, économiques et fonctionnelles du projet.

Cette synthèse constitue une étape préparatoire indispensable, puisqu'elle fixe le cadre conceptuel et réglementaire dans lequel s'inscriront les calculs et vérifications détaillés.

Chapitre 3

Conception et modélisation du bâtiment sur RSA

3.1 Introduction

La conception du bâtiment de filtration d'acide phosphorique repose sur une approche intégrant la stabilité structurelle, la fonctionnalité et la durabilité. Elle prend en compte les exigences du procédé industriel, les contraintes environnementales, les normes en vigueur ainsi que les conditions de montage. Le projet adopte une structure mixte acier-béton : une ossature principale en poteaux, poutres et fermes trapézoïdales assurant la stabilité, des éléments secondaires (pannes, lisses, bardage) pour l'enveloppe, et des fondations en béton armé pour la reprise des charges.

3.2 Systèmes structuraux :

3.2.1 Enveloppes

1. Les enveloppes horizontales ou les toitures : couvertures

Les enveloppes horizontales sont principalement constituées par la toiture. Dans le cas d'un bâtiment industriel, la couverture est généralement réalisée à l'aide de panneaux métalliques nervurés, de bacs acier ou de panneaux sandwichs isolants.

2. Les enveloppes verticales : bardages.

Les enveloppes verticales sont constituées par les bardages, éléments de façade fixés sur la structure porteuse métallique.

3.2.2 Structures principales

Les structures principales de la charpente métallique assurent la stabilité globale du bâtiment et garantissent la transmission des charges vers les fondations. Elles se composent essentiellement des éléments suivants :

1. Portiques : Les portiques, éléments essentiels à la stabilité de la

structure, sont dimensionnés pour résister aux charges verticales et horizontales agissant dans leur plan, engendrant principalement des sollicitations de flexion, d'effort axial et de tranchant. Dans ce projet on a 7 portiques au total avec un entraxe variable (5 entaxes de 8m et un de 5.550m) .

2. Poteaux : Ils constituent les éléments verticaux de soutien. On distingue :

- les poteaux de rive, situés aux extrémités de la structure, qui reprennent les charges de la toiture et des bardages ;
- les poteaux centraux, placés à l'intérieur, qui supportent une partie importante des charges verticales et contribuent à la stabilité longitudinale.

3. Potelets : Les potelets, généralement réalisés en profilés de type I ou H, jouent un rôle essentiel dans la stabilité de l'enveloppe. Leur fonction principale est de reprendre les efforts horizontaux transmis par le vent et de les reporter vers la structure porteuse. En outre, ils contribuent à augmenter la rigidité du bardage, limitant ainsi les déformations et améliorant la durabilité de l'ouvrage face aux sollicitations climatiques.

4. Ferme trapézoïdale : Elle constitue l'ossature principale de la toiture. La ferme est généralement composée de :

- une membrure supérieure (suivant la pente du toit) qui reprend les charges de couverture et du vent ;
- une membrure inférieure, jouant le rôle de tirant et reliant les deux extrémités de la ferme ;
- des montants verticaux qui assurent la répartition des efforts ;
- des diagonales, formant un treillis, qui garantissent la stabilité et réduisent la portée libre des membrures.

Ferme trapézoïdale à treillis

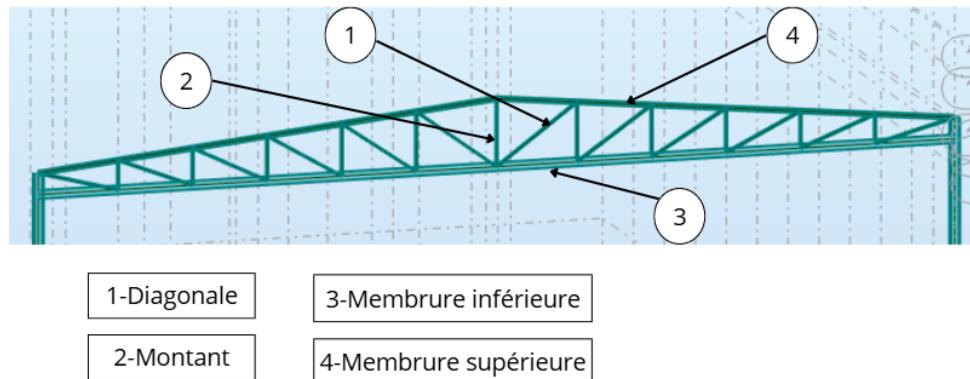


FIGURE 3.1 – ferme trapézoïdale à treillis

5. Sablières : Placées horizontalement au sommet des murs latéraux. Elles jouent un rôle de liaison entre les poteaux et assurent la reprise des charges de la couverture.

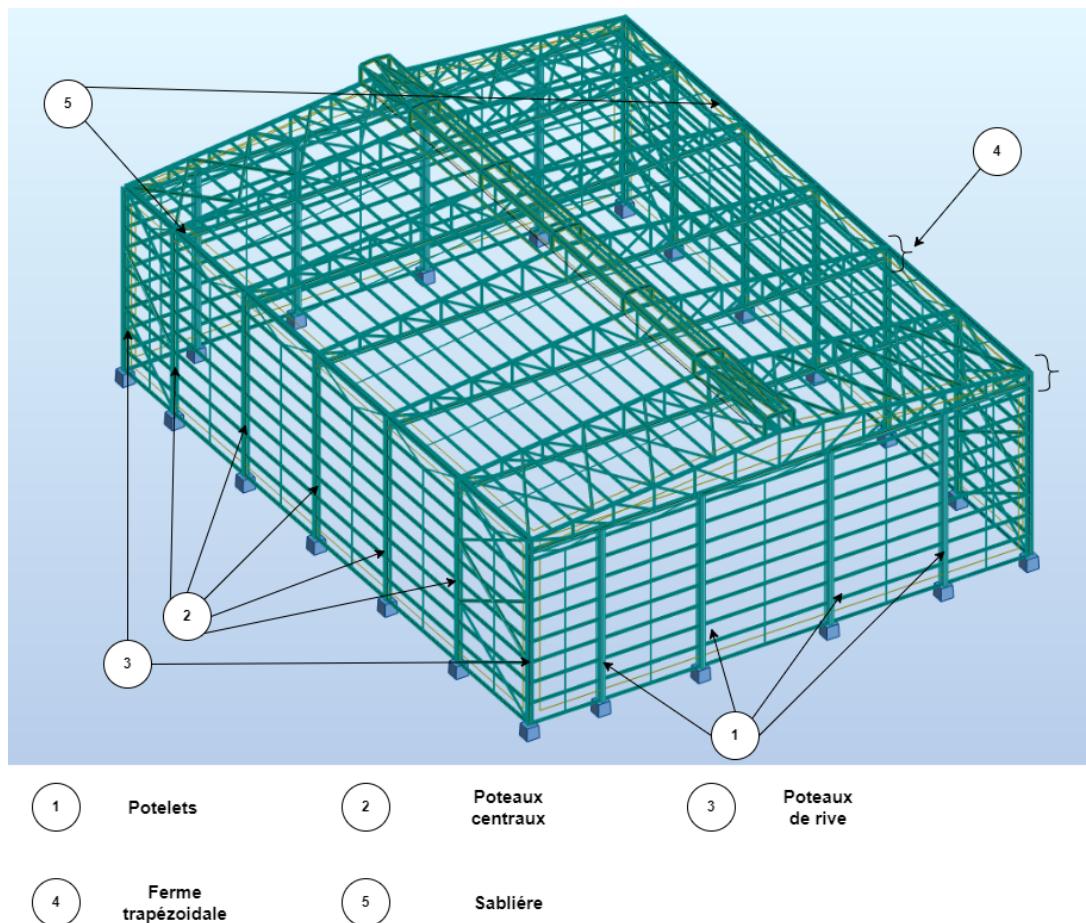


FIGURE 3.2 – éléments principales

3.2.3 structures secondaires

Les structures secondaires regroupent l'ensemble des éléments dont la fonction principale est de supporter l'enveloppe du bâtiment (toiture et façades), sans participer directement à la reprise des charges principales de la structure porteuse.

Elles comprennent principalement :

1. **Contreventements** : Éléments disposés en diagonale dans les plans de toiture ou de façade, les contreventements permettent d'assurer la stabilité globale de la structure en reprenant les efforts horizontaux dus au vent, aux séismes ou aux charges accidentielles. Ils évitent également le flambement des barres comprimées des fermes.
2. **Pannes** : Ce sont des poutres secondaires posées perpendiculairement aux fermes ou aux portiques et qui supportent directement la couverture (panneaux sandwich). Elles transmettent les charges verticales de la toiture (poids propre, surcharge d'exploitation) vers les structures principales.

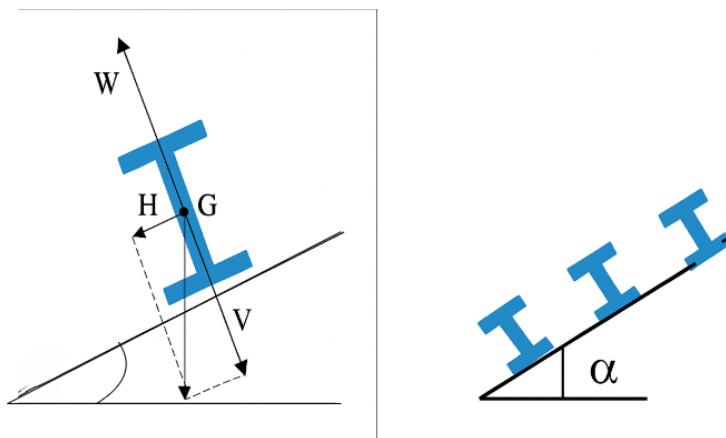


FIGURE 3.3 – Disposition panne

La figure 3.3 suivante illustre la nécessité d'adaptation de la disposition des pannes sur les membrures supérieurs avec la pente de la toiture ($\alpha=5.71^\circ$)

3. **Lisses** : Similaires aux pannes mais fixées verticalement sur les poteaux . Elles ont pour rôle de supporter les bardages et de transmettre leur poids ainsi que les pressions de vent vers la structure principale. La figure 3.4 montre la disposition des lisses UPN sur les poteaux .

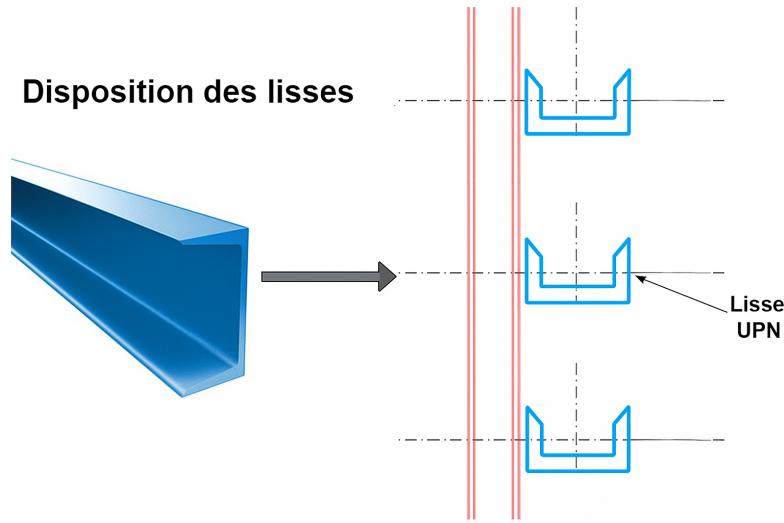


FIGURE 3.4 – Disposition des lisses UPN selon la forte inertie

4. **Liernes** : Les liernes sont des barres horizontales reliant entre les pannes . En diminuant leur porté elles servent à stabiliser les pannes et à réduire les risques de flambement local.
5. **Suspentes** : Ce sont des éléments de suspension qui relient les lisses. Elles permettent de diminuer la portée libre des lisses et de réduire ainsi leur dimensionnement, tout en améliorant la rigidité des parois verticales.

Ces structures, bien que considérées comme éléments secondaires, doivent être dimensionnées conformément aux normes en vigueur (notamment Eurocode 3), afin de garantir la stabilité de l'enveloppe et sa résistance aux actions climatiques telles que le vent . Elles doivent également être conçues pour faciliter la mise en œuvre et l'entretien du bâtiment.

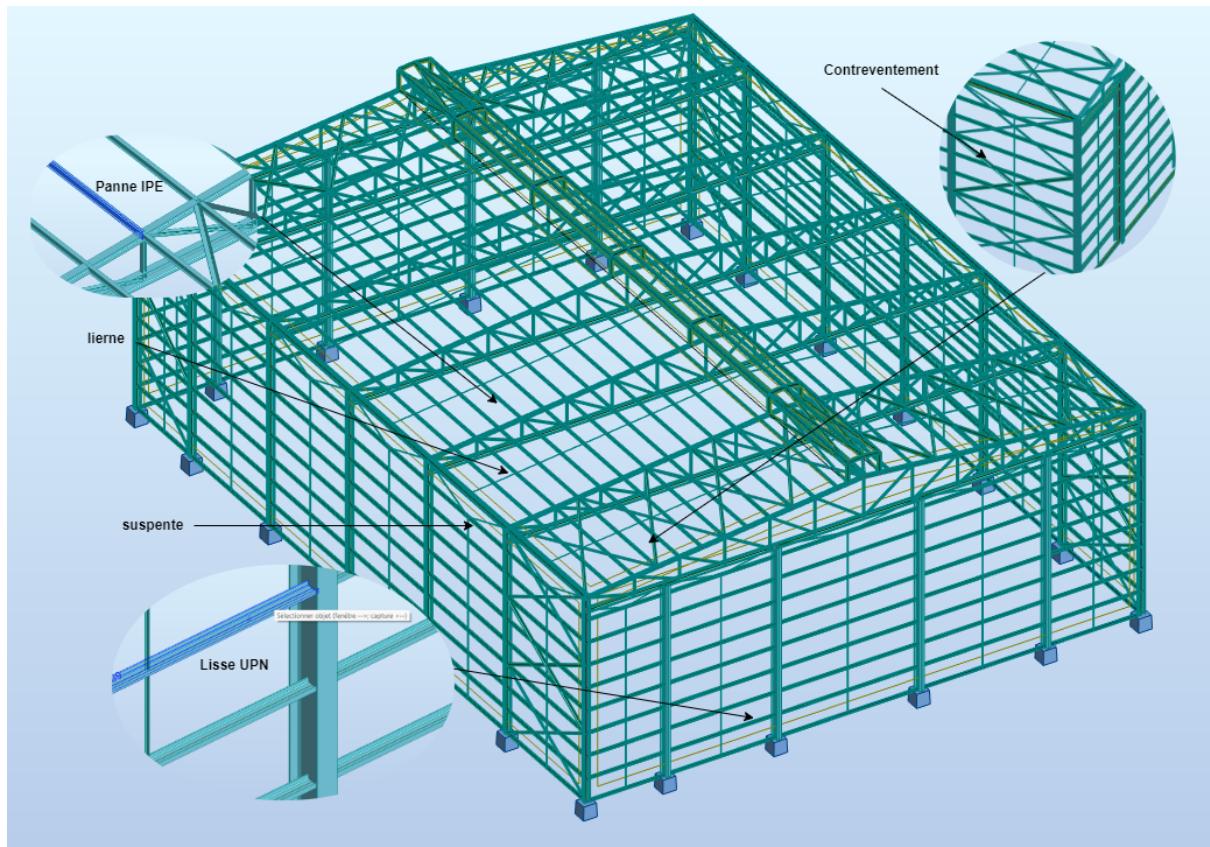


FIGURE 3.5 – éléments secondaires

3.3 Dispositions constructifs :

3.3.1 Pannes

La disposition des pannes doit respecter une distance maximale de 1,50 m entre axes, afin d'assurer une bonne reprise des charges de couverture et de limiter les déformations. Pour leur implantation, on laisse d'abord une marge de 0,20 m à chaque extrémité de la membrure supérieure de la ferme, ce qui permet d'éviter les zones de concentration d'efforts et d'assurer un appui correct du bardage. La longueur utile restante est ensuite divisée en intervalles réguliers, de façon à positionner les pannes conformément aux prescriptions techniques et à garantir une répartition homogène des charges.

