

REPUBLICQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

Université Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la technologie

Département Génie Civil

Mémoire

Présenté pour obtenir

LE DIPLOME DE MASTER

FILIERE : Génie Civil

Spécialité : Structures

Par

- **NEDJAR Mouad**
- **KERIOU Zakaria**

Intitulé

Etude d'un pylône de télécommunication de hauteur 30m

Devant le Jury composé de :

<i>Nom & Prénom</i>	<i>Grade</i>	<i>Qualité</i>	<i>Etablissement</i>
<i>M.</i>	<i>MCB</i>	<i>Président</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M. CHIKH Noureddine</i>	<i>MCA</i>	<i>Encadreur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M.</i>	<i>....</i>	<i>Examineur</i>	<i>Univ-BBA</i>

Année Universitaire 2021/2022

Remerciements

Tout d'abord, nous tenons à remercier dieu clément et miséricordieux de nous avoir donné la force et le courage de mener à bien ce modeste travail.

Nous voudrions adresser toutes nos reconnaissances à Notre encadreur, Monsieur CHIKH NOUREDDINE, qui a voulu accepter de diriger ce travail, pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter notre réflexion, et aussi tous les membres de ce jury.

Nous remercions aussi tous particulièrement M. ROUABAH Salah « Ingénieur BATICIM-Alger », pour l'aide qu'il nous a accordée pour achever ce travail.

Enfin, Nos plus vifs remerciements s'adressent à nos très chers parents pour leurs soutiens et leurs patiences et à tous ceux qui nous ont aidés, encourager et nous ont soutenus.

Sommaire

Introduction générale	1
Présentation du sujet	2
Chapitre I : Généralités sur les pylônes.	
I-1 : Pylône – Définition	5
I-2 : Les différents types de pylônes	5
I-2-1 : Pylônes électriques	5
I-2-2 : Pylônes de télécommunications	5
I-2-3 : Pylônes pour ponts	6
I-2-4 : Pylônes d'éclairage	7
I-2-5 : Pylônes téléphériques	8
I-3 : Les pylônes de télécommunications	9
I-3-1 : Pylônes monopodes	9
I-3-2 : pylônes autostables	9
I-3-3 : Pylônes haubanés	10
I-4 : Avantages des pylônes	11
I-5 : Les règlements et normes utilisés dans le dimensionnements des pylônes	11
I-5-1 : Règles CM66 et additif 80	11
I-5-2 : Eurocode 3 (EC3)	11
I-5-3 : règlement NV65 modifié 99	12
I-5-4 : RPA 99 Version 2003	12
I-6 : Définition de quelques termes	12
I-7 : Les charges transmises aux pylônes	13
I-8 : Conclusion	13
Chapitre II : Constitution d'un pylône de télécommunication.	
II-1 : Introduction	14
II-2 : Avantages des structures en charpente métallique	14
II-3 : Structure d'un pylône en treillis	15
II-3-1 : Choix de la structure	15
II-3-2 : Choix de l'inertie de la structure	16
II-3-3 : Efforts appliqués sur le pylône	17

II-4 : Constitution d'un pylône en treillis	18
II-4-1 : La structure du pylône	18
II-4-2 : Panneaux de base	19
II-4-3 : Le contreventement	19
II-4-4 : Choix du type de cornières	20
II-4-5 : Caractéristiques des éléments du pylône	20
II-4-5-1 : Caractéristiques des cornières	20
II-4-5-2 : Caractéristiques des boulons	21
II-4-6 : Equipements et accessoires du pylône	21
II-5 : Conclusion	22
Chapitre III : Evaluation des charges imposées au pylône.	
III-1 : Introduction	23
III-2 : Actions verticales	23
III-2-1 : Actions verticales	23
III-2-2 : Actions horizontales	25
III-2-2-1 : Effet du vent sur la structure	25
III-2-2-2 : Calcul des charges du vent sur le pylône selon DTR-C-2-47	25
III-2-2-3 : Action du vent sur les antennes	34
III-3 : Hypothèses de calcul	34
III-4 : Charges sismiques	36
III-4-1 : analyse modale	37
III-5 : Conclusion	37
Chapitre IV : Modélisation du pylône en treillis à l'aide de Robot SA	
IV-1 : Introduction	38
IV-2 : Méthode de dimensionnement des pylônes	38
IV-3 : Modélisation par la méthode des éléments finis	39
IV-3-1 : Elément fini barre	39
IV-4 : Organigramme de résolution par la MEF	42
IV-5 : Présentation du logiciel ROBOT SA	42
IV-5-1 : Les principales caractéristiques du logiciel ROBOT SA	43

IV-5-2 : Présentation du logiciel et de son environnement	43
IV-6 : Etapes de la modélisation sur ROBOT SA	44
IV-7 : Analyse statique et résultats	45
IV-8 : Conclusion	56
Conclusion générale :	57
Bibliographie :	58
Annexes :	59

Résumé :

L'objectif de cette étude est le dimensionnement d'un pylône de télécommunication répondant aux exigences de la résistance et la stabilité, selon les normes, d'un pylône métallique destiné à porter des antennes de télécommunication de hauteur 30 m.

La structure du pylône est du type treillis. Le travail à consister à évaluer les différents types de charges transmises au pylône, à savoir les charges permanentes (poids) et les actions du vent.

Une partie de l'étude est la modélisation du pylône avec Autodesk ROBOT Structural Analysis.

Le chargement des actions, le calcul et la vérification des assemblages ont été réalisés à l'aide du logiciel ROBOT 2014.

Malgré que le temps qui nous a été alloué ne nous a pas permis d'aller jusqu'au bout de cette étude, nous nous sommes contentés de nous limiter au calcul des réactions globales aux appuis ainsi que les efforts dans les barres. Ce travail nous a permis de comprendre l'étude de dimensionnement des pylônes en treillis. Ces structures sont élancées et légères, par conséquent, elles sont très sensibles au phénomène d'instabilité.

Mots clés : pylône de télécommunication ; dimensionnement ; treillis.

Abstract :

The objective of this study is the dimensioning of a telecommunication pylon meeting the resistance and stability requirements, according to the standards, of a metal pylon intended to carry telecommunication antennas 30 m high. The structure of the pylon is of the lattice type.

The work consists of evaluating the different types of loads transmitted to the pylon, namely the permanent loads (weight) and the actions of the wind. Part of the study is the modeling of the pylon with Autodesk ROBOT Structural Analysis. The loading of the actions, the calculation and the verification of the assemblies were carried out using the ROBOT 2014 software.

Although the time allocated to us did not allow us to go to the end of this study, we were content to limit ourselves to the calculation of the global reactions to the supports as well as the forces in the bars. This work allowed us to understand the sizing study of lattice towers.

These structures are slender and light, therefore, they are very sensitive to the phenomenon of instability.

These structures are slender and light, therefore, they are very sensitive to the phenomenon of instability.

Keywords : Telecommunication pylon ; dimensioning ; lattice.

ملخص:

الهدف من هذه الدراسة هو تحديد أبعاد برج إتصالات تلبي متطلبات المقاومة والاستقرار، وفقاً للمعايير، لبرج معدني مخصص لحمل هوائيات إتصالات بارتفاع 30 مترًا. هيكل الصرح من النوع الشبكي مثلثيات. يتكون العمل من تقييم أنواع مختلفة من الأحمال المنقولة إلى الصرح، وهي الأحمال الدائمة (الوزن) وأفعال الرياح. جزء من الدراسة هو نمذجة الصرح باستخدام Autodesk ROBOT Structural Analysis. تم إجراء تحميل الإجراءات والحساب والتحقق من التجميعات باستخدام برنامج ROBOT 2014 على الرغم من أن الوقت المخصص لنا لم يسمح لنا بالذهاب إلى نهاية هذه الدراسة، إلا أننا راضون عن حصر أنفسنا في حساب ردود الفعل الكلية على الدعامات وكذلك القوى الموجودة في القضبان. سمح لنا هذا العمل بفهم دراسة تصميم الأبراج الشبكية. هذه الهياكل نحيلة وخفيفة، لذلك فهي حساسة للغاية لظاهرة عدم الاستقرار.

الكلمات المفتاحية: برج إتصالات؛ أبعاد؛ مثلثيات.

Introduction générale :

L'évolution de la technologie de télécommunication exige de plus en plus l'implantation de structures porteuses (mâts ou pylônes) afin d'assurer une meilleure couverture réseau. Dans ce contexte, Un pylône est un maillon essentiel d'une infrastructure de télécommunication. Il a deux fonctions : supporter des antennes et garantir leur qualité de pointage. La qualité de pointage est définie par la position des antennes et la direction du signal. Et pour limiter le dépointage au sommet, le pylône doit être très rigide, et doit également résister aux contraintes engendrées par les charges qui lui sont appliquées telles que le poids propre, celui des équipements, ainsi que la charge du vent. Sa construction doit se baser sur des techniques de bon sens, ou encore des normes qui assurent sa sécurité.

La conception d'une charpente métallique réside dans le pré-dimensionnement des éléments et d'assurer la sécurité de leurs assemblages. Cette conception est fondée sur le principe de la charpente qui doit résister à toutes les charges appliquées, quelle que soit leurs combinaisons.

En conséquence, il faut déterminer les combinaisons des charges dans la structure. Il n'est pas exclu que l'intensité de telles charges ou combinaisons soit évaluée sur une base de probabilité, comme c'est le cas des vents ou des tremblements de terre.

Les règlements tels que (CM 66, DTR REV2013, RPA 99 REV 2003, EUROCODE) servent de guide dans ce domaine et les charges mentionnées sont souvent les valeurs maximales que l'on doit considérer.

Notre mémoire se compose des chapitres suivants :

Le chapitre I sera consacré aux généralités sur les pylônes, les types de pylônes existants, ainsi que les normes utilisées dans leur dimensionnement.

Dans le deuxième chapitre, on trouve une description des éléments constituant le pylône de Télécommunication.

Dans le troisième chapitre, on évalue les charges imposées au pylône.

Et le quatrième chapitre consacré à la modélisation du pylône sur le logiciel Robot structural Analysis.

Présentation du sujet

Ce travail concerne l'étude d'un pylône métallique auto stable, de structure en treillis, de 30 m de hauteur, supportant dans son dernier tronçon des antennes et paraboles de surface totale équivalente de 30 m². Le pylône est de forme carrée (à quatre faces identiques), conçu en cornières (à L égales) laminées à chauds.

Ce pylône contient :

- Des plates-formes de travail et de repos,
- Une échelle et un chemin de câbles vertical,
- des supports antennes et paraboles.

Site : wilaya de Bordj Bou Arreridj.

Caractéristiques du pylône :

1. Galvanisé à Chaud conforme à la norme NF EN ISO 1461,
2. Entre-axe à la base : (3,85x3,85) m, dimensions back to back du pylône à la base: 4mx4m,
3. Fut 01 (00-20) m : Fut à section variable,
4. Fut 02 (20-30) m : Fut à section carrée (1.6x1.6) m,
5. Plateformes (Travail/Repos) : 4 plateformes placées aux Niveaux (9 m – 19 m – 25 m – 29 m).
6. Echelle à crinoline au milieu du pylône.
7. Chemin de câbles vertical parallèle à l'échelle.
8. Système Paratonnerre/mise à la terre.

Ossature :

L'ossature principale du pylône est constituée des éléments métalliques suivants :

Membrures : Les membrures sont des cornières dont l'épaisseur adaptée aux efforts est en acier E28.

Diagonales : Les diagonales sont des cornières dont l'épaisseur adaptée aux efforts est en acier E28. L'assemblage sera assuré par boulons sur les membrures.

Traverses : Les traverses se sont des cornières d'épaisseurs adaptées aux efforts sont en acier E28 elles sont assemblées par boulons sur les membrures.

Boulons de l'ossature principale : Les boulons utilisés pour la structure principale sont des boulons ordinaires avec une classe de qualité moyenne (classe 8.8) avec boulons HR 8.8 pour les encastremets.

Pré montage en usine : Toutes les pièces sont fabriquées sur des gabarits contrôlés.

Etude du vent :

- Vitesse en m/s : donnée à déterminer conformément aux normes algériennes : neige et vent DTR C 2—47, version 2013.
- Dépointage max au sommet du pylône est de 1°.

Antennes :

Nombre d'antennes + systèmes de fixation, Poids, Surface, orientation.

Diamètre Antenne (m)	Nombre d'antennes	Poids Brut / Antenne (Kg)	Niveau d'installation (m)
0,3	4	10,4	4x30
0,6	4	28,7	4x29
0,9	4	69,8	4x28
1,2	8	88,9	2x22 - 2x23,5 - 2x25 - 2x27
1,8	6	182,8	2x18,85 - 2x12,5 - 2x15
panneau carré 17,78*17,78 cm	4	1,8	4x29,5
panneau carré 61,72*61,72 cm	4	8,6	4x26

Pour l'orientation on prend la surface max de l'antenne (toutes les antennes sont perpendiculaires au vent).

Charges verticales :

- Evaluer les cas de charges,
- Echelle et câbles, (charge continue du pied jusqu'au sommet),
- Paratonnerre (poids),
- Plateformes (charges),

Assemblages :

Soudage des pieds du pylône avec platine de base et raidisseurs, ensuite boulonnage.

Cornières à ailes égales.

Nuance d'aciers : S275 (E28) (cornières et tôles)

Boulonnerie : Classe 8.8—Boulonnage à serrage ordinaire, rondelles élastiques, kit de boulon (vis entièrement fileté +rondelle + écrou).

Normes pour boulons :

- DIN 933 : Vis à tête hexagonale entièrement fileté
- DIN 934 : Ecrous hexagonaux à filetage métrique
- DIN 127B : Rondelles élastiques " GROWER "

REGLEMENTS RETENUS DANS LES CALCULS

- **Normes de calcul et conception : Eurocodes 3**
- ✓ NF EN 1993-1 :2005/NA2007/AC : 2009. Pour le calcul de la résistance des éléments.
- ✓ NF EN 1993-3-1 : Mars 2007 Calcul des structures en acier ; Partie 3-1 : Tours, mâts et cheminées - Pylônes et mâts haubanés
- ✓ NF EN 1993-1-8 :2005/AC/2009, pour le calcul des assemblages.
- ✓ DTR C 2 - 47, version 2013, pour le calcul au vent.
- **Pondérations :** Eurocodes 3 - de préférence on utilise les combinaisons manuelles.
- **Logiciel utilisé dans les calculs de simulation :** Autodesk Robot Structural Analysis Professional.

Chapitre I

Généralités sur les pylônes

I-1 Pylône - Définition

Un pylône est une structure métallique ou en béton armé, verticale, destinée à porter des câbles aériens (pylône de ligne électrique), des antennes de toutes sortes (pylône GSM), les ponts suspendus, l'éclairage public etc....

I-2 Les différents types des pylônes

Il existe plusieurs types et formes de pylônes, selon les caractéristiques demandées et selon l'entreprise de fabrication.

I-2-1 Pylônes électriques

Un pylône électrique est un support vertical portant les conducteurs d'une ligne à haute tension. Le plus souvent en charpente métallique, il est conçu pour supporter un ou plusieurs câbles aériens et résister aux aléas météorologiques et sismiques (y compris la foudre), et aux vibrations des câbles et/ou du pylône. Ses fondations sont adaptées au type de sol.



Figure. I-1. Pylône électrique

I-2-2 Pylônes de télécommunication

Les pylônes de télécommunication, ou pylônes en treillis ou en charpente métallique sont fabriqués par des entreprises spécialisées dans ce domaine, et on les distingue suivant plusieurs critères : la capacité portante (le nombre d'équipements et d'antennes destinés à être installés sur ce pylône), le lieu d'installation (sur bâtiment, sur terrain naturel)... etc.



Figure. I-2. Pylône de télécommunication

I-2-3 Pylônes pour ponts

C'est un constituant des ponts suspendus et ponts à haubans pouvant être en acier ou en béton. Il permet de former une triangulation des efforts conduisant le pylône à être soumis à d'importants efforts de compression, transmis par les câbles de suspension ou les haubans. Selon le mode de fixation des haubans et du type de liaison des pieds du pylône, il peut également être soumis à d'autres efforts :

- Effort transversal au point d'attache des haubans dans le cas de câbles discontinus,
- Effort de flexion en pied dans le cas d'un pylône encastré au sol.



Figure. I-3. Pylône pour ponts

I-2-4 Pylônes d'éclairage

Grâce à leur structure compacte et transportable, les pylônes d'éclairage sont parfaits pour toute utilisation, telle que l'éclairage de chantiers, travaux de construction ou exploitations minières, ou pour éclairer des terrains, tels que dépôts ou parkings.

Ils sont notamment utiles pour l'éclairage d'événements ou actes publiques à l'extérieur grâce à leur bas niveau de bruit.

- Tige jusqu'à 9 mètres de long, verticale ou rabattable, disponible avec levage hydraulique ou mécanique.
- Personnalisables : 4 ou 6 projecteurs, jusqu'à une puissance plus de 9.000 Watts et un flux de 180.000 lumens.
- Ils peuvent être placés sur remorque homologué pour la route.
- Une grande autonomie, grâce à leur dépôt interne.
- Système de rotation électrique ou manuel.



Figure. I-4. Pylône d'éclairage

I-2-5 Pylônes téléphériques

Ils supportent en partie centrale les sabots, porteurs des câbles, pour la voie haute et basse, afin de dégager le tirant d'air nécessaire. Les sabots assurent aussi la déviation des câbles.



Figure. I-5. Pylône téléphérique

I-3 Les pylônes de télécommunication

Il existe trois types de pylônes selon la morphologie de la structure.

I-3-1 Pylônes monopodes

Les pylônes monopodes qui appliquent des efforts horizontaux et des moments de renversement sur la fondation, sont généralement de forme cylindrique en béton, ce qui permet de les construire selon le procédé des coffrages glissants. Ils présentent de nombreux avantages :

- Ils nécessitent un entretien beaucoup moins important que les pylônes métalliques,
- Ils procurent un accès facile aux antennes,
- L'intérieur peut abriter des équipements radioélectriques,



Figure 6. Pylône monopode

I-3-2 Pylônes auto stables

Les pylônes auto stables sont des structures métalliques rigides fixées au sol par des fondations en béton. Ils sont encore appelés les polypodes. Utilisés pour la transmission, ils peuvent supporter plusieurs antennes de grande surface, fonctionnant à des fréquences élevées.

