

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur
et de la recherche scientifique

UNIVERSITE Abderrahmane MIRA BEJAIA
Faculté de Technologie
Département de Génie Mécanique

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Construction mécanique

Par :

AIT AISSA Belkacem Lyazid

OUCHEFONE Abdelouahab

Thème

Etude de la structure d'une grue du type E.N.M.T.P U.B.10-04 selon l'EUROCODE3.

Soutenu le 5/10/2021 devant le jury composé de :

M^{me} BOUZIDI Safia

Présidente

Mr. BECHEUR Abdelhamid

Encadreur

Mr. BANOUNE Brahim

Examineur

Année Universitaire 2020-2021

Remerciements

Nous remercions tout d'abord Dieu, le tout puissant de nous avoir accordé santé, courage, patience et foie pour accomplir ce modeste travail.

La réalisation de ce mémoire a été possible grâce à la participation de plusieurs personnes à qui nous voudrions adresser toute notre reconnaissance.

*Nous voudrions tout d'abord adresser toute notre gratitude à notre promoteur, **BECHEUR Abdelhamid** pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils et ses encouragements.*

Nos remerciements vont également à:

***M^{me} BOUZIDI Safia** pour l'honneur qu'elle nous fait de présider notre jury et **BANOUNE Brahim** d'avoir accepté d'examiner notre travail.*

*Nous tenons à remercier **Mr KIKOUCHE chef département L'E.N.M.T.P.** et tout le personnel de **L'E.N.M.T.P.** et bien sur **MOKRAN Mouhend Amezyan** l'ingénieur du bureau d'étude de **L'E.N.M.T.P.***

Nous tenons à formuler notre gratitude et nos profondes reconnaissances à l'égard de nos parents pour leurs indéfectibles soutiens durant tout notre cursus.

Afin de n'oublier personne, nos vifs remerciements s'adressent à tous ceux qui nous ont aidés à la réalisation de ce modeste travail.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail en signe de respect, reconnaissance et de

Remerciement:

Ames très chers parents.

A nos frères

A mon binôme

A mes amis

koukou

boukendoul

A Gandoul

raouf

A Louli

*Et à tous ceux qui ont participé de prêt ou de loin à la réalisation de
ce modeste travail tous ceux qui me sont très chers.*

Ait Aissa Belkacem Lyazid



| | |
|--|-----------|
| a.6.2 Coefficient de la charge de levage Ψ | 15 |
| II.2.2.2 Combinaisons d'actions | 15 |
| II.3 Conclusion | 16 |
| Chapitres III : Analyse de la structure | |
| III.1 Introduction :..... | 16 |
| III.2 Présentation de la méthode des éléments finis | 16 |
| III.2.1 Calcul des structures | 16 |
| III.2.2 Les différentes étapes de résolution..... | 16 |
| III.2.2.1 Discrétisation de la structure en éléments finis | 16 |
| III.2.2.3 Etude d'un élément | 17 |
| III.2.2.4 Matrice des raideurs et matrice des masses | 19 |
| III.2.2.5 Résolution du problème | 19 |
| III.3 Principe de fonctionnement du logiciel | 20 |
| III.4 Action à prendre en compte dans l'analyse | 21 |
| III.5 Analyse de la structure | 25 |
| III.5.1 Analyse des déformées et diagrammes de forces | 26 |
| III.5.1.1 Les Déformées | 26 |
| III.5.1.2 Les Diagrammes Des Forces..... | 27 |
| III.5.2 Analyse des déplacements | 31 |
| III.6 L'analyse modal (sans tenir compte de la charge de manutention)..... | 32 |
| III.7 Conclusion | 34 |
| Chapitre IV : Dimensionnement des éléments | 35 |
| IV.1 Principe de dimensionnement (selon les règles de l'Eurocode 3)..... | 35 |
| IV.1.1 Vérification à l'état limite de service | 35 |
| IV.1.2 Vérification à l'état limite ultime..... | 35 |
| IV.1.2.1 Classification des sections transversales | 35 |
| IV.2 Bases de calculs du nouveau règlement Eurocode 3 | 37 |
| IV.2.1 Résistance des sections transversales | 37 |
| IV.2.1.1 Effort axial de traction (N)..... | 37 |
| IV.2.1.2 Effort axial de compression (N) | 37 |
| IV.2.1.3 Moment fléchissant (M) | 37 |
| IV.2.1.4 Effort tranchant (V) | 37 |
| IV.2.1.5 Moment fléchissant + effort tranchant (M + V)..... | 38 |
| IV.2.1.6 Moment Fléchissant + Effort Axial | 38 |
| IV.2.1.7 Moment Fléchissant+ Effort Axial (M + N) | 39 |
| IV.2.1.7.a Flexion autour de l'axe yy | 39 |
| IV.2.1.7.b Flexion autour de l'axe zz..... | 39 |

Tables des matières

| | |
|---|-----------|
| IV.2.1.7.c Flexion bi axiale | 39 |
| IV.2.1.8 Moment Fléchissant+ Effort Axial + Effort Tranchant (M+V+N) | 40 |
| IV.2.2 Vérification au flambement | 40 |
| IV.3 Analyse des résultats obtenus: | 41 |
| IV.3.1 Analyse des efforts internes: (Design Combo Numériquement) | 41 |
| IV.3.1.1 Analyse des efforts internes dans les éléments de la flèche:..... | 41 |
| IV.3.1.1.a Les éléments des membrures inférieures de la flèche: (L 50*5) | 41 |
| IV.3.1.1.b Les éléments en diagonales inclinées du treillis de la flèche : barre (d=12mm) | 42 |
| IV.3.1.1.c Les éléments montants de la flèche : tube (l 50*5)..... | 43 |
| IV.3.1.1.c Les éléments de la membrure supérieure: barre (d30,d25) | 44 |
| IV.3.1.2 Les éléments du poinçon vertical : tub (eu90ep9)..... | 45 |
| IV.3.1.3 Efforts internes dans les éléments du mât..... | 46 |
| IV.3.1.3.a Eléments des membrures du mat : (L50*5) | 46 |
| IV.3.1.3.b Diagonales du mât (L35*4) | 47 |
| IV.3.1.3.c Les montants du mât :(L35*4) | 48 |
| IV.4 Analyse des résultats obtenus dans la structure proposée | 49 |
| IV.4.1 Analyse des efforts internes | 49 |
| IV.4.1.1 Analyse des efforts internes dans les éléments de la flèche proposé..... | 49 |
| IV.4.1.1.a Les éléments en diagonales inclinées du treillis DE FLECHE : barre (eu=14mm)..... | 49 |
| IV.4.1.1.b Les éléments de la membrure supérieure DE LA FLECHE: barre (d30) | 50 |
| IV.4.1.2 Les poinçons verticaux : tube (d100 ep10) | 51 |
| IV.I Conclusion | 52 |
| VChapitre V : Vérification de la stabilité globale | |
| V.1 Stabilité globale vis à vis du vent..... | 53 |
| V.2 Vérification a l'état limite de service | 53 |
| V.3 Stabilité global vis à vis de la charge de manutention..... | 53 |
| V.4 Conclusion | 54 |
| Conclusion générale | 55 |

Liste des figures :

| | |
|---|----|
| Figure 1 : Structure d'une grue..... | 4 |
| Figure 2 : Grue GME..... | 5 |
| Figure 3: Grue GMA..... | 5 |
| Figure 4: La portée..... | 6 |
| Figure 5: La charge maxi | 6 |
| Figure 6: La charge en bout..... | 7 |
| Figure 7 : La puissance | 7 |
| Figure 8 : Coefficient de majoration dynamique..... | 15 |
| Figure 9 : élément barre a deux nœud | 17 |
| Figure 10 : Charpente avec assemblage de poutres | 18 |
| Figure 11: Courbe de charge..... | 21 |
| Figure 12 : Représentation des données et paramètre de calculs des moment d'inertie..... | 23 |
| Figure 13: Les déformées de la structure a (135G+150Q2)..... | 26 |
| Figure 14 : Les déformées de la structure a (135G+150Q1)..... | 26 |
| Figure 15 : Diagramme de forces axiales..... | 27 |
| Figure 16: Diagramme force axial (135G+150Q2PARF)..... | 27 |
| Figure 17 : Diagramme de torsion | 28 |
| Figure 18: Diagramme des forces axiales | 29 |
| Figure 19: Diagramme moment..... | 29 |
| Figure 20 : Diagramme moment..... | 30 |
| Figure 21 : Diagramme de torsion | 30 |
| Figure 22 : Résultat sap2000 déformation | 32 |
| Figure 23 : Mode 1 | 32 |
| Figure 24 : Mode 2 | 33 |
| Figure 25: Mode 3 | 33 |
| Figure 26 : ResultatsSAP2000,L50*5 | 41 |
| Figure 27: RésultatsSAP2000,barre d12..... | 42 |
| Figure 28 : RésultatsSAP2000,L50*5 | 43 |
| Figure 29: RésultatsSAP2000,barre d25 | 44 |
| Figure 30: Résultats Sap2000,barre d25 | 45 |
| Figure 31: Résultats sap2000,L50*5 | 46 |
| Figure 32 : Résultats sap2000,L35*4 | 47 |
| Figure 33: Résultats SAP2000,L35*4 | 48 |
| Figure 34: Résultats SAP2000,barre ϕ 14 | 50 |
| Figure 35: Résultats SAP2000 ,barre d30..... | 50 |
| Figure 36: RésultatsSAP2000,tube d100 ep 10 | 51 |

Liste des tableaux :

| | |
|--|----|
| Tableau 1 : Description technique | 8 |
| Tableau 2 : Différents modes période et la participation massique. | 34 |
| Tableau 3: Sollicitation résistance ultime | 35 |
| Tableau 4: Classification des sections | 37 |
| Tableau 5 : Réactions | 53 |

I. Introduction générale

Le rôle des équipements de levage devient de plus en plus important dans toutes les branches de l'industrie moderne. Leur utilisation est évidemment nécessaire dans les domaines de l'industrie lourde et des chantiers. Afin de minimiser le danger pouvant entraîner des conséquences graves pour la vie humaine et les biens, les équipements de levage, en particulier les grues, doivent être correctement conçus. Pour cette raison, les ingénieurs doivent tenir compte de toutes les exigences de vérification stipulées par les normes en vigueur lors de la conception.

Cela dit, notre travail consiste à l'étude vis à vis de la résistance et de la stabilité d'une grue de levage de type ENMTP UB 1404.

Les méthodes de calcul utilisées sont basées sur la théorie de la résistance des matériaux et des règles de calcul et de dimensionnement prévues dans le règlement Eurocode 03 (d'un point de vue réglementaire). De plus, compte tenu de la complexité de la structure étudiée (fortement hyperstatique), nous avons fait appel à des outils informatiques en utilisant le logiciel SAP2000. Comme nous le savons tous, cette dernière est principalement basée sur la méthode des éléments finis. La présente étude a été entamée par une description technique des caractéristiques de l'appareil, suivie de l'exposé des principes généraux de conception et de vérification. Après avoir procédé à l'analyse de la structure et sa déformée en question, nous sommes passés à la vérification des éléments vis à vis des critères de résistance, de stabilité de forme et de stabilité globale au chargement. Il s'en est suivi la vérification des déplacements.

Nous terminerons ce travail par une conclusion générale dans laquelle nous ferons reproduire les principaux résultats. Ces derniers consistent essentiellement en les efforts prépondérants au sein des différents éléments de la structure ainsi que le dimensionnement final obtenu. Nous ferons ainsi ressortir les différences fondamentales obtenues par la méthode des éléments finis au niveau du dimensionnement. Ce qui nous permettra d'établir des recommandations en vue d'un rendu meilleur.

Chapitre I :

Présentation de la structure à étudier

I.1 Introduction

Les appareils de levage jouent, dans la manutention des matériaux, un rôle qui consiste à lever et à déplacer des charges dont la masse se situe dans les limites de leur capacité nominale. Cependant, les conditions de service peuvent varier considérablement, tant à l'intérieur d'une même catégorie d'appareils de levage, par exemple les ponts roulants, qu'entre des appareils de levage de types différents, par exemple une grue à tour et une grue portuaire lourde. La conception de l'appareil doit tenir compte des conditions de service afin de pouvoir offrir un niveau de sécurité et une durée de vie qui correspondent aux exigences de l'acquéreur. La classification est donc le système qui permet d'établir la conception des charpentes et des mécanismes sur des bases rationnelles. Elle sert également de cadre de référence aux acheteurs et aux fabricants en ce qu'elle permet d'assortir un appareil donné aux conditions de service pour lesquelles l'appareil est requis. [1]

Outre l'aspect de la sécurité sur le lieu de travail, l'utilisation d'un appareil de levage ou de manutention manuel, électrique ou hydraulique contribue à renforcer la productivité des entreprises. C'est d'ailleurs la raison pour laquelle ces équipements sont omniprésents dans de très nombreux secteurs d'activité. [1]

La grue : est fréquemment utilisée dans le secteur de la construction moderne. De nos jours, la plupart des composants des grands bâtiments sont préfabriqués : les coffrages en béton, les structures et certains matériaux. Cependant, ces éléments sont considérablement lourds. Leur assemblage est délicat. En effet, il se fait parfois à des centaines de mètres du sol. La grue est donc le meilleur moyen pour effectuer ce type d'opération.

Le levage est la principale fonction d'une grue. Elle comprend un bras de levage, montée sur un mât vertical et fixé au sol. C'est la flèche à l'aide de tirant, de câbles très solides, qui permettent le levage des éléments. La contreflèche permet, quant à elle d'équilibrer le fonctionnement de la machine pendant le processus de levage.

Il existe différents types de grues. Chacune a son propre mode de fonctionnement et mode de montage. Les règles et les recommandations sont aujourd'hui fixées afin que les ouvriers ne se blessent pas et exercent dans de bonnes conditions de travail.

Le choix de la grue se fait selon les besoins, c'est-à-dire, selon sa configuration. Il s'agit habituellement de la hauteur et la surface du bâtiment à construire, le stockage des charges et l'environnement du chantier.

I.2 Différents types de grues

Il existe différents types de grues de chantier. Nous avons les grues à tour, les grues télescopiques et les grues à treillis. Les grues à tour sont la gamme la plus diversifiée actuellement disponible sur le marché. Très souples d'utilisation, les grues à montage rapide et les modèles à partie tournante supérieure apportent quotidiennement la preuve de leurs performances dans la construction de logements et dans les grands projets industriels dans le monde entier. Les grues de construction télescopiques sont les solutions les plus rentables dans la gamme des grues d'intervention rapide. Munies de l'équipement complet, elles peuvent se déplacer sur la voie publique et sont ainsi prêtes à fonctionner dès qu'elles arrivent sur le chantier. La grue à treillis à elle de grande capacité. Elle a été conçue pour des conditions d'application les plus diverses. [1]

I.2.1 Les grues mobiles

Selon l'environnement et le type de travail à accomplir, la grue mobile peut être très efficace. Cet appareil, avec le modèle télescopique ou à treillis, se déploie rapidement. Il est équipé d'une cabine pour la conduite. Son principal avantage est qu'elle ne nécessite pas de transport, mais se déplace par elle-même sur la voie publique.

La grue mobile compacte quant à elle, a l'avantage d'être extrêmement maniable. La cabine permet à la fois de mener les opérations de levage et de la conduite de l'engin. Sa taille permet un travail dans des chantiers étroits.

I.2.2 Les grues à tours

Ce sont des équipements de pointe dans le secteur de la construction. Elles sont puissantes et peuvent soulever des charges importantes, jusqu'à 1200 tonnes sur des hauteurs et des portées considérables.

Une grue à tour fonctionne comme une balance géante. Elle se constitue de nombreux systèmes de contrepoids, selon le principe du levier. Si le châssis est, par exemple, fixé au sol par des contrepoids bétonnés, le tour en acier, lui, permet de supporter la flèche en hauteur. Le processus de levage d'une charge, pour sa part, est réalisé par le chariot, relié à un crochet et un moteur, le plus souvent, électrique.

Elle se fixe donc au sol grâce à des appuis, aussi nommés lestages de grue, qui maintiennent toute la structure durant ses manœuvres. Constitué d'acier, le mât, avec sa structure à section carrée, joue un double rôle au sein de l'engin. En premier, il garantit la stabilité de l'appareil lors des opérations de levage. En second, il supporte le poids de la cabine de pilotage, de la flèche et de la charge durant les travaux.

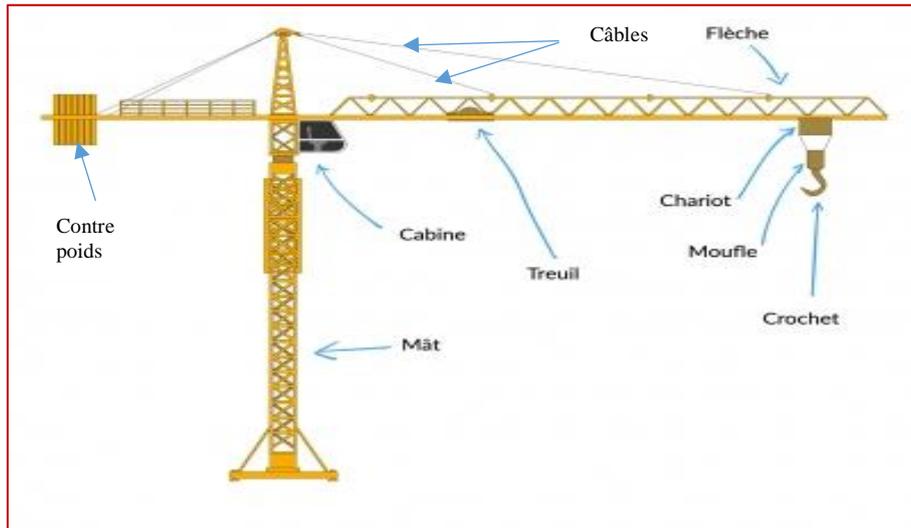


Figure 1 : Structure d'une grue à tours.

I.3 Les modèles de grues à tours

I.3.1 LES GME

Les grues à montage par éléments se distinguent surtout par leur grande hauteur et leur longue flèche. Souvent surmonté par un porte-flèche, leur mât peut mesurer près de 100 mètres de haut.

Il supporte à la fois :

- La cabine de commande
- La flèche, avec le chariot de levage et le tirant
- La contre-flèche, munie de lests et parfois de moteur

Certains modèles de hautes performances proposent aussi des flèches capables d'atteindre une portée de 100 mètres. Leur utilisation garantit avant tout une importante réduction du coût lié au transport sur le chantier. Aussi, leur utilisation peut se faire de deux manières distinctes, en fonction de la configuration du chantier et le modèle de construction de la grue :

Le chariot peut être déplacé horizontalement, le long de la flèche pour accélérer la distribution des matériaux, par exemple.