Calcul de la répartition des pannes

Données :

$$L = \frac{\frac{35}{2}}{\cos 5.71^\circ} = \frac{17.5}{\cos 5.71^\circ} \approx 17.587 \text{ m}$$

$$L = 17,587 \text{ m}, \quad e = 0,20 \text{ m}, \quad s_{\max} = 1,50 \text{ m}$$

– Longueur utile

$$L_u = L - 2e = 17,587 - 0,40 = 17,18 \text{ m}$$

– Nombre d’intervalles

$$m = \left\lceil \frac{L_u}{s_{\max}} \right\rceil = \left\lceil \frac{17,187}{1,50} \right\rceil = \lceil 11,458 \rceil = 12$$

– Espacement réel

$$s = \frac{L_u}{m} = \frac{17,187}{12} = 1,432 \text{ m} \leq s_{\max}$$

– Nombre total de pannes sur les 2 cotées

$$n = m + 2 = 12 + 1 = 13$$

$$N_{\text{tot}} = 2 \times n = 2 \times 13 = 26$$

Répartition des pannes : distance entre panne

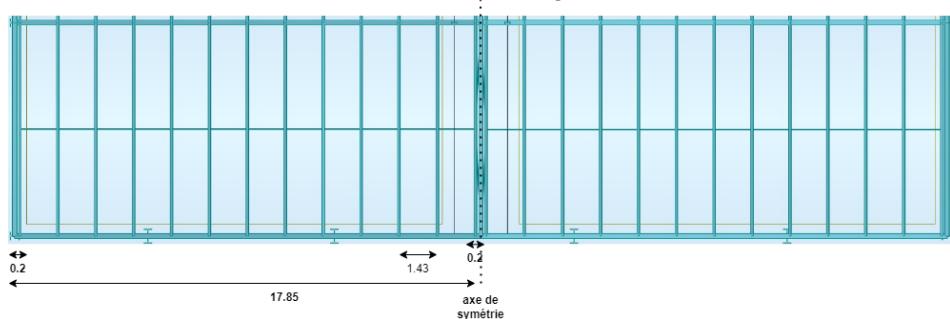


FIGURE 3.6 – Répartition des pannes

3.3.2 Lisses

Calcul de la répartition des lisses

Données :

$$l = 13 \text{ m}, \quad e = 0,20 \text{ m}, \quad s_{\max} = 1,50 \text{ m}$$

– Longueur utile

$$l_u = l - 2e = 13 - 0,40 = 12,6 \text{ m}$$

– Nombre d'intervalles

$$\frac{l_u}{s_{\max}} = \frac{12,6}{1,5} = 8,4 \quad \Rightarrow \quad m = 9$$

– Espacement réel

$$s = \frac{l_u}{m} = \frac{12,6}{9} = 1,4 \text{ m} \leq s_{\max}$$

– Nombre total de lisses

$$n = m + 1 = 9 + 1 = 10$$

Répartition des lisses :
distance entre lisses

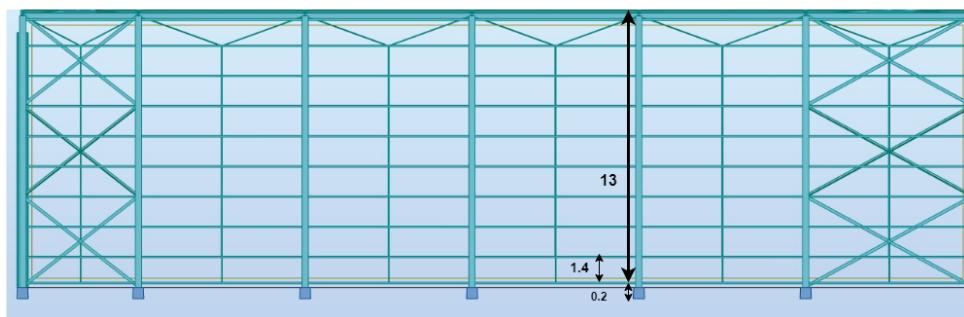


FIGURE 3.7 – Répartition des lisses

3.4 Soubassement en béton armé :

La modélisation présentée ci-dessus 3.8 ; illustre la structure complète intégrée dans le logiciel Robot Structural Analysis (RSA), comprenant le soubassement en béton ainsi que la charpente métallique. Le soubassement, constitué de poteaux , poutres , dalle et de semelles isolées, assure la stabilité globale de l'ouvrage et permet de reprendre efficacement les charges verticales et horizontales transmises par la superstructure. Cette modélisation détaillée met en évidence l'interaction entre la partie en béton armé et la charpente métallique, garantissant une répartition homogène des efforts et une représentation réaliste du comportement global de la structure.

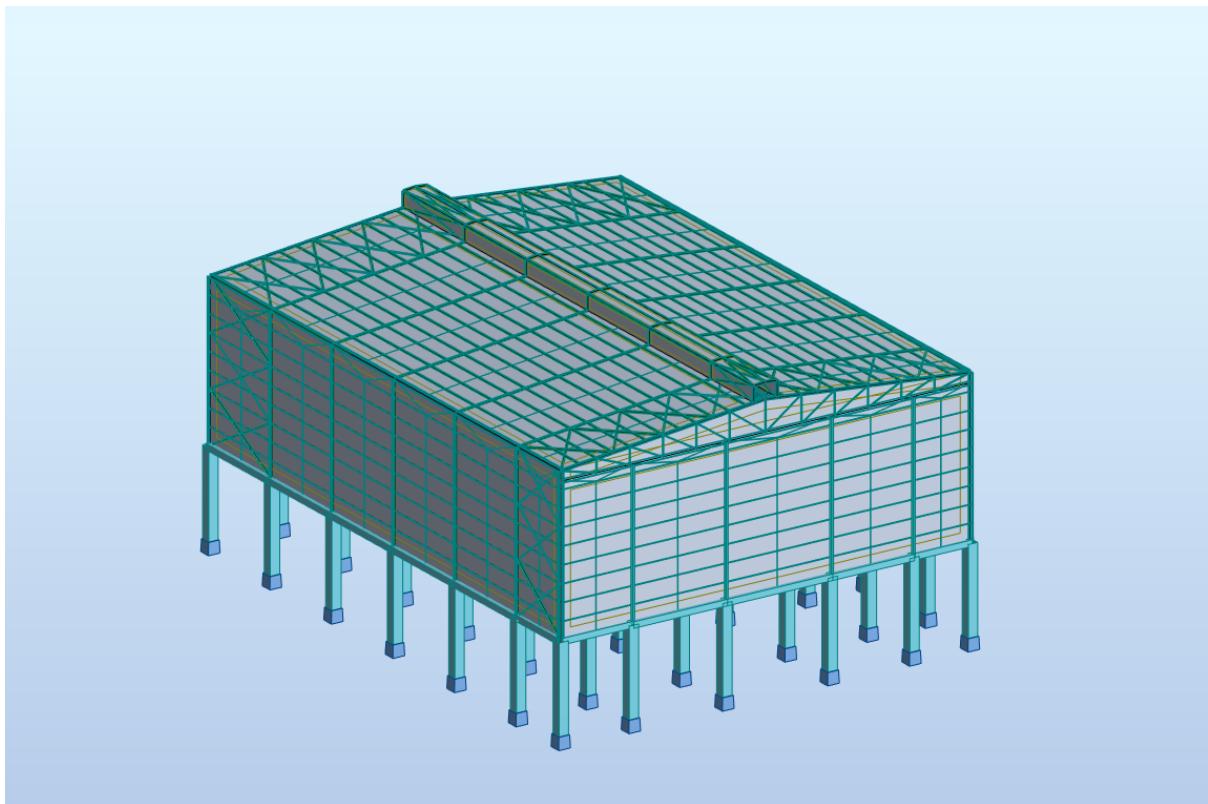
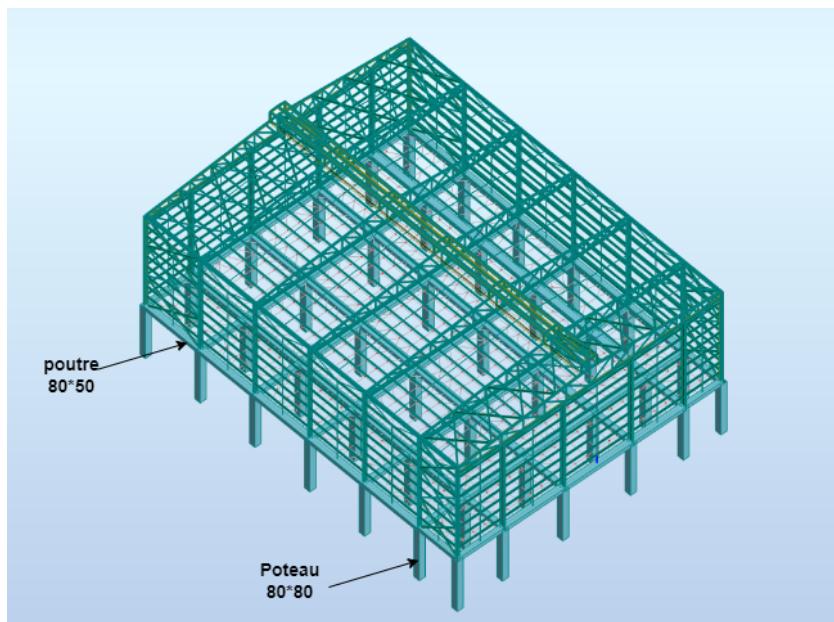


FIGURE 3.8 – Modélisation complète sur RSA

La structure en béton armé est constituée de **poteaux** de section 80×80 cm assurant la reprise des charges verticales, de **poutres** de section (80×50 cm et 60×50 cm) transférant les efforts vers les appuis, et d'un **plancher en BA** d'épaisseur 30 cm jouant le rôle de répartition des charges et des efforts horizontaux. La modélisation de ce plancher a été réalisée à l'aide de la **méthode de maillage de Coons**, avec une division en **triangles à contour rectangulaire**, garantissant une bonne précision des calculs.



**Plancher en BA (EP20cm):
Maillage**

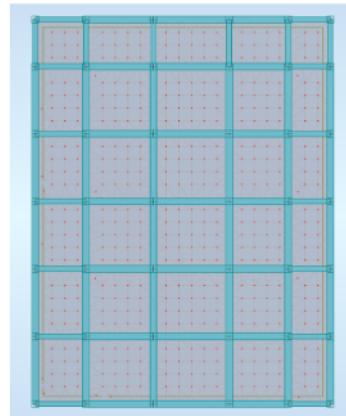


FIGURE 3.9 – Modélisation complète sur RSA

3.4.1 Ferraillage :

Le **ferraillage**, généré par Robot Structural Analysis, est présenté en annexes et conforme aux prescriptions réglementaires en vigueur.

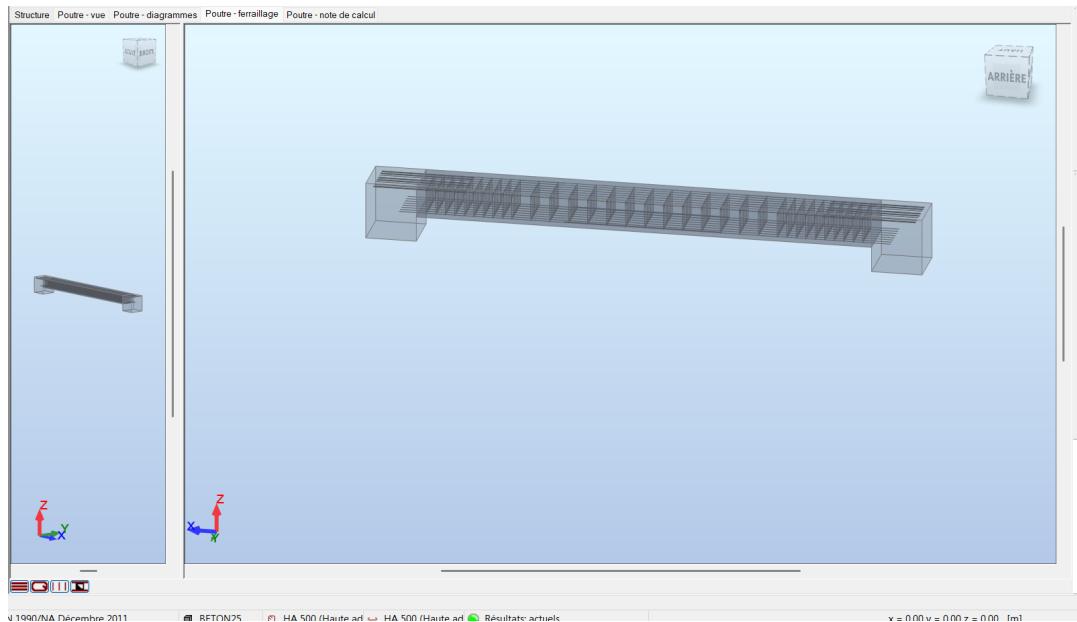


FIGURE 3.10 – Ferraillage poutre

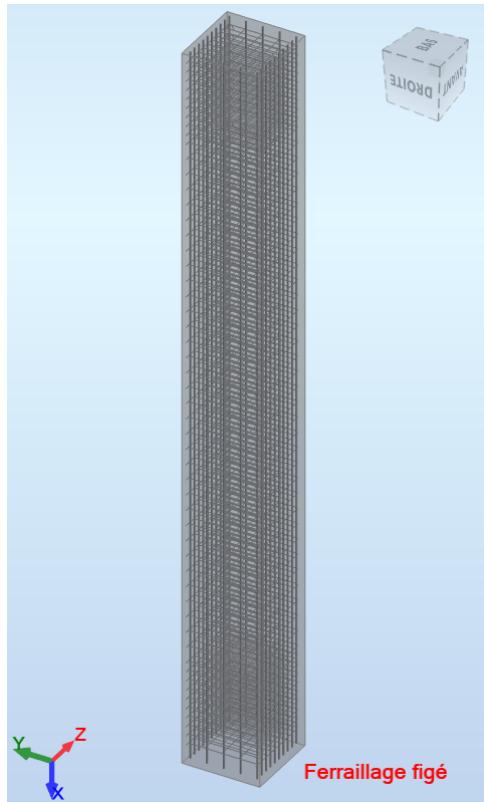


FIGURE 3.11 – Ferraillage poteau

3.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les éléments constitutifs de la structure en distinguant les parties principales et secondaires, tout en clarifiant leur rôle dans l'équilibre global du bâtiment. La comparaison entre le portique avec jarrets et la ferme trapézoïdale a permis de mettre en évidence leurs avantages respectifs et de justifier les choix retenus. Cette modélisation constitue ainsi une étape clé, garantissant la cohérence entre géométrie, stabilité et exigences normatives, et servant de base au dimensionnement et aux calculs ultérieurs.

Chapitre 4

Etudes des assemblages

4.1 Introduction

Dans une charpente métallique, les assemblages jouent un rôle fondamental car ils assurent la transmission des efforts entre les différents éléments structuraux (poutres, poteaux, contreventements). La sécurité et la performance globale de la structure dépendent non seulement du dimensionnement des profils mais aussi de la fiabilité des assemblages. Dans ce chapitre, les assemblages étudiés seront vérifiés à l'aide d'Excel, pour un dimensionnement rapide basé sur les formules normatives, et avec le logiciel IDEA StatiCa, qui permet une modélisation détaillée et une vérification avancée .