Leur section est en général carrée et parfois triangulaire. De forme pyramidale, la partie inférieure peut, suivant la hauteur, se poursuivre par une charpente de section constante ou progressivement décroissante. La largeur à la base, de l'ordre de 5 m pour une hauteur de 50 m est fonction croissante de la hauteur. Le plus souvent l'ensemble est démontable et assemblé par boulonnerie.

Concernant leur structure, les pylônes sont souvent munis d'une échelle intérieure. Les membrures du pylône sont réalisées en fer cornière laminé à chaud ou en sections de tube convenablement protégées par galvanisation à chaud.



Figure. I-7. Pylône auto stable (de section triangulaire)

I-3-3 Pylônes haubanés

Les pylônes haubanés sont plus légers, ils sont en général de sections triangulaire constante tout au long de la structure. Les membrures et treillis sont en cornières à 90° ou 60°, ou en tube galvanisé. Les haubans sont en câble d'acier galvanisé, ils sont fixés au pylône tous les 15 à 30 m. L'ancrage des haubans peut être assuré par massif en béton enterré ou par remblai fixant la semelle du dispositif d'ancrage.

Pour des hauteurs importantes, des dispositifs anti-torsion doivent être adoptés à hauteur des antennes : déport de fixation des haubans sur le pylône par bras horizontaux. L'installation des

haubans nécessite l'acquisition d'un terrain de plus grande étendue que pour un pylône auto-stable, ce qui augmente évidemment le coût et peut entraîner des retards dans les procédures. Ces pylônes comportent comme dans les autres types de pylônes une protection contre la foudre avec paratonnerre.

I-4 Les avantages des pylônes

Les pylônes présentent les avantages suivants :

- Surfaces exposées au vent sont réduites,
- Gain énorme sur le coffrage et l'échafaudage,
- Délai d'exécution réduit,
- Facilité de montage et démontage soit en pièces ou en éléments,
- Léger et résistant aux intempéries (neige, vent, pluie),
- Rentable (réalisation de grande distance en un temps record),
- Entretien facile.

I-5 Les règlements et normes utilisées pour le dimensionnement des pylônes

Il existe un certain nombre de normes de calcul et vérification des pylônes, chaque norme ayant une philosophie bien particulière. Dans ce qui suit, on va se focaliser sur les normes utilisées dans notre étude. Entre autres, les deux normes françaises pour le calcul des structures métalliques CM66-additif 80 et EC3 (Eurocode 3), le CCM97 est le règlement technique Algérien qui vient substituer le CM66 pour le calcul des constructions métalliques, R.N.V1999 pour le calcul des effets du vent et le règlement R.P.A.99/ version 2003 pour l'impact du séisme.

I-5-1 Règles CM66 et additif 80

Les règles françaises CM66 (1966) ont pour but de codifier les méthodes de calcul applicables à l'étude des projets de constructions en acier y compris les pylônes. L'additif 80 : Ce règlement, qui est issu des progrès réalisés dans l'étude du comportement élasto-plastique des matériaux, adopte le critère de Von Mises et permet de mener des calculs qui se basent sur le module de plasticité des profils. Pour le calcul, l'acier est supposé avoir un comportement élasto-plastique parfait.

I-5-2 EUROCODE 3 (EC3)

Faisant partie des EUROCODES publiés par le comité Européen de Normalisation (CEN), l'EC3 est l'ensemble des règles communes européennes de conception et de dimensionnement des structures en acier définissant les exigences de résistance, d'aptitude au service et de durabilité. L'Eurocode3, qui peut s'apparenter à un règlement par « pondération des charges

aux états limites», apporte cependant plus de rigueur et de cohérence et surtout une approche «semi-probabiliste» identique pour tous les matériaux.

I-5-3 Règles Neige et Vent R.N.V 1999

Le présent règlement est élaboré sous l'égide de la commission technique permanente (C.T.P.) pour le contrôle technique de la construction que celle-ci a adopté lors de sa 18ème session tenue le 11 Avril 1999. Il traite des constructions courantes, mettant à la disposition des professionnels et concepteurs de la construction des méthodes d'évaluation des actions climatiques (neige et vent) et des surcharges de sable en zones sahariennes. Le document est fondé sur une approche probabiliste : les actions « normales » et « extrêmes » des anciennes règles sont remplacées par le concept unique d'action caractéristique définie par référence à un zonage territorial (neige - vent - sable) liée aux spécificités climatiques locales.

I-5-4 Règles RPA99/version 2003

La réglementation parasismique est le document technique "DTR BC 2-48" dit : "REGLES PARASISMIQUES ALGERIENNES RPA99». La première version a été RPA81 qui fut suivie par le RPA81 version de 1983 après le séisme de Chlef du 10 Octobre 1980 .La troisième version RPA88 a été suivie par la version RPA99. Les règles RPA99 tiennent compte des errements des séismes tels que le tremblement de terre d'Oued Djer (Algérie) en octobre 1988 et celui d'Ain Témouchent en 22.12.1999. Ainsi, elle introduit 4 sites de sol au lieu des 2 sites (sol meuble et sol ferme) du RPA88. Enfin le RPA99 version 2003, est en vigueur après le séisme du 21 Mai 2003.

Le RPA99 est applicable à toutes les constructions courantes. Il n'est pas directement applicable aux constructions telles que les ouvrages d'art et ceux enterrés.

I-6 Définitions de quelques termes

On donne ici les définitions de quelques termes techniques utilisés dans ce domaine.

- **Antenne** : Une antenne est un dispositif permettant de rayonner (émetteur) ou de capter (récepteur) les ondes électromagnétiques. L'antenne est un élément fondamental dans un système radioélectrique, et ses caractéristiques de rendement, gain, diagramme de rayonnement influencent directement les performances de qualité et de portée du système.
- **Directivité** : La directivité caractérise la capacité d'un émetteur ou d'un récepteur à exercer sa fonction dans les différentes directions.
- **Azimut** : L'azimut est la direction principale d'émission d'une antenne. Il est exprimé en

degrés et est compté positivement dans le sens horaire, en partant du nord (azimut 0°).

- **Dépointage max au sommet** : Le dépointage d'une antenne est la déviation angulaire du faisceau électromagnétique émis par cette antenne, sous l'effet d'une perturbation (vent, choc, séisme, déformation d'un élément, surcharge quelconque).

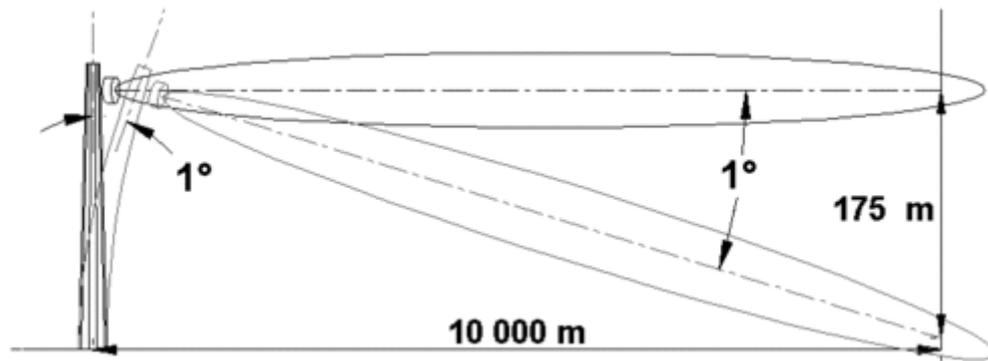


Figure. I-8. Dépointage au sommet

- **Charge à l'entête du pylône**

La charge à l'entête du pylône est la somme des surfaces au vent de toutes les antennes placées sur le pylône.

I-7 Les charges transmises aux pylônes

La structure est soumise aux charges permanentes (poids de la structure et des équipements) et aux charges de vent.

I-8 Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté les différents types de pylônes existant ainsi que leurs accessoires, et les normes qui permettent leur dimensionnement. Malgré l'évolution de la technologie, les pylônes restent tout de même un moyen économique de supporter les lignes électriques et un moyen efficace de diffuser les ondes hertziennes.

L'opération d'implantation d'un pylône s'accompagne de nombreuses contraintes. En effet, il faut le concevoir, définir un mode de mise en place, tout en tenant compte des règles de sécurité et des aspects liés à l'environnementaux et la législation.

Chapitre II

Constitution d'un pylône de télécommunication

II-1 Introduction

Une conception de pylône de télécommunication solide constitue l'un des éléments essentiels pour assurer une fluidité du signal sans interruption. Les pylônes couramment utilisés pour réaliser une telle fonction sont nombreux, on peut citer : les pylônes monopodes, autoportants (en treillis) et haubanés. L'entreprise de télécommunication est confrontée à choisir un type de pylône à utiliser. Un tel choix est difficile et repose sur un certain nombre de critères qui sont : la hauteur du pylône, son poids, et son emplacement.

Les pylônes en treillis ont l'avantage d'être rigide et stables, et peuvent supporter plusieurs antennes de grande surface. En fonction de la hauteur de la structure, un pylône en profilés cornières semble répondre aux exigences techniques recommandées par les normes de calcul et être en même temps économique. Les actions à considérer ainsi que leurs combinaisons sont définies par la norme utilisée. La méthode de calcul à utiliser sera celle des états limites (méthode élastique) : les sollicitations de service sont comparées à des valeurs prescrites et des sollicitations de service majorées, à la capacité portante de la structure.

II-2 Avantages des structures en charpente métallique

Les structures métalliques ont plusieurs avantages par rapport à d'autres formes de constructions (en béton ou en bois). Elles présentent également un large éventail d'applications possibles, ainsi que la possibilité d'avoir de nombreuses pièces standardisées. Parmi les avantages qui confèrent à la charpente métallique une place importante dans le secteur de la construction, on cite :

Résistance et légèreté : Plus grande résistance à la fatigue que le béton. En plus, en raison de son rapport de résistance/poids élevé il est employé intensivement dans les bâtiments hauts et les grandes structures légères.

Durabilité : avec un entretien adéquat, les structures en acier dureront assez longtemps.

Ductilité/Ténacité : la propriété de ductilité des aciers structuraux leur permet de résister à de grandes déformations sans se rompre. Egalement, la ténacité leur permettra d'absorber une grande énergie lors des chocs.

Transport et Montage : la structure est conçue sous forme de sections, par conséquent, le montage sera facile et rapide.

Uniformité : les propriétés de l'acier ne changent pas fortement avec le temps.

Coût : Les structures en acier sont généralement plus légères que celles fabriquées avec d'autres matériaux ; Cela implique moins de coût de base.

Ecologie : L'acier est un matériau plus écologique, durable, recyclable et réutilisable.

Qualité et sécurité : la garantie de qualité et de contrôle de la fabrication garantit la sécurité de la structure. Egalement un entretien et une protection contre la corrosion assure une durée de vie presque illimité de la structure en acier.

II-3 Structure du pylône en treillis

II-3-1- Choix de la structure

La conception porte sur un pylône de télécommunication, dont le rôle est de porter des antennes à différentes hauteurs. Les charges auxquelles sera soumis le pylône sont :

- Les charges permanentes (ou verticales) qui sont le poids propre du pylône et celui des équipements et antennes.
- Les charges horizontales qui sont celles du vent.

Parmi les types de pylônes existant, selon le matériau (en bois, en béton, ou en acier) ou selon le type (monopodes, en treillis ou haubané), le choix est porté sur le pylône métallique en treillis pour les raisons suivantes :

- Résistance et stabilité : les contraintes engendrées par les charges ne doivent pas dépasser les valeurs admissibles exigées par les normes.
- Rigidité : la déformation de l'entête du pylône ne doit dépasser une valeur limite exigée par le cahier des charges.
- Corrosion : L'opération de la galvanisation à chaud de l'acier du pylône permet de lutter contre la corrosion et améliorer la durée de vie.
- Accessibilité et sécurité : les personnes autorisées à monter sur le pylône pour des opérations d'entretien ou de montage doivent avoir un accès facile et sécurisé.
- Transport et installation : les sections des pylônes en treillis peuvent être emballées et transportées facilement. Egalement, cette conception permet une installation facile et rapide.
- Prix de revient : le prix du pylône est évalué en fonction du poids de ses éléments, par conséquent, le choix de ses caractéristiques géométriques permet de répondre aux exigences des normes.

:



a- Section carrée

b- section triangulaire

Figure. II-1- Pylône en treillis auto-stable - Télécom

II-3-2 Choix de l'inertie de la structure

Les pylônes auto-stables (en treillis) ou polypodes sont des structures métalliques rigides fixées au sol par des fondations en béton. La base en général carrée ou triangulaire, ce qui lui assure une très grande stabilité. La forme de la partie inférieure est pyramidale, et peut se poursuivre par une autre partie supérieure de section constante, ou légèrement décroissante. Le plus souvent, l'ensemble est démontable et assemblé par boulonnerie (Figure 10).

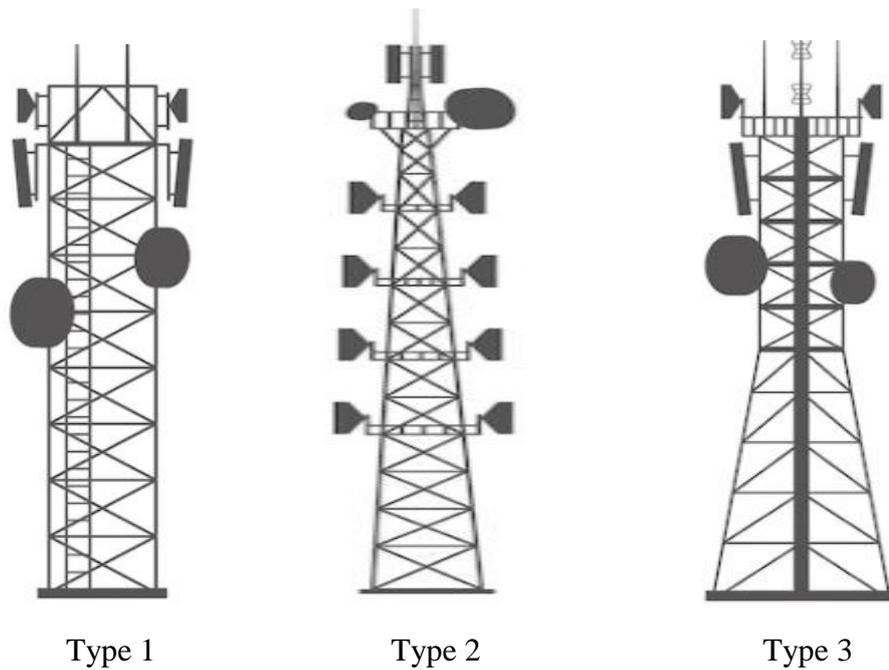


Figure. II-2 -Variation de l'inertie de la structure

II-3-3 Efforts appliqués sur le pylône

Le pylône est soumis aux efforts suivants :

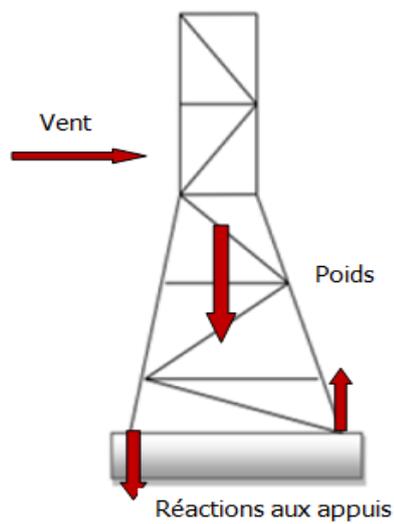


Figure. II-3 - Efforts appliqués sur le pylône

- Le poids propre du pylône et des équipements, c'est un effort vertical qui provoque la compression sur toutes les barres.

- L'effort du vent ou effort de trainée (effort antennes et effort pylône), qui est un effort horizontal.
- L'effort du vent provoque un moment de renversement par rapport à la base.
- Ces efforts engendreront des réactions au niveau des appuis de fixation à la fondation, efforts d'arrachement sur certains appuis et efforts de compression sur d'autres.

Le choix du type d'inertie de la section selon la hauteur permet de garantir l'équilibre statique du pylône.

II-4 Constitution du pylône en treillis

II- 4-1 La structure du pylône

Les pylônes métalliques de télécommunication se composent de deux grandes parties : la superstructure et l'infrastructure (ou fondation). La superstructure est constituée de futs, de membrures et de contreventement.

Le fût constitue l'élément principal du pylône. La liaison entre la superstructure et la fondation est assurée par les embases.

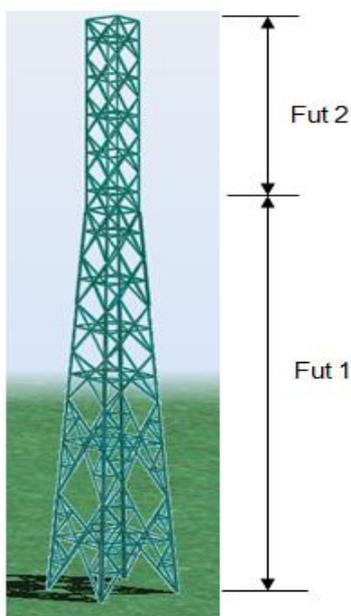


Figure. II-4 - Les parties d'un pylône

Les membrures sont des éléments en acier constituant les éléments porteurs principaux de la structure. Le pylône est subdivisé en tronçons dans le sens vertical afin de déterminer les surfaces projetées et la trainée aérodynamique. Les tronçons sont compris entre des intersections de membrures et de contreventements principaux.

Les pylônes sont souvent munis d'une échelle intérieure, les membrures du pylône sont en cornières laminées à chaud.

II-4-2 Panneau de base

Sur une face, le panneau est constitué des éléments suivants :

- Les membrures,
- Les diagonales,
- Les traverses,
- Les raidisseurs de diagonales,
- Les raidisseurs de traverses.