La flèche elle-même peut être levée, rendant plus flexibles les manœuvres de l'engin, surtout dans un environnement exigu.

À la différence d'une grue à montage automatisé, les grues à montage par éléments tournent grâce à un pivot situé, la plupart du temps, juste en dessous de la cabine. Cela permet surtout de réduire les risques de rupture du mât, en cas de surcharge. Aussi, le montage de ce type d'appareil nécessite une autre grue, voire des hélicoptères pour les structures élevées. [1]



Figure 2 : Grue GME.

I.3.2 LES GMA

I.4 Les caractéristiques :

Le choix d'une grue pour un chantier n'est jamais le fruit du hasard. Il faut pour cela réunir les informations sur des distances, poids, hauteurs.

Une grue doit être parfaitement adaptée au chantier afin d'éviter des manœuvres qui pourraient faire un temps précieux.

Une grue dont les capacités de levage et la longueur de la flèche sont limitées nuisent au bon fonctionnement du chantier. [1]



Figure 3: Grue GMA.



Figure 4 : La portée.

La portée d'une grue est la distance horizontale de travail. Elle se mesure entre l'axe de rotation de la grue et l'axe du crochet chariot en bout de flèche.

Pour déterminer la portée il faut prendre en compte:

- La surface du bâtiment ;
- Les zones de stockage du matériel ;
- Les zones de déchargement des camions.



Figure 5 : La charge maxi.

La charge maxi de la grue est la plus lourde charge que la grue peut soulever à partir du pied de flèche (portée minimale) jusqu'à la distance définie par le constructeur.

Pour déterminer la charge maxi, il faut prendre en compte:

- Les éléments les plus lourds à transporter sur le chantier ;
- La distance à laquelle il faut amener ces charges.



Figure 6 : La charge en bout.

La charge en bout d'une grue est la plus lourde charge que la grue peut soulever et amener en bout de flèche. Pour déterminer la charge en bout, il faut prendre en compte:

- Les charges les plus lourdes qu'il faut amener à la portée maximale (coffrages, béton, éléments préfabriqués, divers *matériaux et matériels*).



Figure 7 : La puissance.

La puissance d'une grue est le résultat du poids de la charge maxi multiplié par sa portée. Ce résultat s'exprime en mètre/tonne (m/t).

Exemple :

Une grue relève 3 tonnes à 50mètres, la puissance à cet endroit sera de $3t \times 50m = 150 \text{ m/t}$,
Une grue relève 8 tonnes à 30 mètres, la puissance à cet endroit sera de $8t \times 30m = 240 \text{ m/t}$.

I.5 Caractéristiques de la grue a étudié (GRUE GMR 1404 VE)

L'Entreprise Nationale Métallique et Travaux Publics leader de la fabrication des grues en Algérie fabrique principalement trois types de grues, on se focalise pour notre étude sur (GRUE GMR 1404 VE) d'après le catalogue d'où on a tiré caractéristiques suivantes : [2]

Tableau 1: Description technique.

| | |
|------------------------------------|--|
| Portée (m) | 12.5 m – 14 m |
| Capacité (kg) | 500 – 400 kg |
| Hauteur (m) | 20.4 m |
| Vitesse de levage | 25 m/mn |
| Vitesse de chariotage | 30 m/mn |
| Vitesse de rotation | 1 tr/mn |
| Poids grue sans lest | 2830 kg |
| Poids grue avec lest | 6330 kg |
| Rayon de giration | 2.50 m |
| Largeur hors-tout | 2.35 m |
| Hauteur de parking | 3.30 m |
| Puissance nécessaire | 5 kVa |
| Puissance moteur levage | 1.8 kW |
| Puissance moteur chariotage | 0.37 kW |
| Puissance moteur rotation | 0.55 KW |
| Sécurité | Limiteur de charge Limiteur de couple Interrupteur combiné principal Fin de course haut crochet |
| Transport | Sur essieu à deux roues avec timon de remorquage pour déplacement sans lest. Vitesse maximale 25 km/h |
| Mouvement à réaliser | Mouvement de levage. Mouvement de rotation d'orientations caractérisées par la vitesse à la tête de La Flèche. Mouvement de translation. |

| | |
|--|--------------------------------------|
| | Mouvement de variation de la portée. |
|--|--------------------------------------|

I.6 Description de l'ossature

L'ossature de la grue est composée de trois parties essentielles:

- Un châssis ou cadre support de l'ensemble sur repose toute la grue et son poids.
- Un mât télescopique (ou tour, ou mâture) vertical formé en général, d'éléments de charpente métallique en treillis assemblés par soudures.
- Une flèche orientable formée, en générale, d'éléments de charpente métallique formant une forme tridimensionnelle en treillis.

I.7 Assemblage de la grue et mise en forme

En général, le mât et la flèche et une seul pièce d'éléments de charpente métallique en treillis assemblés par soudures. [5]

Nous nous limitons à trois nuances d'acier (E20 dans la majorité des cas, S235 et E60 et E36 plus rarement). Dans notre cas, nous utilisons la nuance d'acier E20 (acier doux à faible taux de carbone) qui vérifie les trois conditions de ductilité:

- La contrainte à la rupture en traction f_u , est supérieure de 20% à la limite d'élasticité f_y .
- L'allongement à la rupture ϵ_u est supérieur à 20 fois l'allongement ϵ_y ,
- L'allongement à la rupture ϵ_u est supérieur à 15% : $\epsilon_u \geq 0,15$.

Les caractéristiques mécaniques de l'acier utilisé :

| | |
|--|---|
| f _y : limite d'élasticité | f _y = 235 MPA. |
| f _u : contrainte de rupture en traction | f _u = 360 MPA. |
| E: module d'élasticité longitudinale | E 210000 MPA. |
| v : coefficient de poisson | v = 0.3 |
| G: module d'élasticité transversale (module de cisaillement) | G=81000MPa |
| λ: coefficient de dilatation thermique | λ=11.10 ⁻¹⁰ / °C ⁻¹ |
| p: masse volumique de l'acier | p= 7,850.10 ⁻⁶ |

I.8 Coefficients partiels de sécurité

Lors de l'étude nous avons opté pour la norme Eurocode 03 dans la détermination des actions et combinaisons d'actions, dans les vérifications des éléments nous avons dégagé un coefficient partiel de sécurité dont la valeur est. [8]

$$\gamma_{m0} = \frac{\sigma_a}{f_y} ; \quad \gamma_{m0} = 1.1$$

I.9 Unités utilisées

Les grandeurs mécaniques sont exprimées avec les unités du système international SI.

Les unités suivantes sont utilisées lors des calculs :

Masse: Kg

Longueur : m

Masse Volumique : Kg/m³

Poids Volumique : KN/m³

Force et efforts: KN

Couples et Moments: KN.m

Contrainte et résistance: N/mm²

I.11 Conclusion

Les équipements de levage de nos jours sont de plus en plus importants dans toutes les branches de l'industrie moderne. Leur utilisation est évidemment nécessaire dans les domaines de l'industrie lourde et des chantiers. On a pu voir que ces dernières sont différentes et plusieurs selon leurs capacité et autre.

Chapitre II :

*Principes généraux de l'étude et base de
calcul*

II. Principes généraux de l'étude et base de calcul

II.1 Principes généraux

II.1.1 Principes de justification

II.1.1.1 Etats limites

Afin de prouver la sécurité et la fonctionnalité de l'ouvrage, des calculs sont effectués selon le principe des états limites. Ils sont divisés en deux catégories :

- États limites ultimes : ils sont liés à l'effondrement structurel et à d'autres formes de dommages structurels, qui peuvent mettre en danger la sécurité du personnel et des biens.
- Etats limites de service : ils correspondent à des états qui ne répondent plus aux critères de fonctionnement spécifiés. [5]

II.1.1.2 Situations durables et accidentelles

La structure que l'on veut étudier se retrouve dans deux cas :

- Le cas durable correspond aux conditions normales de fonctionnement.
- Situations accidentelles (explosions, tremblements de terre, accidents de véhicules, rares vents violents extrêmes).

II.2 Base de calcul

II.2.1 Exigences fondamentales

Le calcul et la réalisation de toute structure en acier doivent répondre aux exigences de base suivantes :

Exigences de sécurité : L'ouvrage doit pouvoir résister et maintenir une stabilité, et avoir une fiabilité appropriée pour faire face aux actions et influences qui peuvent lui être imposées lors de son exécution et de son exploitation.

Exigences d'applicabilité : Compte tenu de sa durée de vie et de son coût, il doit être adapté au service prévu avec une probabilité acceptable.

Exigences de durabilité : Il doit avoir une durabilité appropriée en termes de coûts de maintenance.

II.2.2 Action et combinaison d'action

II.2.2.1 Sollicitation devant intervenir dans le calcul

Le calcul des charpentes et conduit en déterminant les contraintes développées dans un appareil en cours de fonctionnement ces contraintes sont calculés en envisageant des sollicitations définies ci-après :

- Les sollicitations principales ;
- Les sollicitations additionnelles.

a. sollicitation principales

Les sollicitations principales sont dues :

- Au poids propre.
- A la charge Mobile des services.
- Aux effets d'inertie du au mouvement de l'appareil autant que le levage.
- Aux effets centrifuge.

a.1 poids propre (G)

Ce sont les poids des pièces fixe et mobile agissant sur un élément à l'exclusion de la charge Mobile service.

a.2 charge Mobile de service (Q)

C'est le poids total des éléments suspendus au câble qui comprend la charge utile le poids des éléments faisant normalement partie de l'appareil tel que moufle crochet

a.3 Effet d'inertie de la haute accélération décélérations des mouvements de direction de translation et d'orientation

A partir des accélérations ou décélérations affectées aux éléments mobiles lors du démarrage ou des freinages, on calcule les sollicitations résultantes dans les différents éléments de charpente. Par ailleurs, l'effet dynamique peut être pris en compte en majorant les efforts calculés de 50%. En effet, lors de ces mouvements de translation et de rotation, les efforts doivent être calculés en fonction de la durée d'accélération ou décélération, admise suivant les conditions d'exploitation de l'appareil et des vitesses maximales utilisées. Pour le mouvement de rotation, en pratique, on choisit une accélération en tête de flèche pouvant varier entre $0,1\text{m/s}^2$ et $0,6\text{ m/s}^2$, suivant la vitesse de rotation et la portée de la grue de manière à obtenir des durées d'accélérations de l'ordre de 5 à 10s dans les cas courants (Fédération Européenne de la Manutention 1.001 article [2.2.3.1.2](#)). [6]

a. 4 Réactions transversales dues au roulement du chariot

Les efforts liés au contact entre les galets et les rails, peuvent être calculés avec un coefficient de frottement f -égal à 0.2 (DIN 15018, chapitre 4.1.5). [3]

a.5 Effet de la force centrifuge

On tient compte de la force centrifuge due au mouvement d'orientation de la grue. Les effets centrifuges sont déterminés en tenant compte de la charge mobile de service et des poids propres des éléments de la grue tels que flèche et charge utile ayant son effet maximal.

a.6 Coefficients d'amplification des charges

a.6.1 Coefficient de choc ' ϕ ' affectant les poids propres

(NF E2-011, chapitre 2.1.5.1) Pour tenir compte des chocs résultant des mouvements de translation de la grue, les efforts dus aux poids propres doivent être affectés d'un coefficient de choc de valeur 1,1. [7]

a.6.2 Coefficient de la charge de levage Ψ

Pour tenir compte des effets dus à la mobilité des charges et à l'effet des chocs qui se produisent en cours de service, les efforts dus à la charge mobile de service doivent être affectés d'un coefficient dit 'coefficient de majoration dynamique'. Ce coefficient est fonction de la vitesse de levage et il prend en compte les effets des accélérations, de l'élasticité du câble de levage et de la charpente. Les valeurs de Ψ sont données par la courbe suivante :

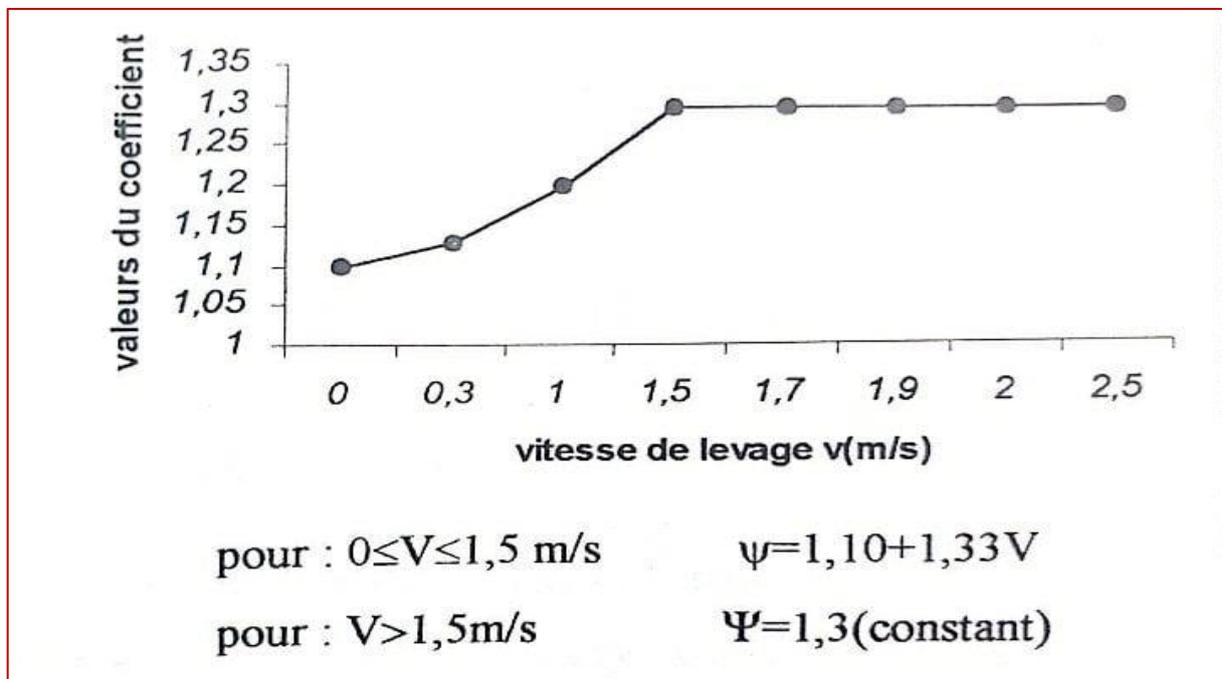


Figure 8 : Coefficient de majoration dynamique [8]

Une utilisation spéciale par dépose ou libération brutale de la charge utile Eventuellement, et dans des cas particuliers aux surcharges de neige et aux variations de température.

II.2.2.2 Combinaisons d'actions

Les sections des éléments sont calculées pour les conditions les plus défavorables, elles doivent résister aux sollicitations définies dans les différents cas de sollicitations suivants :

Combinaison 1 : appareil et chariot en service sans présence du vent. On considère les sollicitations statiques dues aux poids propres (G) multiplier par le coefficient dynamique (1.35.

Les sollicitations dues à la charge de service (Q) multiplier par le coefficient dynamique (1.50) et les différents effets d'inertie et centrifuge. $1,35 G+1,5Q1$

Combinaison 2 : appareil et chariot en service sans présence du vent. On considère les sollicitations statiques dues aux poids propres (G) multiplier par le coefficient dynamique (1.35). Les sollicitations dues à la charge de service (Q) multiplier par le coefficient dynamique (1.50) et les différents effets d'inertie et centrifuge. $1,35 G+1,5Q2$

Combinaison 3 : appareil et chariot en service sans présence du vent. On considère les sollicitations statiques dues aux poids propres (G) multiplier par le coefficient dynamique (1.35). Les sollicitations dues à la charge de service (Q) multiplier par le coefficient dynamique (1.50) et les différents effets d'inertie et centrifuge et on ajoute la sollicitation arrêt translation chariote. $1,35G+1,35Q1+AR.TCH.$

Combinaison 4 : appareil et chariot en service sans présence du vent. On considère les sollicitations statiques dues aux poids propres (G) multiplier par le coefficient dynamique (1.35). Les sollicitations dues à la charge de service (Q) multiplier par le coefficient dynamique (1.35) et les différents effets d'inertie et centrifuge et on ajoute la sollicitation arrêt translation chariote et rotation à l'extrémité. $1,35G+1,35Q2+AR.TCH.RO.EXT$

Combinaison 5 : appareil et chariot en service sans présence du vent. On considère les sollicitations statiques dues aux poids propres (G) multiplier par le coefficient dynamique (1.35). Les sollicitations dues à la charge de service (Q) multiplier par le coefficient dynamique (1.35) et les différents effets d'inertie et centrifuge et on ajoute la sollicitation arrêt rotation fleche . $1,35G+1,35Q2+ARF.$

Combinaison 6 : appareil et chariot en service sans présence du vent. On considère les sollicitations statiques dues aux poids propres (G) sans le multiplier par le coefficient dynamique (1.35). Les sollicitations dues à la charge de service (Q) multiplier par le coefficient dynamique (1.35) et les différents effets d'inertie et centrifuge. $GPQ1$

Combinaison 7 : appareil et chariot en service sans présence du vent. On considère les sollicitations statiques dues aux poids propres (G) sans le multiplier par le coefficient dynamique (1.35). Les sollicitations dues à la charge de service (Q) multiplier par le coefficient dynamique (1.35) et les différents effets d'inertie et centrifuge. $GPQ2$

II.3 Conclusion

On conclue que la vérification pour prouver la sécurité et la fonctionnalité de l'ouvrage s'effectue par des sollicitations et les différents effets d'inertie et centrifuge dans des combinaisons d'action pour le calcul.

Chapitre III :

Analyse de la structure

III. Analyse de la structure

III.1 Introduction :

L'analyse de la structure est réalisée dans le domaine élastique linéaire, les effets du second ordre sont ignorés sous de faibles déformations. En raison de la complexité de la structure à étudier, il s'agit plus précisément de l'étude d'éléments de réseau tridimensionnel d'éléments en treillis(espace). Ils sont extrêmement statiques leurs degrés d'hyperstatique étant très élevés, ce qui rend difficile la détermination manuelle des forces et des déplacements. Ensuite, nous avons choisi un logiciel de calcul de structure utilisant la méthode des éléments finis (SAP 2000).