4.2 Workflow entre Robot Structural Analysis (RSA) et IDEA StatiCa :importation du modèle d'assemblage

Dans le cadre de ce travail, l'interopérabilité entre Robot Structural Analysis (RSA) et IDEA StatiCa a été exploitée pour l'analyse et la vérification des assemblages métalliques.

4.2.1 Étapes du workflow

- 1. Modélisation globale sur RSA :** Le modèle structurel du bâtiment est réalisé sous Robot Structural Analysis, où les éléments porteurs et les charges sont définis. Le logiciel fournit ensuite les efforts internes (N , V , M , T) utilisés pour le dimensionnement des assemblages.

- 2. Exportation vers IDEA StatiCa**

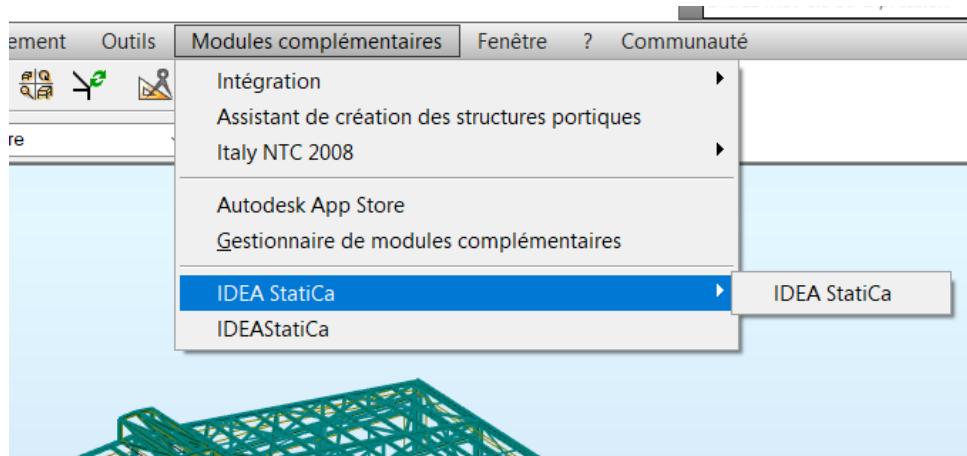


FIGURE 4.1 – Module complémentaire : Exportation vers IDEA StatiCa

Grâce à l’installation de l’extension entre RSA et IDEA StatiCa, les nœuds de la structure ainsi que les efforts correspondants peuvent être exportés directement. Les sections, matériaux et charges sont transférés automatiquement, évitant la ressaïsie manuelle et réduisant les risques d’erreurs.

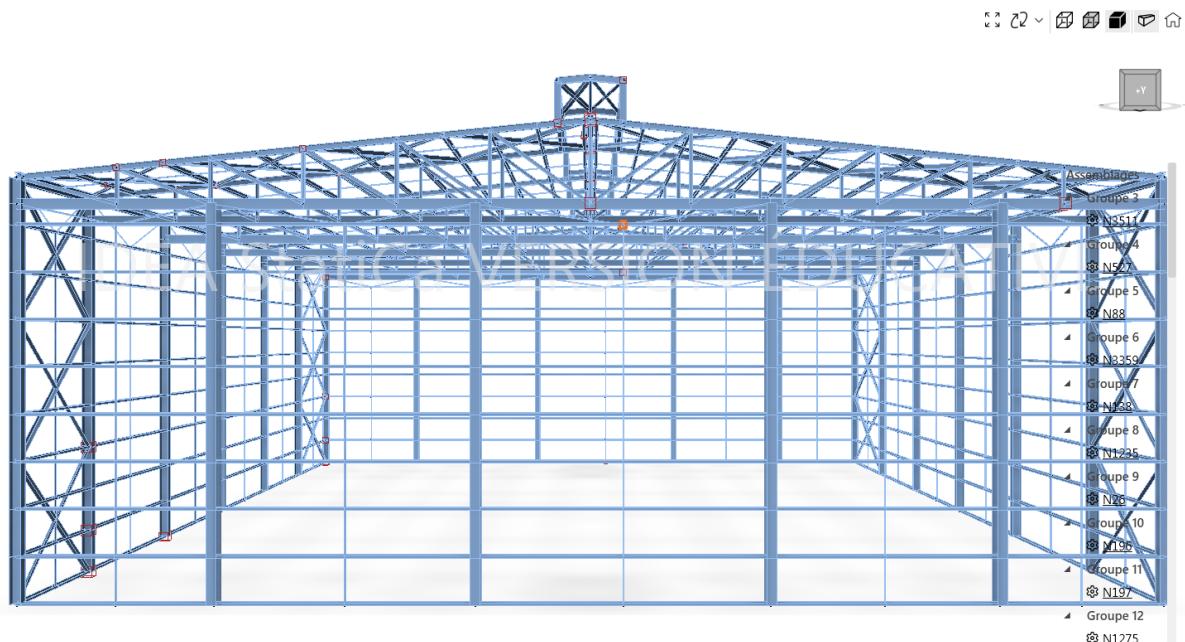


FIGURE 4.2 – Résultat d’exportation vers IDEA StatiCa

3. Vérification des assemblages dans IDEA StatiCa :

Dans IDEA StatiCa, le modèle importé est complété par la définition des plaques, boulons et soudures. L’assemblage est ensuite analysé par la méthode CBFEM(Component Based Finite Element Method). et vérifié automatiquement selon l’Eurocode 3, afin d’évaluer sa résistance, sa rigidité et sa ductilité.

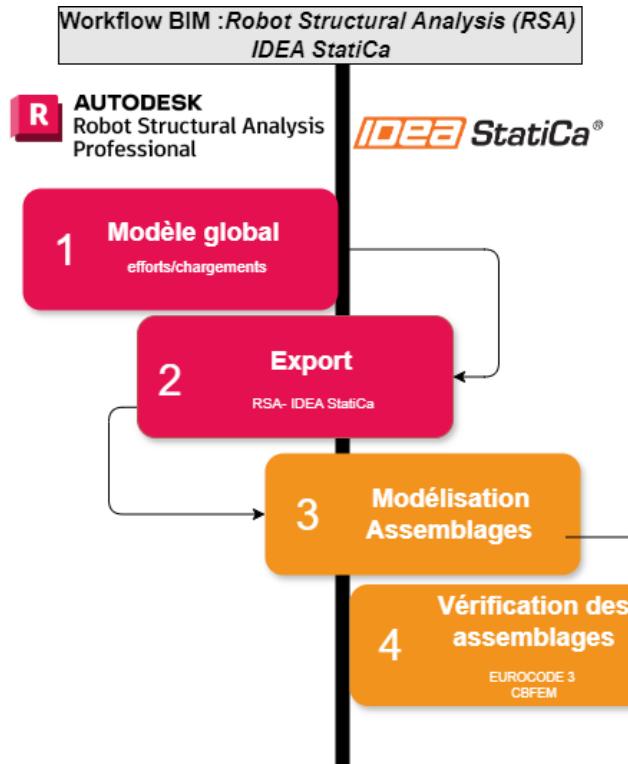


FIGURE 4.3 – RSA - IDEA StatiCa

La figure 4.3 ci-dessus résume les étapes du workflow RSA-IDEA StatiCa

L’interconnectivité RSA–IDEA StatiCa illustre parfaitement les avantages d’un processus BIM collaboratif : cohérence, fiabilité et efficacité.

4.3 Calcul et vérification sur IDEA StatiCa



FIGURE 4.4 – Logo IDEA StatiCa

IDEA StatiCa est un logiciel innovant dédié à la conception, l’analyse et la vérification des structures en acier et en béton armé selon les normes internationales (Eurocodes, AISC, etc.).

Pour les assemblages métalliques, il permet de :

- Concevoir et vérifier tout type de nœuds ou connexions (poutre-poteau, poutre-poutre, treillis, contreventement, etc.).
- Utiliser la méthode avancée CBFEM (Component-Based Finite Element Method), qui combine la précision des éléments finis avec la simplicité des

modèles composants.

- Vérifier la résistance et la rigidité des assemblages, en tenant compte de toutes les composantes : soudures, boulons, platines, raidisseurs, goussets... .
- Interpréter facilement les résultats grâce à des rapports automatiques, détaillés et conformes aux normes

4.4 Les modes d'assemblage

Les modes d'assemblages des structures métalliques peuvent être classés selon leur comportement global (articulés, semi-rigides ou encastrés), qui conditionne la transmission des efforts, et selon leur mode de réalisation (assemblages boulonnés ou soudés).

4.4.1 Les encastrements

Encastrement Poteau / Poutre

L'assemblage étudié a été modélisé et vérifié à l'aide du logiciel **IDEA StatiCa**. Les résultats de l'analyse montrent que l'assemblage satisfait aux critères de résistance et de stabilité.



B82-Ame 1: Section transversale HEB360, Matériau S 275, Épaisseur 12.5 mm

FIGURE 4.5 – Assemblage poutre poteau

Avec raidisseurs :



FIGURE 4.6 – Assemblage poutre poteau avec raidisseurs

les raidisseurs améliorent la rigidité et la sécurité de l’assemblage. L’ajout des raidisseurs (horizontaux) permet de redistribuer les efforts dans l’âme du poteau.

Amélioration notable de la rigidité et de la sécurité au flambement local.

Les soudures et boulons sont moins sollicités (charges mieux transférées).

Assemblage plus robuste mais plus coûteux et complexe à réaliser.

Liaison poteau / lisse UPN

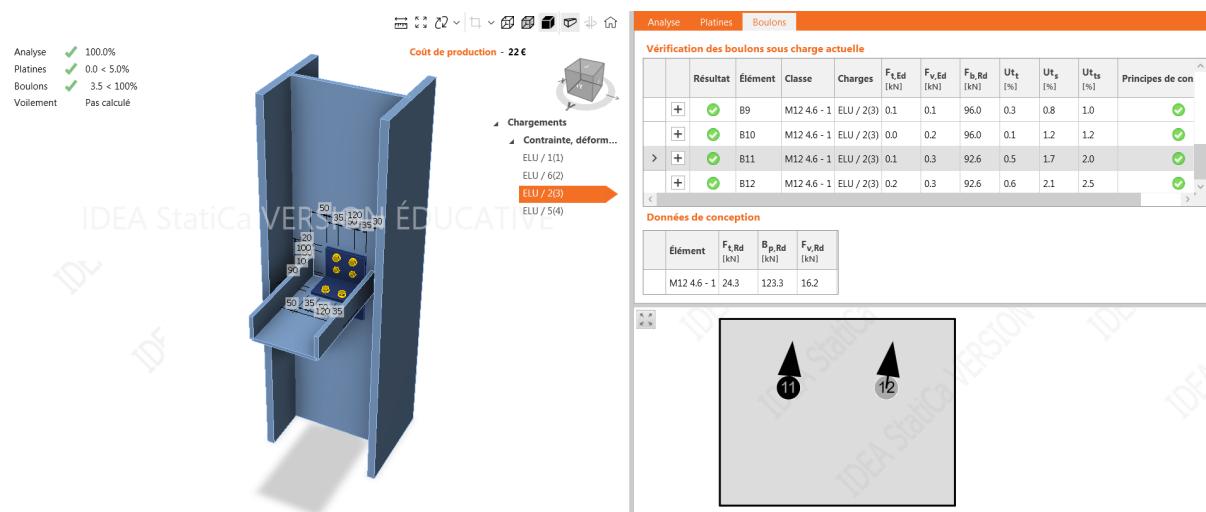


FIGURE 4.7 – Liaison poteau lisse

L’assemblage présenté correspond à une liaison poteau lisse, modélisée avec IDEA StatiCa.

La vérification des boulons sous la charge actuelle montre que toutes les valeurs d’efforts sont inférieures aux résistances de calcul, ce qui confirme la sécurité de l’assemblage. Ainsi, la conception satisfait aux exigences de l’Eurocode 3, garantissant la stabilité et la fiabilité de la connexion.

Encastrement Poutre / Poutre

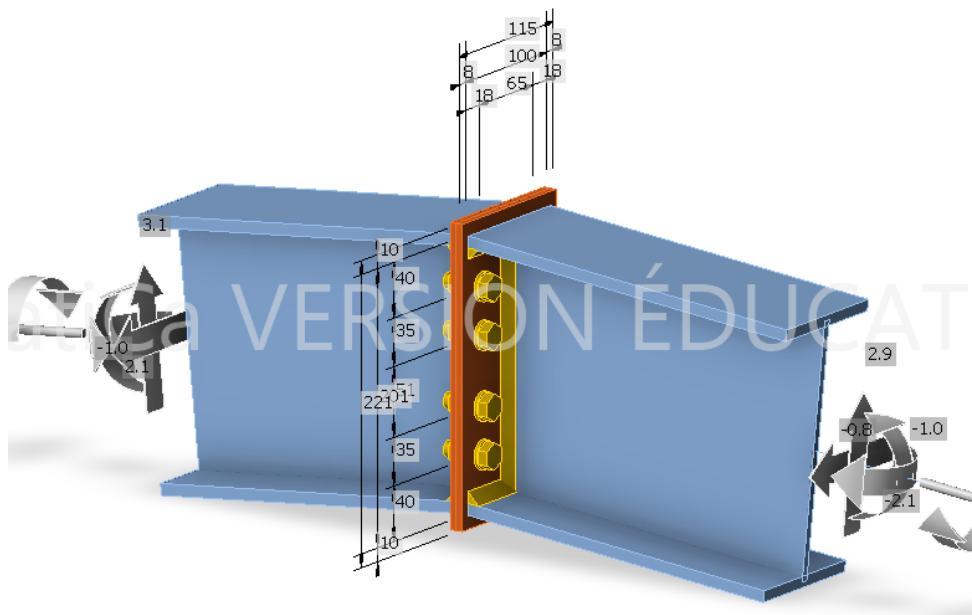


FIGURE 4.8 – Encastrement poutre / poutre

D'après l'analyse 4.9 : L'assemblage poutre-poutre est sûr et conforme aux combinaisons ELU testées. Les zones en vert montrent que la platine d'âme et les liaisons boulonnées fonctionnent correctement.

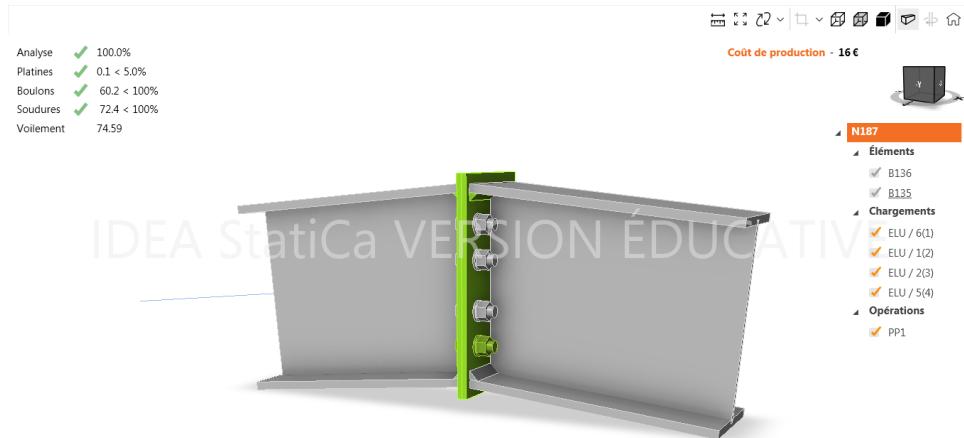


FIGURE 4.9 – Encastrement poutre / poutre

Positionnement des trous de boulons Cette figure 4.10 montre les positions des trous sur la platine .