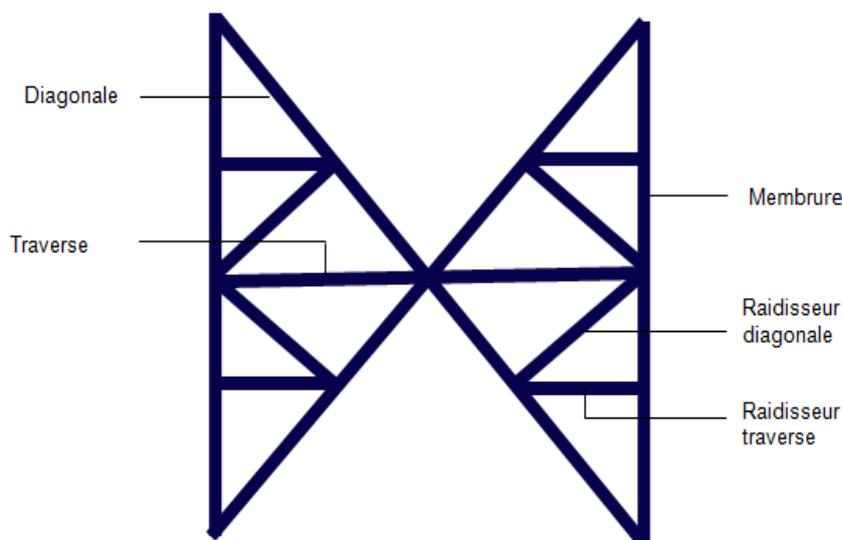


Figure II-5- Eléments du panneau de base

Un tronçon est formé d'une succession de panneaux qui se ressemblent dans leurs formes et profilés. Le schéma suivant donne un aperçu sur le plan du pylône.

II-4-3 Le contreventement

Le contreventement est un système statique destiné à assurer la stabilité horizontale et verticale de la structure vis-à-vis des effets des éventuelles secousses, qui ont des composantes dans les trois directions (exemple : vent, séisme, choc, etc...).

Il sert également à stabiliser localement certaines parties de la structure relativement aux phénomènes d'instabilité (flambage ou déversement).

Les contreventements principaux sont formés de traverses et de diagonales, ce sont des éléments en cornières supportant des efforts provoqués par les charges appliquées sur la structure. Les raidisseurs diagonaux et raidisseurs traverses forment les contreventements secondaires et sont utilisés afin de réduire la longueur de flambement des autres éléments.

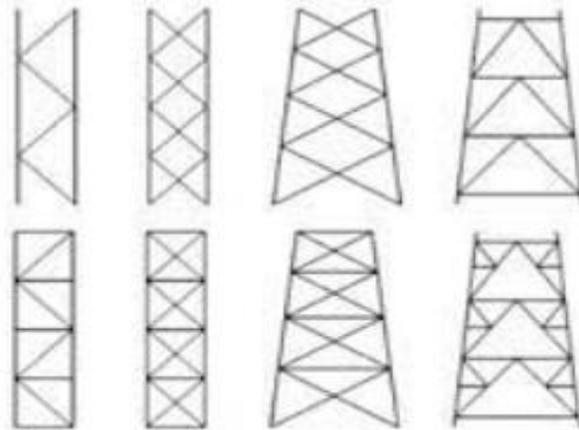


Figure.II-6 - Type de contreventement.

II-4-4 Choix du type de cornières

Tous les éléments constituant notre pylône seront des cornières à ailes égales en acier laminé à chaud et sont conformes à la norme **EN 10025-2**, le matériau utilisé étant l'acier **S275**. Les valeurs de la limite à la rupture et de la limite d'élasticité sont données dans le tableau ci-dessous.

Tableau. II-1. Caractéristiques de l'acier des cornières

Nuance de l'acier	S275
Contrainte limite de rupture en traction (MPa)	410
Limite d'élasticité (MPa)	275

II-4-5 Caractéristiques des éléments du pylône

II-4-5-1 Caractéristiques des cornières

Les caractéristiques des cornières utilisées sont données dans le tableau suivant :

Tableau. II-3. Désignation et nuance du matériau des cornières

Elément du pylône	Type de cornière	Nuance du matériau
Membrures		
Diagonales		
Raidisseurs diagonaux	Cornières à ailes égales	S275
Traverses	CAE	
Raidisseurs traverses		

II-4-5-2- Caractéristiques des boulons

Les boulons de fixation choisis sont des boulons à serrage ordinaire de classe 8.8, les caractéristiques mécaniques sont données dans le tableau suivant :

Tableau. II-4. Caractéristiques mécaniques des boulons

Classe	8.8
f_{yb} (MPa)	640
f_{ub} (MPa)	800

f_{yb} : contrainte limite élastique du matériau.

f_{ub} : contrainte limite de rupture.

II-4-6 Equipements et accessoires du pylône

Les équipements du pylône de télécommunication se composent des éléments suivants :

- 1- Echelle à crinoline : L'échelle à crinoline est un moyen d'accès permanent qui permettra l'accès aux terrasses des bâtiments, les installations industrielles ou les pylônes en charpente métallique. Dans les constructions de structures en acier et aluminium, les échelles à crinoline sont soumises à la norme NF EN 1090.
- 2- Plates-formes de travail/Repos : Les plates-formes de travail seront situées à chaque niveau des équipements. Elles sont au nombre de 4, situées respectivement aux niveaux (9—19—25—29) m.
- 3- Chemin de câble vertical : Le long de la hauteur du pylône, un chemin de câble vertical, placé en parallèle à l'échelle, et permet de fixer les câbles coaxiaux.

4- Système paratonnerre/mise à la terre : Le rôle du système paratonnerre est de protéger la structure contre les coups de foudre directs.

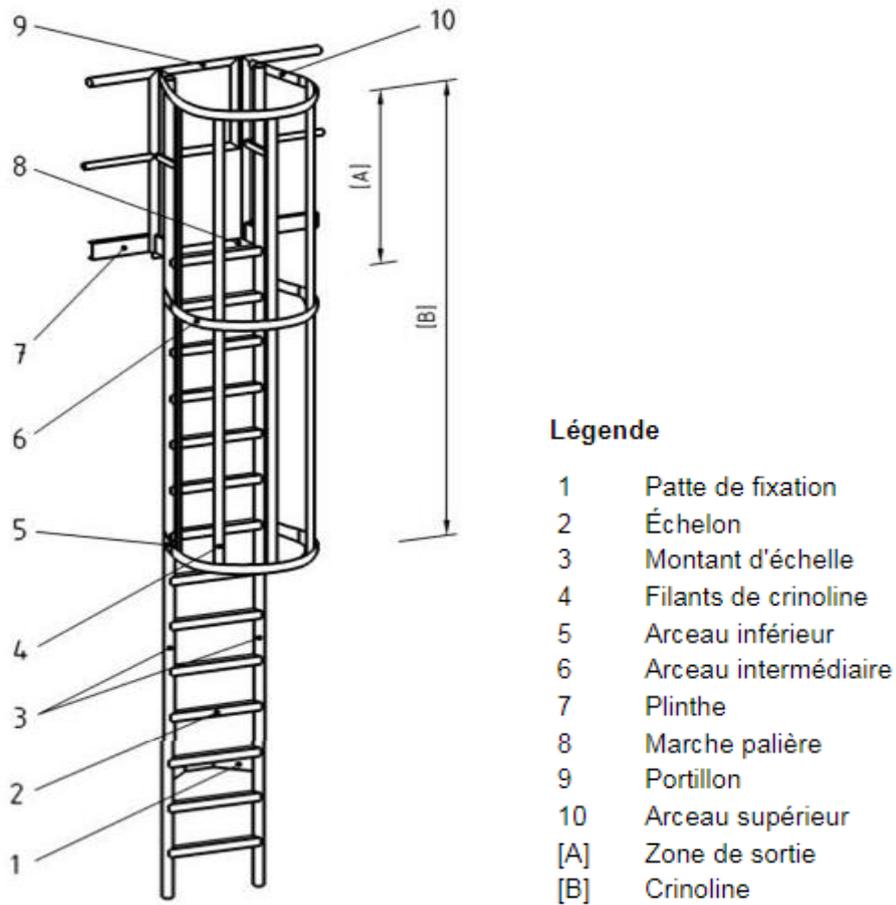


Figure. II-7- Echelle à crinoline- terminologie

II-5 Conclusion

Dans ce chapitre, on a effectué une description des différents éléments constituant le pylône ainsi que leurs caractéristiques. Les éléments de ce pylône, entre autres les membrures, les diagonales et les traverses, devront supporter les contraintes engendrées par les charges appliquées.

Chapitre III

Evaluation des charges imposées au pylône

III-1 Introduction

Les actions sont généralement classées en actions permanentes, actions variables et actions accidentelles. Parmi les charges permanentes, tous les éléments qui constituent le pylône doivent être pris en compte : plateformes, antennes et supports, câbles, échelles, parabole, kit de protection contre la foudre, etc.

III-2 Actions appliquées au pylône

Selon la direction, il est possible de les classer en :

- Actions verticales.
- Actions horizontales.

III-2-1 Actions verticales

Les actions verticales regroupent les actions suivantes :

1. Poids propre du pylône : inclut le poids des éléments constituant le pylône, principalement les membrures, les diagonales, les traverses horizontales, ainsi que les goussets, ce poids est calculé automatiquement par le logiciel robot structural analysis.
2. Le poids des échelles : contient l'échelle et le chemin de câbles, ainsi que les Feeders. Il est estimé à 7 daN/ml, imposé aux quatre pieds du pylône.
3. Poids plateformes : inclut les composants des plateformes et paliers de repos : estimé à 200 kg par niveau, partagé aux quatre membrures sous forme de charges nodales (voir Figure).
4. Poids des antennes et paraboles : contient le poids des équipements de transmission chargés au pylône. Le client n'a pas de données détaillées des antennes à installer, ni les niveaux où seront montées. Le poids des antennes est estimé suivant une installation arbitraire proposée (selon le diamètre de l'antenne), la surface totale occupée est de 30m² (voir les détails au schéma).

Tableau. III-1- Valeurs des poids et niveaux d'installation des antennes

CAS DE CHARGE	Type de charge	Niveau de chargement	Valeur de la charge (daN)
poids des antennes et paraboles	force nodale	30 m	$F_Z = -9,00$
	force nodale	27 m et 28 m	$F_Z = -21,00$
	force nodale	25 m	$F_Z = -35,00$
	force nodale	22 m/17,5 m/15 m	$F_Z = -45,00$
	force nodale	12,5 m/7,8 m	$F_Z = -72,50$

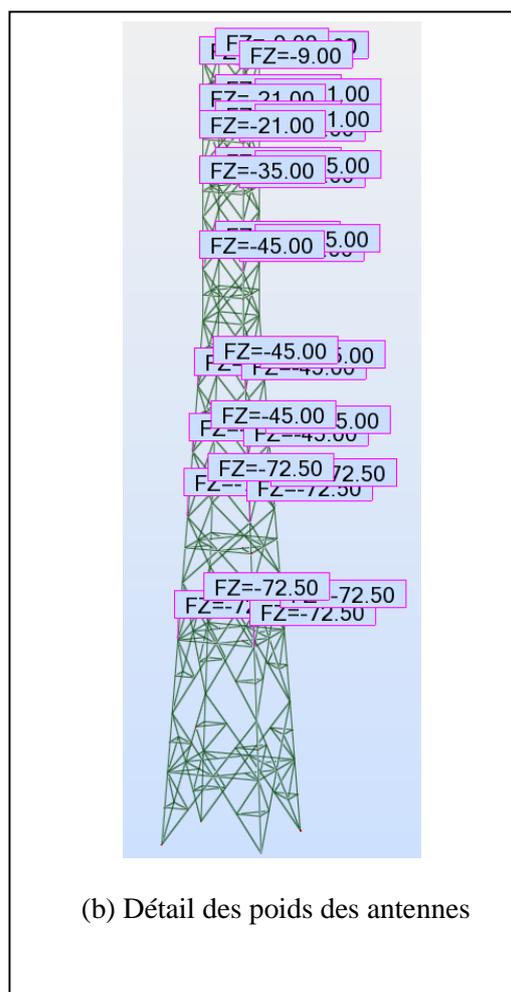
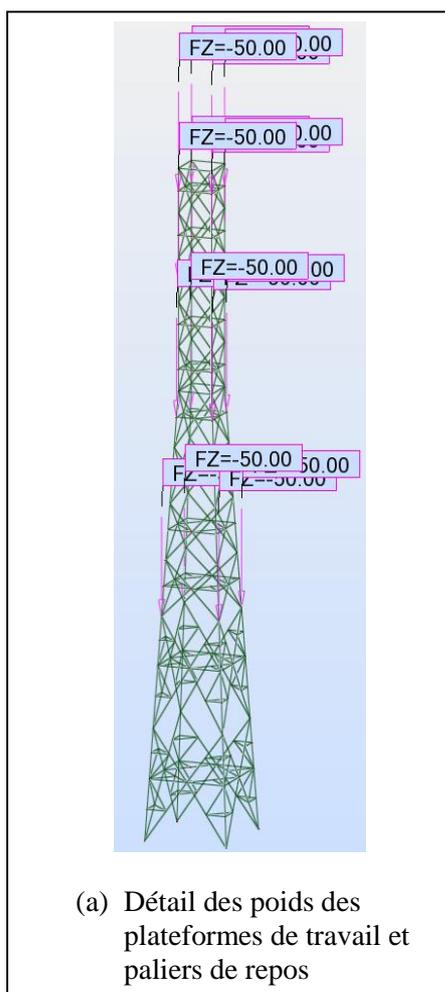


Figure. III-1- Détails des poids des plateformes et des antennes

III-2-2 Actions horizontales

Les actions horizontales sont les suivantes :

III-2-2-1 Effet du vent sur la structure

On suppose que le vent a une direction moyenne horizontale. L'action du vent sur une structure dépend des caractéristiques suivantes :

- Vitesse du vent.
- Dimensions et type de la structure.
- Configuration locale du terrain (Topographie, Région).
- Perméabilité des parois de la structure.

Deux actions sont à considérer selon la surface exposée au vent :

- Action d'ensemble sur le pylône (effort pylône) : Cette action permet de calculer les éléments principaux assurant la stabilité de l'ouvrage. L'action d'ensemble du vent soufflant dans une direction donnée sur une construction est la résultante géométrique de toutes les actions sur les différentes parois. Pour le cas des pylônes, il s'agit de la composante horizontale qui est la Trainée produisant un effet d'entraînement et de renversement.
- Action d'ensemble sur les antennes (effort antennes) : Seules les antennes FH et GSM seront prises en considération dans le dimensionnement des pylônes.

III-2-2-2 Calcul des charges du vent sur le pylône selon DTR C-2-47

Dimensions du pylône

Type :	RECTANGULAIRE
Hauteur :	30,00 m
Largeur :	4 m
Longueur :	4 m
Altitude de la construction :	30,00 m

Tronçons :

1	TR1	Hmax= 5,00 m
2	TR2	Hmax= 10,00 m
3	TR3	Hmax= 15,00 m
4	TR4	Hmax= 20,00 m

- | | | |
|---|-----|---------------|
| 5 | TR5 | Hmax= 25,00 m |
| 6 | TR6 | Hmax= 30,00 m |

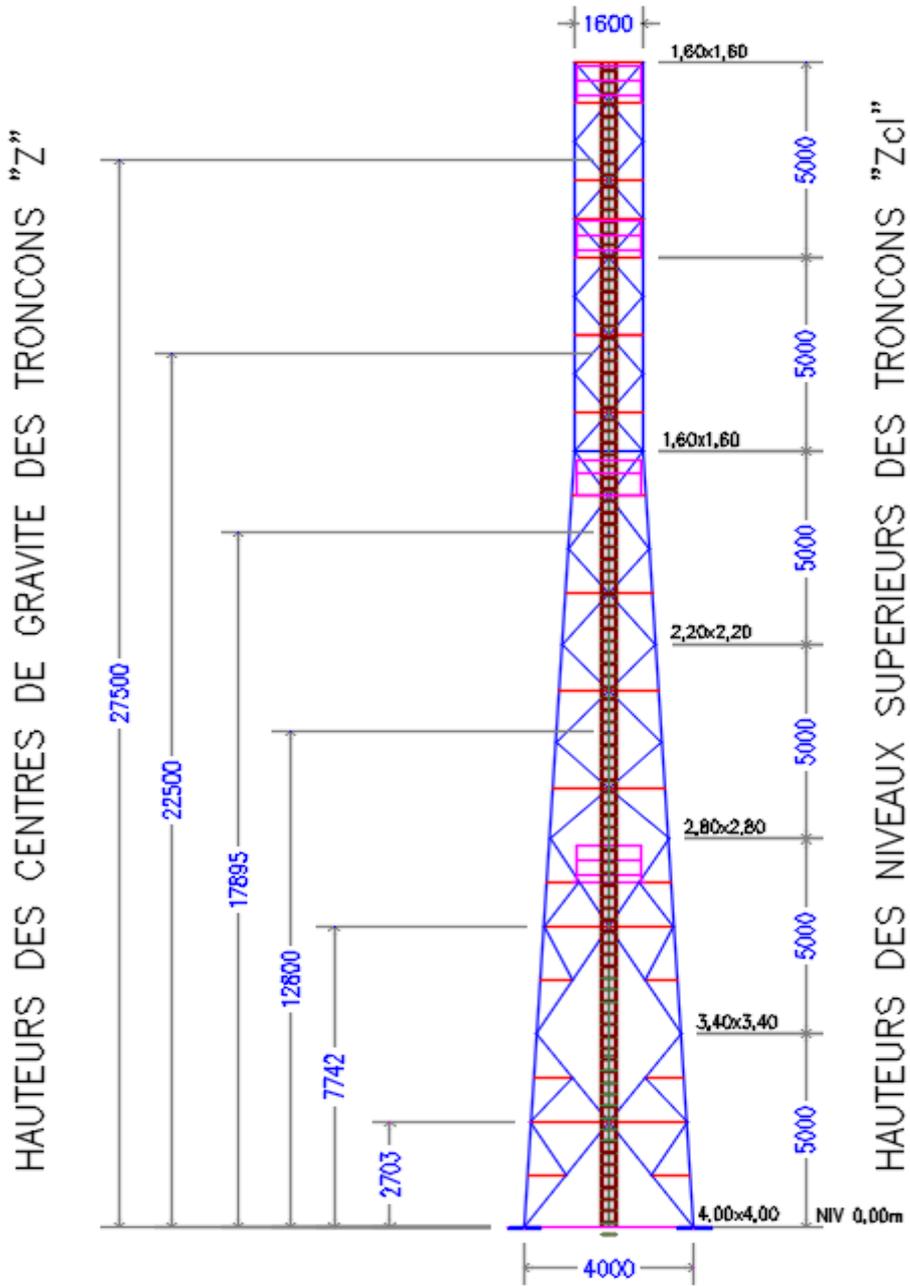


Figure.III-2- Dimensions et tronçons du pylône

Données vent

Zone I, Wilaya de Bordj Bou Arreridj (Tableau A2) page 50 (NV65).

