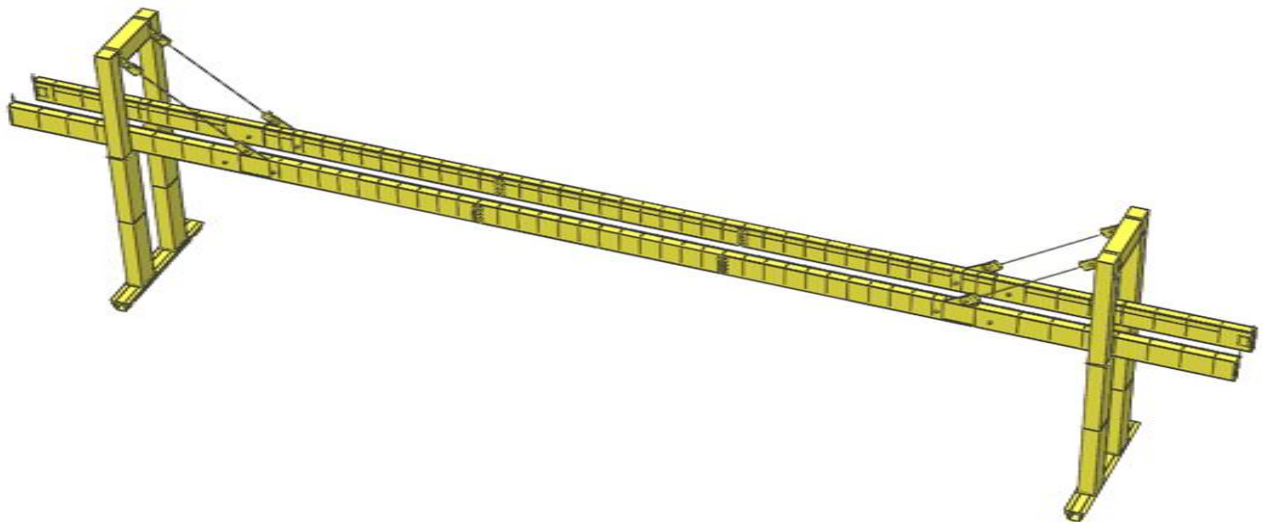


République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Abderrahmane MIRA de Béjaïa
Département de Génie Mécanique

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Génie Mécanique
Spécialité : Ingénierie Mécanique Assistée par Ordinateur



Thème
Dimensionnement de charpente d'un portique roulant de levage ALIECO-Alger



Réalisé par :
Tahar BOULKARIA
Djaafar AHFIR

Promoteurs :
M. Okba HAMRI
M. Aghilas AZIEZ

Président de jury: **M. A. DJERRADA**
Examinatrice : **Melle S. BOUZIDI**
Examinatrice : **Melle L. HIMED**

Promotion : juin 2014

DÉDICACES

Je remercie toute l'équipe pédagogique de département de Génie Mécanique qui nous ont assuré cette formation, mes encadreurs Mr O.HAMRI et Mr A.AZIEZ pour leurs conseils

Je dédie ce modeste travail à mes très chers parents et grands parents
A mes frères et sœurs ainsi qu'à toute ma famille et ma chère C.T
A tous mes amis

Tahar BOULKARIA

DÉDICACES

Je dédie ce travail à mes parents, mes frères et sœurs, ma grande famille, ainsi que
tous mes amis et tous les gens de l'IMAO et ML

Je tiens à remercier tous mes enseignants le long de mon parcours, plus
particulièrement mes promoteurs

Mr O.HAMRI et Mr A.AZIEZ

Djaâfar AHFIR

Sommaire

Notations générales

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale1

Chapitre I : Généralités

I.1) Présentation de l'entreprise d'accueil (ALIECO)	2
I.1.1) Forme juridique	2
I.1.2) Situation patrimoniale	2
I.1.3) Capital social	2
I.1.4) Situation géographique	2
I.1.5) Objet social	3
I.1.6) Historique et évolution de l'entreprise	3
I.1.7) Infrastructures	3
I.1.8) Principaux équipements de production	4
I.1.9) Capacité de production	5
I.1.10) Les métiers et la technologie de l'entreprise	5
I.1.10.1) Les métiers	5
I.1.10.2) Les technologies	6
I.1.11) ACTIVITES	6
I.1.12) Nombre d'employés	7
I.1.13) Les clients d'ALIECO	7
I.1.13.1) Manutention et Levage	7
I.1.13.3) Industries Diverses	9
I.2) Type des engins de levage	10
I.2.1) Les grues	10
I.2.2) Les ponts roulants	11
I.2.2.1) Typologie des ponts roulants	11
I.2.3) Les portiques roulant	12
I.2.3.1) Description et terminologie	13
I.2.3.2) Disposition de construction	14

I.2.3.3) Dénomination des portiques en fonction de leur utilisation	16
I.2.3.4) Les mouvements de portique roulant	17
I.2.3.5) Les éléments constitutifs de l'ossature d'un portique.....	18
I.3) Caractéristiques de construction	18
I.2.3.7) Thème (modèle choisi)	19

Chapitre II : Principes généraux de l'étude, base de calculs

II.1 Normes et documentations à consulter	20
II.1.1) L'Eurocode 3.....	20
II.1.2) La Fédération Européenne de Manutention (F.E.M)	21
II.1.2.1) Objet de F.E.M	22
II.1.2.2) Domaine d'application	22
II.2) Classification en groupes de l'engin de levage et de leurs éléments constitutifs	23
II.2.1) Conception générale de la classification	23
II.2.2) Classe de l'engin dans son ensemble	23
II.2.3) Classe des éléments de l'engin	25
II.3) Les caractéristiques du portique roulant	27
II.4) Acier utilisé	28
II.5) Constitution et géométrie de l'ossature du portique	29
II.5.1) poutres maitresses	29
II.5.2) Sommiers ou boggies	30
II.5.3) Pieds	31
II.6) Actions élémentaires	32
II.6.1) Combinaisons d'actions	33
II.7) principe de classification des sections transversales	33
II.8) Les phénomènes d'instabilité élastique	35
II.8.1) Vérification réglementaire des phénomènes d'instabilité	37

Chapitre III : Calcul des éléments de la charpente

III.1) Vérification des poutres maitresses	47
III.1.1) Pré-dimensionnement	47
III.1.2) Les valeurs statiques de la section droite de la poutre	48
III.1.3) Calcul des sollicitations des poutres maitresses	50

III.1.4)	Vérification à l'état limite ultime	53
III.1.5)	Vérification à l'état limite de service (E.L.S)	54
III.1.5.1)	Classification de la section droite de la poutre	56
III.1.5.2)	Vérification de la poutre au déversement	56
III.1.5.3)	Vérification de la poutre au voilement	58
III.2)	Vérification des pieds	57
III.2.1)	Vérification des pieds de suspension.....	58
III.2.1.1)	Vérification à l'état limite ultime	58
III.2.1.2)	les valeurs statique du pied de suspension	60
III.2.1.3)	Vérification à l'état ultime de service (ELS)	61
III.2.1.3.1)	Classification de la section de pied de suspension	61
III.2.1.3.2)	Vérification de la section de pied de suspension au déversement	61
III.2.1.3.3)	Vérification de la section de pied de suspension au flambement	61
III.2.1.3.4)	Vérification de la section du pied de suspension au voilement	62
III.2.2)	Vérification du pied principal	63
III.2.2.1)	Les valeur statique du pied principal	63
III.2.2.2)	Vérification du pied principal à l'état limite ultime (E.L.U) ...	64
III.2.2.3)	Vérification à l'état limite de service (ELS)	65
III.2.2.3.1)	Classification de la section de pied principal	65
III.2.2.3.2)	Vérification de la section de pied principal au flambement	65
III.3)	Vérification du Sommier	66
III.3.1)	Vérification du sommier à l'état limite ultime (E.L.U)	67
III.3.2)	Les valeurs statiques de la section droite	68
III.3.3)	Vérification de la section du sommier à l'état limite de service (E.L.S)	69
III.3.3.1)	Classification de la section droite du sommier	69
III.3.3.2)	Vérification de la section du sommier au déversement..	69
III.3.3.3)	Vérification de la section du sommier au voilement	70

Chapitre IV : Eléments d'assemblage, Câblage

IV.1) Calcul des éléments d'assemblage	72
IV.1.1) Assemblage par boulons	72
IV.1.2) Assemblage par soudure	75
IV.2) dimensionnement des câbles	76

Chapitre V : Simulation

V.1) Simulation et validation numérique	79
V.1.1) But	79
V.1.2) Méthode	79
V.1.3) Conception et simulation du modèle	79
V.1.3.1) Partie conception	79
V.1.3.2) partie simulation	82
V.1.3.2.1) Méthode des éléments finis	82
V.1.3.2.2) Simulation numérique	85
V.1.3.3) Discussion des résultats	86
Conclusion générale.....	91

Bibliographie

Liste des figures

Figure I.1 : Esquisse d'un semi-portique roulant

Figure I.2 : Esquisse d'un portique roulant

Figure I.3 : Portique roulant mono-poutre

Figure I.4 : Portique roulant bi-poutre

Figure I.5 : Portique roulant multi-poutres

Figure I.6 : Coupe d'un portique roulant réalisé en caisson

Figure I.7 : Coupe d'un portique roulant réalisé en treillis

Figure I.8 : Une vue d'un portique réalisé en profilés

Figure I.10 : Un portique roulant à un deux avant-becs

Figure I.11 : Un portique roulant avec un chariot à la partie supérieur des poutres

Figure I.12 : Un portique roulant avec un chariot à la partie inférieur des poutres

Figure I.13 : Un portique avec un chariot suspendu a la poutre

Figure I.14 : Esquisse d'un portique à crochet

Figure I.15 : Esquisse d'un portique roulant à benne

Figure I.16 : Esquisse d'un portique à bec pivotant

Figure I.17 : Esquisse d'un portique à tourelle

Figure I.19 : Les mouvements d'un portique roulant à crochet

Figure II.1 : Essais de traction des aciers.

Figure II.2 : Différentes vues du PRS de la poutre maitresse

Figure II.3 : Différentes vues de la poutre du sommier

Figure II.4 : Différentes vues de la poutre du pied

Figure II.5 : Déversement d'une poutre

Figure II.6 : Flambement d'un poteau

Figure II.7 : Voilement d'une plaque

Figure II.8 : Coefficient de réduction χ en fonction de λ

Figure III.1 : La section droite de la poutre maitresse

Figure III.2 : La poutre hyperstatique associée

Figure III.3 : Les poutres isostatiques associées

Figure III.4 : Diagramme des efforts tranchants de la poutre maitresse à E.L.U

Figure III.5 : Diagramme des moments fléchissant de la poutre maitresse à E.L.U

Figure III.6 : Diagramme de la flèche de la poutre maitresse à E.L.U

Figure III.7 : Diagramme des moments fléchissant de la poutre maitresse à l'E.L.S

Figure III.8 : Diagramme des efforts tranchants de la poutre maitresse à l'E.L.S

Figure III.9 : Les efforts appliqués au pied de suspension du câble

Figure III.10: La section droite de pied de suspension su câble

Figure III.11 : La section droite des pieds principaux

Figure III.12 : Les sollicitations au pied principal

Figure III.13 : Les sollicitations de sommier

Figure III.14 : La section droite du sommier

Figure IV.1 : Assemblage par boulons

Figure IV.2 : Assemblage avec boulons et couvre joint

Figure IV.3 : Assemblages soudés par joint en bout à pleine pénétration

Figure IV.4 : Les efforts de câble de suspension

Figure V.1 : Les deux poutres maitresses

Figure V.2 : Assemblage pied

Figure V.3 : Raidisseurs des poutres maitresses

Figure V.4 : Assemblage pieds avec les poutres maitresses

Figure V.5 : Assemblage par boulons avec couvre-joint

Figure V.6 : Assemblage câble et anneaux de levage

Figure V.7 : Sommier supérieur et pied

Figure V.8 : Rails de roulement et butée chariot

Figure V.9 : Assemblage des pieds et sommier

Figure V.10 : Galets et sommier principale

Figure V.11 : Assemblage des parties du pied

Figure V.12 : Assemblage du portique roulant

Figure V.13 : Maillage du modèle 3D

Figure V.14 : Contrainte de Von Mises du modèle du portique sans câbles

Figure V.15 : Déplacement résultant du modèle du portique sans câbles

Figure V.16 : Contraintes de Von Mises du modèle du portique avec câbles

Figure V.17 : Déplacement résultant du modèle du portique avec câbles

Figure V.18 : Déplacement selon l'axe z du modèle

Figure V.19 : Déplacement résultant du modèle

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Les machines d'ajustement et d'usinage d'ALIECO

Tableau I.2 : Machines et équipements pour de gros travaux de chaudronnerie

Tableau II.1 : Classe d'utilisation des engins de levage

Tableau II.2 : Classe de spectre des engins de levage

Tableau II.3 : Groupe d'engin des engins de levage

Tableau II.4 : Classe d'utilisation des engins de levage

Tableau II.5 : Classe de spectre des engins de levage

Tableau II.6 : Groupe d'éléments des engins de levage

Tableau II.7 : Classification des aciers selon leur teneur en carbone

Tableau II.8 : Classification des sections transversales

Tableau II.9 : Choix de courbe de flambement en fonction de profilé

Notations Générales

Action et combinaison d'action

- G : charge permanente
Q : action variable
 γ_G : coefficient partiel applicable aux charge permanente
 γ_Q : coefficient partiel applicable à une action variable
 ψ_2 : coefficient pour la valeur quasi permanente d'une action variable

Matériaux

- f_y : valeur nominale de la limite d'élasticité
 τ_y : contrainte limite de cisaillement
 f_u : valeur nominale de limite de rupture
E : module d'élasticité longitudinale
G : module de cisaillement
 ν : coefficient de poisson
 ρ : masse volumique

Coefficients partiels portant sur la résistance

- γ_{M0} : coefficient partiel sur la résistance en section évaluée en référence à la limite d'élasticité
 γ_{M1} : coefficient partiel sur la stabilité au flambement, au déversement, au voilement

Géométrie et caractéristique des sections

- t : épaisseur d'une tôle, d'une paroi de profil...
h : hauteur
b : largeur
d : hauteur de l'âme, hors congé ou cordon de soudure âme-semelle
A : aire de la section
I : inertie de flexion
 μ : moment statique
 I_w : inertie de gauchissement

J : inertie de torsion
 i : rayon de giration
 W_{el} : module élastique de flexion
 W_{pl} : module plastique de flexion
 ρ : rendement d'une section

Paramètres pourtant sur la stabilité des barres et des âmes des poutres

\mathcal{E} : facteur de correction de l'élanement en fonction de la limite d'élasticité
 L_{cr} : longueur de flambement
 L_{LT} : longueur de déversement
 λ : élanement
 N_{cr} : effort normale critique d'Euler
 $\bar{\lambda}$: élanement réduit de flambement
 x : coefficient de flambement de l'eurocode 3
 $\bar{\lambda}_{LT}$: élanement réduit de déversement
 M_{cr} : moment critique de diversement
 X_{LT} : coefficient de déversement de l'eurocode 3
 k_{τ} : coefficient de contrainte critique de cisaillement
 τ_{cr} : contrainte tangente critique d'Euler
 $\bar{\lambda}_w$: élanement réduit de voilement d'une âme de poutre
 η : facteur de majoration de la résistance au cisaillement dans le domaine de faible élanement

Introduction générale

Les moyens de manutention ont connus sur toute l'histoire une évolution constante et significative au gré de développement technologique pour atteindre une perfection à la fin du XX^{ème} siècle.

Dans un ancien temps, c'est la force humaine qui a été mise en œuvre pour effectuer le travail de manutention, mais les grues manuelles actionnées à bras ont donné naissance à une nouvelle manière d'accomplir ces tâches, pour réussir à les mécanisées et les développées ensuite à l'arrivée de développement technologique ; Ce qui a engendré maintenant une large variété de ces engins performants, en cite à titre d'exemples les grues, les ponts roulants et les portiques de manutention.

Dans ce présent mémoire, nous nous intéresserons plus particulièrement à la famille des portiques de manutention, qui sont des engins emblématique pour tous les grands aires de stockage, les ports et les usines d'industrie lourde..., ils sont conçus généralement pour manutentionner des charges lourdes et couvrir tout l'espace de travail.

L'objet de cette étude est de réaliser un dimensionnement et une vérification de la charpente d'un portique roulant d'une capacité de levage de 20 tonnes. Ce mémoire fourni des formules de dimensionnement des structures en acier prévues par les textes de conception et de calcul applicable aux différents types de structure tel que l'Eurocode 3 et les normes de Fédération Européenne de Manutention (FEM).

Les généralités sur les engins de levage et les différents types de portiques de manutention et les principaux composants de leurs ossatures font l'objet du premier chapitre.

En suite, le deuxième chapitre sera une présentation de normes consultées dans le dimensionnement, ainsi que l'explication des phénomènes d'instabilité, passant par les caractéristiques du matériau utilisé ; Quant au troisième chapitre, il est consacré au pré-dimensionnement et à la vérification des éléments avec les règles de formation des combinaisons.

Le calcul des assemblages, des câbles et leurs dimensions a été fait dans le quatrième chapitre ; Enfin, la vérification et la validation numérique des résultats obtenus font l'objet du dernier chapitre.

Chapitre I

Généralités

I.1) Présentation de l'entreprise d'accueil (ALIECO)

I.1.1) Forme juridique

L'entreprise Algérienne des équipements industriels ALIECO (Algerian industrial equipment company) est une entreprise publique économique sous la forme juridique de société par actions.

Elle est dotée d'un conseil d'administration composé de quatre membres. La gestion de l'entreprise est assurée par un Président Directeur Général.

I.1.2) Situation patrimoniale

L'entreprise dispose d'un bien immeuble sis à Hussein Dey, rue du capitaine Azziouz Mouzaoui, côte rouge Alger, d'une superficie de 41 665m². Il a été acquis par acte de transfert de droits et biens immobiliers au profit de l'EPE ENCC/Spa établi par le notaire maître ACHIT HENNI Abdelhamid le 06/08/2001 et publié à la conservation foncière d'Hussein Dey le 18/11/2001 volume 287 n°91.

I.1.3) Capital social

Le capital social initial est de 2 635 200 000 DA. Il est divisé en 527 040 actions numérotées de 1 à 527 040, d'une valeur nominale de 5000 DA et est détenu à cent pour cent (100%) par le groupe ENCC/Spa.

I.1.4) Situation géographique

L'usine est implantée dans le périmètre de la commune d'Hussein Dey, wilaya d'Alger, sur une parcelle de terrain d'une superficie globale de 41 665.00 m². Elle est délimitée :

- Au Nord par des habitations.
- Au Sud par le chemin Parnet.
- A l'est par l'impasse Capitaine Azzoug desservant l'université du caroubier et les logements Sonatrach.
- A l'Ouest par la rue du Capitaine Aziouz Mouzaoui (Côte Rouge).

I.1.5) Objet social

Etude, fabrication, montage, commercialisation, maintenance et expertise des équipements industriels dans les domaines : Hydromécanique et irrigation-adduction, énergie et pétrochimie, levage et manutention, matériaux de construction (briqueteries et cimenteries), et équipements d'industries diverses.

I.1.6) Historique et évolution de l'entreprise

La Compagnie ALIECO-SPA Côte rouge a hérité du savoir faire des ateliers NEYRPIC-AFRIQUE créés en 1942 par la société NEYRET-BELIER et PICARD-PICTET avant de devenir une filiale de l'entreprise NEYRPIC-GRENOBLE (France).

Le 12 Juin 1968 la société NEYRPIC-AFRIQUE est nationalisée, ses biens sont alors transférés à S.N.METAL.

A la restructuration, en 1983, Côte Rouge passe à l'ENCC (Entreprise Nationale de Charpente et de Chaudronnerie).

En Octobre 2000, elle devient une filiale de l'ENCC, et est dénommée ALIECO (ALGERIAN INDUSTRIAL EQUIPMENT COMPAGNY).

I.1.7) Infrastructures

Les infrastructures de la Compagnie ALIECO/Spa qui occupent une superficie globale de 41 665 m² se décomposent comme suit :

- Un bureau d'études.
- Trois (03) ateliers de chaudronnerie.
- Deux (02) ateliers de mécanique.
- Un atelier de débitage.
- Un atelier de traitement de surface et de sablage.
- Un atelier de services généraux.
- Un atelier de maintenance.
- Un parc de stockage de l'acier.
- Bâtiments administratifs.

I.1.8) Principaux équipements de production

- **Machines d'ajustage et d'usinage** : l'entreprise dispose de divers machines entre les tours, les fraiseuses, les rectifieuses, les tailleuses de dentures, les mortaiseuses, les perceuses, etc..., dont les plus importantes sont :

Equipements	Nombre.
Grosses aléseuses : Ø broche 100 à 130mm	3
Grand tour parallèle	3
Grand tour vertical	2
Fraiseuses universelles	3
Fraiseuse horizontale	1
Tailleuses denture	4
Tours parallèles	23
Grosses aléseuses	3
Tours à commande numérique	03
Affûteuse de forêts	01

Tableau I.1 : Les machines d'ajustement et d'usinage d'ALIECO

- **Machines pour chaudronnerie et de soudure** : se sont des équipements pour de gros travaux de chaudronnerie, machine de débit, presse plieuse, plieuse à tablier (tôles fortes 25 mm et tôles fines 6 mm), rouleuses pour tôles fortes et moyennes, des cisailles guillotine et des scies à métaux :

Equipements	Nombre.
Presse plieuse 400 T	1
Plieuse à tablier	1
Rouleuse tôles fortes	1
Rouleuse tôles moyennes	1
Cintreuse de profilés	1
potences de soudures automatiques	2
cisaille guillotine	1
banc d'oxycoupage	1
Oxytome photo cellule	1

Paires de vireur soudage	6
potence de soudage	1
presse horizontale	1
presse verticale	1
scie horizontale	1

Tableau I.2 : Machines et équipements pour de gros travaux de chaudronnerie

- **Une installation de sablage (m) :** L x l x h = 11,5 x 4,5 x 5,5.
- **Un four de recuit (m) :** L x l x h = 4,5 x 2,4, x 2,4.
- **Des moyens de levage et de manutention :** (12) ponts roulants et poutres de 3 à 10 et 1 de 25 tonnes.
- **Centrale à oxygène de 5 000 litres.**
- **Un parc à fer :** On y retrouve des scies (alternative et scie à ruban) et une tronçonneuse.

I.1.9) Capacité de production

La capacité de production exprimée en production nominale réelle est de 2 300 tonnes /an en une équipe.

I.1.10) Les métiers et la technologie de l'entreprise

I.1.10.1) Les métiers

ALIECO est spécialisée dans la construction métallique, une activité diversifiée qui s'étend de la fabrication au montage des équipements industriels de chaudronnerie et de mécanique. Bien que techniquement polyvalente, l'entreprise s'est positionnée sur des segments de marché où elle a capitalisé une expérience avérée dans les domaines de la :

- Chaudronnerie et mécano - soudés.
- Mécanique lourde.
- Montage des équipements industriels.
- Traitement de surface.

Ces segments peuvent être regroupés en deux domaines d'activité stratégique (DAS) qui correspondent à des couples produits – marchés :

- Chaudronnerie et équipements industriels.
- Mécanique lourde.

Globalement, l'activité est concentrée dans les domaines de la chaudronnerie et de la mécanique.

I.1.10.2) Les technologies

Les technologies employées dans la fabrication de la chaudronnerie et les équipements industriels se résument comme suite :

- Débitage dans ses différentes formes (scies, oxycoupages, cisailles guillotines).
- Usinage mécanique (toutes les opérations de tournage, de fraisage, de perçage, de rectification et de filetage).
- Assemblage par boulonnage et/ou par soudure (à l'arc, semi-automatique ou oxyacéthylnique)
- Formage des tôles par l'emboutissage, pliage, cintrage ou roulage, etc....
- Montage des biens d'équipements pour contrôle de faisabilité et montage définitif sur les sites clients.
- Traitement de surfaces (sablage, lavage, grenailage et peinture).
- Transbordement de la matière et des produits à l'intérieur du site, transport de la matière et des produits à l'extérieur (ponts roulants, potences, grues, chariots élévateurs et camions).

I.1.11) Activités

ALIECO/Spa –cote rouge, filiale du groupe E.N.C.C, est une entreprise spécialisée dans l'étude, la fabrication, la présentation et l'assemblage en ateliers, le montage sur sites, la maintenance et le service après vente d'équipements industriels se rapportant plus particulièrement aux domaines suivants :

- Eaux et environnement comprenant :
 - Les équipements hydromécaniques destinés principalement aux barrages (blindage auto résistant, vannes, batardeau, wagon, secteur, grille, organe de décharge, conduites forcées, carter blindé et centrale hydraulique...).
 - Les équipements d'adduction- irrigation destinés à l'alimentation en eau potable des villes (A E P) et l'agriculture (purgeur d'air, clapet à rentrée d'air, joint de démontage et dilatation, vanne papillon, obturateur...).
 - Les équipements de traitement et d'épuration des eaux usées ainsi que les équipements destinés au dessalement d'eau de mer

- Les équipements de levage et de manutentions :
 - Portiques ou semi portiques, poutres et ponts roulants et potences murales ou sur fûts, grues portuaires.
- Les équipements d'énergie et de pétrochimie :
 - Échangeurs, séparateurs, scrubbers, régénérateurs, rebouilleurs, colonnes de distillation, condenseurs, réservoirs sous pression et bacs de stockage.
- Les équipements pour les matériaux de construction :
 - (Cimenteries, briqueteries, faïenceries) dont les clients sont principalement les entreprises de produits rouges étatiques et privées et les cimenteries.

ALIECO/ Spa/Côte Rouge produit commercialise ces équipements selon les prescriptions et cahiers des charges de ses clients, conformément aux normes en vigueur et dans les règles de l'art eu égard aux capitaux investis.

Les domaines d'activité de la Compagnie ALIECO/Spa Côte Rouge sont constitués de produits fabriqués à la demande avec une prise en charge en matière d'études, ces produits sont destinés, principalement, à l'équipement de l'infrastructure et de l'industrie.