- Les entraxes (P1 ,P2) :
- Les pinces (e1 , e2) :

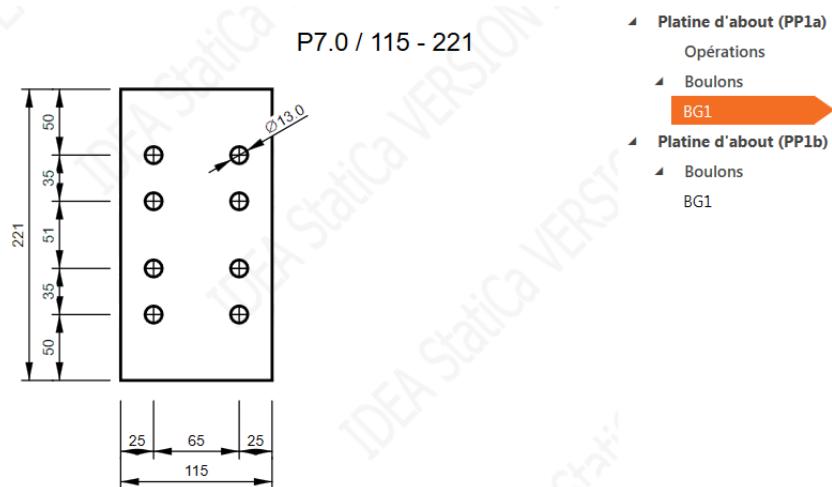


FIGURE 4.10 – Disposition des trous

Encastrement Pied de poteau.

L'encastrement du pied de poteau par platine consiste à fixer la base du poteau métallique sur une fondation en béton à l'aide d'une platine

d'appui. Cette platine est ancrée par des boulons de fondation .

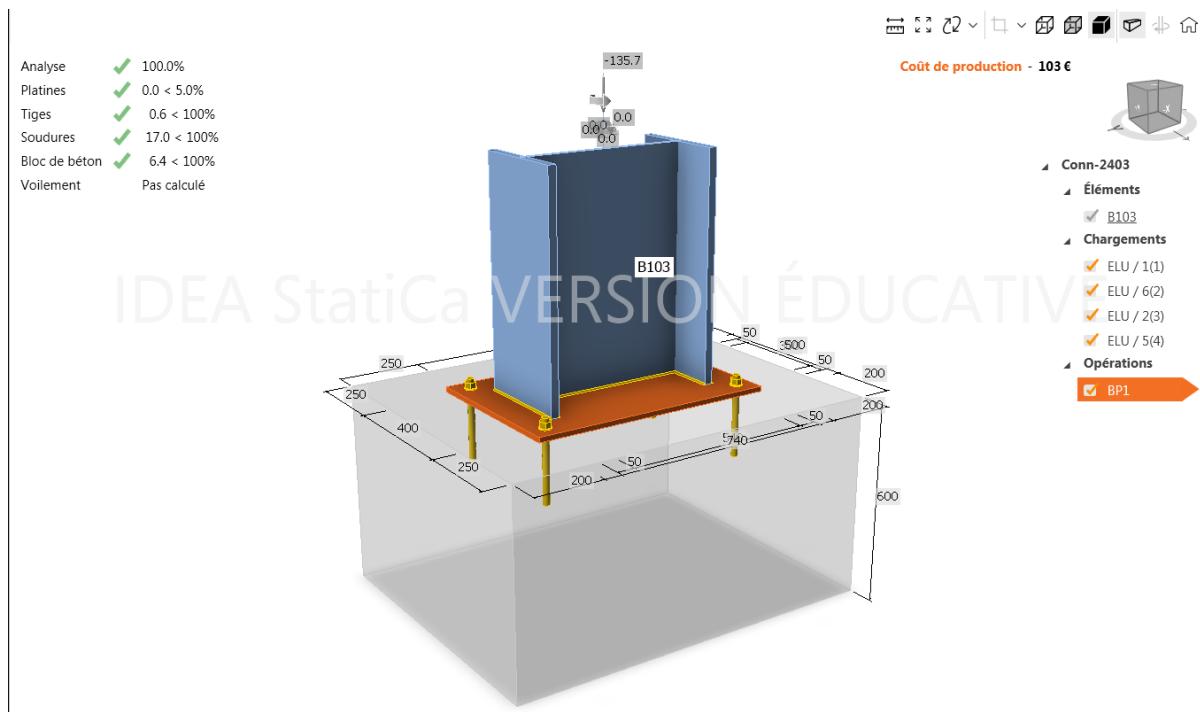


FIGURE 4.11 – Encastrement Pied de poteau

L’assemblage 4.11 représente un encastrement de pied de poteau réalisé à l’aide d’une platine de base ancrée dans le massif en béton par des goujons. Les résultats de vérification indiquent que les efforts sont bien repris par les soudures, les boulons et le béton, avec des taux d’utilisation largement inférieurs à 100%. Ainsi, la connexion est jugée sûre et conforme .

4.4.2 Rigidité des assemblages

En ce qui concerne les principes de dimensionnement des assemblages eux-mêmes, il est nécessaire de relever l’importance de certaines de leurs caractéristiques, à savoir :

- Leur rigidité.
- Leur résistance.
- Leur capacité de rotation.

4.5 Conclusion

L’étude des assemblages réalisée à l’aide d’IDEA StatiCa a permis de vérifier avec précision la sécurité et l’efficacité des liaisons métalliques. Les résultats obtenus montrent que l’ensemble des assemblages modélisés respecte les critères de résistance et de stabilité exigés par les normes en vigueur.

L'analyse comparative entre plusieurs configurations a mis en évidence l'influence du nombre de boulons, de leur entraxe ainsi que des dimensions de la platine sur la répartition des efforts et le coût global de la solution. Bien que certaines variantes soient légèrement plus économiques et d'autres plus simples à exécuter en atelier, toutes assurent un comportement satisfaisant vis-à-vis des sollicitations appliquées.

Ainsi, l'utilisation combinée de RSA pour l'analyse globale et d'IDEA StatiCa pour la vérification locale des assemblages constitue une approche fiable, intégrée et optimisée. Elle garantit la cohérence entre le calcul global de la structure et la conception détaillée des assemblages, tout en offrant la possibilité d'optimiser les choix techniques selon les critères de sécurité, d'économie et de constructibilité.

Chapitre 5

Vérification , Calcul et Optimisation

5.1 Introduction

Le dimensionnement d'une structure repose sur des calculs et vérifications garantissant la conformité aux Eurocodes. Il inclut le contrôle des contraintes dans les matériaux, des déformations aux ELS, ainsi que des phénomènes d'instabilité (flambement, déversement, voilement). Les performances aux ELU sont également évaluées pour assurer la sécurité de l'ouvrage.

5.2 Vérifications

Les vérifications menées concernent à la fois les contraintes (ELU) et les déplacements (ELS).

5.2.1 Contraintes

Concernant les contraintes, les valeurs maximales relevées en traction et en compression restent inférieures à la résistance de calcul de l'acier S275 ($f_{yd} = 275$ MPa). Le taux d'utilisation le plus élevé en compression atteint environ 84 %, ce qui reste acceptable.

	S max [MPa]	S min [MPa]	S max(My) [MPa]	S max(Mz) [MPa]	S min(My) [MPa]	S min(Mz) [MPa]	Fx/Ax [MPa]
MAX	130.77	130.77	61.89	53.99	3.52	2.61	130.77
Barre	521	521	4465	177	4461	4466	521
Noeud	348	348	22	50	426	22	348
Cas	ELU/1	ELU/1	ELU/1	ELU/1	ELU/1	ELU/1	ELU/1
MIN	-229.57	-229.57	-0.00	-4.03	-160.91	-53.99	-229.57
Barre	1279	1279	95	4455	4465	177	1279
Noeud	121	121	132	244	22	50	121
Cas	ELU/1	ELU/1	ELU/4	ELU/1	ELU/1	ELU/1	ELU/1

FIGURE 5.1 – contraintes

5.2.2 Déplacements

Le tableau des déplacements montre que les flèches maximales horizontales et verticales restent inférieures aux limites prescrites pour une

ossature métallique de type industriel, garantissant la stabilité globale et le confort d'exploitation.

	UX [cm]	UY [cm]	UZ [cm]	RX [Deg]	RY [Deg]	RZ [Deg]
MAX	2.1	0.3	0.0	0.43	0.51	0.30
Noeud	174	197	104	22	3361	492
Cas	ELS/1	ELS/1	ELS/1	ELS/1	ELS/1	ELS/1
MIN	-0.9	-0.8	-8.5	-0.77	-0.51	-0.31
Noeud	1246	531	308	241	450	391
Cas	ELS/1	ELS/2	ELS/1	ELS/1	ELS/1	ELS/1

FIGURE 5.2 – déplacement

Ainsi, les résultats obtenus confirment que la structure satisfait les exigences aux états limites ultimes (ELU) et aux états limites de service (ELS), assurant la sécurité et la fonctionnalité de l'ouvrage.

Phénomènes d'instabilité

Les phénomènes d'instabilité regroupent plusieurs modes de ruine pouvant réduire la résistance des éléments structuraux :

- **Le flambement** : perte de stabilité globale d'un élément comprimé élancé.
- **Le déversement** : instabilité affectant les semelles comprimées des pièces fléchies, conduisant à une torsion latérale.
- **Le voilement** : concerne principalement les âmes des pièces fléchies, en raison de leur faible épaisseur par rapport à leur hauteur.
- **Le voilement local** : déformation des âmes ou parois minces des profilés sous compression due aux charges axiales ou à la flexion.

Ces instabilités, liées aux proportions géométriques des sections, doivent être vérifiées afin de garantir la sécurité et la rigidité des structures.

5.3 Calcul

5.3.1 Calcul et vérification manuelle des assemblages boulonnés : Excel (VBA)

Dans le cadre de ce projet, les calculs et vérifications manuelles des assemblages métalliques ont été réalisés à l'aide de feuilles Excel spécialement développées. Ces outils interactifs, enrichis par du code VBA, permettent d'automatiser l'application des formules de dimensionnement conformément aux prescriptions de l'Eurocode 3 [3]..

Fonctionnalités principales :

- Vérification complète des assemblages par boulons :
 - Cisaillement pur ;
 - Traction pure ;
 - Cisaillement et traction combinés ;
 - Résistance au glissement ;
 - Pression diamétrale sur les âmes et semelles.
- Intégration des différents types de boulons (ordinaires et HR) avec leurs caractéristiques mécaniques.
- Application stricte des règles de l'Eurocode 3 afin de garantir la conformité réglementaire des résultats.
- Prise en compte des sollicitations réelles issues du modèle numérique (efforts M , V , N) ainsi que du positionnement géométrique des trous (p_1 , p_2 , e_1 , e_2 , etc.).
- Intégration automatique des données géométriques des profilés (dimensions h , b , t_w , t_f , ...) directement depuis le Catalogue Européen.
- Génération automatique d'un rapport clair et structuré au format PDF, facilitant la sauvegarde et le partage des résultats de calcul.

Étude de cas pratique : Afin d'illustrer le fonctionnement et la pertinence de l'outil, un cas d'exemple a été étudié :

l'assemblage poutre-poteau par platine.

Les vérifications ont porté sur :

- La résistance des boulons sous sollicitations combinées ;
- Le contrôle des plats et de la platine ;
- L'indication automatique des renforts nécessaires (raidisseurs, fourrures d'âme).

Apports de l'outil Excel : Cet outil constitue un support essentiel pour :

- Vérifier rapidement la conformité d'un assemblage ;
- Comparer plusieurs solutions de conception ;
- Gagner du temps dans les calculs répétitifs et réduire les erreurs de manipulation.

Générer PDF

Réinitialiser		Données			Détails du calcul			Résultats & Vérifications					
		Propriétés des boulons			Solicitations			M(kN.m)	V(kN)	N(kN)	Nmax		
		Boulon ordinaire	S235	Partie filetée				320	80	80	16		
		Caractéristiques géométriques			Effort de cisaillement par boulon à l'ELU Fv, Ed			20.00 kN	Résistance au cisaillement Fv,RD				
		Diamètre du Boulon (mm)	16		Effort de traction de calcul par boulon à l'ELU Ft, Ed			16	Résistance : pression diamétrale FB,RD				
		Sections	A (mm ²)	201					98.73 kN				
			As (mm ²)	157					Conforme				
		Caractéristiques mécaniques			Positionnement des trous de boulons (mm)				Résistance à la traction Ft,RD				
		Classe du Boulon	4.6		d0	18.00	P1,0	a	0.65	37.68 kN			
		f _b (Mpa)	240		P1	60	P1,i	beff	282.50	Conforme			
		f _{ub} (Mpa)	400		P2		e3	beff(P)	80	Résistance à la traction +cisaillement			
		f _u (Mpa)	340		e1	35	e4	eg	10	0.64			
		f _y (Mpa)	235		e2	65	t			Conforme			
		Paramètres			Nb lignes	2	Nb colonnes	2	Nb boulons	4	Boulon ordinaire		
		m : Nb de surfaces de cisaillement	2								Vérifié		
		classes de boulons HR	HR1-HR10.9								Boulon HR		
		classes de surfaces	A								Vérifié		
		ζ	0.5								Résistance au glissement par boulon HR F _s ,RD		
		K _s : Nombre d'interfaces de frottement	1								Conforme		
		γM_b	1.25								Résistance à la traction et au cisaillement F _s ,RD		
		γM_S	1.25								Conforme		
		γM_0	1								<input checked="" type="checkbox"/> Besoin d'un raidisseur		
		Calcul et dimensionnement des boulons ordinaires :									<input checked="" type="checkbox"/> Besoin d'un raidisseur		
		assemblages sollicités simultanément au cisaillement et traction									<input checked="" type="checkbox"/> Besoin d'une forrure d'ame		
		Calcul et dimensionnement des boulons HR :											
		assemblages résistant au glissement											

FIGURE 5.3 – Vérification du Boulonnage selon l'EUROCODE 3 sur Excel

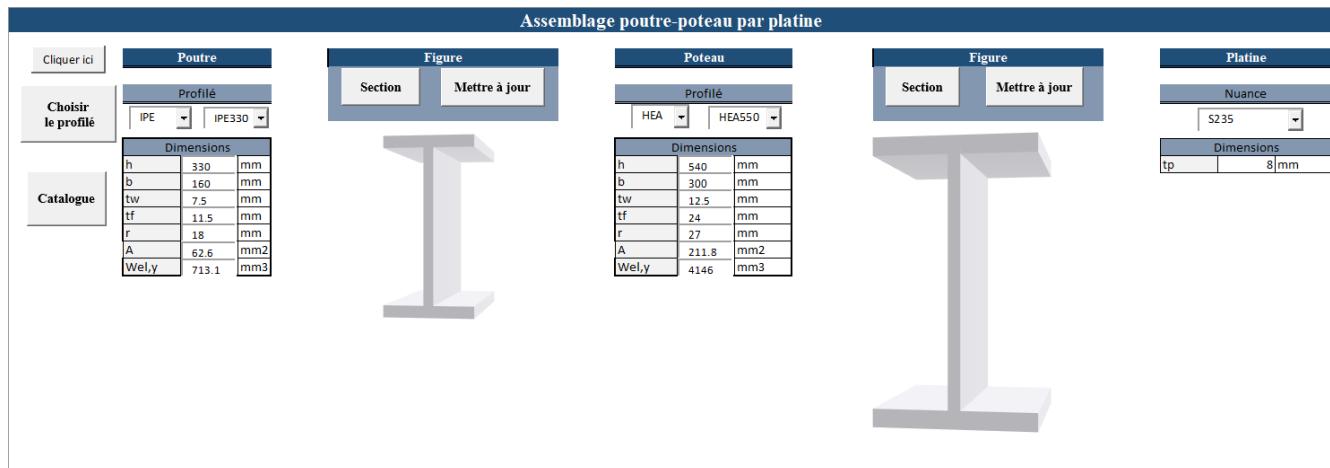


FIGURE 5.4 – Vérification du Boulonnage selon l'EUROCODE 3 sur Excel

Un bouton « **Lancer le calcul** » permet d'exécuter le calcul et d'afficher les différents paramètres ainsi que la configuration de l'assemblage poutre-poteau par platine.