Vitesse de référence $V_{réf} = 25 \text{ m/s}$

Pression de référence $q_{réf} = 375 \text{ N/m}^2$

Catégorie de terrain : II

K_T	z_0 (m)	z_{\min} (m)	ε
0,19	0,05	2	0,52

Hauteur équivalente : $z_{eq} = 0,6 \times h = 18 \text{ m}$

Formules

Vitesse moyenne : $V_m(z) = C_r(z) \times C_t(z) \times V_{ref}$

Coefficient d'exposition : $C_e(z) = C_t^2(z) \times C_r^2(z) \times [1 + 7 \times I_V(z)]$

Dont l'Intensité de turbulence : $I_V(z) = \frac{1}{C_t(z) \times \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}$ pour $z > z_{\min}$

Coefficient de rugosité : $C_r(z) = K_t \times \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)$ pour $z_{\min} > z > 200\text{m}$

Coefficient de topographie : C_t est pris égal à 1

Tableau. III-2- Tableau récapitulatif

Tronçon	H(m)	Z_{cl} (m)	Z	$C_r(z)$	$C_t(z)$	$I_V(z)$	$C_e(z)$	$V_m(z)$ [m/s]	$q_p(Z_{cl})$ [N/m ²]
1	5	5	2,70	0,76	1	0,25	1,58	18,95	593,41
2	5	10	7,74	0,96	1	0,20	2,19	23,95	821,97
3	5	15	12,80	1,05	1	0,18	2,51	26,34	941,74
4	5	20	17,90	1,12	1	0,17	2,73	27,93	1025,39
5	5	25	22,50	1,16	1	0,16	2,89	29,02	1084,19
6	5	30	27,50	1,20	1	0,16	3,03	29,97	1136,94
	pour Z_{eq}		18,00	1,12	1,00	0,17	2,74	27,96	5603,64

Avec :

H(m) : Hauteur du tronçon ;

Z_{cl} (m) : Hauteur du niveau supérieur du tronçon ;

$Z(m)$: Hauteur du centre de gravité du tronçon ;

$q_p(Z_{cl}) = q_{réf} \times C_e(z)$: Pression dynamique de pointe.

Coefficient de force C_f :

$$C_f = C_{f0} \times \Psi_\lambda \quad (\S 4.1)$$

Où :

C_{f0} est le coefficient de force en considérant un élancement effectif infini, il est fonction du taux de remplissage φ ,

Ψ_λ : *Le facteur d'élancement* (§ 4.1.1)

Le coefficient de remplissage $\varphi = \frac{A}{A_c}$; A est la surface pleine d'un tronçon, A_c est la surface totale d'un tronçon.

Direction du vent	C_{f0}	
Vent Normal	$4 \times \varphi^2 - 5,9 \times \varphi + 4$	Cf. tableau 4.5
Vent 45°	$(4 \times \varphi^2 - 5,9 \times \varphi + 4) \times (1 + 0,75 \times \varphi)$ Avec : $(1 + 0,75\varphi) \leq 1,2$	Cf. tableau 4.5

Coefficients de forces d'une structure en treillis spatial.

Elancement effectif λ_E :

$\lambda_E = \frac{h}{b}$; h : Hauteur du pylône, b largeur moyenne du pylône.

$$b = \frac{b_1 + b_2}{2} = \frac{4 + 1.6}{2} = 2,8 \text{ m}$$

$$\lambda_E = \frac{30}{2,8} = 10,71$$

Facteur d'élancement $\Psi_\lambda \cong 0,96$

Tableau.III-3- Tableau récapitulatif du coefficient de remplissage φ - coefficients de forces C_{f0} au V_N et V_{45°

Tronçon	A (S pleine)	A_c (S totale)	$\varphi = A/A_c$	C_{f0} (vent 0°)	$1 + 0,75\varphi$	C_{f0} (vent 45°)
1	3,28	17,45	0,188	3,03	1,14	3,46
2	2,81	14,62	0,192	3,01	1,14	3,45
3	2,41	11,79	0,204	2,96	1,15	3,42
4	2,41	8,96	0,269	2,70	1,20	3,24
5	1,69	7,55	0,224	2,88	1,17	3,36
6	1,59	7,55	0,211	2,93	1,16	3,40

En allant des coefficients de forces C_{f0} d'un élancement infini, aux coefficients de force C_f d'un élancement λ_E :

Tableau. III-4- Tableau récapitulatif des coefficients de force C_f

Tronçon	C_{f0}		$C_f = C_{f0} \times \Psi_\lambda$	
	V_N	vent 45°	V_N	vent 45°
1	3,03	3,46	2,91	3,32
2	3,01	3,45	2,89	3,31
3	2,96	3,42	2,84	3,28
4	2,70	3,24	2,59	3,11
5	2,88	3,36	2,76	3,23
6	2,93	3,40	2,82	3,26
<i>Coefficient global</i>	2,92	3,39	2,80	3,25

Coefficient dynamique C_d

$$C_d = \frac{1 + 2 \times I_V(z_{eq}) \times \sqrt{Q^2 + R^2}}{1 + 7 \times I_V(z_{eq})}$$

Avec :

z_{eq} en m est la hauteur équivalente de la construction ; $z_{eq} = 18m$

$I_V(z_{eq})$ est l'intensité de turbulence pour $z = z_{eq}$

Les différents paramètres qui interviennent dans le calcul du coefficient C_d sont :

- Echelle de turbulence : $L_i(z_{eq}) = 300 \times \left(\frac{z_{eq}}{200}\right)^\varepsilon = 85,77$
- L'intensité de turbulence $I_V(z_{eq}) = \frac{1}{C_t(z) \times \ln \frac{z_{eq}}{z_0}}$ pour $z > z_{min}$; $I_V(z_{eq}) = 0,17$
- Fréquence fondamentale : la fréquence fondamentale de flexion $n_{1,X}$ est évalué par le calcul dynamique aux valeurs propres ; $n_{1,X} = 3,28Hz$.
- Vitesse moyenne : $V_m(z_{eq}) = C_r(z_{eq}) \times C_t(z_{eq}) \times V_{ref} = 1,12 \times 1 \times 25 = \frac{28m}{s}$

- Fréquence adimensionnelle : $N_X = \frac{n_{1,X} \times L_i(z_{eq})}{V_m(z_{eq})} = \frac{3,28 \times 85,77}{28} = 10,05 \text{ Hz}$

- Partie quasi-statique Q^2 : elle est donnée par $Q^2 = \frac{1}{1 + 0,9 \times \left(\frac{b+h}{L_i(z_{eq})}\right)^{0,63}} = \frac{1}{1 + 0,9 \times \left(\frac{2,8+30}{85,77}\right)^{0,63}} = 0,67$

- Fonction adimensionnelle $R_N = \frac{6,8 \times N_X}{(1 + 10,2 \times N_X)^{\frac{5}{3}}} = \frac{6,8 \times 10,05}{(1 + 10,2 \times 10,05)^{\frac{5}{3}}} = \frac{68,34}{2282} = 0,03$

- Fonctions d'admittance aérodynamique R_h et R_b

$$\eta_h = \frac{4,6 \times N_X \times h}{L_i(z_{eq})} = \frac{4,6 \times 10,05 \times 30}{85,77} = 16,17$$

$$\eta_b = \frac{4,6 \times N_X \times b}{L_i(z_{eq})} = \frac{4,6 \times 10,05 \times 2,8}{85,77} = 1,51$$

$$R_h = \left(\frac{1}{\eta_h}\right) - \left(\frac{1}{2 \times \eta_h^2}\right) \times (1 - e^{-2 \times \eta_h}) = \left(\frac{1}{16,17}\right) - \left(\frac{1}{2 \times 16,17^2}\right) \times (1 - e^{-32,34}) = 0,06$$

$$R_b = \left(\frac{1}{\eta_b}\right) - \left(\frac{1}{2 \times \eta_b^2}\right) \times (1 - e^{-2 \times \eta_b}) = \left(\frac{1}{1,51}\right) - \left(\frac{1}{2 \times 1,51^2}\right) \times (1 - e^{-3,02}) = 0,46$$

- Décrément logarithmique δ

$$\delta = \delta_s + \delta_a$$

Avec :

δ_s : décrément logarithmique d'amortissement structural (batiment en acier) : $\delta_s = 0,05$

δ_a : *décrément logarithmique d'amortissement aérodynamique.*

$$\delta_a = \frac{\rho \times b \times C_f}{2 \times n_{1,X} \times m_{1,X}} \times V_m(z_{eq})$$

Où :

ρ : La masse volumique de l'air ($\rho = 1,2 \text{ kg/m}^3$) ;

b : La dimension perpendiculaire au vent de la construction.

C_f : Coefficient de force ;

$n_{1,X}$ (Hz): Fréquence propre du mode fondamental ;

$m_{1,X}$ ($\frac{\text{kg}}{\text{m}}$) La masse équivalente pour le mode fondamental et dans la direction du vent (annexe 3, § 6.3.2).

$$m_1 = \frac{\int_0^h m(z) \cdot \Phi_1^2(z) \cdot dz}{\int_0^h \Phi_1^2(z) \cdot dz}$$

Avec : $\Phi_1(z) = \left(\frac{z}{h}\right)^\xi$;

$h(m)$ Hauteur totale de la structure.

$z(m)$: Hauteur par rapport au point considéré.

$\xi = 2,5$ Pour les structures en treillis.

Tableau.III-5- Tableau récapitulatif des masses équivalentes

Tronçon	Niveau z	ξ	$\Phi_1(z) = \left(\frac{z}{h}\right)^\xi$	m(z) kg/m	$\Phi_1(z)^2 \times m(z)$
1	2,7	2,5	0,0024	282,78	0,00
2	7,74	2,5	0,0338	218,60	0,25
3	12,8	2,5	0,1189	156,32	2,21
4	17,9	2,5	0,2750	136,28	10,31
5	22,5	2,5	0,4871	114,18	27,10
6	27,5	2,5	0,8045	62,10	40,19

$$m_1 = \frac{\int_0^h m(z) \cdot \Phi_1^2(z) \cdot dz}{\int_0^h \Phi_1^2(z) \cdot dz} = \frac{80,056}{0,98} = 82,07 \text{ kg/m}$$

Alors la valeur de δ_a est de :

$$\text{Vent à } 0^\circ \quad \delta_{a0} = \frac{\rho \times b \times C_f}{2 \times n_{1,X} \times m_{1,X}} \times V_m(z_{eq}) = \frac{1,2 \times 2,8 \times 2,80}{2 \times 3,28 \times 82,07} \times 28 = 0,49$$

$$\text{Vent à } 45^\circ \quad \delta_{a45} = \frac{1,2 \times 2,8 \times 3,25}{2 \times 3,28 \times 82,07} \times 28 = 0,56$$

Le décrétement logarithmique δ est donc

$$\text{Vent à } 0^\circ \quad \delta_{0^\circ} = \delta_{a0} + \delta_s = 0,49 + 0,05 = 0,54$$

$$\text{Vent à } 45^\circ \quad \delta_{45^\circ} = \delta_{a45} + \delta_s = 0,56 + 0,05 = 0,61$$

▪ Partie résonante R^2 : (cf. § 3.3.2)

$$R^2 = \frac{\pi^2}{2 \times \delta} \times R_N \times R_h \times R_b$$

$$\text{Vent à } 0^\circ \quad R^2 = \frac{\pi^2}{2 \times 0,54} \times 0,03 \times 0,06 \times 0,46 = 0,0075$$

$$\text{Vent à } 45^\circ \quad R^2 = \frac{\pi^2}{2 \times 0,61} \times 0,03 \times 0,06 \times 0,46 = 0,0067$$

▪ Facteur de pointe g : (cf. § 3.3.3)

$$g = \sqrt{2 \times \ln(600 \times v)} + \frac{0,6}{\sqrt{2 \times \ln(600 \times v)}} \geq 3$$

Où :

$$v \text{ en Hz est la fréquence moyenne donnée par : } v = n_{1,x} \times \sqrt{\frac{R^2}{Q^2+R^2}} \geq 0,08$$

Tableau.III-6- Facteur de pointe

	R^2	Q^2	$n_{1,x}$	v	g
Vent à 0°	0,00750	0,67000	3,28	0,345	3,45
Vent à 45°	0,00670	0,67000	3,28	0,326	3,43

Finalemment le coefficient dynamique C_d :

Tableau.III-7- Valeurs du coefficient C_d

Vent à 0°	Vent à 45°
$g = 3,45$	$g = 3,43$
$I_V(z_{eq}) = 0,17$	$I_V(z_{eq}) = 0,17$
$Q^2 = 0,67$	$Q^2 = 0,67$
$R^2 = 0,0075$	$R^2 = 0,0067$
$C_d = \frac{1 + 2 \times g \times I_V(z_{eq}) \times \sqrt{Q^2 + R^2}}{1 + 7 \times I_V(z_{eq})}$ $= 0,89$	$C_d = \frac{1 + 2 \times g \times I_V(z_{eq}) \times \sqrt{Q^2 + R^2}}{1 + 7 \times I_V(z_{eq})}$ $= 0,89$

Actions d'ensemble :

La force du vent sur un tronçon ou un élément de pièce est déterminée par :

$$F_w = C_d \times C_f \times q_p(z_j) \times A_{\text{réf}} \text{ en [N]} \quad (\text{cf. eq 2.9}).$$

Vent à 0° :

Tableau.III-8- Tableau récapitulatif des forces de vent à 0°

Tronçon	z_j (m)	A_{ref} (m)	C_f	C_d	$q_p(z_j)$ (N/m ²)	F_{wi} (N)
1	5	3,28	2,91	0,89	593,41	5043
2	10	2,81	2,89	0,89	821,97	5947
3	15	2,41	2,84	0,89	941,74	5742
4	20	2,41	2,59	0,89	1025,39	5706
5	25	1,69	2,76	0,89	1084,19	4508
6	30	1,59	2,82	0,89	1136,94	4533
F_w total au vent à 0°						31479

Vent à 45° :

Tableau.III-9- Tableau récapitulatif des forces de vent à 45°

Tronçon	z_j (m)	A_{ref} (m)	C_f	C_d	$q_p(z_j)$ (N/m ²)	F_{wi} (N)
1	5	3,28	3,32	0,89	593,41	5754
2	10	2,81	3,31	0,89	821,97	6805
3	15	2,41	3,28	0,89	941,74	6622
4	20	2,41	3,11	0,89	1025,39	6847
5	25	1,69	3,23	0,89	1084,19	5265
6	30	1,59	3,26	0,89	1136,94	5249
F_w total au vent à 45°						36542

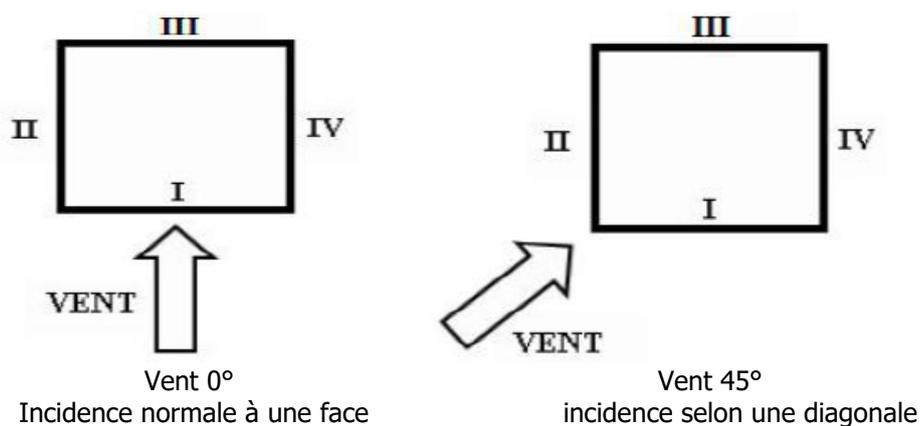


Figure.III-3- Incidence du vent suivant une face

III-2-2-3 Action du vent sur les antennes

L'effet du vent sur les antennes à installer sur le pylône est effectué séparément aux tronçons de la structure. Les surfaces au vent des accessoires (échelles et chemin de câbles) et équipements (antennes et paraboles), au sens normal 0° sont :

- surface au vent des antennes : 30 m^2 (distribuées arbitrairement à la partie supérieure du pylône)
- surface au vent des échelles, chemin de câbles vertical, câbles et Feeders : $0,5 \text{ m}^2/\text{ml}$

III-3 Hypothèses de calcul

Pour notre étude, la vérification des éléments du pylône est établie selon deux types d'états limites :

- Etat limite ultime (ELU),
- Etat limite de service (ELS).
 - **Etat Limite Ultime** : Le dépassement de cet état conduit à la ruine de la structure. Au-delà de l'état limite ultime, la résistance de l'acier est atteinte, la sécurité n'est plus garantie, et la structure risque de s'effondrer, on distingue :
 - État limite de résistance :
 - Etat limite de stabilité de forme : flambement.
 - **Etat Limite de Service** : Les Etats Limites de Service sont associés à des situations de la structure (ou de certaines de ses parties) rendant l'usage de la structure impossible dans le cadre des exigences définies lors de son projet exigences de fonctionnement, de confort pour les usagers ou d'aspect).