III.2 Présentation de la méthode des éléments finis

III.2.1 Calcul des structures

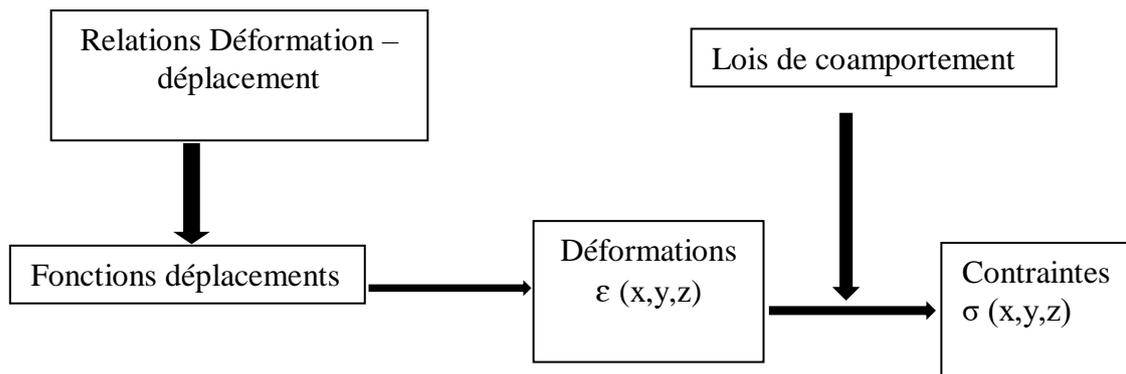
Les informations recherchées dans un problème de calcul de structure sont :

Les déplacements de chaque point de la structure ;

L'état de déformation en chaque point ;

L'état de contrainte en chaque point.

La fonction représentant le déplacement de chaque point de la structure peut être considérée comme la principale inconnue de notre problème. Si le déplacement en tout point est connu, alors en raison de la relation entre le déplacement de déformation et la loi de comportement, il est en effet facile d'en déduire la déformation et la contrainte. D'une manière très courante, il faut donc, pour résoudre un problème de calcul de structures, rechercher les trois fonctions déplacements $u(x, y, z, t)$, $v(x, y, z, t)$ et $w(x, y, z, t)$. Selon le diagramme suivant :



III.2.2 Les différentes étapes de résolution

III.2.2.1 Discrétisation de la structure en éléments finis

La discrétisation consiste à décomposer la structure en éléments simples appelés éléments finis. Leur nature dépendra du type d'ouvrage retenu lors de la modélisation. On parlera donc

d'élément fini "tige" ou « barres », élément fini "coque", élément fini tridimensionnel" volumiques, cette étape est traditionnellement appelée le maillage de la structure. [5]

III.2.2.2 Etude d'un élément

On peut considérer les fonctions déplacements comme inconnues principales du problème. Dans la majorité des cas, il n'est pas possible de trouver leur forme exacte. La méthode des éléments finis consiste à approcher ces fonctions inconnues sur chaque élément.

➤ Éléments unidimensionnels

L'élément barre :

Il illustre des composants structurels qui ne fonctionnent qu'en traction ou en compression. Dans cet élément, on suppose que seule la contrainte normale σ_x n'est pas nulle et est constante dans la section. Il s'agit généralement d'un élément à 2 nœuds, chaque nœud (u, v, w) a 3 inconnues ou degrés de liberté (DDL), car connaître l'allongement de l'élément est suffisant pour déterminer son énergie élastique. [5]

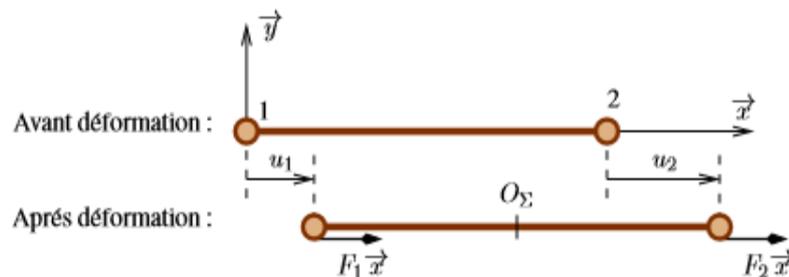


Figure 9 : Élément barre a deux nœud

➤ L'élément poutre

C'est un élément unidimensionnel, qui occupe toutes les hypothèses de la poutre longue. Il intègre l'énergie de la force normale, de la force de cisaillement, de la flexion et de la torsion. C'est généralement un élément à 2 nœuds, et chaque nœud contient 6 inconnues (DDL) : trois translations (u, v, w) et trois rotations $(0x, 0y, 0z)$ de la section efficace. Si l'utilisateur fournit les caractéristiques de la section transversale, la connaissance de l'inconnue à la fin permet de calculer l'énergie élastique en se basant sur la théorie de la poutre.

Exemple élément poutre :

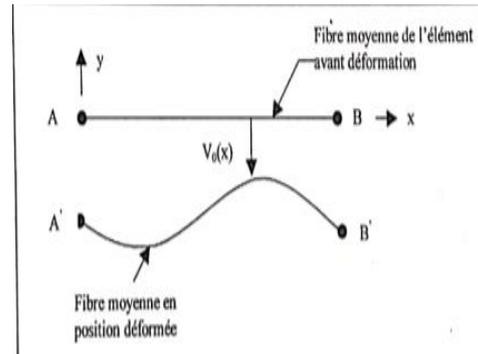


Figure 10 : Charpente avec assemblage de poutres

Élément poutre (A et B sont les nœuds de l'élément ; $v_0(x, t)$ est la fonction de déplacement inconnue ou la fonction de flèche). Dans le cas particulier du problème plan courbe simple, l'inconnue du problème mécanique est la fonction flèche $v_0(x, t)$. Cette fonction peut avoir une forme totalement indéterminée a priori. Dans la méthode des éléments finis, cette forme est approchée par un polynôme d'ordre élevé, permettant de satisfaire la condition de continuité de déplacement. [5]

On peut ainsi écrire :

Problème réel



$V_0(x,t)$

élément fini



Approximation



$$V_0(x,t) = a_0(t) + a_1(t)x + a_2(t)x^2 + a_3(t)x^3 + \dots$$

Avec : a_0, a_1, a_2 et a_3 les paramètres à déterminer.

Il convient de noter que cette approximation sur l'élément permet de remplacer la recherche d'une fonction $v_0(x,t)$ par la recherche d'un nombre de paramètres a_0, a_1, a_2 et a_3 . La prise en compte des conditions aux limites permet d'exprimer la fonction approchée $v_0(x,t)$ en fonction de paramètres ayant une signification physique évidente.

$V_0(x) = V_0(x,t) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + \dots$ relation de forme analogue à

$$V_0(x) = \left(1 - \frac{3x^2}{l^2} + \frac{2x^3}{l^3}\right)V_a + \left(x - 2\frac{x^2}{l} + \frac{x^3}{l^2}\right)\Theta_a + \left(\frac{3x^2}{l^2} - \frac{2x^3}{l^3}\right)V_b + \left(-\frac{x^2}{l^2} + \frac{x^3}{l^3}\right)\Theta_b + \dots$$

Dans cette expression, les paramètres à déterminer sont $v_a, \theta_a, v_b,$ et θ_b , sachant que : $v_a,$ et v_b sont les flèches à l'origine et à l'extrémité de l'élément (aux nœuds de l'élément).

$\Theta_a = \frac{dV_0(x=0)}{dx}$ et $\Theta_b = \frac{dV_0(x=1)}{dx}$: sont les rotations à l'origine et à l'extrémité de l'élément.

Sous forme matricielle, on obtient $V_0(x) = \{ \phi_1(x) \quad \phi_2(x) \quad \phi_3(x) \quad \phi_4(x) \} \begin{bmatrix} V_a \\ \Theta_a \\ V_b \\ \Theta_b \end{bmatrix}$

Les fonctions ϕ_1, \dots, ϕ_4 , déjà appelées fonctions de forme, sont aussi fonctions d'interpolation dans la méthode des éléments finis.

III.2.2.3 Généralisation

D'une manière tout à fait générale, on peut exprimer l'approximation faite sur un élément (e) comme suit :

$$(u) = [\phi] * \{q^{(e)}\}$$

Avec:

(u): le vecteur des fonctions déplacements (fonctions inconnues),

[ϕ]: la matrice des fonctions d'interpolation (fonctions connues),

{ $q^{(e)}$ }: le vecteur (à déterminer) des paramètres cinématiques (degrés de liberté) de l'élément (e).

Pour un problème dynamique, les champs des vitesses ou des accélérations prendront ainsi la forme générale suivante : (u)=[ϕ]*{ $q^{(e)}$ }. [5]

III.2.2.4 Matrice des raideurs et matrice des masses

Pour un élément (e) :

A partir du principe des travaux virtuels:

$$K^{(e)} = \int_{V_e} [B]^T [D][B] dV_e \text{ représente la matrice élémentaire des raideurs.}$$

Avec:

[B] : la matrice reliant les déformations aux paramètres cinématiques. Cette matrice est obtenue à partir des relations déformation-déplacement et de la matrice [ϕ].

[D] : la matrice qui traduit les relations contraintes-déformations.

V_e : le volume de l'élément (e).

$$[m^{(e)}] = \int_{V_e} \rho [\phi]^T [\phi] dV_e \text{ matrice élémentaire des masses.}$$

Quel que soit le type d'élément fini considéré, les expressions de (σ) et (ϵ) (vecteur des contraintes et vecteur des déformations) sont :

$$[\epsilon] = [B] \{q^{(e)}\} \quad ; \quad [\sigma] = [D] \{\epsilon\}.$$

III.2.2.5 Résolution du problème

L'analyse statique de la structure consiste à résoudre un système d'équations linéaires représenté par : $[k] \{U\} = \{F\}$. La résolution de ce système est une étape importante dans la méthode des éléments finis. Lorsque [k] ne dépend pas de {U}, il est linéaire et l'inconnue est Le nombre de degrés de liberté.

III.3 Principe de fonctionnement du logiciel

Parmi les logiciels les plus utilisés, nous citons le SAP2000, qui offre les performances de la technologie d'aujourd'hui (capacité de calcul, analyse statique et dynamique, vitesse d'exécution et précision). Les différentes étapes de calcul sont les suivantes :

- **Décrire la géométrie de la structure et ses propriétés mécaniques :**

La modélisation géométrique et mécanique d'une structure est basée sur deux pièces maîtresses à savoir les nœuds et les éléments. La dimension géométrique d'une structure est établie en plaçant des points (nœud), identifiés par leurs numéros dans un repère GLOBAL à l'aide de coordonnées tridimensionnelles. La géométrie de la structure sera complétée en connectant ces nœuds entre eux par des éléments spécifiques tels que : Poutre, plaques et coques etc. Chaque élément aura un numéro d'identification. [5]

- **Les nœuds :**

Sont des points de jonction des segments (ou de courbes). La structure sera donc un ensemble d'éléments reliés au niveau des nœuds. Par conséquent, la définition de la géométrie ou la modélisation géométrique de la structure passe par l'introduction en premier lieu des coordonnées tridimensionnelles de ces nœuds. Elles sont définies par rapport à un système de repère orthonormé OXYZ (dit : global), dont l'origine O peut être choisie arbitrairement par l'utilisateur.

- **Les degrés de liberté :**

Chaque nœud possède six degrés de liberté : trois rotations par rapport à OX, OY et OZ, respectivement (O_x , O_y et O_z) et trois translations selon les directions OX, OY et OZ, Respectivement (U_x , U_y et U_z).

Les degrés de liberté d'une structure spatiale sont à défaut libres ou peuvent être bloqués. Il y a lieu de bloquer les degrés de liberté des nœuds considérés comme appuis en fonction de nature de ces derniers (appuis simples, doubles, encastres, etc). L'introduction de telles informations se fait par l'intermédiaire du bloc RESTRAINT. Dans ce bloc les degrés de liberté doivent être déclarés soit libres ou actifs, soit inactifs ou bloqués. Dans les calculs, si un degré de liberté est déclaré actif, le programme calculera le déplacement dans la direction correspondante, dans le cas où il serait déclaré inactif, le but de l'analyse sera donc le calcul de la réaction correspondante. [5]

- **Repère global et repère local :**

Le repère global ayant un système de coordonnées cartésien (X,Y,Z) ou cylindrique est utilisé pour spécifier la position des nœuds, leurs conditions aux appuis, aux chargements et aux déplacements. Un repère local (1,2,3) au sein de l'élément type peut être utilisé, la position de ce repère diffère d'un élément à un autre.

➤ **Les éléments :**

• **Élément barre :**

Désigné par le bloc FRAME (exemple : poteaux, poutres, barre de ferme ou de poteaux en treillis etc.).

• **Élément coque :**

Désigné par le bloc SHELL (exemple voiles, coupole de mosquée...etc.).

• **Élément fini volumique :**

Modélisant des structures massives dans aucune dimension ne peut être négligée par rapport à d'autres, il est désigné par le bloc SOLID (exemple : éprouvette...)

➤ **Définition des matériaux :**

Il s'agit de définir les différentes propriétés mécaniques des matériaux utilisés et leurs introductions se fait par l'intermédiaire du bloc DEFINE MATERIALS. L'affectation des différentes propriétés matérielles aux éléments se fait par l'intermédiaire du bloc ASSIGN.

➤ **Décrire les chargements appliqués à la structure :**

Les chargements appliqués peuvent être : statiques ou dynamiques, ponctuels ou uniformément repartis, Introduits sous forme de forces ou sous formes de déplacements imposés aux nœuds de la structure.

➤ **Résultats obtenus :**

- Visualisation de tout ou partie du maillage.
- Visualisation de tout ou partie de la structure.
- Représentation des efforts généralisés.
- Visualisation des modes de vibration de la structure.

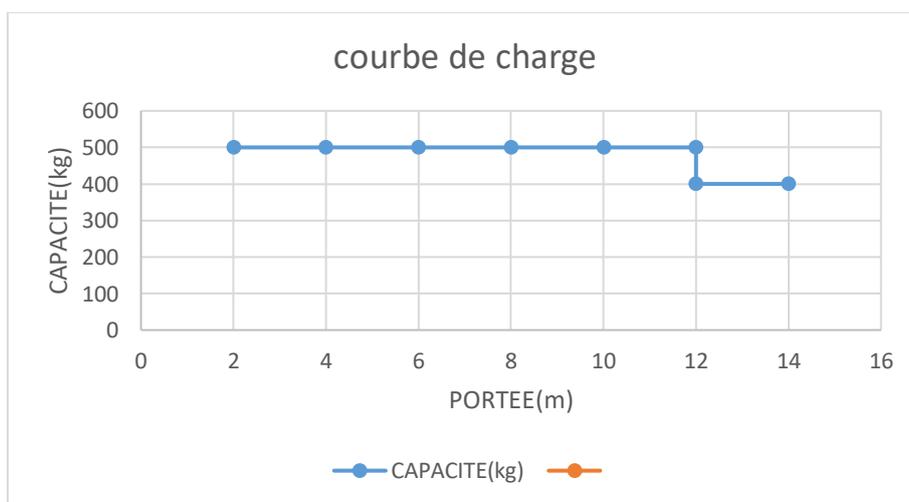


Figure 11 : courbe de charge.

III.4 Action à prendre en compte dans l'analyse

Les sollicitations devant intervenir dans notre cas : grue (Ub 14.04) sont :

- Le poids propre de la grue : $G=2830$ Kgf ;
- La charge mobile de service : les charges mobiles de service sont définies en fonction.
- Effets d'inertie dus aux accélérations des mouvements de direction, translation et d'orientation.
- Force d'inertie due à la rotation de la grue : Pour calculer les forces d'inertie on calcul les moments d'inertie des masses tournantes par rapport à l'axe de rotation (OZ) qui comprend :

➤ **Le moment d'inertie de la charge mobile de service : [4]**

$$I_{ch} = m_{ch} \cdot r^2$$

Avec :

m: masse de la charge (variable selon le cas de charge).

r: la distance entre le point d'application de la charge et l'axe de rotation (O,Z)

(Figure 12), varie selon le cas de charge.

NB: on ne considère que la charge appliquée comme un point matériel.

- Le moment d'inertie de la flèche :

- $I = M_f \cdot d_f^2 + M_f \left(\frac{a^2 + b^2}{12} \right)$

Avec :

M_f: masse de la flèche ($M=218$ Kg)

d_f: la distance entre le centre de gravité de la flèche et l'axe de rotation (oz)(Figure 12).

$$d_f = 7.250 \text{ m}$$

NB: Pour le calcul de son moment d'inertie la flèche est considérée comme une surface plane de longueur (a) et largeur (b).

A : Longueur de la flèche ($a = 14,25$ m).

B: Largeur de la base de la flèche ($b=0.365$ m).

Application numérique :

- **Le moment d'inertie de la flèche :**

$$I_f = 14896.2125 \text{ kg.m}^2.$$

- **Le moment d'inertie du mât :**

$$I(\text{mat}) = M_m \left(\frac{i^2 + j^2}{12} \right)$$

Avec:

M_m: la masse du mât ($M_m=2612$ kg.)

I : largeur de la base du mât ($i=0,5$ m)

J: longueur de la base du mât($j = 0.5$ m).

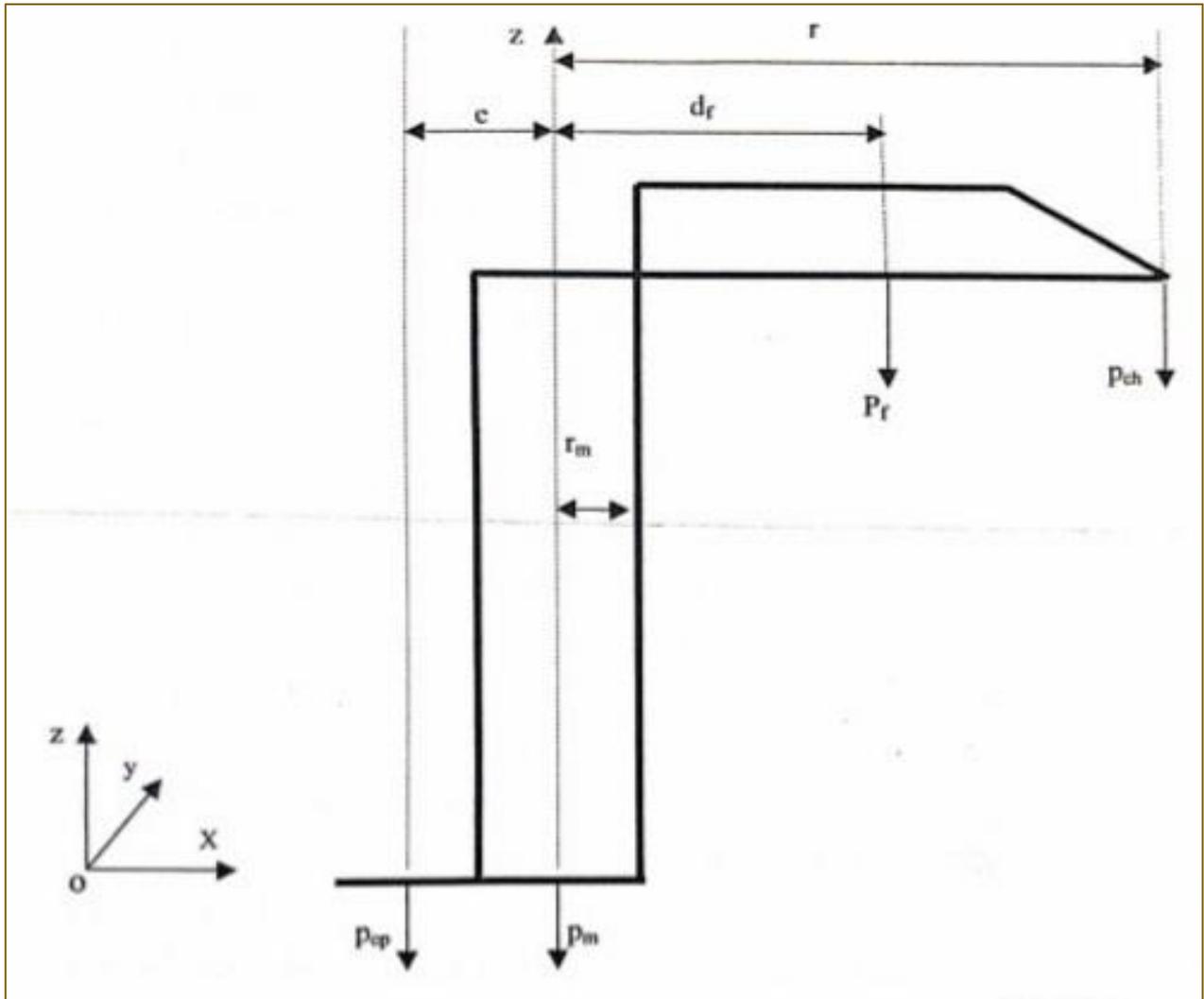


Figure12 : représentation des données et paramètre de calculs des moment d'inertie.

