



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou
Faculté du génie de la construction
Département de génie civil

Mémoire de Master Académique

Option : Construction métallique

Etude de la toiture du nouveau stade de Boukhalfa Tizi Ouzou

- **Partie I : Présentation du projet et étude au vent.**
- **Partie II : Modélisation numérique et vérification.**

Réalisé par :

- **M^rGHEMOURI Amine**
- **M^rAIT MANSOUR Larbi**

Encadré par :

M^r BOUAFIA Youcef

UMMTO 2016

REMERCIEMENTS

Tout d'abord je remercie ALLAH, le tout puissant, le miséricordieux, qui m'a donné l'opportunité de mener à bien ce travail.

Je tiens à remercier vivement mon encadreur, le professeur émérite Mr BOUAFIA Youcef pour sa disponibilité, ses orientations et ses encouragements qui m'ont permis de surpasser les difficultés lors de l'élaboration de ce projet.

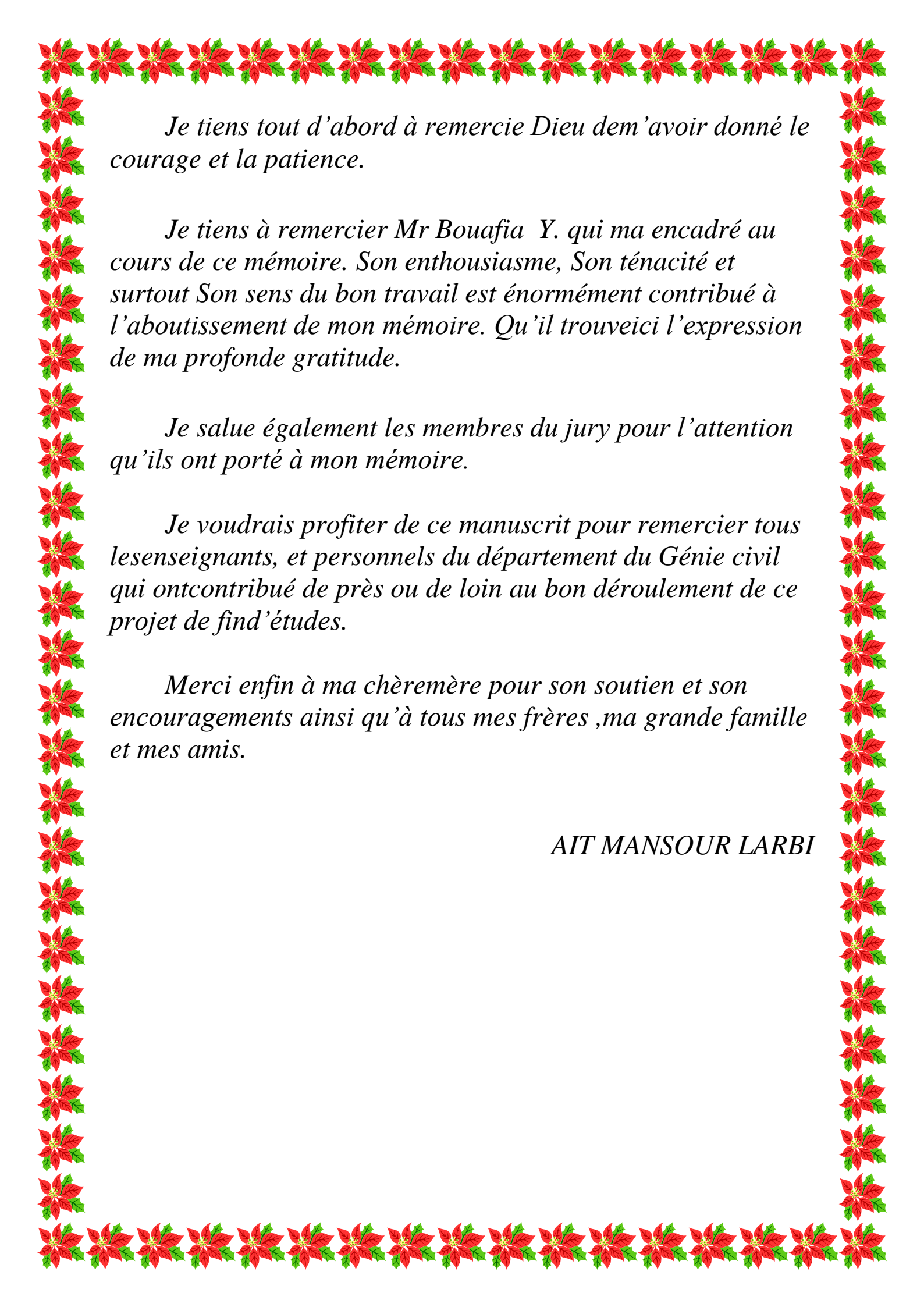
Mes vifs remerciements vont également aux honorables membres de jury qui ont été une force considérables par leurs orientations pour l'enrichissement des chapitres du projet.

Ainsi à l'ensemble d'enseignants qui ont contribué fortement à ma formation et au personnel pédagogique du département de Génie civil.

Sans oublier ma famille et mes amis, particulièrement mes chers parents et frères qui ont consenti d'énormes sacrifices matériels et moraux durant mon cursus universitaire en particulier lors de l'élaboration de ce mémoire afin que je me propulse vers le résultat escompté.

Enfin ces remerciements ne seraient pas complets sans mentionner toute la promotion Master 2 construction métallique 2016 en génie civil.

Amine GHEMOURI



Je tiens tout d'abord à remercier Dieu de m'avoir donné le courage et la patience.

Je tiens à remercier Mr Bouafia Y. qui m'a encadré au cours de ce mémoire. Son enthousiasme, Son ténacité et surtout Son sens du bon travail est énormément contribué à l'aboutissement de mon mémoire. Qu'il trouve ici l'expression de ma profonde gratitude.

Je salue également les membres du jury pour l'attention qu'ils ont porté à mon mémoire.

Je voudrais profiter de ce manuscrit pour remercier tous les enseignants, et personnels du département du Génie civil qui ont contribué de près ou de loin au bon déroulement de ce projet de fin d'études.

Merci enfin à ma chère mère pour son soutien et son encouragement ainsi qu'à tous mes frères, ma grande famille et mes amis.

AIT MANSOUR LARBI



Je dédie ce modeste travail

A la mémoire de mon père que la miséricordieux et le vaste paradis de bon Dieu lui accordés.

A ma très chère mère

Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que vous avez consenti pour mon instruction et mon bien être.

Je vous remercie pour tout le soutien et l'amour que vous me portez depuis mon enfance et j'espère que votre bénédiction m'accompagne toujours.

Que ce modeste travail soit l'exaucement de vos vœux tant formulés, le fruit de vos innombrables sacrifices, bien que je ne vous en acquitterai jamais assez.

Puisse Dieu, le Très Haut, vous accorder santé, bonheur et longévité et faire en sorte que jamais je ne vous déçoive.

A mes frères

A ma grande famille

Ainsi que tous mes amis et proches

AIT MANSOUR Larbi

Résumé

Le confort et la sécurité au sein d'un stade de football, sont obtenus en respectant une longue liste d'exigences et recommandations, éditées par les diverses instances de football à l'échelle internationale. Afin d'assurer ce confort, et particulièrement celui des gradins, les ingénieurs et les architectes ont décidé d'insérer une toiture afin de couvrir les supporteurs du des intempéries pour offrir une meilleur assistance.

C'est pour cela on s'intéresse dans notre projet, à étudier les éléments structuraux de la toiture du nouveau stade de la wilaya Tizi Ouzou, donc notre travail consiste à déterminer et établir, en relation suivie avec l'architecture :

- les efforts ou actions qui s'appliquent à la structure.
- la stabilité de l'ouvrage mais aussi la forme structurelle optimale de l'ouvrage.
- Le choix du matériau de structure pour notre cas est déjà choisi qui est l'acier.
- les réactions aux appuis qui découlent des actions exercées. La descente de charges constitue le document de synthèse de ce travail.
- les sections requises pour chaque partie de l'ossature de manière à assurer la sécurité de la structure. La question de l'assemblage est également développée.

Plusieurs combinaisons d'efforts ou cas de charges sont envisagées. La note de calcul est le document qui rassemble ces éléments

SOMMAIRE

SOMMAIRE

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE II

Tableau II.1 : Propriétés caractéristiques des matériaux.....	10
Tableau II.2 : Caractéristiques des tirants Macalloy 520 en acier brute et acier inoxydable...	11

CHAPITRE IV

Tableau IV.1 : Valeurs de la limite d'élasticité f_{yb}	19
Tableau IV.2 : caractéristiques des boulons.....	19
Tableau IV.2 : Aires des sections filetées et non filetées des boulons.....	20
Tableau IV.3 : Entraxes des boulons et pinces.....	22
Tableau IV.4 : Coefficient de frottement.....	22

CHAPITRE V

Tableau V.1 : Définition des catégories de terrain.....	31
Tableau V -3- coefficient de topographie.....	32

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I

Figure I.1 : maquette de nouveau complexe.....	4
Figure I.2 : Situation du projet	5
Figure I.3 : stade de football.....	6
Figure I.4 : réalisation des fondations.....	7
Figure I.5 : éléments de toiture.....	7

CHAPITRE II

Figure II.1 : déformation d'une éprouvette en acier en fonction de la contrainte.....	9
---	---

CHAPITRE IV

Figure IV.1 : moyens d'assemblages mécanique et soudure.....	18
Figure IV.2 : Boulon de charpente métallique.....	19
Figure IV.3 : Désignation des entraxes et des pinces.	21
Figure IV.4 : Positionnement des trous pour boulons	21
Figure IV.5 : Types d'assemblage dans la structure.....	23
Figure IV.6 : Assemblage entre mât, tirant et hauban.....	23
Figure IV.8 : Encastremets de mat.....	24
Figure IV.9 : soudure des éléments de treillis	25

CHAPITRE V

Figure.1 : organigramme pour la détermination des pressions dues au vent.....	26
Figure.2 : coefficient dynamique Cd.....	27
Figure V.3 : Effort du vent sur la toiture.....	29
Figure V.4 : Résultante des forces.....	33

CHAPITRE VI

Figure VI.1 Le logiciel ROBOT.....	35
Figure VI.2 Organigramme des étapes de modélisation.....	38
Figure VI.3 : Choix du projet à modéliser.....	39
Figure VI.4 : Environnement de travail.....	40
Figure VI.5 : Choix du projet.....	41
Figure VI.6 : Choix de la norme	41
Figure VI.7 : Choix de la norme.....	42
Figure VI.8 : Insertion des lignes de construction.....	42
Figure VI.9 : Choix des profilés.....	43
Figure VI.10 : Création de nouveau profilés	43
Figure VI.11 : Insertion des dimensions du profilé à ajouter.....	44
Figure VI.12 : Choix des barres.....	44
Figure VI.13 : Les mats.....	45
Figure VI.14 : Les tirants.....	46
Figure VI.15 : Exemple de poutre en treillis.....	46
Figure VI.16 : Poutre principale et poutre d'extrémité	47
Figure VI.17 : Les membrures poutres en treillis.....	47
Figure VI.18 : Les éléments de la diagonale.....	48
Figure VI.19 : les renforcements de type croix	48
Figure VI.20 : Choix de la forme géométrique de la poutre en arc.....	49
Figure VI.21 : Les poutres en arc.....	49
Figure VI.22 : Le système de contreventement.....	50
Figure VI.23 : Modèle numérique final de la structure	51
Figure VI.23 : Les relâchements des barres	52
Figure VI.24 : Cas de charge.....	52
Figure VI.25 : Choix du type de chargement.....	53
Figure VI.26 : Insertion de la valeur du chargement	53
Figure VI.27 : Repère globale de la structure	54

Figure VI.28 : Choix de la norme de combinaison.....	54
Figure VI.29 : Tableau des combinaisons.....	55
Figure VI.30 : Calcul de la M.E.F.....	56
Figure VI.31 : Choix de diagramme	57
Figure VI.32 : Les diagrammes du mat.....	58
Figure VI.33 : Les diagrammes de la poutre en arc.....	59
Figure VI.34 : Les diagrammes de la poutre en arc.....	60
Figure VI.35 : Choix d'élément à vérifier.....	61
Figure VI.36 : Tableau des éléments après vérification.....	61
Figure VI.37 : Système de renforcement	62

CHAPITRE VII

Figure VII.1 : Valeurs des efforts maximum au niveau du mat.....	65
Figure VI : effort repris	66

ANNEXES

Figure A.1 : La vue d'avant en 3D du modèle.....	A 2 .III
Figure A.2 : La vue de dessus en 3D du modèle.....	A 2 .2
Figure A.3 : La vue de gauche en 3D du modèle.....	A 2 .3
Figure A.4 : La vue de derrière en 3D du modèle.....	A 2 .4
Figure A.5 : Note de calcul de l'arc	A.6
Figure A.6 : Note de calcul du mat	A.7
Figure A.7 : Note de calcul de la membrure supérieur de a poutre en treillis	A.8

**PARTIE I :
PRESENTATION
DU PROJET ET
ETUDE AU VENT**

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION

I. Introduction :

Concevoir et construire sont les phases essentielles et complémentaires de l'acte de bâtir assurées par les maîtres d'œuvre, architectes et ingénieurs, et les entreprises. Leurs savoir-faire, leurs compétences et leurs cultures doivent s'accorder pour produire une architecture de qualité, qui répond mieux aux pratiques et exigences des usagers et s'insère durablement dans un environnement donné.

Concevoir et construire se font avec des matériaux et chacun d'entre eux à ses spécificités tant sur le plan conceptuel que technique, mécanique et formel. Matériau de structure, mais aussi de plancher, de façade, de couverture, de cloisonnement et d'aménagement, l'acier peut être partout présent dans un édifice et ce à des degrés très divers, en gros œuvre comme en second œuvre, suivant le désir des concepteurs et des clients. Il représente un choix déterminant dès la conception, structurel notamment, qui exige rigueur et précision mais qui donne maîtrise du projet, liberté de création et choix de solutions adaptées.

Construire avec de l'acier relève de la filière composite. C'est un matériau dont la préparation et la mise en forme se fait en grande partie en atelier et dont les éléments arrivent sur le chantier prêts à être montés et associés à d'autres matériaux. La logique de la construction avec l'acier est une logique d'assemblage, où l'ossature se fait par points porteurs de type poteaux-poutres, sur lesquels viennent se greffer les éléments de planchers, d'enveloppe et de partitions. Là aussi, l'anticipation des choix techniques permet de tirer parti au mieux des possibilités architecturales du matériau.

L'acier relève d'un univers bien spécifique avec ses familles de produits, longs ou plats, ses profilés à froid, ses pièces moulées, forgées ou mécano soudées, ses poutres, poutrelles et poteaux en forme de H de I, de U,...etc. Suivant le projet, la structure sera plane, spatiale ou encore suspendue, haubanée... Elle pourra être mixte, en acier-béton, ou tout acier, souvent associée à des façades en verre, des panneaux de bois, de béton, de plâtre... Elle peut être formée d'arcs, de poutres cintrées, de poutres en treillis, de poutres alvéolaires, de tubes et être associée à des planchers secs ou mixtes. Les portées peuvent être grandes, sans point d'appui intermédiaire, etc. L'acier se prête à toutes sortes de mises en œuvre et offre une gamme importante d'aspects. On peut même dire qu'il existe des aciers puisque l'acier inoxydable par exemple n'a pas la même composition que l'acier au carbone, et que ceux-ci se déclinent en de multiples nuances.

Le poids propre des ossatures métalliques intervient peu dans les calculs de résistance. La légèreté donne un avantage certain dans les cas de sols difficiles (en évitant ou réduisant les fondations profondes), ou lorsque l'infrastructure (souvent en béton) doit subir des flexions locales, ou enfin dans le cas de grandes portées, où le poids devient l'ennemi principal.

Dans les infrastructures sportives, on a toujours besoin d'avoir de grandes portées comme les salles de sport et les toitures de stade, c'est une chose qu'on ne peut pas assurer avec le béton c'est pour cela on opte pour la construction métallique.

Le confort et la sécurité au sein d'un stade sont obtenus en respectant une longue liste d'exigences et recommandations, éditées par les diverses instances de football de l'échelle nationale à l'échelle mondiale. Afin d'assurer ce confort, et spécialement celui des gradins, les ingénieurs et les architectes ont décidé d'insérer une toiture afin de couvrir les supporteurs du soleil et des intempéries pour offrir une meilleure assistance.

C'est pour cela on s'intéresse dans notre projet, à étudier les éléments structuraux de la toiture du nouveau stade de Tizi Ouzou, donc notre travail consiste à déterminer et établir, en relation suivie avec l'architecture :

- les efforts ou actions qui s'appliquent à la structure.
- la stabilité de l'ouvrage mais aussi la forme structurelle optimale de l'ouvrage.
- Le choix du matériau de structure pour notre cas est déjà choisi qui est l'acier.
- les réactions aux appuis qui découlent des actions exercées. La descente de charges constitue le document de synthèse de ce travail.
- les sections requises pour chaque partie de l'ossature de manière à assurer la sécurité de la structure. La question de l'assemblage est également développée.

Plusieurs combinaisons d'efforts ou cas de charges sont envisagés. La note de calcul est le document qui rassemble ces éléments.

II. Cadre de ce travail et objectifs :

Le premier objectif fixé consiste d'abord d'analyser l'étude réalisée par le bureau portugais PROENGEL et de l'implémenter ensuite sur le logiciel ROBOT version 2014 en tenant compte des recommandations du règlement sur le comportement de la structure et les charges exercés.

Le deuxième objectif fixé dans ce travail, aussi important que le premier, consiste de mettre en évidence, à travers une analyse paramétrique appropriée, l'effet de certains paramètres clés sur la résistance de la toiture tel que les scénarios du vent et de neige, les différents critères de ruine adoptés et les types de solution envisagés afin de protéger la structure de la ruine.

III. Plan du travail :

Le travail présenté dans ce mémoire sera organisé en 7 chapitres, dont le premier sera consacré essentiellement à la présentation de l'ouvrage, en termes de capacités et le mode de fonctionnement de la toiture. Le chapitre deux sera consacré à déterminer les caractéristiques des matériaux, pour notre cas qui est l'acier, ainsi que les types de profilés utilisés. Le chapitre suivant va contenir l'évaluation des actions, et aussi les différentes charges, et les combinaisons d'action selon l'Eurocode 3. Le chapitre quatre, sera consacré à la présentation des assemblages utilisés dans notre structure. Le chapitre qui suit, présente l'étude au vent et

la vérification au soulèvement. L'avant dernier chapitre sera consacré la présentation du logiciel **ROBOT** à l'implémentation numérique où dans un premier temps à la modélisation numérique de la structure sur logiciel **ROBOT** et ensuite une conclusion à propos des résultats obtenues. Nous terminerons en guise de dernier chapitre par une vérification d'un élément de cette structure manuellement, à partir des résultats obtenus du logiciel.

Et pour finir, on termine par une conclusion générale suivie par quelques recommandations pour l'amélioration et la poursuite de ce travail.

**CHAPITRE I :
PRESENTATION
DU PROJET**

CHAPITRE I : Présentation du Projet

I.1 Présentation du projet :

Le projet du complexe sportif de Tizi-Ouzou a été initié par la direction de la jeunesse et des sports de la wilaya de Tizi-Ouzou. Après l'appel d'offre, le projet a été attribué au groupement **Algéro-espagnol** formé par les deux entreprises ETRHB HADDAD et **FCC CONSTRUCCION** et après par l'entreprise Turque **MAPA**, l'élaboration des plans architecturaux a été confiée au bureau d'étude **DUNE Architecture** qu'on remercie pour les documents qui nous ont mis en service, alors que l'étude génie civil est réalisée par le bureau Portugais **ProEngel**. Le marché en question comprend la réalisation:

- ✓ Un stade de football d'une capacité de 50 000 places.
- ✓ Un stade d'athlétisme de 6 500 places.
- ✓ Un stade de réplique en gazon naturel
- ✓ Parking et aménagement extérieurs.
- ✓ VRD.



Figure I.1 : maquette de nouveau complexe

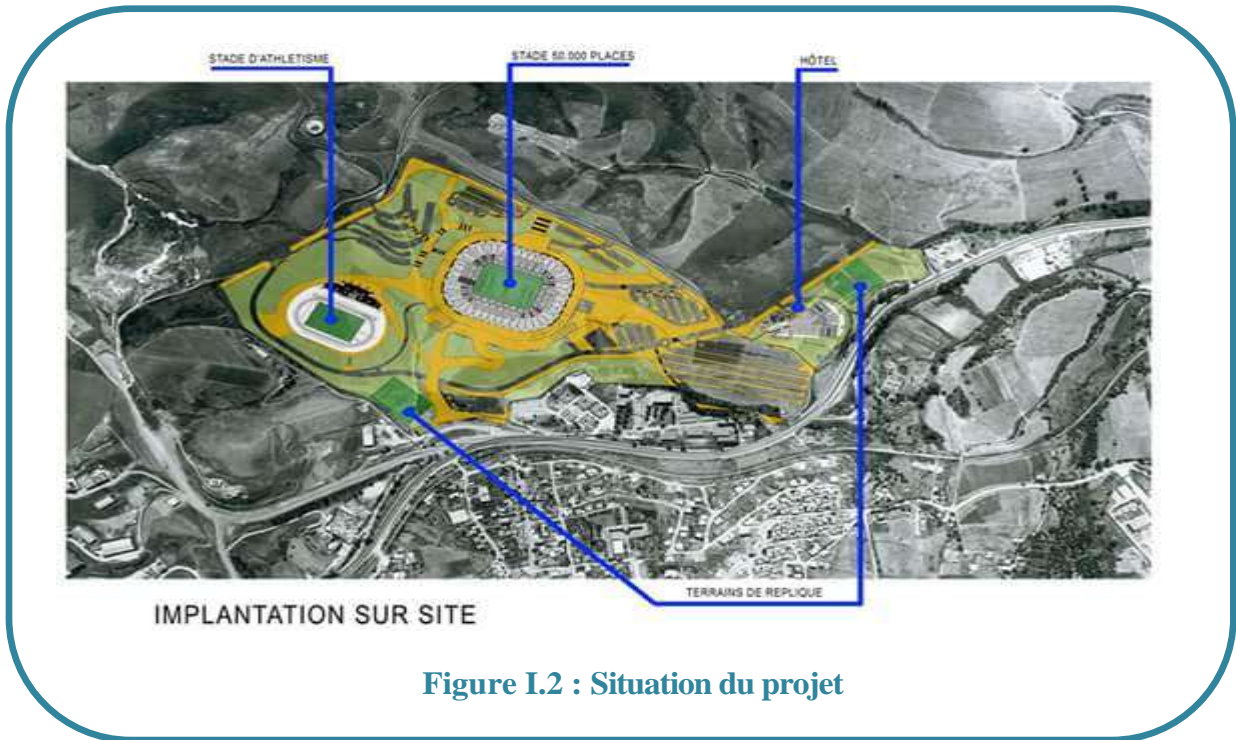
I.2. Situation du projet :

Le terrain du complexe est situé au sud de la RN12 à proximité de la localité de Boukhalfa, à la sortie Ouest de la ville de Tizi-Ouzou.

Les coordonnées UTM approximatives du centre du site prise par GPS sont:

X= 590 451 m

Y= 4 065 299 m



I.3 Stade de football:

La structure du stade est divisée en blocs et chaque bloc structurel est constitué par un ensemble de portiques, radiaux et circonférentiels ainsi que par des voiles dans le sens tangentiel. Pour l'exécution des planchers et des éléments des gradins et des tribunes, il a été adopté une solution préfabriquée; cependant, ces derniers ne font pas partie du mécanisme de reprise des charges de tremblement de terre ou de vent. La structure du stade à construire est en général en béton armé. La superstructure en béton armé supportera la toiture métallique. Les fondations des structures, selon leur localisation et la présence ou l'absence des forces de soulèvement, sont directes avec les semelles ou indirectes avec les pieux.



Figure I.3 :stade de football

• Fiche technique du stade:

➤ Surface du site :		44 hectares
➤ Emprise du stade de football :		39 700 m ²
➤ Dimension de l'aire de révolution:		129*89 m
➤ Tribunes publiques:	45 000 places	
➤ Tribunes d'honneur:		2 750 places
➤ Siège loges VIP:	2 440 places	
➤ Tribunes journalistes:	300 places	
➤ Hauteur du stade		39 m
➤ Nombre d'escalier publics		21
➤ Nombre de vomitoires:		40
➤ Nombre tourniquets:		95 unités
➤ Nombre de rangée gradins bas		29
➤ Nombre de rangée tribune haute:		28
➤ Surface du parvis intérieur:		15 700m ²
➤ Surface de la couverture:		34 000 m ²
➤ Nombre de mât métallique:		40

I.4 Fondation du stade :

Le stade est composé de 17 bâtiments à structure en portique incluant des voiles de comportement, ils sont séparés par des joints de dilation de 20 cm d'épaisseur. Chaque bâtiment est modélisé et étudié à part. Une fosse d'épaisseur de 0,5 m sépare les tribunes de la pelouse du stade.

Du fait de la nature rocheuse du sol, les fondations adoptées pour cet ouvrage sont les

fondations superficielles, alternant entre semelles filantes et semelles isolées.

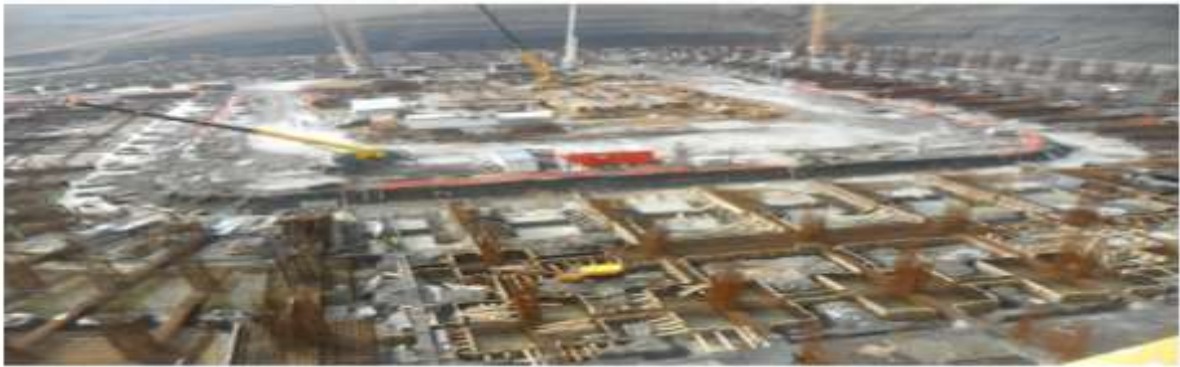


Figure I.4 :réalisation des fondations

I.5Présentation de la toiture :

La couverture de stade est composée de 12 bâtiments, dans notre projet on s'intéressera uniquement à l'étude de bâtiment 10, cette structure est composée de 4 poutres entreillis (2 principales et 2 d'extrémités) en section tubulaire qui reposent sur des poteaux intermédiaire situé de 48.10 m de l'extrémité des poutres 3 mats situés au même niveau des poteaux et à mi-distance entre les poutres ,ces dernier ont été inséré afin d'installer les systèmes a câbles qui retiennent les extrémités des poutres . Des tirants ont été installé afin de transmettre les charge reprises pas les câble. Des contre poids de contreventement ont été inséré à l'extrémité afin d'éviter le risque du soulèvement du vent.Et toute cette structure repose sur les gradins, avec un système d'ancrage dans le béton. La figure et les plans en annexe, montrent en détail les éléments de cette toiture. **(Pour plus de détails voir les plans en annexe1)**

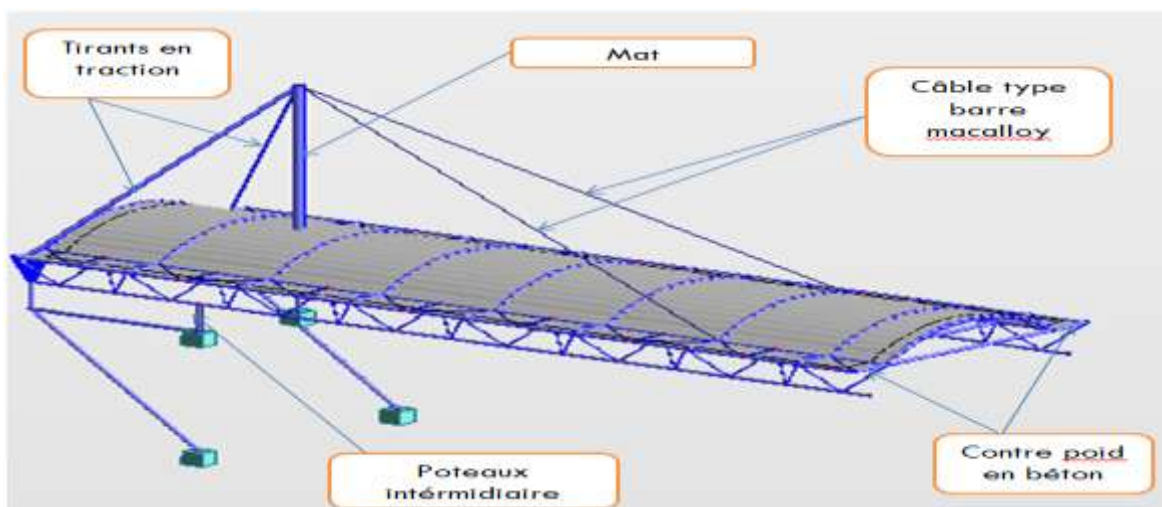


Figure I.5 :éléments de toiture

I.6 Présentation du sujet :

Ce Projet de Fin d'Etude se localise exclusivement sur l'étude de la toiture métallique. Ce projet à lui-seul permet de mener une large palette d'études: des études de la charpente en faisant intervenir des structures en acier et ce sur un bâtiment de grande importance, et d'une structure spéciale. Effectuer ce type de projet faisant intervenir ces matériaux constitue pour nous une spécialisation dans l'étude de structures métalliques. Les études sont effectuées selon les Euro codes, ce qui permet d'être en accord avec les normes. Ces études nous permettent la maîtrise de la méthode de réalisation d'une étude de structures et la maîtrise des outils de calculs et de modélisation. La modélisation et la vérification sera effectuée avec le logiciel ROBOT.