Un second bouton « **Vérifier l'assemblage** » réalise la vérification des boulons (ordinaires et HR) et présente les résultats sous forme de visualisation colorée : **vert** pour un assemblage conforme et **rouge** pour un assemblage non conforme.(Voir figure :5.3)

5.3.2 Etude du vent selon NV 65 [1]

Données

Le tableau 5.1 présente les données de base nécessaires à l'évaluation des actions du vent selon les règles NV65. Ces informations constituent les

paramètres initiaux du calcul et permettent de définir le contexte d'exposition de l'ouvrage.

TABLE 5.1 – Caractéristiques du vent selon NV65

Paramètre	Donné
Site	Exposé
Type du vent	Normal
Région	III
Construction	Fermée

Le site est classé comme exposé, le vent pris en compte est le vent normal et la région retenue est la région III. La construction est considérée comme fermée, sans grandes ouvertures influençant les pressions internes. Ces paramètres servent de base au calcul des charges de vent.



FIGURE 5.5 – Régions du vent en Tunisie

La carte des vents en Tunisie, issue des règles NV65, divise le territoire en plusieurs régions caractérisées par des vitesses de référence distinctes. L'emplacement du projet, situé à Gafsa, se trouve en région III, zone soumise à des vitesses de vent relativement élevées.

Généralités et définitions

On considère que le vent possède une direction moyenne horizontale, mais qu'il peut souffler de n'importe quel côté de l'ouvrage. L'action du vent sur une construction, ainsi que sur chacun de ses éléments, est influencée par plusieurs paramètres :

- La vitesse du vent ;
- La catégorie de la construction et ses proportions globales ;
- La configuration locale du terrain (nature et rugosité du site) ;

- La position de l'ouvrage dans l'espace (reposant sur le sol ou surélevé) ;
- La perméabilité des parois, définie par le rapport entre la surface des ouvertures et la surface totale de la paroi.

Détermination de la pression de calcul du vent.

La pression statique de calcul du vent est donnée par la formule suivante (D'après **N.V. 65**)

$$P = q_h k_s k_m \delta C_r$$

avec :

q_h : pression dynamique agissant à la hauteur h .

k_s : coefficient de site.

k_m : coefficient de masque.

δ : coefficient de réduction.

C_r : coefficient résultant.

Pour une hauteur h (en mètres) au-dessus du sol, la pression dynamique q_h est donnée par la formule suivante :

$$q_h = 2.5 \times \frac{h + 18}{h + 60} q_{10}$$

Valable pour $h \leq 500$ m (NV 65, art. 1.241).

Pression dynamique de base q_{10}

TABLE 5.2 – Pression dynamique de base (daN/m^2)

	normale	extrême
Région 1	50,0	87,5
Région 2	70,0	122,5
Région 3	90,0	157,5

D'après le tableau suivant 5.2, la pression dynamique de référence est :

$$q_{10}(\text{normale, Région III}) = 90 \text{ daN/m}^2$$

Ainsi on obtient :

$$q_H = 100.74 \text{ daN/m}^2$$

Remarques

1. Le rapport de la pression dynamique extrême à la pression dynamique de base normale est égal à :

$$V_e = 1.75 V_n \quad (\text{NV.65, art.1.22})$$

Le site officiel dlubal [4] fournit également les valeurs de vitesses et pressions de vent en Tunisie : v_n, v_e, q_n, q_e .

2. Les valeurs de la pression dynamique de base sont obtenues à partir de la formule de Bernoulli :

$$q = \frac{1}{2} \rho v^2 \simeq \frac{v^2}{16.3} \quad (\text{daN/m}^2)$$

avec v : vitesse du vent (m/s).

Effet de site

Le coefficient de site k_s est donné par les valeurs du tableau suivant 5.3

TABLE 5.3 – Coefficient de site selon la zone géographique

	Zone 1	Zone 2	Zone 3
Site protégé	0,80	0,80	0,80
Site normal	1,00	1,00	1,00
Site exposé	1,35	1,30	1,25

Dans notre cas notre site est exposé et dans la région III donc

$$k_s = 1.25$$

Effet de masque

On prend généralement un coefficient de masque

$$k_m = 1$$

Effet de dimension

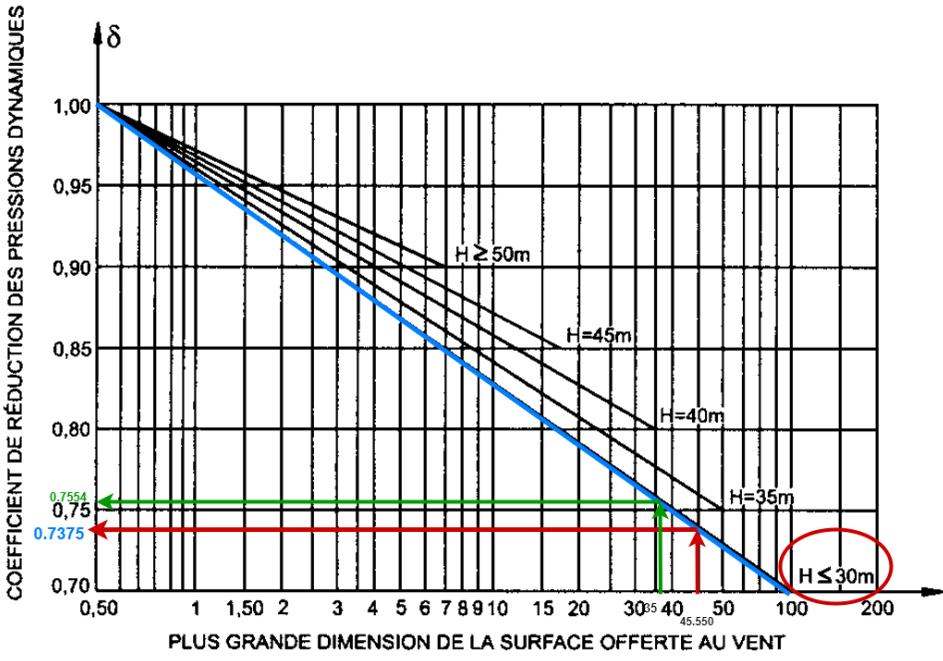


FIGURE 5.6 – Coefficient de réduction D

D'après la figure 5.6 le Coefficient de réduction δ des pressions dynamiques est :

-Vent sur Sa : pour la grande dimension $a=45.550\text{m}$ et $H < 30\text{ m}$ on trouve :

$$\boxed{\delta(a) = 0.7375}$$

-Vent sur Sb : pour la grande dimension $b=35\text{m}$ et $H < 30\text{ m}$ on trouve :

$$\boxed{\delta(b) = 0.7554}$$

La totalité des réductions autorisées par les règles (effet de masque et effet de dimension) ne doit en aucun cas dépasser 33%.

On a :

$$\delta(a) = 0.7375, \quad K_m = 1$$

$$1 - K_m \cdot \delta(a) = 1 - 0.7375 = 0.2625 \approx 26\% < 33\%$$

Condition vérifiée

et

$$\delta(b) = 0.7554, \quad K_m = 1$$

$$1 - K_m \cdot \delta(b) = 1 - 0.7554 = 0.2446 \approx 24\% < 33\%$$

Condition vérifiée

Réduction maximale des pressions dynamiques de base et valeurs limites des pressions dynamiques corrigées

les valeurs de la pression dynamique corrigée seront bornées à celles données au tableau suivant :

TABLE 5.4 – Valeurs limites des pressions dynamiques corrigées (daN/m^2)

Type de pression dynamique	Valeurs maximales	Valeurs minimales
Normale corrigée	170	30
Extrême corrigée	297,5	52,5

Amplification dynamique

Dans le cas où le vent est supposé comme étant statique

$$\beta = 1$$

Classement des constructions en catégories

Notre bâtiment se classe comme construction éloignée du sol comme le montre la figure 5.7 : avec $h=16.05\text{m}$ et $e=7.2\text{m}$: $e < h$

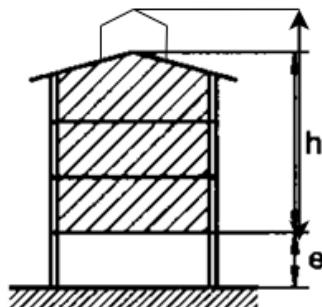


FIGURE 5.7 – position dans l'espace

Perméabilité au vent de μ

Construction fermée :

$$\mu \leq 5\%$$

Direction du vent :

Pour une direction donnée du vent, les faces de la construction situées du côté du vent sont dites "au vent" les autres y compris les faces pour lesquelles le vent est rasant, sont dites "sous vent".(Voir figure 5.8)

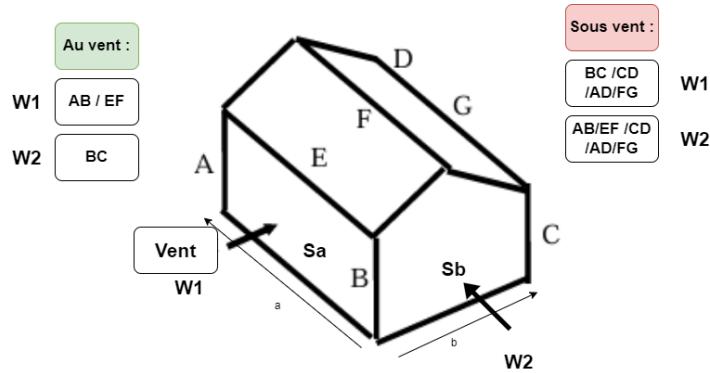


FIGURE 5.8 – Au vent / Sous vent

Constructions à façades parallèles présentant un décrochement en élévation :

Les constructions à façades parallèles présentant un décrochement en élévation peuvent générer des concentrations locales de vent. Les lanterneaux, situés au sommet, doivent être dimensionnés pour résister à ces effets.

Constructions à façades parallèles présentant un décrochement en élévation

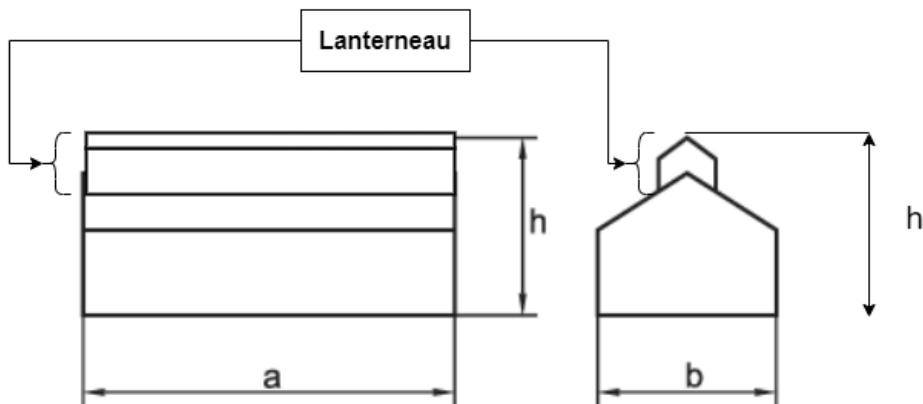


FIGURE 5.9 – Constructions à façades parallèles présentant un décrochement en élévation

Coefficient résultant

Le coefficient de pression résultant C_r est déterminé comme suit :

$$C_r = C_e - C_i$$

où :

- C_e : coefficient représentant les actions extérieures,
- C_i : coefficient représentant les actions intérieures.

Constructions prismatiques à base quadrangulaire

Pour une direction de vent donnée, le rapport de dimensions correspond à

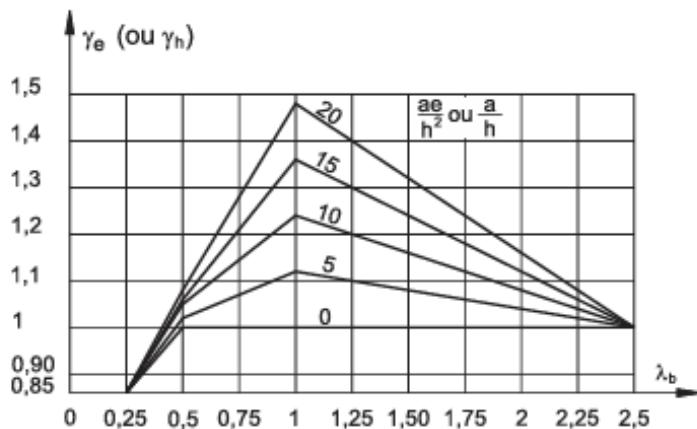
la hauteur h de la construction divisée par la dimension horizontale de la face exposée.

$$\lambda_a = \frac{h}{a} = 16.05/45.550 = 0.352$$

$$\lambda_b = \frac{h}{b} = 16.05/35 = 0.458$$

1. Vent long pon W1 (vent sur S_a)

Détermination du coefficient γ_e selon le "Diagramme R-III-8" [5]



Constructions prismatiques à base quadrangulaire éloignées du sol.

$\lambda_a \leq 1$ et $\lambda_b < 2,5$. Vent normal à S_a .

Figure R-III-8

FIGURE 5.10 – Détermination du coefficient γ_e

Pour un vent normal à la face S_a , le coefficient γ_e (qui correspond au cas où $e < h$) est lu sur le diagramme de la figure R-III-8, en fonction de λ_b et du rapport $\frac{a \cdot e}{h^2}$.

$$\frac{a \cdot e}{h^2} = \frac{45.55 \times 7.20}{(16.05)^2} = \frac{327.96}{257.6} \approx 1.27$$

On a

$$\begin{cases} \lambda_a < 0.5 \\ \lambda_b = 0.458 \end{cases}$$

Selon la figure R-III-8, le coefficient γ_e vaut 0.98.

$$\boxed{\text{Vent sur } S_a : \gamma_e = 0.98}$$

Actions extérieures

Parois verticales :

Les coefficients de pression extérieure c_e , dans le cas d'un vent normal, applicables aux parois verticales, sont données par :

— Face au vent :

$$C_e = +0,8 \quad (\text{quel que soit } \gamma_e)$$

— Face sous le vent :

$$C_e = -(1,3\gamma_e - 0,8)$$

Toitures :

Pour la détermination des coefficients de pression extérieure c_e applicables aux toitures uniques, on distingue deux cas :

● **Vent normal aux génératrices** : On a $f = 1m \leq h/2 = 8.025m$, alors cette valeur dépend de α et de γ_e .