I.1.12) Nombre d'employés

Les employés de la Compagnie ALIECO/Spa Côte Rouge sont au nombre de 390 en moyenne.

I.1.13) Les clients d'ALIECO

Les principaux clients de l'entreprise par catégorie sont :

I.1.13.1) Manutention et Levage

Ponts et portiques roulants série lourds (sidérurgiques) :

- SIDER EL HADJAR – ANNABA.
- S.N.S –EL GHAZAOUET.
- DRAGADOS CONSTRUCTION.
- SONALGAZ.

Ponts roulants semi lourds:

- SNVI – ROUIBA.
- CIMENTRIE ZAHANA.

- ENCC –RELIZANE.
- ENTPL REGHAIA ET ORAN.

Ponts roulants série léger :

- ENMTP- BEJAIA.
- ENCC –ANNABA ET ORAN.
- SNVI-ROUIBA.
- SNTF – PROJET TRANSFERT EL HAMMA.
- SONATRACH –ARZEW.
- SONATRACH-AIN AMENAS.
- SONATRACH –HASSI MESSAOUD.
- SONATRACH- HASSI RMEL.
- SONELGAZ – CENTRALE ELECTRIQUE CAP DJENET.
- SONELGAZ MERS EL HADJADJ.
- SONELGAZ M’SILA.
- SONELGAZ BECHAR.
- BATIMETAL (ALGER, ORAN, ANNABA, ROUIBA).

Grues portiques:

- Port d’ANNABA (SNS).
- Port D’ALGER (ONP).
- Port de MOSTAGANEM (EPM).

I.1.13.2) Equipements Hydromécaniques

Client Potentiel : Agence Nationale des Barrages et de transferts A.N.B.T :

- BARRAGE EL FAKIA (MASCARA)
- BARRAGE AIN ZADA (SETIF)
- BARRAGE DE ZARDEZAS (SKIKDA)
- BARRAGE EL AGREM
- BARRAGE BREZINA (EL BAYADH)
- BARRAGE FONTAINE DES GAZELLES (BISKRA)
- BARRAGE TILES DIT (BOUIRA)
- BARRAGE MEXANA EL AFIA (EL TARF)
- BARRAGE SIDI MOHAMED BEN AOUDA (RELIZANE)

- BARRAGE OULED MELLOUK (AIN DEFLA)

Maintenance des Barrages

Client Potentiel, Agence Nationale des Barrages et transferts A.N.B.T :

- BARRAGE BOUHNAIFIA.
- BARRAGE OUED FODHA
- BARRAGE BOUKADER
- BARRAGE EL HAMIZ
- BARRAGE EL GHERIB.
- BARRAGE FERGOUG
- BARRAGE FOUM EL KHENGA.

I.1.13.3) Industries Diverses

Equipements de diverses centrales électriques pour MERS EL HADJADJ, CAP DJENET, JIJEL et SKIKDA:

- Station de dessalement d'eau de mer : SONATRACH, SONELGAZ.
- Station des traitements des eaux : HYDRO-TRAITEMENT, ECC.
- SONATRCH HASSI RMEL.
- Réservoirs de stockage et cuves : SONELGAZ (TALMINE, TINALKOUM, AFRA, TINZAOUATINE)

Equipements pour SONATRACH (HAOUD BERKAOUI, HASSI RMEL, HASSI MESSAOUD, HAOUD EL HAMRA, GASSI TOUIL, AIN AMENAS, TFT...).

Equipements de briqueteries rouge et silico-calcaires (ECDE CHLEF), (ERCC), (ERCE), (ERCO), (Céramique SUD).

Maintenance pour les équipements de cimenteries et autres (EPRO), (EPRC), (ALTEC), (TEFNA), (TLEMCEN).

I.2) Type des engins de levage

I.2.1) Les grues

Les grues se caractérisent essentiellement par une longueur de flèche en porte-à-faux, à laquelle la charge est suspendue, généralement au moyen d'un câble et d'une moufle, cette flèche possède toujours au moins un degré de liberté par rapport au sol, afin de permettre le déplacement de la charge dans un plan horizontal, par exemple:

- rotation autour d'un axe vertical.
- rotation (limitée) autour d'un axe horizontal.
- déplacement sur rails (la grue étant équipée de roues), généralement de façon rectiligne (translation).

Il y a plusieurs types de grue :

- **Grue sur chenilles**

C'est une grue avec une flèche faite de treillis et de longerons. Ce type de flèche est manipulé par un portique, le câble est mouflé dans le portique pour multiplier sa force sur les pendants qui permettent de faire descendre ou lever la flèche, ce type de structure est moins influencé par le vent, par contre, il faut plus de temps pour préparer la flèche après le transport sur un chantier.

- **Grue sur porteur ou camion-grue**

C'est une grue à flèche télescopique qui s'allonge et se rétracte, un vérin hydraulique permet de faire monter et/ou descendre la flèche (apiquage) et un autre vérin à une ou à plusieurs chambres assure le mouvement de télescopage ; La rétractation peut se faire par vérin ou câbles. Ce type d'appareil est prêt rapidement à travailler dès l'arrivée sur le chantier. Certaines grues peuvent être radiocommandées pour plus de manœuvrabilité. Les applications sont quasi infinies, une nacelle ou une extension articulée, appelée JIB, peut être montée au bout de la flèche permettant à un charpentier de travailler sur les toits du côté opposé à l'accès routier.

- **Grue à tour**

Elles sont érigées sur une tour fixée ou posée au sol, une grue à tour est toujours constituée des éléments de structure d'un fût et d'une flèche. Elle est également souvent caractérisée par une structure en treillis, rencontrant quelques rares exceptions sur des petites grues à montage rapide ; elles ont une large diversité de modèle, on cite par exemples :

- La famille des Grues à Montage par Éléments (dite **GME**) avec flèche et contre-flèche.
- La famille des Grues à Montage Automatisé (dite **GMA**).
- La famille des Grues à Montage Rapide (dite **GMR**).

- **Les grues de navire**

Les grues de navire sont généralement mues par des systèmes hydrauliques ; Un vérin permet l'apiquage de la flèche (élévation), alors qu'un autre système hydraulique ou électrique permet la rotation du fût et un troisième qui permet la manœuvre du câble de suspension de la charge. Le système de télécommande peut être électronique, électrique ou hydraulique pour les modèles les plus anciens. Certaines grues offrent la possibilité de se coupler pour une synchronisation du mouvement par une commande unique.

I.2.2) Les ponts roulants

Les ponts roulants sont généralement installés dans des halls industriels ou leur prolongement à l'air libre ; Ils permettent la manutention de la charge dans tout l'espace de ces halls, ils sont installés en hauteur et circulent sur des rails fixés sur des poutres de roulement en acier ou béton, en encorbellement ou reposant sur des poteaux.

Sur un petit pont roulant, la conduite de l'engin se fait par télécommande ou radio-commande, les gros ponts possèdent souvent une cabine de conduite, mais ils peuvent également être pilotés depuis le sol par une télécommande. Il peut y avoir plusieurs ponts dans une même travée, chacun d'eux est alors protégé par un système anticollision.

I.2.2.1) Typologie des ponts roulants

Le pont roulant est constitué d'une ou de plusieurs poutres longitudinales reposant à chaque extrémité sur un chariot appelé sommier équipé de roues se déplaçant sur un rail. Les

ponts pour faibles charges sont mono-poutre, les autres à double poutres. On trouve exceptionnellement des ponts à 4 poutres, comme dans les aciéries où de tels engins sont capables de lever plusieurs centaines de tonnes.

Un pont roulant de grande taille est constitué :

- d'un quadrilatère, structure constituée de :
 - sommiers équipés de galets (roues) assurant le déplaçant sur l'une et l'autre des voies de roulement
 - deux poutres reliant les sommiers et supportant le chariot
- d'un chariot se déplaçant sur les poutres du quadrilatère et équipé d'un ou deux palans ou treuils qui permet d'enrouler le câble de levage.
- d'une ou d'un moufle reprenant les accessoires de levage à l'extrémité basse des câbles

I.2.3) Les portiques roulant



Un portique de manutention est un appareil de levage pour charges lourdes ; Autonome, il est utilisé principalement sur de grandes aires de stockage à l'air libre, tel que les ports, les parcs de matières en vrac ou produits industriels de masse.

Le portique remplit sensiblement les mêmes fonctions qu'un pont roulant dont il ne diffère que par le principe de fonctionnement. Un pont roulant circule sur un chemin de roulement situé en hauteur sur des poutres en acier ou béton positionnées sur des poteaux. Le portique de manutention quant à lui circule sur une bande de roulement, généralement constituée de rails, située au sol. L'appareil se compose de quatre poutres dont deux sont horizontales solidarisiées au sens de la largeur dotées de rails au dessus, sur ces rails circule un chariot qui supporte effectivement le matériel de levage lui-même qui se compose d'un ou deux treuils sur lesquels s'enroulent les câbles de levage ainsi que le moyen de préhension qui peut être un palan, une pince hydraulique, un grappin, un électro-aimant etc..., et deux autres poutres dans le sens de la longueur installées au sommet de l'ensemble sur lesquelles posées les deux premières, elles sont aussi solidarisiées, elles reposent sur des pieds (ou palées)

verticaux ; tout cet ensemble s'installe sur un chemin de roulement composé de rails. Une cabine de conduite suspendue complète l'installation.

Le principe décrit ci-dessus concerne les gros portiques. Il existe aussi des petits portiques mono-poutre. De même, les ensembles peuvent être constitués de poutre en H mais aussi de poutres tubulaires.

Il existe des engins hybrides posés d'un côté sur un rail au sol et de l'autre sur un chemin de roulement sur poutres en hauteur ; On parle à ce moment de semi-portiques.

I.2.3.1) Description et terminologie

Le portique de manutention est un engin de levage qui peut ou non se déplacer sur des chemins de roulement dont l'un, ou moins, est au sol et dont l'organe de préhension est suspendu à un mécanisme de levage qui, en général, se déplace perpendiculairement à ses chemins de roulement, il peut comporter plusieurs dispositifs de levage. [7]

On distingue les types de portiques suivants :

- **Semi-portique roulant**

Un semi-portique roulant est un engin de levage constitué par une ou deux poutres reposant sur une palée d'appui et un chemin de roulement aérien comme montrer dans la figure I.1.

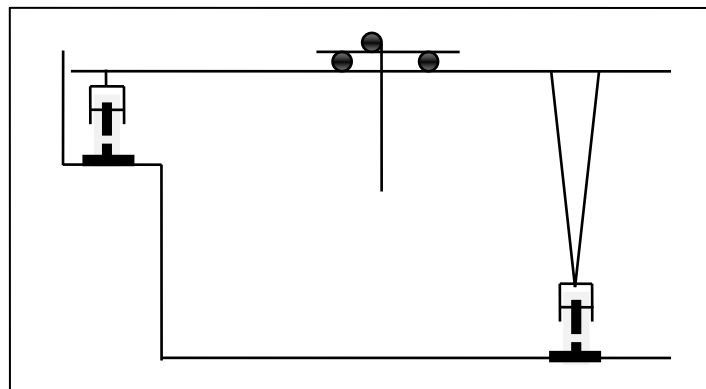


Figure I.1 : Esquisse d'un semi-portique roulant

- **Portiques ou semi-portiques fixes**

Ce sont des engins identiques aux portiques et semi-portiques roulant sauf en ce qui concerne les organes de déplacement, généralement leurs appuis étant scellés.

- **Portique roulant**

Le portique roulant est constitué par une ou deux poutres reposant sur deux palées d'appuis.

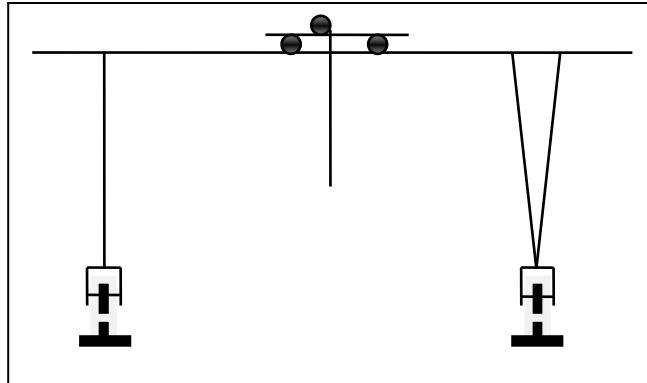


Figure I.2 : Esquisse d'un portique roulant

I.2.3.2) Disposition de construction

Les portiques roulants de maintenance peuvent être du type :

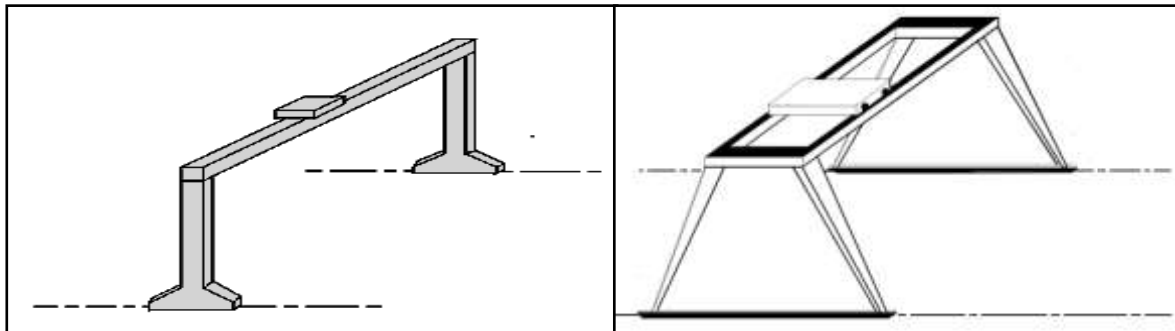


Figure I.3 : Portique roulant mono-poutre

Figure I.4 : Portique roulant bi-poutre

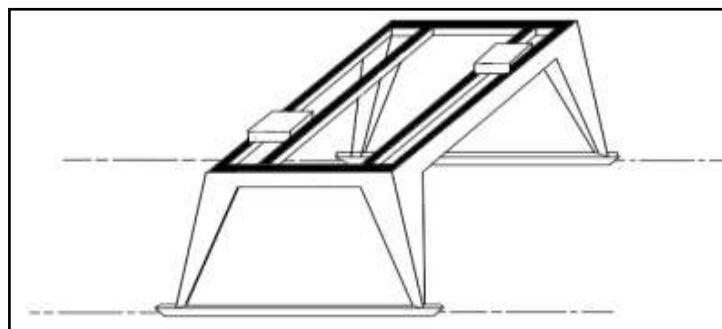


Figure I.5 : Portique roulant multi-poutres

Ils peuvent être réalisés entre autres :

- En caisson (figure I.6).
- En treillis (figure I.7).
- En profilés (figure I.8).

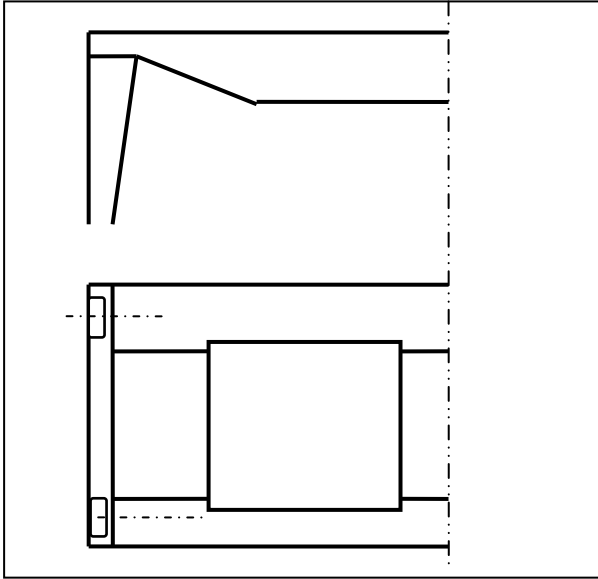


Figure I.6 : Coupe d'un portique roulant réalisé en caisson

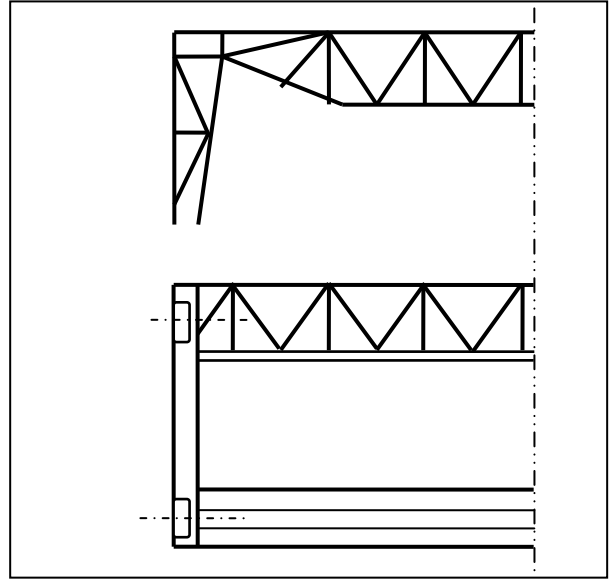


Figure I.7 : Coupe d'un portique roulant réalisé en treillis

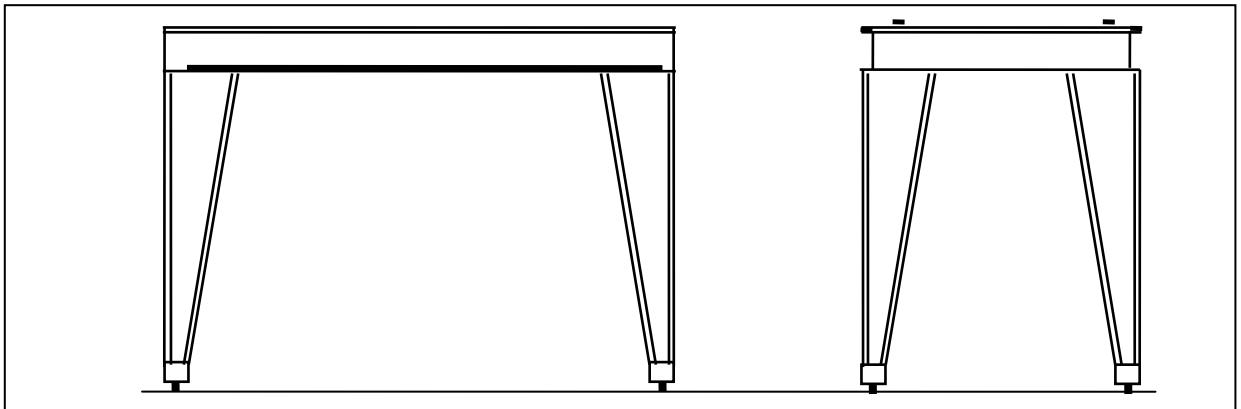


Figure I.8 : Une vue d'un portique réalisé en profilés

Un portique peut avoir un ou deux avant-becs, relevables ou non (figure 10).

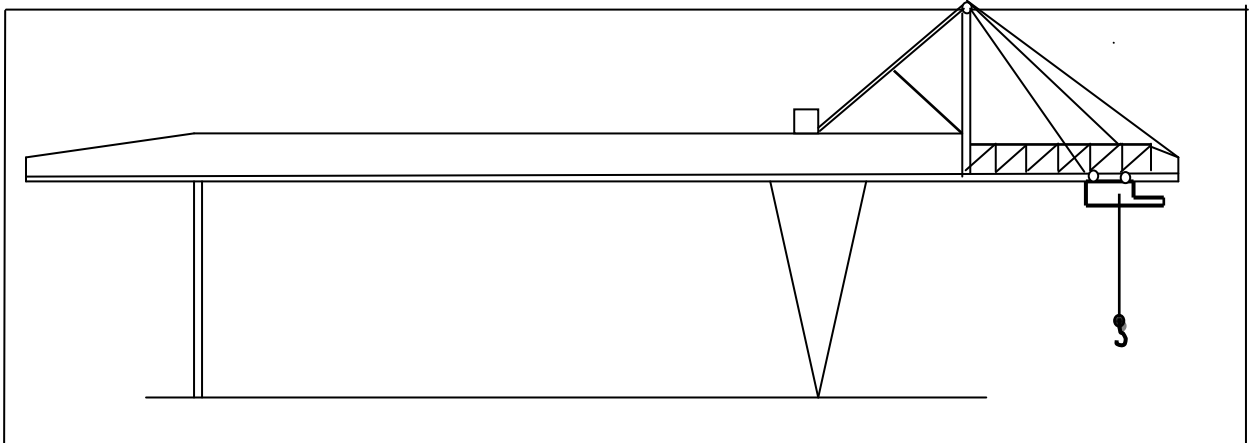


Figure I.10 : Un portique roulant à un deux avant-becs

Le chariot peut se déplacer :

- Soit à la partie supérieure des poutres (figure I.11).
- Soit à la partie inférieure des poutres (figure I.12).
- Soit suspendu aux poutres (figure I.13).

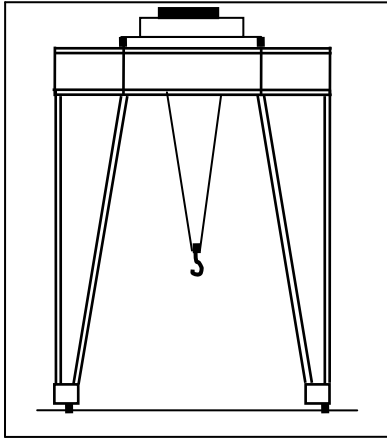


Figure I.11 : Un portique roulant avec un chariot à la partie supérieur des poutres

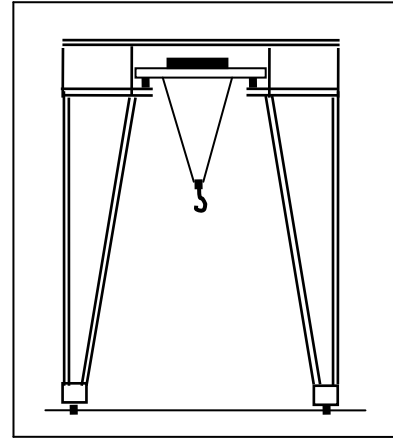


Figure I.12 : Un portique roulant avec un chariot à la partie inférieure des poutres

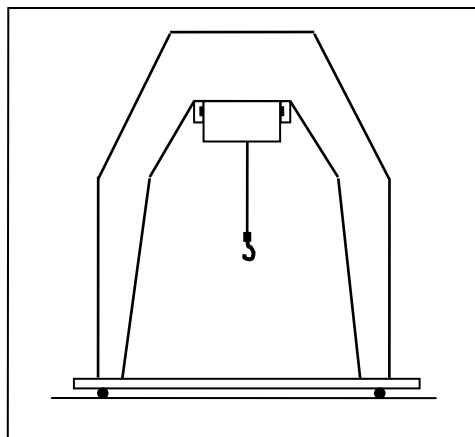


Figure I.13 : Un portique avec un chariot suspendu a la poutre

Il existe également des portiques mono-poutre dont le chariot roule sur le côté de la poutre.

I.2.3.3) Dénomination des portiques en fonction de leur utilisation

- Portique à crochet (figure I.14)

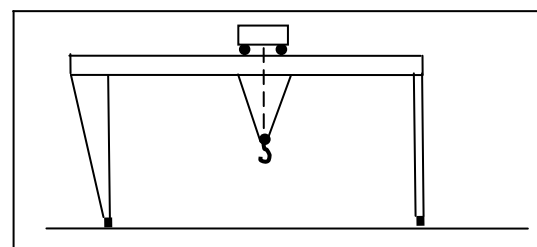


Figure I.14 : Esquisse d'un portique à crochet

- Portique à benne (figure I.15).

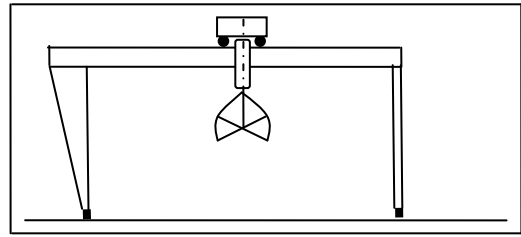


Figure I.15 : Esquisse d'un portique roulant à benne

- portique à bec fixe ou pivotant (figure I.16)

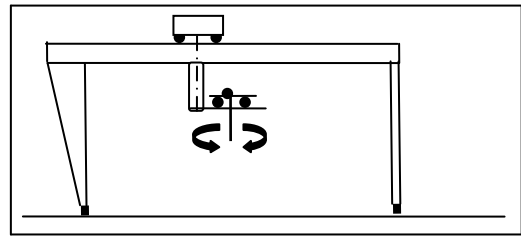


Figure I.16 : Esquisse d'un portique à bec pivotant

- Portique à tourelle (figure I.17)

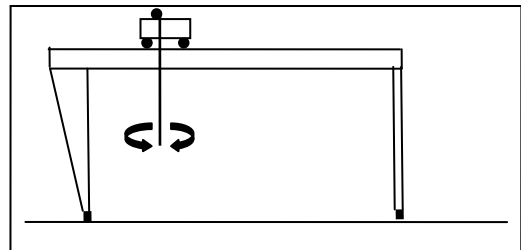


Figure I.17 : Esquisse d'un portique à tourelle

I.2.3.4) Les mouvements d'un portique roulant

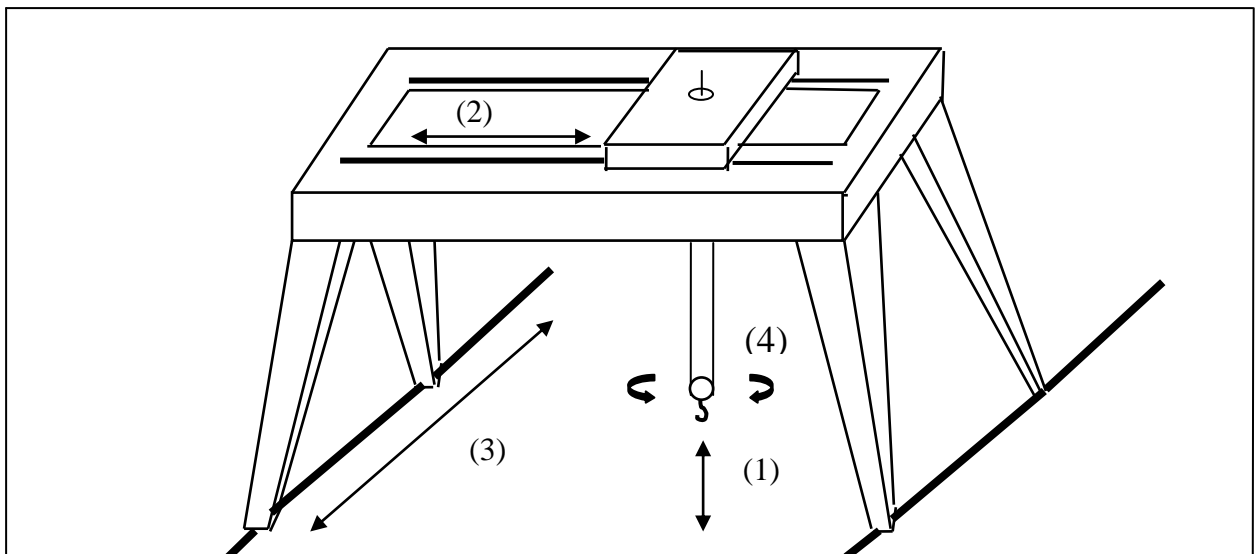


Figure I.19 : Les mouvements d'un portique roulant à crochet

- **Mouvement de levage** : mouvement vertical du crochet ou des accessoires de levage (figure I.19 (1)).
- **Mouvement direction** : déplacement du chariot par rapport à l'ossature du portique (figure I.19(2)).
- **Mouvement translation** : déplacement de l'ensemble de l'engin sur les rails (figure I.19 (3)).
- **Mouvement orientation (giration)** : rotation d'un ensemble, solidaire des accessoires de levage, autour d'un axe (figure I.19 (4)).