**CHAPITRE II :
CARACTERISTIQUES
DES MATIRIEAUX**

CHAPITRE II : CARACTERISTIQUES DES MATIRIEAUX

II.1 Généralités :

Pour satisfaire les règles de conception et de calcul des structures en acier les matériaux employés doivent avoir les propriétés indiquées ci-dessus.

Les caractéristiques des matériaux qui s'introduisent le plus généralement dans les calculs sont la résistance limite d'élasticité f_y et la résistance à la traction f_u , qu'on peut englober sous le terme générale de « résistance » et qu'on la note f_y .

Les matériaux utilisés sont essentiellement :

- ✓ Acier
- ✓ Béton

II.2 L'acier :

Acier est un matériau constitué du fer et un peu de carbone (<1.7%).il peut comporter aussi d'autres éléments (tel que le silicium, le nickel, lamagnésie, ...) qui améliorent ses caractéristiques mécaniques. Ces derniers sont déterminé en faisons des essais destructifs tel que :

a. L'essai de traction, qui permet de déterminer :

- ✓ Le module d'élasticité longitudinal E.
- ✓ Le coefficient de poisson ν .
- ✓ Les contraintes limites : d'élasticité f_y et de rupture F_u .
- ✓ l'allongement a la rupture.
- ✓ le module de glissement G : $G = \frac{E}{(1+\nu)^2}$

b. L'essai de dureté, qui étudie la pénétration d'une bille ou d'une pointe dans l'acier.

c. L'essai de résilience, qui permet de mesurer l'aptitude d'un acier à rompre par choc.

d. L'essai de fatigue.

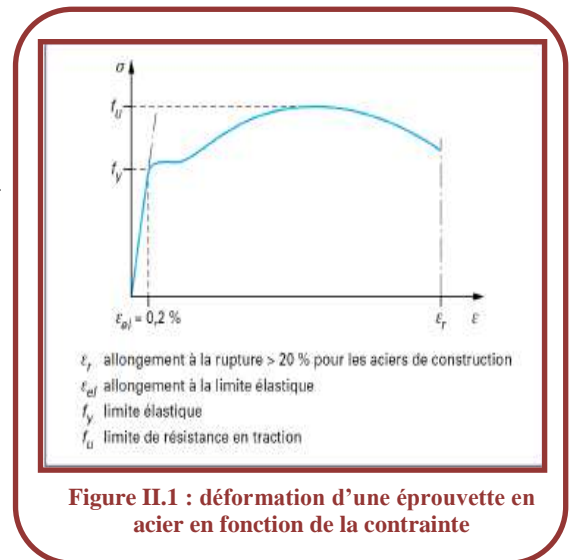


Figure II.1 : déformation d'une éprouvette en acier en fonction de la contrainte

Pour notre ossature, on utilise un acier (S355) qui a les caractéristiques mécaniques suivantes :

- ✓ Module de Young (module d'élasticité longitudinal) $E=210000\text{Mpa}$.
- ✓ La limite d'élasticité transversal $G=81000\text{Mpa}$.
- ✓ La limite élastique de traction, $f_y=335\text{Mpa}$.
- ✓ La masse élastique de cisaillement, $\tau = 0.58f_y\text{MPa}$.
- ✓ La masse volumique de l'acier : $\rho = 7850\text{Kg}/\text{m}^3$.
- ✓ Le coefficient de dilatation thermique : $\alpha = 1.2 \times 10^{-6}$.

II.3 Les assemblages : Ils seront réalisés soit :

- ✓ Par boulonnage : on utilise des boulons ordinaires ou bien des boulons à haute résistance (HR)
- ✓ Par soudure.

II.4 Béton :

✓ Classe de résistance	
✓ planchers alvéolées	C40/50
✓ Marches	C35/35
✓ Classe d'exposition(EN 2 06-1)	XC4
✓ Dimension maximale des granulats	25 mm
✓ Rapport maximal Eau/Ciment	0,45
✓ Dosage minimale de ciment 320	Kg/m ³

II.5 Armatures en acier :

✓ Armatures - générales	A500NR
✓ Armatures – électro-soudées	A500EL
✓ Enrobage	≥30mm

II.6 Les haubans (type Macalloy) :

Macalloy a mis au point de nouveaux systèmes et technologies dans le domaine du haubannage architectural depuis le début des années 1980. Macalloy est un leader reconnu dans ce marché au niveau de la conception, la fabrication et la fourniture de systèmes de barres filetées.

Macalloy est habitué à travailler avec des prescripteurs et des entrepreneurs de renommée mondiale pour le développement de certaines structures véritablement uniques et avant-gardistes. La gamme de produits d'haubannage architectural de Macalloy est agréée selon l'agrément Technique Européen ETA 07/0215, ce qui les permet d'utiliser le marquage CE, ainsi que d'autres certifications mondialement reconnues.

Tableau II.1 : Propriétés caractéristiques des matériaux

Nom du produit	Matériau	Limite minimum élastique N/mm ²	Charge minimum de rupture N/mm ²	Allongement minimum %	Résilience minimum Charpy J@ -20°C	Module d'élasticité kN/mm ²
Macalloy 460	Acier brut	460	610	19	27	205
Macalloy S460	Acier inoxydable	460	610	15	27	205
Macalloy 520	Acier brut	520	660	19	27	205
Macalloy S520	Acier inoxydable	520	660	15	27	205

II.6.1 Les caractéristiques pour les haubans Macalloy 520 M 85 sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau II.2 :Caractéristiques des tirants Macalloy 520 en acier brute et acier inoxydable

Diamètres (filetage)	Unités	M10	M12	M16	M20	M24	M30	M36	M42	M48	M56	M64	M76	M85	M90	M100
Diamètre nominal de la barre	mm	10	11	15	19	22	28	34	39	45	52	60	72	82	87	97
Charge minimum élastique	kN	28	41	77	122	176	284	411	566	746	1030	1360	1985	2531	2862	3585
Charge minimum de rupture	kN	35	52	98	155	223	360	522	719	946	1308	1727	2520	3212	3633	4551
Valeur calculée de résistance à l'EC3	kN	26	38	71	112	161	257	376	518	682	942	1244	1814	2313	2616	3277
Poids nominal de la barre	(kg/m)	0.5	0.75	1.4	2.2	3	4.8	7.1	9.4	12.5	16.7	22.2	32	41.5	46.7	58

II.6.2 Protection contre la corrosion :

Les barres en acier brut peuvent être fournies avec une couche primaire standard ou galvanisées. La galvanisation peut être appliquée avant ou après le filetage de la barre, selon besoins. On doit noter que tous les accessoires standard en acier brut Macalloy (chapes femelles, axes et contre-écrous) sont pourvus d'un revêtement galvanisé à chaud conformément à la norme **BS EN 1461: 2009**.

**CHAPITRE
III :EVALUATION DES
ACTIONS SELON
L'EUROCODE 3**

CHAPITRE III : EVALUATION DES ACTIONS SELON L'EUROCODE 3

III.1 Introduction :

Les valeurs caractéristiques des différentes actions sont soit définies par des règles ou normes, soit explicitement données par le cahier des charges du maître d'ouvrage. La revue effectuée ici vise à rappeler dans chaque cas le règlement qui s'applique, à fixer les ordres de grandeur et à souligner les difficultés que l'on peut parfois rencontrer.

Une action désigne aussi bien des charges appliquées à la structure que des déformations imposées par les effets thermiques ou des déplacements d'appui.

Trois types d'action sont à considérer :

- ✓ les actions permanentes G : poids propre de la structure, poids des équipements.
- ✓ les actions variables d'exploitation ou d'environnement Q : surcharges d'exploitation, neige, vent, effets thermiques.
- ✓ les actions accidentelles A : charges d'explosions, chocs divers, séismes, feu, etc.

La valeur de calcul d'une action est obtenue en faisant le produit d'une valeur représentative de l'action par un coefficient partiel de sécurité, qui est appelé coefficient de pondération, qui sert à pondérer ou autrement dit à augmenter l'intensité de la charge afin de vérifier pour un cas plus défavorable que la réalité.

III.1.1 Action permanentes : elles comprennent :

- ✓ Le poids propre des éléments de construction.
- ✓ Le poids propre des équipements fixes.
- ✓ Les poids, poussées et pressions des terres.
- ✓ Les déformations permanentes imposées à la construction telle que les déplacements différents des appuis

III.1.2 Actions variables d'exploitation : Elles comprennent :

- ✓ les charges résultant du fonctionnement des équipements.
- ✓ les charges de produits stockés dans les bâtiments déstockage.
- ✓ les surcharges d'exploitation sur les planchers des bâtiments.
- ✓ les charges mobiles de ponts roulants.

Les charges variables de fonctionnement des équipements sont en général données par le cahier des charges du client ou à défaut par les fournisseurs.

Les charges de produits stockés et les surcharges d'exploitation sur plancher peuvent être définies dans le cahier des charges du client. À défaut, le règlement algérien dit **DTR** fournit les éléments nécessaires pour évaluer ces charges.

III.1.3 Action variable climatique :

Qui comporte trois cas :

- ✓ Action du vent.
- ✓ Action de neige.

- ✓ Action de la variation de la température.

III.1.4 Action accidentelles : comprenant les actions sismiques, les explosions, les chocs Etc.

III.2 Situations représentatives :

Au cours de la période de référence de l'ouvrage, égale à 50 ans ou à la durée de vie requise par le maître d'ouvrage, seules font l'objet de calcul les situations les plus représentatives ou les plus critiques. Ces situations critiques correspondent à des combinaisons particulières des diverses actions susceptibles de s'exercer sur l'ouvrage.

Les situations les plus critiques se répartissent en deux groupes :

- ✓ **les états limites ultimes ELU** associés à un effondrement ou d'autres formes de défaillance structurelle pouvant mettre en danger la sécurité des personnes.
- ✓ **les états limites de service ELS** associés à des exigences d'aptitude au service.

III.2.1 Les états limites ultimes des structures métalliques :

- ✓ la perte d'équilibre statique.
- ✓ la ruine par déformation excessive de l'ouvrage.
- ✓ l'instabilité d'une partie ou de la totalité de la structure.
- ✓ la ruine par fatigue.

III.2.2 Les états limites de services concernent :

- ✓ les déformations ou les flèches pouvant affecter l'exploitation efficace de la construction ou provoquer des dommages aux finitions ou autres éléments non structureaux.
- ✓ les vibrations pouvant incommoder les occupants, endommager le bâtiment ou limiter son efficacité fonctionnelle.

III.3 Les combinaisons de charges :

Pour chaque cas de charge, les valeurs de calcul E_d des effets des actions doivent être déterminées en appliquant les règles de combinaison aux valeurs de calcul des actions. Une combinaison d'actions résulte de l'application simultanée :

- ✓ des actions permanentes.
- ✓ d'une action variable dite de base.
- ✓ des actions variables dites d'accompagnement.

Chaque type d'action est prise à sa valeur de calcul, la valeur de calcul étant obtenue en pondérant la valeur représentative de l'action par le coefficient partiel de sécurité pour l'action considérée.

Le coefficient partiel de sécurité tient compte :

- ✓ de la possibilité d'écart défavorable au niveau de l'action.
- ✓ de la possibilité d'une modélisation imprécise de l'action.

- ✓ des incertitudes relatives à l'évaluation des effets de l'action.

Les combinaisons d'actions à considérer doivent couvrir toutes les situations critiques où la structure est susceptible de se trouver.

Ces combinaisons comprennent des combinaisons d'états limites ultimes et des combinaisons d'états limites de service.

Les combinaisons de charges sont définies pour les états limites de service : ELS (pour le haubannage) et pour les états limites ultimes : ELU (pour dimensionnement de la charpente et des systèmes d'ancrage).

Dans ce qui suit, on désigne par :

G_{\max} :	charges permanentes défavorables.
T :	effets thermiques d'ensemble.
Q :	charge d'exploitation.
W :	action du vent.

III.3.1 Etats Limites de Service (E.L.S.) :

A. Combinaison quasi-permanente :

$$\sum G_{k,j} + \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} \times Q_{k,i}$$

$$G_{\max} + 0.25 A(L)$$

B. Combinaison permanente:

$$\sum G_{k,j} + \psi_{1,i} \times Q_{k,i} + \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} \times Q_{k,i}$$

$$G_{\max} + 0.75 A(L)$$

$$G_{\max} + 0.25 A(L) + 0.50 T$$

$$G_{\max} + 0.25 A(L) + 0.50 W$$

C. Combinaison rare :

$$\sum G_{k,j} + Q_{k,i} + \sum_{i \geq 1} \psi_{0,i} \times Q_{k,i}$$

$$G_{\max} + A(L) + 0.6 W + 0.53 T$$

$$G_{\max} + 0.67 A(L) + W + 0.53 T$$

$$G_{\max} + 0.67 A(L) + 0.6 W + T$$

III.3.2 Etats Limites ultime (E.L.U.) :**A. Combinaison fondamentale :**

$$\sum \gamma_{G,j} \times G_{k,j} + \gamma_{Q,i} \times Q_{k,i} + \sum_{i \geq 1} \gamma_{Q,i} \times \psi_{0,i} \times Q_{k,i}$$

$$1.35G_{\max} + 1.5 A(L) + 1.5 (0.60W + 0.53 T)$$

$$1.35G_{\max} + 1.5 T + 1.5 (0.67 A(L) + 0.60W)$$

$$1.35G_{\max} + 1.5 W + 1.5 (0.67 A(L) + 0.35T)$$

B. Combinaison accidentelle :

$$\sum G_{k,j} + A_{Ed} + \psi_{1,i} \times Q_{k,i} + \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} \times Q_{k,i}$$

$$G_{\max} + E + 0.75 A(L)$$

$$G_{\max} + E + 0.25 A(L) + 0.50 T$$

$$G_{\max} + E + 0.25 A(L) + 0.50 W$$

III.4 Résistances des éléments:

L'analyse globale d'une structure soumise à une combinaison d'actions se traduit par un effet E_d (effort normal, moment flexion, déformée...ETc.). L'exigence de performance ou de non-ruine est respectée lorsque :

$$E_d \leq R_d$$

Avec : R_d : résistance de calcul pour le mode de ruine considéré ou le niveau de performance spécifié.

Dans le cas des ELU :

$$R_d = \frac{R_k}{\gamma_M}$$

Avec : R_k : valeur caractéristique de la résistance considérée.

: γ_M Coefficient partiel de sécurité applicable à la résistance caractéristique du matériau.

III.5 Application à notre structure :

Notre structure regroupe plusieurs cas de charges vu que l'importance de notre structure et les dimensions importante de cette structure.

III.5.1 Charge permanente :

- ✓ Poids propre de la structure et calculé selon mesure, et selon les poids des profilés, pour notre cas les poids propre est introduit automatiquement par le logiciel.
- ✓ Formation de toiture : qui est les poids du bardage pour notre cas est de **30 Kg/m²**.
- ✓ Installation distribuées : qui sont les différentes installations telles que l'éclairage des gradins et les baffles, il est estimé à **5 Kg/m²**.
- ✓ Passerelle : les poutres principale sont dotés d'une passerelle son poids est estimer à **50 Kg/ml**.
- ✓ Projecteurs de bord sur le périmètre : c'est pour éclairer le terrain de jeux son poids est de : **50 Kg/ml**.

III.5.2 Charge d'exploitation :

- ✓ Entretien de toiture : elle est estimée à **35kg/m²**.
- ✓ Surcharge passerelle : elle est estimée à **100Kg/m²**.

III.5.3 Charge climatique :

- ✓ L'effet de température: vu que les dimensions de notre structure dépasse les 50m (**60.15*52.5m**), une variation uniforme de température est prise en compte : Combinaison fréquente (ELS) : variation **-15°C ; +35°C**. Le coefficient de dilatation thermique de l'acier est pris égal à **11x10⁻⁶ °C⁻¹**. Le coefficient de dilatation thermique du carbone est pris égal à **2x10⁻⁶ °C⁻¹**.
- ✓ Les effets du vent : sont pris en compte pour l'ouvrage en construction et en service. Les pressions à appliquer sur les toitures et les câbles sont : **q_e = 160 Kg/m²** avec des coefficients dynamique **C_e=+0.45, C_i=-0.6**.
- ✓ L'effet de la neige : selon le cahier de charge **35kg/m²**.

III.5.4 Combinaison d'action :

Pour les combinaisons de charges, dans notre cas on doit prendre en considération la charge thermique, ce qui donne un nombre important de combinaison par ce qu'il faut faire tout un groupe de combinaison pour chaque température, pour cela on a opté pour la solution automatique du logiciel, qui consiste à fixer les combinaisons automatiquement selon une norme précise qui est dans notre cas **L'Eurocode 3**.

III.5.5 Vérifications des éléments :

La vérification des éléments a été faite avec le logiciel Robot qui permet de faire une vérification complète de tous les éléments de structure selon **l'Eurocode 3**.

III.6 Conclusion :

L'étape d'évaluations des actions est l'étape la plus importante lors d'une étude d'une structure en génie civil, et la présence des logiciels de modélisation numérique tel que **ROBOT**, car il offre la possibilité d'insérer facilement les charges et aussi de déterminer les combinaisons automatique, et aussi il donne la combinaison la plus défavorable facilite la tâche aux ingénieurs et réduit le facteur temps.

**CHAPITRE
IV :LES
ASSEMBLAGES**

CHAPITRE IV : LES ASSEMBLAGES

IV.1 Introduction :

Un assemblage est un dispositif qui permet de réunir et de solidariser plusieurs pièces entre elles, en assurant la transmission et la réparation des diverses sollicitations entre les pièces, sans générer des sollicitations parasites notamment de torsion.

Pour réaliser une structure métallique; on dispose de pièces individuelles, qu'il convient d'assembler:

- ✓ Soit bouts à bouts (éclissage, rabotages).
- ✓ Soit concourantes (attaches poutre/poteau, treillis et systèmes réticulés).

Pour conduire les calculs selon les schémas classiques de la résistance des matériaux, il y a lieu de distinguer, parmi les assemblages:

- ✓ Les assemblages articulés, qui transmettent uniquement les efforts normaux et les tranchants.
- ✓ assemblages rigides, qui transmettent en outre les divers moments.

Les procédés mécaniques actuellement utilisés en construction métallique sont :

- ✓ le boulonnage ordinaire et ses dérivés (vis, goujons).
- ✓ le boulonnage HR, à serrage contrôlé.
- ✓ le rivetage à froid.
- ✓ le portage ou appui direct.
- ✓ le rivetage à chaud.

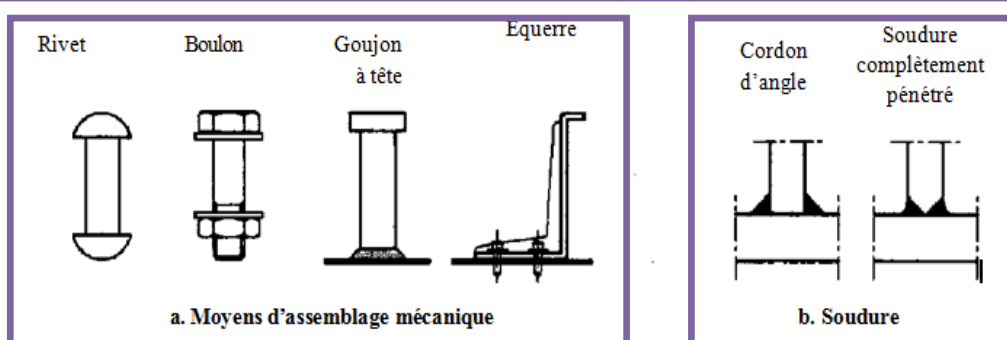


Figure IV.1 : moyens d'assemblages mécanique et soudure.

IV.2 Caractéristique des boulons :

Tableau IV.1 : Valeurs de la limite d'élasticité f_{yb}

classe	4.6*	4.8*	5.6*	5.8*	6.6	6.8	8.8	10.9
$f_{yb}(N/mm^2)$	240	320	300	400	360	480	640	900
$f_{ub}(N/mm^2)$	400	400	500	500	600	600	800	1000

Tableau IV.2 : Aires des sections filetées et non filetées des boulons

Diamètre du boulon [mm]	8	10	12	14	16	18	20	22	24	27	30	36
Aire section non filetée A [mm ²]	50,3	78,5	113,1	154,0	201,0	254,0	314,0	380,0	452,0	573,0	707,0	1 018
Aire section filetée A _s [mm ²]	36,6	58,0	84,3	115,0	157,0	192,0	245,0	303,0	353,0	469,0	561,0	817,0

Quel que soit le type de boulons, le jeu normal entre la tige du boulon et le trou des pièces à assembler est fixé à 2 mm pour les diamètres de boulons d inférieur ou égal à 24 mm, et à 3 mm pour les diamètres de boulons égaux ou supérieurs à 27 mm. Le diamètre d_0 du trou vaut donc:

$$d_0 = d + 2\text{mm} \quad \text{pour : } d \leq 24\text{mm.}$$

$$d_0 = d + 3\text{mm} \quad \text{pour : } d \geq 27\text{mm.}$$

L'Eurocode 3 (§ 7.5.2) propose les mêmes diamètres de trous, sauf pour les diamètres de boulons $d \leq 14$ mm, pour lesquels $d_0 = d + 1$ mm.

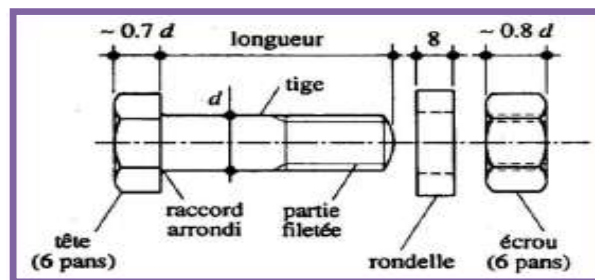


Figure IV.2 : Boulon de charpente métallique

Tableau IV.2 : caractéristiques des boulons

	M 12	M 16	M 20	M 24	M 27
Diamètre de la tige d [mm]	12	16	20	24	27
Diamètre du trou d_o [mm]	14	18	22	26	30
Section de la tige A [mm ²]	113	201	314	452	573
Section résistante A_s [mm ²]	84	157	245	353	459

IV.3 Diamètre des boulons :

Pour des raisons pratiques, on évitera la mise en œuvre dans un même assemblage de boulons de diamètres différents, tandis que l'utilisation de boulons de même diamètre mais de classe de qualité différente est carrément proscrite.

Le choix du diamètre des boulons se fera en déterminant leur résistance ou celle des pièces assemblées sur la base d'une bonne estimation des efforts à transmettre.

Comme le diamètre d des boulons et l'épaisseur t des pièces à assembler ne sont pas totalement indépendants, le domaine d'utilisation des différents types de boulons est à peu près le suivant (entre parenthèses les diamètres utilisés moins couramment)

$t < 10$ mm	pour	$d = 12, 16$ mm.
$10 \text{ mm} \leq t \leq 25$ mm	pour	$d = 16, 20, 24$ mm.
$t > 25$ mm	pour	$d = 24, 27, 30$ mm.

IV.4 Dispositions constructives des boulons :

Dans un assemblage boulonné quelconque, les trous de boulons sont positionnés par les pinces e_i et les entre-axes p_i comme illustré sur la Figure VIII.7. On rappelle qu'une pince désigne la distance entre le centre d'un trou de fixation et le bord de la pièce. La pince est dite longitudinale lorsque la distance est mesurée dans la direction de l'effort, et transversale si la distance est mesurée dans la direction perpendiculaire. L'entraxe est la distance entre trous de fixation adjacents dans la direction considérée. Les valeurs à donner aux pinces e_1 et e_2 et aux entraxes p_1 et p_2 doivent être comprises entre des valeurs minimales qui ont pour but de prémunir l'assemblage contre le risque de déchirure des tôles assemblées et des valeurs maximales qui permettent d'éviter la corrosion ou le voilement local.

En règle générale, les trous de fixation d'un assemblage doivent vérifier :

$$1,5d_0 \leq e_1 \leq \inf(12t, 150\text{mm})$$

$$1,5d_0 \leq e_2 \leq \inf(12t, 150\text{mm})$$

$$3d_0 \leq p_i \leq \inf(14t, 150\text{mm})$$

Avec : d_0 : diamètre du trou.

T : épaisseur du plat le plus mince située sur l'extérieur.

Les trous normalisés pour les boulons des catégories A et D doivent être réalisés avec les tolérances suivantes :

- ✓ 1 mm pour les boulons M12 et M14 ;
- ✓ 2 mm pour les boulons M16 à M24 ;
- ✓ 3 mm pour les boulons M27 et au-delà

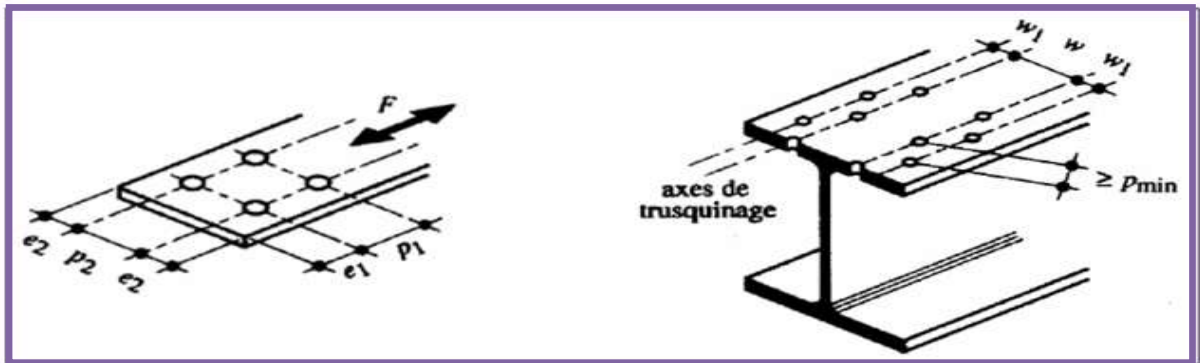


Figure IV.3 : Désignation des entraxes et des pincés.

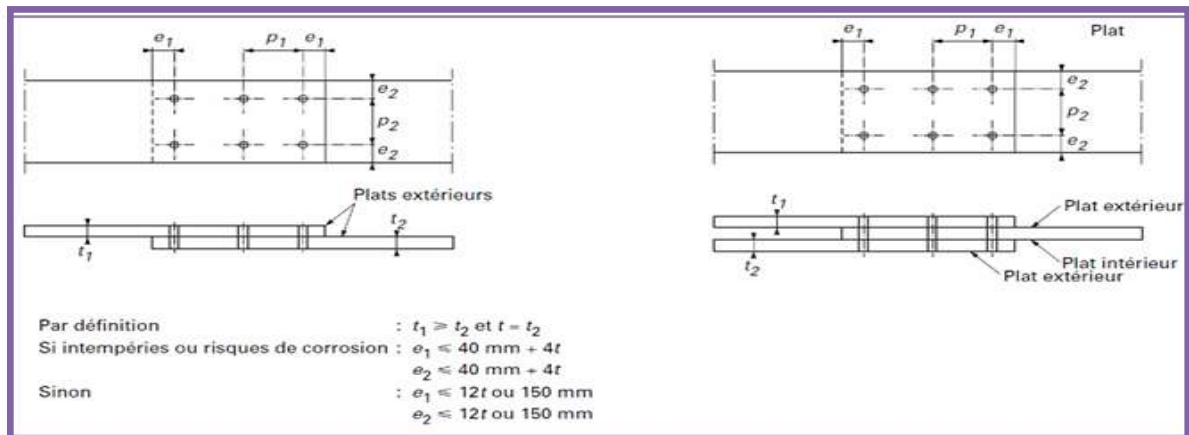


Figure IV.4 : Positionnement des trous pour boulons

Tableau IV.3 : Entraxes des boulons et pincés

Boulons	Valeurs usuelles [mm]			Valeurs minimales [mm]		
	p^1, p^2	e_1	e_2	p^1, p^2	e_1	e_2
M12	40	25	20	35	20	15
M16	50	35	25	40	25	20
M20	60	40	30	45	30	25
M24	70	50	40	55	35	30
M27	80	55	45	65	40	35

- ✓ L'Eurocode 3 (§ 6.5.1) donne les valeurs minimales suivantes (d_0 est le diamètre du trou) :

$$e_1 = 1.2 d_0 \text{ et } e_2 = 1.5 d_0$$

$$p_1 = 2.2 d_0 \text{ et } p_2 = 3.0 d_0$$

Tableau IV.4 : Coefficient de frottement

Classe	Caractéristiques	μ
A	Surfaces décapées par grenailage ou sablage, avec enlèvement de toutes les plaques de rouille non adhérentes et sans piqûres de corrosion.	0.50
	Surfaces décapées par grenailage ou sablage et métallisées par projection d'aluminium.	
	Surfaces décapées par grenailage ou sablage et métallisées par	
B	Surfaces décapées par grenailage ou sablage et recouvertes d'une couche de peinture au silicate de zinc alcalin d'épaisseur 50 à 80 μm .	0.40
C	Surfaces nettoyées par brossage métallique ou à la flamme avec enlèvement de toutes les plaques de rouille non adhérentes.	0.30
D	Surfaces non traitées.	0.20

IV.5 Les type d'assemblage :

Dans le cas de notre structure, comme le montre la figure suivante, on distingue quatre types d'assemblages :

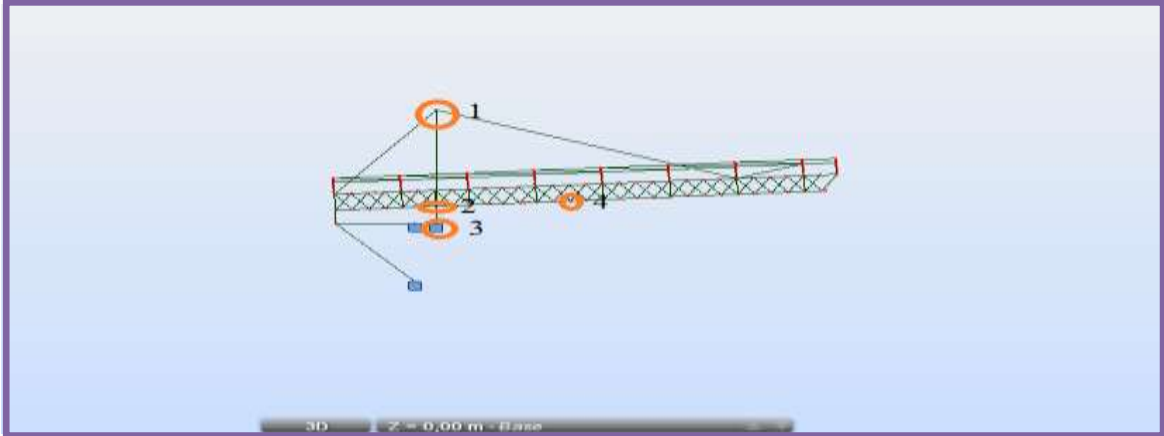


Figure IV.5 : Types d'assemblage dans la structure

IV.5.1 Assemblage entre mât, tirant et hauban :

Dans le 1^{er} cas des assemblages dans cette toiture entre ces 3 éléments on fait notre liaison avec l'aide de 2 corniers ce type est le plus répandu, pour assembler un mât, tirant et hauban.