Avec :

p_f : poids de la flèche

p_{ch} : poids de la charge de service

p_{cp} : poids du contre poids

p_m : poids du mat

r_m : la distance entre l'axe de rotation (oz) et la membrure du mat

➤ **Accélération α (décélération) :**

Dans les cas courants, les durées d'accélération sont d'ordre de 5 à 10secondes. On prend le cas le plus défavorable à $t= 5$ secondes

La vitesse de rotation $\omega=\alpha t$ donc, $\alpha= \omega /t$. avec : α : accélération angulaire (Mouvement uniformément accélère ou décélère.)

$\omega =0,105$ rad/s.

$\alpha=0.021$ rad /s².

Force d'inertie de la flèche (Fif):

$$F_{if} = \frac{I_f}{d_f} \alpha \text{ avec: } I_f = m \cdot r^2$$

$I_f = 14896.2125 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ moment d'inertie de la flèche

$D_f = 7.250 \text{ m}$ $M_f = 283.4 \text{ Kg}$. $A = 0,365 \text{ m}$. $b = 14 \text{ m}$.

$F_{if} = 43.1905 \text{ N}$.

- Force d'inertie de la charge d'exploitation P (F_{ipr}):

$$F_{ipr} = m r \alpha$$

- Calculs du cas le plus défavorable

Tableau III-01 : tableau de charge et le moment de rotation max.

| La charge exploitation en (N) | Le moment de rotation max en (Nm) |
|-------------------------------|------------------------------------|
| F1=500 | 3625 |
| F2=400 | 5700 |

- Calcul du moment de rotation max :

$$M = r \cdot F \cdot \sin \alpha \text{ donc } m_1 = 3625 \text{ Nm} \quad m_2 = 5700 \text{ Nm}$$

Donc le cas le plus défavorable est avec f_2

$$F_{ife} = \frac{I_f}{d_f} \alpha = m \cdot r \cdot \alpha$$

$r = 14.250 \text{ m}$ $M_{fe} = 400 \text{ Kg}$.

$F_{ife} = 155.61 \text{ N}$.

Avec:

M: Masse de la charge d'exploitation et le poids d la grue

r : La distance entre le point d'application de la charge d'exploitation et l'axe de rotation (oz) (figure III.4), varie selon le cas de charge.

Force d'inertie du mât (F_{im}):

$$F_{im} = \frac{I_m}{r_m} \alpha$$

Avec :

$M_m = 2612 \text{ kg}$ $r_m = 0.25 \text{ m}$

$I_m = 212,225 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, Moment d'inertie du mât.

r_m : Distance entre l'axe de rotation (oz) et la membrure du mât ($r = 0,25 \text{ m}$.)

$F_{im} = 17.8269 \text{ N}$.

Effet d'inertie du au mouvement de translation du chariot (au démarrage ou au Freinage):

$$F_{ipt} = m \cdot \gamma$$

$F_{ipt} = 1839.5 \text{ N}$

Avec :

m: La masse de la charge d'exploitation, varie selon le cas de charge.

γ : Décélération du chariot au freinage. ($\gamma = 2.83 \text{ m/s}$)

Effets de la force centrifuge :

La force centrifuge due au mouvement de rotation de la grue :

La force centrifuge de la flèche : $F_{if} = M_f \cdot \omega^2 \cdot d_f$

Avec:

M_f : masse de la flèche ($M_f = 218 \text{ kg}$).

ω : la vitesse de chariotage ($\omega = 0.105 \text{ rad/s}$). d_f (figure 12) = 7,250 m

$F_{if} = 26.14 \text{ N}$.

A La force centrifuge de la charge d'exploitation :

$F_{cp} = m \cdot \omega^2 \cdot r$

$F_{cp} = 51.96 \text{ N}$

Avec:

r: La distance entre le point d'application de la charge d'exploitation et l'axe de Rotation (oz) (figure 13), varie selon le cas de charge.

III.5 Analyse de la structure

Dans les systèmes en treillis, les barres fonctionnent en mode flexion-compression et flexion-traction. On étudie l'effort axial qui domine à plus de 75% devant les efforts flexion ou autres.

Durant les calculs sur le logiciel, nous ne pouvons pas supposer les nœuds articulés ou soudés. Nous les supposons rigides, ce qui justifie l'apparition des moments. Ces derniers sont faibles négligeable.

III.5.1 Analyse des déformées et diagrammes de forces

III.5.1.1 Les Déformées

Sous toutes nos combinaisons nous avons :

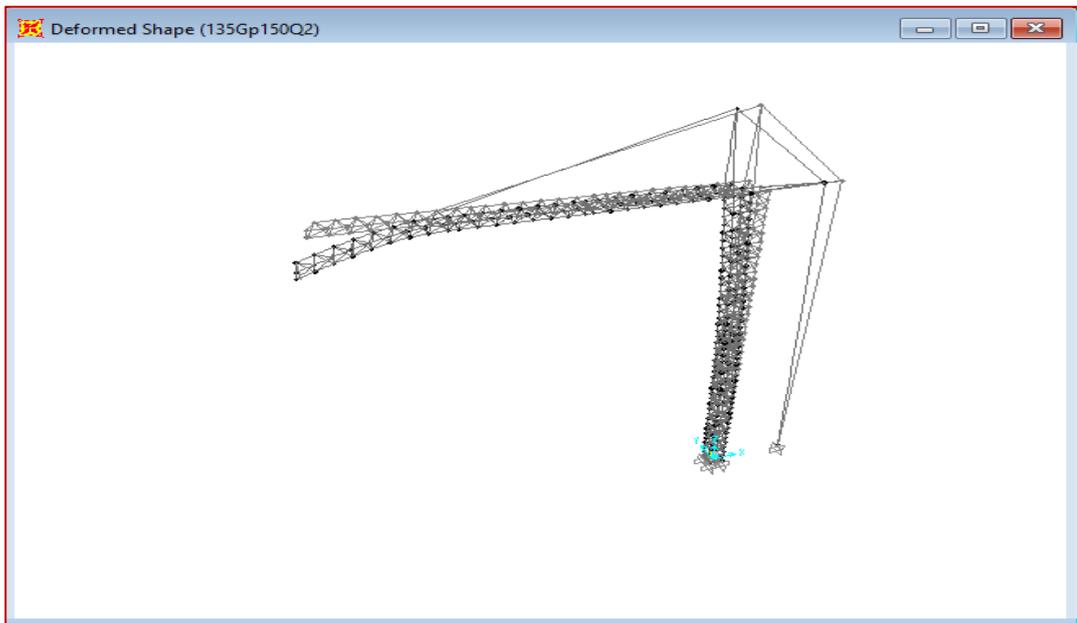


Figure 13: les déformées de la structure a (135G+150Q2).

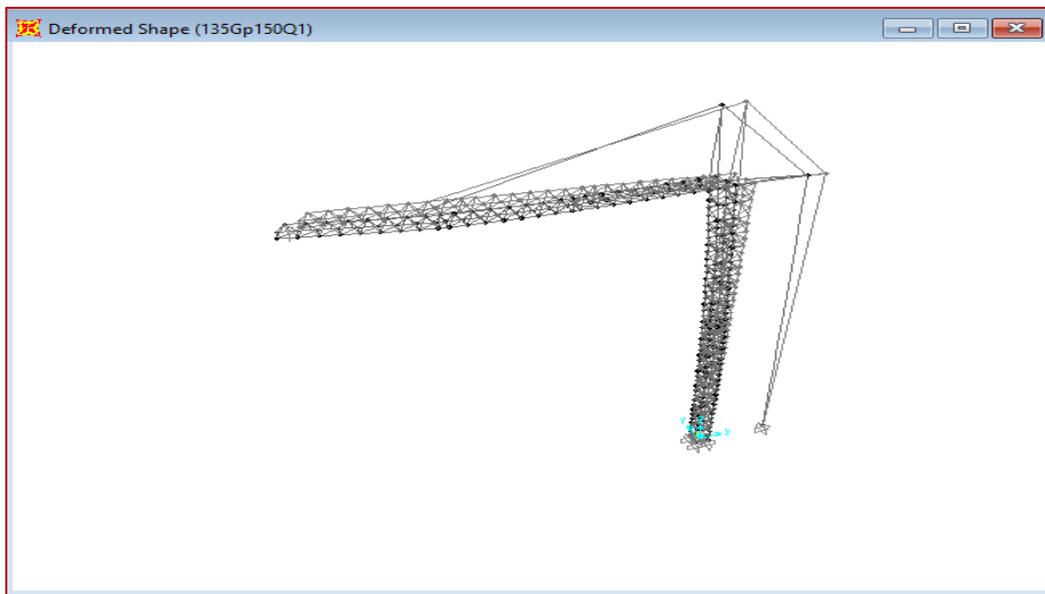


Figure 14: Les déformées de la structure à (135G+150Q1).

En visualisant la déformée sous les différentes combinaisons comme présenté dans ces photos (figure 13,14) on constat que le mat es la flèche ont subis une flexion justifiée par les déplacements des nœuds.

III.5.1.2 Les Diagrammes des forces

Notre modèle est constitué d'un système en treillis, les éléments fonctionnent seulement sous l'effort de traction et de compression. Nous analysons les diagrammes pour vérifier le modèle.

- Pour la combinaison (135GP150Q1) :

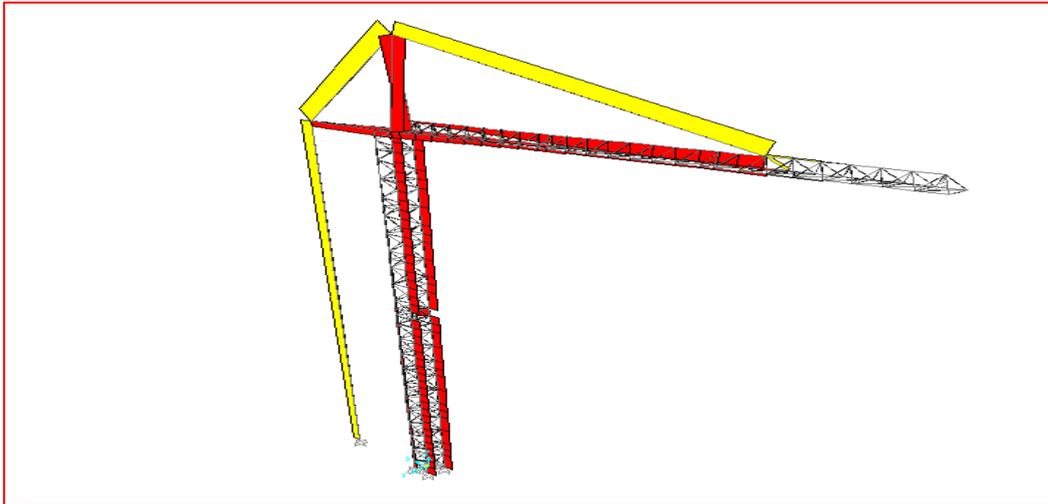


Figure 15 : Diagramme de forces axiales.

Nous avons une distribution des efforts internes sur membrures du mat, on visualise une compression (en rouge) jusqu'aux poinçons verticaux et horizontaux et les membrures supérieures de la flèche avec la section les plus sollicités ou la force max au point d'application. La traction (en jaune), le câble est sollicité, notre structure fonctionne en traction-compression.

- Pour la combinaison (135GP150Q2P.ARF) :

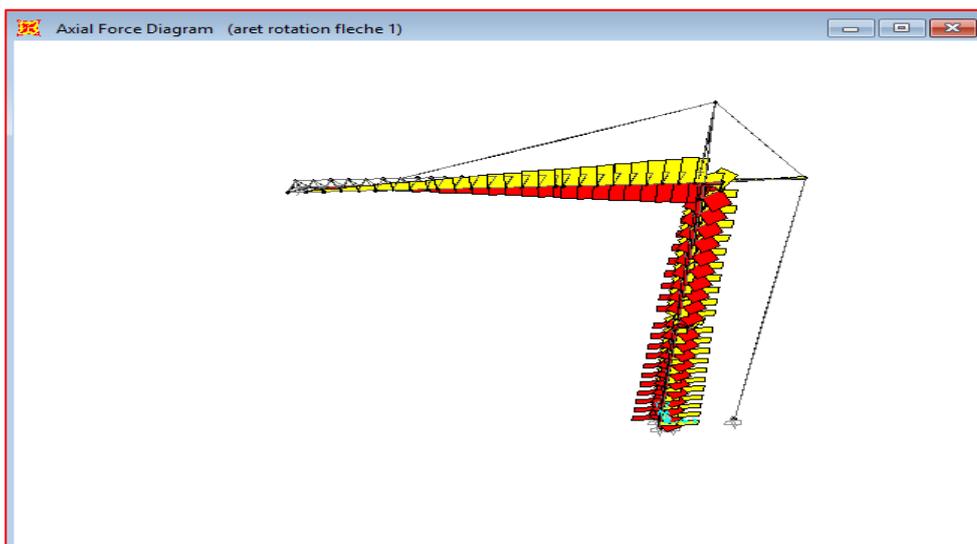


Figure 16 : Diagramme force axial (135GP150Q2PARF)

Nous avons remarqué une distribution des efforts internes sur la structure, sur les membrures intérieures du mat et de la flèche, on visualise une compression (en rouge) avec la section la plus sollicitée se concentre sur les membrures du mat. La traction (en jaune) est partagée sur les membrures extérieures de mats, les diagonales du mats et les membrures supérieures de la flèche ou la section la plus sollicitée se concentre, notre structure fonctionne uniquement en traction-compression.

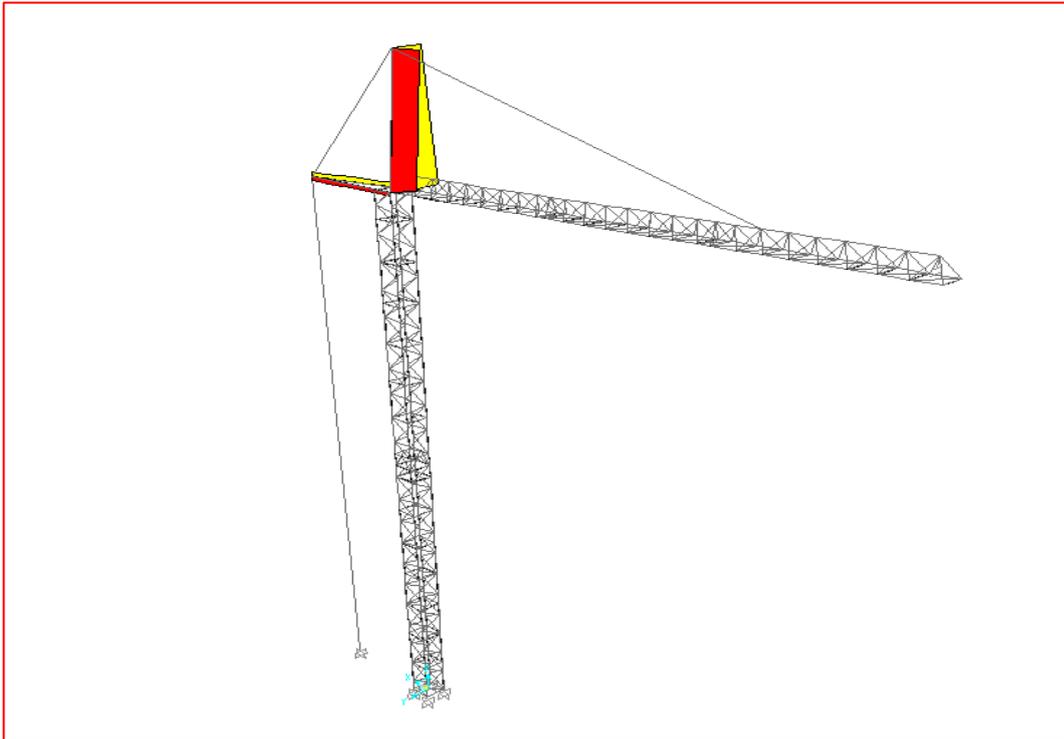


Figure 17 : Diagramme de torsion.

Les valeurs des moments sont très faibles à moins de 25%.