I.2.3.5) Les éléments constitutifs de l'ossature d'un portique

L'ensemble de la charpente comprenant en particulier les éléments suivants :

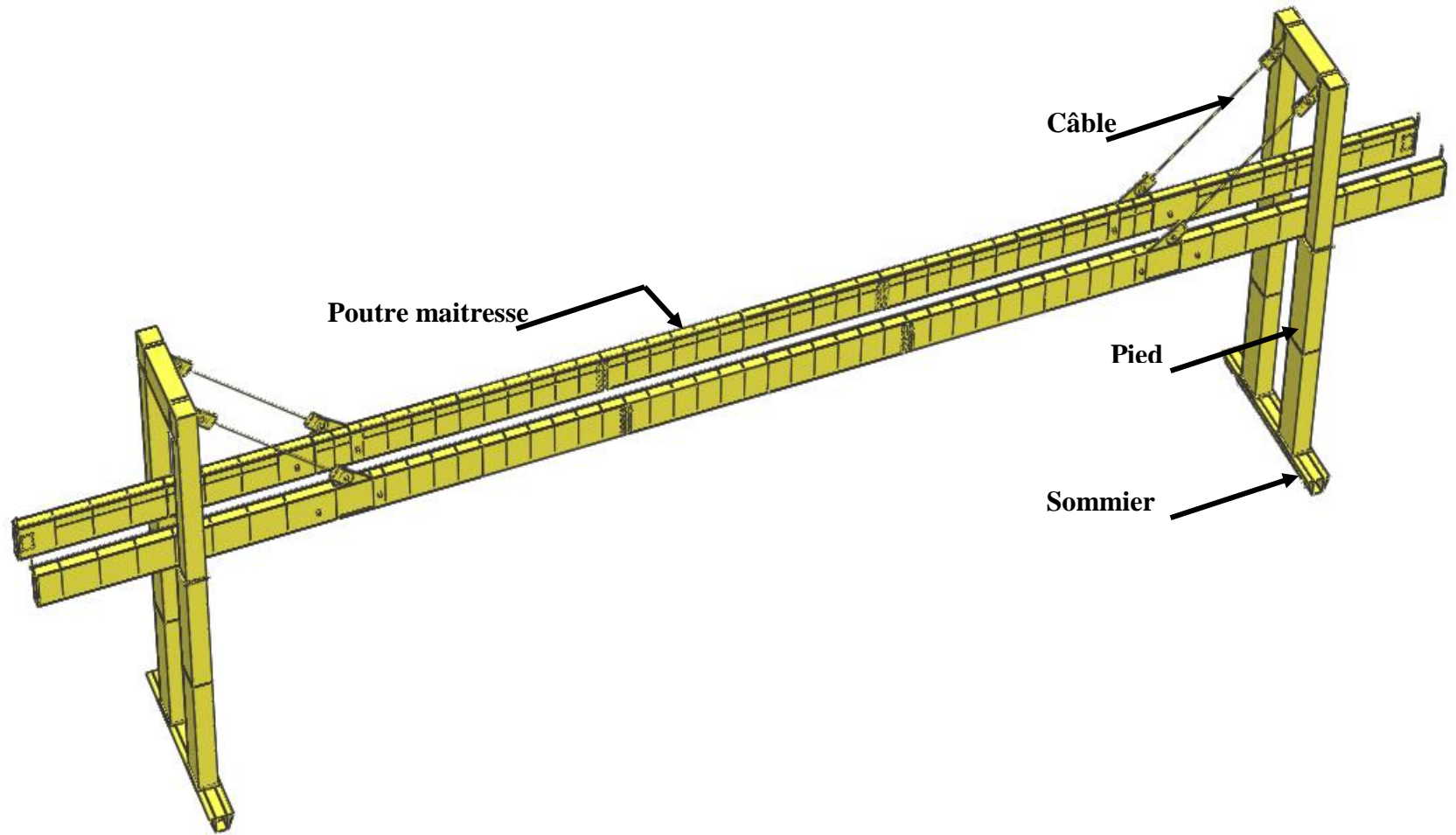
- **La poutre maitresse** : c'est un élément de l'ossature constitué par 1 ou 2 poutres qui assurent le déplacement de chariot sur des rails.
- **Les pieds** : c'est un élément de l'ossature constitué par 1 ou 2 jambes reliant la partie supérieure de l'appareil à ses assises, elle peut être soit encastrée ou pendulaire.
- **Sommier** : c'est le châssis inférieur de l'ossature supportant la palée sur laquelle sont fixés les organes de roulement de la translation.
- **Avant-bec** : partie de la poutre principale située à l'extérieur des palées ; Il peut être fixé ou articulé (avant-bec relevable).

I.2.3.6) Caractéristiques de construction

- **Charge nominale** : masse maximale d'utilisation pour le levage pour laquelle est calculé le portique.
- **Portée** : la distance entre-axes de la voie de roulement.
- **Déplacement ou course** : distance maximale utile que le portique peut parcourir ou un élément du portique.
- **Course de portique** : déplacement maximal en translation.
- **Hauteur libre sous portique** : c'est la hauteur entre le sol et la poutre maitresse.

I.2.3.7) Thème (modèle choisi)

Le modèle d'étude choisi dans ce présent mémoire est un portique roulant bi-poutres de 48 mètres de portée avec deux avant-becs fixes de 6 mètres et 10, 5 mètres de hauteur libre sous portique dont la charge utile est de 20 Tonnes.



Chapitres II

**Principes généraux de
l'étude, base de calculs**

II.1 Normes et documentations à consulter

II.1.1) L'Eurocode 3

Avant 1993, la conception et le calcul des constructions métalliques étaient régis par diverses réglementations.

- Les règles de calcul des constructions en acier, dites règles **CM 66**, qui réglementaient tout les bâtiments en acier.
- Le titre **V** du fascicule 61 du cahier des prescriptions communes, intitulé **conception et calcul des ponts et constructions métalliques en acier**, qui règlemente tout les ponts et ouvrages d'art.
- Des normes **NF**, qui régissaient les calculs des assemblages et des éléments à parois minces :
 - Les assemblages rivés : normes **NF P. 22410** et **P.22411**.
 - Les assemblages par boulons non précontraints : normes **NF P. 22430** et **P.22431**.
 - Les assemblages par boulons à serrage contrôlé : normes **NF P. 22460** à **P.22469**.
 - Les assemblages soudés : normes **NF P. 22470** à **P. 22472**.
- **L'additif 80**, qui introduisait les notions de plasticité de l'acier et d'états-limites, ce qui permettait de tirer parti des propriétés élasto-plastiques de l'acier et d'alléger ainsi les structures.

Depuis 1993, une nouvelle réglementation européenne est entrée en vigueur et impose un remplacement de ces divers et précédents textes, un code unique **l'Eurocode 3**.

L'Eurocode 3 calcul des structures en acier a été adopté par le comité européen de normalisation (CEN) en 1992 et a été classé provisoire pour durée de 3 années (1993 à 1996).

Chaque pays de la communauté européenne ajuste les modalités d'application de ce nouveau règlement sur son territoire, au moyen d'un document d'application national (DAN).

Pendant la période probatoire de 3 ans, le statut expérimental de **l'Eurocode EC 3-DAN** existera conjointement avec les règles antérieures (CM 66, Additif 80, Titre V du Fascicule 61 pour

les ouvrages d'art), qui disparaîtront à compter de 1996 lorsque l'**Eurocode 3** deviendra une norme européenne homologuée (EN).

L'**Eurocode 3** est un règlement très novateur, qui fixe des règles très détaillées, des notions et des classifications très pertinentes (classes de sections par exemple), et qui propose diverses alternatives de dimensionnement au calculateur, selon la stratégie et la finalité retenues (calculs des assemblages par platines, calculs en élasticité ou plasticité, calculs selon des analyses au premier ou au second ordre...). Le tout étant pensé selon une approche de sécurité semi-probabiliste, qui conduit à une calibration de très nombreuses formules de calculs de résistances.

En revanche, l'**Eurocode3** est un ouvrage mal rédigé, peu clair et rempli de redondances, dont les calculs et les formules sont truffés d'indices, qui les rendent difficilement compréhensibles. C'est un traité beaucoup trop théorique, qui vient s'appuyer sur des logiciels de calculs.

En comparaison avec d'autres constructions, les constructions métalliques exigent qu'une attention toute particulière soit portée sur certains points névralgiques, notamment :

- Les assemblages (boulonnages, soudages), afin de se prémunir contre leurs risques de rupture brutale, qui conduiraient à la ruine de l'ouvrage par effondrement.
- Les phénomènes d'instabilité élastique (flambement, déversement, voilement), qui amplifient considérablement les contraintes dans les pièces, et qui sont particulièrement redoutables en construction métallique, du fait de l'utilisation de pièces de faible épaisseur et de grand élancement.

II.1.2) La Fédération Européenne de Manutention (F.E.M)

Les règles pour le calcul des appareils de levage, mises au point par le comité technique de la section I/FEM et publiées jusqu'à présent en deux éditions, la 1ère en 1962 et la 2ème en 1970, ont toujours trouvé une utilisation de plus en plus large dans de nombreux pays à travers le monde.

Tenant compte de cette audience de plus en plus large, la Section I de la **F.E.M** a modifiée la forme de l'édition de ces règles de calcul. L'ancienne forme compacte a été abandonnée pour permettre une meilleure actualisation et la nouvelle répartition en cahiers séparés sera comme suite :

- **Cahier 1** : Objet et domaine d'application.
- **Cahier 2** : Classement et Sollicitations des charpentes et des mécanismes.
- **Cahier 3** : Calcul des contraintes dans la charpente.

- **Cahier 4** : Calcul et choix des éléments de mécanismes.
- **Cahier 5** : Equipement électrique.
- ~~**Cahier 6** : Stabilité et sécurité contre l'entraînement par le vent.~~
- **Cahier 7** : Règles de sécurité.
- **Cahier 8** : Charges d'essai et tolérances.
- **Cahier 9** : Suppléments et commentaires aux cahiers 1 à 8.

II.1.2.1) Objet de F.E.M

Les présentes règles ont pour objet de déterminer les sollicitations et combinaisons de sollicitation dont il faut tenir compte dans l'établissement des projets d'exécution des appareils de levage et de fixer pour les différentes combinaisons de sollicitations possibles, les conditions de résistance et de stabilité à observer.

II.1.2.2) Domaine d'application

Ces règles de calcul s'appliquent au calcul d'appareils de levage, ou parties d'appareils de levage qui appartiennent à la terminologie illustrée pour engins de levage et appareils lourds de levage de la Section I de la F.E.M [1].

Les engins qui n'appartiennent pas à la Section I :

- Engins de levage attribués à la Section V, par exemple :
 - Grues sur véhicules, sur pneus, à bandages pleins, à chenilles, sur camions, à remorques ou sur appuis.
 - Engins de levage qui, selon le règlement intérieur de la F.E.M. sont attribués à la Section IX, à savoir :
 - Matériels divers équipés d'appareils de levage de série.
 - Palans pneumatiques.
 - Accessoires de levage.
 - Appareils de levage à chaîne à bras.
 - Plates-formes élévatrices, plates-formes de travail ou rampes ajustables de quai.
 - Treuils.
 - Crics, vérins, chèvres, appareils combinés de traction et de levage.
 - Appareils mécaniques de desserte de casiers.

Pour le matériel de levage de série, on pourra utiliser ceux des chapitres des règles de calcul de la Section I qui ont été désignés par la Section IX.

Les règles de calcul comportent 8 cahiers. De plus, certains cahiers comportent des annexes qui donnent des informations plus détaillées concernant les méthodes d'utilisation.

II.2) Classification en groupes de l'engin de levage et de leurs éléments constitutifs:

Ce titre a pour but de classer le portique roulant que nous voudrions dimensionner dans ce présent mémoire d'une charge de service de 20 T, de 60 m de portée et de 10, 5 m de hauteur libre sous portique.

II.2.1) Conception générale de la classification

Trois classifications en groupes :

- L'engin dans son ensemble
- Des mécanismes individuels dans leur ensemble.
- Des éléments de la charpente métallique et de l'équipement mécanique.

Cette classification s'opère sur la base de deux critères :

- La durée totale d'utilisation de l'objet considéré.
- Le spectre de charge.

II.2.2) Classe de l'engin dans son ensemble (FEM cahier 2 article 2.1)

Les engins de levage sont classés dans leur ensemble suivant 8 groupes, désignés respectivement par les symboles A1, A2, ..., A8, sur la base de 10 classes d'utilisation et de 4 classes de spectres de charge.

- **Classe d'utilisation de l'engin (FEM cahier 2 page 2-5)**

La classification se fait par durée d'utilisation et par durée totale d'utilisation, sa veut dire, les cycles de levage qu'il accomplit pendant sa mise en service jusqu'à l'achèvement de cette dernière,

en fonction de durée totale d'utilisation, 10 classes d'utilisation, désignées par les symboles U0, U1, ..., U9 sont distinguées.

Nombre de cycle /jour	Nombre de jour	Nombre d'année
15	150	100

$n_{\max} = \text{nombre de cycle/jour} \times \text{nombre de jour} \times \text{nombre d'année}$

$n_{\max} = 225\,000$ cycles

Symbole	Durée totale d'utilisation (nombre n_{\max} de cycles de levage)				
	U0			n_{\max}	<
U1	16 000	<	n_{\max}	<	32 000
U2	32 000	<	n_{\max}	<	63 000
U3	63 000	<	n_{\max}	<	125 000
U4	125 000	<	n_{\max}	<	250 000
U5	250 000	<	n_{\max}	<	500 000
U6	500 000	<	n_{\max}	<	1 000 000
U7	1 000 000	<	n_{\max}	<	2 000 000
U8	2 000 000	<	n_{\max}	<	4 000 000
U9	4 000 000	<	n_{\max}		

Tableau II.1 : Classe d'utilisation des engins de levage

On a $125\,000 < n_{\max} \leq 250\,000$ donc d'après le tableau 2.1.1 c'est la classe **U4**.

- **Spectre de charge de l'engin : (FEM cahier 2 article 2.1.2.3)**

Le spectre de charge caractérise l'ensemble des charges à lever durant la durée d'utilisation totale. En fonction le spectre de charge du portique roulant ; quatre classes de spectre de charge seront définies.

$$k_p = \sum_{i=1}^r \left[\left(\frac{m_i}{m_{\max}} \right)^3 \cdot \left(\frac{n_i}{n_{\max}} \right) \right]$$

$m_{\max} = 30\,000$ kg

$$n_i = n_{\max} = 225\,000$$

m_i	m_i/m_{\max}	$(m_i/m_{\max})^3$	n_i	n_i/n_{\max}	$(n_i/n_{\max}) \cdot (m_i/m_{\max})^3$
20 000	0.66	0.30	225 000	1	0.30

Symbole	Facteur de spectre k_p				
Q1			k_p	\leq	0, 125
Q2	0, 125	<	k_p	\leq	0, 250
Q3	0, 250	<	k_p	\leq	0, 500
Q4	0, 500	<	k_p	\leq	1, 000

Tableau II.2 : Classe de spectre des engins de levage

D'après le tableau 2.1.2, le spectre de charge du portique est de classe **Q3**.

La classe de portique roulant dans son ensemble est définie dans le tableau II.3.

Classe d'utilisation spectre de charge	Classe d'utilisation									
	U0	U1	U2	U3	U4	U5	U6	U7	U8	U9
Q1	A1	A1	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
Q2	A1	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A8
Q3	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A8	A8
Q4	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A8	A8	A8

Tableau II.3 : Groupe d'engin des engins de levage

Donc le portique est de classe **A5** dans son groupe d'engin.

II.2.3) Classe des éléments de l'engin (FEM cahier 2 article 2.1.4)

Les éléments ou les mécanismes de la charpente, sont classés en 8 groupes, désignés respectivement par les symboles E1, E2, ..., E8, sur la base de 11 classes d'utilisation et de 4 classes de spectre de contraintes.

- **Classe d'utilisation de l'engin :**

Elle se fait par durée d'utilisation, c'est-à-dire le nombre de cycles de contraintes auxquelles il est soumis, et par durée totale d'utilisation. C'est la durée d'utilisation supputée, considérée comme valeur d'orientation, jusqu'au remplacement de l'élément.

De la même façon de la classification de l'engin de levage, on a: $n_{\max} = 225\ 000$

symbole	Durée d'utilisation totale (nombre n_{\max} de cycle de contraintes)				
B0			n_{\max}	<	16 000
B1	16 000	<	n_{\max}	<	32 000
B2	32 000	<	n_{\max}	<	63 000
B3	63 000	<	n_{\max}	<	125 000
B4	125 000	<	n_{\max}	<	250 000
B5	250 000	<	n_{\max}	<	500 000
B6	500 000	<	n_{\max}	<	1 000 000
B7	1 000 000	<	n_{\max}	<	2 000 000
B8	2 000 000	<	n_{\max}	<	4 000 000
B9	4 000 000	<	n_{\max}	<	8 000 000
B10	8 000 000	<	n_{\max}		

Tableau II.4 : Classe d'utilisation des engins de levage

On a $125\ 000 < n_{\max} \leq 250\ 000$ donc d'après le tableau 2.1.1 est de classe **B4**.

- **Spectre de contraintes de l'engin :**

Le spectre de contraintes caractérise la mesure de la sollicitation agissant sur l'élément pendant sa durée totale d'utilisation. Généralement le spectre de contrainte k_{sp} est égal au spectre de charge.

Donc : $k_{sp} = 0.30$

symbole	Facture de spectre K_{sp}				
P1			k_{sp}	<	0, 125
P2	0, 125	<	k_{sp}	<	0,25
P3	0, 25	<	k_{sp}	<	0,5
P4	0, 5	<	k_{sp}	<	1

Tableau II.5 : Classe de spectre des engins de levage

Donc le spectre du portique roulant est de classe **P3**.

Sur la base de leur classe d'utilisation et de leur spectre de contrainte, les éléments sont classés dans l'un des groupes définis au tableau suivant :

Classe d'utilisation spectre de contrainte	Classe d'utilisation										
	B0	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10
P1	E1	E1	E1	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8
P2	E1	E1	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E8
P3	E1	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E8	E8
P4	E1	E2	E2	E4	E5	E6	E7	E8	E8	E8	E8

Tableau II.6 : Groupe d'éléments des engins de levage

D'après le tableau 4.1.3, les éléments du portique roulant est de classe **E4**.

II.3) Les caractéristiques du portique roulant

- Type..... caisson
- Facteur de marche 40%
- Classe de démarrage..... 150 d/h
- Force au crochet 20 000 kg
- Portée..... 60m
- Hauteur de levage.....10m
- Vitesse de levage principale.....5.5m/min
- Vitesse de direction principale..... 10m/min
- Vitesse de translation principale.....25m/min

- Genre de commande.....par boîte à boutons
- Tension d'alimentation.....380V-50Hz
- Tension de commande.....2x24V
- Puissance total installée.....12.5 kW
- Nature de rail de roulement.....rail carrée 50x50
- Coefficient de sécurité pour les charge répartie γ_G1.35
- Coefficient de sécurité pour charge variable γ_Q1.50

II.4) Acier utilisé

L'acier est un matériau constitué essentiellement de fer et d'un petit pourcentage de carbone, ces éléments sont extraits de matières premières naturelles tirées du sous-sol (mines de fer et de charbon). Le carbone n'intervient, dans la composition, que pour une très faible part (généralement inférieure à 1%). [2]

Outre le fer et le carbone, l'acier peut comporter d'autres éléments qui leur sont associés :

- Soit volontairement : ce sont notamment le silicium, le manganèse, le nickel, le chrome, le tungstène, le vanadium, etc., qui ont pour propriété d'améliorer les caractéristiques mécanique des aciers (résistance à la rupture, dureté, limite d'élasticité, ductilité, résilience, soudabilité...), on parle dans ces cas des aciers alliés.
- Soit involontairement : phosphore, soufre... qui sont des impuretés et qui altèrent les propriétés des aciers. [2]

	Matériaux	Teneur en carbone	Utilisation
Aciers	- Acier doux.	$0,05\% < C < 0,3\%$	Charpente, boulons, rails
	- Aciers mi-durs.	$0,3\% < C < 0,6\%$	pièces forgées
	- Aciers durs.	$0,6\% < C < 0,75\%$	Outils
	- Aciers extra-durs	$0,75\% < C < 1,20\%$	Outils, poinçons
	- Aciers spéciaux	$1,20\% < C < 1,70\%$	Pièces spéciales
Fontes	- Fontes hypo-eutectiques	$1,70\% < C < 4,50\%$	Pièces coulées, culasses
	- Fontes hyper-eutectiques	$4,50\% < C < 6,30\%$	moteurs, bâtis machines.

Tableau II.7 : Classification des aciers selon leur teneur en carbone

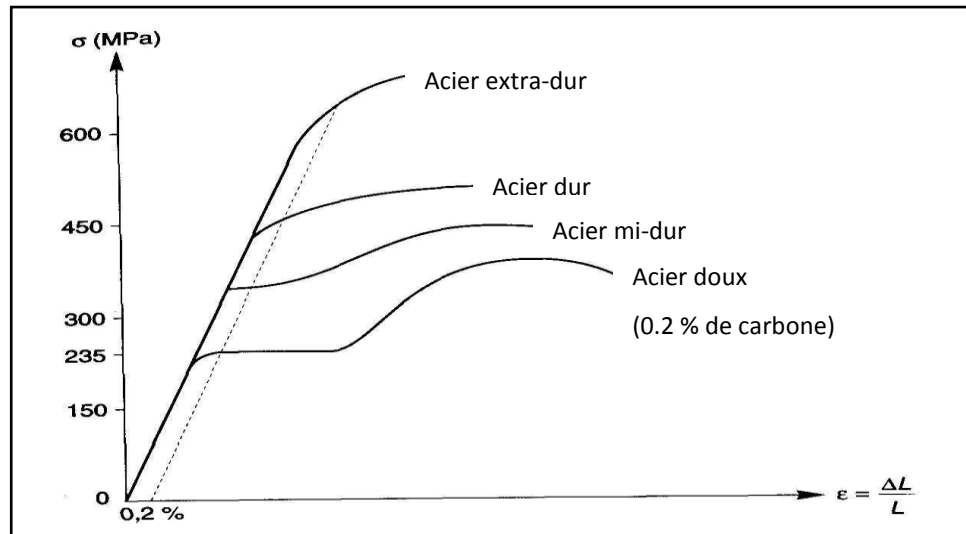


Figure II.1 : Essais de traction des aciers

D'après le tableau 03, on utilise un acier doux qui a une teneur en carbone entre 0,05% et 0,3% pour les éléments de la charpente, c'est le S235 qui a les caractéristiques suivantes :

- Module d'élasticité longitudinale : $E = 210\ 000\ \text{MPa}$.
- Coefficient de Poisson : $\nu = 0,3$.
- Module d'élasticité transversale : $G = 81\ 000\ \text{MPa}$.
- Coefficient de dilatation linéaire : $\lambda = 11 \cdot 10^{-6}$.
- Masse volumique de l'acier : $\rho = 78,50\ \text{kN/m}^3$.
- Limite d'élasticité : $f_y = 235\ \text{MPa}$.
- Contrainte de rupture en traction : $f_u = 360\ \text{MPa}$.
- Contrainte limite élastique de cisaillement pur (critère de Von Mises) :

$$\tau = \frac{f_y}{\sqrt{3}} = 0,58 \cdot f_y$$

II.5) Constitution et géométrie de l'ossature du portique

II.5.1) poutres maitresses

- **Poutre en profilé du commerce** : la construction avec ce type de poutre économise le temps de réalisation, mais elle a un poids mort relativement élevé en ce qui concerne la variété et les dimensions normalisées. On la rencontre surtout pour des poutres maitresses de petite ou moyenne portée et de capacité de levage faible.

- **Poutres mécano-soudées ou profilé reconstitué soudé (PRS) :** afin d'optimiser leurs caractéristiques mécaniques (horizontale et verticale), les poutres sont reconstituées par mécano-soudure :
 - en caisson : la poutre est composée de deux semelles supérieures et inférieures, et de deux tôles d'âme de faible épaisseur généralement renforcées par des cornières ou des raidisseurs soudés, et des entretoises qui évitent le flambage des tôles d'âme.
 - D'autres solutions intermédiaires sont parfois employées, notamment : construction à base de profilé renforcée par des poutres de rive ou des tôles d'âme verticales soudées sur les ailes des profilés (treillis) ou construction triangulée tubulaire. On notera que la construction en treillis est en voie de disparition. [3]

La section droite des poutres maitresses de l'ossature du portique roulant à dimensionner est un profilé reconstitué soudé (PRS) symétrique avec deux âmes et deux semelles supérieure et inférieure, avec des raidisseurs transversaux et horizontaux.