Les boulons utilisés sont des boulons ordinaires non précontraints autorisant un certain glissement. Ce fait ainsi que la souplesse intrinsèque des éléments supportée une certaine ce qui permet à ces éléments de tournés. C'est la raison pour laquelle ce type d'assemblage est considéré comme une articulation et par conséquent ne transmet pas de moment fléchissant. Le seul effort global transmis est l'effort tranchant V_{sd} .



Figure IV.6 : Assemblage entre mât, tirant et hauban

IV.5.2 Assemblage entre mât et poutre en treillis :

Qui est généralement réalisé par un Assemblage à l'aide d'une platine boulonnée.

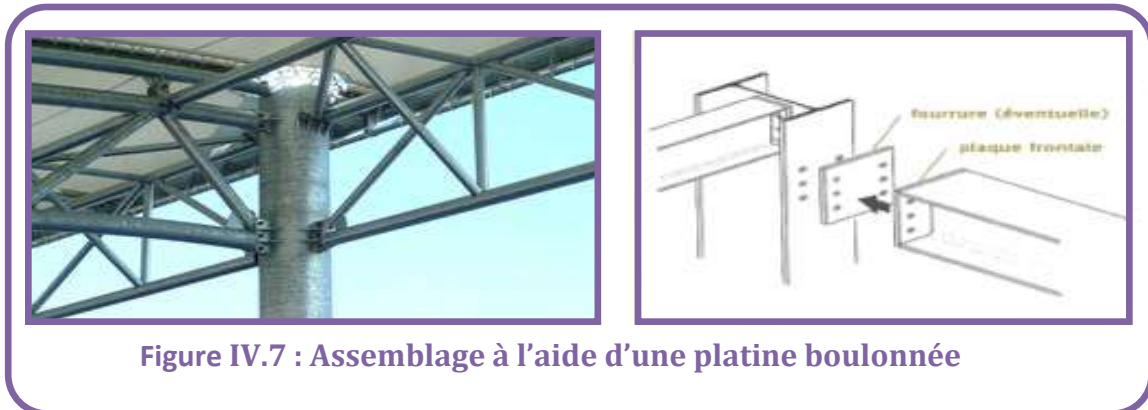


Figure IV.7 : Assemblage à l'aide d'une platine boulonnée

Ce dernier est un assemblage rigide qui transmet tous les efforts d'un composant à l'autre. L'avantage de la solution avec ce type d'assemblage fait travailler les boulons au double cisaillement. Par ailleurs, tous les efforts transmis sont parfaitement centrés.

Les boulons à utiliser peuvent être des boulons ordinaires ou des boulons HR précontraints. La disposition des boulons doit respecter les recommandations de l'EC 3-DAN sur les pinces et les entraxes.

IV.5.3 Encastrement en pied du mât :

Les dispositions courantes avec mât à section circulaire sont représentées sur la figure IV.8. Pour plus d'efficacité, il faut placer les tiges d'ancrages aux extrémités de la section de mât.

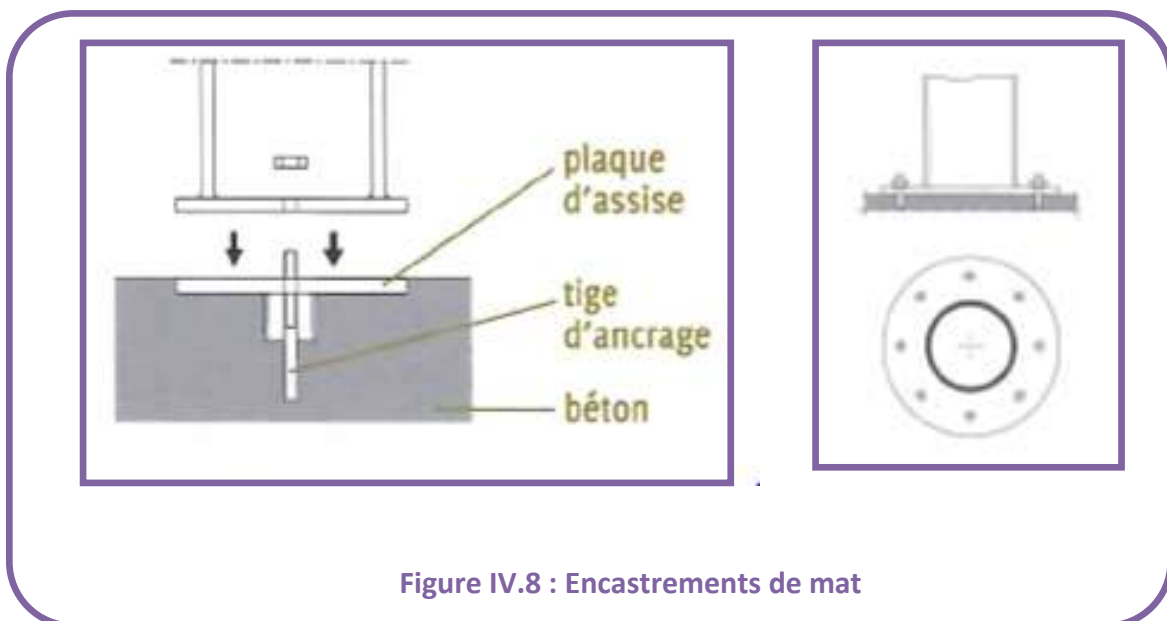


Figure IV.8 : Encastrement de mât

IV.5.4 Assemblage entre les éléments de la poutre en treillis :

Les assemblages entre les tubes se font par soudure. La soudure consiste à faire fondre l'acier localement avec ou sans apport de métal (toujours de l'acier) de manière à reconstituer une continuité de la matière aussi parfaite que possible. Le procédé le plus courant en construction métallique est la soudure à l'arc qui utilise la chaleur produite par un arc électrique pour emmener l'acier à la température de fusion.

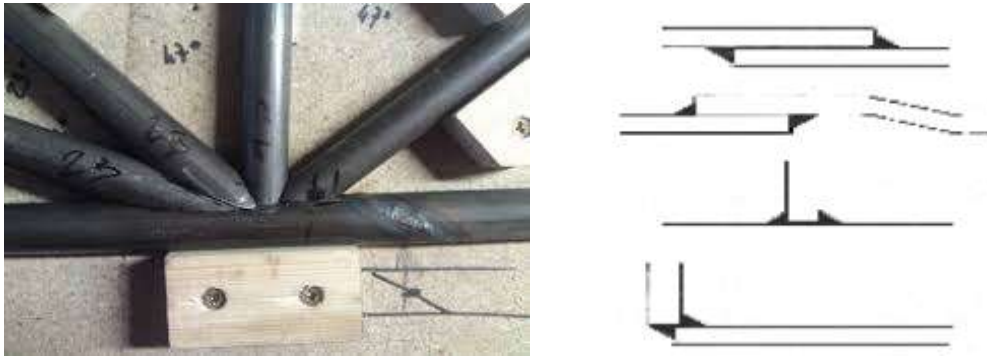


Figure IV.9 : soudure des éléments de treillis

IV.6 Conclusion :

Les assemblages constituent des zones particulières plus fragiles que les zones courantes des pièces, car les sections sont réduites du fait des perçages où la nature de l'acier affaiblie par la chauffe du soudage. En outre, les assemblages sont soumis à des sollicitations qui peuvent s'inverser et les contraintes peuvent changer de sens (une poutre de charpente peut fléchir dans le sens positif sous charge de neige et dans le sens négatif sous soulèvement par le vent).

C'est pourquoi il faut être particulièrement vigilant dans la conception et le calcul des assemblages, afin de se prémunir contre tout risque de rupture brutale.

Les assemblages peuvent être considérés comme autant de "**talons d'Achille**" dans une structure, et les anciens ont coutume de dire qu'une charpente sous dimensionnée, mais correctement assemblée, est préférable à une charpente correctement dimensionnée, mais mal assemblée.

**CHAPITRE
V : ETUDE AU
VENT**

CHAPITRE V : ETUDE AU VENT

V.1 Introduction :

L'effet du vent sur une construction est assez prépondérant et a une grande influence sur la stabilité de l'ouvrage. Pour cela, une étude approfondie doit être élaborée pour la détermination des différentes actions dues au vent et ceci dans toutes les directions possibles. Le calcul sera mené conformément au Règlement Neige et Vent 99 (RNV 99).

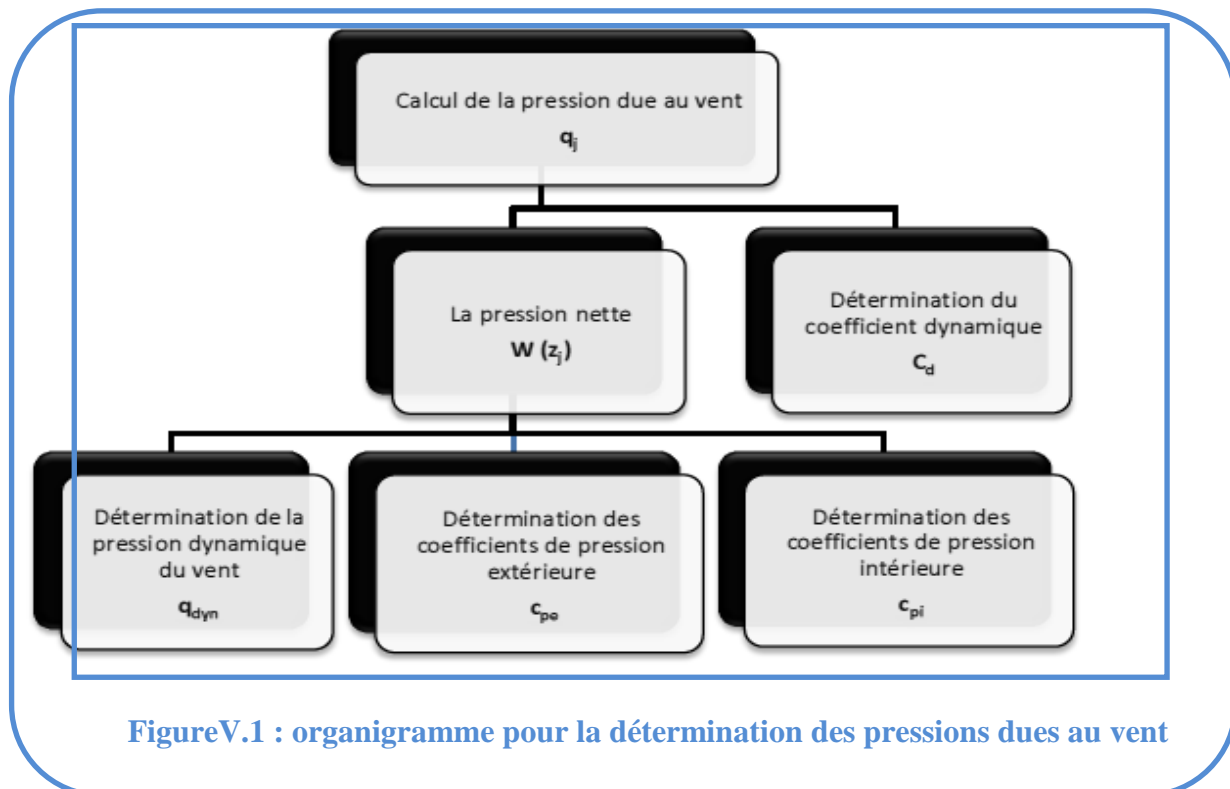
Le document technique réglementaire (DTR) fournit les procédures et principes généraux pour la détermination des actions du vent sur l'ensemble d'une construction et sur ses différentes parties et s'applique aux constructions dont la hauteur est inférieure à 200m.

Les actions du vent appliquées aux parois dépendent de :

- ✓ La direction.
- ✓ L'intensité.
- ✓ La région.
- ✓ Le site d'implantation de la structure et leur environnement.
- ✓ La forme géométrique et les ouvertures de la structure.

V.2 Détermination des pressions dues au vent :

L'organigramme suivant représente le travail à effectuer afin de déterminer les pressions dues au vent :



V.2.1 Calcul de la pression due au vent :

La pression due au vent qui s'exerce sur un élément de surface j est donnée par :

$$q_j = C_d \times W(Z_j) [\text{N/m}^2] \text{ (§1.2.2.1 RNV99)[1]}$$

C_d : le coefficient dynamique de la construction Figure 3.3[1]

W : (en N/m^2) est la pression nette (appelée aussi pression) exercée sur l'élément de surface, calculée à la hauteur Z_j relative à l'élément de surface j

V.2.1.a Détermination du coefficient dynamique C_d :

C_d est donné en fonction des dimensions :

- ✓ b (en m) qui désigne la dimension horizontale perpendiculaire à la direction du vent prise à la base de la construction.
- ✓ h (en m) qui désigne la hauteur total de la construction

Le coefficient est déterminé à partir de l'abaque suivant :

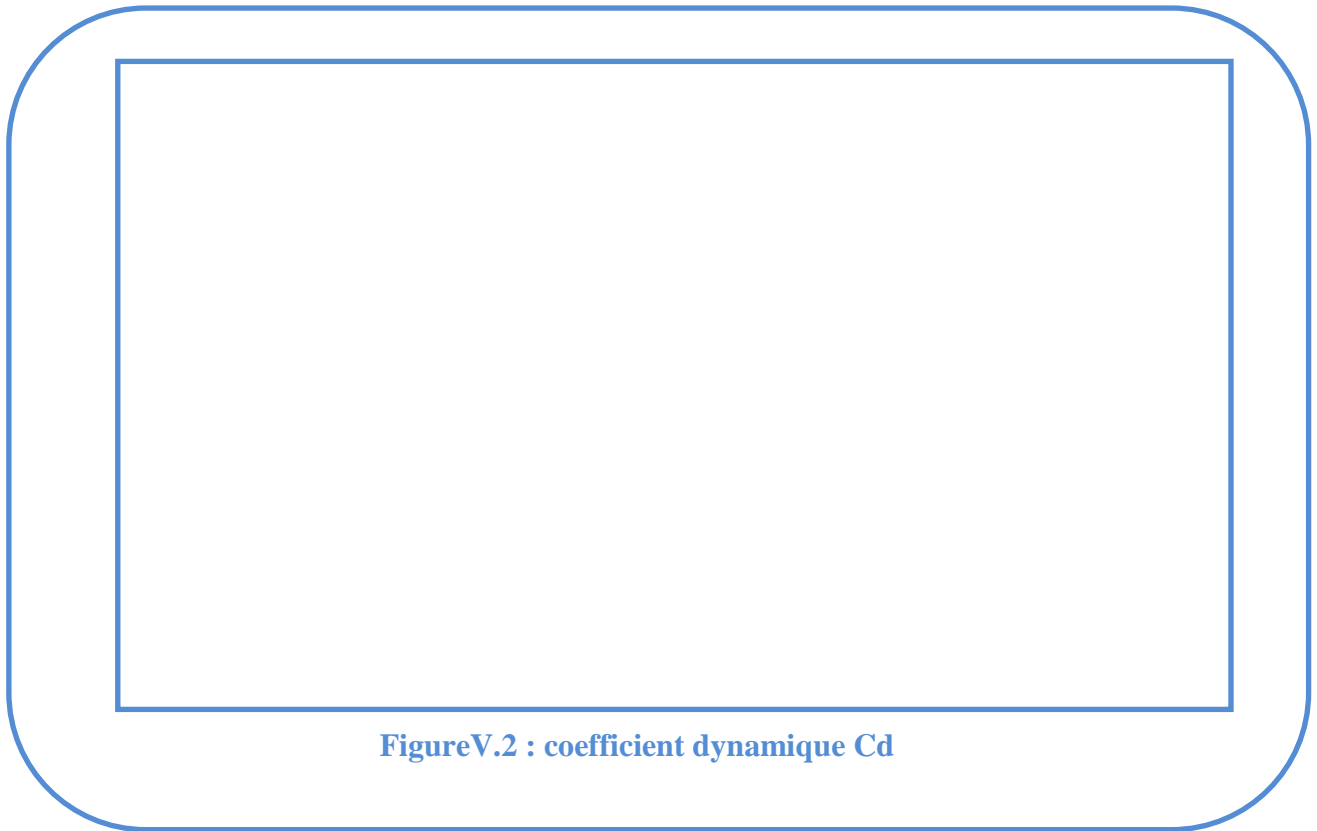


Figure V.2 : coefficient dynamique C_d

On notera que ce coefficient est limité à 0,90 pour des immeubles d'une hauteur de 50 m ou plus, quelle qu'en soit la longueur. Le coefficient de réduction garde une valeur constante (0,70) jusqu'à 30 m de hauteur, pour des bâtiments ayant plus de 100 m de longueur.

V.2.1.b Détermination de la pression due au vent $W(z_j)$:

$$W(z_j) = q_{\text{dyn}}(Z_j) \times (C_e - C_i) [\text{N/m}^2] \quad (\text{\S}1.2.2.2 \text{ RNV99}) [1]$$

- ✓ q_{dyn} : est la pression dynamique du vent calculée à la hauteur Z_j relative à l'élément de surface j .
- ✓ C_e : est le coefficient de pression extérieure.
- ✓ C_i : est le coefficient de pression intérieure.

i. Détermination de la pression dynamique q_{dyn} :

La pression dynamique qui s'exerce sur un élément de surface j est donnée par :

$$q_{\text{dyn}} = q_{\text{réf}} \times C_{\text{ex}} [\text{N/m}^2] \quad (\text{\S}3.2 \text{ RNV99})$$

- ✓ $q_{\text{réf}}$: est la pression dynamique de référence pour les constructions permanentes données par le règlement.
- ✓ C_{ex} : coefficient d'exposition au vent.

ii. Détermination du coefficient d'exposition $C_{\text{ex}}(Z)$:

Dans le cas où la structure est peu sensible aux excitations dynamiques le coefficient d'exposition est donné par la formule ci-dessous :

$$C_e(Z) = C_t(Z)^2 \times C_r(Z)^2 \left[1 + \frac{7 \times K_t}{C_r(Z) \times C_t(Z)} \right] \quad (\text{\S}3.3.2 \text{ RNV99})$$

- ✓ $C_t(z)$: le coefficient de topographie
- ✓ $C_r(z)$: le coefficient de rugosité
- ✓ K_T : facteur de terrain.

iii. Coefficient de rugosité :

Le coefficient de rugosité traduit l'influence de la rugosité et de la hauteur sur la vitesse moyenne du vent.

$$C_r(Z) = K_T * \ln\left(\frac{Z}{Z_0}\right) \quad \text{pour} \quad Z_{\min} \leq Z \leq 200 \text{ m}$$

$$C_r(Z) = K_T * \ln\left(\frac{Z_{\min}}{Z_0}\right) \quad \text{pour} \quad Z < Z_{\min}$$

(§4.2 RNV99)

V.2 Application à la structure :

Dans cette étape on s'est limité uniquement à l'étude au vent suivant un sens(**voir figure suivante**), car suivant ce sens la structure présente une portée importante (**48 m**), ce qui augmente le risque de soulèvement, pour cela le bureau portugais **PRO ANGEL** a inséré des contrepoids aux extrémités afin de protéger la structure de ce phénomène, et d'autre part éviter la rupture des câbles, car si la structure est soulevée par le vent les câbles seront relâchés, et quand le vent s'arrête y'aura un type de choc pour les câbles qui vont pas supporté le relâchement directe de la structure ce qui va causer la ruine. Pour cela notre travail consiste à faire une vérification au soulèvement de cette couverture.

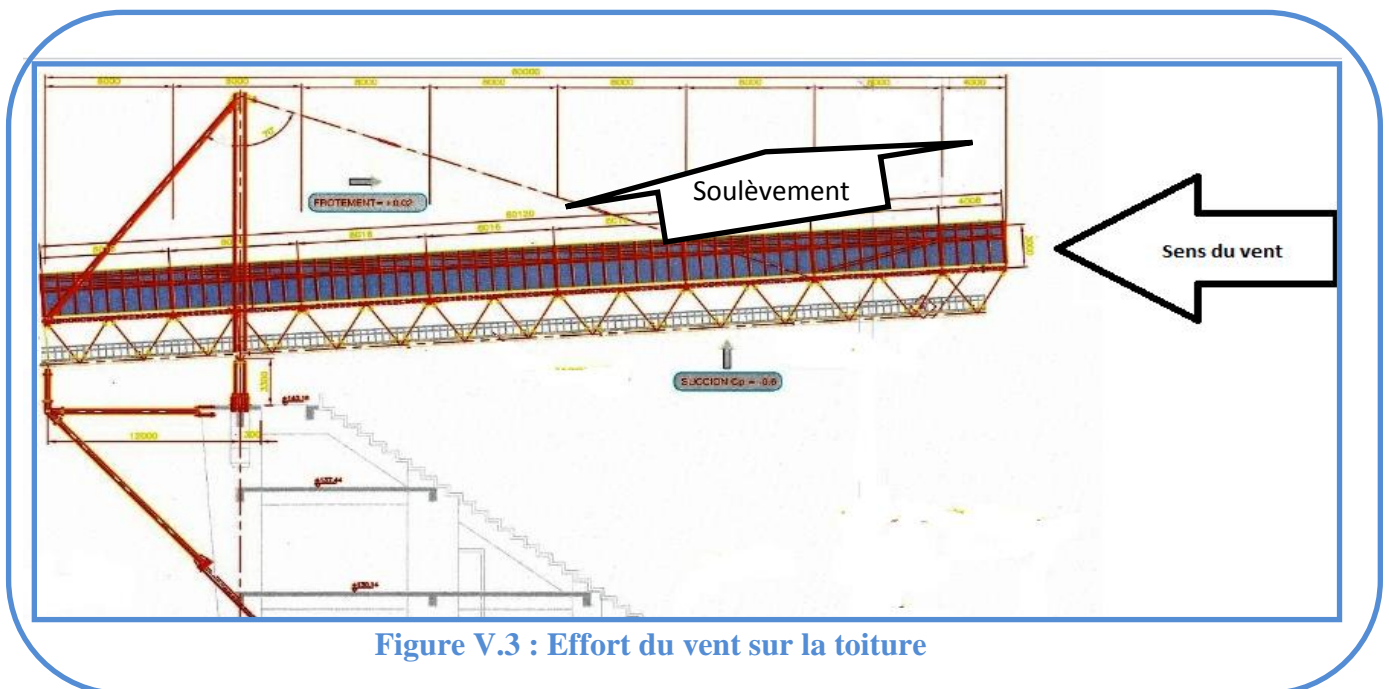


Figure V.3 : Effort du vent sur la toiture

Et vu la grandeur des dimensions et le type de notre structure, certains coefficients sont impossible de les définir par le règlement **RNV 99**, et précisément les coefficients de pression

V.2.1 Essais de soufflerie :

Un **essai soufflerie** est une installation d'essais utilisée en aérodynamique pour étudier les effets d'un écoulement d'air sur un corps, généralement un modèle de dimension réduite par rapport au

réel. On peut effectuer dans une soufflerie des mesures, par exemple d'efforts, et des visualisations d'écoulement le plus souvent impossibles à faire dans les conditions réelles.

Le cas de notre toiture ils ont opté pour une maquette de l'échelle 1/200, sur laquelle ils ont placé des capteurs dans plusieurs points liés à l'outil informatique, par la suite ils ont appliqué un vent calculé (q_{dyn} cité précédemment) d'une valeur de $q_{dyn} = 160 \text{ kg/m}^2$ suivant les sens indiqué dans la figure précédente.

Par la suite en utilisant la série de fourrier, à partir de différentes valeur indiqué par les capteurs, ils ont déterminé les coefficients suivant :

Avec un $q_{dyn} = 160 \text{ kg/m}^2$ on a :

- ✓ Coefficient de pression intérieur $C_i = -0.6$
- ✓ Coefficient de pression extérieur $C_e = +0.45$
- ✓ Coefficient de frottement qui est $C_f = +0.2$

V.2.2 Détermination du coefficient d'exposition C_{ex} selon l'RNV 99 :

Ce coefficient dépend de la catégorie du terrain et de son site pour cela toute les coefficients à calculer dans la formule précédente ont une relation avec le terrain pour cela ils sont nommés facteurs de site. Et leurs valeurs sont tirés à partir des tableaux suivants :

Tableau V.1 : Définition des catégories de terrain.

Catégories de terrain	K_T	Z_0 (m)	Z_{min} (m)	ϵ
I En bord de mer, au bord d'un plan d'eau offrant au moins 5 km de longueur au vent, régions lisses et sans obstacles.	0,17	0,01	2	0,11
II Régions de culture avec haies et avec quelques petites fermes, maisons ou arbres.	0,19	0,05	4	0,26
III Zones industrielles ou suburbaines, forêt, zones urbaines ne rentrant pas dans la catégorie de terrain IV	0,22	0,3	8	0,37
IV Zones urbaines dont au moins 15% de la surface est occupée par des bâtiments de hauteur moyenne supérieure à 15 m.	0,24	1	16	0,46

Pour notre structure on a été situé dans la catégorie -III- donc on a :

- ✓ Facteur du terrain $K_T = 0.22$
- ✓ Paramètre de rugosité $Z_0 = 0.3 \text{ m}$
- ✓ Hauteur minimale $Z_{min} = 8 \text{ m}$

Et vu que la hauteur total du stade est de $Z=39$ m, pour le calcul du coefficient de rugosité C_r on utilise cette formule :

$$C_r(Z) = K_T * \ln \left(\frac{Z}{Z_0} \right)$$

Car on a : $Z_{\min}=8\text{m} < Z=39 \text{ m} < 200\text{m}$

Après calcul on trouve le coefficient de la rugosité :

$$C_r = 1.07$$

Pour le coefficient topographique C_t , prend en compte l'accroissement de la vitesse du vent lorsque celui-ci souffle sur des obstacles tels que les collines, les dénivellations isolées, ... etc. il est donné par le tableau suivant :

Tableau -1- coefficient de topographie

Site	$C_t(z)$
site plat ($\Phi < 0,05$, voir § 4.3.4)	1
site aux alentours des vallées et oueds sans effet d'entonnoir	1
site aux alentours des vallées et oueds avec effet d'entonnoir	1,3
site aux alentours des plateaux	1,15
site aux alentours des collines	1,15
site montagneux	1,5

Notre site est situé aux alentours des collines ce qui veut dire on prend un coefficient topographique :

$$C_t = 1.15$$

✓ Calcul du coefficient d'exposition C_{ex} :

$$C_{ex} = 1.15^2 \times 1.07^2 \left[1 + \frac{7 \times 0.22}{1.15 \times 1.07} \right]$$

$$C_{ex} = 3.41$$

a) Détermination de la pression dynamique de référence $q_{\text{réf}}$:

Sa valeur est déterminée en fonction de la zone d'implantation de la structure qui est donné par le règlement, elle est résumée dans le tableau suivant :

Tableau -2- valeurs de la pression dynamique de référence

Zone	$q_{réf}$ (N/m²)
I	375
II	470
III	575

Pour notre cas on ait situé à la zone -III- donc :

$$q_{réf} = 37.5 \text{ daN}$$

b) Calcul de la pression dynamique de référence q_{dyn} :

Donc : $q_{dyn} = q_{réf} \times C_{ex}$

$$q_{dyn} = 37.5 \times 3.41$$

$$q_{dyn} = 127.86 \text{ daN}$$

Pour une raison de sécurité, et afin de de prendre les même valeurs que le bureau d'étude on a opté pour une augmentation de la valeur de la pression dynamique donc on va prendre :

$$q_{dyn} = 160 \text{ daN} = 160 \text{ Kg/m}^2$$

c) Calcul de la pression due au vent $W(z_j)$:

Suivant la formule :

$$W(z_j) = q_{dyn}(Z_j) \times (C_e - C_i)$$

Donc :

$$W(z_j) = 160 \times [+0.45 - (-0.60)]$$

On a donc :

$$W(z_j) = 168 \text{ kg/m}^2$$

d) Remarque :

Le coefficient de pression extérieur est faible par rapport au coefficient intérieur, ce qui nous mène à dire que le vent exerce un effort de soulèvement sur la toiture, pour cela on doit effectuer cette vérification.