Pour la combinaison (135GP150Q2) :

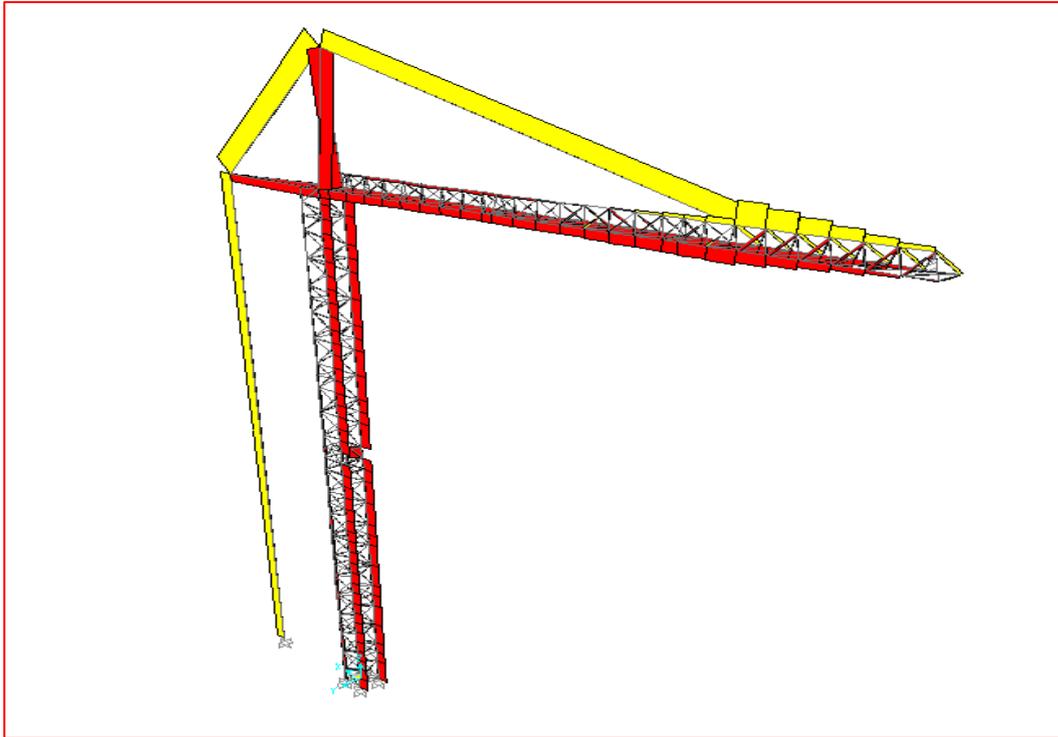


Figure 18 : Diagramme des forces axiales.

Nous remarquons une distribution des efforts internes sur membrures du mat, on visualise une compression (en rouge) jusqu'aux poinçons verticaux et horizontaux avec la section la plus sollicitée ou la force max avant le point d'application de la force. La traction (en jaune) le câble est sollicité et les membrures supérieures de tête de flèche, notre structure travaille uniquement en traction, compression.

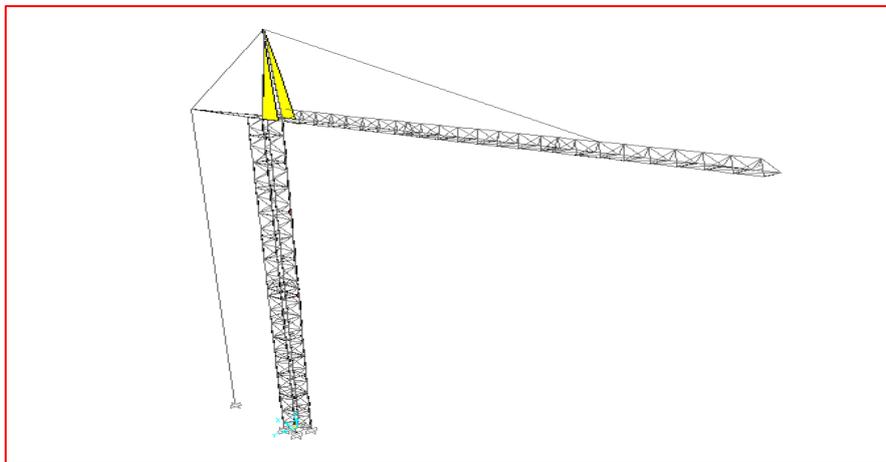


Figure 19 : Diagramme moment

Les moments sont négligeables.

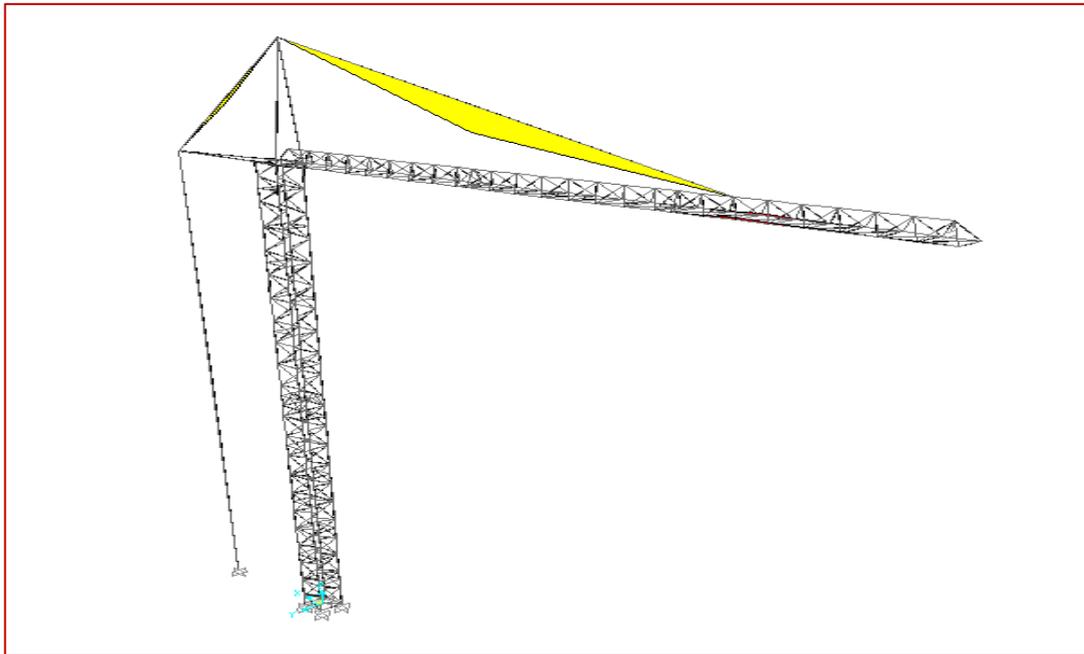


Figure20 : Diagramme moment.

Nous remarquons une traction sur le câble et la flexion est due à son poids propre donc les moments sont négligeables.

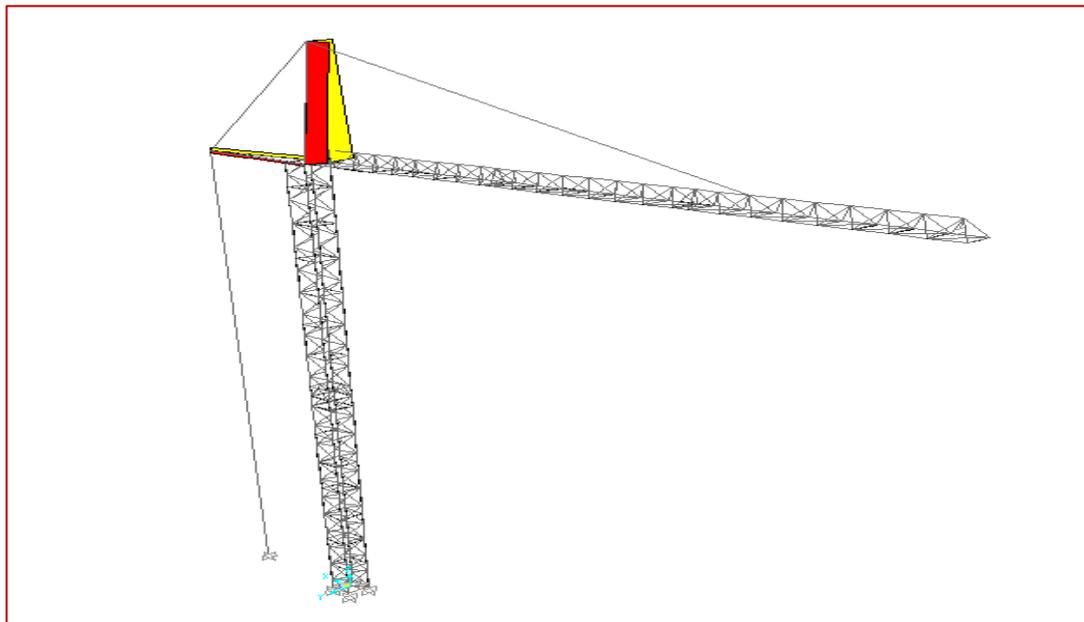


Figure21 : Diagramme de torsion.

Nous avons une distribution des efforts interne en visualise une compression (en rouge) et traction (en jaune) sur les poinçons verticaux et horizontaux ou la section les plus sollicité mes la force est faible.

III.5.2 Analyse des déplacements

- Les déplacements des nœuds des éléments de la flèche sous les deux combinaisons sans majoration varient de :

Suivant l'axe (oz) =14.52mm et suivant l'axe (ox) =-27.7 mm.

- Les déplacements des nœuds des éléments de mât varient de

Suivant l'axe (ox)=-28.2mm et L'axe (oz)=-7.5mm

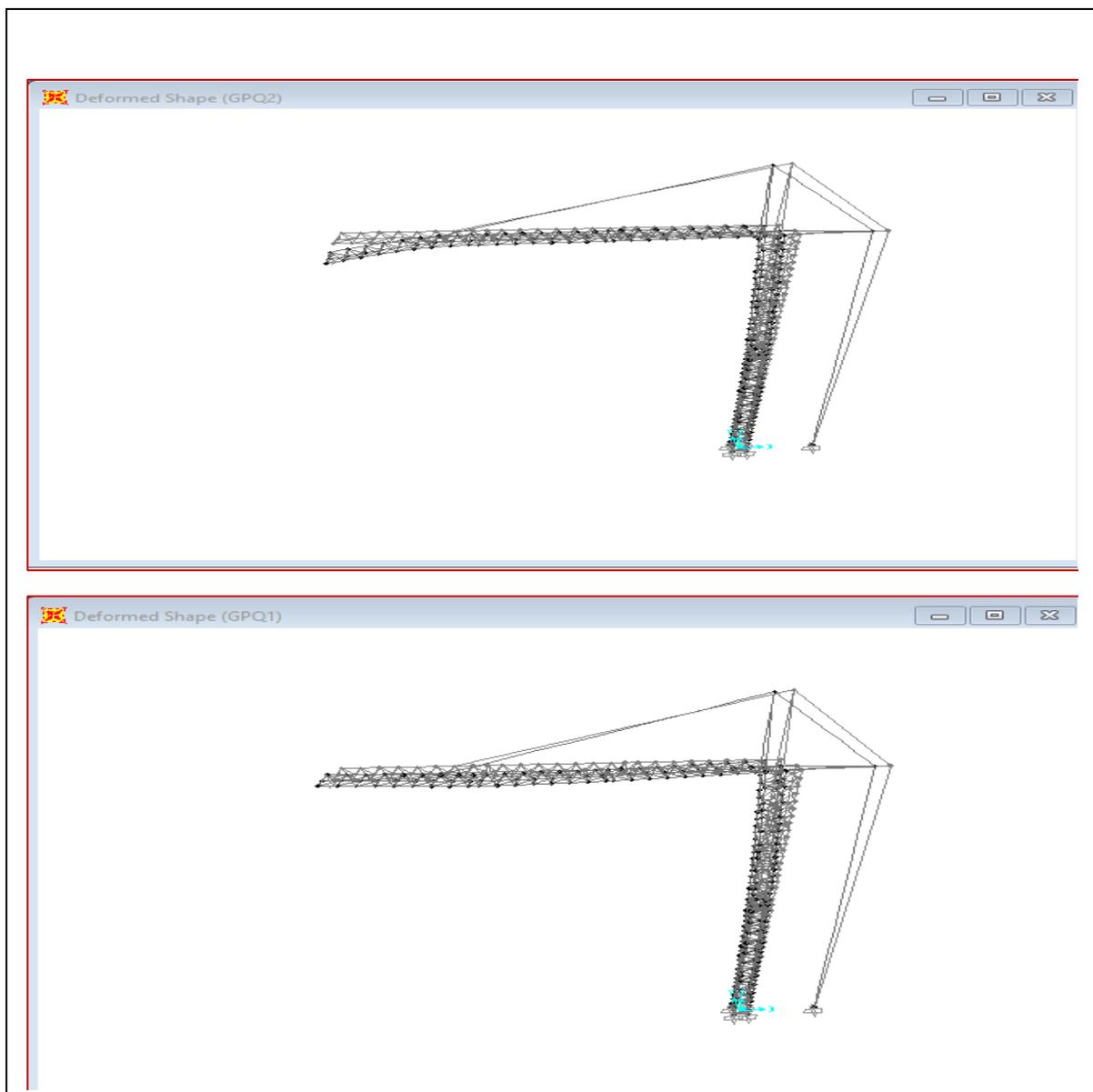


Figure 22 : RésultatsSAP2000 déformation

III.6 L'analyse modal (sans tenir compte de la charge de manutention)

Les modes de vibrations :

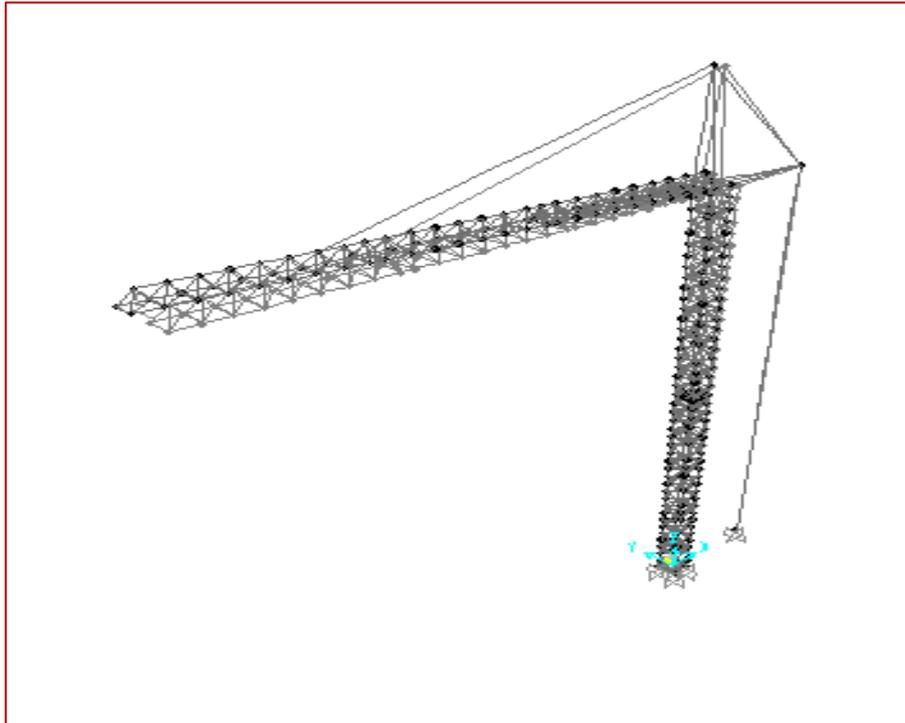


Figure23 : Mode 1.

Ce premier mode est un mode de vibration avec une periode de 1.77sec et un facteur de participation massique de vibration selon l'axe y =41% par contre faible selon les autres axes (voire tableau 2).

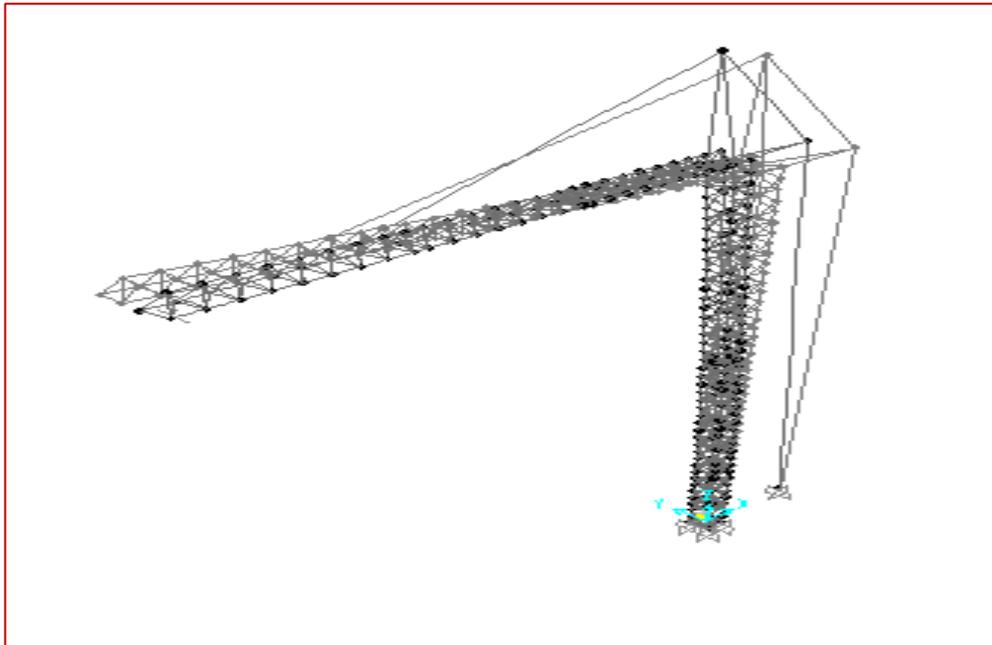


Figure 24 : Mode 2.

Ce dixieme mode est un mode de vibration avec une periode de 1,15 secondes et un facteur de participation massique de vibration selon l'axe $y=40\%$ par contre faible selon les autres axes (voire tableau 2) et on constate une flexion sur le mat et la fleche .

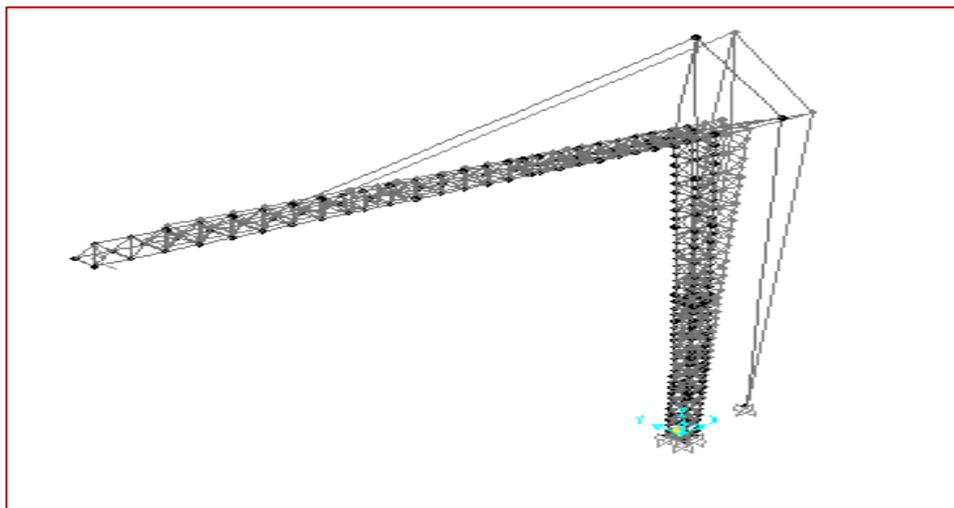


Figure 25 : Mode 3.