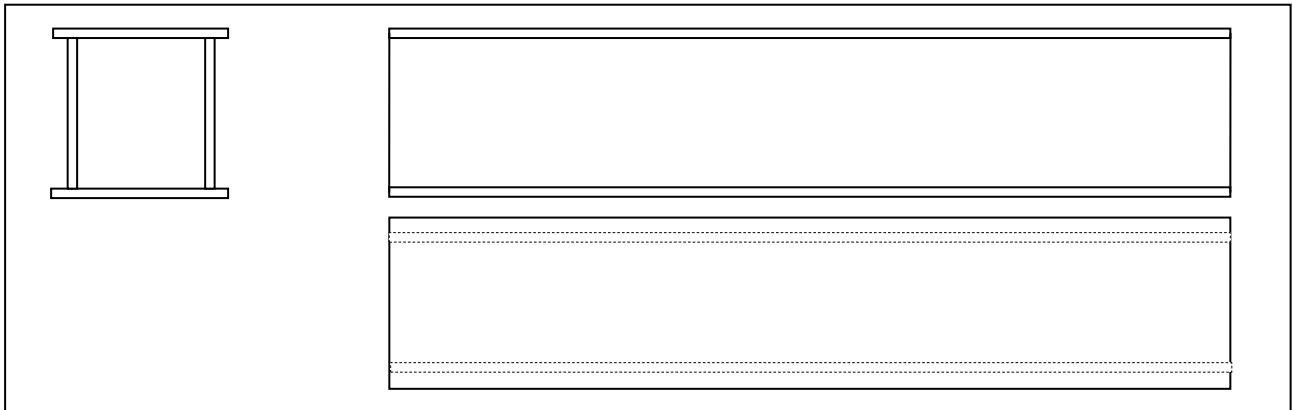


Figure II.2 : Différentes vues du PRS de la poutre maitresse

II.5.2) Sommiers ou boggies

Les sommiers sont les éléments de la charpente qui reposent sur les galets de roulement et les mécanismes de translation du portique roulant, deux constructions sont possibles : sommiers rigides ou boggies articulés.

La distance entre les points de contact sur le rail des deux galets d'un même sommier est appelée empattement.

Les sommiers de la charpente du portique roulant qui vont supporter toute la structure sont d'une section droite trapézoïdale isocèle, sachant que cette forme nous permet d'avoir un bon assemblage.

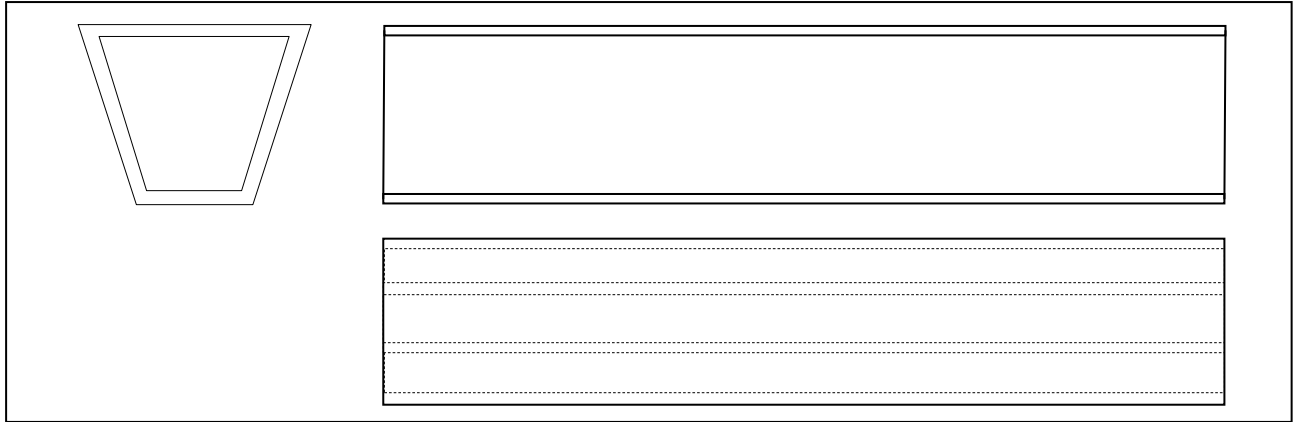


Figure II.3 : Différentes vues de la poutre du sommier

II.5.3) Pieds

Ce sont les éléments de liaison entre les poutres maîtresses et les sommiers ou bougiés sur les portiques. Réalisées en tubes, profilés, caissons mécano-soudés ou treillis celles-ci doivent être suffisamment rigides pour éviter toute déformation de l'ensemble.

Pour les portiques mono-poutres dont les palées sont généralement en profilés, une des deux palées est équipée d'un contreventement permettant de renforcer la stabilité longitudinale.

Généralement, pour les portiques roulant bi-poutre de longue portée, les pieds qui assurent la liaison entre les poutres maîtresses et les deux sommiers sont conçus d'une manière à assurer la stabilité de la structure ; c'est-à-dire éviter le risque de renversement.

Concernant notre cas, pour que les quatre jambes qui vont être conçues pour supporter les sollicitations (le poids des poutres et la charge de service...) dans toutes circonstances, on adopte des pieds d'une section droite rectangulaire constante.

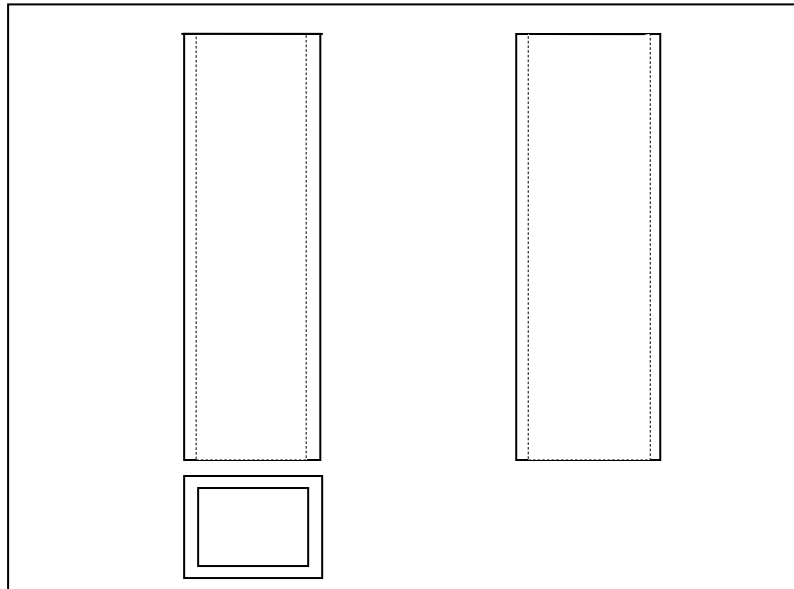


Figure II.4 : Différentes vues de la poutre du pied

II.6) Actions élémentaires

La mise en place des codes européens de calcul des constructions permet de généraliser à l'ensemble des matériaux la justification de la sécurité par la méthode dite des états limite. Dans ce cadre les actions appliquées aux ouvrages sont classées en trois catégories : [4]

- **Les actions permanentes G :**
 - Poids propres
 - Action de précontrainte
 - Déplacement différentiel des appuis
 - Déformation imposée à la construction
- **Les actions variables Q :**
 - Charges d'exploitation
 - Action du vent
 - Action de la neige
 - Action des gradients thermiques
- **Les actions accidentelles A :**
 - Explosions
 - Chocs de véhicules

II.6.1) Combinaisons d'actions (normes NF 1993-1-1)

Les actions sont combinées entre elles et leurs valeurs sont affectées de divers coefficients qui sont les coefficients partiels de sécurité γ , et les coefficients de combinaison ψ .

- **Combinaisons aux E.L.U :**

$$\sum \gamma_G \cdot G + \gamma_Q \cdot Q$$

telque : $\gamma_G = 1,35$ et $\gamma_Q = 1,5$

- **Combinaisons aux E.L.S :**

$$\sum G + \sum \psi_2 \cdot Q$$

telque : $\psi_2 = 1$

II.7) principe de 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 pouvant atteindre leur résistance plastique, sans risque de voilement local, et possédant une capacité importante pour former une rotule plastique.
- 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 atteindre leur résistance élastique en fibre extrême, mais non leur résistance plastique, du fait des risques de voilement local.
- Classe 4 : sections transversales ne pouvant atteindre leur résistance élastique, du fait des risques de voilement local.

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 II.8 : Classification des sections transversales

II.8) Les phénomènes d'instabilité élastique

Le calcul d'une structure exige que, sous toutes les combinaisons d'actions possibles, définies réglementairement la stabilité statique soit assurée :

- Tant globalement, au niveau de la structure.
- Qu'individuellement au niveau de chaque élément.

Les actions développent des diverses sollicitations, qui génèrent des contraintes au sein du matériau et des déformations des éléments. Il s'agit donc, afin de garantir le degré de sécurité souhaité ou souhaitable, de vérifier que les contraintes et les déformations restent en deçà des limites admissibles.

Deux cas de figure se présentent :

- Le cas des petites déformations : tant que l'on reste dans le domaine des petites déformations, on admet que les sollicitations ne varient pas (ou peu) sous l'effet des déformations, ce qui conduit simplement à vérifier que les contraintes restent inférieures à la contrainte de ruine.
- Le cas des grandes déformations : dans le cas des déformations considérables, les sollicitations qui les ont initiées et nécessitent des calculs spécifiques. [2]

Les grandes déformations affectent les zones des pièces comprimées, qui représente dès lors trois types de comportement caractéristique :

- Le déversement : il affecte les semelles comprimées des pièces fléchies et qui est moins dangereux que le flambement.

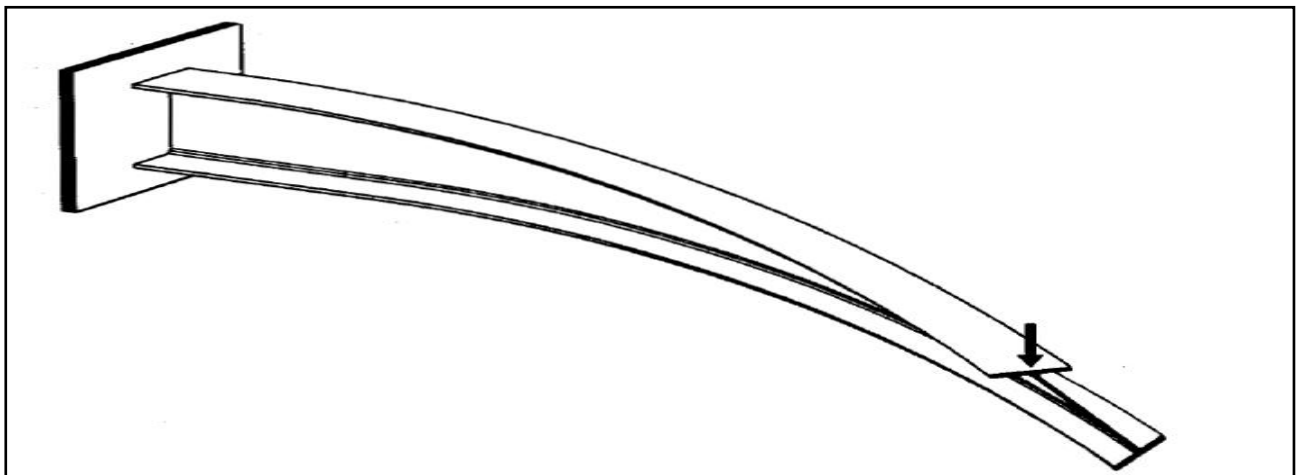


Figure II.5 : Déversement d'une poutre

- Le flambement : il affecte les pièces simplement comprimées (flambement simple) ou comprimées et fléchies (flambement flexion), qui est un phénomène particulièrement dangereux.

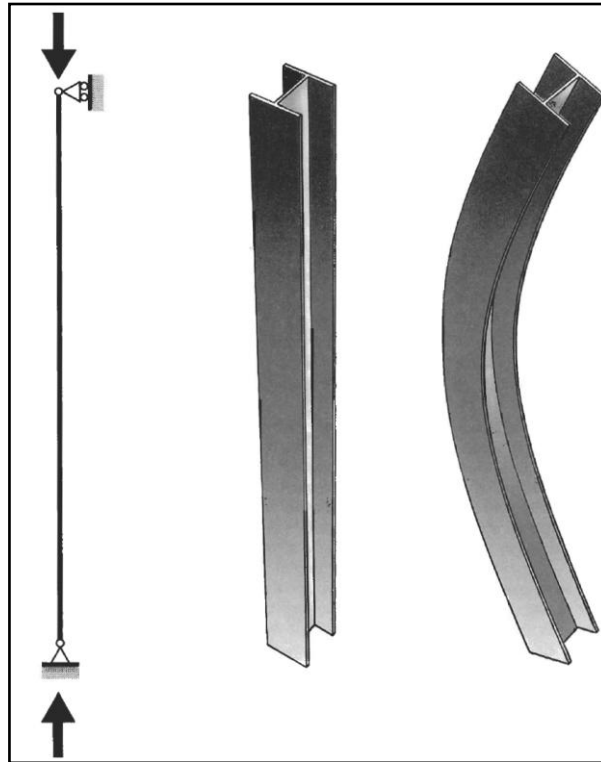


Figure II.6 : Flambement d'un poteau

- Le voilement : il affecte les âmes des pièces, il reste secondaire.

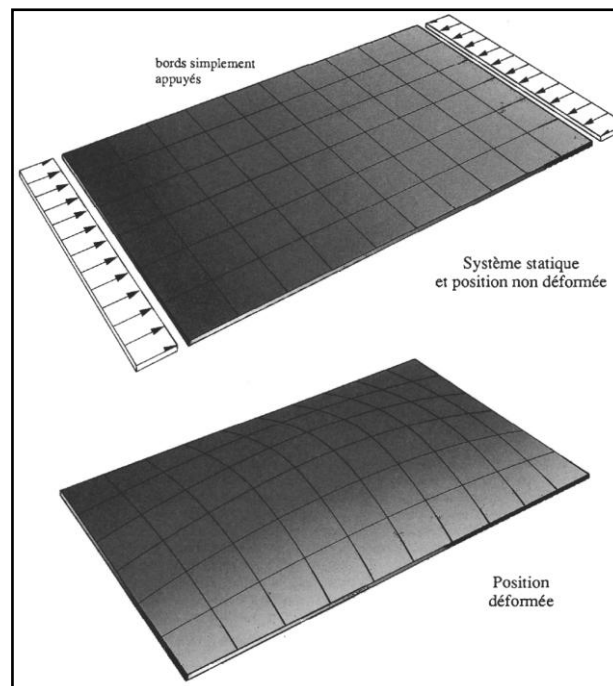


Figure II.7 : Voilement d'une plaque

II.8.1) Vérification réglementaire des phénomènes d'instabilité

- **Flambement par flexion en compression simple (Eurocode 3 partie 1-1)**

Données

N_{Ed}	effort normal pondéré appliqué
f_y	limite d'élasticité de l'acier
A	aire de la section droite
A_{eff}	aire efficace de la section droite en classe 4
I_y	moment d'inertie principale maximale de flexion
I_z	moment d'inertie principale maximale de flexion
$L_{cr,y}$	longueur de flambement dans la direction y
$L_{cr,z}$	longueur de flambement dans la direction z

Calculs

Efforts normaux critiques pour les deux directions principales de flambement

$$\begin{cases} N_{cr,y} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{L_{cr,y}^2} \\ N_{cr,z} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{L_{cr,z}^2} \end{cases}$$

Elancements réduits pour les directions principales de flambement

$$\begin{aligned} \text{Classes 1, 2 et 3 : } \quad \bar{\lambda}_y &= \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cry}}} & \bar{\lambda}_z &= \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{crz}}} \\ \text{Classe 4 : } \quad \bar{\lambda}_y &= \sqrt{\frac{A_{eff} \cdot f_y}{N_{cry}}} & \bar{\lambda}_z &= \sqrt{\frac{A_{eff} \cdot f_y}{N_{crz}}} \end{aligned}$$

Si $\bar{\lambda} \leq 0.2$ ou $N_{Ed} \leq 0,04 \cdot N_{cr}$ dans les deux directions, les effets du flambement peuvent être négligés.

Coefficients de flambement

$$\begin{aligned} \varphi_y &= \frac{1}{2} \left[1 + \alpha_y \cdot (\bar{\lambda}_y - 0.2) + \bar{\lambda}_y^2 \right] & \chi_y &= \frac{1}{\varphi_y + \sqrt{\varphi_y^2 - \bar{\lambda}_y^2}} \\ \varphi_z &= \frac{1}{2} \left[1 + \alpha_z \cdot (\bar{\lambda}_z - 0.2) + \bar{\lambda}_z^2 \right] & \chi_z &= \frac{1}{\varphi_z + \sqrt{\varphi_z^2 - \bar{\lambda}_z^2}} \end{aligned}$$

Utilisation possible de valeurs tabulées de χ en fonction de l'élancement réduit

$$\chi_{min} = \min(\chi_y, \chi_z)$$

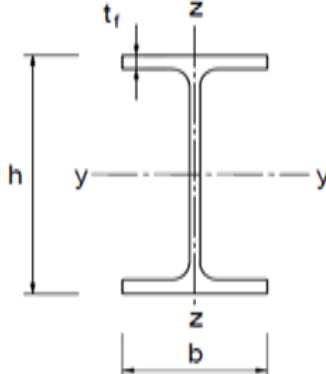
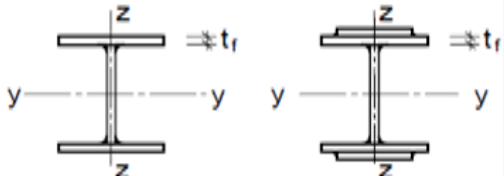

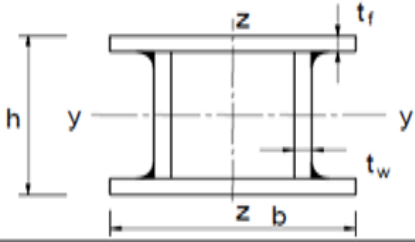
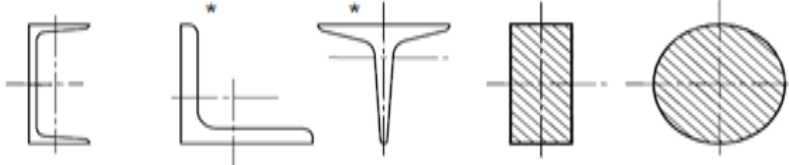
Section transversale	Limites	Flambement selon l'axe	Courbe de flambement	
			S 235 S 275 S 355 S 420	S 460
Profils laminés 	$h/b > 1,2$ $t_f \leq 40\text{mm}$	y - y z - z	a b	a_0 a_0
	$40\text{mm} < t_f \leq 100\text{mm}$	y - y z - z	b c	a a
	$h/b \leq 1,2$ $t_f \leq 100\text{mm}$ $t_f > 100\text{mm}$	y - y z - z y - y z - z	b c d d	a a c c
Profils en I soudés 	$t_f \leq 40\text{mm}$ $t_f > 40\text{mm}$	y - y z - z y - y z - z	b c c d	b c c d
Profils creux 	Laminés à chaud	quelconque	a	a
	Formés à froid	quelconque	b	b
Caissons soudés 	En général (sauf comme ci-dessus)	quelconque	b	b
	Soudures épaisses et $b/t_f < 30$ $h/t_w < 30$	y - y z - z	c c	c c
Profils en U, en L, en T et profils pleins 		quelconque	c	c

Tableau II.9 : Choix de courbe de flambement en fonction de profilé

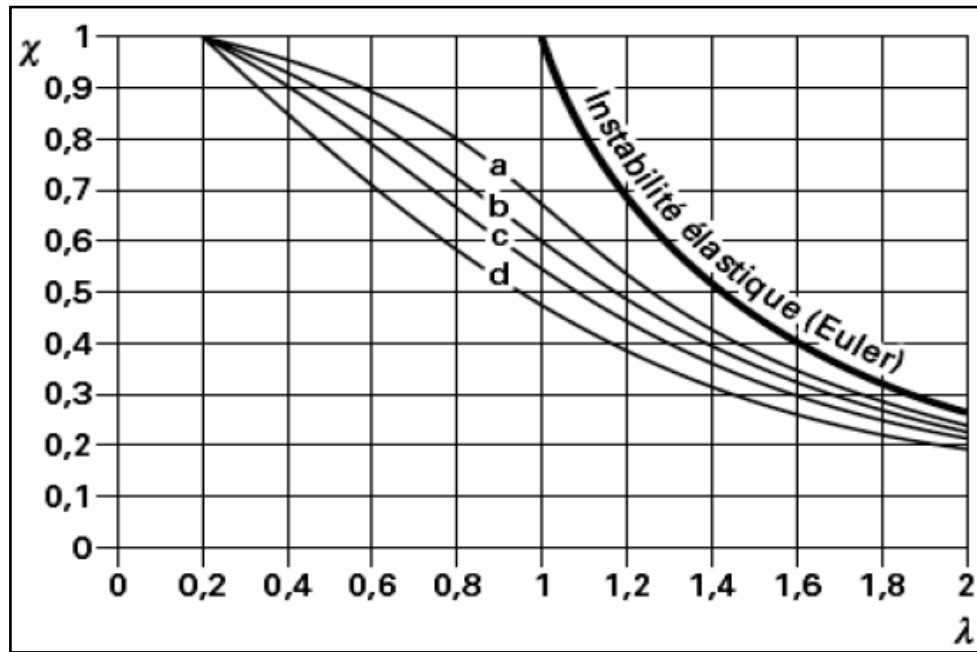


Figure II.8 : Coefficient de réduction χ en fonction de λ

La stabilité est assurée si :

$$\text{Classes 1, 2 et 3 : } \frac{N_{Ed}}{\chi_{\min} \cdot A \cdot f_y / \gamma_{M1}} \leq 1$$

$$\text{Classe 4 : } \frac{N_{Ed}}{\chi_{\min} \cdot A_{\text{eff}} \cdot f_y / \gamma_{M1}} \leq 1$$

- **Déversement en flexion simple (Eurocode 3 partie 1-1)**

Données :

- $M_{y,ed}$ moment fléchissant pondéré maximal sur le tronçon
- f_y limite d'élasticité de l'acier
- I_y moment d'inertie principale maximale de flexion
- I_z moment d'inertie principale maximale de flexion
- $W_{pl,y}$ module plastique de flexion autour de l'axe y
- $W_{el,y}$ module élastique de flexion autour de l'axe y
- $W_{eff,y}$ module élastique de flexion autour de l'axe y en classe 4
- i_z rayon de giration autour de l'axe z
- J moment d'inertie de torsion
- I_w inertie de gauchissement
- h hauteur du profil
- t_f épaisseur d'aile de profil
- L_{LT} longueur de déversement

Le déversement n'est pas à craindre pour les tronçons :

- De longueur $L_{LT} \leq 35 \cdot i_z \varepsilon$ quel que soit le diagramme de moment.
- Soumis à des moments d'extrémité dans le rapport ψ tel que $-1 \leq \psi \leq 0,62$ et $L_{LT} \leq (60 - 40 \cdot \psi) \cdot i_z \cdot \varepsilon$
- $\overline{\lambda}_{LT} \geq 0,4$

Calculs :

C_1, C_2 coefficients en fonctions du diagramme de moments régnant sur la longueur L_{LT}

Charge uniformément répartie	$C_1 = 1,13$	$C_2 = 0,45$
Charge concentrée à mi-travée	$C_1 = 1,35$	$C_2 = 0,59$
Moment constant	$C_1 = 1$	$C_2 = 0$
Moment d'extrémité opposés	$C_1 = 2,55$	$C_2 = 0$
Diagramme triangulaire	$C_1 = 1,77$	$C_2 = 0$

z_g distance de la charge au centre de gravité, comptée positivement si la charge est orientée vers le centre de gravité.

$$M_c = C_1 \cdot \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{L_{LT}^2} \cdot \left[\left(\frac{I_w}{I_z} + \frac{L_{LT}^2 \cdot G \cdot J}{\pi^2 \cdot E \cdot I_z} + (C_2 \cdot z_g)^2 \right)^{\frac{1}{2}} - C_2 \cdot z_g \right] \quad \text{Moment critique}$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{classes 1 et 2} \quad \overline{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{M_{cr}}} \\ \text{classes 3} \quad \overline{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{M_{cr}}} \\ \text{classe 4} \quad \overline{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{eff,y} \cdot f_y}{M_{cr}}} \end{array} \right\} \text{élancement réduit de déversement}$$

Le déversement n'est pas à craindre si $\overline{\lambda}_{LT} \leq 0,4$

$$\varphi_{LT} = \frac{1}{2} \left[1 + \alpha_{LT} \cdot (\overline{\lambda}_{LT} - 0,2) + \overline{\lambda}_{LT}^2 \right]$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\varphi_{LT} + \sqrt{\varphi_{LT}^2 - \overline{\lambda}_{LT}^2}}$$

La stabilité est assurée si :

$$\text{classes 1 et 2: } \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot W_{pl,y} \cdot f_y / \gamma_{M1}} \leq 1$$

$$\text{classes 3: } \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot W_{pl,y} \cdot f_y / \gamma_{M1}} \leq 1$$

classes 4:
$$\frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot W_{pl,y} \cdot f_y / \gamma_{M1}} \leq 1$$