Détermination du coefficient "Ce" pour des toitures à un ou plusieurs versants plans selon le "Diagramme R-III-6"

Diagramme R-III-6
Détermination du coefficient c_e pour des toitures à un ou plusieurs versants plans

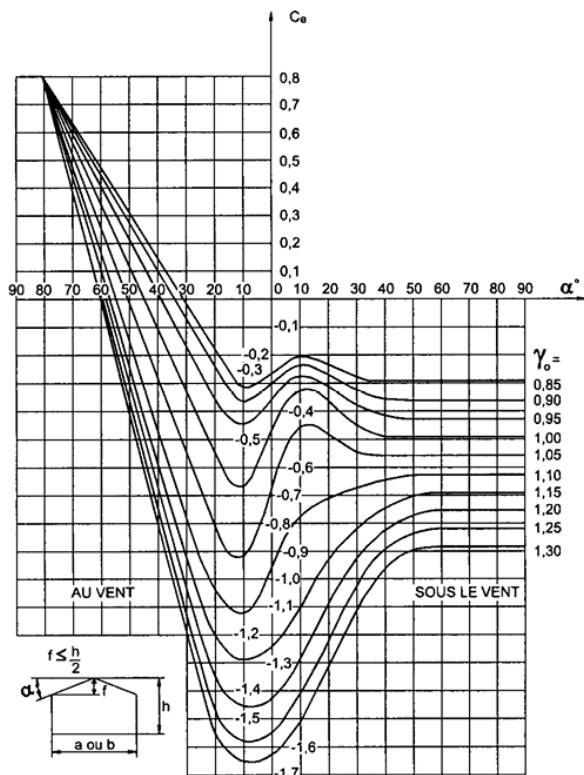


FIGURE 5.11 – Diagramme R-III-6

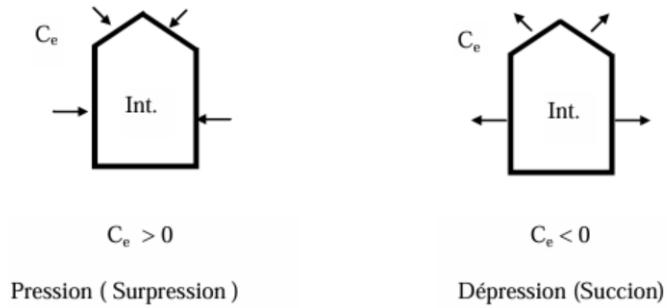


FIGURE 5.12 – Convention de signes

Le tableau 5.9 ci-dessous regroupe les résultats de C_e trouvées respectivement pour les parois verticales et la toiture.

TABLE 5.5 – Coefficients de pression pour les parois et la toiture

Élément	Face au vent	Face sous le vent
Parois verticales	+0.8	-0.474
Toiture	-0.55	-0.32

Actions intérieures

Pour les constructions fermées (perméabilité des parois $\mu \leq 5$), on applique simultanément sur les faces intérieures de tous les compartiments :

— soit une surpression avec :

$$c_i = +0.6 (1.8 - 1.3 \gamma_e)$$

— soit une dépression avec :

$$c_i = -0.6 (1.3 \gamma_e - 0.8)$$

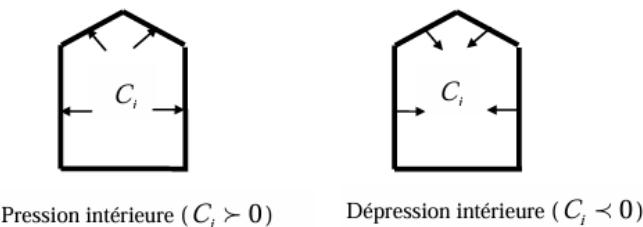


FIGURE 5.13 – Convention de signe Ci

TABLE 5.6 – Actions intérieures

Type	Coefficient
Surpression (C_i)	+0.3156
Dépression (C_i)	-0.2844

Coefficients de pression résultants C_r ;

Règles de correction :

- si $-0.30 \leq c_r \leq 0$, alors on prend $c_r = -0.30$,
- si $0 \leq c_r \leq +0.30$, alors on prend $c_r = +0.30$.

TABLE 5.7 – Coefficients de pression résultants (W1)

Coefficient résultant $C_r = C_e - C_i$			
Parois verticales			
	Face au vent	Face sous le vent	Correction
Surpression	0.4844	-0.7896	0.4844 / -0.7896
Dépression	1.0844	-0.1896	1.0844 / -0.30
Toitures			
	Face au vent	Face sous le vent	Correction
Surpression	-0.8656	-0.6356	-0.8656 / -0.6356
Dépression	-0.2656	-0.0356	-0.30 / -0.30

2. Calcul de l'action du vent W1

La pression exercée par le vent sur une paroi est calculée à l'aide de la formule suivante, dans laquelle interviennent les différents coefficients déterminés précédemment.

$$P(a) = q_h k_s k_m \delta(a) C_r(a)$$

Afin d'évaluer les effets les plus défavorables du vent sur une paroi, il convient de retenir les coefficients de pression présentant les valeurs absolues les plus élevées. Les coefficients ainsi sélectionnés sont récapitulés dans le tableau 5.8 ci-après.

TABLE 5.8 – Calcul de l'action du vent W1 :daN/m²

Parois verticales		
	Face au vent	Face sous le vent
Surpression	44.986	73.33
Dépression	100.71	27.861
Toitures		
	Face au vent	Face sous le vent
Surpression	80.388	59.028
Dépression	27.861	27.861

Les charges de vent correspondantes sont :

- Charge de vent de soulèvement sur les toitures : $W \uparrow = 0.804 \text{ kN/m}^2$
- Charge de vent de pression sur les parois verticales : $W \downarrow = 1.007 \text{ kN/m}^2$

3. Vent pignon W2 (vent sur Sb)

Pour un vent normal à la face S_b , le coefficient γ_e est égal au coefficient γ_0 de la construction reposant sur le sol.

Détermination du coefficient γ_o selon le " Diagramme R-III-5"

Diagramme R-III-5
Détermination du coefficient γ_o

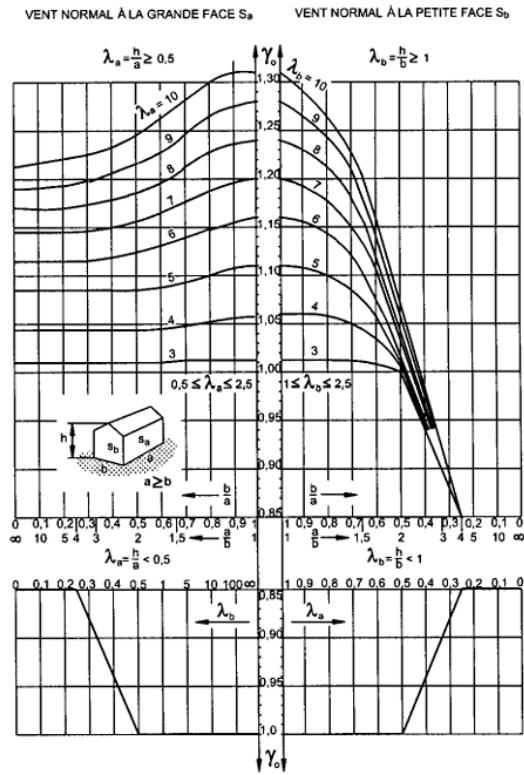


FIGURE 5.14 – Détermination du coefficient γ_o

On a

$$\begin{cases} \lambda_b = 0.458 < 1 \\ \lambda_a = 0.352 \end{cases}$$

Donc d'après le diagramme 5.14 :

Vent sur $S_b : \gamma_0 b = 0.92$

Actions extérieures

Parois verticales

Les coefficients de pression extérieure ce, dans le cas d'un vent normal, applicables aux parois verticales, sont données par :

— Face au vent :

$$C_e = +0,8 \quad (\text{quel que soit } \gamma_0 b)$$

— Face sous le vent :

$$C_e = -(1,3\gamma_0 b - 0,8)$$

Toitures

- vent parallèle aux génératrices :** On a $f \leq \frac{h}{2}$, alors c'est une fonction de α et de $\gamma_0 b$ (voir le diagramme R-III-6 avec $\alpha = 0$). **Détermination du coefficient "Ce" pour des toitures à un ou plusieurs versants plans selon le "Diagramme R-III-6"**

Le tableau 5.9 ci-dessous regroupe les résultats de Ce trouvées respectivement pour les parois verticales et la toiture.

TABLE 5.9 – Ce : Actions extérieures

Élément	Face au vent	Face sous le vent
Parois verticales	+0.8	-0.396
Toiture	-0.37	-0.28

Actions intérieures

Pour les constructions fermées (perméabilité des parois $\mu \leq 5$), on applique simultanément sur les faces intérieures de tous les compartiments :

- soit une surpression avec :

$$c_i = +0.6 (1.8 - 1.3 \gamma_0 b)$$

- soit une dépression avec :

$$c_i = -0.6 (1.3 \gamma_0 b - 0.8)$$

TABLE 5.10 – Actions intérieures

Type	Coefficient
Surpression (C_i)	+0.3624
Dépression (C_i)	-0.2376

Coefficients de pression résultants Cr

TABLE 5.11 – Coefficients de pression résultants (W2)

Coefficient résultant $C_r = C_e - C_i$		
Parois verticales		
	Face au vent	Face sous le vent
Surpression	0.4376	-0.7584
Dépression	1.0376	-0.1584
Toitures		
	Face au vent	Face sous le vent
Surpression	-0.7324	-0.6424
Dépression	-0.1324	-0.0424

4. Calcul de l'action du vent W2

La pression exercée par le vent sur une paroi est calculée à l'aide de la formule suivante, dans laquelle interviennent les différents coefficients déterminés précédemment.

$$P(b) = q_h k_s k_m \delta(b) C_r(b)$$

Afin d'évaluer les effets les plus défavorables du vent sur une paroi, il convient de retenir les coefficients de pression présentant les valeurs absolues les plus élevées. Les coefficients ainsi sélectionnés sont récapitulés dans le tableau 5.12 ci-après.

TABLE 5.12 – Calcul de l'action du vent W2 : daN/m² avec correction

Parois verticales			
	Face au vent	Face sous le vent	Correction
Surpression	41.62	72.142	-
Dépression	98.70	28.54	28.54 → 30
Toitures			
	Face au vent	Face sous le vent	Correction
Surpression	69.67	61.108	-
Dépression	28.54	28.54	28.54 → 30, 28.54 → 30

La valeur de la pression calculée P doit être vérifiée afin qu'elle reste comprise entre une valeur minimale de 30 daN/m² et une valeur maximale de 170 daN/m². Ainsi, on adopte les règles suivantes :

- Si $P < 30$, alors $P_{\text{corr}} = 30 \text{ daN/m}^2$.
- Si $30 \leq P \leq 170$, alors $P_{\text{corr}} = P$.
- Si $P > 170$, alors $P_{\text{corr}} = 170 \text{ daN/m}^2$.

On peut résumer cette correction à l'aide de la formule suivante :

$$P_{\text{corr}} = \min \left(\max(P, 30), 170 \right)$$

Les charges de vent correspondantes sont :

- Charge de vent de soulèvement sur les toitures : $W \uparrow= 0.697 \text{ kN/m}^2$
- Charge de vent de pression sur les parois verticales : $W \downarrow= 0.987 \text{ kN/m}^2$

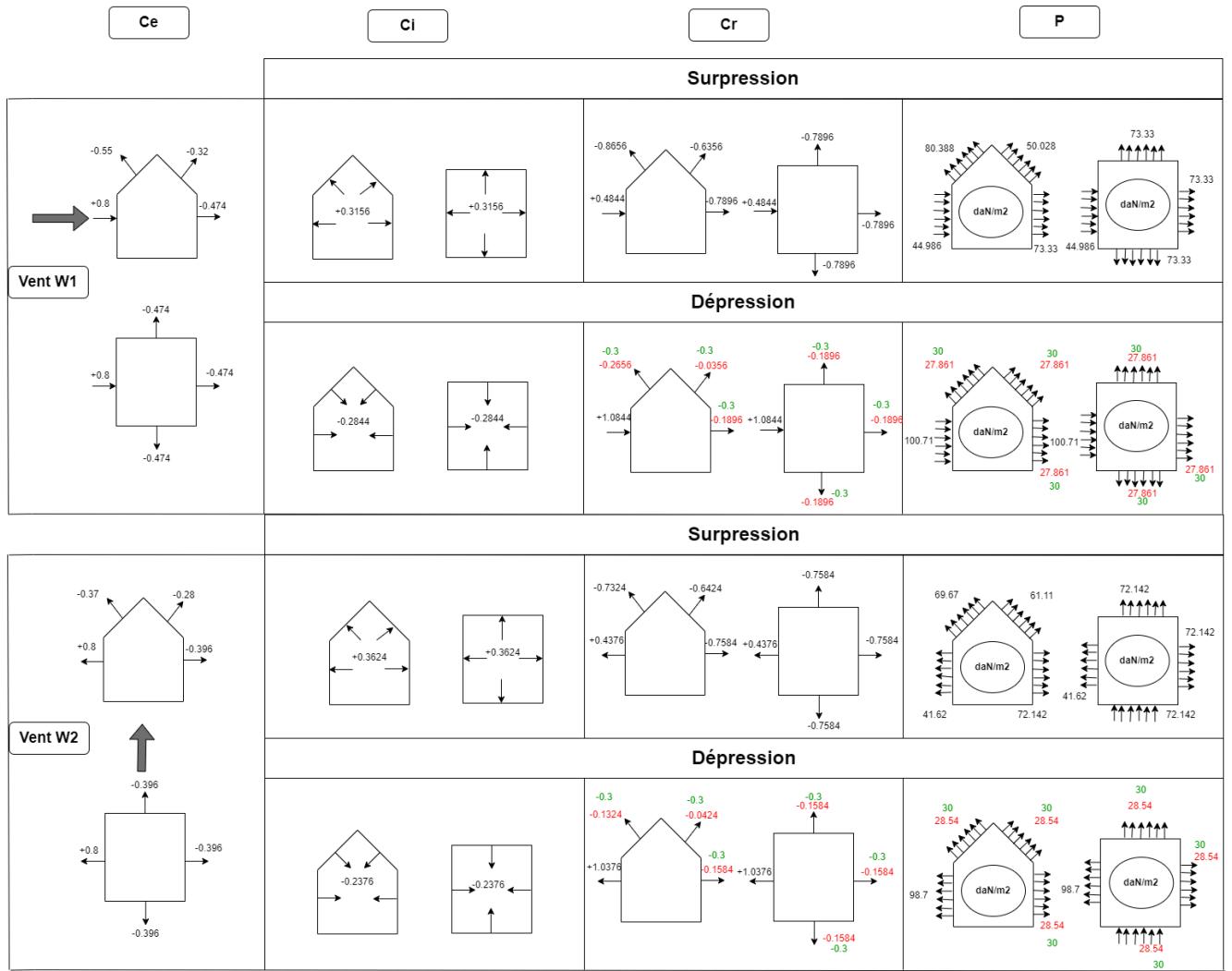


FIGURE 5.15 – Résultats de calcul du vent W1 et W2

Dans cette partie, la charge due au vent a été évaluée conformément à la norme NV65, afin d’identifier les sollicitations les plus défavorables qui serviront de base au dimensionnement de la structure.

5.3.3 Calcul et dimensionnement des Lisses

Dans cette section, l’objectif est de calculer manuellement les lisses afin de les dimensionner et de comparer ces résultats avec ceux obtenus par simulation numérique (*RSA*).

Évaluation des charges et surcharge

On choisit de dimensionner la lisse la plus sollicitée, en sélectionnant le vent le plus défavorable sur la façade long pon . Ainsi, $W1 = 1.007 \text{ kN/m}^2$. Poids propre des lisses (ou pannes) : G_{second} estimé à 0.1 kN/m .

TABLE 5.13 – Résumé des charges et combinaisons pour le dimensionnement des lisses

Type de charge / combinaison	Formule	Valeur (kN/m)
Charges permanentes	$G = (G_{\text{second}} + G_{\text{bard}}) \cdot e$	$G = (0.1 + 0.1) \cdot 1.4 = 0.28$
Surcharge (vent défavorable)	$V = W_1 \cdot e$	$V = 1.007 \cdot 1.4 = 1.41$
Combinaison ELU	$1.35 G + 1.5 V$	$1.35 \cdot 0.28 + 1.5 \cdot 1.41 = 2.49$
Combinaison ELS	$1 G + 1 V$	$0.28 + 1.41 = 1.69$

Principe de dimensionnement

Condition de résistance : Les lisses sont soumises à une flexion déviée sans effort normal, ce qui implique la vérification suivante :

$$\left(\frac{M_{sd,y}}{M_{pl,y}} \right)^{\alpha} + \left(\frac{M_{sd,z}}{M_{pl,z}} \right)^{\beta} \leq 1$$

avec $\alpha = 2$ et $\beta = 1$ (absence d'effort normal).