Le troisieme mode est une vibration avec une periode de 1.11sec et un facteur de participation massique de vibration selon l'axe $X=83\%$ (voire tableau 2) et le mat subit une flexion .

Tableau 2 : Différents modes et leur participation massique.

| OutputCase | StepType | StepNum | Period Sec | UX | UY | UZ | SumUX | SumUY |
|------------|----------|-----------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------|
| MODAL | Mode | 1,000000 | 1,778011 | 7,789E-06 | 0,41 | 5,186E-09 | 7,789E-06 | 0,41 |
| MODAL | Mode | 2,000000 | 1,149659 | 8,811E-04 | 0,40 | 7,156E-07 | 8,889E-04 | 0,81 |
| MODAL | Mode | 3,000000 | 1,118968 | 0,83 | 3,461E-04 | 7,622E-04 | 0,83 | 0,81 |
| MODAL | Mode | 4,000000 | 0,156198 | 4,239E-07 | 4,204E-02 | 2,397E-06 | 0,83 | 0,85 |
| MODAL | Mode | 5,000000 | 0,135716 | 2,261E-02 | 1,231E-05 | 0,26 | 0,86 | 0,85 |
| MODAL | Mode | 6,000000 | 0,128739 | 1,325E-05 | 5,190E-02 | 9,716E-05 | 0,86 | 0,90 |
| MODAL | Mode | 7,000000 | 0,095568 | 3,495E-02 | 7,638E-04 | 2,173E-02 | 0,89 | 0,91 |
| MODAL | Mode | 8,000000 | 0,094258 | 3,550E-02 | 6,595E-04 | 2,384E-02 | 0,93 | 0,91 |
| MODAL | Mode | 9,000000 | 0,078074 | 5,292E-05 | 4,302E-05 | 4,851E-03 | 0,93 | 0,91 |
| MODAL | Mode | 10,000000 | 0,066697 | 2,995E-06 | 1,757E-02 | 1,829E-06 | 0,93 | 0,92 |
| MODAL | Mode | 11,000000 | 0,045883 | 2,929E-06 | 1,776E-02 | 1,108E-05 | 0,93 | 0,94 |
| MODAL | Mode | 12,000000 | 0,034081 | 2,728E-02 | 5,193E-10 | 1,151E-03 | 0,96 | 0,94 |

III.7 Conclusion

Suite à l'analyse par éléments finis de cette structure on a pu constater que les moments fléchissant sollicitant ont une faible influence sur le comportement des barres. Ce qui confirme la modélisation classique qui consiste à supposer que les liaisons entre les barres comme des articulations (système articulé). Ainsi, il en ressort que notre structure en treillis travaille essentiellement en traction-compression avec toutefois une assez faible participation des moments fléchissant. Par ailleurs, l'étude des différents modes de vibration, nous a montré que la structure est globalement souple avec une période propre de 1.11 sec munie d'un facteur de participation massique de 83% correspondant à un mode de vibration selon la direction de la flèche (voir figure 23). Sachant que les périodes d'excitation sous forme de rafales de vent avoisinent approximativement la valeur de 1 sec ; Ceci permet de déduire que le risque de résonance n'est pas totalement écarté pour ce mode de vibration.

ChapitreIV :

Dimensionnement des éléments

IV. Dimensionnement des éléments : [8]

IV.1 Principe de dimensionnement (selon les règles de l'Eurocode 3)

IV.1.1 Vérification à l'état limite de service

Concernant cette structure métallique et ses éléments constitutifs, l'état limite de service correspond au déplacement vertical et/ou horizontal qui affecte sa fonction normale.

Afin d'éviter de dépasser le statut limite de ses services, il est nécessaire de les limiter. Pour la grue, les éléments de la flèche doivent être dimensionnés de manière que leurs déplacements verticaux soient appropriés à un bon fonctionnement (circulation) du chariot. A cet effet, nous adoptons une valeur limite admissible du déplacement vertical égale à $L/400$ avec :

L : la longueur totale de la flèche.

IV.1.2 Vérification à l'état limite ultime

IV.1.2.1 Classification des sections transversales

Quatre classes de section ont été définies, allant de la section 1 (la plus performante) à la section 4 (la plus fragile), soit :

Classe 1: Sections transversales avec résistance plastique importante sans risque de voilement local, pouvant former une rotule plastique et ont une capacité de rotation.

Classe 2: Sections transversales pouvant atteindre leur résistance plastique, sans risque de voilement local mais avec une capacité de rotation limitée.

Classe 3: Sections transversales pouvant pas former de rotule plastique avec capacité d'atteindre leur résistance élastique en fibre extrême mais non leur résistance plastique, du fait des risques de voilement local.

Classe 4 : Sections transversales pouvant pas atteindre leurs résistances élastique du fait des risque de voilement local.

Tableau 3: Sollicitation résistance ultime.

| Classe | Capacité de rotation | Calcul des sollicitations | Résistance de calcule |
|--------|----------------------|--------------------------------------|--------------------------------|
| 1 | Importante | Plastique | Plastique |
| 2 | Limite | Plastique si justification par essai | Plastique |
| 3 | Nulle | Elastique | Elastique sur section complété |

| Classe | Modèle de comportement | Résistance de calcul | Capacité de rotation plastique |
|--------|------------------------|------------------------------------|--------------------------------|
| 1 | | plastique sur section complète | Importante |
| 2 | | plastique sur section complète | Limitée |
| 3 | | élastique sur section complète | Aucune |
| 4 | | élastique sur section efficace | Aucune |

Tableau 4: Classification des sections.

IV.2 Bases de calculs du nouveau règlement Eurocode 3

IV.2.1 Résistance des sections transversales

IV.2.1.1 Effort axial de traction (N)

Dans un élément sollicité en traction axiale, l'effort de traction N dans chaque section transversale doit rester inférieur à l'effort résistant de traction, soit:

$$N \leq N_R = \min [N_{pl} ; N_u ; N_{net}]$$

Avec:

$$N_{pl} = A \cdot \frac{f_y}{\gamma_{m0}} \text{ (Résistance plastique de la section brute).}$$

$$N_u = 0.9 \cdot A_{net} \cdot \frac{f_u}{\gamma_{m2}} \text{ (Résistance ultime de la section nette au droit des trous de fixation).}$$

$$N_{net} = A_{net} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{m0}} \text{ (Résistance plastique de la section nette pour les assemblages par boulons précontraints à l'É.L.U.).}$$

IV.2.1.2 Effort axial de compression (N)

Dans un élément sollicité en compression axiale, l'effort de compression N dans chaque section transversale doit rester inférieur à l'effort résistant de compression. Soit :

$$N \leq N_R, \text{ avec:}$$

Pour les sections de classe 1, 2 ou 3:

$$N_R = N_{pl} = A \cdot \frac{f_y}{\gamma_{m0}} \text{ (résistance plastique de la section brute)}$$

IV.2.1.3 Moment fléchissant (M)

En l'absence d'effort tranchant, le moment fléchissant M dans chaque section transversale doit rester inférieur au moment résistant, soit:

$$M \leq M_R, \text{ avec :}$$

Pour les sections de classe 1 ou 2:

$$M_R = M_{pl} = W_{pl} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{m0}} \text{ (moment résistant plastique)}$$

Pour les sections de classe 3:

$$M_R = M_{el} = W_{el} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{m0}} \text{ (moment résistant élastique)}$$

IV.2.1.4 Effort tranchant (V)

L'effort tranchant V dans chaque section transversale doit rester inférieur à l'effort tranchant résistant, soit:

$$V \leq V_{pl} = 0.58 \cdot f_y \cdot \frac{A_v}{\gamma_{m0}}$$

Où A_v est l'aire de cisaillement, qui peut être déterminée comme suit (pour un effort Parallèle à l'âme):

- Profils laminés I ou H:

$$A_v = A - 2b \cdot t_f + (t_w + 2r) \cdot t_f$$

- Profils laminés U :

$$A_v = A - 2b \cdot t_f + (t_w + r) \cdot t_f$$

Profils reconstitués sont des I ou H:

$$A_v = (h - 2t_f) \cdot t_w$$

IV.2.1.5 Moment fléchissant + effort tranchant (M + V)

Le moment résistant plastique d'une section transversale est réduit par la présence de cisaillement.

Si l'effort tranchant est faible, cette réduction est négligeable (et compensée par l'écroutissement du matériau).

IV.2.1.6 Moment fléchissant + Effort Axial

CONCEPTION ET CALCUL DES STRUCTURES MÉTALLIQUES SELON L'EUROCODE3.

En revanche, lorsque l'effort tranchant dépasse la moitié de l'effort tranchant plastique résistant, il faut prendre en compte son interaction sur le moment résistant plastique. Soit:

$$\text{Si } V \leq 0.5 V_{pl}, M \leq M_R$$

$$\text{SI } V > 0,5 V_{pl} . M \leq M_v$$

Avec:

M_R : moment résistant plastique tel que défini au § 4.2.1.3

M_v = moment résistant plastique réduit du fait de l'effort tranchant, déterminée en utilisant une limite d'élasticité réduite f_{red} pour l'aire de cisaillement seule, soit:

$$f_{red} = (1 - \rho) \cdot f_y$$

Avec:

$$\rho = \left[\left(2 \cdot \frac{V}{V_{pl}} \right) - 1 \right]^2$$

Pour les sections transversales à semelles égales et fléchies suivant l'axe de forte d'Inertie, on obtient:

$$M_v = \frac{(W_{pl} \cdot f_y - W_v \cdot f_y + W_v \cdot f_{red})}{\gamma_{mo}}$$

$$M_v = (W_{pl} - W_v \cdot \rho) \cdot \frac{f_y}{\gamma_{mo}}$$

Avec M_v module de résistance plastique de l'aire de cisaillement A_v

$$A_v = h \cdot t_w \text{ et } W_v = \frac{h t_w^2}{w} = \frac{A_v^2}{4 t_w}$$

Soit:
$$M_v = (W_{pl} \frac{\rho \cdot A_v^2}{4 t_w}) \frac{f_y}{\gamma_{m0}}$$

IV.2.1.7 Moment fléchissant+ effort axial (M + N)

- SECTIONS DE CLASSES 1 ET 2

Pour les sections de classes 1 et 2, il faut vérifier, en l'absence d'effort tranchant, que le moment fléchissant M reste inférieur au moment résistant plastique M_N réduit du fait de l'effort axial, soit :

$$M \leq M_n \text{ avec :}$$

Pour un plat:

$$M_N = M_{pl} \left(1 - \left(\frac{N}{N_{pl}} \right)^2 \right)$$

Et le critère devient:

$$\left(\frac{M}{M_{pl}} \right) + \left(\frac{N}{N_{pl}} \right)^2 \leq 1$$

Pour une section comportant des semelles:

- si $N \leq \min[0,25 N_{pl}; 0,50 A_w \cdot \frac{f_y}{\gamma_{m0}}]$, Alors $M_N = M_{pl}$
- si $N > \min[0,25 N_{pl}; 0,50 A_w \cdot \frac{f_y}{\gamma_{m0}}]$, $A_w = A - 2 b t_y$ étant l'aire de l'âme

Il faut distinguer 3 cas:

IV.2.1.7.a- Flexion autour de l'axe yy

$$M_{Ny} = M_{ply} \cdot \frac{\left(1 - \frac{N}{N_{pl}} \right)}{1 - 0.5 \cdot a} \text{ Avec : } a = \min \left[\frac{A_w}{A}; 0.5 \right]$$

IV.2.1.7.b Flexion autour de l'axe zz

$$M_{Nz} = M_{Nz} = M_{plz} \cdot \left[1 - \left(\frac{\frac{N}{N_{pl}} - a}{1 - a} \right)^2 \right]$$

$$\text{Avec } a = \min \left[\frac{A_w}{A}; 0.5 \right].$$

IV.2.1.7.c- Flexion bi-axiale

$$\left[\frac{M_y}{M_{Ny}} \right]^\alpha + \left[\frac{M_z}{M_{Nz}} \right]^\beta \leq 1$$

Les exposants α et β valant, pour des sections en I et H:

$$\alpha = 2 \text{ et } \beta = 5 \frac{N}{N_{pl}} \text{ avec } \beta \geq 1$$

SECTIONS DE CLASSE 3

Les sections de classe 3 sont considérées comme satisfaisantes, si la contrainte longitudinale maximale σ_x vérifie la condition:

$$\sigma_x \leq \frac{F_y}{\gamma_{m0}}$$

Ce qui s'écrit encore:

$$\frac{N}{A} + \frac{M_y}{W_{ely}} + \frac{M_z}{W_{elz}} \leq \frac{f_y}{\gamma_{m0}}$$

IV.2.1.8 Moment Fléchissant+ Effort Axial + Effort Tranchant (M+V+N)

Lorsque l'effort tranchant dépasse la moitié de l'effort tranchant résistant plastique, il faut prendre en compte son effet, ainsi que celui de l'effort axial, pour calculer le Moment résistant plastique réduit.

Si $V \leq 0.5 V_{pl}$ \implies critères du paragraphe 4.4.6. à vérifier.

Si $V > 0.5 V_{pl}$ \implies La résistance de calcul de la section transversale aux combinaisons de moment et effort axial doit être calculée en utilisant une limite d'élasticité réduite f_{red} pour l'aire de cisaillement A.

Avec:

$$f_{red} = (1-\rho) \cdot f_y \quad \text{et} \quad \rho = \left(\frac{2V}{V_{pl}} - 1 \right)^2$$

IV.2.2 Vérification au flambement

- Calcul des élancements réduits :

$$L = 0,642 \text{ m.} \quad i_{22} = 0,014 \text{ m.} \quad i_{33} = 0,014 \text{ m.}$$

$$\lambda_{22} = \frac{L}{i_{22}} \quad ; \quad \bar{\lambda}_{22} = \frac{\lambda_{22}}{\lambda_{cr}}$$

Il y a lieu de tenir du risque de flambement.

On vérifie si:

$$\frac{N}{x_{min} \cdot A \cdot f_y / \gamma_{m1}} + \frac{K_3 M_{33}}{W_{el33} \cdot f_y / \gamma_{m1}} + \frac{K_2 M_{22}}{W_{el22} \cdot f_y / \gamma_{m1}} \leq 1$$

IV.3 Analyse des résultats obtenus:

IV.3.1 Analyse des efforts internes: (Design Combo Numériquement)

IV.3.1.1 Analyse des efforts internes dans les éléments de la flèche:

IV.3.1.1.a Les éléments des membrures inférieures de la flèche: (L 50*5)

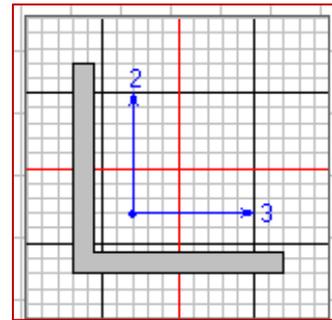
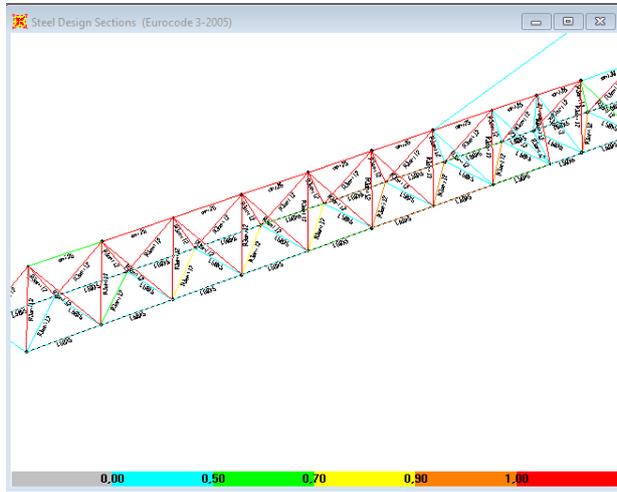


Figure 26 : resultat SAP2000

L50*5

L'élément le plus sollicité des membrures inférieures se situe à $x=8.653$ et $y=260$, $z=14512.5$ sous la combinaison 135G+150Q2. LES résultats selon Euro code 3 sont :

C'est un élément de classe 3 avec coefficient de sécurité de 0,95.

➤ L'effort axial sollicitant:

$$N=26.328 \text{ kN}$$

➤ Les moments fléchissant sollicitant :

$$M_{22} = - 13.246 \text{ kN.m selon l'axe 2}$$

$$M_{33} = - 439.868 \text{ kN.m selon l'axe 3}$$

➤ Les efforts tranchants sollicitant:

$$V_2 = - 0,432 \text{ kN selon l'axe 2}$$

$$V_3 = - 0.0554 \text{ kN Selon l'axe 3}$$

➤ Le moment de torsion

$$T = 0.106 \text{ kN.m}$$

➤ L'effort axial résistant (Traction et Compression)

$$N_R = 102.610 \text{ kN}$$

$N \leq N_R$ donc vérifié

➤ Les moments fléchissant résistants:

$$M_{22rd} = - 439.868 \text{ kN.m}$$

$$M_{33rd} = - 13.246 \text{ kN.m}$$

- Les efforts tranchants résistants:

$$V_{2,rd}=102.610 \text{ kN.}$$

$$V_{3rd}=102.610 \text{ kN}$$

L'influence de l'effort axial sollicitant est de 27% et celle du moment fléchissant sollicitant M_{22} de l'axe demi forte inertie est de 73% sur l'élément. L'influence des autres efforts et moments sollicitant (V_1 , V_2 et M_{22}) est négligeable.

VI.3.1.1.b- Les éléments en diagonales inclinées du treillis de la flèche : barre (d=12mm)

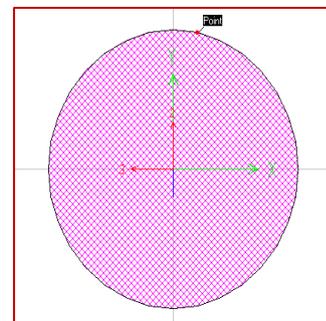
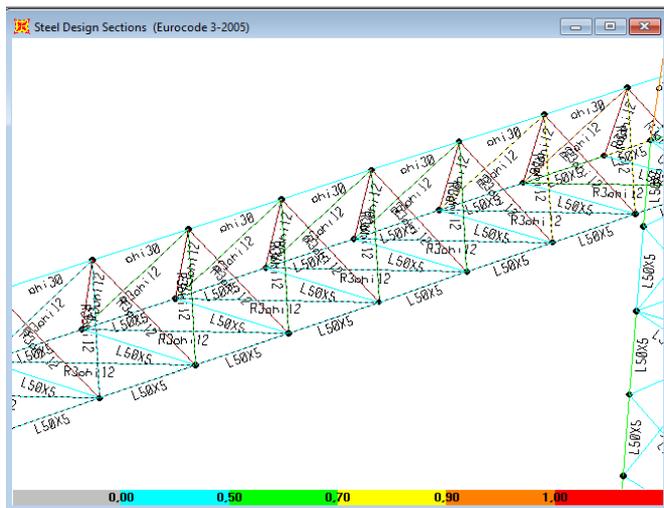


Figure 27 : Résultat SAP 2000.