- **Flambement en flexion composée**

Données

N_{Ed}	effort normal pondéré appliqué
$M_{y,Ed}$	moment fléchissant pondéré maximal autour de l'axe principal y
$M_{z,Ed}$	moment fléchissant pondéré maximal autour de l'axe principal z
f_y	limite d'élasticité de l'acier
A	aire de la section droite
A_{eff}	aire efficace de la section droite en classe 4
I_y	moment d'inertie principale maximale de flexion
$W_{pl,y}$	module plastique de flexion autour de l'axe y
$W_{el,y}$	module élastique de flexion autour de l'axe y
$W_{eff,y}$	module élastique de flexion autour de l'axe y en classe 4
I_z	moment d'inertie principale maximale de flexion
$W_{pl,z}$	module plastique de flexion autour de l'axe z
$W_{el,z}$	module élastique de flexion autour de l'axe z
$W_{eff,z}$	module élastique de flexion autour de l'axe z en classe 4
i_z	rayon de giration autour de l'axe z
$L_{cr,y}$	longueur de flambement dans la direction y
$L_{cr,z}$	longueur de flambement dans la direction z
I_T	d'inertie de torsion de Saint-Venant
I_w	inertie de gauchissement
y_0, z_0	coordonnées du centre de cisaillement de la section droite par rapport au centre de gravité
h	hauteur du profil
t_f	épaisseur d'aile de profil
L_T	longueur de flambement par torsion
L_{LT}	longueur de déversement

Calculs

Efforts normaux critiques pour les deux directions principales de flambement

$$\begin{cases} N_{cr,y} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{L_{cr,y}^2} \\ N_{cr,z} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{L_{cr,z}^2} \end{cases}$$

 N_{Rk} effort de compression critique de la section, en fonction de sa classe

Classes 1, 2 et 3 $N_{Rk} = A \cdot f_y$

Classe 4 $N_{Rk} = A_{eff} \cdot f_y$

Coefficient de flambement

Facteur d'imperfection α_y et α_z suivant le type de profil et la direction de flambement

$$\begin{aligned} \varphi_y &= \frac{1}{2} \left[1 + \alpha_y \cdot (\bar{\lambda}_y - 0.2) + \bar{\lambda}_y^2 \right] & \chi_y &= \frac{1}{\varphi_y + \sqrt{\varphi_y^2 - \bar{\lambda}_y^2}} \\ \varphi_z &= \frac{1}{2} \left[1 + \alpha_z \cdot (\bar{\lambda}_z - 0.2) + \bar{\lambda}_z^2 \right] & \chi_z &= \frac{1}{\varphi_z + \sqrt{\varphi_z^2 - \bar{\lambda}_z^2}} \end{aligned}$$

Elancement de déversement

 M_{cr} moment critique de déversement de la barre soumise uniquement à la flexion autour de y $M_{y,Rk}$ moment résistant en flexion de la section, en fonction de sa classe

Classes 1 et 2 $M_{y,Rk} = W_{pl,y} \cdot f_y$

Classe 3 $M_{y,Rk} = W_{el,y} \cdot f_y$

Classe 4 $M_{y,Rk} = W_{eff,y} \cdot f_y$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{M_{y,Rk}}{M_{cr}}}$$

Coefficient de déversement

Facteur d'imperfection α_{LT} en fonction de type de profil

$$\begin{aligned} \varphi_{LT} &= \frac{1}{2} \left[1 + \alpha_{LT} \cdot (\bar{\lambda}_{LT} - 0.2) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right] \\ \chi_{LT} &= \frac{1}{\varphi_{LT} + \sqrt{\varphi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} \end{aligned}$$

Effort normal critique de flambement par torsion

$$N_{cr,T} = \frac{1}{i_0^2} \left(GI_T + \frac{\pi^2 EI_w}{L_T^2} \right) \quad \text{avec : } i_0 = \sqrt{i_y^2 + i_z^2 + y_0^2 + z_0^2}$$

Effort normal critique de flambement par flexion-torsion

$$N_{cr,TF} = \frac{i_0^2}{2(i_y^2 + i_z^2)} \left[N_{cr,y} + N_{cr,T} - \sqrt{(N_{cr,y} + N_{cr,T})^2 - 4N_{cr,y}N_{cr,T} \frac{i_y^2 + i_z^2}{i_0^2}} \right]$$

Facteur de moment uniforme équivalent $C_{my,0}$ $C_{mz,0}$

Moment d'extrémité dans le rapport $C_{mi,0} = 0,79 + 0,21\psi_i + 0,36(\psi_i - 0,33) \frac{N_{Ed}}{N_{cr,i}}$

ψ compris entre -1 et 1

Charge uniformément répartie $C_{mi,0} = 1 + 0,03 \frac{N_{Ed}}{N_{cr,i}}$

Combinaison de moment d'extrémité

Et d'une charge répartie $C_{mi,0} = 1 + \left[\frac{\frac{\pi^2 E I_i}{L^2} |\delta_i|}{M_{i,Ed}} - 1 \right] \frac{N_{Ed}}{N_{cr,i}}$

δ_i flèche maximale le long de la barre

$M_{i,Ed}$ moment de flexion maximal le long de la barre

Facteur de moment uniforme équivalent $C_{mL,T} = 1$

Correction des facteurs de moment uniforme équivalent

A considérer lorsque $\bar{\lambda}_{LT,cst} > 0,2\sqrt{C_1} \cdot \sqrt{\left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}\right) \left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,TF}}\right)}$ qui traduit la sensibilité de la

barre aux déformations de torsion où $\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{M_{y,Rk}}{M_{cr}}}$, avec M_{cr} le moment critique de déversement

de la barre supposé soumis à un moment de flexion constant autour de l'axe y, soit

$$M_{cr} = \frac{\pi^2 E I_z}{L_{LT}^2} \sqrt{\frac{I_w}{I_z} + \frac{L_{LT}^2 G I_T}{\pi^2 E I_z}}$$

$$a_{LT} = 1 - \frac{I_T}{I_y} \geq 0$$

Et ε_y le rapport entre la contrainte de flexion y et d'effort normal, soit :

$$\varepsilon_y = \frac{M_{y,Ed} / W_{el,y}}{N_{Ed} / A} \quad \text{en classes 1,2 et 3}$$

$$\varepsilon_y = \frac{M_{y,Ed} / W_{eff,y}}{N_{Ed} / A_{eff}} \quad \text{en classe 4}$$

$$C_{mi,y} = C_{mi,0} + (1 - C_{mi,0}) \frac{a_{LT} \sqrt{\varepsilon_y}}{1 + a_{LT} \sqrt{\varepsilon_y}}$$

$$C_{mi,z} = C_{mi,0}$$

$$C_{mi,y} = C_{mi,y}^2 \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}\right) \left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,TF}}\right)}} \geq 1$$

Facteur d'interaction pour une justification en élastique de la stabilité (classes 3 et 4)

$$k_{yy} = \frac{C_{m,y} C_{m,LT}}{1 - \chi_y N_{Ed} / N_{cr,y}} \quad k_{yz} = \frac{C_{m,y} C_{m,LT}}{1 - \chi_y N_{Ed} / N_{cr,y}} \cdot \frac{1 - N_{Ed} / N_{cr,y}}{1 - N_{Ed} / N_{cr,z}}$$

$$k_{zy} = \frac{C_{m,y} C_{m,LT}}{1 - \chi_z N_{Ed} / N_{cr,z}} \cdot \frac{1 - N_{Ed} / N_{cr,z}}{1 - N_{Ed} / N_{cr,y}} \quad k_{zz} = \frac{C_{m,y}}{1 - \chi_z N_{Ed} / N_{cr,z}}$$

Formules de justification en élasticité de la stabilité (classes 3 et 4)

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} M_{y,Rk} / \gamma_{M1}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{M_{z,Rk} / \gamma_{M1}} \leq 1$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} M_{y,Rk} / \gamma_{M1}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{M_{z,Rk} / \gamma_{M1}} \leq 1$$

Modifications des facteurs d'interaction pour une justification en plasticité de la stabilité (classes 1 et 2)

Gain de résistance en flexion par plasticité $w_y = \frac{W_{pl,y}}{W_{el,y}} \quad w_z = \frac{W_{pl,z}}{W_{el,z}}$

Taux d'utilisation de la section à l'effort normal $n_{pl} = \frac{N_{Ed}}{N_{Rk} / \gamma_{M1}}$

Elancement réduit maximal de flambement $\bar{\lambda}_{max} = \max(\bar{\lambda}_y, \bar{\lambda}_z)$

Coefficient de plasticité C_{ij}

$$C_{yy} = 1 + (w_y - 1) \left[\left[2 - \frac{1,6}{w_y} C_{my}^2 \bar{\lambda}_{max} (1 + \bar{\lambda}_{max}) \right] n_{pl} - b_{LT} \right]$$

$$C_{yz} = 1 + (w_z - 1) \left[\left[2 - \frac{1,6}{w_z} C_{mz}^2 \bar{\lambda}_{max}^2 \right] n_{pl} - c_{LT} \right]$$

$$C_{zy} = 1 + (w_y - 1) \left[\left[2 - \frac{1,6}{w_y} C_{mz}^2 \bar{\lambda}_{max}^2 \right] n_{pl} - d_{LT} \right]$$

$$C_{zz} = 1 + (w_z - 1) \left[\left[2 - \frac{1,6}{w_z} C_{mz}^2 \bar{\lambda}_{max} (1 + \bar{\lambda}_{max}) \right] n_{pl} - e_{LT} \right]$$

Tel que les termes c_{LT} , b_{LT} , d_{LT} , e_{LT} dépendent de l'élancement $\bar{\lambda}_{LT,cst}$

$$b_{LT} = 0,5 a_{LT} \bar{\lambda}_{LT,cst}^2 \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} M_{pl,y;Rd}} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{M_{pl,z;Rd}}$$

$$c_{LT} = 10 a_{LT} \frac{\bar{\lambda}_{LT,cst}^2}{5 \bar{\lambda}_z^4} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{C_{my} \chi_{LT} M_{pl,y;Rd}}$$

$$d_{LT} = 2 a_{LT} \frac{\bar{\lambda}_{LT,cst}^2}{0,1 + \bar{\lambda}_z^4} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{C_{my} \chi_{LT} M_{pl,y;Rd}} \frac{M_{z,Ed}}{C_{mz} M_{pl,z;Rd}}$$

$$e_{LT} = 1,7 a_{LT} \frac{\bar{\lambda}_{LT,cst}^2}{0,1 + \bar{\lambda}_z^4} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{C_{my} \chi_{LT} M_{pl,y;Rd}}$$

En finale, la prise en compte de la plasticité nécessite d'appliquer aux facteurs d'interaction k_{ij} précédemment définis, les coefficients multiplicateur suivant :

$$\begin{aligned} \text{à } k_{yy} &: \frac{1}{C_{yy}} & \text{à } k_{yz} &: \frac{1}{C_{yz}} \cdot 0,6 \sqrt{\frac{w_z}{w_y}} \\ \text{à } k_{zy} &: \frac{1}{C_{yz}} \cdot 0,6 \sqrt{\frac{w_y}{w_z}} & \text{à } k_{yy} &: \frac{1}{C_{zz}} \end{aligned}$$

Formules de justification en plasticité de la stabilité (classes 1 et 2)

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y A f_y / \gamma_{M1}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} W_{pl,y} / \gamma_{M1}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed}}{W_{pl,z} f_y / \gamma_{M1}} \leq 1$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z A f_y / \gamma_{M1}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} W_{pl,y} / \gamma_{M1}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed}}{W_{pl,z} f_y / \gamma_{M1}} \leq 1$$

- **Voilement de cisaillement des âmes de poutre (Eurocode 3 partie 1-5)**

Selon l'eurocode 3 partie 1-5, les âmes cisillées peuvent être considérées prémunies contre les risques de voilement si leur élancement géométrique, rapport entre leur hauteur totale h_w et leur épaisseur t_w , respecte la condition : $\frac{h_w}{t_w} \leq 31 \cdot \frac{\varepsilon}{\eta} \cdot \sqrt{k_\tau}$ [4]

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

$$k_{\tau} = 4 + \frac{5,34}{(a/h_w)^2} \quad \text{si } a/h_w \leq 1$$

$$\text{Et } k_{\tau} = 5,34 + \frac{4}{(a/h_w)^2} \quad \text{si } a/h_w > 1$$

(a) étant l'espace des raidisseurs transversaux.

Ou $k_{\tau} < \frac{72\varepsilon}{\eta}$ en absence des raidisseurs transversaux.

Lorsque l'élancement géométrique de l'âme dépasse les limites fixées, il faut une justification de stabilité au voilement.

$$\begin{aligned} - \text{Contrainte critique de cisaillement} & \quad \tau_{cr} = k_{\tau} \cdot \frac{E \pi^2}{12(1-\nu^2)} \cdot \left(\frac{t_w}{h_w}\right)^2 \\ - \text{Résistance postcritique de l'âme} & \\ \tau_y = f_y / \sqrt{3} & \quad \tau_y = \tau_{cr} (h_w / h_{eff})^2 \end{aligned}$$

À partir de ces résultats, on va trouver une nouvelle valeur d'élancement réduit

$$\bar{\lambda}_w = \sqrt{\frac{\tau_y}{\tau_{cr}}}$$

$$\text{Et } V_{bw,d} = \chi_w \cdot h_w \cdot t_w \cdot \frac{f_{yw} / \sqrt{3}}{\gamma_{M1}}$$

Tel que x_w est le coefficient pour la contribution de l'âme à la résistance postcritique au cisaillement.

- Pour $\bar{\lambda}_w < 0,83 / \eta$ $x_w = \eta$
- Pour $\bar{\lambda}_w > 0,83 / \eta$ $x_w = 0,83 / \bar{\lambda}_w$
- Pour $\bar{\lambda}_w > 1,08$ $x_w = 1,37 / (0,7 + \bar{\lambda}_w)$

Donc pour vérifier il suffit que :

$$\frac{h_w}{t_w} \leq \frac{0,83}{\eta} \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{E \sqrt{3}}{12(1-\nu^2) \cdot 235}} \cdot \sqrt{k_{\tau}}$$

• Contribution des semelles et expression globale de la résistance au voilement par cisaillement

Notant que le moment M_{Ed} appliqué doit rester inférieur à la valeur limite

$$M_{f,Rd} = b_{fm} t_{fm} f_{yf} d_f / \gamma_{M1}$$

b_{fm} : Largeur efficace

t_{fm} : Epaisseur de la semelle la plus faible

d_f : La distance séparant les fibres moyennes des semelles

La contribution des semelles à la résistance au voilement par cisaillement est la plus faible des deux valeurs pour chaque semelle suivant la formule suivante :

$$V_{bf,Rd} = \frac{b_f \cdot t_f^2}{c} \cdot \frac{f_{yf}}{\gamma_{M1}} \left[1 - \left(\frac{M_{Ed}}{M_{f,Rd}} \right)^2 \right] \quad \text{avec : } c = a \cdot \left(0,25 + \frac{1,6 b_f \cdot t_f^2 \cdot f_{yf}}{t \cdot h_w^2 \cdot f_{yw}} \right)$$

En finale, la résistance totale de la section au voilement est :

$$V_{b,Rd} = V_{bw,Rd} + V_{bf,Rd}$$

Sans dépasser la valeur limite : $(\eta \cdot h_w \cdot t_w \cdot f_{y,w} / \sqrt{3}) / \gamma_{M1}$

Chapitres III

Calcul des éléments de la charpente

III.1) Vérification des poutres maitresses

III.1.1) Pré-dimensionnement

Les deux poutres maitresses sont en profilés reconstitués soudés (PRS) de 60 mètres de portée, elles sont à cinq travées avec un moment quadratique constant sur toute la section, en admettant que des câbles de suspension seront des solutions pour réduire du coût, la portée (L) et la hauteur (H) de la poutre (respectant le rapport $\frac{1}{20} < \frac{H}{L} < \frac{1}{25}$) ; La travée du milieu est de 36 mètres de longueur et les quatre autres sont de 6 mètres de longueur pour chaque une.

Ces poutres sont reposées sur quartes appuis, les deux appuis (pieds) à X = 6 mètres et à X = 54 mètres et les deux autres à X = 12 mètres et à X = 48 mètres où elles sont suspendues par des câbles.

Chaque poutre maitresse doit supportée une charge ponctuelle de 10 tonnes, donc, le cas le plus défavorable est l'emplacement de cette dernière au milieu de la poutre, alors l'étude sera basée sur cette hypothèse.

On se basant sur les données fournies par l'entreprise (ALIECO), on observe que la section transversale est un profilé reconstitué soudé symétrique (PRS) de dimensions suivantes :

H = 1500 mm
 h = 1480 mm
 B = 500 mm
 b = 460 mm
 $t_w = 8$ mm
 $t_f = 10$ mm
 c = 12 mm

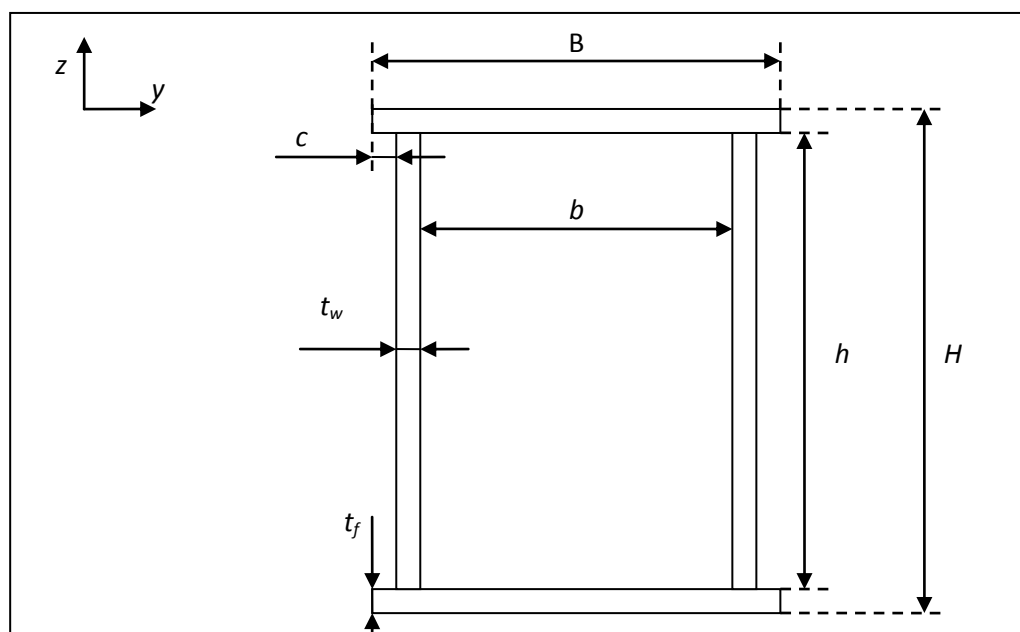


Figure III.1 : La section droite de la poutre maitresse

III.1.2) Les valeurs statiques de la section droite de la poutre

Une section (S) peut être décomposée en n sections élémentaires (Si), $i \in \{1, \dots, n\}$. Les caractéristiques géométriques de la section (S) peuvent être calculées à partir de la somme algébrique des caractéristiques géométriques des sections (Si). [5]

- Calcul de la surface

$$A = \sum A_{si}$$

$$A = 2(1480 \cdot 8) + 2(500 \cdot 10) = 33\,680 \text{ mm}^2$$

- Calcul des moments quadratiques

$$I_y = \iint z^2 ds_1 + \iint z^2 ds_2 + \iint z^2 ds_3 + \iint z^2 ds_4$$

$$I_y = \int_{y=0}^{y=B} \int_{z=0}^{z=t_w} z^2 ds_1 + \int_{y=0}^{y=B} \int_{z=H-t_f}^{z=H} z^2 ds_2 + \int_{y=c}^{y=c+t_w} \int_{z=t_f}^{z=H-2t_f} z^2 ds_3 + \int_{y=B-c}^{y=B-c-t_w} \int_{z=t_f}^{z=H-2t_f} z^2 ds_4$$

$$I_y = \left[\frac{z^3}{3} \right]_0^{500} [y]_0^{10} + \left[\frac{z^3}{3} \right]_0^{500} [y]_{1490}^{1500} + \left[\frac{z^3}{3} \right]_{12}^{20} [y]_{10}^{1480} + \left[\frac{z^3}{3} \right]_{480}^{488} [y]_{10}^{1480}$$

$$I_y = 9\,872\,722\,666,67 \text{ mm}^4 = 987\,272,26 \text{ cm}^4$$

$$I_z = \iint y^2 ds_1 + \iint y^2 ds_2 + \iint y^2 ds_3 + \iint y^2 ds_4$$

$$I_z = \int_{y=0}^{y=B} \int_{z=0}^{z=t_w} y^2 ds_1 + \int_{y=0}^{y=B} \int_{z=H-t_f}^{z=H} y^2 ds_2 + \int_{y=c}^{y=c+t_w} \int_{z=t_f}^{z=H-2t_f} y^2 ds_3 + \int_{y=B-c}^{y=B-c-t_w} \int_{z=t_f}^{z=H-2t_f} y^2 ds_4$$

$$I_z = [z]_0^{500} \left[\frac{y^3}{3} \right]_0^{10} + [z]_0^{500} \left[\frac{y^3}{3} \right]_{1490}^{1500} + [z]_{12}^{20} \left[\frac{y^3}{3} \right]_{10}^{1480} + [z]_{480}^{488} \left[\frac{y^3}{3} \right]_{10}^{1480}$$

$$I_z = 1\,505\,081\,706,66 \text{ mm}^4$$

$$I_A = I_y + I_z = 11\,377\,804\,373,34 \text{ mm}^4 = 1\,137\,780,43 \text{ cm}^4$$

- calcul du module de résistance élastique :

$$W_{ely} = \frac{2 \cdot I_y}{H} = 13\,163\,630,27 \text{ mm}^3$$

- Calcul du moment statique :

$$\mu_y = \iint z ds_1 + \iint z ds_2 + \iint z ds_3 + \iint z ds_4$$

$$\mu_y = \int_{y=0}^{y=B} \int_{z=0}^{z=t_w} z ds_1 + \int_{y=0}^{y=B} \int_{z=H-t_f}^{z=H} z ds_2 + \int_{y=c}^{y=c+t_w} \int_{z=t_f}^{z=H-2t_f} z ds_3 + \int_{y=B-c}^{y=B-c-t_w} \int_{z=t_f}^{z=H-2t_f} z ds_4$$

$$\mu_y = 25\,260\,000 \text{ mm}^3$$

$$\mu_z = \iint y ds_1 + \iint y ds_2 + \iint y ds_3 + \iint y ds_4$$

$$\mu_z = \int_{y=0}^{y=B} \int_{z=0}^{z=t_w} y ds_1 + \int_{y=0}^{y=B} \int_{z=H-t_f}^{z=H} y ds_2 + \int_{y=c}^{y=c+t_w} \int_{z=t_f}^{z=H-2t_f} y ds_3 + \int_{y=B-c}^{y=B-c-t_w} \int_{z=t_f}^{z=H-2t_f} y ds_4$$

$$\mu_z = 8\,170\,000 \text{ mm}^3$$

- Calcul du module de résistance plastique :

$$W_{ply} = 2 \cdot \mu_y = 50\,520\,000 \text{ mm}^3$$

- Calcul du rayon de giration :

$$i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} = 541,41 \text{ mm}$$

$$i_z = \sqrt{\frac{I_z}{A}} = 211,39 \text{ mm}$$

- Calcul d'inertie de gauchissement :

$$I_w = I_z \cdot \frac{(h \cdot t_f)^2}{4} = 813\,079\,002\,281\,534,075 \text{ mm}^6 = 813\,079\,002,28 \text{ cm}^6$$

III.1.3) Calcul des sollicitations sur les poutres maitresses

Dans les calculs suivants, on ne prend pas compte des deux travées d'extrémités (avant-bec) car elles jouent un rôle favorable (elles diminuent la flèche), donc la poutre devient une poutre continue à trois travées de même moment d'inertie comme la montre la figure (III.2).

Les sollicitations seront définies avec la formule des trois moments tel que :

M_i : désigne le moment sur l'appui A_i

M_{i+1} : le moment sur l'appui A_{i+1}

$M_i(x)$: le moment fléchissant dans la travée i de la poutre continue

$M_{0,i}(x)$: le moment fléchissant dans la travée i isostatique associée et chargée uniquement par F sans les moments aux appuis

$V_{0,i}(x)$: l'effort tranchant dans la travée i isostatique associée et chargée uniquement par F sans les moments aux appuis

$\theta_{i,d}^0$: la rotation à droite de l'appui dans la travée i isostatique associée et chargée uniquement par F sans les moments aux appuis

$\theta_{i,g}^0$: la rotation à gauche de l'appui dans la travée i isostatique associée et chargée uniquement par F sans les moments aux appuis

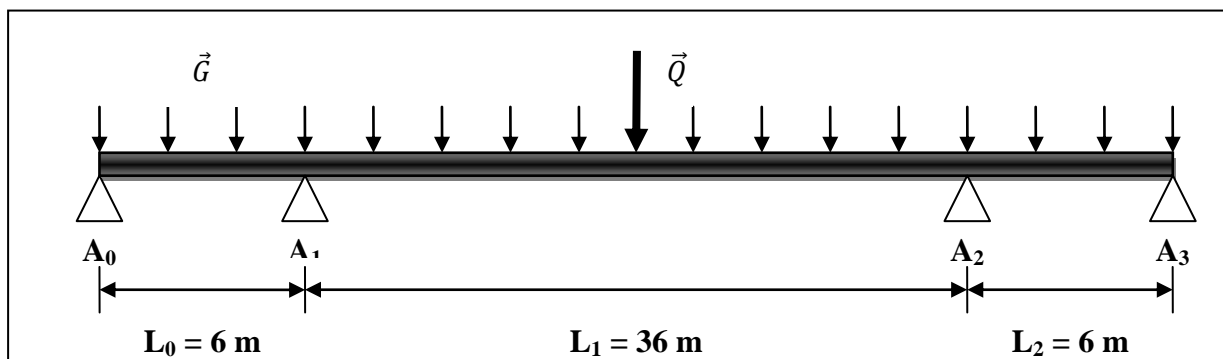


Figure III.2 : La poutre hyperstatique associée

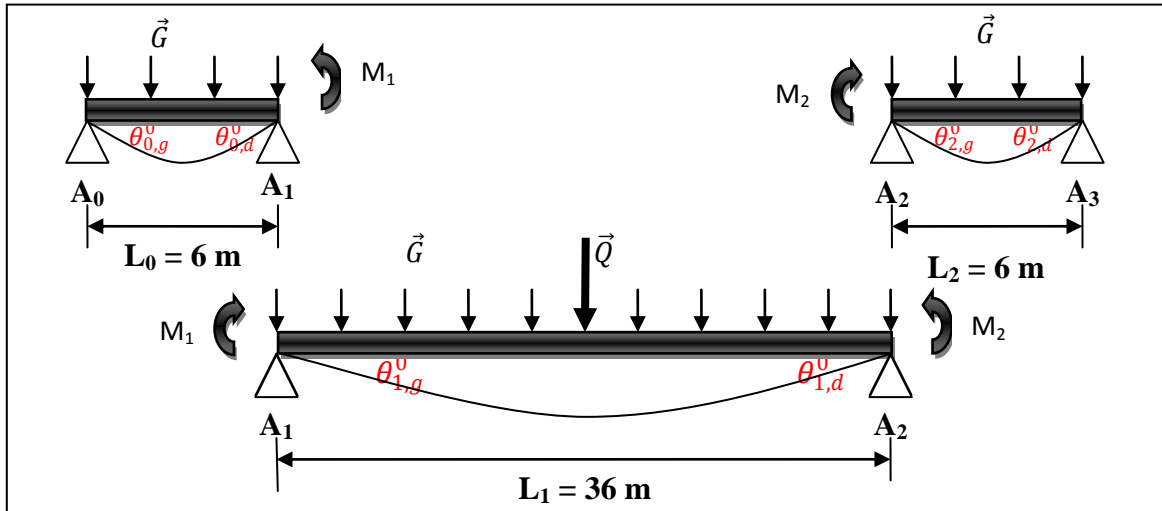


Figure III.3 : Les poutres isostatiques associées

- **Calcul des sollicitations dans les poutres isostatiques associées :**

- **Poutres (1) et (3) :** les poutres (1) et (3) sont de même longueur et sollicitées par une charge uniformément répartie (\vec{G}).