Condition de rigidité :

- Pour deux appuis :

$$f = \frac{5 q L^4}{384 E I_y} < f_{\text{adm}} = \frac{L}{200}$$

- Pour trois appuis (présence de lierne) :

$$f = \frac{5 q (L/2)^4}{384 E I_y} < f_{\text{adm}} = \frac{L}{200}$$

Détermination de la section des lisses

Cette figure 5.16 illustre les charges appliquées sur un lisse :

- le poids propre, qui comprend à la fois le poids du lisse et celui du bardage, représenté par des charges verticales descendantes ;
- la charge de vent W_1 , modélisée par une action horizontale.

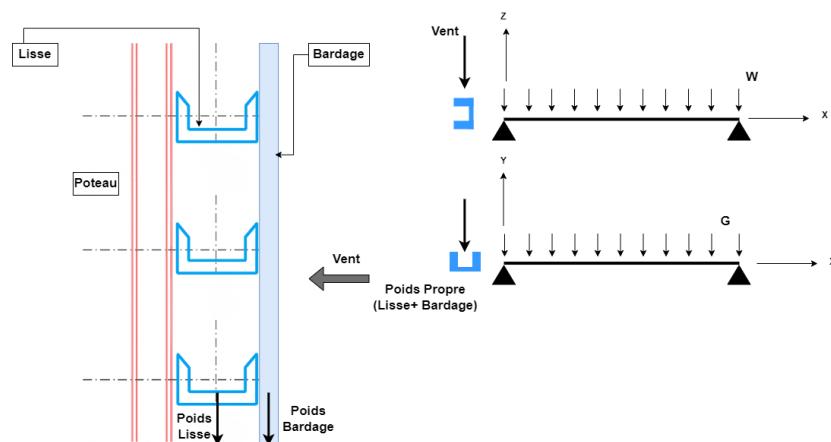


FIGURE 5.16 – Charges sur les lisses

Vérification du lisse

Moment fléchissant suivant $y - y$:

$$M_{y,sd} = \frac{1.5 \cdot V \cdot L^2}{8} = \frac{1.5 \cdot 1.41 \cdot 8^2}{8} = 16.92 \text{ kN.m}$$

Moment fléchissant suivant $z - z$:

$$M_{z,sd} = \frac{1.35 \cdot G \cdot L^2}{8} = \frac{1.35 \cdot 0.28 \cdot 8^2}{8} = 3.36 \text{ kN.m}$$

Critère de résistance

Suivant $y - y$:

$$M_{y,sd} \leq M_{pl,y} = \frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{\gamma_{M0}}$$

$$W_{pl,y} \geq \frac{\gamma_{M0} \cdot M_{y,sd}}{f_y} = 61.53 \text{ cm}^3$$

Suivant $z - z$:

$$M_{z,sd} \leq M_{pl,z} = \frac{W_{pl,z} \cdot f_y}{\gamma_{M0}}$$

$$W_{pl,z} \geq \frac{\gamma_{M0} \cdot M_{z,sd}}{f_y} = 12.22 \text{ cm}^3$$

Critère de rigidité

Déformation suivant z :

$$f_z = \frac{5 \cdot V \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I_y} < f_{adm} = \frac{L}{200}$$

$$I_y \geq \frac{200 \cdot 5 \cdot V \cdot L^3}{384 \cdot E} = 895.23 \times 10^4 \text{ mm}^4$$

Déformation suivant y :

$$f_y = \frac{5 \cdot G \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I_z} < f_{adm} = \frac{L}{200}$$

$$I_z \geq \frac{200 \cdot 5 \cdot G \cdot L^3}{384 \cdot E} = 177.7 \times 10^4 \text{ mm}^4$$

Choix du profilé

Le profilé vérifiant ces conditions est :

UPN 220

TABLE 5.14 – Caractéristiques géométriques et mécaniques du profilé UPN 220

Profilé	h (mm)	b (mm)	t _w (mm)	t _f (mm)	d (mm)
UPN 220	220	80	9	12.5	167

A (mm ²)	I _y (mm ⁴)	W _{ely} (mm ³)	W _{ply} (mm ³)	i _y (mm)
37,4	2690	245	292	8.48

I _z (mm ⁴)	W _{elz} (mm ³)	W _{plz} (mm ³)	i _z (mm)
197	33.6	64.1	2,3

I _t (mm ⁴)	I _w (10 ⁻³ cm ⁶)	G (kg/m)
16	14.6	29.4

Vérification du profilé

1. Détermination de la classe de la section.

Détermination de la classe de la section

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = \sqrt{\frac{235}{275}} = 0.924$$

Paroi comprimée :

$$\frac{c}{t_w} = 6.4 < 10 \cdot \varepsilon = 9.24$$

⇒ paroi de classe 1

La section est de classe 1

2. Vérification à la flexion biaxiale.

$$\left(\frac{M_{sd,y}}{M_{pl,y}} \right)^\alpha + \left(\frac{M_{sd,z}}{M_{pl,z}} \right)^\beta \leq 1$$

Avec : $\alpha = 2$; $\beta = 1$

$$M_{pl,y} = \frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = 80.3 \text{ kN.m} > M_{y,sd}$$

$$M_{pl,z} = \frac{W_{pl,z} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = 17.63 \text{ kN.m} > M_{z,sd}$$

$$\left(\frac{16.92}{80.3} \right)^2 + \left(\frac{3.36}{17.63} \right)^1 = 0.235 < 1 \Rightarrow \text{Vérifié.}$$

3. Vérification de l'effort tranchant.

-selon y-y

$$V_{y,sd} = 1.35 \times G \times \frac{L}{2} = 1.512 \text{ kN}$$

$$V_{pl,y,Rd} = \frac{A_{vy} \cdot f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}} = 317.5 \text{ kN}$$

$$V_{y,sd} < V_{pl,y,Rd} \Rightarrow \text{Vérifié}$$

-selon z-z

$$V_{z,sd} = 1.5 \times V \times \frac{L}{2} = 8.46 \text{ kN}$$

$$V_{pl,z,Rd} = \frac{A_{vz} \cdot f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}} = 327.3 \text{ kN}$$

$$V_{z,sd} < V_{pl,z,Rd} \Rightarrow \text{Vérifié}$$

4. Vérification de la rigidité.

Flèche suivant z :

$$f_z = \frac{5 \cdot V \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I_y} = 0.0133 \text{ m} < f_{adm} = \frac{L}{200} = \frac{8}{200} = 0.04 \text{ m} \Rightarrow \text{Vérifié}$$

Flèche suivant y :

$$f_y = \frac{5 \cdot G \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I_z} = 0.036 \text{ m} < f_{adm} = \frac{L}{200} = \frac{8}{200} = 0.04 \text{ m} \Rightarrow \text{Vérifié}$$

5.4 Optimisation

La diminution des sections des éléments structuraux entraîne une réduction de la quantité d'acier utilisée et, par conséquent, du coût global de la structure. Cette démarche permet d'obtenir une conception à la fois performante et économique, tout en assurant la sécurité et la durabilité de l'ouvrage. Pour atteindre cet objectif, plusieurs méthodes et pratiques d'optimisation ont été mises en œuvre :

5.4.1 Ajout d'éléments secondaires

L'introduction d'éléments secondaires, tels que les liernes et les suspentes, permet de redistribuer les charges et de diminuer les sollicitations sur les éléments principaux. Cette technique a conduit à une réduction significative des sections des pannes et des lisses, sans compromettre la stabilité ou la rigidité de la structure.

5.4.2 Optimisation des espacements

La position et l'espacement des pannes, lisses et autres éléments secondaires ont été étudiés pour atteindre un équilibre entre :

- la résistance mécanique,
- la rigidité globale,
- et la minimisation des matériaux.

En ajustant les espacements de manière stratégique, on peut réduire la section des barres tout en respectant les critères normatifs.

5.4.3 Choix des sections et des profils

Le choix judicieux des profils métalliques (IPE, HEA, HEB, etc.) en fonction des sollicitations locales permet une utilisation plus efficace du matériau. Par exemple, l'utilisation de profils plus résistants uniquement aux endroits les plus sollicités et des profils légers ailleurs permet de diminuer la masse totale et le coût.

5.4.4 Utilisation de logiciels de modélisation et de calcul

L'outil de calcul structurel (Robot Structural Analysis RSA) permet de simuler différents scénarios et configurations :

- vérification de la résistance et de la déformabilité des sections optimisées,
- analyse des effets combinés des charges permanentes et climatiques,
- ajustement des sections et des renforts en fonction des résultats de simulation.

5.4.5 Exemple d'optimisation des lisses

Lisse sans suspente

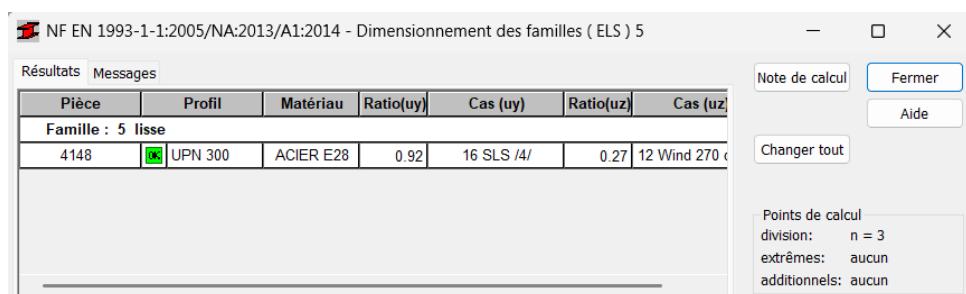


FIGURE 5.17 – Exemple d'optimisation des lisses ELS

Lisse avec suspentes

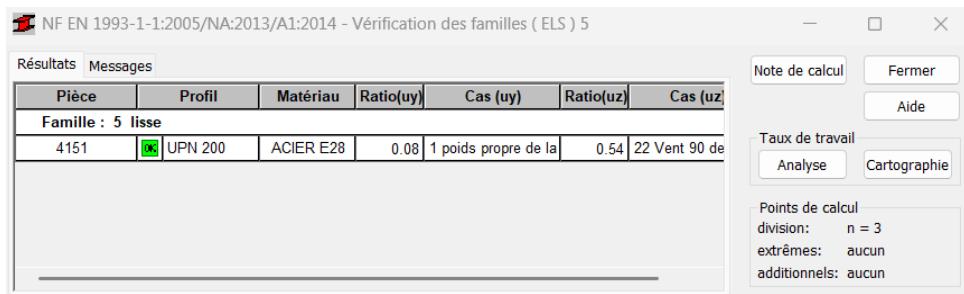


FIGURE 5.18 – Exemple d’optimisation des lisses ELS

L’ajout de suspentes aux lisses a permis une meilleure reprise des charges verticales et une répartition plus uniforme des efforts. Cette amélioration structurale a conduit à une optimisation de la conception, permettant de réduire la section des lisses de UPN 300 à UPN 200 sans compromettre la stabilité ni la rigidité de l’ensemble. Ainsi, l’intégration des suspentes contribue à la fois à l’efficacité structurelle et à la rationalisation des matériaux.

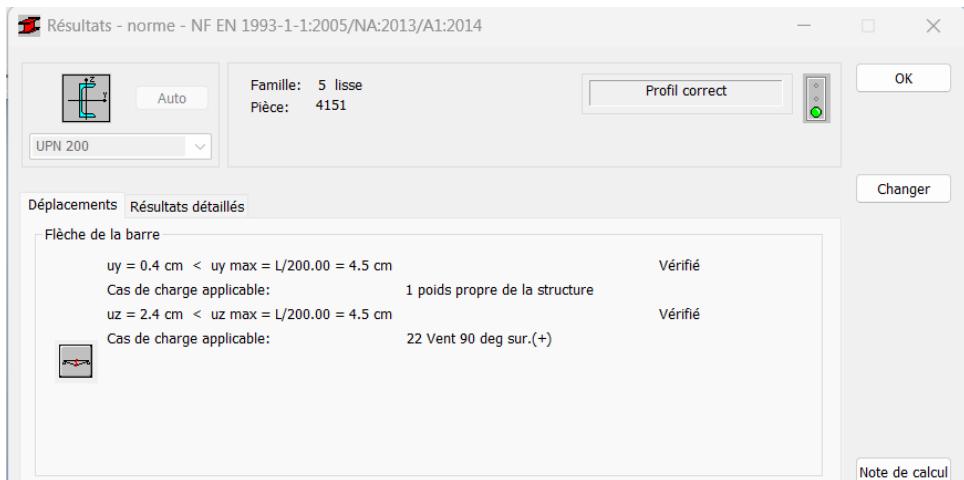


FIGURE 5.19 – Vérification de la flèche ELS

Pour le profil UPN 200, la vérification à l’ELS a été effectuée et confirme que la flèche maximale respecte les limites imposées. La valeur obtenue à partir du logiciel ($uy = 0.4 \text{ cm}$, $uz = 2.4 \text{ cm}$) est inférieure à la valeur limite $L/200 = 4.5 \text{ cm}$ pour les deux directions (y et z).

La simulation numérique a permis d’optimiser les sections, notamment grâce à l’ajout de suspentes, tout en respectant les normes. Elle illustre l’intérêt des outils numériques pour affiner les choix techniques, en complément des méthodes manuelles assurant la fiabilité des structures.

5.5 Conclusion

Ce chapitre a présenté les principales étapes de **vérification, calcul et optimisation** de la structure. Les contrôles sur les contraintes, déplacements et phénomènes d'instabilité ont confirmé la sécurité de l'ouvrage. Le calcul a été mené à la fois par des méthodes manuelles (Excel/VBA) et par des logiciels spécialisés, notamment pour l'étude du vent (NV65) et le dimensionnement des pannes. Enfin, l'optimisation a permis de réduire les sections et les quantités d'acier tout en garantissant la performance et l'économie du projet.

Conclusion

Ce stage au sein de TECI – Tunisie Engineering et Construction Industrielle m'a offert une opportunité précieuse de mettre en pratique les connaissances acquises au cours de ma formation en génie civil, en les confrontant aux exigences concrètes du milieu professionnel.

Le projet sur lequel j'ai travaillé, portant sur la conception et le calcul d'un bâtiment de filtration d'acide phosphorique, m'a permis de développer des compétences techniques approfondies, notamment en structures mixtes acier-béton, en modélisation par RSA, ainsi qu'en application des Euro-codes dans le dimensionnement des éléments porteurs.

La variante choisie, basée sur une ferme trapézoïdale, a présenté des défis intéressants en termes de stabilité, d'optimisation structurelle et d'intégration des contraintes fonctionnelles liées au procédé industriel. Ce travail m'a également sensibilisé à l'importance de la coordination entre les différentes disciplines (génie civil, équipements, sécurité, etc.) dans le cadre d'un projet industriel complexe.

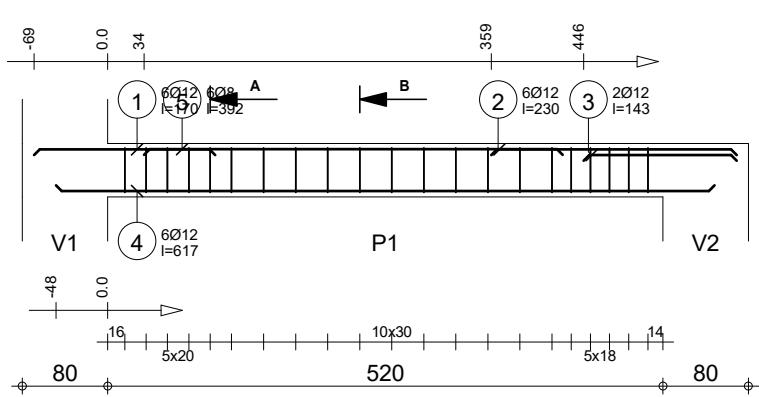
Sur le plan personnel, ce stage m'a permis de découvrir l'organisation d'un bureau d'études, d'améliorer ma rigueur professionnelle, et de mieux comprendre les exigences du monde de l'ingénierie industrielle. L'accompagnement des ingénieurs de TECI m'a été très bénéfique pour progresser dans la maîtrise des outils comme Autodesk Robot Structural Analysis et Excel VBA, ainsi que dans la lecture et l'interprétation des documents techniques.