Les Etats Limites de Service comprennent :

- Les déformations affectant défavorablement l'exploitation de l'ouvrage ou provoquant des dommages aux finitions ou superstructures bardage, couverture, etc....) ;
- Les vibrations pouvant incommoder les occupants, endommager le bâtiment ou limiter son efficacité fonctionnelle.

Les tableaux suivants représentent les cas de charges et les combinaisons utilisées dans notre cas (ELU) :

Cas de charges

Tableau.III-10- Tableau des cas de charges

Cas	Nom du cas	Nature	Type d'analyse
1	Poids Propre	permanente	Statique linéaire
2	Poids Echelles	permanente	Statique linéaire
3	Poids Plate-formes	permanente	Statique linéaire
4	Poids Antennes	permanente	Statique linéaire
5	Modale		Modale
6	Vent 0° - Pylône	vent	Statique linéaire
7	Vent 45° - Pylône	vent	Statique linéaire
8	Vent 0° - Antennes	vent	Statique linéaire
9	Vent 45° - Antennes	vent	Statique linéaire
10	Vent 0° - Câbles	vent	Statique linéaire
11	Vent 45° - Câbles	vent	Statique linéaire
12	Sismique RPA 99 (2003) Dir. - masses_X	sismique	Sismique-RPA 99 (2003)
13	Sismique RPA 99 (2003) Dir. - masses_Y	sismique	Sismique-RPA 99 (2003)

Combinaisons des charges

Tableau.III-11- Tableau des combinaisons des charges

Combinaison	Nom	Type d'analyse	Définition
15 (C)	CP	Combinaison linéaire	$1*1.20+$ $(2+3+4)*1.00$
16 (C)	Vent 0° - ALL	Combinaison linéaire	$(6+8+10)*1.00$
17 (C)	Vent 45° - ALL	Combinaison linéaire	$(7+9+11)*1.00$
18 (C)	1.35 CP + 1.6 Vent 0° - ALL	Combinaison linéaire	$16*1.60+15*1.35$
19 (C)	1.35 CP + 1.6 Vent 45° - ALL	Combinaison linéaire	$17*1.60+15*1.35$

Désignation des cas de charges :

CP : ensemble des charges permanentes (poids propre, poids échelle, poids plateforme et poids antennes).

Vent 0° : Charges dues au vent à incidence normale.

Vent 45° : Charges dues au vent suivant la diagonale.

Vent 0° - ALL : signifie Vent 0° (pylône + antennes + câbles).

Vent 45° - ALL : signifie Vent45° (pylône + antennes + câbles).

III-4 Charges sismiques

Plusieurs études spécialisées ayant comparé la réponse sismique à la réponse du vent des pylônes auto stables, ont conclu que la marge de résistance aux séismes est supérieure à celle de résistance au vent. A cet effet, le dimensionnement est fait en prenant en compte le vent comme cas de charge le plus défavorable et on considère que l'étude sismique n'est plus nécessaire pour ce cas de figure.

III-4-1 Analyse modale

L'analyse modale est l'opération, réalisée à l'aide du logiciel ROBOT SA, qui consiste à rechercher les caractéristiques des modes propres de la structure, fréquences propres et périodes propres. On se limite aux 10 premiers modes d'oscillation. Le résultat est donné dans le tableau suivant :

Tableau.III-12- Caractéristiques des modes propres

Cas	Mode	Fréquence [Hz]	Période [sec]
5	1	3,28	0,30
5	2	4,36	0,23
5	3	4,62	0,22
5	4	4,62	0,22
5	5	6,87	0,15
5	6	8,42	0,12
5	7	12,12	0,08
5	8	12,12	0,08
5	9	12,13	0,08
5	10	13,09	0,08

III-5 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à l'évaluation des différentes actions horizontales et verticales imposées au pylône dans sa totalité. L'étape suivante sera l'étude de la superstructure, dans laquelle on cherche à faire sortir les effets des actions sur la structure. Cette étude sera réalisée à l'aide du logiciel Robot Structural Analysis.

Chapitre IV

Modélisation du pylône en treillis à l'aide de Robot SA

IV-1 Introduction

Les pylônes en treillis font partie des structures discrètes qui sont composées d'éléments barres assemblées par boulonnage en des points appelés nœuds, et soumises à des forces extérieures qui sont : la pression due au vent, le poids propre du pylône et des antennes. Sous l'effet de ces forces, le pylône peut se déformer et des contraintes internes dans chaque élément sont engendrées. Ces dernières sont entièrement définies par les caractéristiques géométriques de la section courante (aire, module d'Young... etc.) et la géométrie de la fibre moyenne. Les efforts appliqués à chaque barre sont schématisés comme charges ponctuelles.

IV-2 Méthode de dimensionnement des pylônes

Les logiciels de calcul commercialisés actuellement reposent sur la méthode des éléments finis (MEF). Leurs domaines d'application sont variés : calcul des structures, calculs thermiques, électromagnétiques, écoulements des fluides. Concernant les calculs relatifs aux structures, il est possible de traiter la majorité des cas rencontrés dans la pratique :

- Matériaux isotropes ou anisotropes ;
- Comportements élastiques, élasto-plastique et plastique ;
- Calculs des champs thermiques, stationnaires ou non, couplage thermo élastique ;
- Structures homogènes ou composites sous chargement statique ;
- Comportement non linéaire comme le flambement ;
- Analyse dynamique : fréquences, modes, vibrations forcées sous diverses excitations, vibrations transitoires.

Il est possible de considérer plusieurs types d'élément fini dans les calculs :

- Élément barre,
- Élément poutre,
- Élément plaque,

Dans notre cas, c'est l'élément barre qui nous concerne parce que toutes les barres de la structure travaillent soit en traction soit en compression.

IV -3 Modélisation par la MEF

La méthode des éléments finis (M.E.F.) est un outil efficace pour l'analyse des structures dans de nombreux secteurs de l'industrie : aérospatiale, automobile, nucléaire, génie civil, construction navale, mécanique,etc.

IV-3-1 Elément fini barre

Une barre est un élément de structure dont les dimensions transversales sont petites par rapport aux dimensions longitudinales et ne travaille qu'en traction-compression le long de son axe, car les efforts sont normaux, ce qui le différencie de l'élément poutre. La section, généralement, peut évoluer lentement en forme et en taille le long de l'élément. Les barres sont utilisées pour la modélisation des structures articulées (treillis) car elles ne contiennent ni moments ni efforts tranchants, elles présentent des liaisons rotules à leurs extrémités. Par définition une barre est un élément linéique dont la raideur selon l'axe longitudinal est telle que :

$$k = \frac{ES}{L} \quad \text{avec : } E : \text{ module de Young, } S : \text{ la section de la barre, et } L : \text{ La longueur.}$$

Dans une barre, La contrainte est uni axiale dans le repère local de l'élément, elle est reliée à la déformation par le module de Young $\sigma = E\varepsilon$.

Elément barre :

Une barre est définie par deux nœuds, chacun d'entre eux possédant trois degrés de liberté en translation dans l'espace, notés u, v, et w

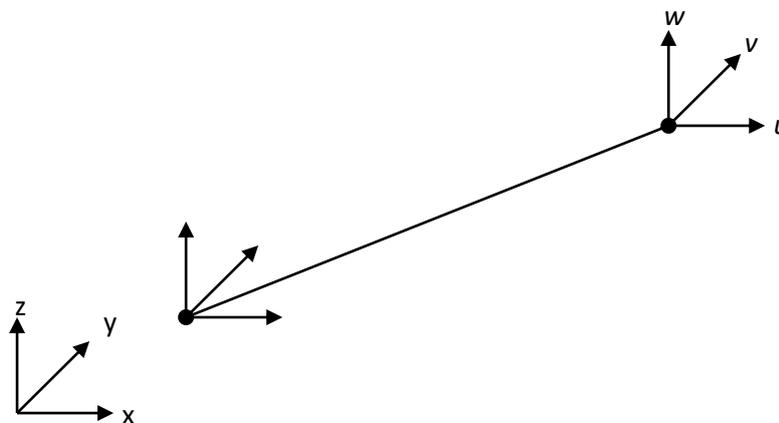


Figure.IV-1- Elément fini de barre

Soit la structure ci-dessous, articulée aux points A, B et C

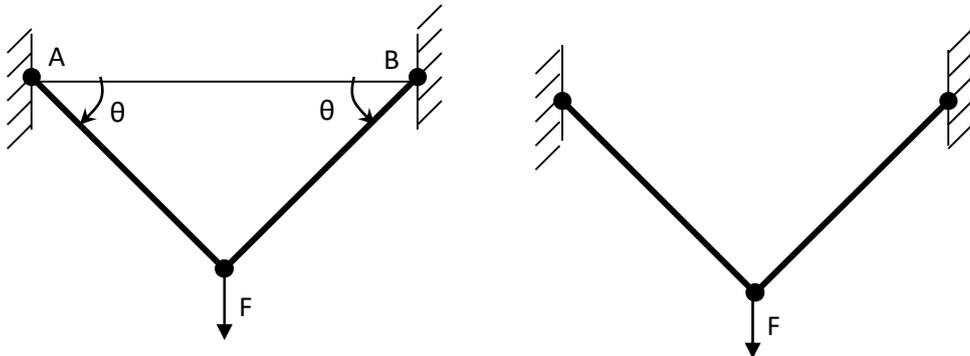


Figure.IV-2- structure et modèle

La solution analytique est obtenue avec le modèle réalisé qui comporte trois nœuds et deux barres. Les nœuds n'ont pas de degré de liberté de rotation, donc ne tournent pas. La différence d'angle entre les positions avant et après la mise en charge est uniquement due à des différences de translation aux extrémités de l'élément. Si l'angle θ est nul, le programme applique la charge sur un degré de liberté non alimenté en raideur : il est alors fixé par le programme et la charge est ignorée. La structure n'a alors aucun déplacement.

Il ne faut pas raffiner le maillage car ce fait, on introduit une succession de rotules entre les éléments : le programme détecte et bloque des pivots nuls, dénaturant ainsi le problème et la solution.

Il suffit pour s'en convaincre de faire le calcul suivant :

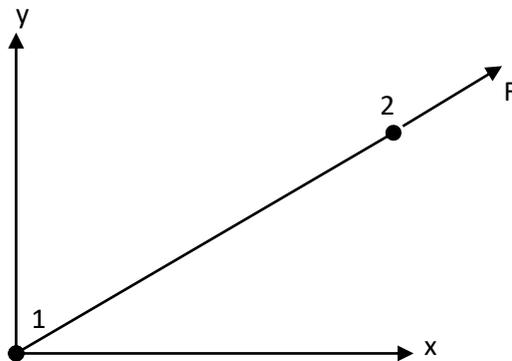


Figure.IV-3- modèle A de la structure

La raideur axiale de la barre est donnée par la relation $k = \frac{ES}{L}$, soumise à une traction axiale d'intensité F , la barre s'allonge et le déplacement du nœud chargé est, dans les directions x et y ,

$$\frac{FL}{ES} \cos \theta \quad \text{et} \quad \frac{FL}{ES} \sin \theta$$

On retrouve ce résultat avec le modèle A qui ne comporte qu'un seul élément de barre. En modélisant le problème comme en B, on introduit des rotules sur les nœuds 2, 3 et 4. Le programme bloque les translations en y de ces nœuds : la structure déformée est non parallèle à la structure initiale, les nœuds n'ayant eu de déplacement que selon x ,

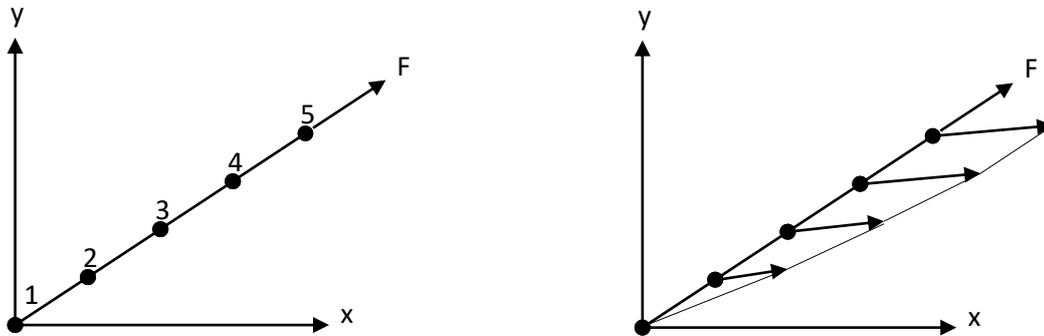


Figure.IV-4- modèle B de la structure déformée

Simplement l'effort normal divisé par la section de la barre $\sigma = \frac{N}{S}$

La réaction nodale R sur les degrés de liberté fixés permet de calculer directement la contrainte aux encastremets, ce qui n'est pas le cas pour les membranes ou d'autres types d'éléments. En effet, l'approche élément fini et le passage du déplacement continu dans l'élément au déplacement discret aux nœuds n'est réalisé que le long de l'axe de la barre. La section n'est pas discrétisée, l'information nodale qui est récupérée aux extrémités de l'élément n'a donc pas besoin d'être réinterprété.

IV-4 Organigramme de résolution par la MEF

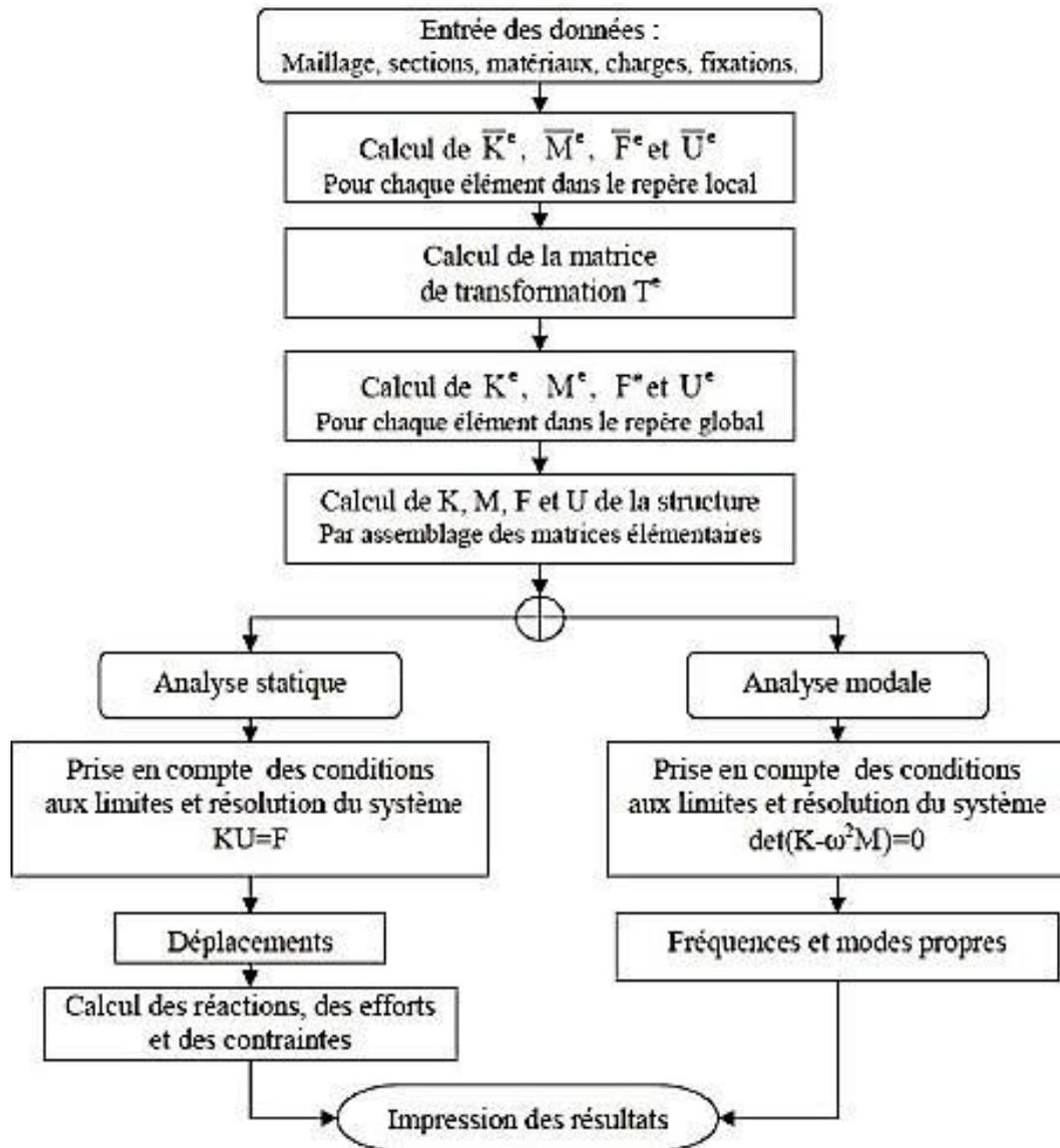


Figure.IV-5- Organigramme

IV-5 Présentation du logiciel ROBOT SA

Le système Robot est un logiciel CAO/DAO destiné à modéliser, analyser et dimensionner les différents types de structures. Robot permet de créer les structures, les calculer, vérifier les résultats obtenus, dimensionner les éléments spécifiques de la structure ; la dernière étape gérée par Robot est la création de la documentation pour la structure calculée et dimensionnée.