- Calcul des réactions aux appuis :

$$R_{A0} = R_{A1} = R_{A2} = R_{A3} = \frac{GL_0}{2}$$

- Calcul du moment de flexion :

$$M_{max} = \frac{G L_0^2}{8}$$

$$M(x) = \frac{G x}{2} (L_0 - x)$$

- Calcul des efforts tranchants :

$$V_{A2} = V_{A3} = -V_{A0} = -V_{A1}$$

$$V_{A2} = V_{A3} = \frac{GL_0}{2}$$

$$V_{A0} = V_{A1}$$

$$V(x) = \frac{G L_0^2}{2} - (G x)$$

- **Poutres (2) :**

- Calcul des réactions aux appuis :

$$R_{A1} = R_{A2} = \frac{GL_1}{2} + \frac{Q}{2}$$

- Calcul du moment de flexion :

$$M_{max} = \frac{G L_1^2}{8} + \frac{Q L_1}{4}$$

$$M(x) = \frac{G x}{2} (L_1 - x) + \frac{Q x (L_1 - x)}{L_1}$$

- Calcul des efforts tranchants :

$$V_{A1} = -R_{A1}$$

$$V_{A2} = R_{A1}V(x) = \frac{G L_1^2}{2} - (G \cdot x) + \frac{Q}{2}$$

Formule des trois moments pour les travées de même inertie :

$$M_{i-1}L_i + 2M_i(L_i + L_{i+1}) + M_{i+1}L_{i+1} = 6EI(\theta_{i,d}^0 - \theta_{i,g}^0)$$

$$\text{donc : } M_0L_0 + 2M_1(L_1 + L_2) + M_2L_2 = 6EI(\theta_{1,d}^0 - \theta_{1,g}^0)$$

$$M_1L_1 + 2M_2(L_2 + L_3) + M_3L_3 = 6EI(\theta_{2,d}^0 - \theta_{2,g}^0)$$

La poutre continue est chargée uniformément sur toute sa longueur et ponctuellement au milieu, les parties gauche et droite sont symétriques, donc $M_1 = -M_2$; Sachant que $M_0 = M_3 = 0$.

$$\Rightarrow M_1 = \frac{6EI(\theta_{1,d}^0 - \theta_{1,g}^0)}{48 \cdot 10^3}$$

- Calcul des angles de rotation :

$$\theta_{1,d}^0 = -\frac{G L_1^3}{24EI} - \frac{Q L_1^2}{16EI}$$

$$\theta_{1,g}^0 = \frac{G L_0^3}{24EI}$$

Expressions des sollicitations :

- les moments fléchissant :

$$M_i(x) = M_{0,i}(x) + M_{i-1} \left(1 - \frac{x}{L_i}\right) + M_i \left(\frac{x}{L_i}\right)$$

- Les efforts tranchants :

$$V_i(x) = V_{0,i}(x) + \frac{M_{i-1}}{L_i} + \frac{M_i}{L_i}$$

III.1.4 Vérification de la poutre maitresse à l'état limite ultime (E.L.U)

Pour vérifier les poutres maitresses à l'état limite ultime, il faut que $f_{max} < f_{adm}$ tel que $f_{adm} = L_1/1000$.

f_{max} : la flèche maximale

f_{adm} : la flèche admissible

- **Combinaison des forces à E.L.U**

$$\sum \gamma_G \cdot G + \gamma_Q \cdot Q$$

$$G = 1,35 \cdot 2,65 = 3,6 \text{ kN/m}$$

$$Q = 1,5 \cdot 100 = 150 \text{ kN}$$

Sachant que : $Q = 100 \text{ kN}$; la charge variable (la charge de service)

$G = 2,65 \text{ kN/m}$; la charge permanente (le poids propre)

- **Calcul des sollicitations et des déformations :**

- Calcul des efforts tranchants :

$$V_i(0) = -V_i(48) = 149,6 \text{ kN}$$

$$V_i(6) = -V_i(42) = 170,6 \text{ kN}$$

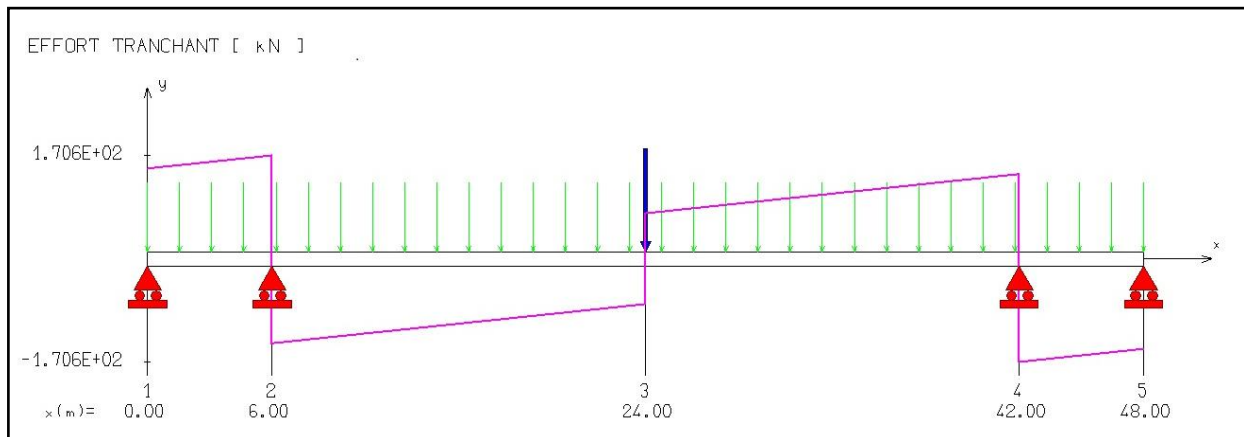


Figure III.4 : Diagramme des efforts tranchants de la poutre maitresse à E.L.U

- **Calcul des moments fléchissant :**

$$M_i(24) = 974,2 \text{ kN.m}$$

$$M_i(6) = M_i(42) = -959,02 \text{ kN.m}$$

$$M_i(0) = M_i(48) = 0 \text{ kN.m}$$

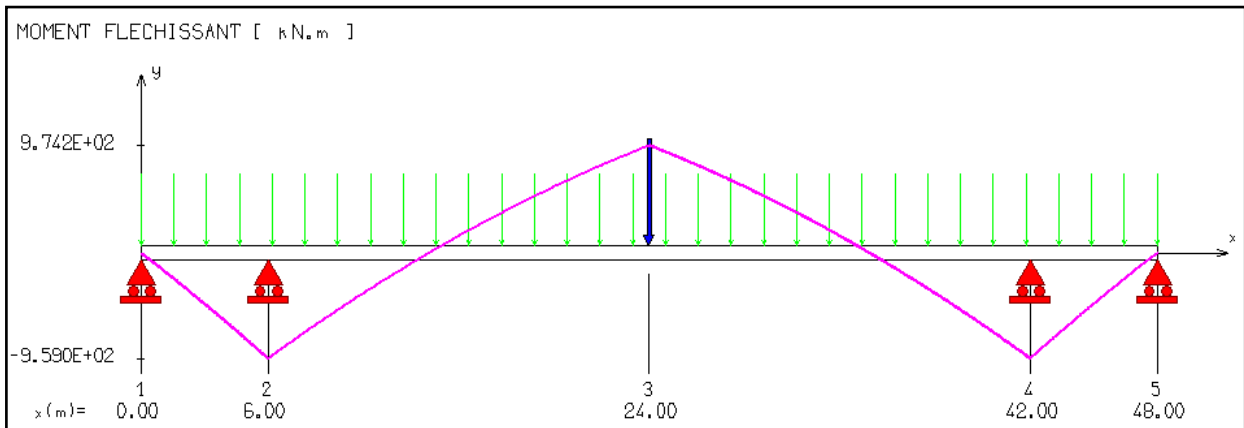


Figure III.5 : Diagramme des moments fléchissant de la poutre maîtresse à E.L.U

- Calcul de la flèche :

La flèche maximale est située au point d'application de la charge ponctuelle \vec{Q} , donc dans la travée du milieu

f est la flèche à un point quelconque

$$f_{max} = f(24\ 000) = 3,336 \cdot 10^{-2} m = 33,36\ mm$$

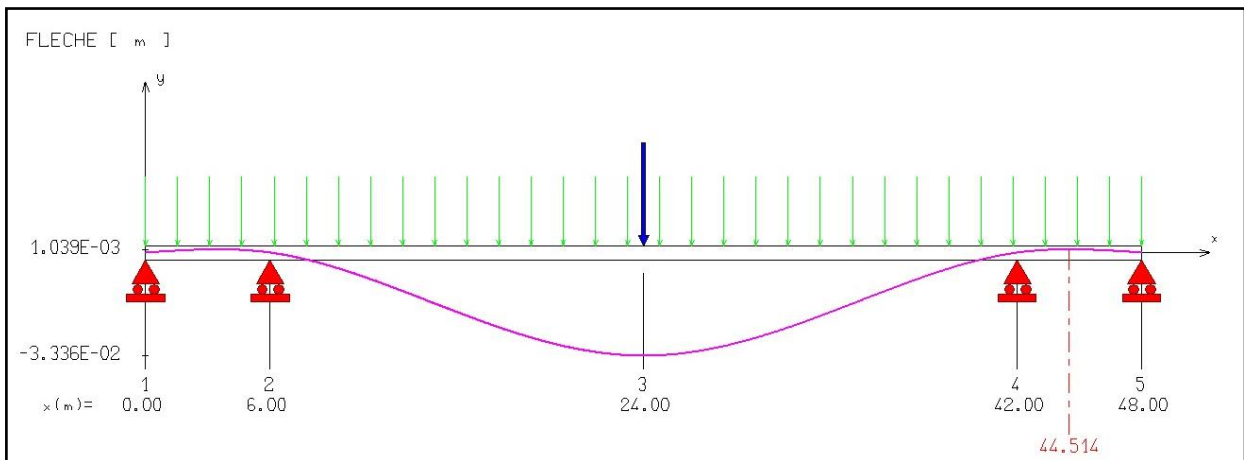


Figure III.6 : Diagramme de la flèche de la poutre maîtresse à E.L.U

D'après les résultats trouvés f_{max} est inférieure à la valeur limite de déformation, donc les poutres maîtresses sont validées à L'E.L.U.

III.1.5) Vérification à l'état limite de service (E.L.S)

- Combinaison des forces à l'E.L.S :

$$\sum G + \sum \psi_2 \cdot Q$$

tel que : $\psi_2 = 1$

$G = 100\ kN$

$Q = 2,65\ kN/m$

- Calcul des sollicitations :

- Calcul des moments fléchissant :

$$M_{max} = M_i(24) = 665.5 \text{ kN.m}$$

$$M_i(6) = M_i(42) = -663.8 \text{ kN.m}$$

$$M_i(0) = M_i(48) = 0 \text{ kN.m}$$

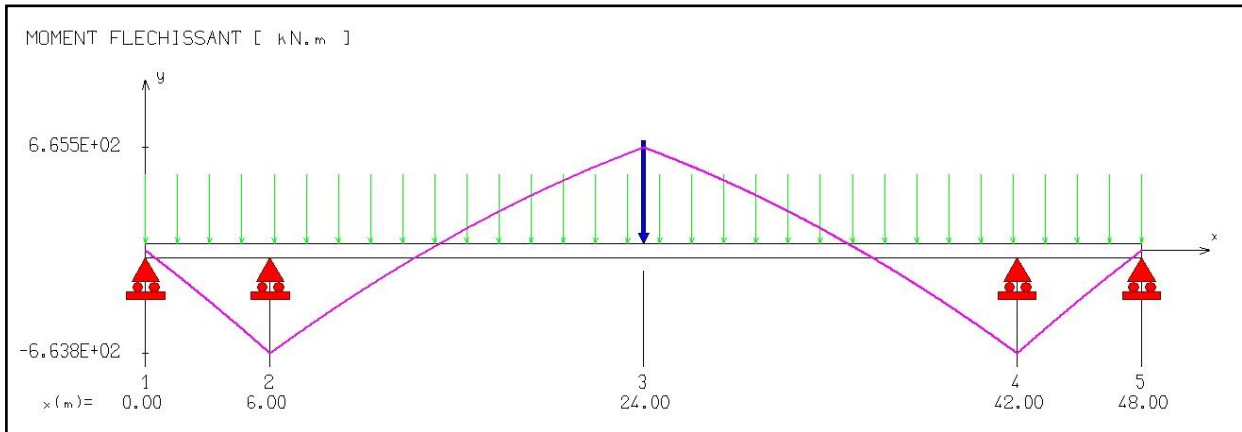


Figure III.7 : Diagramme des moments fléchissant dans la poutre maîtresse à l'E.L.S

- Calcul des efforts tranchants :

$$V_i(0) = -V_i(48) = 102,6 \text{ kN}$$

$$V_i(6) = -V_i(42) = 118,5 \text{ kN}$$

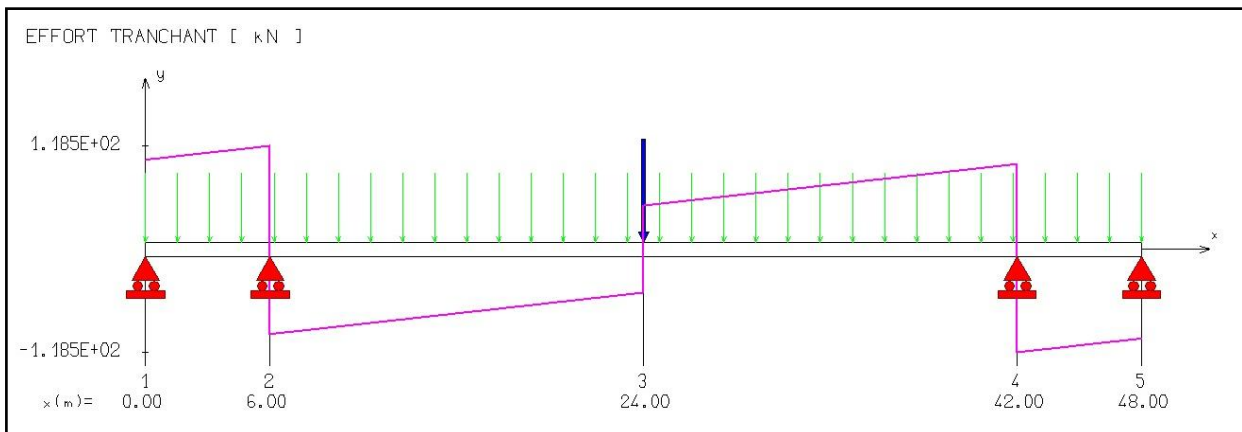


Figure III.8 : Diagramme des efforts tranchants dans la poutre maîtresse à l'E.L.S

III.1.5.1) Classification de la section droite de la poutre

- Classification des âmes :

$$\frac{h - 20}{t_w} = 182,5$$

Le rapport $h - 20 / t_w$ est supérieur à 124ε , sachant que $\varepsilon = 1$; donc les âmes sont de classe 4.

- Classification des semelles :

$$\frac{b}{t_f} = 46$$

Le rapport b/t_f est supérieur à 42ε sachant que $\varepsilon = 1$; donc les semelles sont de classe 4.

Les âmes et les semelles de la poutre sont de classe 4, donc la section droite est de classe 4.

III.1.5.2) Vérification de la poutre au déversement

Données :

$$M_{y,Ed} = 665,5 \text{ kN.m} = 665\,500\,000 \text{ N.mm}$$

$$f_y = 235 \text{ MPa}$$

$$G = 81\,000 \text{ MPa}$$

$$W_{pl,y} = 50\,520\,000 \text{ mm}^3$$

$$W_{el,y} = 13\,163\,630,27 \text{ mm}^3$$

$$I_y = 9\,872\,722\,666,67 \text{ mm}^4$$

$$I_z = 1\,505\,081\,706,66 \text{ mm}^4$$

$$I_w = 813\,079\,002\,281\,534,075 \text{ mm}^6$$

$$J = 501\,693\,902,23 \text{ mm}^4$$

$$i_z = 211,11$$

$$i_y = 541,41 \text{ mm}$$

$$L_{LT} = 36 \text{ m} = 36\,000 \text{ mm}$$

$$L_{LT} = 6 \text{ m} = 6\,000 \text{ mm}$$

Le déversement n'est à craindre pour les tronçons de longueur $L_{LT} \leq 35 \cdot i_z \cdot \varepsilon$, quel que soit le diagramme des moments.

$$35 \cdot i_z \cdot \varepsilon = 7\,398,65 \text{ mm}$$

Donc les tronçons de $L_{LT} = 6\,000 \text{ mm}$ ne sont pas exposés au déversement

- calcul du moment critique

$$M_c = C_1 \cdot \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{L_{LT}^2} \cdot \left[\left(\frac{I_w}{I_z} + \frac{L_{LT}^2 \cdot G \cdot J}{\pi^2 \cdot E \cdot I_z} + (C_2 \cdot z_g)^2 \right)^{\frac{1}{2}} - C_2 \cdot z_g \right] = 13\,086\,070\,575,11 \text{ N}\cdot\text{mm}$$

- calcul de l'élancement réduit :

$$\overline{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{\text{eff},y} \cdot f_y}{M_{\text{cr}}}}$$

$$\rho = \frac{I}{A \cdot v_i \cdot v_s} = 0.6$$

$$W_{\text{eff},y} = W_{\text{el},y} \cdot \rho = 7\,898\,178,162 \text{ mm}^3$$

$$\overline{\lambda}_{LT} = 0.37$$

Le déversement n'est pas à craindre pour le tronçon de $L = 36 \text{ m}$ car $\overline{\lambda}_{LT} < 0,4$

III.1.5.3) Vérification de la poutre au voilement

Données :

$$\varepsilon = 1$$

$$a = 750 \text{ mm}$$

$$t_w = 8 \text{ mm}$$

$$h = 1480 \text{ mm}$$

$$v = 0.3$$

$$\eta = 1$$

$$\tau_y = f_y / \sqrt{3} = 135.68 \text{ MPa}$$

- calcul du coefficient de contrainte critique du cisaillement :

$$k_\tau = 4 + \frac{5,34}{(a/h_w)^2} = 25.36$$

Si $\frac{h_w}{t_w} \leq 31 \cdot \frac{\varepsilon}{\eta} \cdot \sqrt{k_\tau}$ les âmes peuvent être prémuni contre le voilement

$$\frac{h_w}{t_w} = 185$$

$$31 \cdot \frac{\varepsilon}{\eta} \cdot \sqrt{k_\tau} = 156.11$$

Donc, on continue les calculs pour déterminer la résistance postcritique des âmes et la contribution des semelles.

- Calcul de résistance postcritique des âmes :

$$\tau_{cr} = \frac{\tau_y}{(h_w/h_{\text{eff}})^2} = 48,84 \text{ MPa}$$

$$\bar{\lambda}_w = \sqrt{\frac{\tau_y}{\tau_{cr}}} = 1.66$$

$$V_{2w,d} = x_w \cdot h_w \cdot t_w \cdot \frac{f_{yw}/\sqrt{3}}{\gamma_{M1}} = 861\,642\,N$$

Tel que : $x_w = 0,59$

- Calcul de la contribution des semelles au voilement par cisaillement

$$M_{f,Rd} = \frac{b_{fm} t_{fm} f_{yf} d_f}{\gamma_{M1}} = 1\,125\,000\,N.m$$

$$V_{2f,Rd} = \frac{b_f \cdot t_f^2}{c} \cdot \frac{f_{yf}}{\gamma_{M1}} \left[1 - \left(\frac{M_{Ed}}{M_{f,Rd}} \right)^2 \right] = 83\,625,92\,N$$

- Calcul de la résistance totale de la section au voilement par cisaillement

$$V_{2,Rd} = V_{2w,Rd} + V_{2f,Rd} = 945\,267,92\,N$$

- Calcul de la valeur limite :

$$\left(\frac{\eta \cdot h_w \cdot t_w \cdot f_{y,w}}{\sqrt{3}} \right) / \gamma_{M1} = 1\,460\,381,26\,N$$

D'après les calculs, on remarque que l'effort résistant de la section au voilement est inférieur à la valeur limite, ce qui nous conduit à conclure que la section de la poutre maîtresse est assurée contre le voilement par cisaillement.

III.2) Vérification des pieds

Les pieds de la charpente du portique sont quatre, chaque pied est constitué de deux parties qui sont, le pied de suspension du câble d'une longueur de 7,5 mètres placé perpendiculairement par rapport à la poutre maîtresse, dont la section droite est carrée, et le pied principal qui supporte la charge de service et les poids propres des éléments (poutre et pied de suspension), sa longueur est de 10 mètres avec une section droite rectangulaire.

III.2.1) Vérification des pieds de suspension

III.2.1.1) Vérification à l'état limite ultime (E.L.U)

Dans ce titre, on procède à un pré-dimensionnement de la section droite du pied, notre cas est assimilé à une poutre encadrée d'un côté et sollicitée par une force N_c qui est la tension du câble de suspension de l'autre côté. Donc les pieds de suspension sont sollicités par une flexion et une compression.

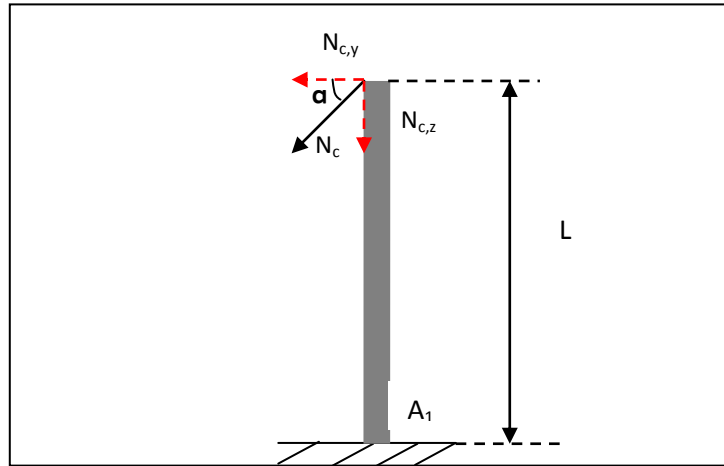


Figure III.9 : Les efforts appliqués au pied de suspension du câble

Tel que : $N_{cr} = V_i(6)/\sin(45) = 241,26 \text{ kN}$

$$N_{c,y} = 170,6 \text{ kN}$$

$$N_{c,z} = 170,6 \text{ kN}$$

$V_i(6)$: l'effort tranchant de la poutre maitresse à l'ELU

- Calcul du moment fléchissant :

$$M_{A1} = N_{c,y} \cdot L = 1\,279,5 \text{ kN.m}$$

Pour que les pieds résistent à la flexion, il faut que $f \leq \frac{L}{450}$

$$\text{D'autre part on a : } f = \frac{N_{cy} L^3}{3.E.I}$$

$$\text{Donc : } \frac{L}{450} \leq \frac{N_{cy} L^3}{3.E.I} \Rightarrow I \geq \frac{N_{cy} \cdot L^2 \cdot 450}{3.E}$$

$$\Rightarrow I \geq 6\,854\,464\,285,7 \text{ mm}^4 = 685\,446,42 \text{ cm}^4$$

Pour que la flèche de pied soit inférieure à $L/450$; il faut que le moment quadratique de la section droite soit supérieur à l'inertie calculée.