V.2.3 Vérification au soulèvement :

Afin que la toiture soit vérifiée contre le soulèvement, le moment appelé renversant créé par le vent ascendant doit être inférieur au moment appelé stabilisant, créé par le poids propre de la structure :

$$M_R < M_S$$

Avec : M_R : Moment renversant créé par la résultante du vent.

M_S : Moment stabilisant créé par la résultante du poids propre de la structure.

Cette vérification, nécessite le calcul des résultantes du vent et du poids propre de la structure et de déterminer leurs positions. Donc après avoir calculé ces données on a :

1. Le vent :

- ✓ La résultante : $V = 6935.04 \text{ KN}$
- ✓ La position par rapport aux poteaux : $L_1 = 18 \text{ m}$

2. Le poids propre :

- ✓ La résultante : $P = 6445.47 \text{ KN}$
- ✓ La position par rapport aux poteaux : $L_2 = 24 \text{ m}$

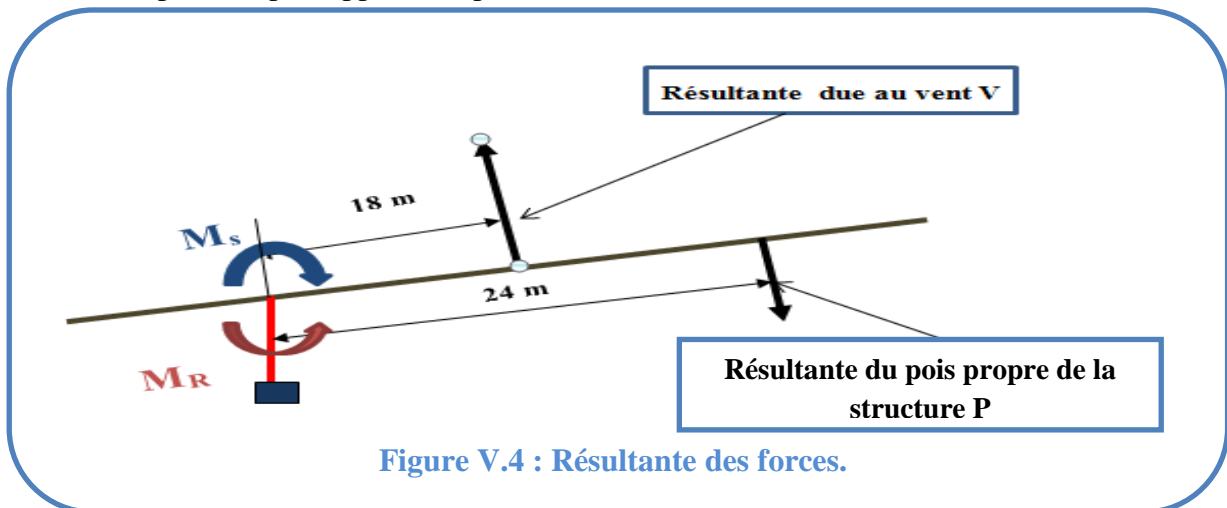


Figure V.4 : Résultante des forces.

3. Calcul du moment renversant M_R :

$$M_R = V \times L_1$$

On a :

$$M_R = 6935,04 \times 18$$

Donc le moment renversant est de :

$$M_R = 124830,72 \text{ KN.m}$$

4. Calcul du moment stabilisant M_s :

$$M_s = P \times L_2$$

On a :

$$M_s = 6445.47 \times 24$$

Donc le moment stabilisant est de :

$$M_s = 154691,28 \text{ KN.m}$$

➤ Donc après calculs on a :

$$M_R = 124830,72 \text{ KN.m} < M_s = 154691,28 \text{ KN.m}$$

V.3 Conclusion:

Ce qui signifie que le moment renversant est plus petit que le moment stabilisant, donc on peut dire qu'il ne y'a pas de risque de soulèvement pour notre toiture.

L'ingénierie du vent est un domaine d'expertise qui repose sur des connaissances approfondies en matière d'aérodynamique et de comportement des structures et qui dispose d'outils tels que l'approche réglementaire et les approches de simulation des effets du vent.

L'approche réglementaire reste la base de l'étude des effets du vent. Pour les cas complexes, elle est suppléée par la simulation physique, à échelle réduite ou à échelle 1, et par la simulation numérique. Ces deux approches de simulation ne s'opposent pas mais se complètent.

**PARTIE II :
MODELISATION
NUMERIQUE ET
VERIFICATION**

**CHAPITRE
VI : MODELISATI
ON ET
RESULTATS**

CHAPITRE VI: MODELISATION ET RESULTATS

VI.1 Introduction :

Ce chapitre présent l'étude numérique utilisant le logiciel **Autodesk Robot Structural Analysis** pour but d'étudier et vérifié la couverture sous chargement statique et dynamique (vent) et déterminer les efforts exercés dans chaque éléments à fin de vérifier la section des profilés utilisé.

VI.2 Définition du logiciel Robot :

Autodesk Robot Structural Analysis Professional est une application logicielle collaborative, polyvalente et rapide, conçue pour aider à rester compétitif dans l'économie mondiale. **Autodesk Robot Structural Analysis Professional** est capable de calculer les modèles les plus complexes grâce à un maillage automatique par éléments finis d'une puissance exceptionnelle, des algorithmes non linéaires, ainsi qu'un jeu complet de codes de conception, le tout pour des résultats quasiment instantanés.

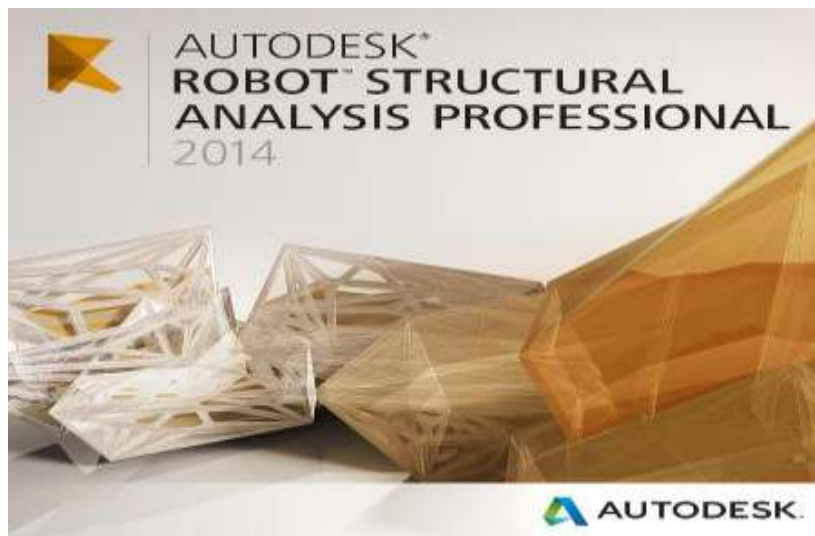


Figure VI.1 Le logiciel ROBOT

Autodesk Robot Structural Analysis Professional offre également l'avantage d'un flux de travail collaboratif plus fluide et d'une remarquable interopérabilité grâce à ses liaisons bidirectionnelles 3D vers les produits complémentaires **Autodesk**. Le système **ROBOT** regroupe plusieurs modules spécialisés dans chacune des étapes de l'étude de la structure (création du modèle de structure, calcul de la structure, dimensionnement). Les modules fonctionnent dans le même environnement.

VI.2.1 De l'analyse jusqu'aux dessins de fabrication :

Les ingénieurs structure qui utilisent le logiciel **Autodesk Robot Structural Analysis Professional** peuvent transférer de manière plus fluide des données de conception choisies vers le logiciel **AutoCAD** qui est un logiciel de dessin technique. Ils bénéficient ainsi d'un flux de travail intégré, de l'analyse à la documentation de projet et aux dessins de structure finaux, en passant par la conception.

VI.2.2 Modélisation, analyse et conception :

Non seulement le logiciel **Autodesk Robot Structural Analysis Professional** permet aux utilisateurs d'analyser un large éventail de structures, mais il intègre également des fonctions créées spécialement pour la modélisation, l'analyse et la conception de bâtiments. La présentation de type conception architecturale inclut des vues de plan d'étage pour faciliter la création de colonnes et la génération de présentations de structures de poutres. Les ingénieurs peuvent ainsi utiliser des outils pour ajouter, copier, supprimer et modifier une géométrie pour les étages identiques d'un bâtiment.

VI.2.3 Maillage automatique et modélisation avancés :

Autodesk Robot Structural Analysis Professional est une application logicielle d'analyse de structure performante, qui intègre de puissantes techniques de génération de maillage permettant aux ingénieurs structure de travailler plus efficacement sur des modèles encore plus complexes. Les outils de définition de maillage automatique facilitent la manipulation manuelle des mailles, la décomposition et le maillage autour des ouvertures de toute forme et de toute taille. Les nombreux outils de maillage disponibles permettent aux ingénieurs structure de créer plus rapidement un maillage par éléments finis de haute qualité sur quasiment n'importe quelle forme de structure.

VI.2.4 Capacités d'analyse :

Autodesk Robot Structural Analysis Professional est un outil puissant, convivial et efficace en matière d'analyse statique linéaire générale. Il permet en outre aux ingénieurs structure d'aller au-delà des capacités d'analyse habituelle offertes par d'autres logiciels. Ils peuvent ainsi explorer plus facilement différentes alternatives d'une même conception et étudier le comportement linéaire et non linéaire d'une structure. Le logiciel permet d'analyser simplement et efficacement de nombreux types d'effets non linéaires (analyses P-delta, membres de tension/compressions, appuis, câbles et charnières plastiques, pour n'en citer que quelques-uns). **Autodesk Robot Structural Analysis Professional** intègre des outils d'avant-garde pour l'analyse dynamique des structures, de même que des solveurs dynamiques de haut niveau qui facilitent l'exécution des analyses dynamiques pour les structures délicates.

VI.2.5 Solveurs d'analyse :

Autodesk Robot Structural Analysis Professional intègre différents solveurs de pointe, capables de traiter plus rapidement des modèles de structure encore plus complexes. Basés sur une technologie avancée, ces algorithmes d'analyse permettent aux ingénieurs d'obtenir des résultats plus rapidement. Ils peuvent ainsi optimiser et ré-analyser plus facilement des structures, de même qu'explorer de nombreuses configurations possibles de ces dernières.

VI.2.6 De nombreux formats de sortie pour les résultats d'analyses :

Autodesk Robot Structural Analysis Professional permet d'obtenir de façon souple les résultats de vos analyses. Ces résultats peuvent être consultés, sous la forme de diagrammes et de plans pour des membres individuels, des pièces ou l'intégralité de la structure. Les résultats présentés en tableaux peuvent quant à eux être facilement filtrés pour montrer des données spécifiques et générés aisément dans des feuilles de calcul pour le post-traitement des données par l'utilisateur.

VI.2.7 Codes de conception internationaux

Autodesk Robot Structural Analysis Professional inclut plus de 60 bases de données de coupes et de matériaux du monde entier, facilitant ainsi la conduite de projets internationaux. Avec 70 codes de conception intégrés pour de nombreux pays, les ingénieurs structure peuvent travailler avec des formes de coupes spécifiques à des pays, en unités anglo-saxonnes ou métriques, mais aussi avec des codes de construction spécifiques à des pays, le tout dans le même modèle intégré.

VI.2.8 Modélisation des données du bâtiment pour l'ingénierie structure :

La modélisation des données du bâtiment est un processus intégré basé sur les informations coordonnées et fiables d'un projet, de la conception jusqu'à la construction et l'exploitation. En adoptant ce logiciel, les architectes, les ingénieurs, les maîtres d'œuvre et les propriétaires peuvent plus facilement créer des informations et des documentations de conception numériques coordonnées, utiliser ces informations pour visualiser, simuler et analyser avec précision les performances, l'apparence et les coûts d'un projet, de même que livrer le projet plus rapidement, à moindre coût et avec un impact réduit sur l'environnement.

VI.2.9 Organigramme de modélisation sur robot :

Ce suivant organigramme présente les différentes étapes à suivre afin de modéliser une structure en génie civil, et aussi déterminer les efforts exercés et vérifier les sections des éléments structuraux.

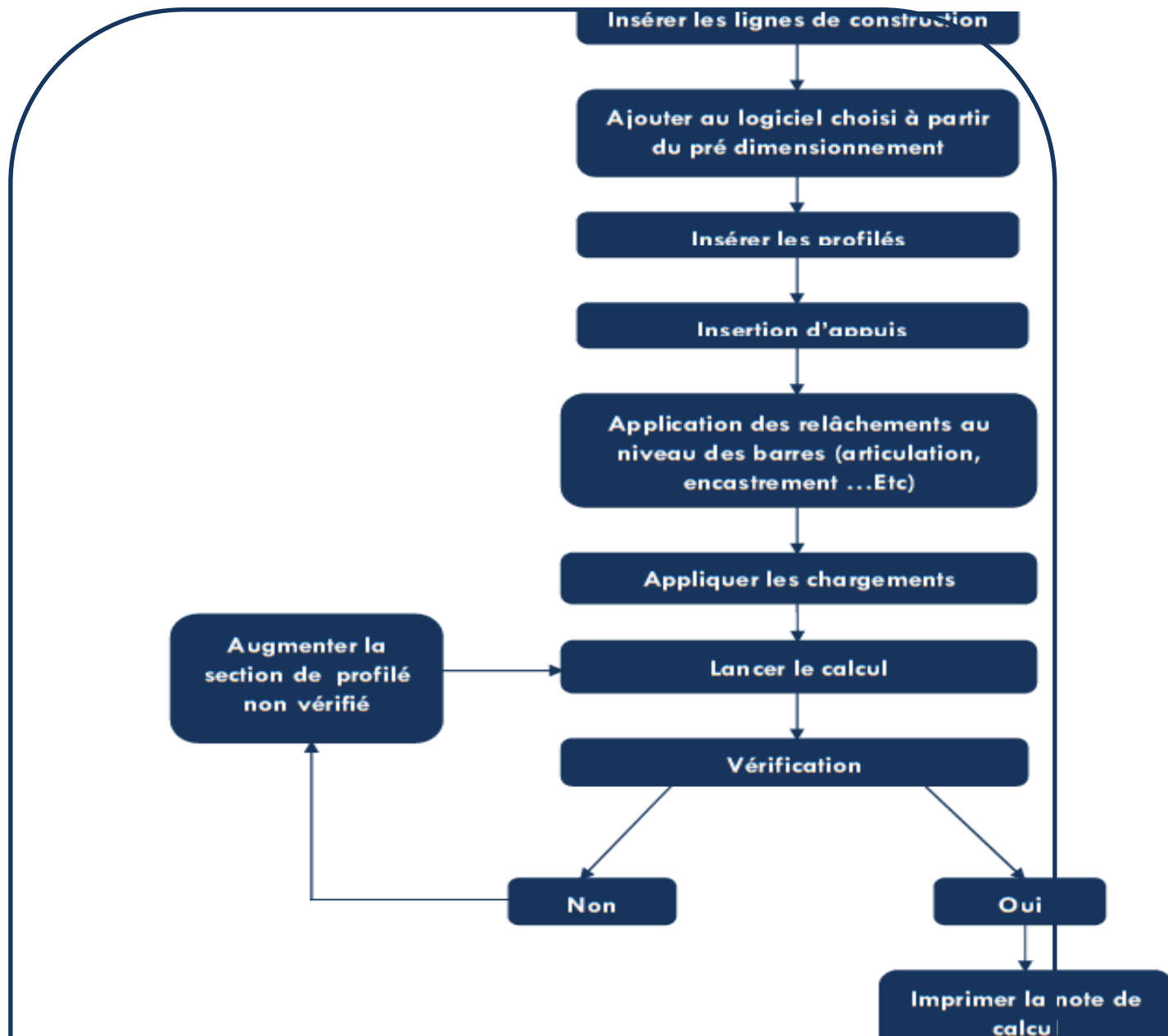


Figure VI.2 Organigramme des étapes de modélisation

VI.2.10 Démarrage de Robot :

Le système ROBOT regroupe plusieurs modules spécialisés dans chacune des étapes de l'étude de la structure (création du modèle de structure, calcul de la structure, Dimensionnement). Les modules fonctionnent dans le même environnement.

Après le lancement du système ROBOT (pour ce faire, cliquer sur l'icône approprié affiché sur le bureau ou sélectionner la commande appropriée dans la barre des tâches), la fenêtre représentée sur la figure VI.3 est affichée. Dans cette fenêtre, nous pouvons définir le type de la structure à

étudier, ouvrir une structure existante ou charger le module permettant d'effectuer le dimensionnement de la structure.

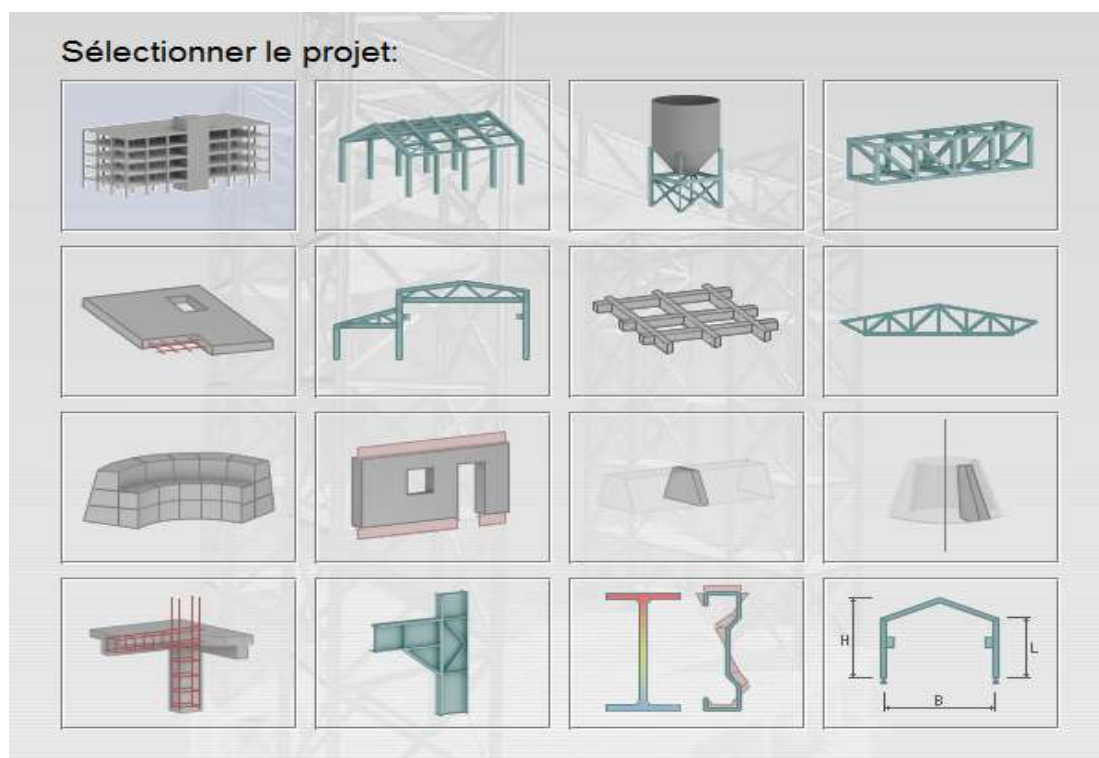


Figure VI.3 : Choix du projet à modéliser

VI.2.11 L'environnement du travail:

Une fois un type de structure sélectionné, on arrive à l'écran ci-après avec un certain nombre de zones utiles à connaître pour le déroulement de notre modélisation et de l'exploitation des résultats.

Le principe fondamental de ROBOT est la gestion par bureaux qui va vous guider à travers les étapes essentielles de modélisation, d'exploitation de résultats et enfin le dimensionnement des éléments.

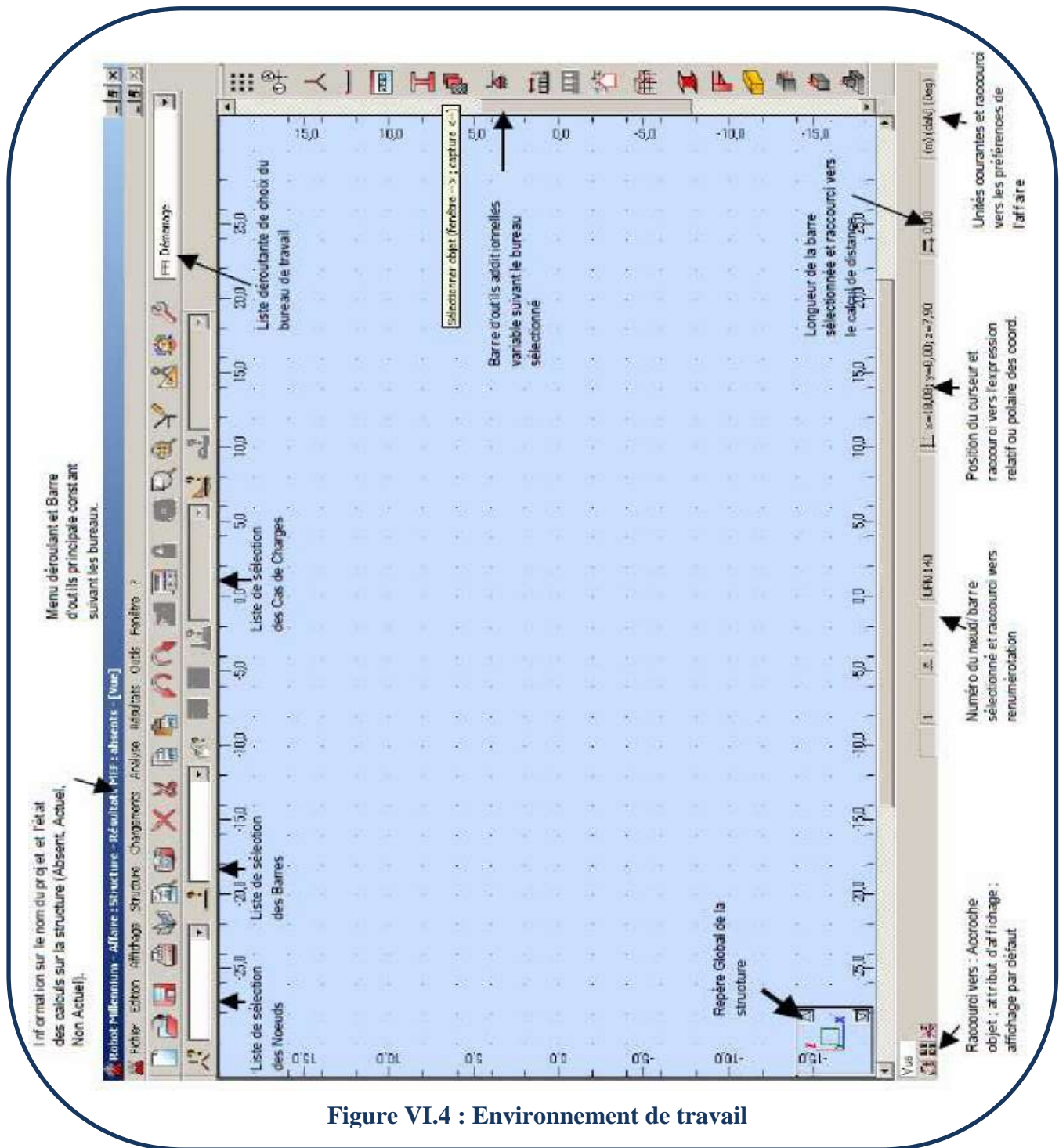


Figure VI.4 : Environnement de travail

VI.3 Application à notre projet :

VI.3.1 Etapes de modélisation :

a) Choix de projet :

- ✓ On choisit étude d'un portique spatiale

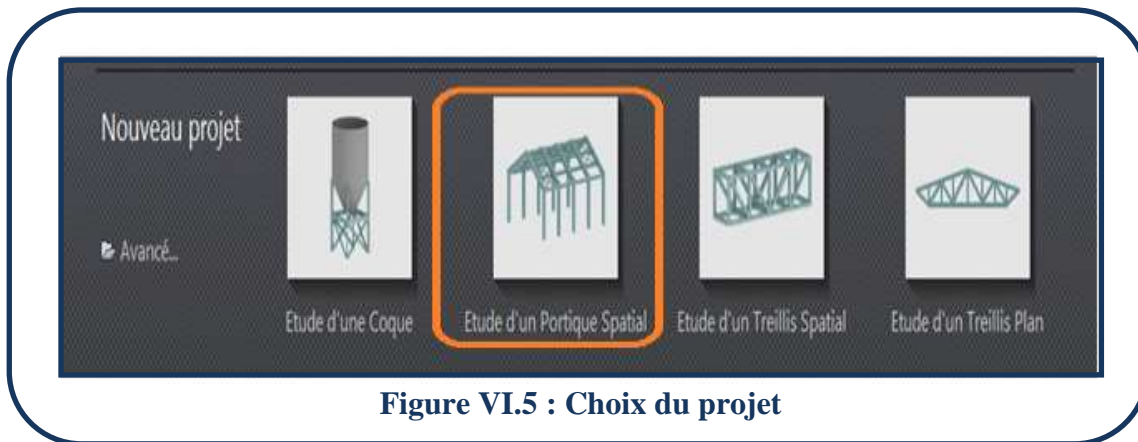


Figure VI.5 : Choix du projet

b) Choix de la norme et des unités :

- ✓ Dans préférence de la tache on choisit les déférentes unités :

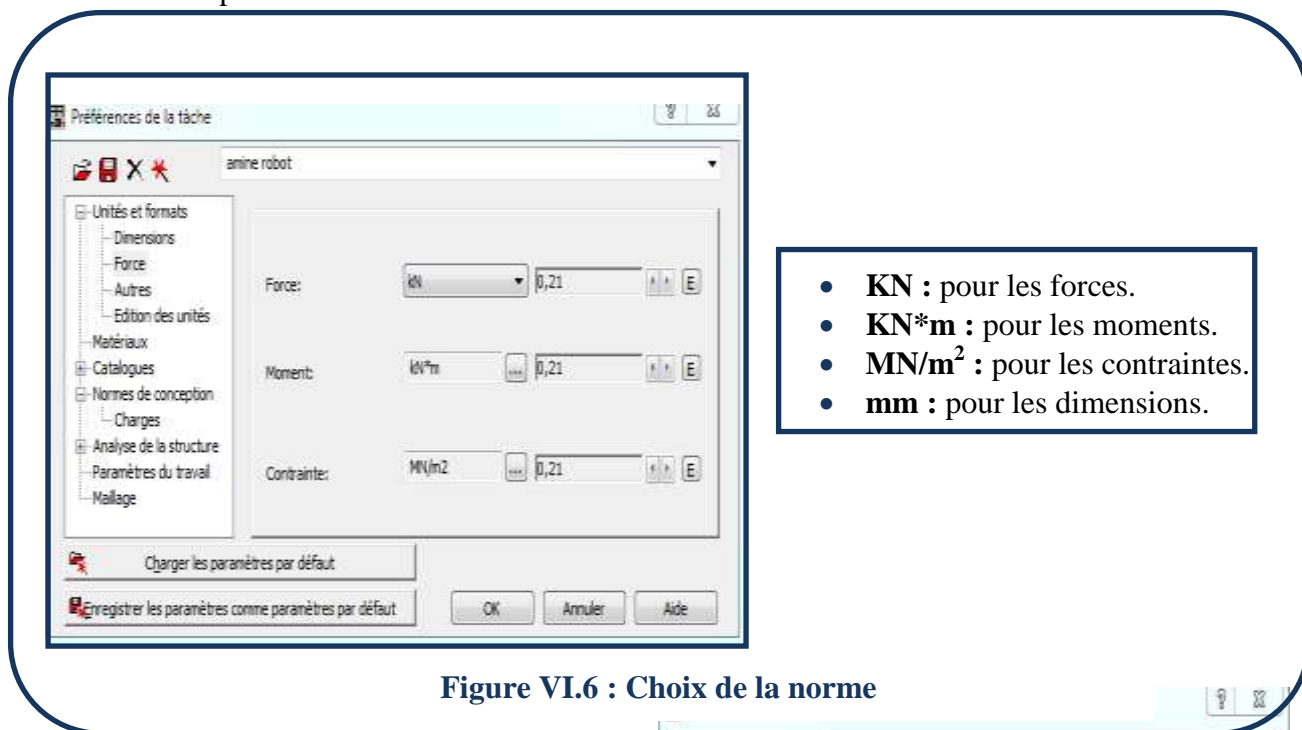
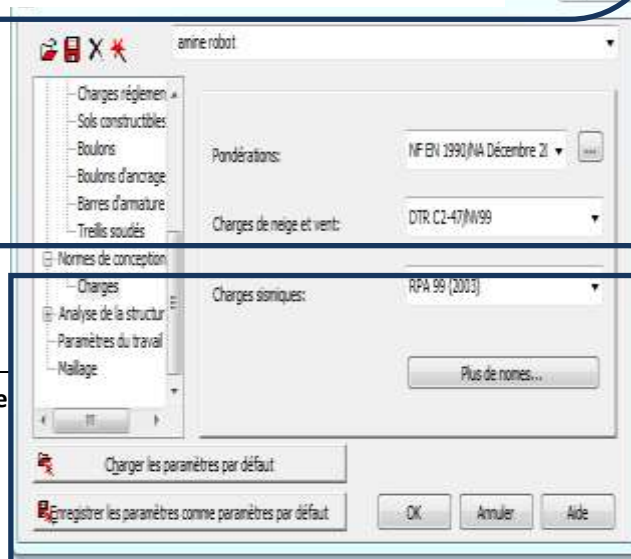


Figure VI.6 : Choix de la norme

- ✓ Toujours dans préférence de la tâche, on choisit pour norme d'étude :




- **Eurocode 3** : pour le calcul de la structure.
- **RNV 99** : pour les charges neige et vent.