IV-5-1 Les principales caractéristiques du logiciel Robot

- Définition de la structure réalisée en mode entièrement graphique dans l'éditeur conçu à cet effet (vous pouvez aussi ouvrir un fichier au format DXF et importer la géométrie d'une structure définie dans un autre logiciel CAO/DAO).
- Possibilité de présentation graphique de la structure étudiée et de représenter à l'écran les différents types de résultats de calcul (efforts, déplacements, travail simultané en plusieurs fenêtres ouvertes etc.),
- Possibilité de calculer (dimensionner) une structure et d'en étudier simultanément une autre (architecture multithread) ;
- Possibilité d'effectuer l'analyse statique et dynamique de la structure,
- Possibilité d'affecter le type de barres lors de la définition du modèle de la structure et non pas seulement dans les modules métier.
- Possibilité de composer librement les impressions (notes de calcul, captures d'écran, composition de l'impression, copie des objets vers les autres logiciels).

Le système Robot regroupe plusieurs parties (modules) spécialisées dans chacun des étapes de l'étude de la structure (création du modèle de structure, calculs de la structure, dimensionnement). Les modules fonctionnent dans le même environnement.

IV-5-2 Présentation du logiciel et de son environnement

Il regroupe plusieurs modules parmi lesquels nous pouvons citer :

- L'étude d'une coque,
- L'étude d'un treillis spatial,
- L'étude d'un portique spatial etc...

Ce logiciel intègre la méthode de calcul aux ETATS LIMITES et prend en compte les coefficients de sécurités réglementaires selon plusieurs facteurs d'insécurité à l'égard :

- D'une part de l'état limite ultime (ELU) correspondant à la ruine d'un des éléments de l'ouvrage.
- D'autre part de l'état limite de service (ELS) correspondant à l'état limite de fissuration et de déformation.

Les figures suivantes montrent l'environnement AUTODESK ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS Professionnel.

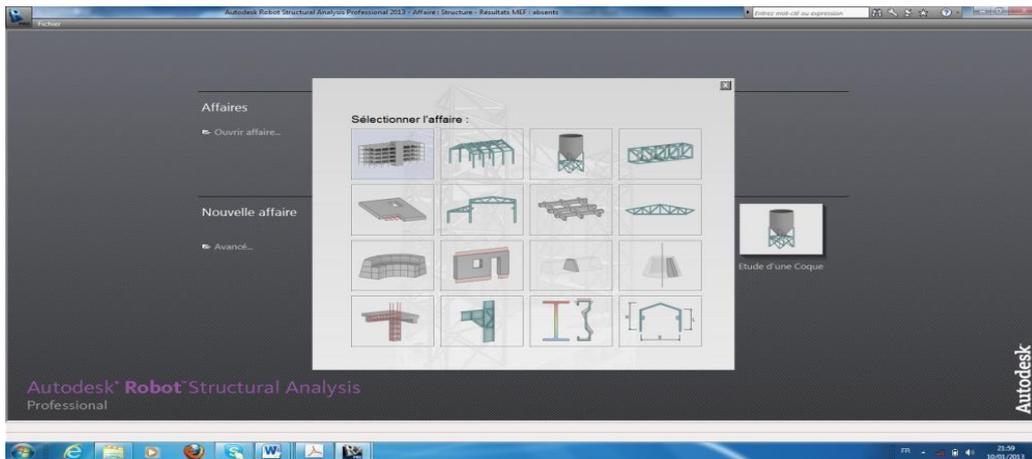


Figure.IV-6- Environnement ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS Professionnel.

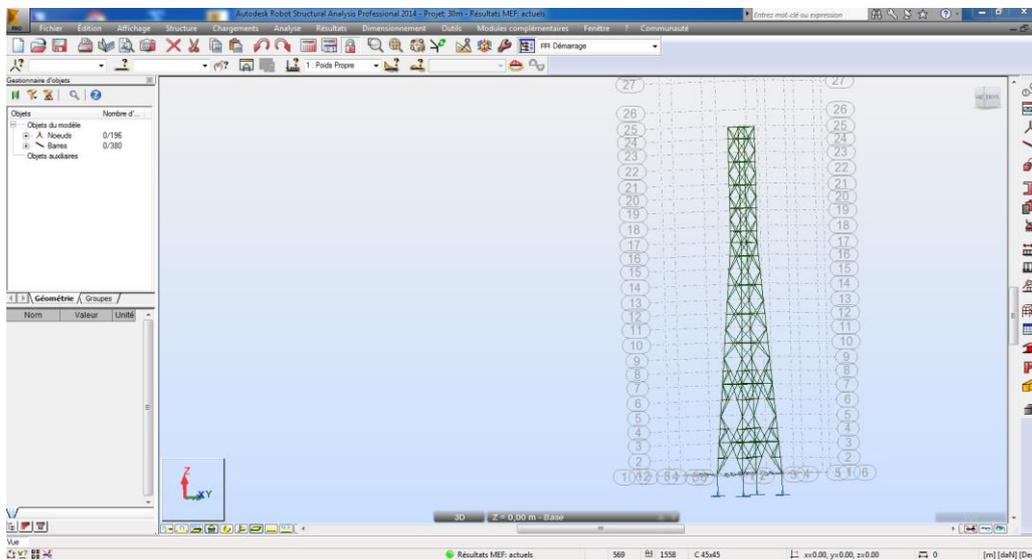


Figure.IV-7- Vu en 3D du pylône modélisé.

IV-6 Etapes de la modélisation sur Robot

- La définition des lignes de construction.
- La sélection des normes.
- La définition des barres de la structure.
- La définition des appuis.

Après avoir terminé la modélisation nous sommes passés à la définition des différentes charges calculées.

- La définition des cas de charges.
- La définition des charges pour les cas de charges définis.
- La définition des charges du vent sur le pylône.

IV-7 Analyse statique et résultats

- Après avoir effectué la modélisation du pylône, on lui demande de procéder aux calculs.
- Les résultats obtenus par le logiciel Robot donnent les efforts et les contraintes qui sont exprimées dans le repère local, et les déplacements dans le repère global.
- Tableau des caractéristiques des profilés :

	Nom de la section▲	Liste des barres	AX [cm2]	AY [cm2]	AZ [cm2]	IX [cm4]	IY [cm4]	IZ [cm4]
	CAEP 45x4.5	542A1549 1554A1557	3,894	0,0	0,0	0,260	11,320	2,958
	CAEP 50x5	0A1541 1550A1553	4,803	0,0	0,0	0,396	17,382	4,547
	CAEP 60x6	310A1341 1350A1353	6,909	0,0	0,0	0,821	36,144	9,441
	CAEP 70x7	110A1125 1501A1504	9,397	0,0	0,0	1,521	67,091	17,505
	CAEP 80x8	1401A1404	12,267	0,0	0,0	2,594	114,614	29,880
	CAEP 100x10	1301A1304	19,154	0,0	0,0	6,333	280,348	73,005
	CAEP 110x10	1201A1204	21,180	0,0	0,0	7,000	377,710	98,250
	CAEP 120x12	1101A1104	27,541	0,0	0,0	13,130	583,713	151,620
	CAEP 150x15	1001A1004	43,025	0,0	0,0	32,060	1425,870	370,238

Tableau du matériau des barres :

	Matériau	E [daN/mm2]	G [daN/mm2]	N U	LX [1/°C]	RO [daN/m3]	Re [daN/mm2]
1	ACIER E28	21000,00	8080,00	30	0,00	7701,00	27,50

Définition des cas de charges :

	Cas	Préfixe	Nom du cas	Nature	Type d'analyse
	1	PERM1	Poids Propre	permanente	Statique linéaire
	2	PERM2	Poids Echelles	permanente	Statique linéaire
	3	PERM3	Poids Plate-formes	permanente	Statique linéaire
	4	PERM4	Poids Antennes	permanente	Statique linéaire
	5	MOD5	Modale		Modale
	6	VPERPI	Vent perpendiculaire paroi I	vent	Statique linéaire
	7	VBPI_II	Vent bissectrice paroi I et II	vent	Statique linéaire
	8	VENT3	Vent 0° - Antennes	vent	Statique linéaire
	9	VENT4	Vent 45° - Antennes	vent	Statique linéaire
	10	VENT5	Vent 0° - Câbles	vent	Statique linéaire
	11	VENT6	Vent 45° - Câbles	vent	Statique linéaire
	12		CP		Combinaison linéaire
	13		Vent 0° - ALL		Combinaison linéaire
	14		Vent 45° - ALL		Combinaison linéaire
	15		1.33 CP + 1.75 Vent 0° - ALL		Combinaison linéaire
	16		1.33 CP + 1.75 Vent 45° - ALL		Combinaison linéaire
	17	SIS17	Sismique RPA 99 (2003)	sismique	Sismique-RPA 99 (2

Tableau des combinaisons des charges

Combinaison	Nom	Type d'analyse	Type de la	Nature du cas	Définition
12 (C)	CP	naison linéaire	EFF		$1*1.20+(2+3+4)*1.00$
13 (C)	Vent 0° - ALL	naison linéaire	EFF		$(6+8+10)*1.00$
14 (C)	Vent 45° - ALL	naison linéaire	EFF		$(7+9+11)*1.00$
15 (C)	5 Vent 0° - ALL	naison linéaire	EFF		$12*1.33+13*1.75$
16 (C)	Vent 45° - ALL	naison linéaire	EFF		$12*1.33+14*1.75$

Les valeurs des réactions au niveau des appuis 1,2 3 et 4 et selon les différents cas de charges :

Noeud/Cas/Mode	FX [daN]	FY [daN]	FZ [daN]	MX [daNm]	MY [daNm]	MZ [daNm]
1/1/	82,17	82,19	1158,9	0	0	-0,18
1/2/	11,64	11,64	210,5	0	0	0
1/3/	9,01	9,01	200	0	0	0
1/4/	21,1	21,1	366	0	0	0
1/6/	-675,66	-260,89	-4656,65	0	0	0,8
1/7/	-388,19	404,59	17,61	0	0	0,09
1/8/	-553,27	-296,18	-5440,05	0	0	0
1/9/	-245,89	245,67	0	0	0	0,01
1/10/	-263,2	-108,76	-1958,26	0	0	0
1/11/	-108,02	107,93	0	0	0	0
1/12 (C)/	140,35	140,38	2167,18	0	0	-0,22
1/13 (C)/	-1492,12	-665,83	-12054,97	0	0	0,81
1/14 (C)/	-742,1	758,19	17,61	0	0	0,1
1/15 (C)/	-2424,54	-978,5	-18213,85	0	0	1,12
1/16 (C)/	-1112,01	1513,53	2913,16	0	0	-0,12
1/17/CQC	80,03	140,49	1506,07	0	0	0
2/1/	-82,17	82,16	1158,87	0	0	-0,18

2/2/	-11,64	11,64	210,5	0	0	0
2/3/	-9,01	9,01	200	0	0	0
2/4/	-21,1	21,1	366	0	0	0
2/6/	-673,71	262,22	4656,65	0	0	-0,7
2/7/	-892,36	892,71	9010,59	0	0	-0,01
2/8/	-552,87	296,18	5440,05	0	0	0
2/9/	-708,63	708,85	8374,41	0	0	-0,01
2/10/	-263,05	108,76	1958,26	0	0	0
2/11/	-260,06	260,14	2739,33	0	0	0
2/12 (C)/	-140,35	140,34	2167,14	0	0	-0,21
2/13 (C)/	-1489,63	667,16	12054,97	0	0	-0,7
2/14 (C)/	-1861,04	1861,71	20124,34	0	0	-0,02
2/15 (C)/	-2793,52	1354,18	23978,5	0	0	-1,51
2/16 (C)/	-3443,49	3444,63	38099,89	0	0	-0,33
2/17/CQC	84,23	143,34	1546,08	0	0	0
3/1/	-82,16	-82,16	1158,86	0	0	0,18
3/2/	-11,64	-11,64	210,5	0	0	0
3/3/	-9,01	-9,01	200	0	0	0
3/4/	-21,1	-21,1	366	0	0	0
3/6/	-675,1	-261,41	4658,08	0	0	0,7
3/7/	-405	388,41	17,61	0	0	-0,07
3/8/	-553,27	-296,18	5440,05	0	0	0
3/9/	-245,88	245,67	0	0	0	0
3/10/	-263,2	-108,76	1958,26	0	0	0
3/11/	-108,02	107,93	0	0	0	0
3/12 (C)/	-140,34	-140,34	2167,12	0	0	0,21

3/13 (C)/	-1491,56	-666,35	12056,4	0	0	0,7
3/14 (C)/	-758,89	742	17,61	0	0	-0,06
3/15 (C)/	-2796,89	-1352,77	23980,97	0	0	1,51
3/16 (C)/	-1514,71	1111,86	2913,09	0	0	0,17
3/17/CQC	80,04	140,52	1506,08	0	0	0,01
4/1/	82,16	-82,19	1158,89	0	0	0,18
4/2/	11,64	-11,64	210,5	0	0	0
4/3/	9,01	-9,01	200	0	0	0
4/4/	21,1	-21,1	366	0	0	0
4/6/	-673,95	260,08	-4658,08	0	0	-0,8
4/7/	-909,64	909,48	-9045,81	0	0	-0,01
4/8/	-552,87	296,18	-5440,05	0	0	0
4/9/	-708,64	708,85	-8374,41	0	0	-0,01
4/10/	-263,05	108,76	-1958,26	0	0	0
4/11/	-260,06	260,14	-2739,33	0	0	0
4/12 (C)/	140,34	-140,38	2167,17	0	0	0,22
4/13 (C)/	-1489,87	665,02	-12056,4	0	0	-0,81
4/14 (C)/	-1878,34	1878,47	-20159,55	0	0	-0,02
4/15 (C)/	-2420,61	977,09	-18216,36	0	0	-1,12
4/16 (C)/	-3100,43	3100,62	-32396,88	0	0	0,25
4/17/CQC	84,22	143,39	1546,07	0	0	0
Cas	1 - Poids Propre					
Mode						
Somme totale	0	0	4635,52	0	0	0
Somme réactions	0	0	4635,52	23177,54	-23177,45	0

Somme efforts	0	0	-4635,52	-	23177,54	23177,45	0
Vérification	0	0	0	0	0	0	0
Précision	5,00E-12	1,44E-20					
Cas	2 - Poids Echelles						
Mode							
Somme totale	0	0	841,99	0	0	0	0
Somme réactions	0	0	841,99	4209,97	-4209,97	0	0
Somme efforts	0	0	-841,99	-4209,97	4209,97	0	0
Vérification	0	0	0	0	0	0	0
Précision	7,70E-12	4,12E-20					
Cas	3 - Poids Plate-formes						
Mode							
Somme totale	0	0	800	0	0	0	0
Somme réactions	0	0	800	4000	-4000	0	0
Somme efforts	0	0	-800	-4000	4000	0	0
Vérification	0	0	0	0	0	0	0
Précision	2,16E-11	1,95E-19					
Cas	4 - Poids Antennes						
Mode							
Somme totale	0	0	1464	0	0	0	0
Somme réactions	0	0	1464	7320	-7320	0	0

Somme efforts	0	0	-1464	-7320	7320	0
Vérification	0	0	0	0	0	0
Précision	1,82E-11	4,39E-20				
Cas	6 - Vent perpendiculaire paroi I					
Mode						
Somme totale	-2698,41	0	0	0	0	0
Somme réactions	-2698,41	0	0	0	-37517,67	13494,65
Somme efforts	2698,41	0	0	0	37517,67	-13494,65
Vérification	0	0	0	0	0	0
Précision	1,35E-11	1,05E-19				
Cas	7 - Vent bissectrice paroi I et II					
Mode						
Somme totale	-2595,19	2595,19	0	0	0	-0,01
Somme réactions	-2595,19	2595,19	0	-	36363,58	-36363,58
Somme efforts	2595,19	-2595,19	0	36363,58	36363,58	-25954,12
Vérification	0	0	0	0	0	0
Précision	1,04E-11	2,44E-21				
Cas	8 - Vent 0° - Antennes					
Mode						
Somme totale	-2212,28	0	0	0	0	0

Somme réactions	-2212,28	0	0	0	-43822,66	11061,4	
Somme efforts	2212,28	0	0	0	43822,66	-11061,4	
Vérification	0	0	0	0	0	0	
Précision	3,75E-10	1,99E-19					
Cas	9 - Vent 45° - Antennes						
Mode							
Somme totale	-1909,04	1909,04	0	0	0	-0,01	
Somme réactions	-1909,04	1909,04	0	-	33730,28	-33730,28	19090,4
Somme efforts	1909,04	-1909,04	0	33730,28	33730,28	-19090,4	
Vérification	0	0	0	0	0	0	
Précision	1,26E-10	3,46E-21					
Cas	10 - Vent 0° - Câbles						
Mode							
Somme totale	-1052,49	0	0	0	0	0	
Somme réactions	-1052,49	0	0	0	-15774,91	5262,46	
Somme efforts	1052,49	0	0	0	15774,91	-5262,46	
Vérification	0	0	0	0	0	0	
Précision	1,27E-11	1,43E-19					
Cas	11 - Vent 45° - Câbles						
Mode							
Somme totale	-736,14	736,14	0	0	0	0	

Somme réactions	-736,14	736,14	0	-	11033,42	-11033,42	7361,43
Somme efforts	736,14	-736,14	0	11033,42	11033,42	-7361,43	
Vérification	0	0	0	0	0	0	
Précision	7,67E-12	2,43E-21					
Cas	12 - CP						
Mode							
Somme totale	0	0	8668,61	0	0	0	
Somme réactions	0	0	8668,61	43343,01	-43342,91	0	
Somme efforts	0	0	-8668,61	-	43343,01	43342,91	0
Vérification	0	0	0	0	0	0	
Précision	5,34E-11	2,98E-19					
Cas	13 - Vent 0° - ALL						
Mode							
Somme totale	-5963,18	0	0	0	0	0	
Somme réactions	-5963,18	0	0	0	-97115,24	29818,5	
Somme efforts	5963,18	0	0	0	97115,24	-29818,5	
Vérification	0	0	0	0	0	0	
Précision	4,01E-10	4,47E-19					
Cas	14 - Vent 45° - ALL						
Mode							

Somme totale	-5240,37	5240,37	0	0	0	-0,02
Somme réactions	-5240,37	5240,37	0	81127,28	-81127,28	52405,95
Somme efforts	5240,37	-5240,37	0	81127,28	81127,28	-52405,95
Vérification	0	0	0	0	0	0
Précision	1,44E-10	8,33E-21				
Cas	15 - 1.33 CP + 1.75 Vent 0° - ALL					
Mode						
Somme totale	-10435,57	0	11529,26	0	0	0
Somme réactions	-10435,57	0	11529,26	57646,21	-	52182,38
Somme efforts	10435,57	0	-11529,26	57646,21	227597,74	-52182,38
Vérification	0	0	0	0	0	0
Précision	7,73E-10	1,18E-18				
Cas	16 - 1.33 CP + 1.75 Vent 45° - ALL					
Mode						
Somme totale	-9170,64	9170,64	11529,26	0	0	-0,03
Somme réactions	-9170,64	9170,64	11529,26	84326,54	-	91710,41
Somme efforts	9170,64	-9170,64	-11529,26	84326,54	199618,82	-91710,41
Vérification	0	0	0	0	0	0
Précision	3,23E-10	4,10E-19				

Cas	17 - Sismique RPA 99 (2003)					
Mode CQC						
Somme totale	328,52	567,73	6104,29	0	0	0,02
Somme réactions	40,53	567,33	0	12288,69	375,38	2890,92
Somme efforts	40,53	567,3	0	12288,57	375,46	2890,98
Vérification	81,06	1134,63	0	24577,26	750,84	5781,9
Précision	4,54E-02	2,89E+00				

Les valeurs max des efforts :

	FX [daN]	FY [daN]	FZ [daN]	MX [daNm]	MY [daNm]	MZ [daNm]
MAX	140,35	3444,63	38099,89	0,00	0,00	1,51
Noeud	1	2	2	1	1	3
Cas	12 (C)	16 (C)	16 (C)	16 (C)	15 (C)	15 (C)
Mode						
MIN	-3443,49	-1352,77	-32396,88	-0,00	-0,00	-1,51
Noeud	2	3	4	4	4	2
Cas	16 (C)	15 (C)	16 (C)	15 (C)	6	15 (C)
Mode						

Les déplacements max :

	UX [cm]	UY [cm]	UZ [cm]	RX [Rad]	RY [Rad]	RZ [Rad]
MAX	7,3448	1,9757	0,4758	0,008	0,008	0,003
Noeud	122	122	130	3	2	10
Cas	15 (C)	17	16 (C)	15 (C)	15 (C)	15 (C)
Mode		CQC				
MIN	-0,4663	-5,9905	-0,6275	-0,008	-0,005	-0,003
Noeud	81	122	121	2	1	12
Cas	15 (C)	16 (C)	16 (C)	15 (C)	15 (C)	15 (C)
Mode						

On remarque que le déplacement max de la structure au sommet est de 7,34 cm se trouve au nœud 122 qui est le point le plus haut de la structure.