Barre d12

L'élément le plus sollicité est à une distance $x = 2.502\text{m}$ du mât télescopique sous lacombinaison135G+150Q1 X = 2.502m du mât télescopique. L'élément est sollicité en compression sous l'effet de l'effort axial sollicitant N, C'est un élément de classe 3 avec un coefficient de sécurité de 2.45.

- L'effort axial sollicitant:

$$N=1.587 \text{ kN}$$

- Les moments fléchissant sollicitant :

$$M_{22}= 0 \text{ kN.m selon l'axe 2}$$

$$M_{33}=0.157 \text{ kN.m selon l'axe 3}$$

- Les efforts tranchants sollicitant :

$$V_2 = -0,008 \text{ kN selon l'axe 2}$$

$$V_3 = 0,004 \text{ kN selon l'axe 3}$$

- Les moments fléchissant résistants:

$$M_{22rd}= 4.235 \text{ kN.m}$$

$$M_{33d}=4.235 \text{ kN.m}$$

- Les efforts tranchants (résistants traction compression):

$$V_{2c} = 0.7 \text{ kN.}$$

$$V_{3t} = 2.84 \text{ kN.}$$

- L'effort axial résistant :

$$N_R = 0.61 \text{ kN.}$$

Donc $N \geq N_R$ pas vérifié.

L'influence de l'effort axial N est de 44 % et celle du moment fléchissant sollicitant M_{22} de l'axe demi-forte inertie est de 56%. L'influence des moments fléchissant sollicitant (M_{22} et M_{33}) et des efforts tranchants sollicitant (V_2 et V_3) sont négligeable.

VI.3.1.1.c- Les éléments montants de la flèche : tube (I 50*5)

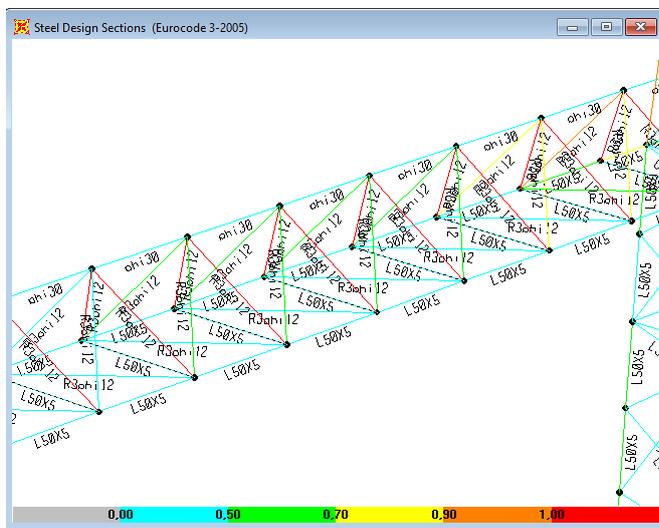
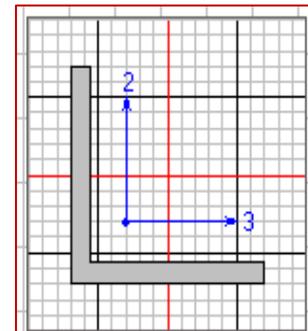


Figure 28 : Résultats SAP2000



L50*5

L'élément le plus sollicité est à une distance $x = 2.85$ m du mât télescopique sous la combinaison 135G+135Q2AF, une flexion composée ($M_{22} + N$). C'est un élément de classe 3 avec un coefficient de sécurité de 0.061.

- L'effort axial sollicitant:

$$N = 0.14 \text{ kN}$$

- Les moments fléchissant sollicitant :

$$M_{22} = 38.55 \text{ kN.m selon l'axe 2}$$

$$M_{33} = -0.0013 \text{ kN.m selon l'axe 3}$$

- Les efforts tranchant sollicitant:

$$V_2 = 0,026 \text{ kN Selon l'axe 2}$$

$$V_3 = -0,148 \text{ kN selon l'axe 3}$$

- L'effort axial résistant (compression, traction) :

$$N_R = 102.61 \text{ kN}$$

$N \leq N_R$ donc vérifié.

- Les moments fléchissant résistants:

$$M_{22rd} = 651.13 \text{ kN.m}, M_{33rd} = 651.13 \text{ kN.m}$$

- Les efforts tranchant résistants:

$$V_{2,rd} = 102.610 \text{ kN}$$

$$V_{3,rd} = 102.610 \text{ kN}$$

L'influence de l'effort axial sollicitant N est de 16% et celle du moment fléchissant sollicitant M_{22} est de 84%. L'influence du moment fléchissant sollicitant M_{22} , et des efforts tranchants sollicitant V_2 et V_3 est négligeable.

VI.3.1.1.c- Les éléments de la membrure supérieure de la flèche: barre (d30,d25)

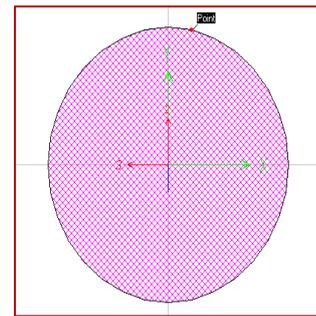
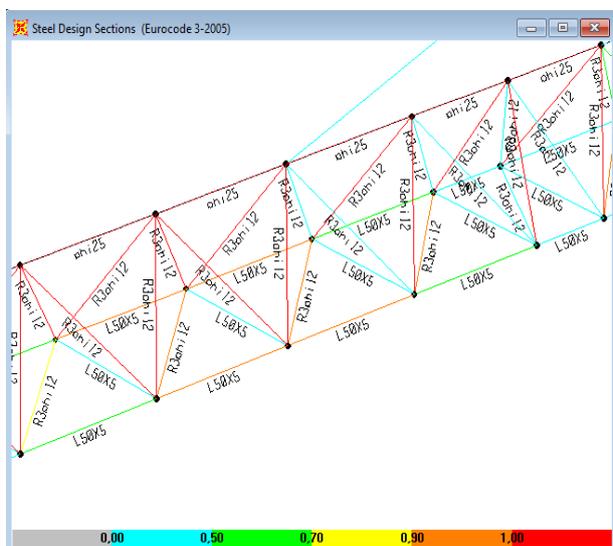


Figure 29 : Résultats Sap2000

Barre d25

L'élément le plus sollicité est à une distance $X = 8.885\text{m}$ du mât télescopique lors de la combinaison 135G+135Q2, l'élément de flexion composée ($M_{33}+N$). C'est un élément de classe 3 avec un coefficient de sécurité de 4.28.

- L'effort axial sollicitant :

$$N = 47.684 \text{ kN}$$

- Les moments fléchissant sollicitant :

$$M_{22} = 0,0065 \text{ kN.m selon l'axe 2}$$

$$M_{33} = -15.893 \text{ kN.m selon l'axe 3}$$

- Les efforts tranchants sollicitant :

$$V_2 = -0.037 \text{ kN selon l'axe 2}$$

$$V_3 = 0.000009 \text{ kN selon l'axe 3}$$

- Les moments fléchissant résistants :

$$M_{22rd} = M_{33rd} = 38.293 \text{ kN.m}$$

- Les efforts tranchants résistants (compression traction):

$$V_{2c} = 8.220 \text{ kN}, V_{3t} = 12.33 \text{ kN}$$

- L'effort axial résistant:

$$N_c = 8.219 \text{ kN}, N_t = 12.332 \text{ kN}$$

$N \geq N_R$ donc pas vérifié .

L'influence de l'effort axial sollicitant N est de 10% et celle du moment fléchissant est de 90%.
L'influence du moment fléchissant sollicitant M_{22} et des efforts tranchants sollicitant V_2 et V_3 est négligeable.

VI.3.1.2 Les éléments du poinçon vertical : tub (eu90ep9)

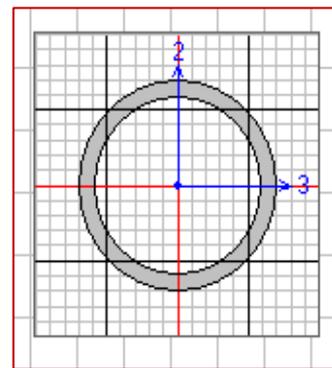
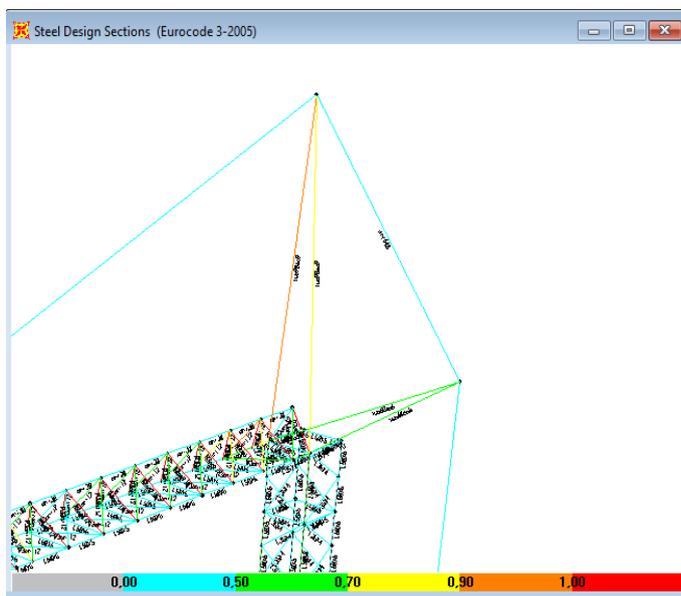


Figure 30 : Résultats SAP2000

barre d25

L'élément sollicité extérieur sous la combinaison 135G+135Q2AT.RE est un élément de classe 3 avec un coefficient de sécurité de 0.95.

- L'effort axial sollicitant :

$$N = 30.84 \text{ kN}$$

- Les moments fléchissant sollicitant :

$$M_{22} = 1034.54 \text{ kN.m selon l'axe 2}$$

$$M_{33} = 8.65 \text{ kN.m selon l'axe 3}$$

- Les efforts tranchant sollicitant:

$$V_2 = -0.05 \text{ kN selon l'axe 2}$$

$$V_3 = 0.35 \text{ kN selon l'axe 3}$$

- Les moments fléchissant résistants :

$$M_{22rd} = M_{33rd} = 12666.92 \text{ kN.m}$$

- Les efforts tranchants résistants (compression traction):

$$V_{2c} = 34.020 \text{ kN}, V_{3t} = 489.274 \text{ kN}$$

- L'effort axial résistant:

$$N_R = 30.85 \text{ kN}$$

$N \geq N_R$ donc pas vérifié.

L'influence de l'effort axial sollicitant N est de 90% et celle du moment fléchissant est de 10%. L'influence du moment fléchissant sollicitant M_{22} et des efforts tranchants sollicitant V_2 et V_3 est négligeable.

VI.3.1.3 Efforts internes dans les éléments du mât

VI.3.1.3.a- Eléments des membrures du mat : (L50*5)

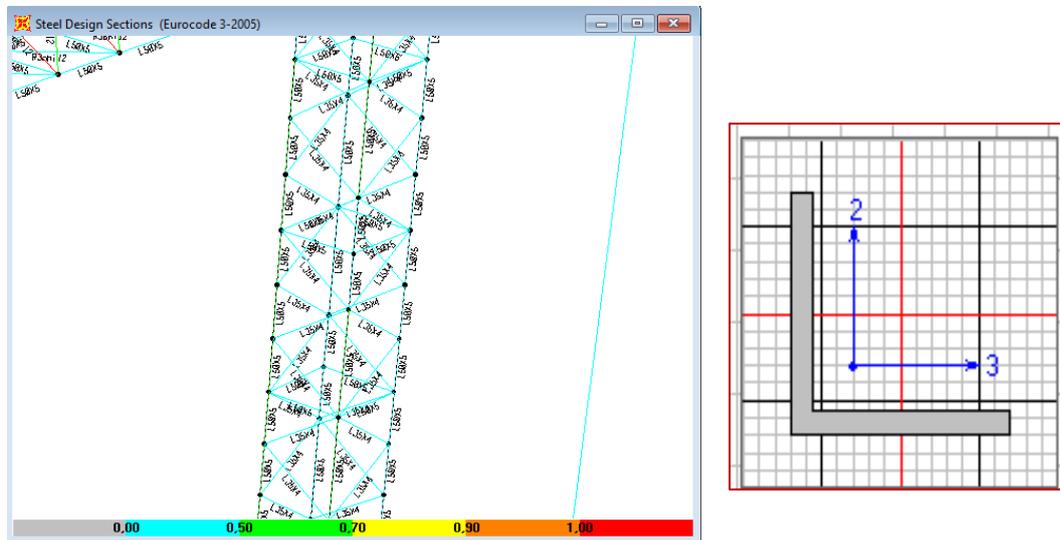


Figure 31 : Résultats SAP2000

L50*5

L'élément le plus sollicité est à l'extrémité supérieure du mât extérieur sous la combinaison 135G+135Q2.ART.RE l'élément est sollicité en flexion bi-axiale composée ($M_{22} + M_{33} + N$). C'est un élément de classe 3 avec un coefficient de sécurité de 0.6.

- L'effort axial sollicitant:

$$N = 31,752 \text{ kn}$$

- Les moments fléchissant sollicitant:

$$M_{22} = 54.52 \text{ kn.m selon l'axe 2}$$

$$M_{33} = -8.99 \text{ kn.m selon l'axe 3}$$

- Les efforts tranchants sollicitant :

$$V_2 = -0.02 \text{ kn Selon l'axe 2}$$

$$V_3 = 0.2 \text{ kn selon l'axe 3}$$

- L'effort axial résistant:

$$N_R = 49.515 \text{ kn}$$

$N \geq N_R$ donc pas vérifié.

- Les moments fléchissant résistants:

$$M_{22rd} = 651.127 \text{ kn.m}$$

$$M_{33rd} = 651.127 \text{ kn.m}$$

- Les efforts tranchant résistant (traction, compression):

$$V_{2c} = 49.515 \text{ kn}$$

$$V_{3t} = 102.609 \text{ kn}$$

L'influence de l'effort axial sollicitant N est de 90%, et celle du moment fléchissant sollicitant M_{22} est de 10%, L'influence des efforts tranchant sollicitant V_2 et V_3 est négligeable.

VI.3.1.3.b- Diagonales du mât (L35*4)

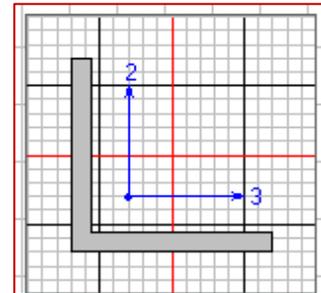
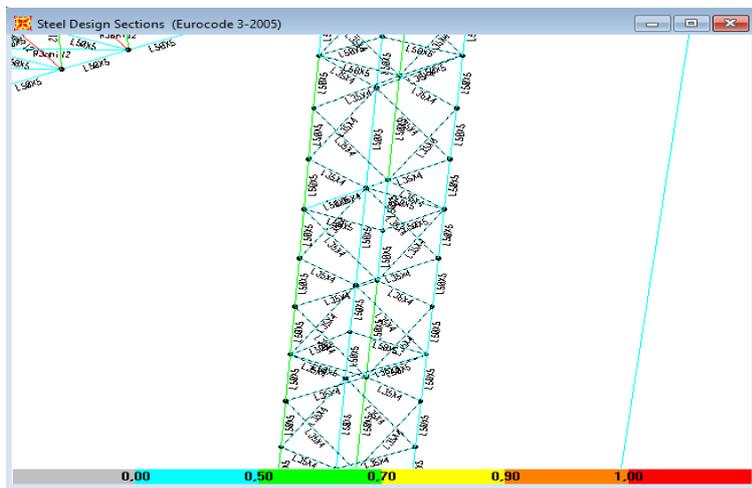


Figure 32 : Résultats SAP2000

L35*4

L'élément le plus sollicité est à l'extrémité inférieure du mât télescopique sous la combinaison 153G+135Q2ARF. L'élément est sollicité en flexion bi-axiale composée ($M_{22} + M_{33} + N$). C'est un élément de classe 3 avec un coefficient de sécurité de 0.067.

- L'effort axial sollicitant:

$$N = 3.12 \text{ kN}$$

- Les moments fléchissant sollicitant :

$$M_{22} = 0,093 \text{ kN.m selon l'axe 2}$$

$$M_{33} = 2.307 \text{ kN.m selon l'axe 3}$$

- Les efforts tranchants sollicitant:

$$V_2 = 0,033 \text{ kN selon l'axe 2}$$

$$V_3 = 0,032 \text{ kN selon l'axe 3}$$

- L'effort axial résistant: $N_R = 3.12 \text{ kN}$

$N \geq N_R$ donc pas vérifié.

- Les moments fléchissant résistants :

$$M_{22c} = 252.736 \text{ kN.m}$$

$$M_{33t} = 252.736 \text{ kN.m}$$

- Les efforts tranchants résistants :

$$V_{2,rd} = 56.976 \text{ kN}$$

$$V_{3,rd} = 56.976 \text{ kN}$$

- Les moments fléchissant résistants:

$$M_{22rd} = 25.274 \text{ kN.m}$$

$$M_{33rd} = 25.274 \text{ kN.m}$$

L'influence de l'effort axial sollicitant N est de 86%, celle du moment fléchissant sollicitant M_{33} est de 14%. L'influence des efforts tranchants sollicitant V_2 et V_3 est négligeable.

VI.3.1.3.c- Les montants du mât :(L35*4) :

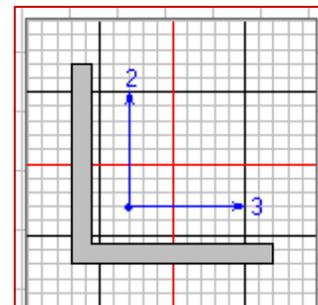
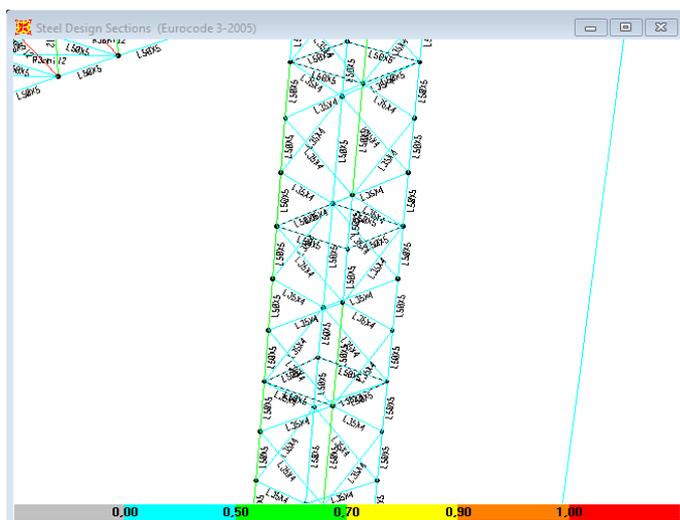


Figure 33 : Résultats SAP2000

L35*4

L'élément le plus sollicité est à l'extrémité inférieure du mât télescopique sous la combinaison 153GP135Q2ATR.RE. L'élément est sollicité en flexion bi axiale composée ($M_{22} + M_{33} + N$). C'est un élément de classe 3 avec un coefficient de sécurité de 0.13.