Figure VI.7 : Choix de la norme

c) Lignes de construction :

✓ Définition :

Les lignes de construction forment une grille auxiliaire qui facilite la définition des différents éléments de la structure et permet de se référer aux composants de cette structure (c'est-à-dire de les sélectionner). La grille formée par les lignes de construction crée des points sur lesquels nous pouvons positionner le pointeur lors de la définition graphique de la structure.

Après un clic sur l'icône affichée dans la barre  d'outils dans le bureau Démarrage Le logiciel affiche alors la boîte de dialogue représentée ci-dessous :

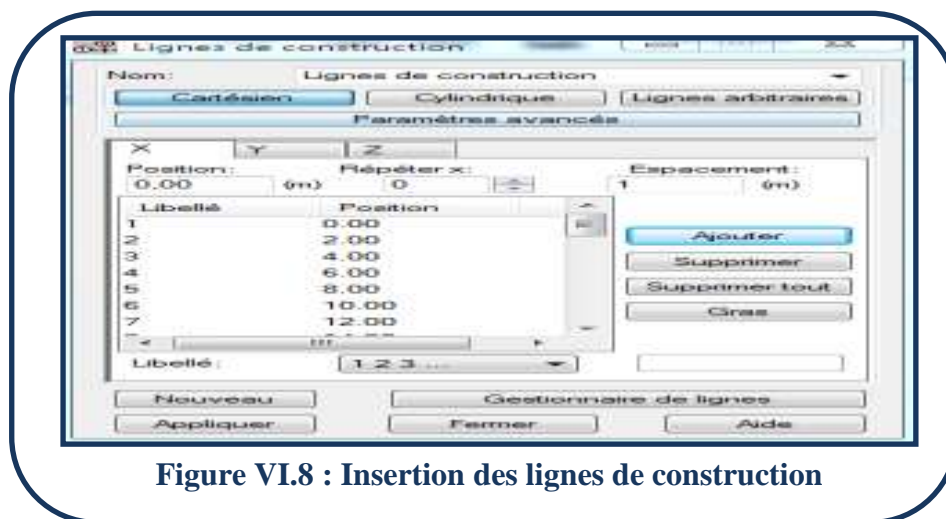



Figure VI.8 : Insertion des lignes de construction

Par la suite on choisit les dimensions de la structures selon les 3 axes x, y et z, comme l'indique la figure précédente.

d) Choix des éléments de la structure :

✓ Création des profils :

Après avoir les lignes de construction on crée les déferent types de profilés tubulaires comme suit :

- a. Dans la barre d'outilles on clique sur l'icône profilés de barre  pour ouvrir une nouvelle fenêtre comme montré sur la figure :

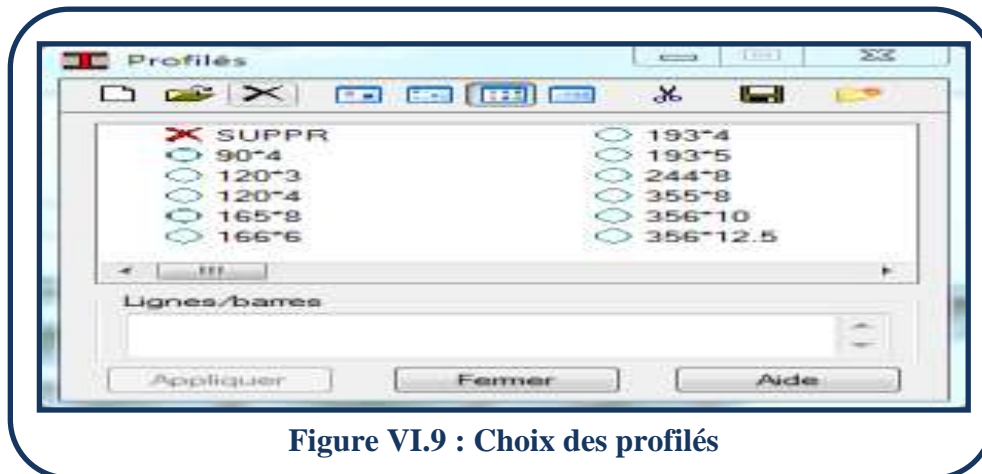


Figure VI.9 : Choix des profilés

- b. Par la suite on clique sur nouveau pour la création de déferents profilés :

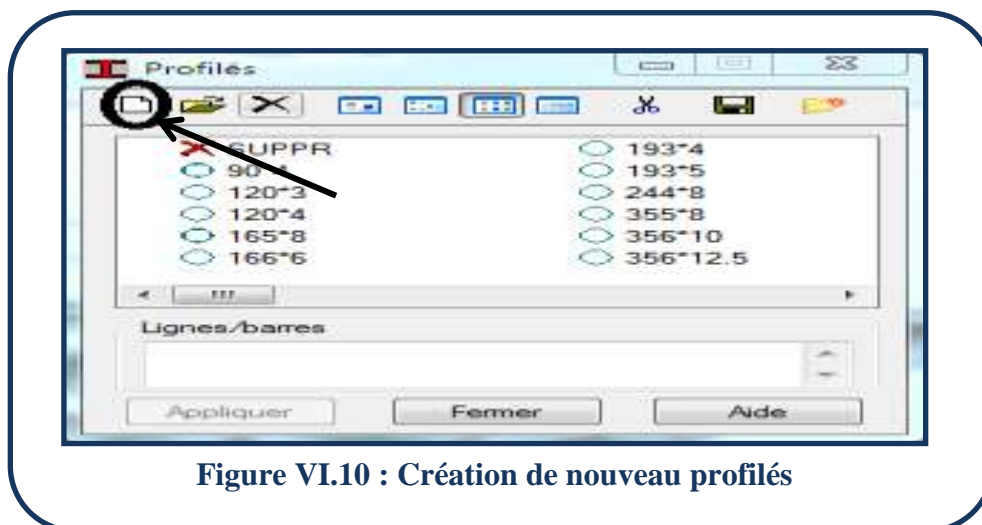


Figure VI.10 : Création de nouveau profilés

c. Ensuite, on choisit dans la fenêtre suivante les dimensions de notre profilé à ajouter.

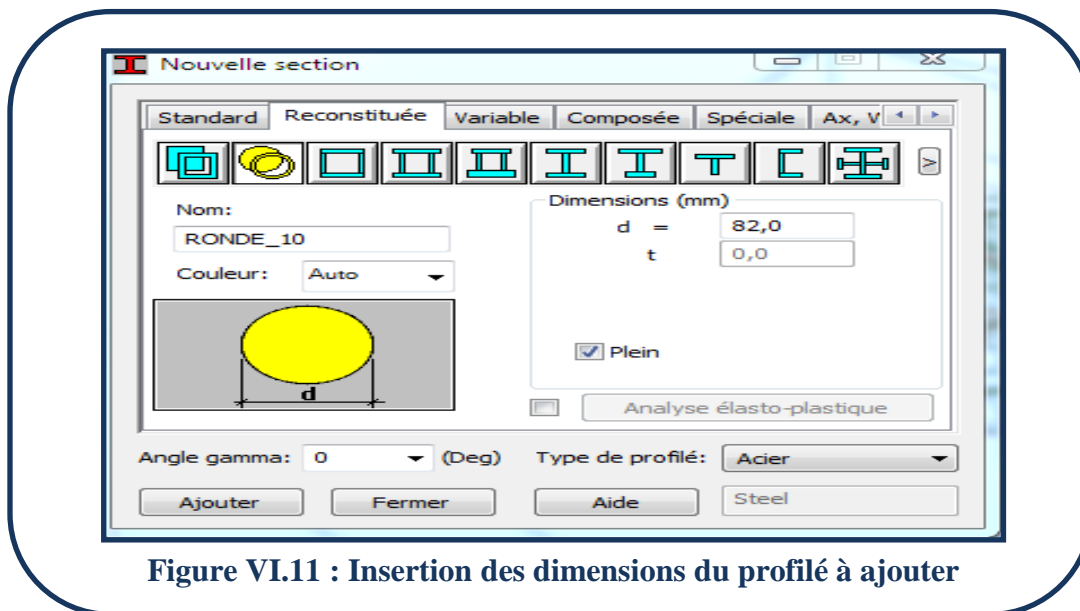



Figure VI.11 : Insertion des dimensions du profilé à ajouter

d. Pour le dessin des éléments de la structure il suffit Just de cliquer sur l'icône  dans la barre d'outils une boîte de dialogue sera affichée :

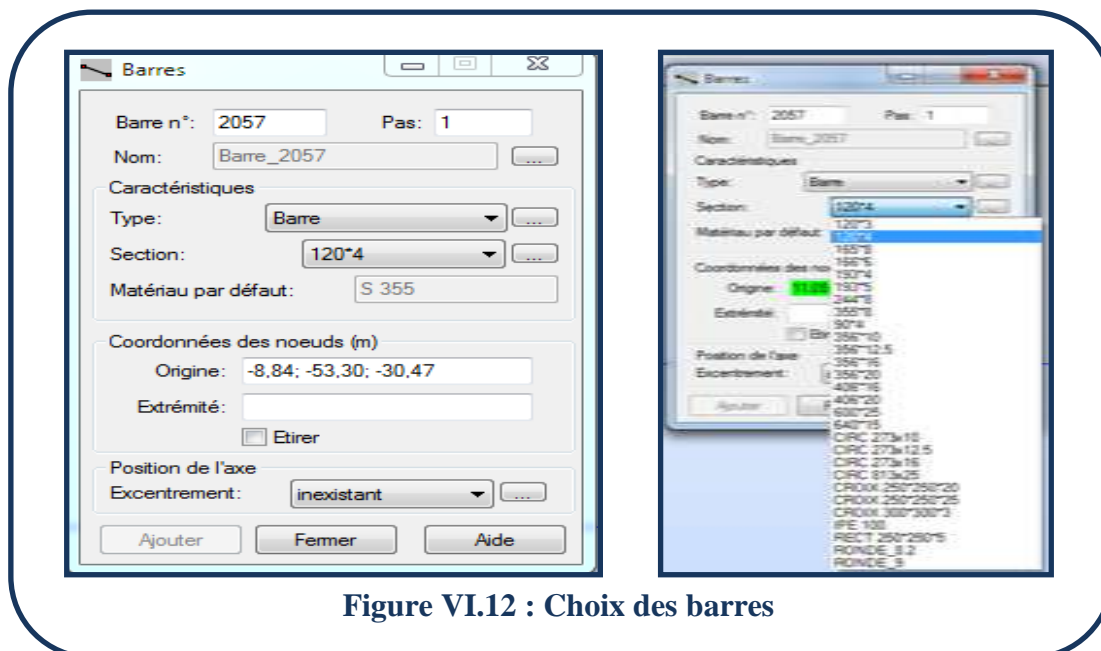


Figure VI.12 : Choix des barres

e) **Éléments créés :**

Après avoir terminé les taches précédentes, on entame la création des éléments de notre structurelle que les mats les tirant ...etc.

1. Les mâts :

Le mât est une pièce généralement verticale, servant à soutenir les pièces nécessaire à la propulsion par le vent et doit reprendre les efforts de compression et de flexion et résister au flambement. Dans notre structure les mâts sont de type **813×25** et **21.5** m de hauteur.

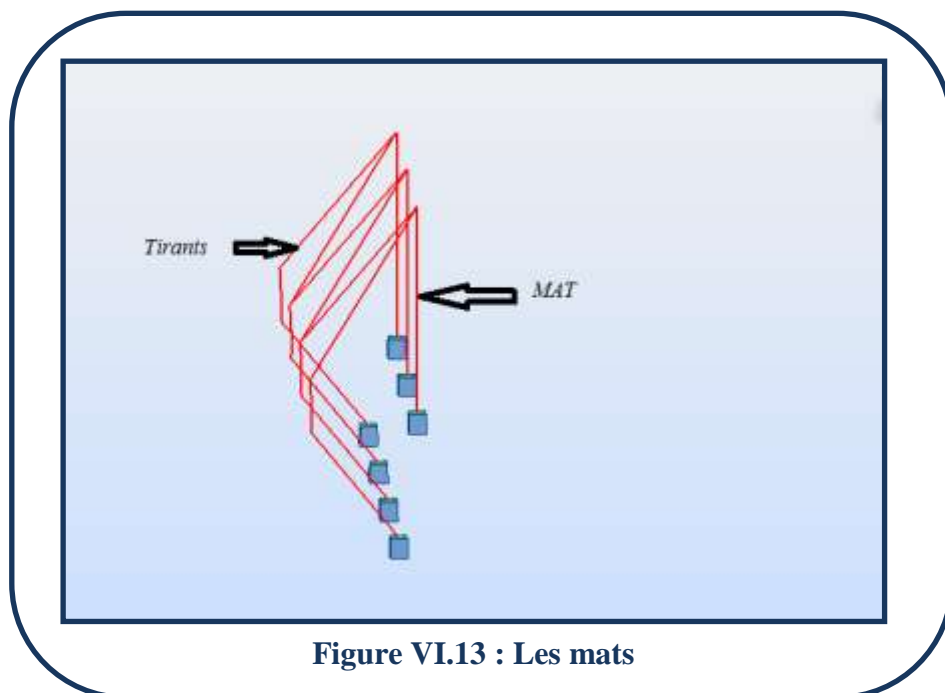


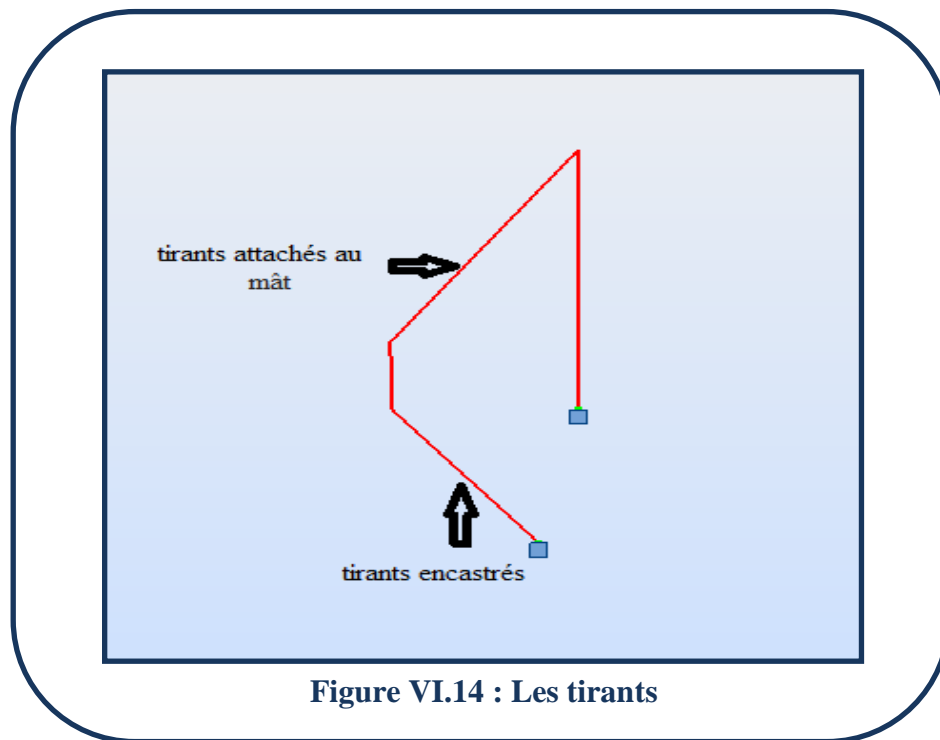
Figure VI.13 : Les mats

2. Les tirants :

Sont des éléments en diagonale qui travaillent uniquement en traction simple.

Dans ce projet on a deux types de tirants comme le montre la figure de la page suivante :

- ✓ tirants attachés au mât de type **356×12.5**.
- ✓ tirants encastrés de type **406×20**.



3. Poutres en treillis (triangulaires):

La poutre triangulaire comporte trois membrures parallèles et trois plans de treillis. Cette poutre ne nécessite aucun élément complémentaire pour être stable. C'est une structure spatiale.



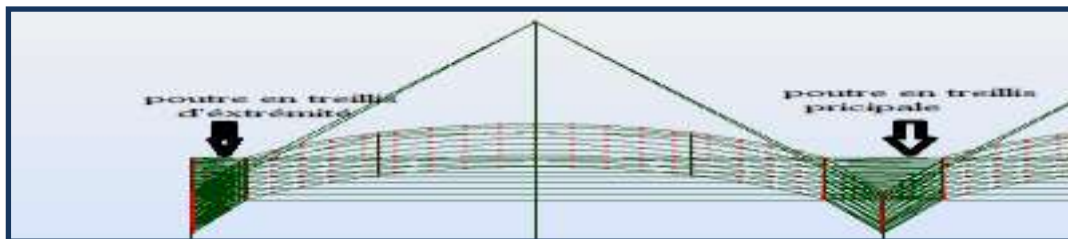


Figure VI.16 : Poutre principale et poutre d'extrémité

Pour notre cas des poutres en treillis principales et d'extrémité. Les Eléments de la poutre en treillis :

- ✓ les **2 membrures supérieures** sont de type **273×16** avec **60** mètre de longueur(**figure VI.17**).
- ✓ **la membrure inférieure** est de type **356×16** avec **58.5** mètre de longueur(**figure VI.17**).

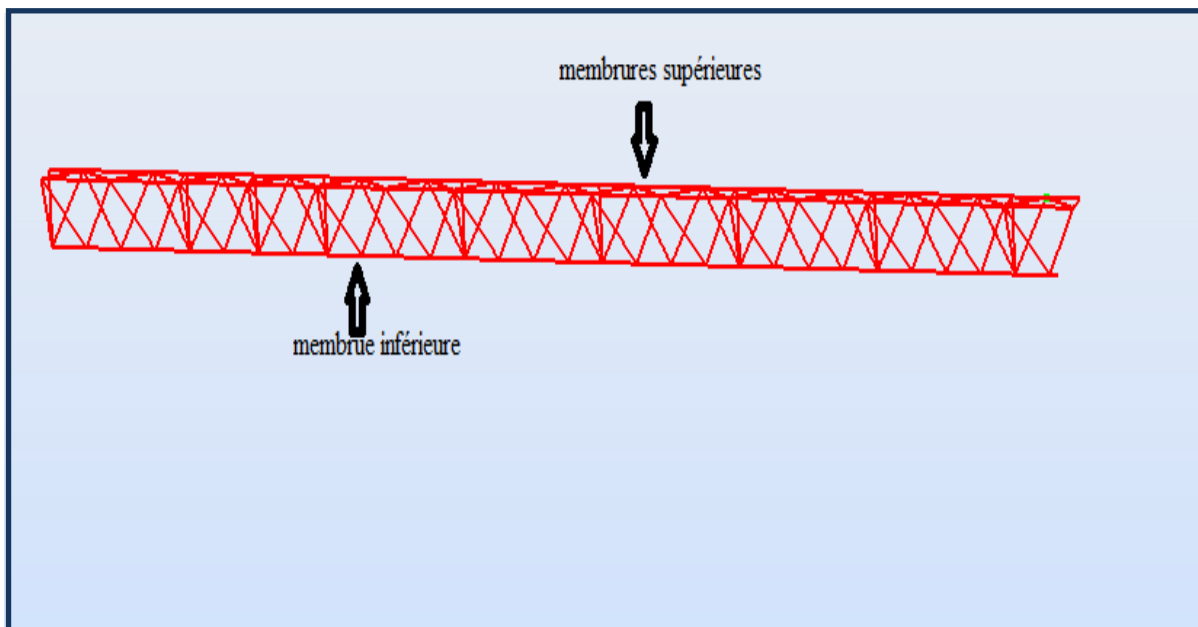


Figure VI.17 : Les membrures poutres en treillis

- ✓ les barres de la diagonale de type 166×6(figure VI.18).

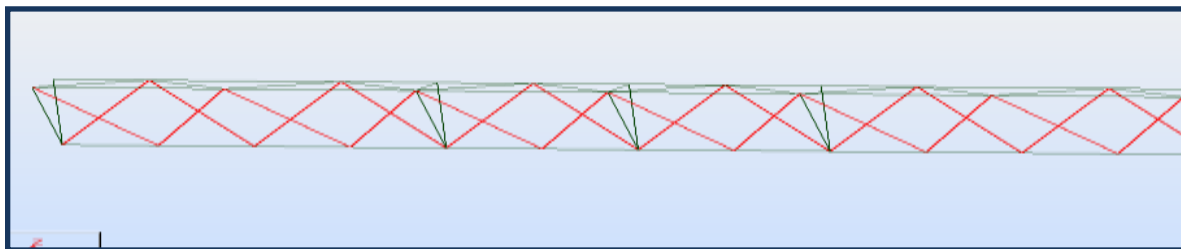


Figure VI.18 : Les éléments de la diagonale

- ✓ dans chaque 8mètre au long de la poutre en fait un renforcement avec une croix de type 300×300×30(figure VI.19).

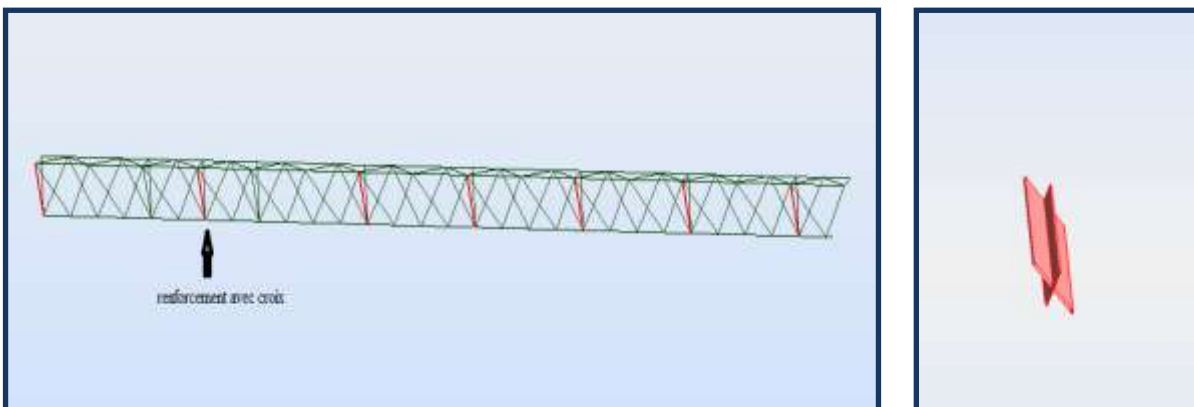

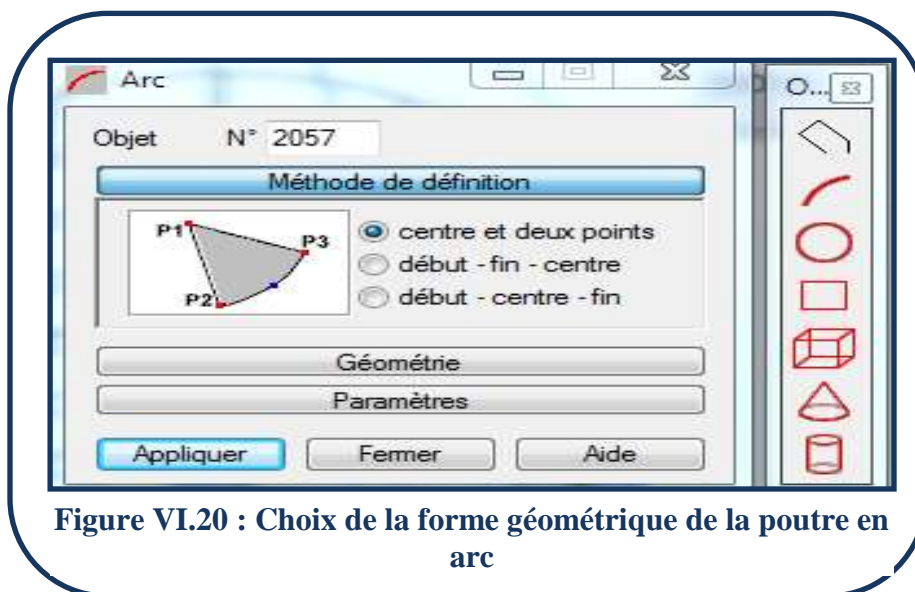


Figure VI.19 : les renforcements de type croix

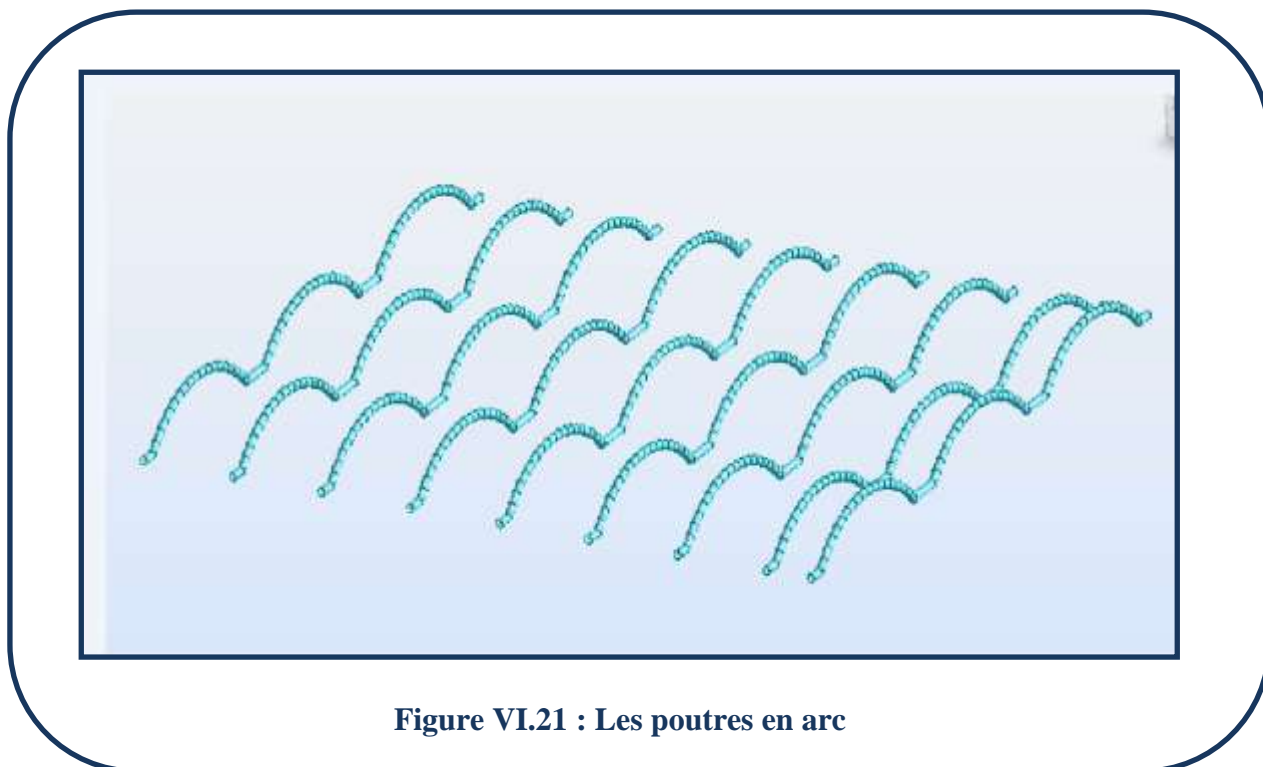
4. Poutres en arc :

Les arcs sont généralement des éléments utilisés dans les ouvrages d'art et de grande importance. Les efforts de réactions aux extrémités sont plus importants par rapport à la flèche à mi-travée.

Dans notre structure les arcs sont de type 640×15 et de diamètre de 14 mètre. Pour la modélisation de l'arc on clique sur l'icône  dans la barre d'outils puis on choisit arc on introduisant le diamètre.



- Nous obtenons par la suite :



5. Le contreventement :

En génie civil, un contreventement est un système statique destiné à assurer la stabilité globale d'un ouvrage vis-à-vis des effets horizontaux issus des éventuelles actions sur celui-ci (par exemple : vent, séisme, choc, freinage, etc.). Il sert également à stabiliser localement certaines parties de l'ouvrage (poutres, colonnes) relativement aux phénomènes d'instabilité (flambage ou déversement).

Dans notre structure le contreventement est en V avec une section de 193×5 , comme l'indique la **figure VI.22**.