Donc la section droite est un carré de 800 mm de longueur et 23 mm d'épaisseur tel que :

$$A = 71\,484 \text{ mm}^2$$

$$h = 800 \text{ mm}$$

$$t_f = 23 \text{ mm}$$

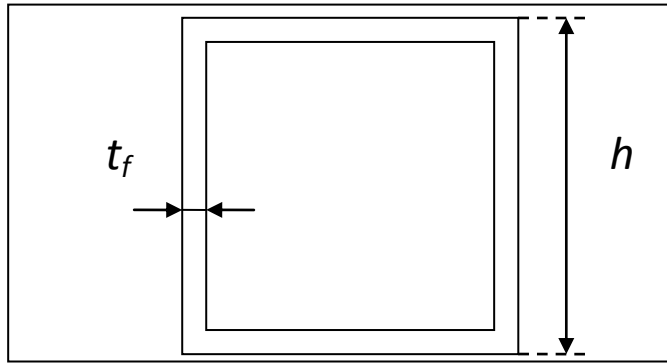


Figure III.10: La section droite du pied de suspension du câble

III.2.1.2) les valeurs statique du pied de suspension

- Calcul des moments d'inertie :

$$I_y = I_z = \frac{h^4 - (h - 2t_f)^4}{12} = 7\,199\,129\,812 \text{ mm}^4$$

- Calcul des moments statique:

$$I_y = I_z = \frac{h^3 - [(h - 2t_f)^2 \cdot h]}{2} = 28\,593\,600 \text{ mm}^3$$

- Calcul du module de résistance élastique:

$$W_{ely} = \frac{2 \cdot I_y}{H} = 17\,997\,824,53 \text{ mm}^3$$

- Calcul du module de résistance plastique:

$$W_{ply} = 2 \cdot \mu_y = 57\,187\,200 \text{ mm}^3$$

- Calcul des rayons de giration :

$$i_y = i_z = \sqrt{\frac{I_y}{A}} = 317,34 \text{ mm}$$

- Calcul du moment de gauchissement :

$$I_w = I_z \cdot \frac{(h \cdot t_f)^2}{4} = 609\,334\,347\,287\,680\,000 \text{ mm}^6 = 6\,093\,343\,472,87 \text{ cm}^6$$

- Calcul de la distance entre les fibres extrêmes et l'axe neutre :

$$v_i = v_s = \frac{h}{2} = 400 \text{ mm}$$

- Calcul du rendement de la section :

$$\rho = \frac{I_y}{A \cdot v_i v_s} = 0.62$$

III.2.1.3) Vérification à l'état ultime de service (E.L.S)

III.2.1.3.1) Classification de la section du pied de suspension

$$\text{On a: } \frac{d}{t_f} = \frac{h-3.t_f}{t_f} \\ = 31,78$$

Selon l'Eurocode 3 ; Si $d/t_f \leq 33\varepsilon$, sachant que $\varepsilon=1$; donc la section est de classe 1.

III.2.1.3.2) Vérification de la section du pied de suspension au déversement

Quand $L_{LT} \leq 35 \cdot i_z \cdot \varepsilon$ ou $\bar{\lambda}_{LT} \leq 0,4$, il est inutile de prendre compte le phénomène d'instabilité, si non il faut vérifier que le moment maximal M_f est inférieur au moment ultime du déversement.

$$\text{Donc } 35 \cdot i_z \cdot \varepsilon = 11\,106,9 \text{ mm}$$

La longueur de déversement $L_{LT} = 7\,500$ mm est inférieure à $35 \cdot i_z \cdot \varepsilon$ dans ce cas, il n'est y a pas un risque de ruine par déversement.

III.2.1.3.3) Vérification de la section du pied de suspension au flambement

Données :

$$N_{ed} = N_{c,y} = 170,6 \text{ kN.}$$

$$f_y = 235 \text{ MPa.}$$

$$A = 71\,484 \text{ mm}^2.$$

$$I_y = I_z = 7\,199\,129\,812 \text{ mm}^4.$$

$$L = 7\,500 \text{ mm}$$

$$L_{cry} = L_{crz} = 2L = 14\,000 \text{ mm.}$$

- Calcul des efforts normaux critiques :

$$\text{On a : } N_{cry} = N_{crz} = N_{cr} \quad \text{car : } I_y = I_z$$

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{L_{cr}^2} \Rightarrow N_{cr} = 76\,050\,578,89 \text{ N} = 76\,050,57 \text{ kN}$$

$$N_{cr} \cdot 0,04 = 3\,042,02 \text{ kN} \quad \Rightarrow N_{ed} > 0,04 \cdot N_{cr}$$

Les effets des efforts de flambement peuvent être négligés dans les deux directions z et y parce que $N_{ed} > 0,04 \cdot N_{cr}$.

III.2.1.3.4) Vérification de la section du pied de suspension au voilement

Données :

$$\varepsilon = 1$$

$$t_w = 23 \text{ mm}$$

$$h = 800 \text{ mm}$$

$$v = 0.3$$

$$\eta = 1$$

$$\tau_y = f_y / \sqrt{3} = 135,68 \text{ MPa}$$

Si $\frac{h_w}{t_w} < \frac{72\varepsilon}{\eta}$ les âmes peuvent être prémuni contre le voilement

$$\frac{h_w}{t_w} = 34,78 \qquad \frac{72\varepsilon}{\eta} = 72$$

Donc, on continue les calculs pour déterminer la résistance postcritique des âmes et la contribution des semelles.

- Calcul de la résistance postcritique des âmes :

$$\tau_{cr} = \frac{\tau_y}{(h_w/h_{eff})^2} = 52,15 \text{ MPa}$$

$$\bar{\lambda}_w = \sqrt{\frac{\tau_y}{\tau_{cr}}} = 1,6$$

$$V_{2w,d} = x_w \cdot h_w \cdot t_w \cdot \frac{f_{yw} / \sqrt{3}}{\gamma_{M1}} = 1\,278\,781,5 \text{ N}$$

Tel que : $x_w = 0,59$

- Calcul de la contribution des semelles au voilement par cisaillement :

$$M_{f,Rd} = \frac{b_{fm} t_{fm} f_{yf} d_f}{\gamma_{M1}} = 577\,217\,835,63 \text{ N.mm} = 577,21 \text{ kN.m}$$

$$V_{2f,Rd} = \frac{b_f \cdot t_f^2}{c} \cdot \frac{f_{yf}}{\gamma_{M1}} \left[1 - \left(\frac{M_{Ed}}{M_{f,Rd}} \right)^2 \right] = 21\,900,38 \text{ N}$$

- Calcul de la résistance totale de la section au voilement par cisaillement :

$$V_{2,Rd} = V_{2w,Rd} + V_{2f,Rd} = 1\,300\,681,88 \text{ N} = 1\,300,68 \text{ kN}$$

- Calcul de la valeur limite :

$$\left(\frac{\eta \cdot h_w \cdot t_w \cdot f_{y,w}}{\sqrt{3}}\right) / \gamma_{M1} = 2\,167\,383,40\text{ N}$$

La section va résister au voilement par cisaillement, car l'effort résistant de la section au voilement est inférieur à la valeur limite.

III.2.2) Vérification du pied principal

Pour des raisons d'assemblage, la section droite du pied principal va épouser exactement la section droite du pied de suspension du câble et la largeur de la poutre maitresse, donc elle prend les dimensions suivantes :

$$b = 1300\text{ mm}$$

$$h = 800\text{ mm}$$

$$t_f = 23\text{ mm}$$

$$A = 94\,484\text{ mm}^2$$

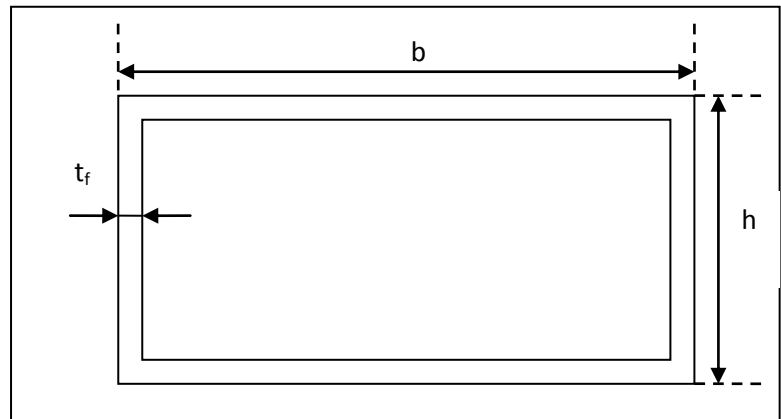


Figure III.11 : La section droite du pied principal

III.2.2.1) Les valeurs statique du pied principal

- Calcul des moments d'inertie :

$$I_y = \frac{(b \cdot h^3) - [(b-2t_f)(h-2t_f)^3]}{12} = 22\,563\,413\,478,67\text{ mm}^4 = 2\,256\,341,34\text{ cm}^4$$

$$I_z = \frac{(h \cdot b^3) - [(h-2t_f)(b-2t_f)^3]}{12} = 10\,671\,585\,478,67\text{ mm}^4 = 1\,067\,158,54\text{ cm}^4$$

- Calcul des moments statique:

$$\mu_y = \frac{(b \cdot h^2) - [b \cdot h \cdot (h - 2t_f)]}{2} = 23\,920\,000\text{ mm}^3$$

$$\mu_z = \frac{(h \cdot b^2) - [b \cdot h \cdot (b - 2t_f)]}{2} = 47\,840\,000\text{ mm}^3$$

- Calcul du module de résistance élastique:

$$W_{ely} = \frac{2 \cdot I_y}{H} = 69\,425\,887,62\text{ mm}^3$$

- Calcul du module de résistance plastique:

$$W_{ply} = 2 \cdot \mu_y = 47\,840\,000 \text{ mm}^3$$

- Calcul des rayons de giration :

$$i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} = 488,68 \text{ mm}$$

$$i_z = \sqrt{\frac{I_z}{A}} = 336,07 \text{ mm}$$

- Calcul du moment de gauchissement :

$$I_w = I_z \cdot \frac{(h \cdot t_f)^2}{4} = 2\,385\,126\,033\,446\,441\,675 \text{ mm}^6 = 2\,385 \cdot 10^{15} \text{ mm}^6$$

III.2.2.2) Vérification du pied principal à l'état limite ultime (E.L.U)

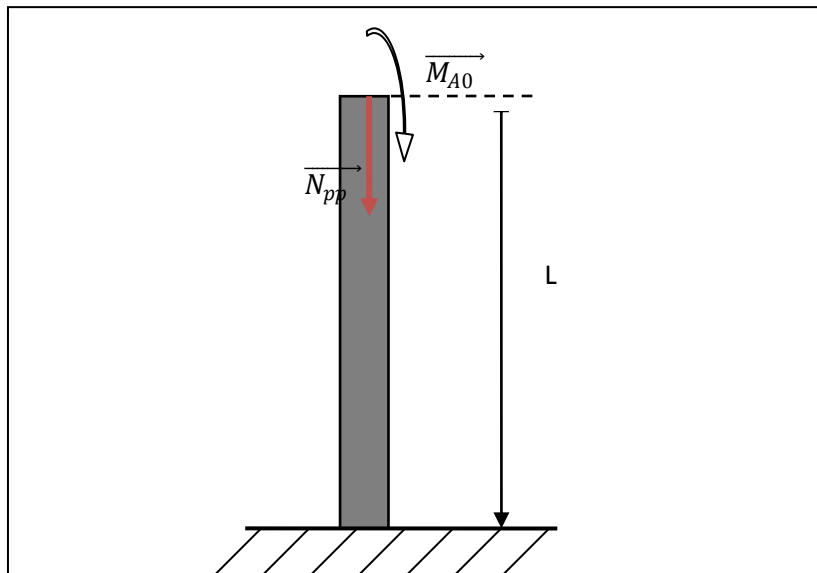


Figure III.12 : Les sollicitations au pied principal

Tel que : $N_{pp} = N_{c,y} + (1,35 \cdot P_{ps}) + V_i(0)$

$$P_{ps} = A \cdot L \cdot \rho = 42,08 \text{ kN}$$

$$V_i(0) = 149 \text{ kN}$$

$$N_{c,y} = 170,6 \text{ kN}$$

$$\Rightarrow N_{pp} = 377,008 \text{ kN}$$

P_{ps} : poids propre du pied de suspension

$V_i(0)$: effort tranchant de la poutre maitresse à l'E.L.U

$N_{c,y}$: effort normal du pied de suspension à l'E.L.U

- Calcul de la flèche :

$$f_{max} = \frac{M_{A0} \cdot L^2}{2 \cdot E \cdot I_z} = 28,54 \text{ mm}$$

- Calcul de la flèche admissible :

$$f_{adm} = \frac{L}{300} = 33,33 \text{ mm}$$

On remarque que $f_{max} < f_{adm}$; donc les pieds principaux sont pas exposés à la ruine.

III.2.2.3) Vérification à l'état limite de service (E.L.S)

III.2.2.3.1) Classification de la section de pied principal

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

$$= 1$$

$$\text{Et : } \frac{b}{t_f} = 34,78$$

$$\frac{b}{t_f} < 42\varepsilon \quad \text{Donc la section est de classe 1}$$

$$\text{Et : } \frac{d}{t_f} = \frac{h-3 \cdot t_f}{t_f}$$

$$= 53,52$$

$$\frac{d}{t_f} > 42\varepsilon \quad \text{Donc la section est de classe 4}$$

Selon l'eurocode 3, la section droite va prendre la classe la plus défavorable, donc dans notre cas, elle est de classe 4.

III.2.2.3.2) Vérification de la section du pied principal au flambement

Données :

$$N_{ed} = N_{pp} = N_{c,y} + V_i(0) + P_{ps} = 263,18 \text{ kN}$$

$$N_{c,y} = 118,5 \text{ kN}$$

$$V_i(0) = 102,6 \text{ kN}$$

$$P_{ps} = A \cdot L \cdot \rho = 42,08 \text{ kN}$$

- $N_{c,y}$: effort normal du pied de suspension à l'E.L.S
- $V_i(0)$: effort tranchant de la poutre maitresse à l'E.L.S
- P_{ps} : poids propre du pied de suspension.

$$A = 94\,484 \text{ mm}^2$$

$$I_y = 10\,671\,585\,479 \text{ mm}^4$$

$$I_z = 2\,256\,341\,349 \text{ mm}^4$$

$$E = 210\,000 \text{ MPa}$$

$$f_y = 235 \text{ MPa}$$

$$L = 10 \text{ m} = 10\,000 \text{ mm}$$

$$L_{cry} = L_{crz} = L_{cr} = 0,7 \cdot L = 7\,000 \text{ mm}$$

- Calcul des efforts critiques pour les deux axes y et z :

$$\begin{aligned} N_{cry} &= \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{L_{cr}^2} \\ &= 1\,868\,716\,344,91 \text{ N} = 1\,868\,716,34 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} N_{crz} &= \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{L_{cr}^2} \\ &= 883\,827\,539,18 \text{ N} = 883\,827,53 \text{ kN}. \end{aligned}$$

- Calcul de la section efficace :

$$A_{eff} = \rho \cdot A$$

$$\text{Tel que : } \rho = \frac{I}{A \cdot v_i \cdot v_s} = \frac{1}{3}$$

$$\text{Donc : } A_{eff} = 31\,494,66 \text{ mm}^2$$

- Calcul de l'élanement réduit pour les deux axes y et z :

$$\begin{aligned} \bar{\lambda}_z &= \sqrt{\frac{A_{eff} f_y}{N_{cry}}} \\ &= 0,091 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{\lambda}_y &= \sqrt{\frac{A_{eff} f_y}{N_{crz}}} \\ &= 0,062 \end{aligned}$$

$$\bar{\lambda}_z < 0,2 \text{ et } \bar{\lambda}_y < 0,2$$

D'après les résultats obtenus ci-dessus, les effets de flambement peuvent être négligés dans les deux directions principales parce que $\bar{\lambda} < 0,2$

III.3) Vérification du Sommier

Le sommier est assimilé à une poutre sur deux appuis d'une longueur de 7 mètres et d'une section droite trapézoïdale isocèle avec un moment d'inertie constant sollicité par deux charges ponctuelles comme le montre la figure (III.13).

III.3.1) Vérification du sommier à l'état limite ultime (E.L.U)

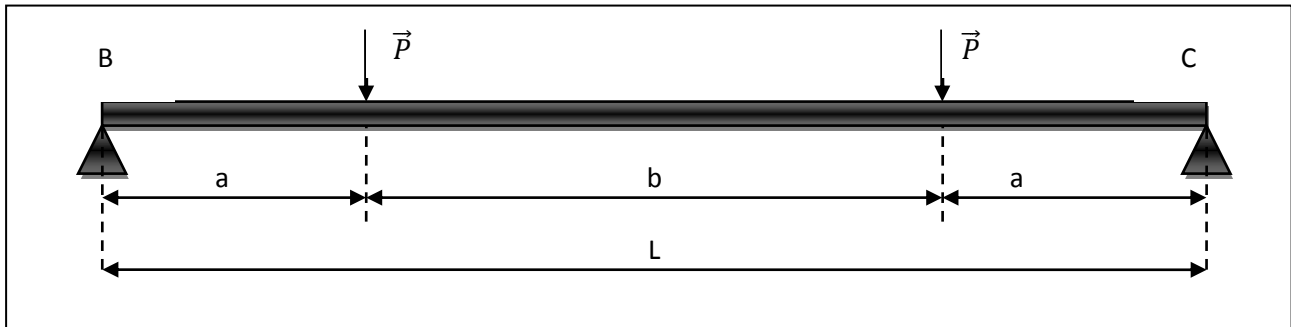


Figure III.13 : Les sollicitations au sommier

Tel que : $P = (1,35 \cdot P_{pp}) + N_{pp}$

$$P_{pp} = A \cdot L_{pp} \cdot \rho = 71,61 \text{ kN}$$

$$N_{pp} = 377,008 \text{ kN}$$

$$\Rightarrow P = 473,69 \text{ kN}$$

P_{pp} : poids propre du pied principal

N_{pp} : effort normal sur le pied principal à l'E.L.U

$$a = 2 \text{ m} = 2\,000 \text{ mm}$$

$$b = 3 \text{ m} = 3\,000 \text{ mm}$$

$$L = 7 \text{ m} = 7\,000 \text{ mm}$$

- Calcul des réactions aux appuis :

$$R_B = R_C = P$$

$$= 473,69 \text{ kN}$$

- Calcul du moment de flexion :

$$M_{\max} = P \cdot a$$

$$= 947,38 \text{ kN.m}$$

Pour que cette pièce résiste, il faut que $f_{max} \leq L/1\,000$

$$D'autre\ part : f_{max} = \frac{P \cdot a (3L^2 - 4a^2)}{24 \cdot E \cdot I} \Rightarrow \frac{L}{1\,000} \leq \frac{P \cdot a (3L^2 - 4a^2)}{24 \cdot E \cdot I}$$

$$\text{Donc : } I \geq \frac{1\,000 \cdot P \cdot a (3L^2 - 4a^2)}{24 \cdot E \cdot L} \Rightarrow I \geq 3\,517\,791\,695,75 \text{ mm}^4 = 35\,177\,916,95 \text{ cm}^4$$

La section droite du sommier est un trapèze isocèle de dimensions suivantes :

H = 700 mm
 h = 664 mm
 D = 500 mm
 d = 464 mm
 B = 900 mm
 b = 864 mm
 t_f = 18 mm

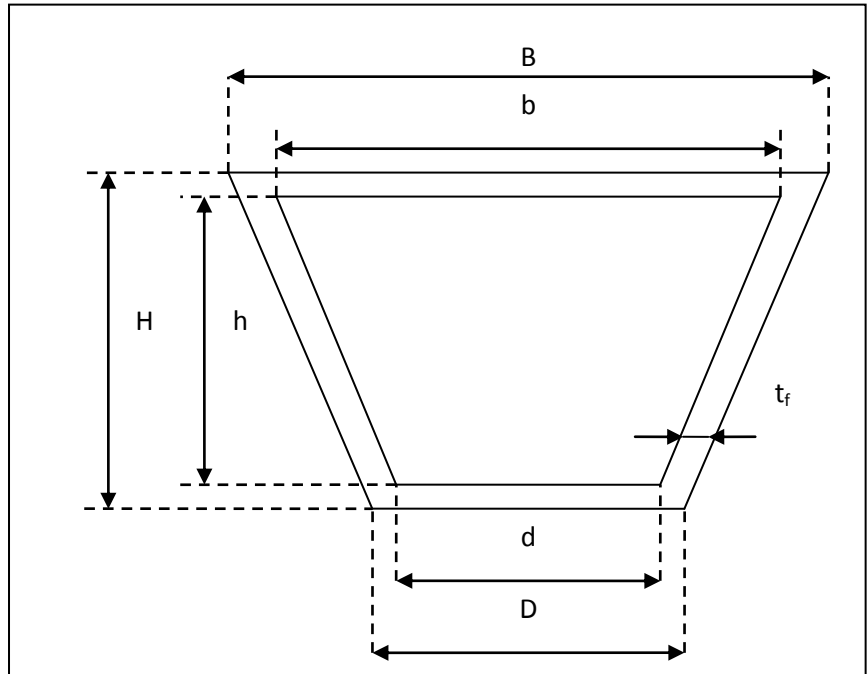


Figure III.14 : La section droite du sommier

III.3.2) Les valeurs statiques de la section droite

$$A = \left[H \cdot \frac{D+B}{2} \right] - \left[h \cdot \frac{d+a}{2} \right] = 49104 \text{ mm}^2$$

- Calcul des moments d'inertie :

$$I_z = H^3 \frac{(D^2 + 4 \cdot DB + B^2)}{36 \cdot (D + B)} - h^3 \frac{(d^2 + 4 \cdot d \cdot b + b^2)}{36 \cdot (d + b)} = 3\,754\,666\,431,99 \text{ mm}^4$$

$$I_y = H^3 \frac{(3D + B)}{12} - h^3 \frac{(3d + b)}{12} = 13\,562\,070\,528 \text{ mm}^4$$

- Calcul du moment statique :

$$\mu_y = H^2 \frac{(3D + B)}{2} - \frac{(3d + b) \cdot H \cdot h}{2} = 63\,705\,600 \text{ mm}^3$$

- Calcul du module de résistance élastique:

$$W_{ely} = \frac{2 \cdot I_y}{H} = 19\,374\,386,47 \text{ mm}^3$$

- Calcul du module de résistance plastique:

$$W_{ply} = 2 \cdot \mu_y = 127\,411\,200 \text{ mm}^3$$

- Calcul des rayons de giration :

$$i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} = 523,94 \text{ mm}$$

$$i_z = \sqrt{\frac{I_z}{A}} = 276,52 \text{ mm}$$

- Calcul du moment de gauchissement :

$$I_w = I_z \cdot \frac{(h \cdot t_f)^2}{4} = 430\,218\,127\,776\,886,1775 \text{ mm}^6 = 430\,218\,127,77 \text{ cm}^6$$

- Calcul de la distance entre les fibres extrêmes et l'axe neutre :

$$v_i = \frac{H}{3} \cdot \frac{2 \cdot B \cdot D}{B + D} = 466,67 \text{ mm}$$

$$v_s = H - v_i = 233,33 \text{ mm}$$

- Calcul du rendement de la section :

$$\rho = \frac{I}{A \cdot v_i v_s} = 0.7$$

III.3.3) Vérification de la section du sommier à l'état limite de service (E.L.S)

III.3.3.1) Classification de la section droite du sommier

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

$$= 1$$

$$\text{Et : } \frac{b}{t_f} = 50$$

$$\frac{d}{t_f} > 42\varepsilon \quad \text{donc la section est de classe 4.}$$

Selon l'eurocode 3 ; la section droite va prendre la classe la plus défavorable, donc la section du sommier est de la classe 4.

III.3.3.2) Vérification de la section du sommier au déversement

Estimons dans ce cas que L_{LT} est inférieure à $35 \cdot i_z \cdot \varepsilon$; Sachant que la longueur de déversement du sommier $L_{LT} = 7\,000 \text{ mm}$, si cette condition est vérifiée, alors le phénomène d'instabilité n'est pas à craindre.

$$\text{On a } 35 \cdot i_z \cdot \varepsilon = 9\,678,2 \text{ mm}$$

On remarque que $L_{LT} \leq 35 \cdot i_z \cdot \varepsilon$ donc le déversement n'est pas à craindre.

III.3.3.3) Vérification de la section du sommier au voilement

Données :

$$\varepsilon = 1$$

$$t_w = 23 \text{ mm}$$

$$h = 564 \text{ mm}$$

$$v = 0.3$$

$$\eta = 1$$

$$\tau_y = f_y / \sqrt{3} = 135.68 \text{ MPa}$$

Si $\frac{h_w}{t_w} < \frac{72\varepsilon}{\eta}$ les âmes peuvent être prémuni contre le voilement

$$\frac{h_w}{t_w} = 28,87$$

$$\frac{72\varepsilon}{\eta} = 72$$

On continue les calculs pour déterminer la résistance postcritique des âmes et la contribution des semelles.

- Calcul de résistance postcritique des âmes :

$$\tau_{cr} = \frac{\tau_y}{(h_w/h_{eff})^2} = 94,97 \text{ MPa}$$

$$\bar{\lambda}_w = \sqrt{\frac{\tau_y}{\tau_{cr}}} = 1,19$$

$$V_{2w,d} = x_w \cdot h_w \cdot t_w \cdot \frac{f_{yw} / \sqrt{3}}{\gamma_{M1}} = 1\,111\,401,75 \text{ N}$$

Tel que : $x_w = 0,59$

- Calcul de la contribution des semelles au voilement par cisaillement :

$$M_{f,Rd} = \frac{b_{fm} t_{fm} f_{yf} d_f}{\gamma_{M1}} = 285\,100\,345,6 \text{ N.mm}$$

$$V_{2f,Rd} = \frac{b_f \cdot t_f^2}{c} \cdot \frac{f_{yf}}{\gamma_{M1}} \left[1 - \left(\frac{M_{Ed}}{M_{f,Rd}} \right)^2 \right] = 13\,905,31 \text{ N}$$

- Calcul de la résistance totale de la section au voilement par cisaillement :

$$V_{2,Rd} = V_{2w,Rd} + V_{2f,Rd} = 1\,125\,307,06 \text{ N}$$

- Calcul de la valeur limite :

$$\left(\frac{\eta \cdot h_w \cdot t_w \cdot f_{y,w}}{\sqrt{3}}\right) / \gamma_{M1} = 1\,883\,694,48 \text{ N}$$

D'après les calculs, on remarque que l'effort résistant de la section au voilement est inférieur à la valeur limite ; ce qui nous amène à conclure que la section du sommier est assurée contre le voilement par cisaillement.

Chapitre IV

Eléments d'assemblage, Câblage

IV.1) Calcul des éléments d'assemblage

IV.1.1) Assemblage par boulons

- Couvre-joint pour les poutres maitresses:

La première manière d'assembler les âmes de la poutre est les plaques (couvre-joint) qui seront calculées connaissant les charges et efforts verticaux et horizontaux sur cette poutre.