- L'effort axial sollicitant:

$$N = 3.15 \text{ kN}$$

- Les moments fléchissant sollicitant :

$$M_{22} = 0,003 \text{ kN.m selon l'axe 2}$$

$$M_{33} = 2.24 \text{ kN.m selon l'axe 3}$$

- Les efforts tranchants sollicitant :

$V_2 = 0,002$ kN Selon l'axe 2

$V_3 = 0,002$ kN Selon l'axe 3

- L'effort axial résistant:

$N_R = 46.9$ kN.

$N \geq N_R$ donc pas vérifié.

- Les moments fléchissant résistants :

$M_{22c} = 252.736$ kN.m, $M_{33t} = 252.736$ kN.m

- Les efforts tranchants résistants :

$V_{2,rd} = 46.976$ kN, $V_{3,rd} = 56.976$ kN

L'influence de l'effort axial sollicitant N est de 85%, celle du moment fléchissant sollicitant M_{33} est de 15%. L'influence des efforts tranchants sollicitant V_2 et V_3 est négligeable.

VI.4 Analyse de la structure proposée :

VI.4.1 Analyse des efforts internes :

VI.4.1.1 Analyse des efforts internes dans les éléments de la flèche proposée :

VI.4.1.1.a- Les éléments en diagonales inclinées du treillis de flèche : barre (eu=14mm)

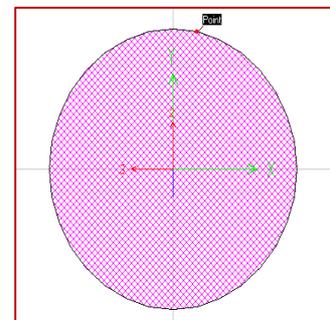
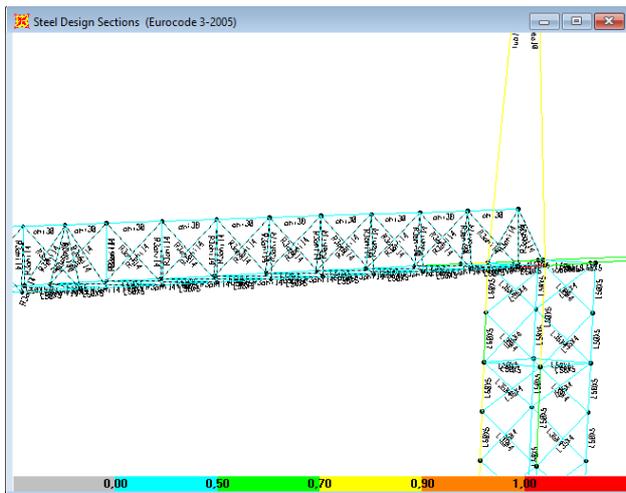


Figure 34 : Résultats SAP2000

barre $\phi 14$

L'élément le plus sollicité est à une distance $x = 2.502$ m du mât télescopique sous la combinaison 135G+135Q2.AF $x = 9.117$ m du mât télescopique. L'élément est sollicité en compression sous l'effet de l'effort axial sollicitant N . C'est un élément de classe 3 avec un coefficient de sécurité de 0.066.

- L'effort axial sollicitant:

$N = 1.603$ kN

- Les moments fléchissant sollicitant:

$M_{22} = 0$ kN.m selon l'axe 2

$M_{33} = 1.930$ kN.m selon l'axe 3

➤ Les efforts tranchants sollicitant :

$V_2 = 0,008$ kN selon l'axe 2

$V_3 = 0,004$ kN selon l'axe 3

➤ Les moments fléchissant résistants:

$M_{22rd} = 56.825$ kN.m / $M_{33d} = 56.825$ kN.m

➤ L'effort axial résistant:

$N_R = 9.89$ kn

$N \leq N_R$ donc vérifié.

➤ Les efforts tranchants (résistants traction-compression):

$V_{2c} = 5.76$ kN

$V_{3t} = 32.675$ kN

L'influence de l'effort axial N est de 74 %. est celle du moment fléchissant sollicitant M_{22} de l'axe forte inertie est de 26%. L'influence des moments fléchissant sollicitant (M_{22} et M_{33}) et des efforts tranchants Sollicitant (V_2 et V_3) sont négligeable.

VI.4.1.1.b- Les éléments de la membrure supérieure DE LA FLECHE: barre (d30)

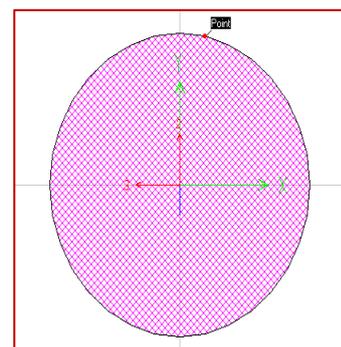
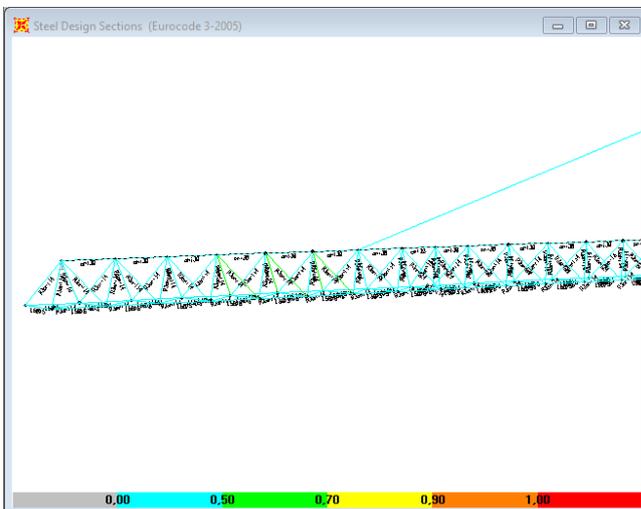


Figure 35 : Résultats Sap2000

barre d30

L'élément le plus sollicité est à une distance $x = 8.885$ m du mât télescopique lors de la combinaison 135G+150Q2, l'élément est une flexion composée ($M_{33}+N$). C'est un élément de classe 3 avec un Coefficient de sécurité de 0.41.

➤ L'effort axial sollicitant :

$N=52.26 \text{ kN}$

- Les moments fléchissant sollicitant :

$M_{22}= 0,0065 \text{ kN.m}$ selon l'axe 2

$M_{33}= -13.768 \text{ kN.m}$ selon l'axe 3

- Les efforts tranchants sollicitant :

$V_2=0.042 \text{ kN}$ selon l'axe 2

$V_3=-0.000006 \text{ kN}$ selon l'axe 3

- Les moments fléchissant résistants :

$M_{22rd} = M_{33rd} = 559.54 \text{ kN.m}$

- Les efforts tranchants résistants (compression-traction):

$V_{2c} = 112.343 \text{ kN}$, $V_{3t} = 150.043 \text{ kN}$.

- L'effort axial résistant:

$N_R = 122.34 \text{ kN}$; $N \leq N_R$ donc vérifié.

L'influence de l'effort axial sollicitant N est de 91% et celle du moment fléchissant est de 9%. L'influence du moment fléchissant sollicitant M_{22} et des efforts tranchants sollicitants V_2 et V_3 est négligeable.

VI.4.1.2.c- Les poinçons verticaux : tube (d100 ep10)

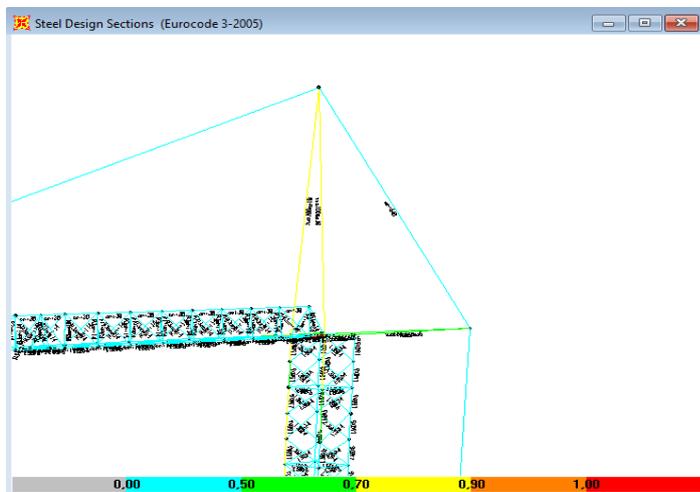
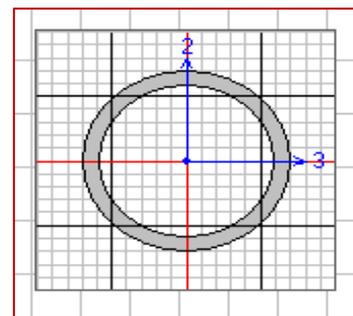


Figure 36 : Résultats SAP 2000



Tube d100 di10

L'élément le plus sollicité lors de la combinaison 135G+150Q2, l'élément est une flexion composée. C'est un élément de classe 3 avec un coefficient de sécurité de 0.85.

- L'effort axial sollicitant :

$N=34.386 \text{ kN}$

- Les moments fléchissant sollicitant:

$M_{22}= 1441.88 \text{ kN.m}$ selon l'axe 2

$M_{33} = 103.18 \text{ kN.m}$ selon l'axe 3

➤ Les efforts tranchants sollicitant :

$V_2 = 0.006 \text{ kN}$ Selon l'axe 2

$V_3 = -0.5 \text{ kN}$ Selon l'axe 3

➤ Les moments fléchissant résistants :

$M_{22rd} = M_{33rd} = 17975.757 \text{ kN.m}$

➤ Les efforts tranchants résistants (compression traction):

$V_{2c} = 42.11 \text{ kN}$

$V_{3t} = 604.042 \text{ kN}$

➤ L'effort axial résistant:

$N_{Rc} = 42.11 \text{ kN}$

$N_{Rt} = 604.42 \text{ kN}$.

$N \leq N_R$ donc vérifié.

L'influence de l'effort axial sollicitant N est de 95% et celle du moment fléchissant est de 5%. L'influence du moment fléchissant sollicitant M_{22} et des efforts tranchants sollicitant V_2 et V_3 est négligeable.

VI.1 Conclusion

On conclue que les éléments de cette structure sont vérifiés vis-à-vis des clauses de l'EC03 et des résultats de calcul des efforts internes et des déplacements obtenus en utilisant le logiciel SAP2000. Toutefois, quelques renforcements sont suggérés au niveau de la zone d'extrémité de la flèche.

Chapitre V :

Vérification De La Stabilité Globale

V- vérification de la stabilité globale

V.1 Stabilité globale vis à vis du vent :

L'étude de la stabilité globale vis-à-vis du vent sera faite ultérieurement et de manière plus détaillée en utilisant les outils de simulation CFD (Computational Fluid Dynamics) ainsi que de l'interaction fluide-structure et ce, dans le cadre d'un autre PFE.

V.2 Vérification a l'état limite de service :

La limite de flèche verticale admissible choisie est de : $\frac{L}{400}$ pour les deux combinaisons G+Q1 et G+Q2.

La flèche maximale ou le déplacement maximal sur (Oz) est situé (e) dans les cas de charges à x=14m du mat télescopique sous les combinaisons : G+Q1 et G+Q2.

➤ La flèche verticale maximale :

$$f = 30.92\text{mm} \leq \frac{L}{400} = 35 \text{ donc vérifiée. [8]}$$

V.3 Stabilité global vis à vis de la charge de manutention :

L'étude de la stabilité globale vis-à-vis des différentes actions, consiste à vérifier que les réactions calculées à la base situées au niveau du contrepoids soient inférieures à la valeur du poids effectif utilisé pour le présent modèle et dont la valeur est égale à $3.5 \text{ Tf} = 35 \text{ kN}$.

Tableau 5 : Réactions

| Joint | OutputCase | CaseType | F1 | F2 | F3 | M1 | M2 | M3 |
|-------|---|-----------|-----------|-------|------------|--------|--------|--------|
| | | | KN | KN | KN | KN-m | KN-m | KN-m |
| 106 | aret rotation flèche 1 | LinStatic | 1,377E-05 | 0,000 | -1,743E-03 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 106 | aret translation chariot | LinStatic | 1,485E-03 | 0,000 | -0,188 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 106 | aret rotation de combinaison avec aret charriot | LinStatic | 5,429E-06 | 0,000 | -6,872E-04 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |

Chapitre V : Vérification de la stabilité générale

| Joint | OutputCase | CaseType | F1 | F2 | F3 | M1 | M2 | M3 |
|-------|---|-------------|-----------|-------|---------|--------|--------|--------|
| | | | KN | KN | KN | KN-m | KN-m | KN-m |
| 106 | aret translation chariot extrême pour combinaison | LinStatic | 9,836E-04 | 0,000 | -0,125 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 106 | 135Gp150Q1 | Combination | 0,305 | 0,000 | -33,674 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 106 | 135Gp150Q2 | Combination | 0,316 | 0,000 | -34,996 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 106 | 135G135Q2ARF | Combination | 0,297 | 0,000 | -32,657 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 106 | 135G135Q1ARTch | Combination | 0,289 | 0,000 | -31,654 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 106 | 135G135Q1trcharrotcom | Combination | 0,289 | 0,000 | -31,654 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 106 | 135G135Q2aret tr et rot extr | Combination | 0,298 | 0,000 | -32,781 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |

Sous les différentes combinaisons citées dans le tableau ci-dessus, les différentes valeurs de ces réactions sont illustrées dans la colonne F3 (dirigées selon l'axe vertical de la gravité Oz).

On constate sur ce tableau que la combinaison la plus défavorable de l'Eurocode 03 est celle de 1.35G+1.5Q2 et dont la réaction à l'appui du contrepoids est égal à 34.996 kN. On voit bien que cette valeur est bien inférieure à la valeur du contrepoids qui est de 35 kN.

Toutefois, elle demeure très proche. A cet effet, et pour davantage de sécurité, nous suggérons d'augmenter légèrement ce contrepoids de 5% c'est-à-dire d'adopter un contrepoids dont la valeur est égale à cette valeur devant être arrondie par excès, le contrepoids suggéré est de 37 KN. [8]

$$P = 35 * 1.05 = 36.75 \text{ KN.}$$

V.4 Conclusion

Nous ne concluons que le contre poids qui a été mis en place dans cette étude vérifie la stabilité de la forme et la stabilité globale au chargement.

Conclusion générale

Conclusion générale

A l'issue de cette étude, de nouveaux calculs de conception et de dimensionnement des éléments de la structure métallique de la grue de type ENMTP UB 1404, ont été effectués et ce, conformément aux règles de l'Eurocode 03 et de la méthode de calcul par éléments finis utilisant le logiciel SAP2000.

Cette seconde vérification a permis d'affirmer que les résultats des calculs de dimensionnement déterminés initialement selon les normes et méthodes de calcul adoptées par le fabricant sont très proches des résultats obtenus par la présente étude.

En effet, les principaux résultats obtenus sont comme suit:

- La majorité des éléments donnés dans les plans du constructeur vérifient toutes les conditions de résistance et de stabilité. Il s'agit essentiellement des vérifications de résistance, de stabilité de forme et de stabilité globale au chargement.
- La vérification de la structure aux états limites de service notamment des déplacements verticaux de la flèche à même de permettre un bon fonctionnement du chariot est satisfaisante.
- Il y a lieu de mentionner qu'un calcul très minutieux concernant la stabilité globale de l'appareil a été mené avec le logiciel **SAP2000**. Il s'agit plus précisément de l'étude des déplacements verticaux des nœuds de la flèche et de la réaction du contre poids et ce, sous toutes les combinaisons de charges auxquelles sera soumise notre grue. Le résultat obtenu est très satisfaisant.
- *Par ailleurs, l'analyse par éléments finis de cette structure a permis de constater que les moments fléchissant sollicitant ont une faible influence sur le comportement des barres. Ce qui confirme l'approche de la modélisation classique qui consiste à supposer que les liaisons entre les barres comme des articulations (système articulé).*

Références

- [1]- ISO 4301-1 :2016 Appariées de levage a charge suspendue-classification-partie1: généralité
- [2]-La fiche technique E.N.M.T.P. (catalogue)
- [3]- Association de documentation pour l'industrie nationale, centre français des traductions de normes, DIN 15018, " Grues, principes concernant les ossatures en acier ", partie 1 Avril 1974.
- [4]- PAUL APPELL traitait de mécanique rationnelle.4^e Edition. Tome 2. Dynamique des Systèmes Mécanique analytique 2018.
- [5] - ANTOINE LEGAY ' calcule des structures par élément finis '' CNAM-PARIS,2019.
- [6]- Fédération Européenne de la Manutention, " Règles pour le calcul des appareils de lev ", F.E.M.1001 3^{ème} édition, 1983.
- [7]- Association française de normalisation NF E52-081, " Grues à tour, règles de calcul", AFNOR, Octobre 1975.
- [8]- JEAN Morel, " Calcul des structures métalliques selon l'EUROCODE 03, 2005.

Résumé :

Le rôle des équipements de levage devient de plus en plus important dans toutes les branches de l'industrie moderne. En particulier, les grues doivent être correctement conçus. Pour cette raison, les ingénieurs doivent tenir compte de toutes les exigences de vérification stipulées par les normes en vigueur lors de la conception. Cela étant dit, notre travail consiste en l'étude vis à vis de la résistance et de la stabilité d'une grue de levage de type ENMTP UB 1404 selon les normes de l'Eurocode03. Lors de cette étude, des calculs de conception et de dimensionnement des éléments de la structure métallique de la grue sus-citée, ont été effectués et ce, en utilisant la méthode des éléments finis utilisant le logiciel SAP2000.

Abstract :

The role of lifting equipment is becoming more important in all branches of modern industry. In particular, cranes must be properly designed. For this reason, engineers must take into account all the verification requirements stipulated by the standards when designing. Our work consists of the study with regard to the resistance and the stability of a lifting crane type ENMTP UB 1404 according to the standards of Eurocode03. During this study, design and dimensioning calculations of the elements of the metallic structure of the above mentioned crane were carried out using the finite element method using the SAP2000 software.