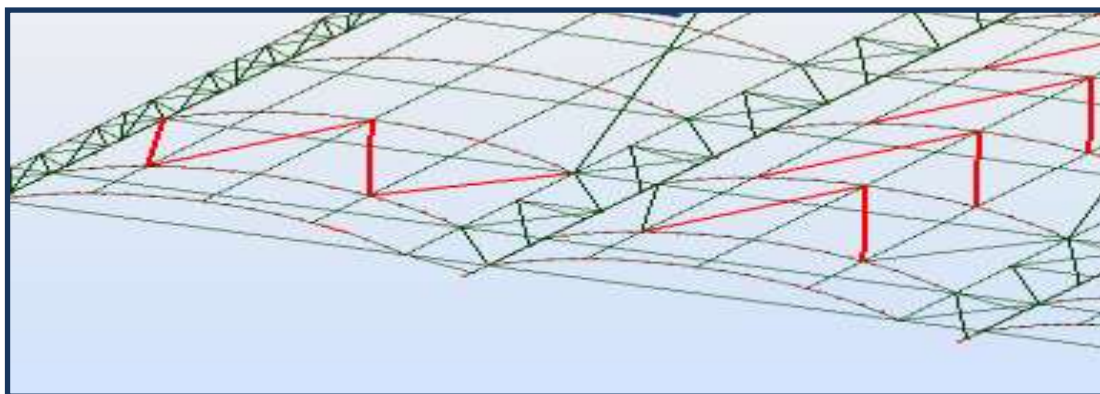


Figure VI.22 : Le système de contreventement

6. Le modèle final :

Après avoir insérer tous les éléments de notre structure on obtient un modèle final, ce qui est illustré dans la figure de la page suivante :

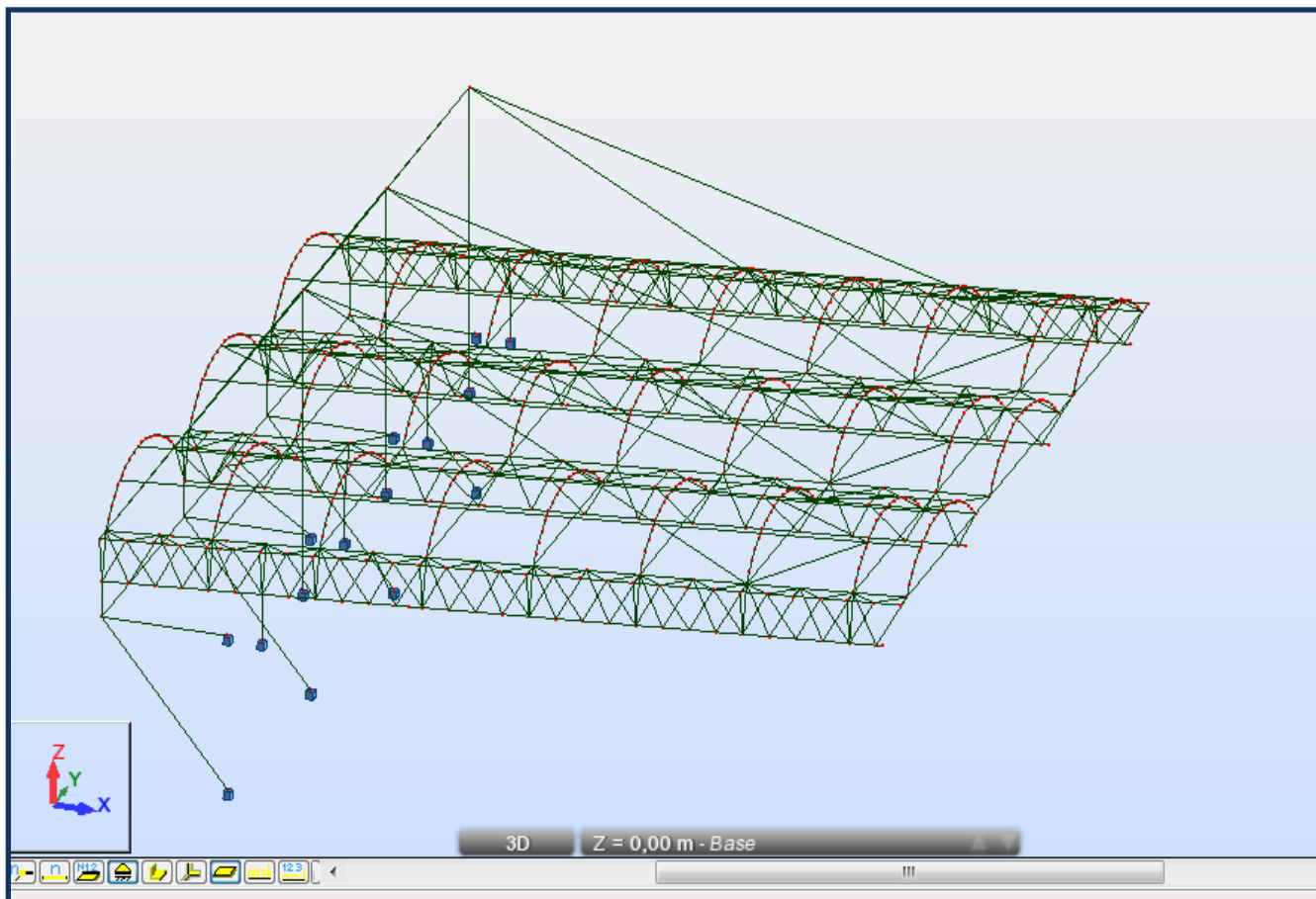



Figure VI.23 : Modèle numérique final de la structure

f) Relâchement des barres :

Les barres de structures de type treillis et les éléments de type câble dans les portiques, dans lesquels les rotules sont utilisées, elles assurent les déplacements mais permettent les rotations libres des extrémités des éléments. Si besoin on n'a pas besoin des liaisons rigides, les nœuds de barre peuvent être relâchés. Afin d'appliquer ce relâchements on :

- Cliquez sur  l'icône dans la barre d'outils, après on choisit le type de relâchement qu'on veut effectuer comme on voit sur la [figure VI.24](#).

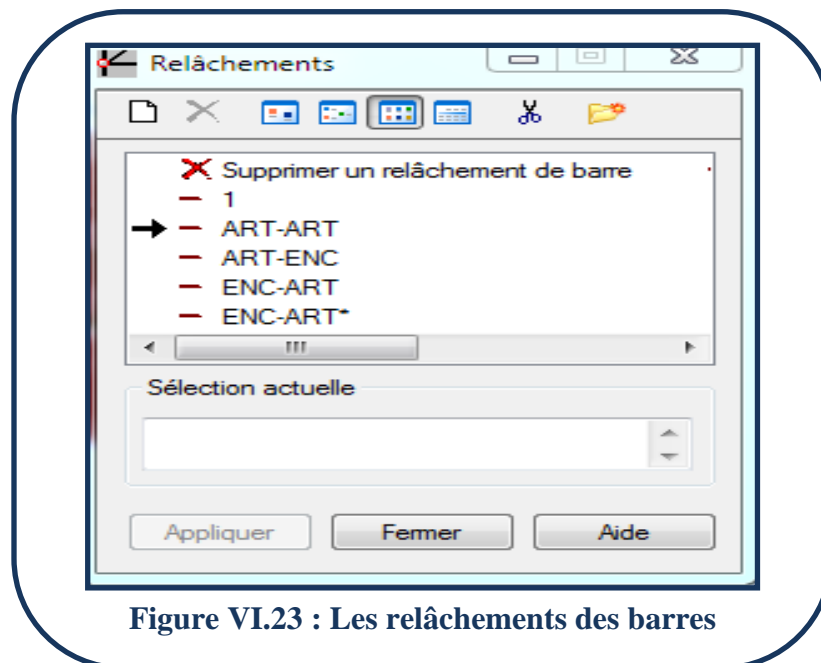



Figure VI.23 : Les relâchements des barres

g) Chargement :

Afin de dimensionner un ouvrage, il faut évaluer les **charges** qu'il devra supporter. Les charges sont des forces, des déformations ou des accélérations qui s'appliquent sur la structure ou ses composantes. Elles occasionnent des contraintes, des déformations ou des déplacements sur les structures. L'étude des charges est appelée l'analyse structurale.

1. Cas de charge :

Dans la barre d'outils on clique sur l'icône cas de charge  charge pour définir la nature de la charge (permanente, d'exploitation, vent et température) une boîte de dialogue s'affiche :

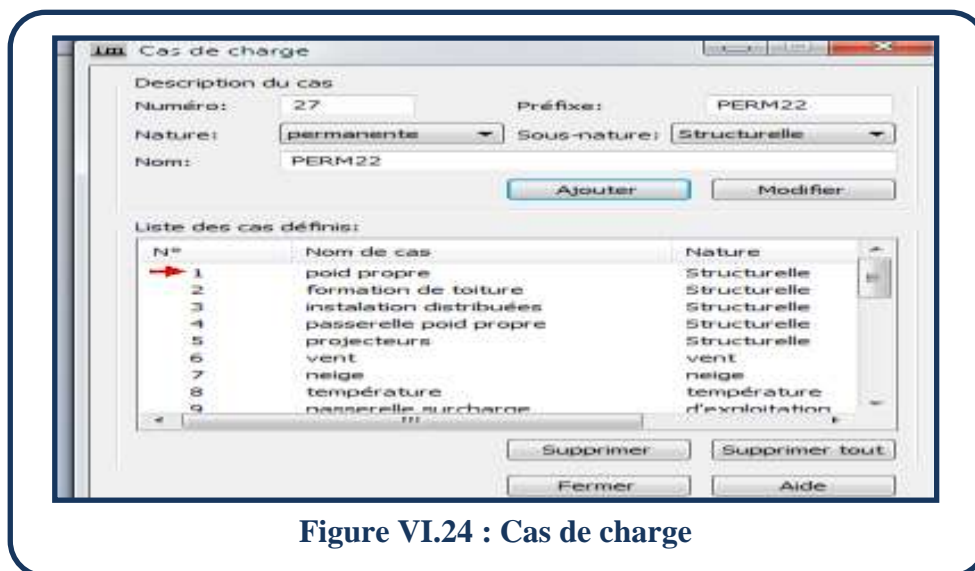

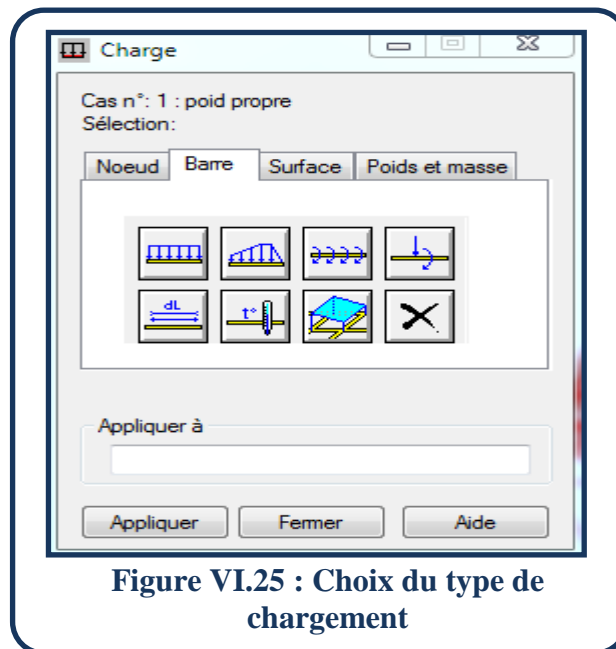


Figure VI.24 : Cas de charge

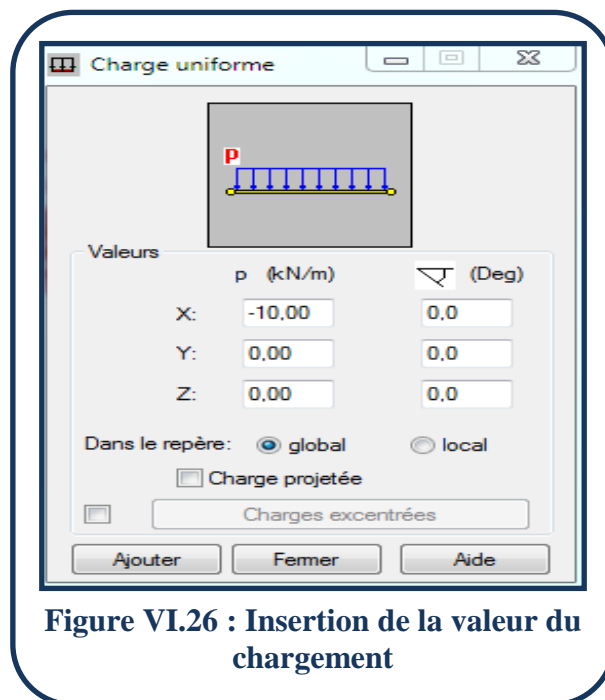
2. Type de chargement :

Afin de définir des charges appliquées à la structure, la solution la plus facile est de cliquer sur l'icône  définir charge dans la barre d'outils une boîte de dialogue s'affiche :



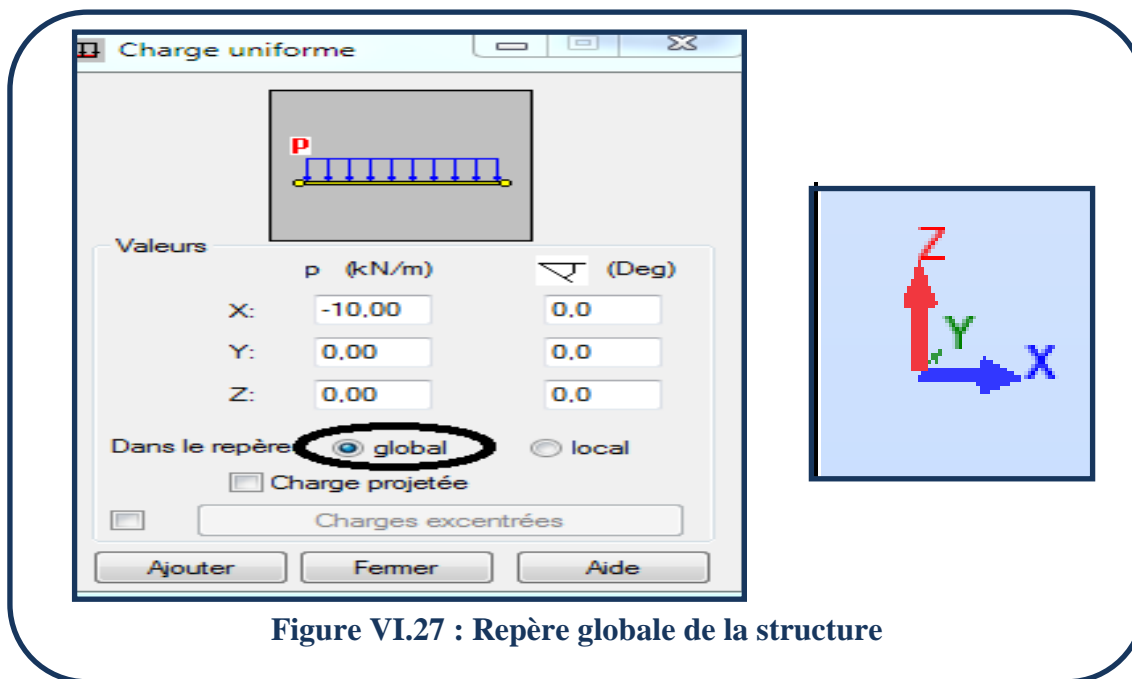
3. Valeurs du chargement

Par la suite, on choisit la nature de la charge (linaire, surfacique etc.), dans une autre boîte de dialogue, on va maitre la valeur de la charge :



Remarque :

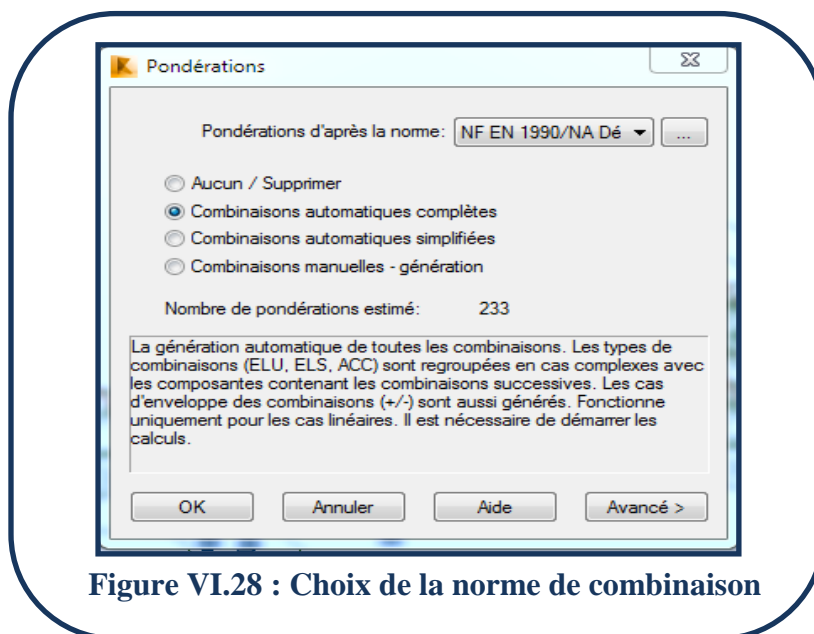
Si notre chargement est vers le bas, on ajoute un signe moins a par rapport au repère globale de la structure.



- Par la suite on insert nos chargements aux éléments qui doivent les reprendre.

4. Combinaisons de charges :

Après la consultation d'Eurocode 3 on a opté pour combinaisons automatique de charges.



- Par la suite, on obtient le tableau suivant :

Combinaison/Comp.	Définition
ULS/ 1	+ 5*1.35 + 6*0.90 + 7*0.75 + 8*0.90 + 9*1.50 + 10*0.90 + 11*1.35
ULS/ 2	+ 3*1.35 + 4*1.35 + 5*1.35 + 6*0.90 + 7*0.75 + 9*1.50 + 11*1.35
ULS/ 3	+ 4*1.35 + 5*1.35 + 6*0.90 + 7*0.75 + 8*0.90 + 9*1.50 + 11*1.35
ULS/ 4	+ 4*1.35 + 5*1.35 + 6*0.90 + 7*0.75 + 9*1.50 + 10*0.90 + 11*1.35
ULS/ 5	+ 4*1.35 + 5*1.35 + 6*0.90 + 8*0.90 + 9*1.50 + 10*0.90 + 11*1.35
ULS/ 6	+ 2*1.35 + 3*1.35 + 4*1.35 + 5*1.35 + 6*0.90 + 9*1.50 + 11*1.35
ULS/ 7	+ 3*1.35 + 4*1.35 + 5*1.35 + 6*0.90 + 8*0.90 + 9*1.50 + 11*1.35
ULS/ 8	+ 3*1.35 + 4*1.35 + 5*1.35 + 6*0.90 + 9*1.50 + 10*0.90 + 11*1.35
ULS/ 9	+ 4*1.35 + 5*1.35 + 7*0.75 + 8*0.90 + 9*1.50 + 10*0.90 + 11*1.35
ULS/ 10	+ 2*1.35 + 3*1.35 + 4*1.35 + 5*1.35 + 7*0.75 + 9*1.50 + 11*1.35
ULS/ 11	+ 3*1.35 + 4*1.35 + 5*1.35 + 7*0.75 + 8*0.90 + 9*1.50 + 11*1.35
ULS/ 12	+ 3*1.35 + 4*1.35 + 5*1.35 + 7*0.75 + 9*1.50 + 10*0.90 + 11*1.35
ULS/ 13	+ 3*1.35 + 4*1.35 + 5*1.35 + 8*0.90 + 9*1.50 + 10*0.90 + 11*1.35
ULS/ 14	1*1.35 + 2*1.35 + 3*1.35 + 4*1.35 + 5*1.35 + 9*1.50 + 11*1.35
ULS/ 15	+ 2*1.35 + 3*1.35 + 4*1.35 + 5*1.35 + 8*0.90 + 9*1.50 + 11*1.35
ULS/ 16	+ 2*1.35 + 3*1.35 + 4*1.35 + 5*1.35 + 9*1.50 + 10*0.90 + 11*1.35
ULS/ 17	1*1.35 + 2*1.35 + 3*1.35 + 4*1.35 + 5*1.35 + 11*1.35
ULS/ 18	+ 5*1.00 + 6*0.90 + 7*0.75 + 8*0.90 + 9*1.50 + 10*0.90 + 11*1.00
ULS/ 19	+ 3*1.00 + 4*1.00 + 5*1.00 + 6*0.90 + 7*0.75 + 9*1.50 + 11*1.00
ULS/ 20	+ 4*1.00 + 5*1.00 + 6*0.90 + 7*0.75 + 8*0.90 + 9*1.50 + 11*1.00
ULS/ 21	+ 4*1.00 + 5*1.00 + 6*0.90 + 7*0.75 + 9*1.50 + 10*0.90 + 11*1.00
ULS/ 22	+ 4*1.00 + 5*1.00 + 6*0.90 + 8*0.90 + 9*1.50 + 10*0.90 + 11*1.00
ULS/ 23	+ 2*1.00 + 3*1.00 + 4*1.00 + 5*1.00 + 6*0.90 + 9*1.50 + 11*1.00
ULS/ 24	+ 3*1.00 + 4*1.00 + 5*1.00 + 6*0.90 + 8*0.90 + 9*1.50 + 11*1.00
ULS/ 25	+ 3*1.00 + 4*1.00 + 5*1.00 + 6*0.90 + 9*1.50 + 10*0.90 + 11*1.00
ULS/ 26	+ 4*1.00 + 5*1.00 + 7*0.75 + 8*0.90 + 9*1.50 + 10*0.90 + 11*1.00
ULS/ 27	+ 2*1.00 + 3*1.00 + 4*1.00 + 5*1.00 + 7*0.75 + 9*1.50 + 11*1.00
ULS/ 28	+ 3*1.00 + 4*1.00 + 5*1.00 + 7*0.75 + 8*0.90 + 9*1.50 + 11*1.00
ULS/ 29	+ 3*1.00 + 4*1.00 + 5*1.00 + 7*0.75 + 9*1.50 + 10*0.90 + 11*1.00
ULS/ 30	+ 3*1.00 + 4*1.00 + 5*1.00 + 8*0.90 + 9*1.50 + 10*0.90 + 11*1.00
ULS/ 31	1*1.00 + 2*1.00 + 3*1.00 + 4*1.00 + 5*1.00 + 9*1.50 + 11*1.00


Figure VI.29 : Tableau des combinaisons

Remarque :

A partir des combinaisons de charges, et vu qu'on a un nombre important de charge, et avec la présence de la charge thermique, on a obtenu auprès de 320 combinaisons.

h) Analyse et Calculs :

Cette étape consiste à faire une analyse globale de la structure, en utilisant la méthode des éléments finis.

On clique sur l'icône  calculer pour faire un calcul générale de la structure. Une boîte de dialogue s'ouvre :

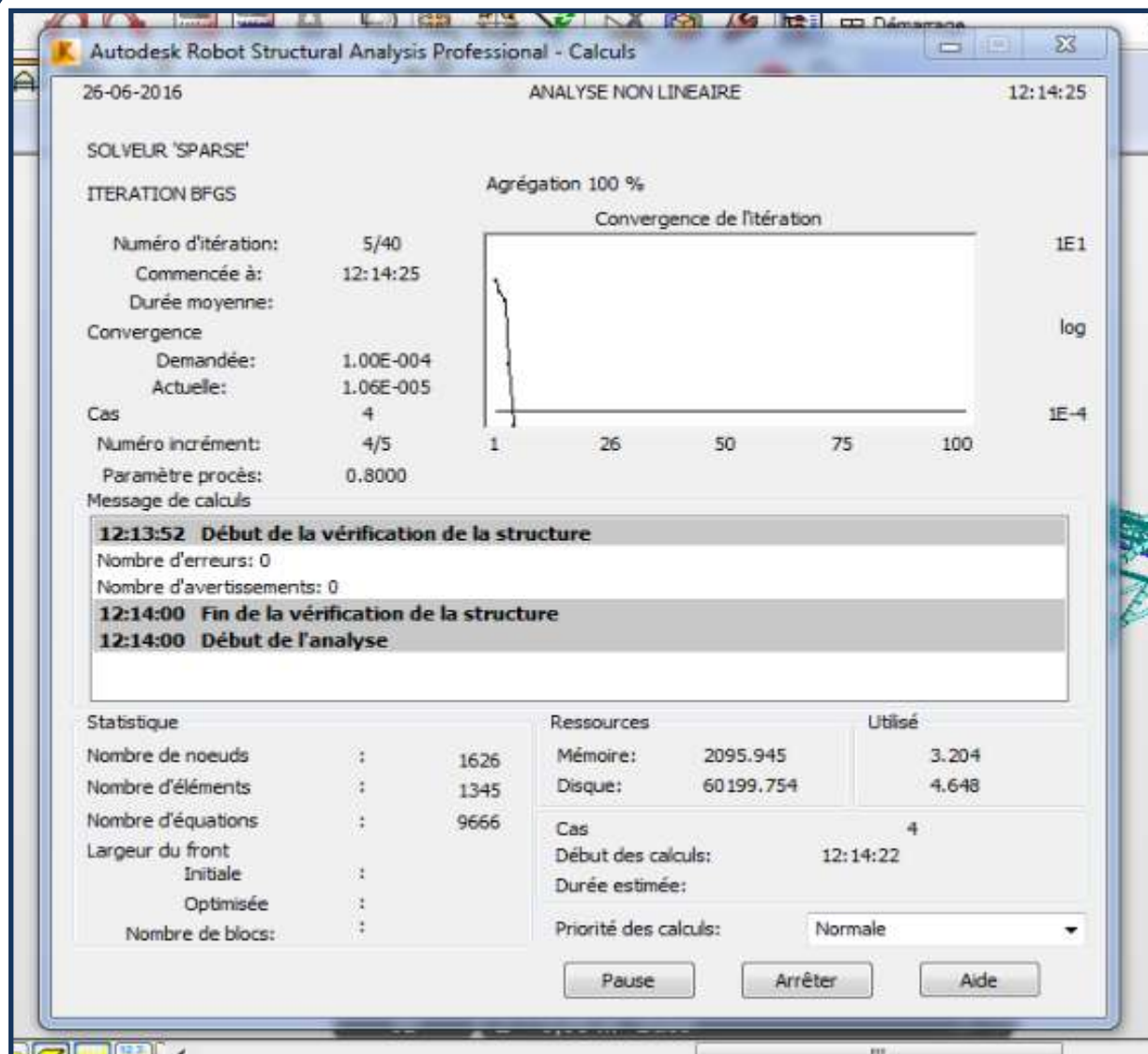


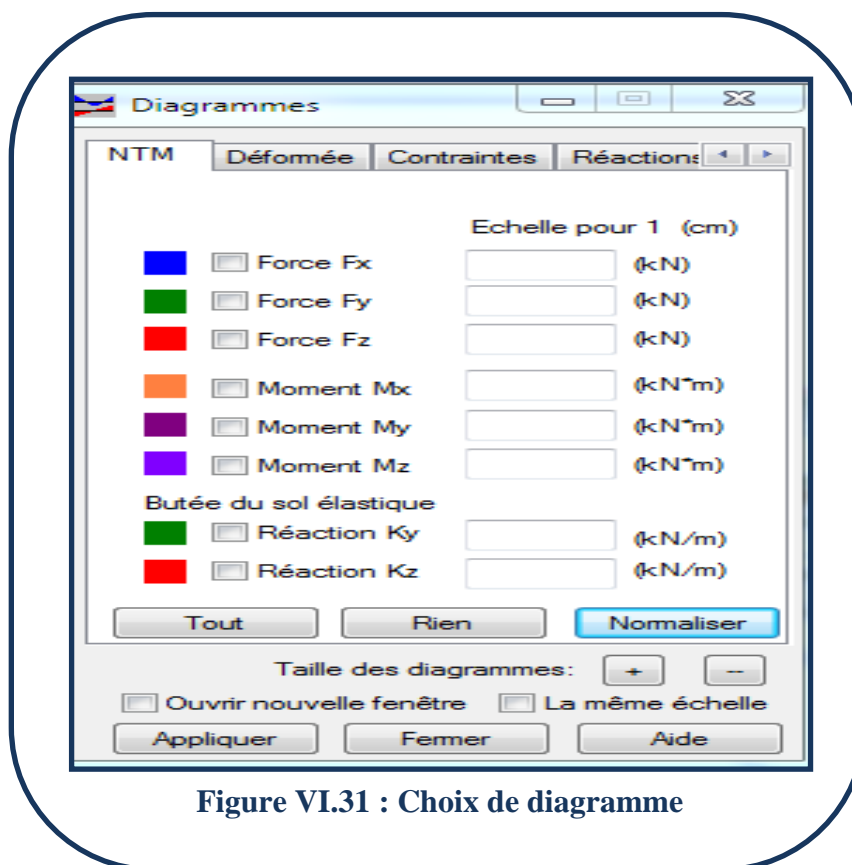
Figure VI.30 : Calcul de la M.E.F.