Les efforts max dans les barres :

	FX [daN]	FY [daN]	FZ [daN]	MX [daNm]	MY [daNm]	MZ [daNm]
MAX	34593,26	132,78	106,36	1,78	51,43	32,10
Barre	1001	1001	1002	1004	1201	1202
Noeud	2	87	1	3	141	142
Cas	16 (C)	16 (C)	16 (C)	15 (C)	16 (C)	16 (C)
Mode						
MIN	-29368,79	-102,37	-101,47	-1,78	-53,14	-48,62
Barre	1003	1003	1004	1001	1301	1204
Noeud	85	85	3	2	141	144
Cas	16 (C)	16 (C)	16 (C)	15 (C)	15 (C)	16 (C)
Mode						

Vérification des contraintes :

Les contraintes maximales dans la structure sont relatives à la combinaison la plus critique de l'état limite ultime qui est la combinaison 16 : 1.33 CP + 1.75 vent 45°-ALL, les résultats de ces contraintes sont regroupés dans le tableau suivant :

	S max [daN/mm ²]	S min [daN/mm ²]	S max(My) [daN/mm ²]	S max(Mz) [daN/mm ²]	S min(My) [daN/mm ²]	S min(Mz) [daN/mm ²]	Fx/Ax [daN/mm ²]
MAX	10,5629	10,4705	1,8166	2,1558	0,0000	0,5123	10,4705
Barre	1204	1204	1425	1076	1101	1465	1204
Noeud	144	91	182	104	87	163	91
Cas	16 (C)	16 (C)	16 (C)	15 (C)	16 (C)	15 (C)	16 (C)
Mode							
MIN	-8,8798	-8,8798	-0,0000	-0,4865	-1,8166	-2,1427	-8,8798
Barre	1202	1202	1001	1303	1425	1204	1202
Noeud	89	89	2	143	182	144	89
Cas	16 (C)	16 (C)	14 (C)	15 (C)	16 (C)	16 (C)	16 (C)
Mode							

On remarque d'après le tableau que la valeur max de la contrainte normale qui est de 105,6 MPa se trouve au niveau de la barre 1204, et pour la barre 1202 qui a une contrainte de 88,79 MPa se trouve inférieure à 235 MPa, alors le critère de résistance est vérifié.

IV-8 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la présentation du logiciel de modélisation et de dimensionnement des pylônes qui est Robot structural analysis, ainsi que la présentation de certains résultats obtenus de l'étude statique du pylône.

On remarque que les contraintes max engendrées par les efforts imposés au pylône sont largement vérifiées.

Cette vérification montre que le pylône est stable.

Conclusion générale

Au terme de ce travail, nous pouvons dire que cette étude nous a été bénéfique et nous a permis d'acquérir de nouvelles connaissances concernant la modélisation et le dimensionnement des pylônes sur le logiciel Robot S.A, et d'élargir nos connaissances aux concepts de construction métallique notamment les pylônes de télécommunication et de voir les difficultés rencontrées par les ingénieurs concepteurs de tels projets.

Lors de cette étude, nous avons abordé la conception de la structure du pylône, et le choix des matériaux, évalué les actions du vent appliquées sur le pylône, et effectué le calcul des efforts et des contraintes dans les barres, ce qui permettra le dimensionnement convenable du pylône, et la vérification dynamique selon R.P.A.99/V 2003.

En effet, un projet de dimensionnement doit être structuré, et doit contenir certaines étapes importantes à savoir : les assemblages, l'étude de la fondation ou même l'exécution et l'entretien. Par manque de temps et d'outils de calcul, nous nous sommes limités aux calculs des efforts internes nécessaires pour dimensionner notre ouvrage.

En définitive, nous affirmons que ce projet nous a permis de mettre en pratique nos connaissances théoriques en construction métallique, d'utiliser les normes en vigueur et de toucher au plus près les problèmes liés au dimensionnement d'un pylône de grande hauteur. Egalement, ce travail a montré que le domaine étudié est très vaste, des problèmes non résolus ou partiellement résolus ont été rencontrés. Comme perspectives, nous suggérons, pour les travaux futurs, la prise en compte d'un certain nombre de points dont :

- Analyse détaillée du pylône.
- Etude comparative avec un pylône portique et pylône articulé et haubané.
- Analyse des pylônes sous une charge de choc.

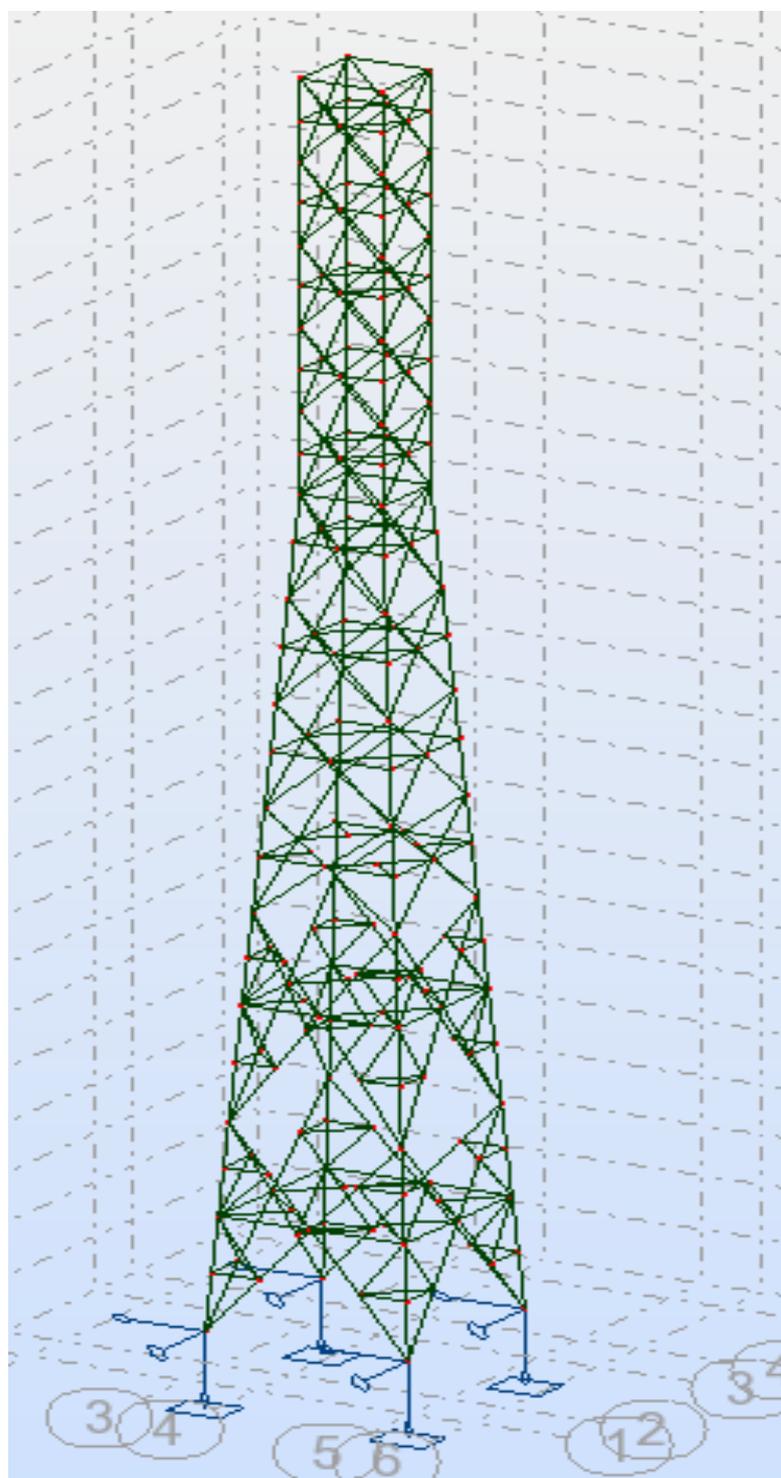
Bibliographie

- [1] EN 1990/A1, Eurocode 0 : Bases de calcul des structures - Partie 1-1 : Actions générales - Poids Volumiques, Poids propres, Charges d'exploitation des bâtiments, avril 2002.
- [2] NF EN 1993-1-1, Eurocode 3 : Calcul des structures en acier - Partie 1-1 : Règles générales et règles pour les bâtiments, octobre 2005.
- [3] NF EN 1993-1-8, Eurocode 3 : Calcul des structures en acier - Partie 1-8 : Calcul des assemblages, Décembre 2005.
- [4] NF EN 1993-3-1, Eurocode 3 : Calcul des structures en acier - Partie 3-1 : Tours, mâts et cheminées – Pylône et mâts haubanés, mars 2007.
- [5] NF EN 1993-3-2, Eurocode 3 : Calcul des structures en acier - Partie 3-1 : Tours, mâts et cheminées – Cheminées, avril 2007.
- [6] Règles CM66.
- [7] D.T.R. C 2-4.7 Règlement Neige et vent, version 2013, CNERIB, Alger.
- [8] RPA 99 /2003.
- [9] Jean MOREL, Calcul des structures métalliques selon l’Eurocode 3, Eyrolles, 2005.
- [10] RATSIMBAZAFY Herinjaka Haga, Contribution à l’étude d’un pylône auto stable à trois pieds de 50 m de hauteur A 67HA Sud et création d’outil de calcul de pylône par la méthode des éléments finis sur Matlab R2013a, mémoire de Master, ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE D'ANTANANARIVO, 2015.
- [11] HADI Samia et MEZHOUD Naïma, Analyse de la stabilité des pylônes à treillis, mémoire de master en GENIE CIVIL, université BADJI MOKHTAR, ANNABA, 2016.
- [12] [Zienkiwicz O.C., La méthode des éléments finis, Editions Mc Graw Hill, 1979.
- [13] Krishna moorthy, Méthode des Eléments Finis (MEF), 1987.
- [14] https://fr.wikipedia.org/wiki/Pylone_télécommunication

Annexes

Annexes

Vue de la structure



Note de calcul

ROBOT 2014

Date : 13/07/22

Propriétés du projet : **30m**

Nom du fichier : **30m.vent suivant NV65.rtd**

Emplacement : D :

Créé : 03/07/22 19:14

Modifié : 08/07/22 18:58

Taille : 50413568

Auteur :

Bureau :

Adresse :

Type de structure : Portique spatial

Coordonnées du centre de gravité de la structure :

X = 5.000 (m)

Y = 5.000 (m)

Z = 11.845 (m)

Moments d'inertie centraux de la structure :

I_x = 336477.958 (kg*m²)

I_y = 336292.376 (kg*m²)

I_z = 15844.508 (kg*m²)

Masse = 4726.912 (kg)

Description de la structure

Nombre de nœuds : 568

Nombre de barres : 380
Eléments finis linéiques : 548
Eléments finis surfaciques : 0
Eléments finis volumiques : 0
Nbre de degrés de liberté stat. 3392
Cas : 17
Combinaisons : 5

Liste de cas de charges/types de calculs

Cas 1 : Poids Propre

Type d'analyse : Statique linéaire

Cas 2 : Poids Echelles

Type d'analyse : Statique linéaire

Cas 3 : Poids Plate-formes

Type d'analyse : Statique linéaire

Cas 4 : Poids Antennes

Type d'analyse : Statique linéaire

Cas 5 : Modale

Type d'analyse : Modale

Données :

Mode d'analyse : Modal
Type de matrices de masses : Concentrée sans rotations
Nombre de modes : 10
Limites : 0.000
Coefficient des masses participantes : 0.000

Cas 6 : Vent perpendiculaire paroi I

Type d'analyse : Statique linéaire

Cas 7 : Vent bissectrice paroi I et II

Type d'analyse : Statique linéaire

Cas 8 : Vent 0° - Antennes

Type d'analyse : Statique linéaire

Cas 9 : Vent 45° - Antennes

Type d'analyse : Statique linéaire

Cas 10: Vent 0° - Câbles

Type d'analyse : Statique linéaire

Cas 11: Vent 45° - Câbles

Type d'analyse : Statique linéaire

Cas 12: CP

Type d'analyse : Combinaison linéaire

Cas 13: Vent 0° - ALL

Type d'analyse : Combinaison linéaire

Cas 14: Vent 45° - ALL

Type d'analyse : Combinaison linéaire

Cas 15: 1.33 CP + 1.75 Vent 0° - ALL

Type d'analyse : Combinaison linéaire

Cas 16: 1.33 CP + 1.75 Vent 45° - ALL

Type d'analyse : Combinaison linéaire

Cas 17: Sismique RPA 99 (2003)

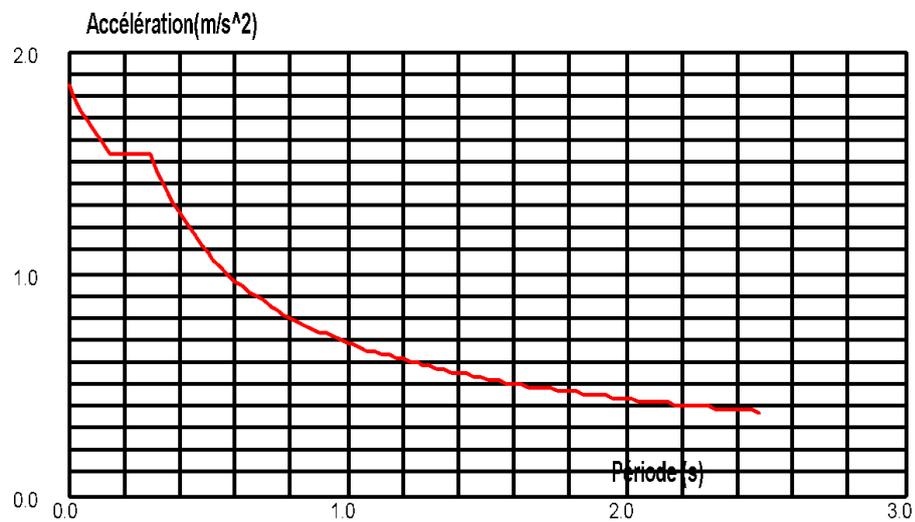
Type d'analyse : Sismique - RPA 99 (2003)

Direction de l'excitation :

X = 1.000

Y = 1.000

Z = 1.000



Données :

Zone : I
Usage : 1A
Assise : S1
Coefficient de qualité : 1.000
Coefficient de comportement : 3.000
Amortissement : x = 5.00 %

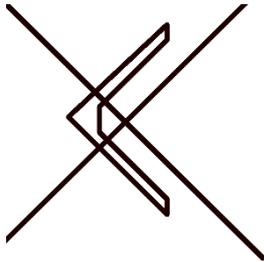
Paramètres du spectre :

Correction de l'amortissement : $\eta = [7/(2+\xi)]^{0.5} = 1.000$
A = 0.150
T₁ = 0.150 T₂ = 0.300

Propriétés des profilés

Caractéristiques de la section :

CAEP 100x10



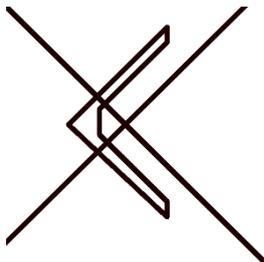
HY=7,5, HZ=14,1 [cm]

AX=19,154 [cm²]

IX=6,333, IY=280,348, IZ=73,005 [cm⁴]