En somme, cette expérience a été très enrichissante, tant sur le plan technique que professionnel, et renforce ma motivation à m'orienter vers le domaine de la conception de structures industrielles dans la suite de mon parcours.

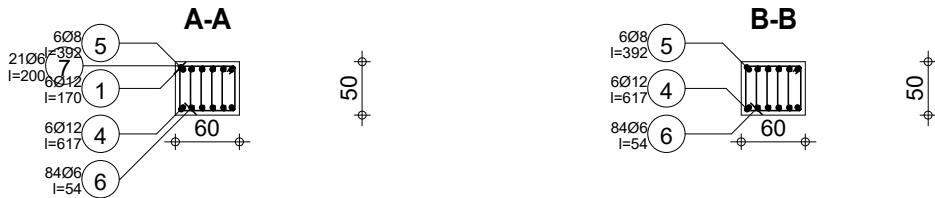
Bibliographie

- [1] Ramzi Zakhama. Cours de construction métallique ii – charges de vent selon nv65, 2016. Année universitaire 2015–2016.
- [2] *Eurocode 3 : Calcul des structures en acier – Partie 1-1 : Règles générales et règles pour les bâtiments.* CEN – Comité Européen de Normalisation, Bruxelles, 2005. EN 1993-1-1.
- [3] Ramzi Zakhama and Sami Montassar. Cours : Assemblages boulonnés en construction métallique, 2024–2025. Disponible auprès des auteurs. E-mail : ramzi.zakhama@enit.utm.tn.
- [4] Dlubal Software. Zones de neige, de vent et de sismicité – vent nv65/n84. <https://www.dlubal.com/fr/zones-de-neige-de-vent-et-de-sismicite/vent-nv65-n84.html>, 2025. Consulté le 8 aout 2025.
- [5] Collectif / CSTB. *Règles NV 65 – Règles définissant les effets de la neige et du vent sur les constructions et annexes.* Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB), France, 2000. DTU P06-002.

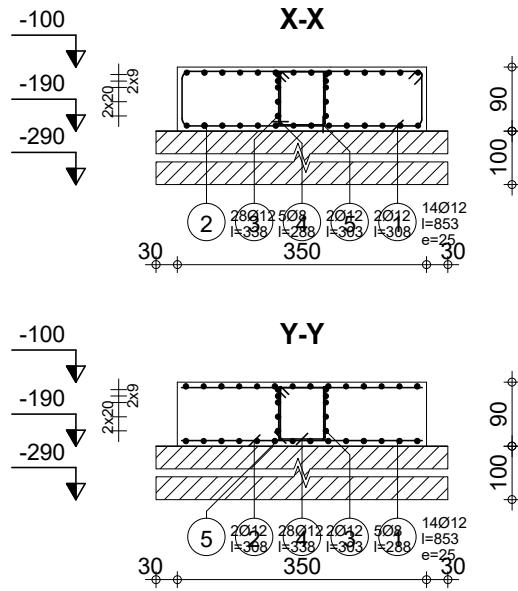
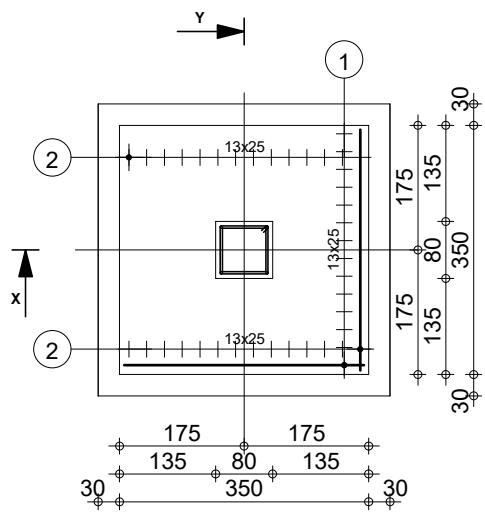
ANNEXES



Pos.	Armature	Code	Forme	Acier
①	6012	l=170	00	170 HA 500
②	6012	l=230	00	230 HA 500
③	2012	l=143	00	143 HA 500
④	6012	l=617	00	617 HA 500
⑤	608	l=392	00	392 HA 500
⑥	8406	l=54	00	54 HA 500
⑦	2106	l=200	31	52 HA 500



Tél.	Fax		
Classe d'exposition : X0	Diamètre max. du granulat : 20mm	Classe de structure : S1	Béton : BETON25 = 2.04 m3 Acier HA 500 = 56.7 kg Acier HA 500 = 28.7 kg
R PRO	Poutre4692 : P1	Nombre 1	Surface du coffrage = 10.5 m ² Enrobage inférieur 4 cm Enrobage supérieur 4 cm Enrobage latéral 4 cm
CM ferme trapézoïdale version 9.5_3D	Section 60x50		Densité = 41.81 kg/ m ³ Diamètre moyen = 8.46mm Echelle pour la vue 1/50 Echelle pour la section 1/50
			Page 1/1



Pos.	Armature	Code	Forme	Acier	Pos.	Armature	Code	Forme	Acier
(1)	14Ø12	31		HA 400	(4)	2012	31		HA 400
(2)	28Ø12	00		HA 400	(5)	2012	31		HA 400
(3)	5Ø8	31		HA 400	(6)	4Ø12	00		HA 400

Tél.

Fax

Béton : BETON35 = 11 m3

Acier HA 400 = 193 kg

Acier HA 400 = 16.5 kg

Fissuration peu préjudiciable

Nombre 1

Surface du coffrage = 12.6 m²
Densité = 19 kg/m³

Enrobage c1 = 6 cm, c2 = 6 cm

Gros béton = 16.8 m³
fck = 15MPaEchelle pour la vue 1/75
Echelle pour la section 1/75

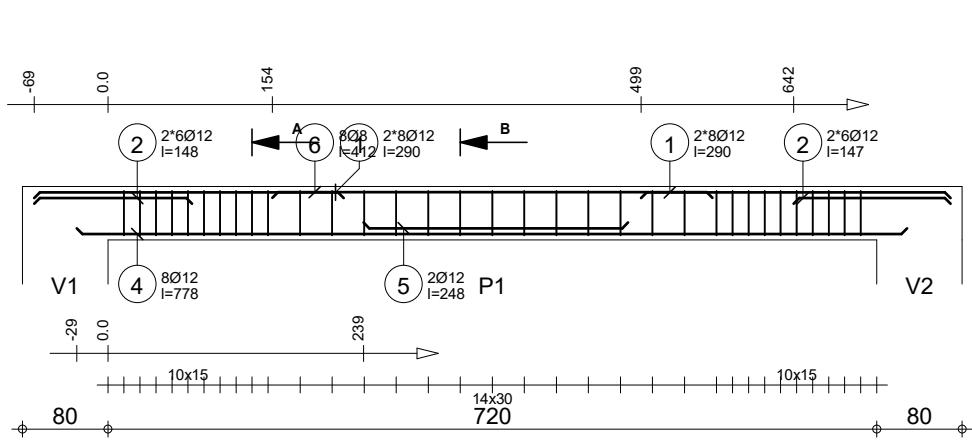
Page 1/1



Indefini

CM ferme trapézoïdale version 9.5_3D

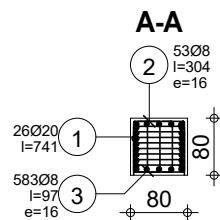
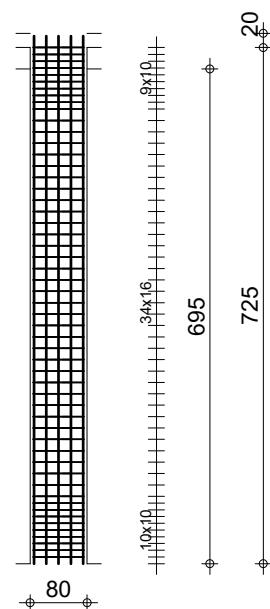
Semelle3546



Pos.	Armature	Code	Forme	Acier
①	2*6Ø12	l=290	00	— ₂₉₀
②	2*6Ø12	l=147*	00	— ₁₄₈
④	8Ø12	l=778	00	— ₇₇₇
⑤	2Ø12	l=248	00	— ₂₄₈
⑥	8Ø8	l=412	00	— ₄₁₂
⑦	19Ø6	l=54	00	— ₅₄
⑧	33Ø6	l=240	31	₇₂ — ₆



Tél.	Fax	Béton : BETON25 = 3.52 m3	Acier HA 500 = 116 kg
Classe d'exposition : X0	Diamètre max. du granulat : 20mm	Classe de structure : S1	Acier HA 500 = 54.3 kg
		Béton : BETON25 = 3.52 m3	
		Surface du coffrage = 15.4 m ²	Enrobage inférieur 4 cm Enrobage supérieur 4 cm
			Enrobage latéral 4 cm
		Densité = 48.58 kg/ m ³	Echelle pour la vue 1/50
		Diamètre moyen = 8.44mm	Echelle pour la section 1/50
Poutre4708 : P1		Nombre 1	Page 1/1
Section 80x50			



Pos.	Armature	Code	Forme	Acier
①	26Ø20	l=741	00	— ⁷⁴¹ HA 500
②	53Ø8	l=304	31	[⁷² ₁₆ ₃₂] HA 500
③	583Ø8	l=97	00	[⁷² ₁₆] HA 500

Classe d'exposition : X0	Tél. Diamètre max. du granulat : 20mm	Fax Classe de structure : S1	Béton : C25/30 = 4.45 m3	Acier HA 500 = 475 kg
CM ferme trapézoidale version final_3D	Poteau166 Section 80x80	Nombre 1	Surface du coffrage = 22.2 m ² Densité = 171.5 kg/ m ³	Acier HA 500 = 287 kg Enrobage 4 cm Echelle pour la vue 1/75 Echelle pour la section 1/75
R PRO				Page 1/1

Pièce	Profil	Matériau	Lay	Laz	Ratio	Cas
Famille : 1 poteau central						
85	HEB 360	ACIER E28	156.59	19.28	0.64	10 Wind 180 deg press (-)
Famille : 2 potelet						
102 Poteau_102	HEA 550	ACIER E28	53.06	170.68	0.95	12 Wind 270 deg press (-)
Famille : 3 panne						
320	IPE 180	ACIER E28	107.88	389.83	0.80	9 Wind 180 deg press (+)
Famille : 4 poteau de rive						
7	HEB 360	ACIER E28	163.45	173.50	0.29	10 Wind 180 deg press (-)
Famille : 5 lisse						
4149	UPN 200	ACIER E28	116.52	418.90	0.87	12 Wind 270 deg press (-)
Famille : 6 contrventemets						
4209	CAE 135x10	ACIER E28	224.83	224.83	0.92	13 ELU /1/
Famille : 7 membrure inférieur						
4288	IPE 330	ACIER E28	20.76	986.45	0.68	13 ELU /1/
Famille : 8 Diagonale						
1279	HEA 100	ACIER E28	77.63	125.41	0.83	13 ELU /1/
Famille : 11 sablière						
4315 Barre_4315	IPE 330	ACIER E28	58.35	225.47	0.55	13 ELU /1/
Famille : 12 membrure supérieur						
95	HEA 180	ACIER E28	27.96	31.80	0.84	13 ELU /1/
Famille : 13 Montant						
1271	HEA 100	ACIER E28	27.24	44.00	0.23	13 ELU /1/
Famille : 15 liernes						
506 Liernes_506	CAE 30x3	ACIER E28	446.08	446.08	0.60	5 Wind 0 deg press (+)
Famille : 16 suspente						
60 suspente_60	CAE 40x4	ACIER E28	377.26	377.26	0.83	13 ELU /1/

Pièce	Profil	Matériaux	Ratio(uy)	Cas (uy)	Ratio(uz)
Famille : 1 poteau central					
85	HEB 360	ACIER E28	-	-	-
Famille : 2 potelet					
102 Poteau_102	HEA 550	ACIER E28	0.07	9 Wind 180 deg nress (+)	0.38
Famille : 3 panne					
421	IPE 180	ACIER E28	-	-	0.64
Famille : 4 poteau de rive					
7	HEB 360	ACIER E28	-	-	-
Famille : 5 lisso					
4154	UPN 200	ACIER E28	0.58	16 ELS /2/	0.75
Famille : 7 membrure inférieur					
43	IPE 330	ACIER E28	0.93	12 Wind 270 deg nress (-)	0.01
Famille : 11 sablière					
25	IPE 330	ACIER E28	0.23	7 Wind 90 deg nress (+)	0.01
Famille : 12 membrure supérieur					
88	HEA 180	ACIER E28	0.00	7 Wind 90 deg nress (+)	0.23
Famille : 15 liernes					
486 Liernes_486	CAE 30x3	ACIER E28	0.00	8 Wind 90 deg nress (-)	0.00

Cas (uz)	Ratio(vx)	Cas (vx)	Ratio(vy)	Cas (vy)
Famille : 1 poteau central				
-	0.99	5 Wind 0 deg nress (+)	0.01	11 Wind 270 deg nress (+)
Famille : 2 potelet				
12 Wind 270 deg nress (-)	-	-	-	-
Famille : 3 panne				
5 Wind 0 deg nress (+)	-	-	-	-
Famille : 4 poteau de rive				
-	0.58	5 Wind 0 deg nress (+)	0.01	8 Wind 90 deg nress (-)
Famille : 5 lisso				
12 Wind 270 deg nress (-)	-	-	-	-
Famille : 7 membrure inférieur				
16 ELS /1/	-	-	-	-
Famille : 11 sablière				
16 ELS /1/	-	-	-	-
Famille : 12 membrure supérieur				
16 ELS /1/	-	-	-	-
Famille : 15 liernes				

Cas (uz)	Ratio(vx)	Cas (vx)	Ratio(vy)	Cas (vy)
16 ELS /1/	-	-	-	-

CALCULS DES CHARGES NEIGE ET VENT

selon NV65 02/09

DIMENSIONS DU BATIMENT

Hauteur:	23.25 m
Largeur:	35.00 m
Profondeur:	45.55 m
Position du sol:	7.20 m
Altitude de la construction:	13.00 m

DONNEES VENT

Région:	3
Type de vent:	normal
Site:	exposé ks = 1.250

Pression de base: **0.75 kPa**

RESULTATS VENT

Cas de charge: **Vent 0 deg sur.(+)**

Gamma : **1.000**

Coefficients de chargement

surface: **4242** *Ce : -0.627 Ci : 0.300 Ce-Ci = -0.927*
qH : 1.00 kPa Delta : 1.000
qr(z) = -0.93 kPa local

surface: **4602** *Ce : -0.500 Ci : 0.300 Ce-Ci = -0.800*
qH : 1.00 kPa Delta : 1.000
qr(z) = -0.80 kPa local

surface: **4245** *Ce : 0.800 Ci : 0.300 Ce-Ci = 0.500*
qH : 1.00 kPa Delta : 1.000
qr(z) = 0.50 kPa local

surface: **4241** *Ce : -0.383 Ci : 0.300 Ce-Ci = -0.683*
qH : 1.00 kPa Delta : 1.000
qr(z) = -0.68 kPa local

surface: **3086** *Ce : -0.500 Ci : 0.300 Ce-Ci = -0.800*
qH : 1.00 kPa Delta : 1.000
qr(z) = -0.80 kPa local

surface: **4320** *Ce : -0.383 Ci : 0.300 Ce-Ci = -0.683*
qH : 1.00 kPa Delta : 1.000