Puis dans **Résultats** on choisit les différentes options souhaiter à faire (diagrammes dans les barres, réactions au niveau des nœuds, déplacements, flèches et contraintes).

i) Résultats :

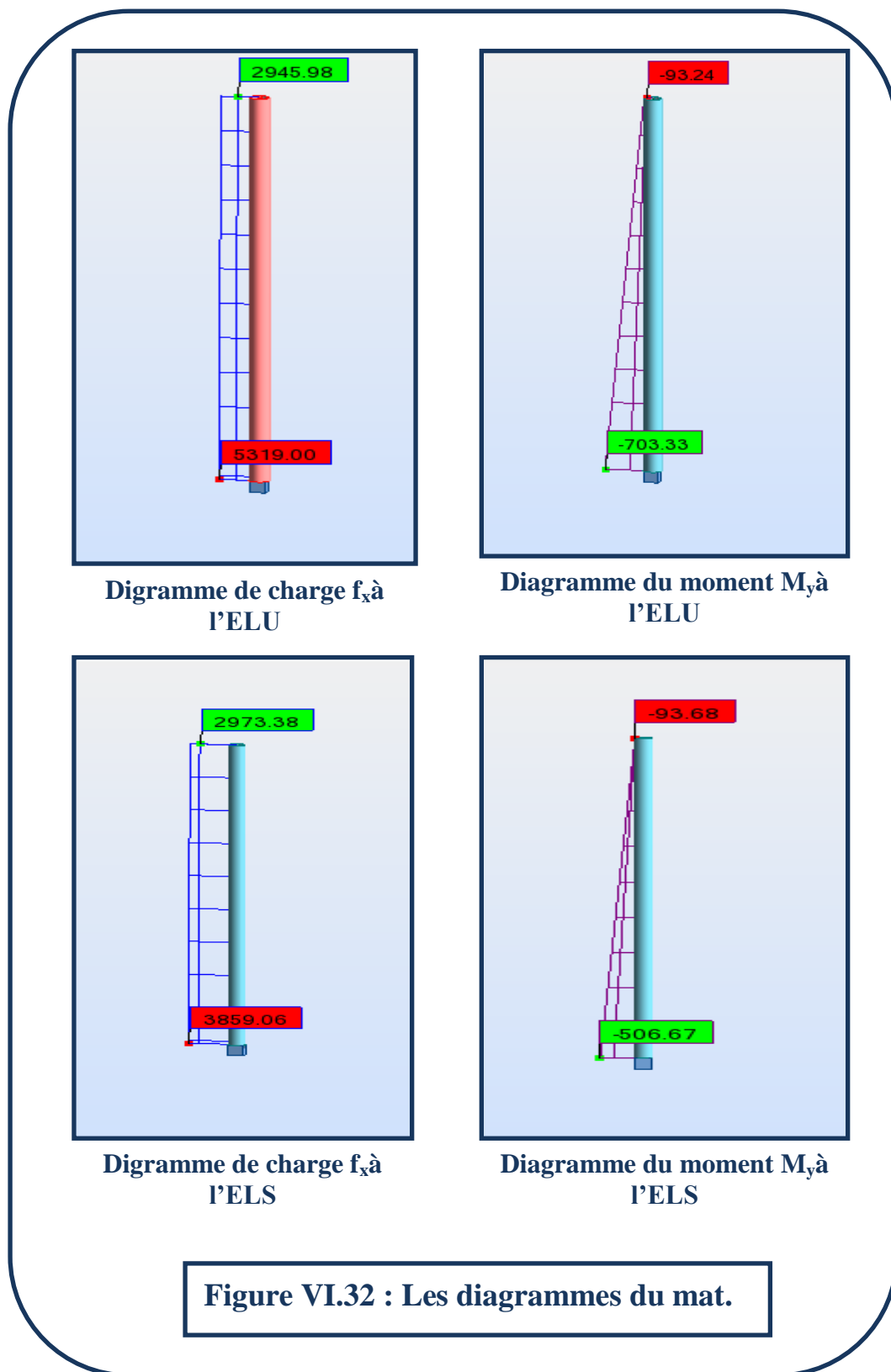
1. Diagrammes :

Après avoir cliqué sur résultats, une boîte de dialogue qui s'ouvre, alors on choisit diagrammes-barres on obtient la figure suivante :



Dans cette dernière, on coche sur les efforts qu'on veut afficher puis sur normaliser. Pour les éléments principaux de la structure tel que le mat, la poutre en arc et la poutre principale on donne quelques résultats à l'ELU et à l'ELS.

A. Les mats :



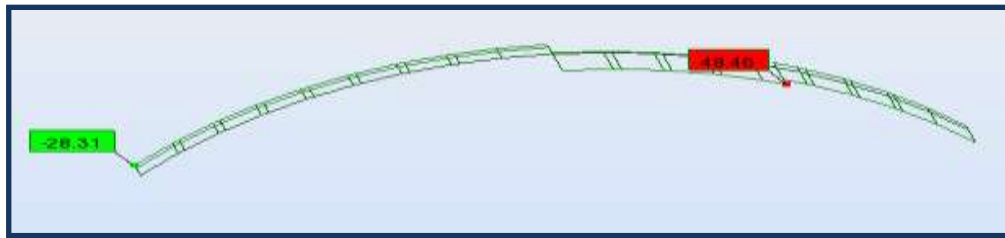
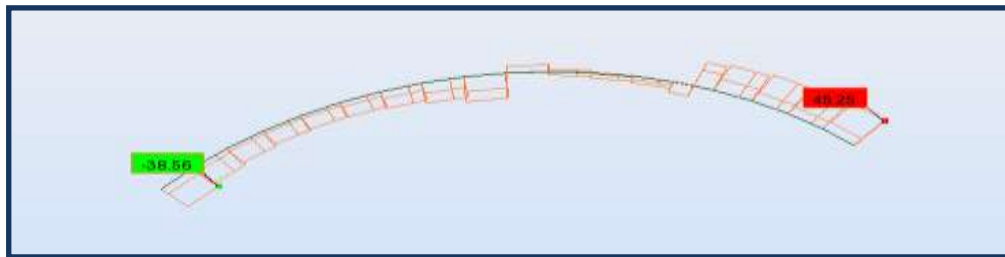
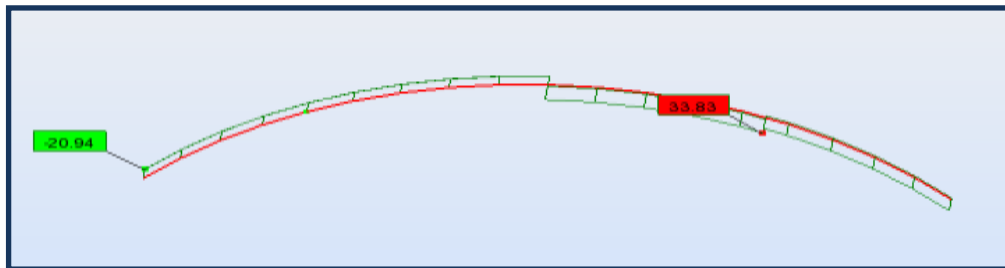
B. La poutre en arc :Diagramme de charge f_x à l'ELUDiagramme du moment M_y à l'ELUDiagramme du moment f_x à l'ELSDiagramme du moment M_y à l'ELS

Figure VI.33 : Les diagrammes de la poutre en arc

C. Poutres en treillis :

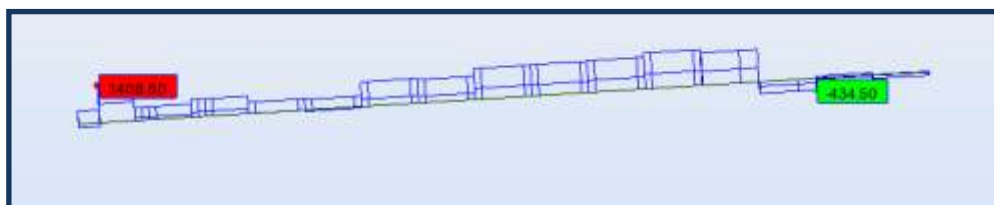
Diagramme du moment F_x à l'ELUDiagramme du moment M_y à l'ELUDiagramme du moment F_x à l'ELSDiagramme du moment M_y à l'ELS

Figure VI.34 : Les diagrammes de la poutre en arc

2. Etape devérification :

La dernière étape de modélisation est de faire la vérification des éléments. Pour cette étape, on clique puis **Dimensionnement** dimensionnement des barres en acier une boite de dialogue s'affiche :

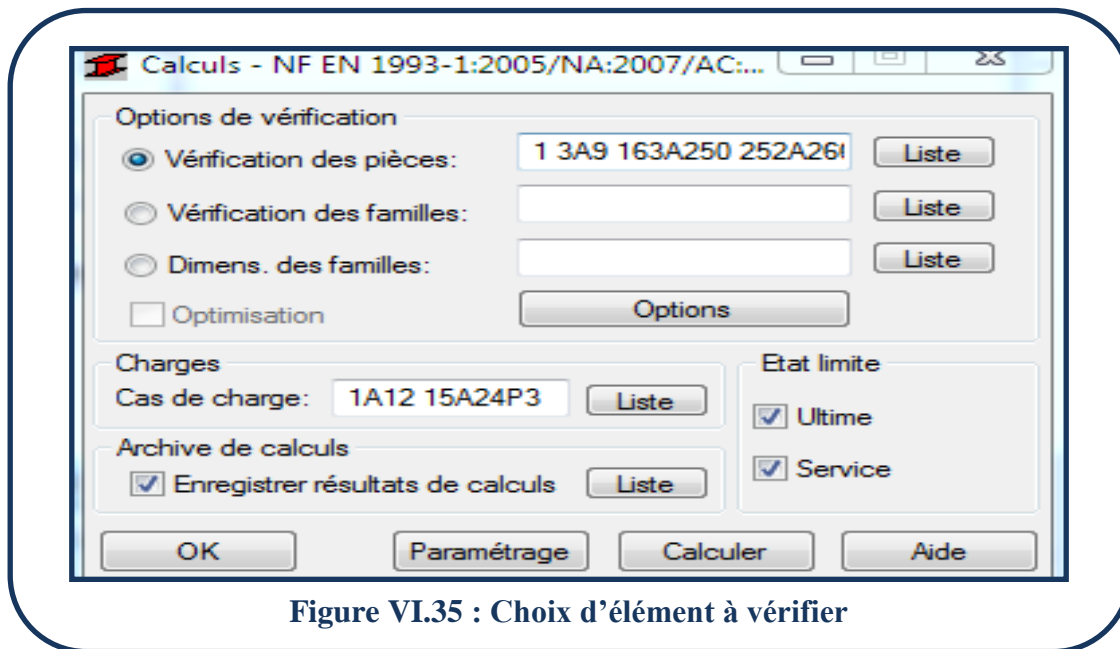


Figure VI.35 : Choix d'élément à vérifier

- Sur cette dernière on clique sur calculer, ce qui nous donne un tableau qui résume tous les éléments de notre structure en précisant s'ils sont vérifié ou non comme le montre la figure suivante :

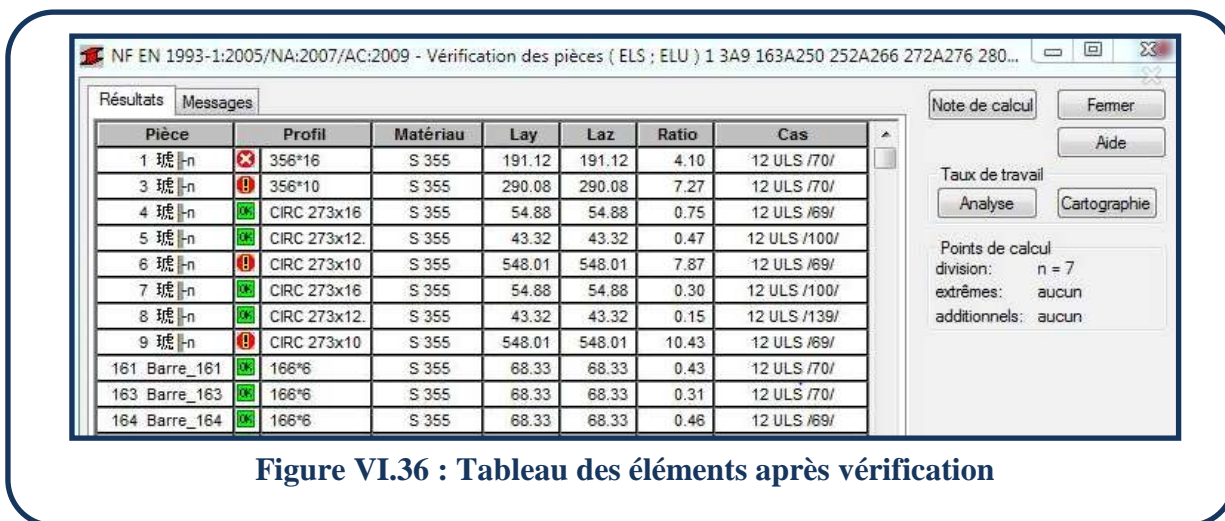


Figure VI.36 : Tableau des éléments après vérification

- Pour avoir plus de détails, il suffit juste de cliquer sur note de calcul, pour voir clairement les vérifications faites pour chaque élément (**Exemples : voir annexe 3**).

VI.4 Conclusion :

VI.4.1 A propos de Robot :

Le système Robot est un progiciel CAO/DAO destiné exclusivement aux ingénieurs en génie civil qui permet de modéliser, analyser et dimensionner les différents types de structures. Robot offre plusieurs avantages tels que :

- ✓ La modélisation des structures (à partir d'un pré-dimensionnement).
- ✓ Le calcul des différents efforts sous chargement.
- ✓ La vérification des résultats obtenus, le dimensionnement les éléments spécifiques de la structure.

La dernière étape gérée par Robot est la création de la documentation pour la structure calculée et dimensionnée.

VI.4.2 Résultats obtenus :

Lors de la vérification des éléments de notre structure, on a constaté que certains éléments ne sont pas vérifiés car on a négligé :

a. Les systèmes de renforcement des barres :

Le bureau d'étude portugais **PRO ANGEL**, ont ajouté des systèmes de renforcement au niveau des barres situés aux zones de concentration de contraintes, comme le cas de la membrure inférieure, de la poutre principale qui est posée sur le poteau, la barre située au niveau de cette liaison est renforcée, à l'aide d'un fer-plat, à fin d'augmenter l'inertie de cette section comme le montre la figure suivante :

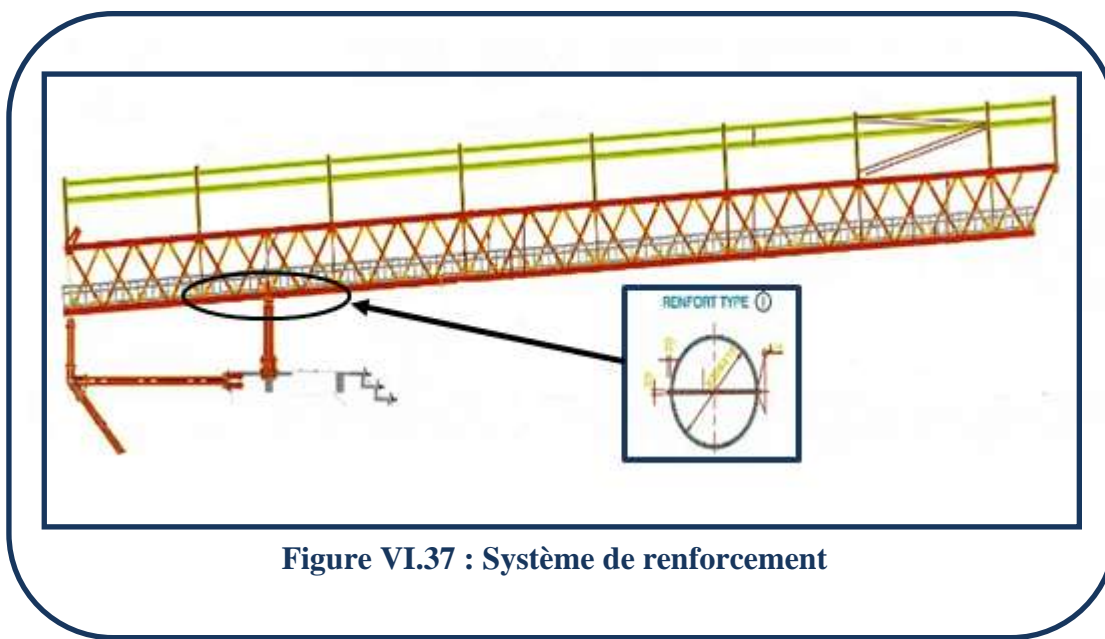


Figure VI.37 : Système de renforcement

Ce système de renfort n'existe pas sur notre logiciel, ce genre de section n'est pas disponible sur le catalogue des sections de Robot. Ce qu'on propose comme solution c'est d'augmenter l'épaisseur de ces barres.

b. L'étude entière de la toiture :

Notre projet s'est basé uniquement sur une partie de la couverture, ce qui veut dire qu'on a négligé pas mal d'éléments qui participent dans le comportement de la structure. Pour cela la modélisation entière de la toiture est nécessaire afin d'avoir son comportement réel, car tous les éléments de cette structure travaillent comme un ensemble. Donc le manque de plusieurs éléments structuraux, a donné que certains éléments ne sont pas vérifiés.

**CHAPITRE
VII : VERIFICATION
ON DU MAT**

CHAPITRE VII : VERIFICATION DU MAT

VII.1 Introduction :

Le calcul d'une structure exige que, pour toutes les combinaisons d'actions possibles, définies réglementairement, la stabilité statique soit assurée, tant globalement au niveau de la structure, qu'individuellement au niveau de chaque élément.

Les actions développent une diversité de sollicitations, qui génèrent les contraintes au sein du matériau et des déformations des éléments. Afin de garantir le degré de sécurité souhaité, on doit vérifier que les contraintes et les déformations restent inférieures aux limites admissibles.

- Deux cas de figures se présentent :
 - ✓ **Le cas des petites déformations** : On admet que les sollicitations ne varient pas sous l'effet des déformations, ce qui conduit simplement à vérifier que les contraintes restent inférieures à la contrainte de ruine.
 - ✓ **Le cas des grandes déformations** : Dans ce cas les déformations modifient considérablement les sollicitations et affectent les zones comprimées des pièces, qui peuvent présenter 3 types de comportement, dénommés phénomènes d'instabilité, qui sont :

VII.1.1 Le voilement :

Dans une plaque soumise à une compression uniforme sur deux côtés opposés, parallèlement à son plan moyen, on observe que la plaque, au-delà d'une certaine charge, se déforme transversalement.

Il s'agit du phénomène de voilement, qui se manifeste par des ondulations, qui ne sont pas à confondre avec le phénomène de flambement pour des pièces à une dimension, à la différence près que le voilement se développe plus progressivement, les grandes déformations n'apparaissant pas brutalement et ne conduisant généralement pas à la ruine de la pièce.

Le phénomène de voilement peut également apparaître sous un effort de cisaillement simple. Il est dans ce cas, attaché à la diagonale comprimée.

Les âmes des poutres utilisées en construction métallique sont généralement minces et donc susceptibles de se voiler sous des efforts de compression ou de cisaillement excessifs. Pour éviter le voilement des âmes des poutres, deux moyens sont possibles :

- ✓ soit augmenter l'épaisseur de l'âme.
- ✓ soit disposer des raidisseurs d'âme, judicieusement positionnés.

VII.1.2 Le flambement :

Lors d'un chargement en compression simple d'une barre élancée, initialement rectiligne, en position verticale et bi-articulée aux extrémités, soumise à un effort N que l'on augmente progressivement, on observe que quand N atteint une certaine valeur, la barre se dérobe latéralement, et apparaît alors une grande déformation, cette déformation a les traits

caractéristiques de toutes les instabilités de forme. Dans le cas des barres comprimées, cette instabilité prend le nom de flambement.

VII.1.3 déversement :

Ce phénomène d'instabilité élastique se produit, d'une façon générale, lorsqu'une poutre fléchie présente une faible inertie transversale et a la torsion. La partie supérieure de la poutre, comprimée, flambe latéralement et il existe une valeur critique du moment de flexion (selon le plan le plus grande raideur) comme il existe un effort normal critique provoquant le flambement pour une barre comprimée, pour lequel la poutre fléchit dans le plan de sa plus faible raideur et entre en torsion.

VII.2 Vérification des mats:

Pour la vérification de la résistance du mat, on doit prendre en considération les efforts extrêmes issus des combinaisons de charge les plus défavorable donné par **ROBOT**, comme la figure ci-dessous l'illustre :

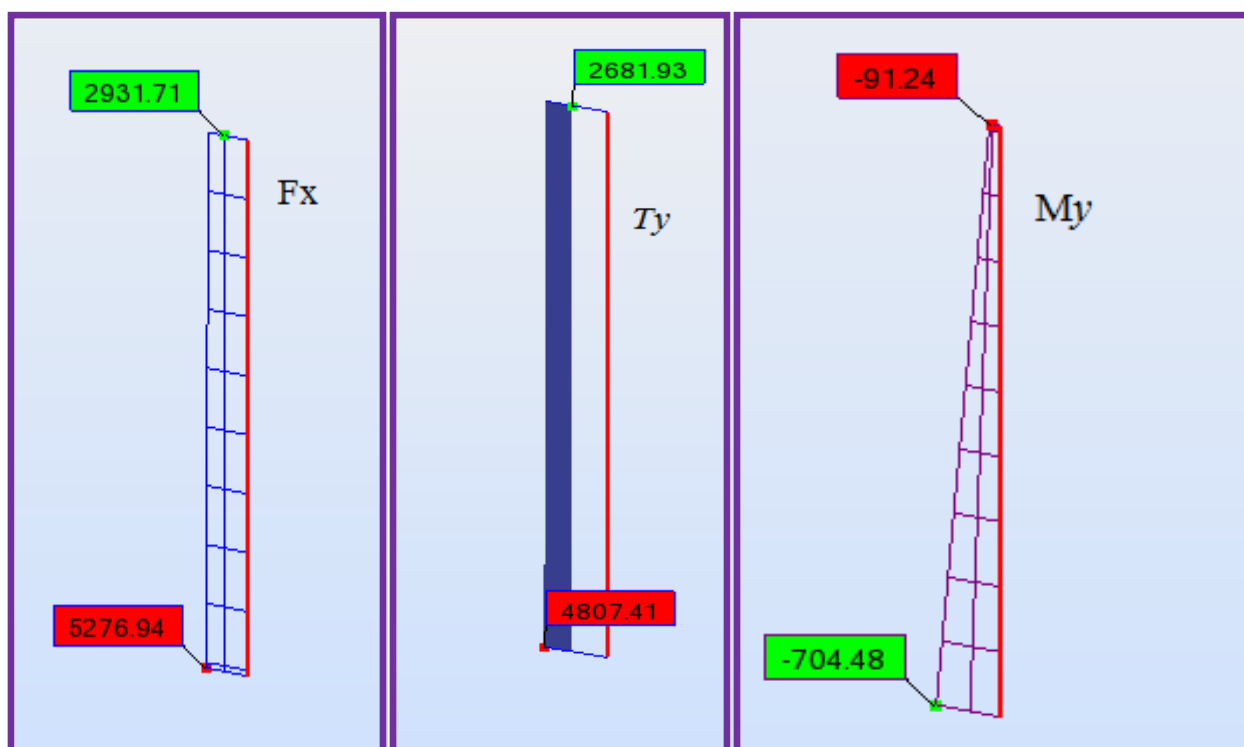


Figure VII.1 : Valeurs des efforts maximum au niveau du mat

VII.2.1 Caractéristique du Mat :

Le mat est un tube cylindrique creux de dimensions $2150 \times 813 \times 25$, qui est encastré en pied et articulé en tête, et une nuance d'acier de 345 N/mm^2 avec :

- ✓ Un moment sollicitant : $M_{ed,y} = 704.48 \text{ KN.m}$.
- ✓ Un effort normal sollicitant : $N_{ed,x} = 5276.94 \text{ KN}$.
- ✓ Un effort tranchant sollicitant : $V_{ed,z} = 4807.41 \text{ KN}$.

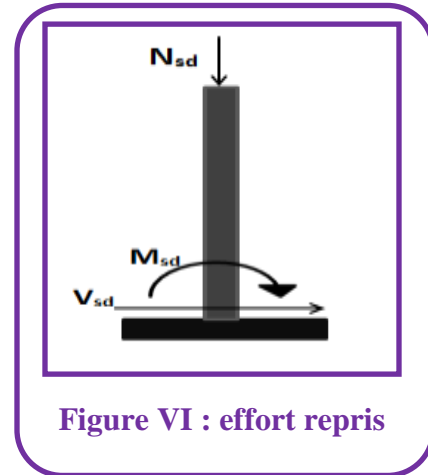


Figure VI : effort repris

VII.2.2 Classe de la section :

$$\frac{D}{t} \leq 50 \varepsilon^2 \quad \boxed{\frac{813}{25} = 32.52} < 50 \times 0.82 = 41$$

Avec :

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = \sqrt{\frac{235}{345}} = 0.82$$

Avec :

- ✓ **D** : Le grand diamètre du mat.
- ✓ **t** : épaisseur du mat.

Donc la section est de classe 1

VII.2.3 L'aire de la section :

$$\boxed{A = \frac{\pi \times (D^2 - d^2)}{4}}$$

Avec:

- ✓ **A**: aire de la section.
- ✓ **D**: le grand diamètre du mat.
- ✓ **d** : le petit diamètre du mat.

$$A = \frac{3.14 \times (813^2 - 763^2)}{4} = 61858 \text{ mm}^2$$

$$\boxed{A = 61858 \text{ mm}^2}$$

VII.2.4 L'inertie :

$$I_y = I_z = \frac{\pi \times (D^4 - d^4)}{64}$$

Avec :

- ✓ **D** : le grand diamètre du mat.
- ✓ **d** : le petit diamètre du mat.
- ✓ **I_z** et **I_y** : l'inertie.

$$I_y = I_z = \frac{3.14 (813^4 - 763^4)}{64} = 4806126900 \text{ mm}^2$$

$$I_y = I_z = 4806126900 \text{ mm}^2$$

VII.2.5 Rayon de giration :

$$i_y = i_z = \sqrt{\frac{I}{A}}$$

Avec:

- ✓ **i_y** et **i_z** : l'inertie.
- ✓ **A** : aire de la section.
- ✓ **I** : l'inertie.

$$i_y = i_z = \sqrt{\frac{4806126900}{61858}} = 278,74 \text{ mm}$$

$$i_y = i_z = 278,74 \text{ mm}$$

VII.2.6 Vérification au flambement:

- Calcul de **N_{b,rd}**, l'effort normal de résistance :

$$N_{b,rd} = \chi \times \beta_A \times A \times \frac{f_y}{\gamma_{M1}}$$

Avec :

- ✓ **β_A** : coefficient du matériau de scellement, et **β_A = 1** car la section est de classe 1
- ✓ **A** : aire de la section.

- ✓ f_y : limite d'élasticité du matériau.
- ✓ γ_{M1} : facteur partiel de sécurité du matériau, qui est $\gamma_{M1} = 1,1$.

Dans ce qui suit :

- ✓ χ : facteur de réduction vis-à-vis du flambement, qui est en fonction de $\bar{\lambda}$ et λ .
- ✓ $\bar{\lambda}$: Elancement réduit vis-à-vis du flambement.
- ✓ λ : Elancement.
- ✓ λ_1 : Elancement Eulérien.

▪ **Calcul de $\bar{\lambda}$:**

a. **Elancement λ :**

$$\lambda = \lambda_x = \lambda_y = \frac{l_f}{i}$$

$$\lambda = \frac{2150}{115.65.87} = 18.59$$

$$\lambda = 18.59$$

b. **Elancement Eulérien λ_1 :**

$$\lambda_1 = 93.3 \text{ } \epsilon$$

$$\lambda_1 = 77.49$$

c. **Elancement réduit vis-à-vis du flambement $\bar{\lambda}$:**

$$\bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\lambda_1} = \frac{18.59}{77.49} = 0.24$$

$$\bar{\lambda} = \frac{18.59}{77.49}$$

$$\bar{\lambda} = 0.24$$

d. **Section creuse laminé à chaud** : à partir de la courbe a de flambement, on tire la valeur de :

$$\chi = 0.9912$$

Donc:

$$N_{b,rd} = 1 \times 0.9912 \times 618,58 \times \frac{345}{1.1} \times 10^{-2}$$

$$N_{b,rd} = 1923.01 \text{ KN}$$

$$N_{b,rd} = 19230.19 \text{ KN} > N_{ed} = 5276.94 \text{ KN}$$

Ce qui veut dire, que les mats sont vérifiés au flambement.

VII.2.7 Vérification au déversement :

La résistance de la pièce à la flexion composée est déterminée en suivant les étapes suivantes :

A. Vérification vis-à-vis l'effort tranchant :

$$V_{pl,rdZ} = A_{vz} \times \frac{f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}}$$

Avec :

- ✓ A_{vz} : section de cisaillement.
- ✓ $V_{pl,rdZ}$: effort tranchant plastique.
- ✓ f_y : limite d'élasticité du matériau.

$$V_{pl,rdZ} = 618,58 \times \frac{345}{\sqrt{3}} \times \frac{1}{1.1} \times 10^{-1}$$

$$V_{Ed,Z} = 4807.41 \text{ KN} < V_{pl,rdZ} = 11201.12 \text{ KN}$$

*

Donc, le mat est vérifié vis-à-vis de l'effort tranchant.