Matériau=ACIER E28

CAEP 80x8



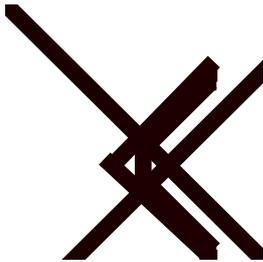
HY=6,0, HZ=11,3 [cm]

$AX=12,267$ [cm²]

$IX=2,594, IY=114,614, IZ=29,880$ [cm⁴]

Matériau=ACIER E28

CAEP 110x10



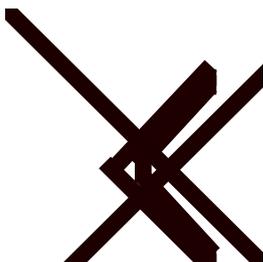
$HY=8,2, HZ=15,6$ [cm]

$AX=21,180$ [cm²]

$IX=7,000, IY=377,710, IZ=98,250$ [cm⁴]

Matériau=ACIER E28

CAEP 150x15



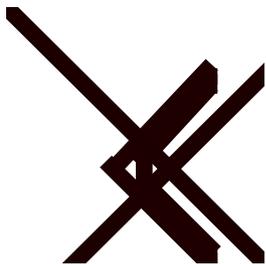
$HY=11,3, HZ=21,2$ [cm]

$AX=43,025$ [cm²]

$IX=32,060, IY=1425,870, IZ=370,238$ [cm⁴]

Matériau=ACIER E28

CAEP 120x12



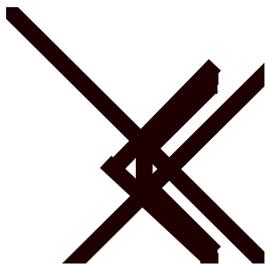
$HY=9,1$, $HZ=17,0$ [cm]

$AX=27,541$ [cm²]

$IX=13,130$, $IY=583,713$, $IZ=151,620$ [cm⁴]

Matériau=ACIER E28

CAEP 70x7



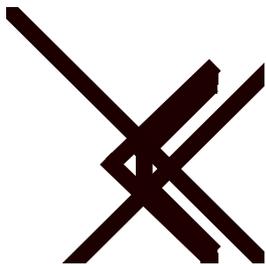
$HY=5,3$, $HZ=9,9$ [cm]

$AX=9,397$ [cm²]

$IX=1,521$, $IY=67,091$, $IZ=17,505$ [cm⁴]

Matériau=ACIER E28

CAEP 60x6



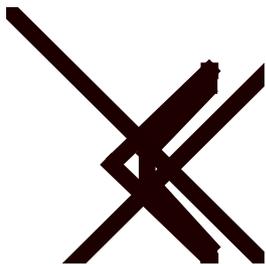
$HY=4,5$, $HZ=8,5$ [cm]

$AX=6,909$ [cm²]

$IX=0,821$, $IY=36,144$, $IZ=9,441$ [cm⁴]

Matériau=ACIER E28

CAEP 45x4.5



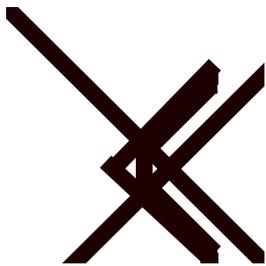
$HY=3,3$, $HZ=6,4$ [cm]

$AX=3,894$ [cm²]

$IX=0,260$, $IY=11,320$, $IZ=2,958$ [cm⁴]

Matériau=ACIER E28

CAEP 50x5



$HY=3,8$, $HZ=7,1$ [cm]

$AX=4,803$ [cm²]

$IX=0,396$, $IY=17,382$, $IZ=4,547$ [cm⁴]

Matériau=ACIER E28

Pondérations

Pondérations suivant le règlement :

CM66 Avril 2000

Paramètres de la création des pondérations

Type de pondérations : complètes

Liste de cas actifs :

1: Poids Propre	permanente	G1	1.00	PERM
2: Poids Echelles	permanente	G1	1.00	PERM
3: Poids Plate-formes	permanente	G1	1.00	PERM
4: Poids Antennes	permanente	G1	1.00	PERM
6: Vent perpendiculaire paroi I	vent	W1	1.00	VPER
7: Vent bissectrice paroi I et II	vent	W1	1.00	VBPI_
8: Vent 0° - Antennes	vent	W1	1.00	VENT
9: Vent 45° - Antennes	vent	W1	1.00	VENT
10: Vent 0° - Câbles	vent	W1	1.00	VENT
11: Vent 45° - Câbles	vent	W1	1.00	VENT
17: Sismique RPA 99 (2003)	sismique	E1	1.00	SIS17

Liste de modèles de combinaison :

EFF	Normale 1 charge variable
EFF	Normale 2 charges variables
EFF	Normale 3 charges variables
EFF	Extrême

EFF	Extrême Vent + D-Neige
DEP	Déplacement
ACC	Sismique
ACC	Sismique
ACC	Accidentelle
ACC	Accidentelle

Liste de groupes définis :

permanente:	G1	et,
vent:	W1	ou excl.,
sismique:	E1	ou excl.,

Liste de relations définies :

Caractéristiques - Barres

Nom de la section	Liste des barres	AX [cm ²]	AY [cm ²]	AZ [cm ²]	IX [cm ⁴]	IY [cm ⁴]	IZ [cm ⁴]
CAEP 100-x10	1301A1304	19,154	0,0	0,0	6,333	280,348	73,005
CAEP 80x-8	1401A1404	12,267	0,0	0,0	2,594	114,614	29,880
CAEP 110-x10	1201A1204	21,180	0,0	0,0	7,000	377,710	98,250
CAEP 150-x15	1001A1004	43,025	0,0	0,0	32,060	1425,870	370,238

Nom de la section	Liste des barres	AX [cm2]	AY [cm2]	AZ [cm2]	IX [cm4]	IY [cm4]	IZ [cm4]
CAEP 120-x12	1101A1104	27,541	0,0	0,0	13,130	583,713	151,620
CAEP 70x-7	1010A1025 1110A1125 1501A1504	9,397	0,0	0,0	1,521	67,091	17,505
CAEP 60x-6	1210A1241 1310A1341 1350A1353	6,909	0,0	0,0	0,821	36,144	9,441
CAEP 45x-4.5	1034A1077 1134A1177 1258A1261 1458A1477 1542A1549 1554A1557	3,894	0,0	0,0	0,260	11,320	2,958
CAEP 50x-5	1026A1033 1126A1133 1242A1257 1342A1349 1354A1361 1410A1457 1510A1541 1550A1553	4,803	0,0	0,0	0,396	17,382	4,547

Caractéristiques - Panneaux

Nom de l'épaisseur	Liste de panneaux	Matériau	Type d'épaisseur	Epaisseur [cm]	E1 [cm]	E2 [cm]	E3 [cm]	KZ [daN/m3]
--------------------	-------------------	----------	------------------	----------------	---------	---------	---------	-------------

Caractéristiques - Câbles

Nom du câble	Liste des barres	Section AX [cm2]	Précontrainte SIG [daN/mm2]	Force Fo [daN]	Longueur L [m]	Dilatation dl [m]	Dilatation relative
--------------	------------------	------------------	-----------------------------	----------------	----------------	-------------------	---------------------

Caractéristiques - Jarrets

Nom du jarret	Type de jarret	Longueur [cm] / REL	Hauteur [cm] / REL	Largeur [cm] / REL
---------------	----------------	---------------------	--------------------	--------------------

Nom du jarret	Epaisseur 1 [cm] / REL	Epaisseur 2 [cm] / REL	Position	Liste - origine	Liste - extrémité
---------------	------------------------	------------------------	----------	-----------------	-------------------

Caractéristiques - Matériaux

	Matériau	E [daN- /mm ²]	G [daN- /mm ²]	NU	LX [1/°C]	RO [daN/m ³]	Re [daN- /mm ²]
1	ACIER E28	21000,00	8080,00	0,30	0,00	7701,00	27,50

Les valeurs des réactions au niveau des appuis pour les différents cas de charges :

Noeud/Cas/Mode	FX [daN]	FY [daN]	FZ [daN]	MX [daNm]	MY [daNm]	MZ [daNm]
1/1/	82,17	82,19	1158,9	0	0	-0,18
1/2/	11,64	11,64	210,5	0	0	0
1/3/	9,01	9,01	200	0	0	0
1/4/	21,1	21,1	366	0	0	0
1/6/	-675,66	-260,89	-4656,65	0	0	0,8
1/7/	-388,19	404,59	17,61	0	0	0,09
1/8/	-553,27	-296,18	-5440,05	0	0	0
1/9/	-245,89	245,67	0	0	0	0,01
1/10/	-263,2	-108,76	-1958,26	0	0	0
1/11/	-108,02	107,93	0	0	0	0
1/12 (C)/	140,35	140,38	2167,18	0	0	-0,22
1/13 (C)/	-1492,12	-665,83	12054,97	0	0	0,81

1/14 (C)/	-742,1	758,19	17,61	0	0	0,1
1/15 (C)/	-2424,54	-978,5	18213,85	0	0	1,12
1/16 (C)/	-1112,01	1513,53	2913,16	0	0	-0,12
1/17/CQC	80,03	140,49	1506,07	0	0	0
2/1/	-82,17	82,16	1158,87	0	0	-0,18
2/2/	-11,64	11,64	210,5	0	0	0
2/3/	-9,01	9,01	200	0	0	0
2/4/	-21,1	21,1	366	0	0	0
2/6/	-673,71	262,22	4656,65	0	0	-0,7
2/7/	-892,36	892,71	9010,59	0	0	-0,01
2/8/	-552,87	296,18	5440,05	0	0	0
2/9/	-708,63	708,85	8374,41	0	0	-0,01
2/10/	-263,05	108,76	1958,26	0	0	0
2/11/	-260,06	260,14	2739,33	0	0	0
2/12 (C)/	-140,35	140,34	2167,14	0	0	-0,21
2/13 (C)/	-1489,63	667,16	12054,97	0	0	-0,7
2/14 (C)/	-1861,04	1861,71	20124,34	0	0	-0,02
2/15 (C)/	-2793,52	1354,18	23978,5	0	0	-1,51
2/16 (C)/	-3443,49	3444,63	38099,89	0	0	-0,33
2/17/CQC	84,23	143,34	1546,08	0	0	0

3/1/	-82,16	-82,16	1158,86	0	0	0,18
3/2/	-11,64	-11,64	210,5	0	0	0
3/3/	-9,01	-9,01	200	0	0	0
3/4/	-21,1	-21,1	366	0	0	0
3/6/	-675,1	-261,41	4658,08	0	0	0,7
3/7/	-405	388,41	17,61	0	0	-0,07
3/8/	-553,27	-296,18	5440,05	0	0	0
3/9/	-245,88	245,67	0	0	0	0
3/10/	-263,2	-108,76	1958,26	0	0	0
3/11/	-108,02	107,93	0	0	0	0
3/12 (C)/	-140,34	-140,34	2167,12	0	0	0,21
3/13 (C)/	-1491,56	-666,35	12056,4	0	0	0,7
3/14 (C)/	-758,89	742	17,61	0	0	-0,06
3/15 (C)/	-2796,89	-1352,77	23980,97	0	0	1,51
3/16 (C)/	-1514,71	1111,86	2913,09	0	0	0,17
3/17/CQC	80,04	140,52	1506,08	0	0	0,01
4/1/	82,16	-82,19	1158,89	0	0	0,18
4/2/	11,64	-11,64	210,5	0	0	0
4/3/	9,01	-9,01	200	0	0	0
4/4/	21,1	-21,1	366	0	0	0
4/6/	-673,95	260,08	-4658,08	0	0	-0,8

4/7/	-909,64	909,48	-9045,81	0	0	-0,01
4/8/	-552,87	296,18	-5440,05	0	0	0
4/9/	-708,64	708,85	-8374,41	0	0	-0,01
4/10/	-263,05	108,76	-1958,26	0	0	0
4/11/	-260,06	260,14	-2739,33	0	0	0
4/12 (C)/	140,34	-140,38	2167,17	0	0	0,22
4/13 (C)/	-1489,87	665,02	-12056,4	0	0	-0,81
4/14 (C)/	-1878,34	1878,47	20159,55	0	0	-0,02
4/15 (C)/	-2420,61	977,09	18216,36	0	0	-1,12
4/16 (C)/	-3100,43	3100,62	32396,88	0	0	0,25
4/17/CQC	84,22	143,39	1546,07	0	0	0
Cas	1 - Poids Propre					
Mode						
Somme totale	0	0	4635,52	0	0	0
Somme réactions	0	0	4635,52	23177,54	-23177,45	0
Somme efforts	0	0	-4635,52	23177,54	23177,45	0
Vérification	0	0	0	0	0	0

Précision	5,00E-12	1,44E-20				
Cas	2 - Poids Echelles					
Mode						
Somme totale	0	0	841,99	0	0	0
Somme réactions	0	0	841,99	4209,97	-4209,97	0
Somme efforts	0	0	-841,99	-4209,97	4209,97	0
Vérification	0	0	0	0	0	0
Précision	7,70E-12	4,12E-20				
Cas	3 - Poids Plate- formes					
Mode						
Somme totale	0	0	800	0	0	0
Somme réactions	0	0	800	4000	-4000	0
Somme efforts	0	0	-800	-4000	4000	0
Vérification	0	0	0	0	0	0
Précision	2,16E-11	1,95E-19				
Cas	4 - Poids Antennes					

Mode						
Somme totale	0	0	1464	0	0	0
Somme réactions	0	0	1464	7320	-7320	0
Somme efforts	0	0	-1464	-7320	7320	0
Vérification	0	0	0	0	0	0
Précision	1,82E-11	4,39E-20				
Cas	6 - Vent perpendiculaire paroi I					
Mode						
Somme totale	-2698,41	0	0	0	0	0
Somme réactions	-2698,41	0	0	0	-37517,67	13494,65
Somme efforts	2698,41	0	0	0	37517,67	-13494,65
Vérification	0	0	0	0	0	0
Précision	1,35E-11	1,05E-19				
Cas	7 - Vent bissectrice paroi I et II					
Mode						
Somme totale	-2595,19	2595,19	0	0	0	-0,01

Somme réactions	-2595,19	2595,19	0	-	36363,58	-36363,58	25954,12
Somme efforts	2595,19	-2595,19	0	36363,58	36363,58	-25954,12	
Vérification	0	0	0	0	0	0	0
Précision	1,04E-11	2,44E-21					
Cas	8 - Vent 0° - Antennes						
Mode							
Somme totale	-2212,28	0	0	0	0	0	0
Somme réactions	-2212,28	0	0	0	-43822,66	11061,4	
Somme efforts	2212,28	0	0	0	43822,66	-11061,4	
Vérification	0	0	0	0	0	0	0
Précision	3,75E-10	1,99E-19					
Cas	9 - Vent 45° - Antennes						
Mode							
Somme totale	-1909,04	1909,04	0	0	0	0	-0,01
Somme réactions	-1909,04	1909,04	0	-	33730,28	-33730,28	19090,4
Somme efforts	1909,04	-1909,04	0	33730,28	33730,28	-19090,4	

Vérification	0	0	0	0	0	0
Précision	1,26E-10	3,46E-21				
Cas	10 - Vent 0° - Câbles					
Mode						
Somme totale	-1052,49	0	0	0	0	0
Somme réactions	-1052,49	0	0	0	-15774,91	5262,46
Somme efforts	1052,49	0	0	0	15774,91	-5262,46
Vérification	0	0	0	0	0	0
Précision	1,27E-11	1,43E-19				
Cas	11 - Vent 45° - Câbles					
Mode						
Somme totale	-736,14	736,14	0	0	0	0
Somme réactions	-736,14	736,14	0	-	11033,42	-11033,42
Somme efforts	736,14	-736,14	0	11033,42	11033,42	-7361,43
Vérification	0	0	0	0	0	0
Précision	7,67E-12	2,43E-21				

Cas	12 - CP					
Mode						
Somme totale	0	0	8668,61	0	0	0
Somme réactions	0	0	8668,61	43343,01	-43342,91	0
Somme efforts	0	0	-8668,61	43343,01	43342,91	0
Vérification	0	0	0	0	0	0
Précision	5,34E-11	2,98E-19				
Cas	13 - Vent 0° - ALL					
Mode						
Somme totale	-5963,18	0	0	0	0	0
Somme réactions	-5963,18	0	0	0	-97115,24	29818,5
Somme efforts	5963,18	0	0	0	97115,24	-29818,5
Vérification	0	0	0	0	0	0
Précision	4,01E-10	4,47E-19				
Cas	14 - Vent 45° - ALL					
Mode						

Somme totale	-5240,37	5240,37	0	0	0	-0,02
Somme réactions	-5240,37	5240,37	0	81127,28	-81127,28	52405,95
Somme efforts	5240,37	-5240,37	0	81127,28	81127,28	-52405,95
Vérification	0	0	0	0	0	0
Précision	1,44E-10	8,33E-21				
Cas	15 - 1.33 CP + 1.75 Vent 0° - ALL					
Mode						
Somme totale	-10435,57	0	11529,26	0	0	0
Somme réactions	-10435,57	0	11529,26	57646,21	227597,74	52182,38
Somme efforts	10435,57	0	11529,26	57646,21	227597,74	-52182,38
Vérification	0	0	0	0	0	0
Précision	7,73E-10	1,18E-18				
Cas	16 - 1.33 CP + 1.75 Vent 45° - ALL					
Mode						

Somme totale	-9170,64	9170,64	11529,26	0	0	-0,03
Somme réactions	-9170,64	9170,64	11529,26	84326,54	199618,82	91710,41
Somme efforts	9170,64	-9170,64	11529,26	84326,54	199618,82	-91710,41
Vérification	0	0	0	0	0	0
Précision	3,23E-10	4,10E-19				
Cas	17 - Sismique RPA 99 (2003)					
Mode CQC						
Somme totale	328,52	567,73	6104,29	0	0	0,02
Somme réactions	40,53	567,33	0	12288,69	375,38	2890,92
Somme efforts	40,53	567,3	0	12288,57	375,46	2890,98
Vérification	81,06	1134,63	0	24577,26	750,84	5781,9
Précision	4,54E-02	2,89E+00				