B. Moment fléchissant et effort normale :

$$\frac{N_{ed}}{N_{pl,rd}} + \frac{M_{ed,y}}{M_{pl,rdy}} \leq 1$$

a. Calcul de l'effort normal de résistance :

$$N_{pl,rd} = A \frac{f_y}{\gamma_{M0}}$$

$$N_{pl,rd} = 61858 \frac{345}{1.1} \times 10^{-3}$$

$$N_{pl,rd} = 19400.92 \text{ KN}$$

b. Le module de résistance élastique de la section :

$$W_{el} = 23658 \text{ cm}^3$$

c. Moment plastique :

$$M_{pl,rdy} = W_{el,y} \frac{f_y}{\gamma_{M0}}$$

$$M_{pl,rdy} = 23658000 \times \frac{345}{1.1}$$

$$M_{pl,rdy} = 7420 \text{ KN.m}$$

d. Vérification :

$$\frac{N_{ed}}{N_{pl,rd}} + \frac{M_{ed,y}}{M_{pl,rdy}} = \frac{5276.94}{19400.92} + \frac{704.48}{7420} = 0.27 + 0.09 = 0.37 < 1 \quad \text{C.V}$$

Donc le mat, est vérifié au déversement.

VII.3:Conclusion :

On constate que le mat, est vérifié pour tous les cas de sollicitation qui lui revient, et ce résultat confirme le résultat donné par **ROBOT**.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Une étude correcte et fiable, doit prendre soin de toutes les actions qui peuvent solliciter l'ouvrage pendant toute sa durée de vie. Par conséquent, l'ingénieur doit avoir des connaissances théoriques et pratiques suffisantes, et un concept permanent sur les nouvelles technologies.

Le nouveau stade de Tizi Ouzou, est l'un des grands projets en Algérie, c'est une structure très importante, pour cela on propose à l'avenir de faire de nouveaux règlements adéquat avec ce type de structure.

Ce présent travail, est la résultante des connaissances acquises durant notre cycle de formation. Il nous a permis d'approfondir nos connaissances en matière d'application des règlements, notamment l'Eurocode. Ce qui nous permettra d'intervenir au niveau international.

L'intégration de l'outil informatique, spécialement les logiciels de calculs, nous a permis de constater la délicatesse de leurs utilisations, et les conséquences qui découlent d'une mauvaise modélisation, ou d'un manque de données comme dans notre cas. Mais d'autre part nous avons bien apprécié la facilité et la simplicité avec laquelle on atteint nos objectifs, à l'aide de ces logiciels.

Pour la poursuite de ce travail, il serait intéressant de refaire cette étude en introduisant les charges sismique et les différentes paramètres manquantes, une chose qu'on ne pouvait pas réaliser vu le facteur de temps, et aussi le manque de règlement à utiliser.

ANNEXE

ANNEXE 1 :
LES PLANS

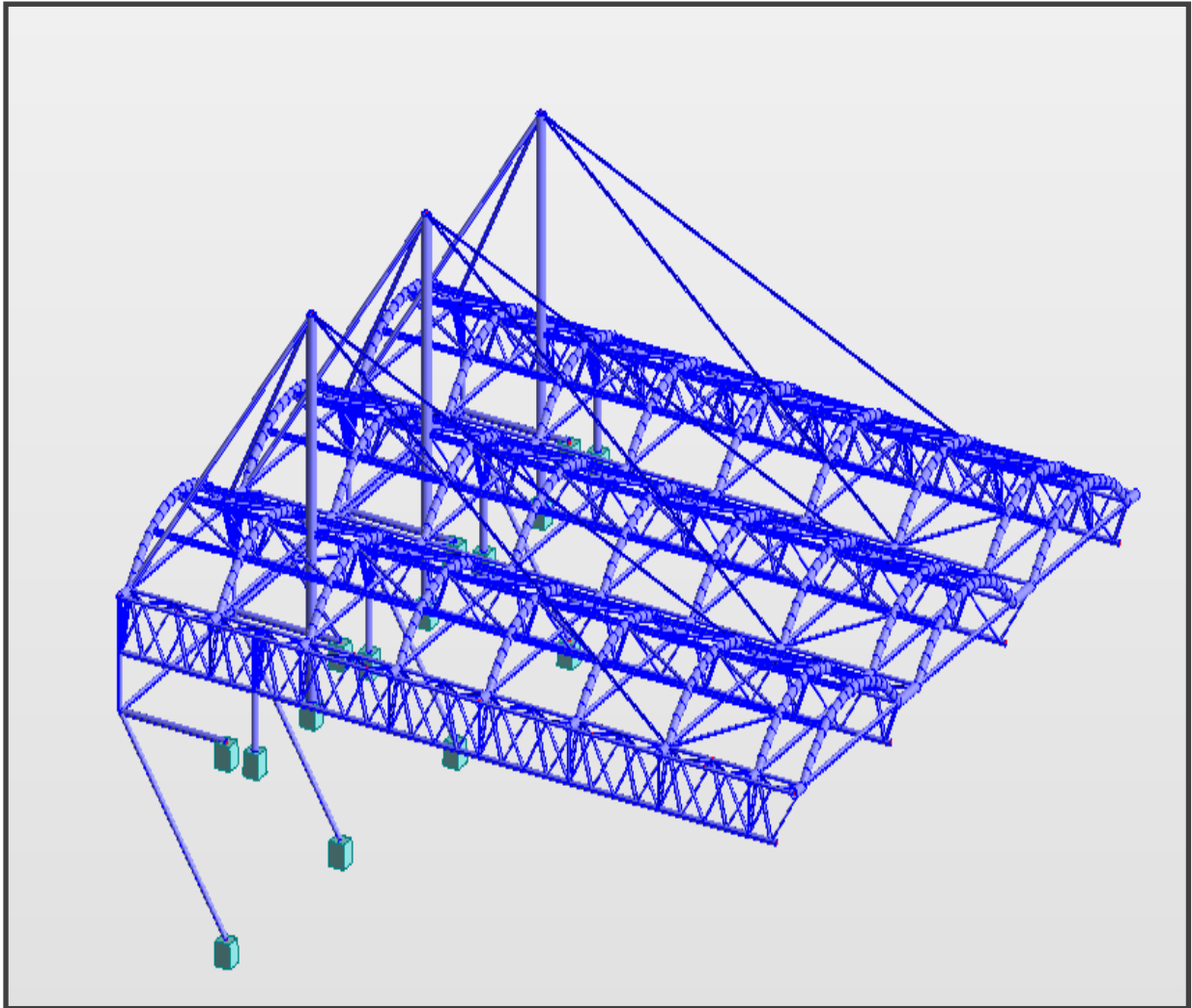


Figure A.1 : La vue d'avant en 3D du modèle.

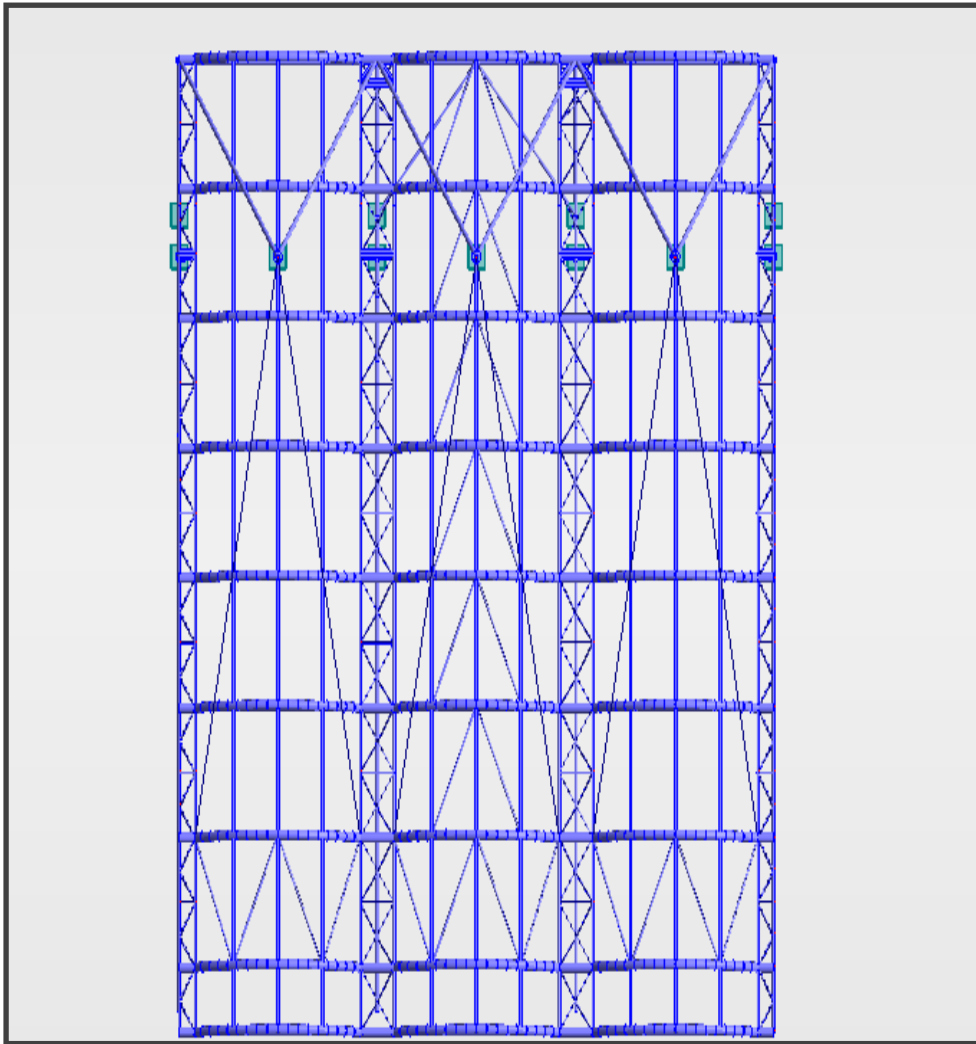


Figure A.2 : La vue de dessus en 3D du modèle.

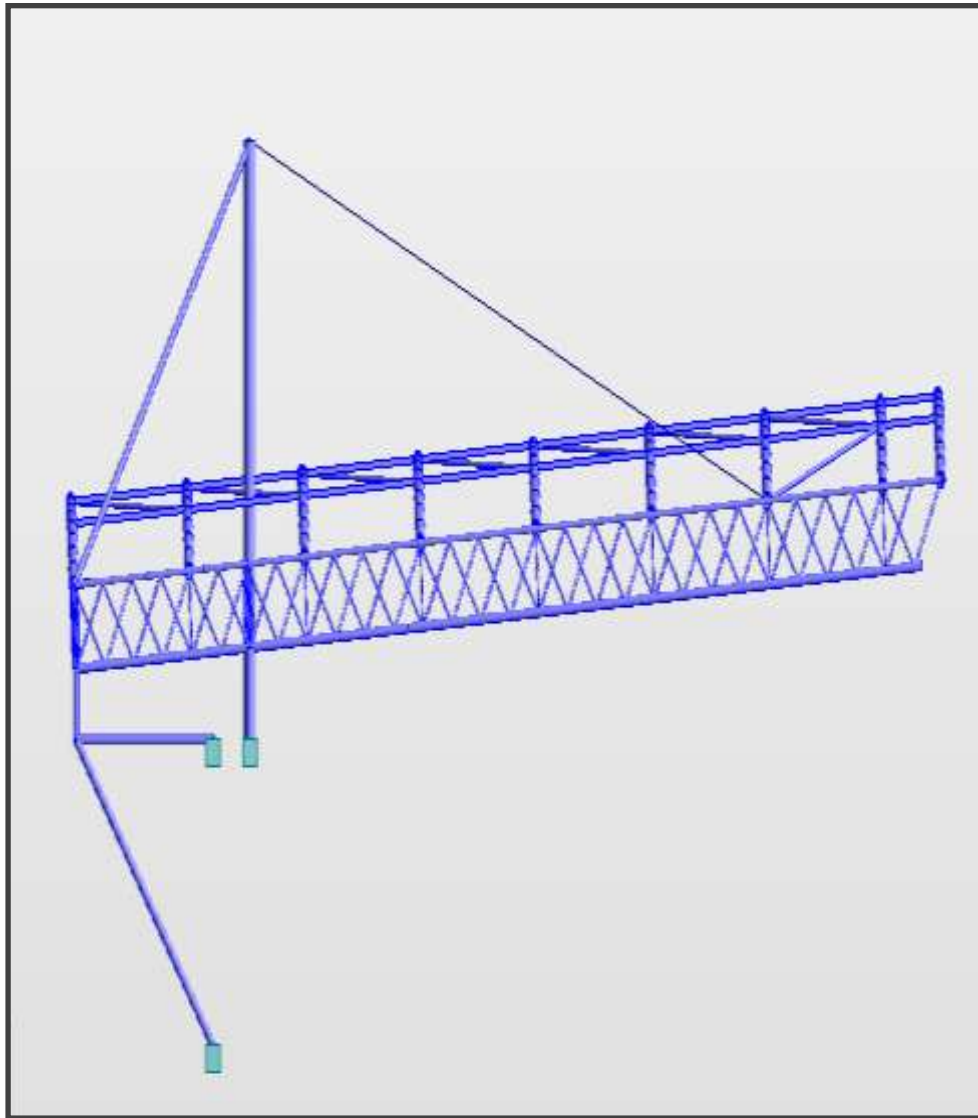


Figure A.3 : La vue de gauche en 3D du modèle.

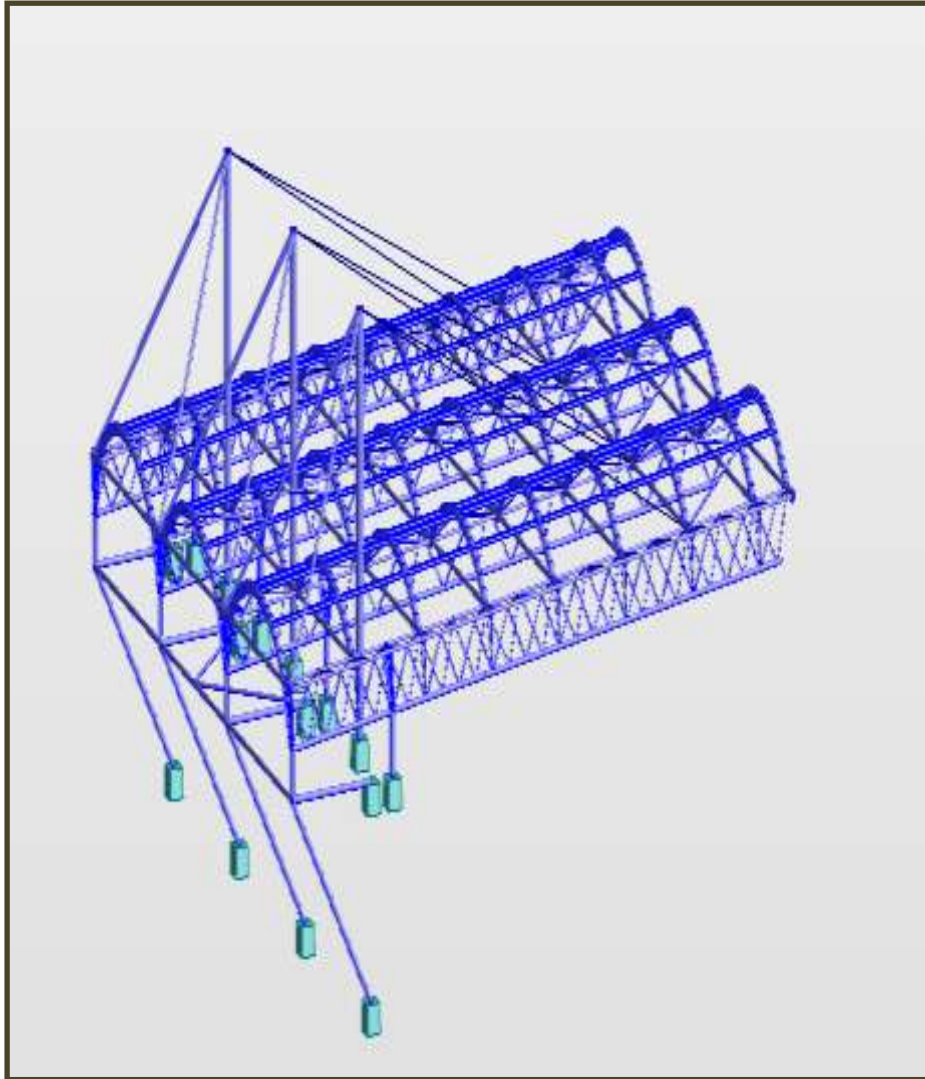


Figure A.4 : La vue de derrière en 3D du modèle.

**ANNEXE 2 :
MODELE
NUMERIQUE
FINAL**

ANNEXE 3 :
NOTES DE
CALCULS

CALCUL DES STRUCTURES ACIER

NORME: NF EN 1993-1:2005/NA:2007/AC:2009, Eurocode 3: Design of steel structures.

TYPE D'ANALYSE: Vérification des pièces

FAMILLE:

PIECE: ARC

POINT: 1

COORDONNEE: x = 0.00 L = 0.00

m

CHARGEMENTS:

Cas de charge décisif: 12 ULS /112/ 1*1.35 + 2*1.35 + 3*1.35 + 4*1.35 + 5*1.35 + 6*0.90 + 7*0.75 + 8*1.50 + 11*1.35

MATERIAU:

S 355 (S 355) fy = 355.00 MPa



PARAMETRES DE LA SECTION: 640*15

h=640.0 mm	gM0=1.00	gM1=1.00	
	Ay=187.50 cm ²	Az=187.50 cm ²	Ax=294.52 cm ²
tw=15.0 mm	Iy=143893.53 cm ⁴	Iz=143893.53 cm ⁴	Ix=287787.07 cm ⁴
	Wply=5860.50 cm ³	Wplz=5860.50 cm ³	

EFFORTS INTERNES ET RESISTANCES ULTIMES:

N,Ed = 80.79 kN	My,Ed = -1.51 kN*m	Mz,Ed = 108.46 kN*m	Vy,Ed = 70.80 kN
Nc,Rd = 10455.61 kN	My,Ed,max = -21.50 kN*m	Mz,Ed,max = 108.46 kN*m	Vy,T,Rd = 3780.22 kN
Nb,Rd = 10455.61 kN	My,c,Rd = 2080.48 kN*m	Mz,c,Rd = 2080.48 kN*m	Vz,Ed = -20.60 kN
	MN,y,Rd = 2079.94 kN*m	MN,z,Rd = 2079.94 kN*m	Vz,T,Rd = 3780.22 kN
			Tt,Ed = 30.11 kN*m
			Classe de la section = 2



PARAMETRES DE DEVERSEMENT:

PARAMETRES DE FLAMBEMENT:



en y:

Ly = 0.90 m	Lam_y = 0.05
Lcr,y = 0.90 m	Xy = 1.00
Lamy = 4.09	kzy = 0.60



en z:

Lz = 0.90 m	Lam_z = 0.05
Lcr,z = 0.90 m	Xz = 1.00
Lamz = 4.09	kzz = 1.00

FORMULES DE VERIFICATION:

Contrôle de la résistance de la section:

$$N,Ed/Nc,Rd = 0.01 < 1.00 \quad (6.2.4.(1))$$

$$(My,Ed/MN,y,Rd)^{2.00} + (Mz,Ed/MN,z,Rd)^{2.00} = 0.00 < 1.00 \quad (6.2.9.1.(6))$$

$$Vy,Ed/Vy,T,Rd = 0.02 < 1.00 \quad (6.2.6-7)$$

$$Vz,Ed/Vz,T,Rd = 0.01 < 1.00 \quad (6.2.6-7)$$

$$\tau_{xy,Ed}/(fy/(\sqrt{3} \cdot gM0)) = 0.02 < 1.00 \quad (6.2.6)$$

$$\tau_{xz,Ed}/(fy/(\sqrt{3} \cdot gM0)) = 0.02 < 1.00 \quad (6.2.6)$$

Contrôle de la stabilité globale de la barre:

$$\lambda_{y,Ed} = 4.09 < \lambda_{y,max} = 210.00 \quad \lambda_{z,Ed} = 4.09 < \lambda_{z,max} = 210.00 \quad \text{STABLE}$$

$$N,Ed/(Xy \cdot N,Rk/gM1) + k_{yy} \cdot My,Ed,max/(XLT \cdot My,Rk/gM1) + k_{yz} \cdot Mz,Ed,max/(Mz,Rk/gM1) = 0.05 < 1.00 \quad (6.3.3.(4))$$

$$N,Ed/(Xz \cdot N,Rk/gM1) + k_{zy} \cdot My,Ed,max/(XLT \cdot My,Rk/gM1) + k_{zz} \cdot Mz,Ed,max/(Mz,Rk/gM1) = 0.07 < 1.00 \quad (6.3.3.(4))$$

Profil correct !!!

Figure A.5 : Note de calcul de l'arc

CALCUL DES STRUCTURES ACIER

NORME: NF EN 1993-1:2005/NA:2007/AC:2009, Eurocode 3: Design of steel structures.

TYPE D'ANALYSE: Vérification des pièces

FAMILLE:

PIECE: MAT

POINT: 1

COORDONNEE: x = 0.00 L = 0.00

m

CHARGEMENTS:

Cas de charge décisif: 12 ULS /69/ 1*1.35 + 2*1.35 + 3*1.35 + 4*1.35 + 5*1.35 + 6*0.90 + 7*1.50 + 8*0.90 + 9*1.05 + 11*1.35

MATERIAU:

S 355 (S 355) fy = 355.00 MPa



PARAMETRES DE LA SECTION: CIRC 813x25

h=813.0 mm	gM0=1.00	gM1=1.00	
	Ay=394.07 cm ²	Az=394.07 cm ²	Ax=619.00 cm ²
tw=25.0 mm	Iy=480856.00 cm ⁴	Iz=480856.00 cm ⁴	Ix=961713.00 cm ⁴
	Wply=15528.81 cm ³	Wplz=15528.81 cm ³	

EFFORTS INTERNES ET RESISTANCES ULTIMES:

N,Ed = 5270.62 kN	My,Ed = -634.44 kN*m	Mz,Ed = -58.78 kN*m	Vy,Ed = -2.75 kN
Nc,Rd = 21974.50 kN	My,Ed,max = -634.44 kN*m	Mz,Ed,max = -58.78 kN*m	Vy,T,Rd = 8076.19 kN
Nb,Rd = 14479.39 kN	My,c,Rd = 5512.73 kN*m	Mz,c,Rd = 5512.73 kN*m	Vz,Ed = 23.53 kN
	MN,y,Rd = 5026.02 kN*m	MN,z,Rd = 5026.02 kN*m	Vz,T,Rd = 8076.19 kN
			Tt,Ed = -0.36 kN*m
			Classe de la section = 1



PARAMETRES DE DEVERSEMENT:

PARAMETRES DE FLAMBEMENT:



en y:

Ly = 21.50 m	Lam_y = 1.01
Lcr,y = 21.50 m	Xy = 0.66
Lamy = 77.14	kyy = 0.96



en z:

Lz = 21.50 m	Lam_z = 1.01
Lcr,z = 21.50 m	Xz = 0.66
Lamz = 77.14	kyz = 0.55

FORMULES DE VERIFICATION:

Contrôle de la résistance de la section:

$$N_{Ed}/N_{c,Rd} = 0.24 < 1.00 \quad (6.2.4.(1))$$

$$(M_{y,Ed}/M_{N,y,Rd})^{2.00} + (M_{z,Ed}/M_{N,z,Rd})^{2.00} = 0.02 < 1.00 \quad (6.2.9.1.(6))$$

$$V_{y,Ed}/V_{y,T,Rd} = 0.00 < 1.00 \quad (6.2.6-7)$$

$$V_{z,Ed}/V_{z,T,Rd} = 0.00 < 1.00 \quad (6.2.6-7)$$

$$\tau_{xy,Ed}/(f_y/(\sqrt{3} \cdot g_{M0})) = 0.00 < 1.00 \quad (6.2.6)$$

$$\tau_{xz,Ed}/(f_y/(\sqrt{3} \cdot g_{M0})) = 0.00 < 1.00 \quad (6.2.6)$$

Contrôle de la stabilité globale de la barre:

$$\lambda_{y} = 77.14 < \lambda_{y,max} = 210.00 \quad \lambda_{z} = 77.14 < \lambda_{z,max} = 210.00 \quad \text{STABLE}$$

$$N_{Ed}/(X_y \cdot N_{Rk}/g_{M1}) + k_{yy} \cdot M_{y,Ed,max}/(XLT \cdot M_{y,Rk}/g_{M1}) + k_{yz} \cdot M_{z,Ed,max}/(M_{z,Rk}/g_{M1}) = 0.48 < 1.00 \quad (6.3.3.(4))$$

$$N_{Ed}/(X_z \cdot N_{Rk}/g_{M1}) + k_{zy} \cdot M_{y,Ed,max}/(XLT \cdot M_{y,Rk}/g_{M1}) + k_{zz} \cdot M_{z,Ed,max}/(M_{z,Rk}/g_{M1}) = 0.44 < 1.00 \quad (6.3.3.(4))$$

Profil correct !!!

Figure A.6 : Note de calcul du mat

CALCUL DES STRUCTURES ACIER

NORME: NF EN 1993-1:2005/NA:2007/AC:2009, Eurocode 3: Design of steel structures.

TYPE D'ANALYSE: Vérification des pièces

FAMILLE:

PIECE: MEMBRURE SUP DU TREILLISPOINT: 1
12.00 m

COORDONNEE: $x = 0.52 L =$

CHARGEMENTS:

Cas de charge décisif: 12 ULS /70/ 1*1.35 + 2*1.35 + 3*1.35 + 4*1.35 + 5*1.35 + 6*0.90 + 7*1.50 + 9*1.05 + 10*0.90 + 11*1.35

MATERIAU:

S 355 (S 355) $f_y = 355.00$ MPa



PARAMETRES DE LA SECTION: 356*16

$h=356.0$ mm	$gM0=1.00$	$gM1=1.00$	
	$A_y=108.80$ cm ²	$A_z=108.80$ cm ²	$A_x=170.90$ cm ²
$tw=16.0$ mm	$I_y=24750.12$ cm ⁴	$I_z=24750.12$ cm ⁴	$I_x=49500.24$ cm ⁴
	$W_{ply}=1850.97$ cm ³	$W_{plz}=1850.97$ cm ³	

EFFORTS INTERNES ET RESISTANCES ULTIMES:

$N_{,Ed} = 3321.50$ kN	$M_{y,Ed} = -186.30$ kN*m	$M_{z,Ed} = 0.31$ kN*m	$V_{y,Ed} = -18.16$ kN
$N_{c,Rd} = 6067.04$ kN	$M_{y,Ed,max} = -186.30$ kN*m	$M_{z,Ed,max} = 56.10$ kN*m	$V_{y,T,Rd} = 2205.71$ kN
$N_{b,Rd} = 889.22$ kN	$M_{y,c,Rd} = 657.09$ kN*m	$M_{z,c,Rd} = 657.09$ kN*m	$V_{z,Ed} = 96.72$ kN
	$MN_{,y,Rd} = 421.13$ kN*m	$MN_{,z,Rd} = 421.13$ kN*m	$V_{z,T,Rd} = 2205.71$ kN
			$Tt_{,Ed} = -6.20$ kN*m
			Classe de la section = 1



PARAMETRES DE DEVERSEMENT:

PARAMETRES DE FLAMBEMENT:



en y:
 $L_y = 23.00$ m
 $L_{cr,y} = 23.00$ m
 $L_{amy} = 191.12$

$Lam_y = 2.50$
 $X_y = 0.15$
 $k_{yy} = 1.00$



en z:
 $L_z = 23.00$ m
 $L_{cr,z} = 23.00$ m
 $Lam_z = 191.12$

$Lam_z = 2.50$
 $X_z = 0.15$
 $k_{zz} = 1.00$

FORMULES DE VERIFICATION:

Contrôle de la résistance de la section:

$$N_{,Ed}/N_{c,Rd} = 0.55 < 1.00 \quad (6.2.4.(1))$$

$$(M_{y,Ed}/M_{N,y,Rd})^{2.00} + (M_{z,Ed}/M_{N,z,Rd})^{2.00} = 0.20 < 1.00 \quad (6.2.9.1.(6))$$

$$V_{y,Ed}/V_{y,T,Rd} = 0.01 < 1.00 \quad (6.2.6-7)$$

$$V_{z,Ed}/V_{z,T,Rd} = 0.04 < 1.00 \quad (6.2.6-7)$$

$$\tau_{ty,Ed}/(f_y/(\sqrt{3} * gM0)) = 0.01 < 1.00 \quad (6.2.6)$$

$$\tau_{tz,Ed}/(f_y/(\sqrt{3} * gM0)) = 0.01 < 1.00 \quad (6.2.6)$$

Contrôle de la stabilité globale de la barre:

$$\lambda_{bda,y} = 191.12 < \lambda_{bda,max} = 210.00 \quad \lambda_{bda,z} = 191.12 < \lambda_{bda,max} = 210.00 \quad \text{STABLE}$$

$$N_{,Ed}/(X_y * N_{,Rk}/gM1) + k_{yy} * M_{y,Ed,max}/(XLT * M_{y,Rk}/gM1) + k_{yz} * M_{z,Ed,max}/(M_{z,Rk}/gM1) = 4.10 > 1.00 \quad (6.3.3.(4))$$

$$N_{,Ed}/(X_z * N_{,Rk}/gM1) + k_{zy} * M_{y,Ed,max}/(XLT * M_{y,Rk}/gM1) + k_{zz} * M_{z,Ed,max}/(M_{z,Rk}/gM1) = 4.10 > 1.00 \quad (6.3.3.(4))$$

Profil incorrect !!!

**Figure A.7 : Note de calcul de la membrure
supérieure de a poutre en treillis**