Pour notre poutre, on considère le couvre-joint placé au milieu de celle-ci comme le plus exposé à la rupture, donc on prend les efforts suivants :

- Q : effort due au poids propre de la poutre maitresse
- F : charge de service
- N : effort qui est une combinaison entre F et Q en prenant compte de l'effort tranchant global au point indiqué.

Pour calculer à l'état limite ultime (E.L.U), le diamètre (d) des boulons nécessaires à assembler chaque deux âme avec le couvre-joint, on utilise la méthode suivante :

$$N = \frac{F + Q}{2} = \frac{100 \cdot 1,5 + 153,17 \cdot 1,35}{2} = 178,39 \text{ kN}$$

Donc $M = N \cdot \frac{L}{2}$ avec L: distance entre les deux pieds.

$$M = 4281,35 \text{ kN.m} = 4\,281\,354 \text{ N.m}$$

Si on suppose le nombre de boulons (n) et la manière avec laquelle ces derniers seront partagés sur la plaque on trouvera leurs diamètres.

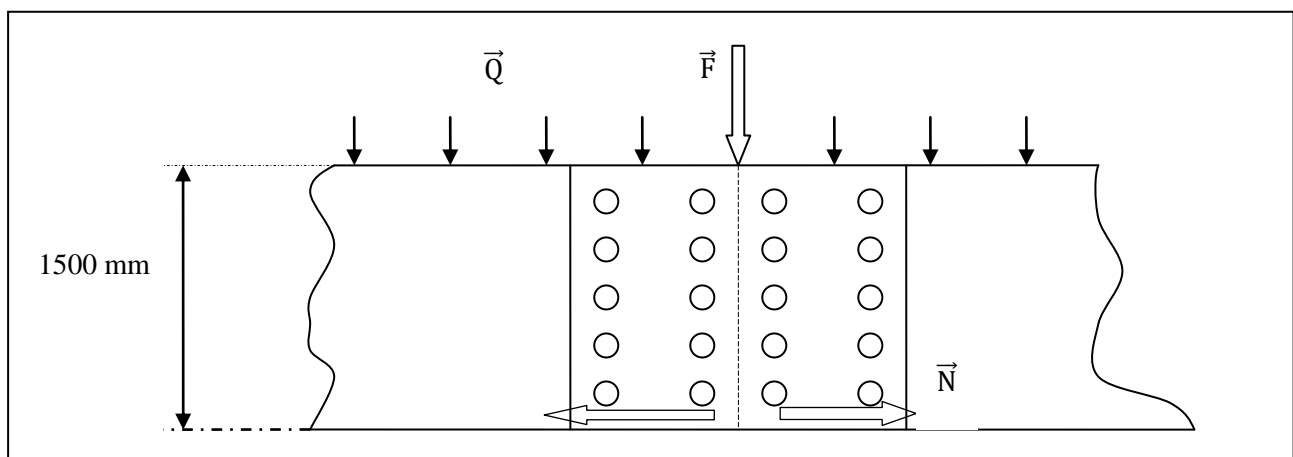


Figure IV.1 : Assemblage par boulons

$n = 22$ boulons ; $n_r = 2$ rangés ; $n_l = 11$ lignes

- Calcul de l'effort N_{b1} sur le boulon le plus sollicité:

$$\text{On général : } N_{b_i} = \frac{M h_i}{n_r \sum h_i^2}$$

$$h_1 = 59,09 \text{ mm}$$

$$\sum h_i = 0,059 + 0,177 + 0,295 + 0,413 + 0,531 + 0,649 + 0,767 + 0,885 + 1,003 + 1,121 + 1,239$$

$$\sum h_i^2 = 6,614 \text{ mm}^2$$

$$\text{Donc : } N_{b_1} = \frac{4281354 \cdot 0,059}{2 \cdot 6,614} = 19095,84 \text{ N}$$

Pour que le boulon résiste à cet effort, il faut éviter le cisaillement de sa section.

$$\text{Donc : } \frac{N_{b_1}}{\frac{\pi d_0^2}{4}} \leq \tau_{pr}$$

Si on choisi le boulon A56 qui a une contrainte admissible au cisaillement de 18 daN/mm^2

$$\tau_{pr} = \frac{\tau_{adm}}{1,33} = \frac{180}{1,33} = 135,33 \text{ N/mm}^2; \text{ sachant que le facteur de sécurité global}=1,33$$

$$\text{Alors : } d_0 \geq \sqrt{\frac{4N_{b_1}}{\pi \tau_{pr}}}$$

$$\Rightarrow d_0 \geq 13,41 \text{ mm}$$

$$\text{On a : } d_0 = 0,89 d$$

$$\text{Donc : } d = \frac{d_0}{0,89} = 15,07 \text{ mm}$$

On prend un diamètre normalisé qui est $d = 16 \text{ mm}$

Après avoir calculé le diamètre des boulons, on procède maintenant au calcul de l'épaisseur de couvre-joint.

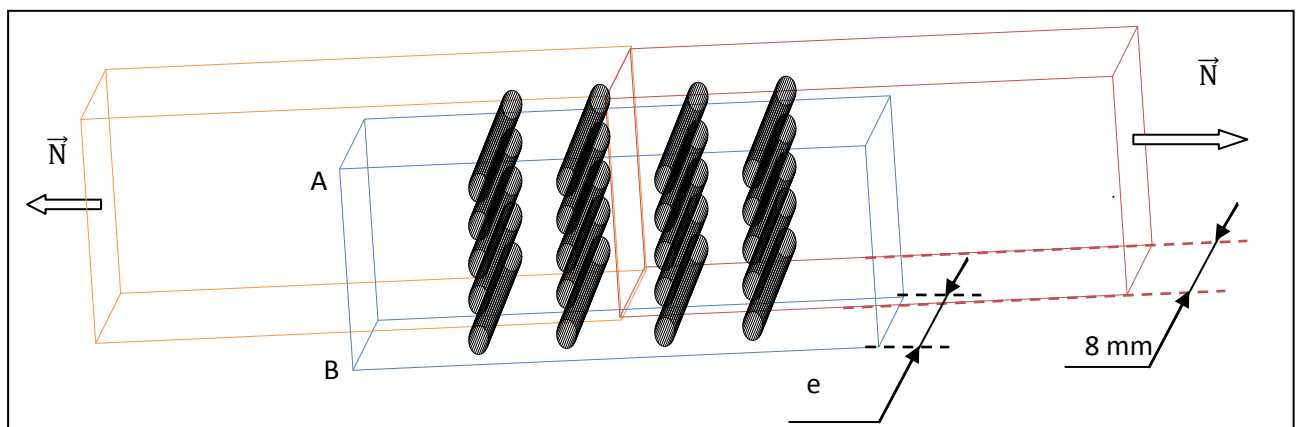


Figure IV.2 : Assemblage avec boulons et couvre joint

On a 11 lignes de boulons → 11 trous de perçage de ($d = 16 \text{ mm}$) dans la plaque.

Pour que la section AB (la plus faible section droite par rapport à l'effort axial N_{AB})

$$N_{AB} = \frac{F + Q}{2} = 178,39 \text{ kN} = 178390 \text{ N}$$

$$S_{AB} = (11 \cdot 16) \cdot e \Rightarrow S_{AB} = 176 \cdot e$$

Donc : $\frac{N_{AB}}{S_{AB}} \leq R_p$

Pour l'acier S235, $R_p = \frac{R_e}{1,33} = \frac{235}{1,33} = 176,69 \text{ N/mm}^2$; R_p est la contrainte de traction du matériau

Avec un facteur de sécurité partiel égal à 2, donc : $R_p = \frac{176,69}{2}$

L'épaisseur minimale exigée pour la résistance au cisaillement du couvre-joint est

$$e \geq \frac{N_{AB}}{S_{AB} R_p} = \frac{178390}{176 \cdot 88,34} \quad \text{donc} \quad e \geq 11,47 \text{ mm}$$

Selon l'eurocode3 l'épaisseur des couvre-joints trouvés vérifiée les conditions de résistance de la plaque et des boulons, on prend une épaisseur de $e = 12 \text{ mm}$

- Plaque d'assise du pied :

Reprenant la même démarche pour calculer le diamètre des boulons (d) et la manière de leurs déposition sur la plaque à la base du chaque pied du portique.

L'effort sur le pied à E.L.U en flexion: $N_x = 170,6 \text{ kN}$

Moment due à cet effort : $M = N_x \times h = 170\,600 \times (10 + 7,5)$

Donc : $M = 2\,985\,500 \text{ N.m}$

On suppose que les boulons sont partagés de la manière suivante sur la plaque, $a = 60 \text{ mm}$

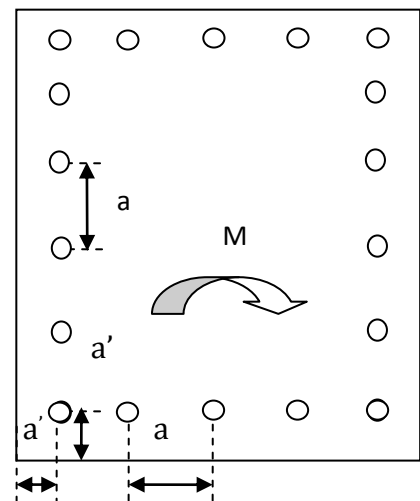
$$a' = 30 \text{ mm}$$

Donc $h_1 = 1000 - (2 \times 30) = 940 \text{ mm} = 0,94 \text{ m}$

$$\sum h_i^2 = 4,464 \text{ m}^2$$

$$n_r = 25 \text{ rangés} ; n_L = 16 \text{ lignes}$$

L'effort sur le boulon le plus sollicité est :



$$Nb_1 = \frac{M h_1}{n_r \sum h_i^2} = 25146,68 \text{ N}$$

Calculant le diamètre du boulon pour éviter le cisaillement en traction de sa section : (pour le boulon A56, la contrainte admissible à la traction = 24 daN/mm²)

$$\frac{Nb_1}{\frac{\pi d_0^2}{4}} \leq \sigma_{pr} \quad \text{Sachant que : } \sigma_{pr} = \frac{\sigma_{adm}}{1,33} = \frac{240}{1,33} = 176,49 \text{ N/mm}^2$$

Donc : $d_0 \geq 13,32 \text{ mm}$; alors : $d = d_0 / 0,89 = 14,97 \text{ mm}$

On prend un diamètre normalisé, $d = 15 \text{ mm}$

Selon l'eurocode3 l'épaisseur des couvre-joints doit dépasser 8 mm parce que les boulons A56 sont de l'acier S235 de diamètre 15mm, donc on prend une épaisseur de $e = 10 \text{ mm}$.

IV.1.2) Assemblage par soudure

Deux grandes familles d'assemblages soudés doivent être distinguées, ceux pour lesquels les joints sont conçus de sorte à reconstituer directement la continuité de la matière, en générale au prix d'une préparation par usinage des bords des pièces assemblées, et ceux pour lesquels la transmission des efforts s'effectue par le biais de cordons d'angle constitués de dépôt de métal réalisés dans les dièdres formés par les faces des pièces assemblées. Dans tous les cas, l'opération de soudage doit impérativement assurer une fusion à la fois du métal déposé et métal de base des pièces de façon à garantir une parfaite continuité locale de la tenue mécanique, ceci justifie que la première catégorie des joints dits en bout à pleine pénétration ne nécessite aucune vérification de résistance par calcul.

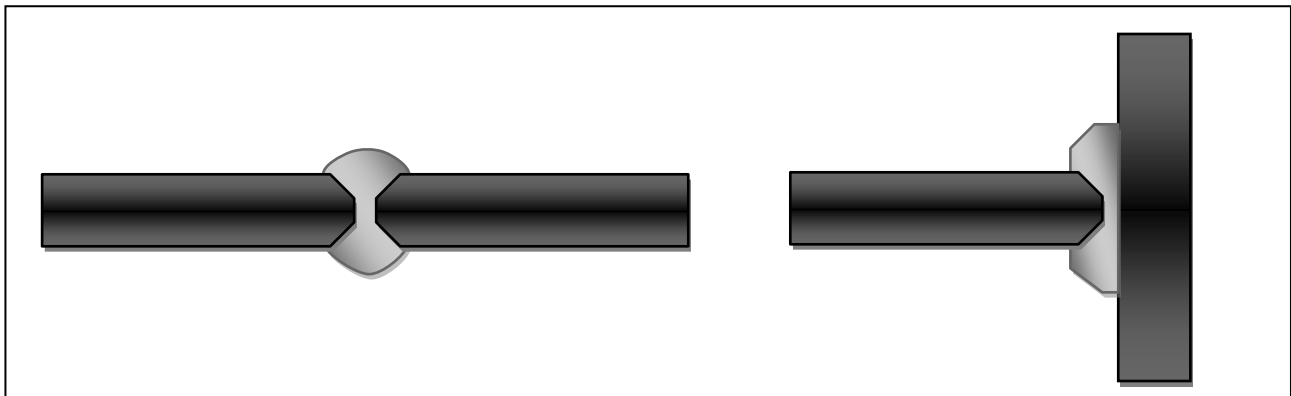


Figure IV.3 : Assemblages soudés par joint en bout à pleine pénétration

IV.2) dimensionnement des câbles

- Câble de suspension (câble dormant)

Effort sur le câble : le câble sert à suspendre la poutre, donc sa tension statique N est la réaction (selon les deux composantes x et y) au point d'accrochage entre les deux.

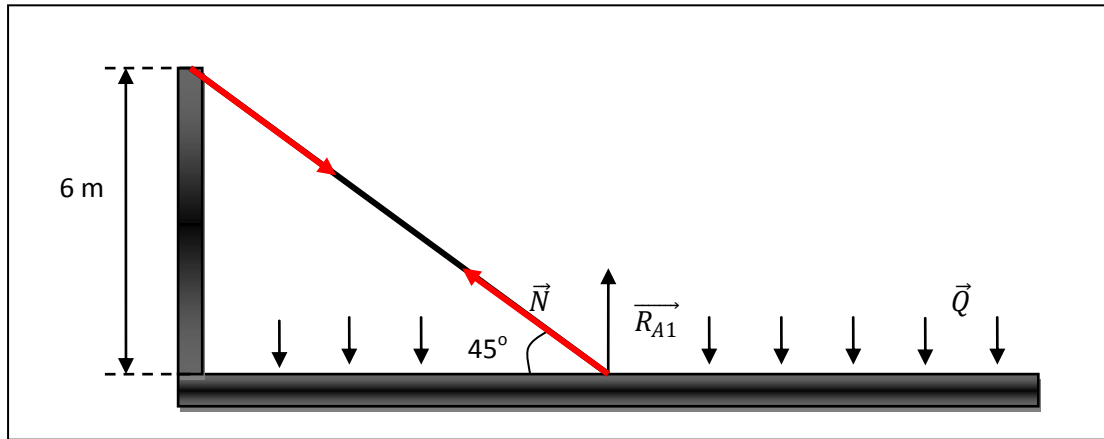


Figure IV.4 : Les efforts de câble de suspension

On a $R_y = 170,6 \text{ kN}$ (R_y : la réaction selon y à l'appui d'accrochage du câble)

$$\text{Donc : } N = \frac{R_y}{\cos 45} = \frac{142,6}{0,70} = 241,26 \text{ kN}$$

Alors le diamètre (d_c) du câble est :

$$\text{Selon la FEM } d_c \geq c\sqrt{N}$$

$$\text{Sachant que } c = \sqrt{\left[\frac{Z_p}{\pi K f \frac{R_0}{4}} \right]} = \sqrt{\left[\frac{Z_p}{K' R_0} \right]}$$

Z_p : Selon le groupe de mécanisme = 5

f : coefficient de remplissage

K : coefficient de perte de toronnage

$K' = 0,9$: facteur reprend de f et K

$R_0 = 1034 \text{ N/mm}^2$ (pour un alliage de Titane): limite d'élasticité de matériau du fil de câble

$$\text{Donc : } d_c \geq 0,0732 \sqrt{241\,260} = 35,95 \text{ mm}$$

Alors on prend un diamètre : $d_c = 36 \text{ mm}$

- Câble de manutention (actif)

La charge à soulever est de 20 Tonnes avec un coefficient de sécurité 1,5 donc $N = 300\,000\text{ N}$

Si on considère que le groupe de mécanisme est m 8 donc $Z_p = 9$

Donc : $d_c \geq 0,0983 \sqrt{300\,000} = 53,84\text{ mm}$ si on met un crochet

Et $d_c \geq 0,0983 \sqrt{\frac{300\,000}{4}} = 26,92\text{ mm}$ si on utilise une poulie d'accrochage de 4 câbles.

- Calcul des dimensions de l'axe de rotation du galet

Pour calculer les dimensions de cet axe (d_g : diamètre et A_g : longueur exposée au cisaillement), on retire l'effort total sur chaque galet N_g (combinant tout les poids propres des éléments et la charge de service), on prend compte d'empatement (distance entre les galets).

On a $N_g = 441\,910\text{ N}$ (effort diamétral sur l'axe)

La contrainte pratique de cisaillement de matériau de l'axe est :

$$\tau_{pr} = \frac{\sigma_{adm}}{F_s \sqrt{3}} = \frac{235}{1,33 \sqrt{3}} = 102\text{ N/mm}^2$$

Donc la surface de l'axe (S) doit être :

$$S \geq \frac{N_g}{\tau_{pr}} = 4\,332,45\text{ mm}^2$$

On a $S = d_g \times A_g$ Si on pose: $A_g = 200\text{ mm}$

Donc le diamètre de l'axe est : $d_g = \frac{S}{A_g} = 21,66\text{ mm}$

Chapitre V

Simulation

V.1) Simulation numérique

V.1.1) But

Le but de cette partie est de comparer les résultats théoriques (flèche) calculés dans les chapitres précédents, avec ceux du numériques récupérés après une simulation du modèle de la structure.

V.1.2) Méthode

Pour avoir les résultats de cette étude, on suit les étapes suivantes :

- ✓ Conception des différentes pièces de la structure, on présentant d'une manière volumique (3D) le modèle, avec l'utilisation d'un logiciel de conception (**Solidworks** pour notre cas).
- ✓ Simulation du modèle 3D dans un logiciel de calcul de structure, en appliquant les différents efforts, sollicitations et conditions (conditions aux limites et d'assemblages, contraintes, précontraintes).
- ✓ Comparaison des résultats (numériques et analytiques).

V.1.3) Conception et simulation du modèle

V.1.3.1) Partie conception

Dans cette partie, on va concevoir le modèle numérique du portique en 3D, en se basant sur les dimensions des éléments essentiels calculées et vérifiées précédemment ; pour cela on a choisi le logiciel de CAO Solidworks, ce choix est due à sa capacité de créer directement des volumes à partir des esquisses et de représenter les formes les plus complexes, et la facilité de son utilisation.

- **Éléments conçus :** Dans les figures suivantes, on représente quelques éléments essentiels (pièces ou assemblages) modélisés avec le logiciel de conception

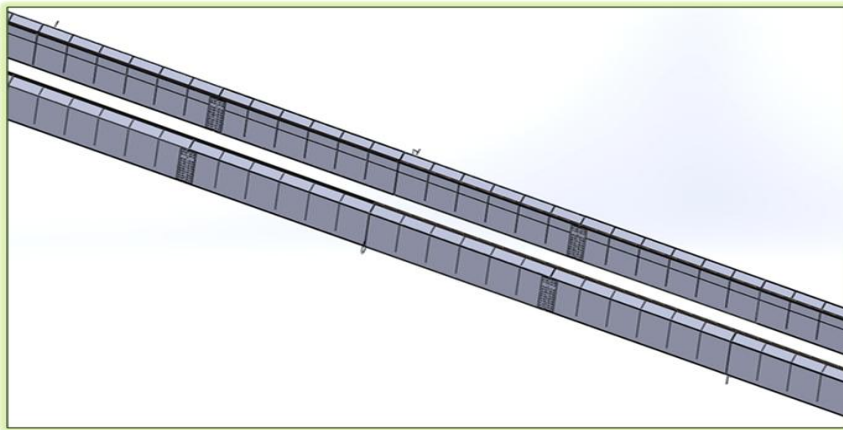


Figure V.1 : Les deux poutres maitresses

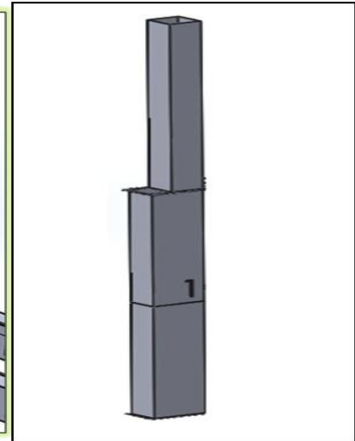


Figure V.2 : Assemblage pied

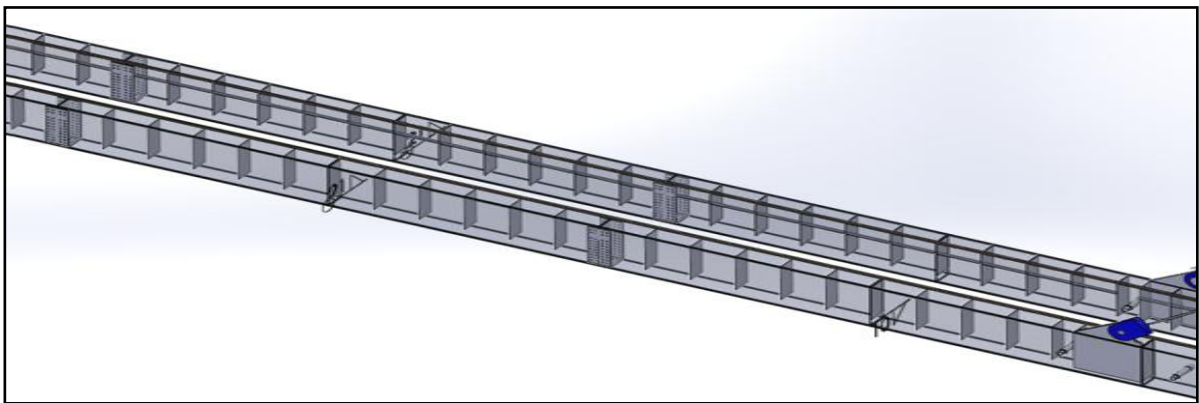


Figure V.3 : Raidisseurs des poutres maitresses

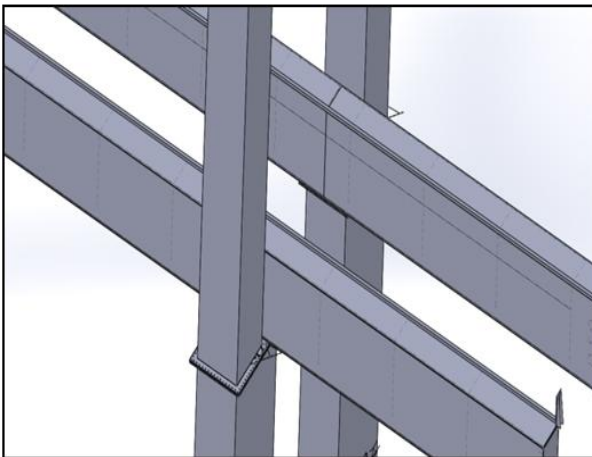


Figure V.4 : Assemblage pieds avec les
Poutres maitresses

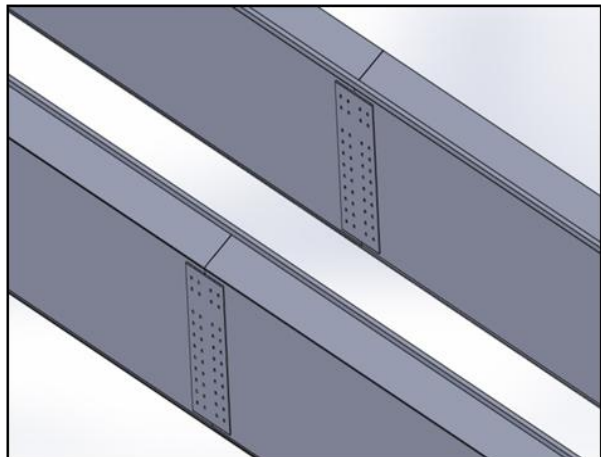


Figure V.5 : Assemblage par boulons avec
couvre-joint

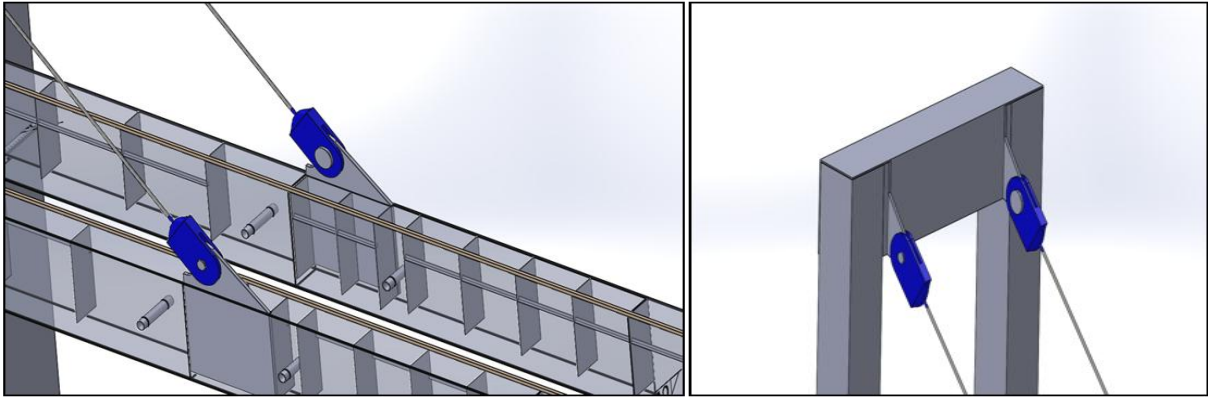


Figure V.6 : Assemblage câble et anneaux de levage **Figure V.7 :** Sommier supérieur et pied

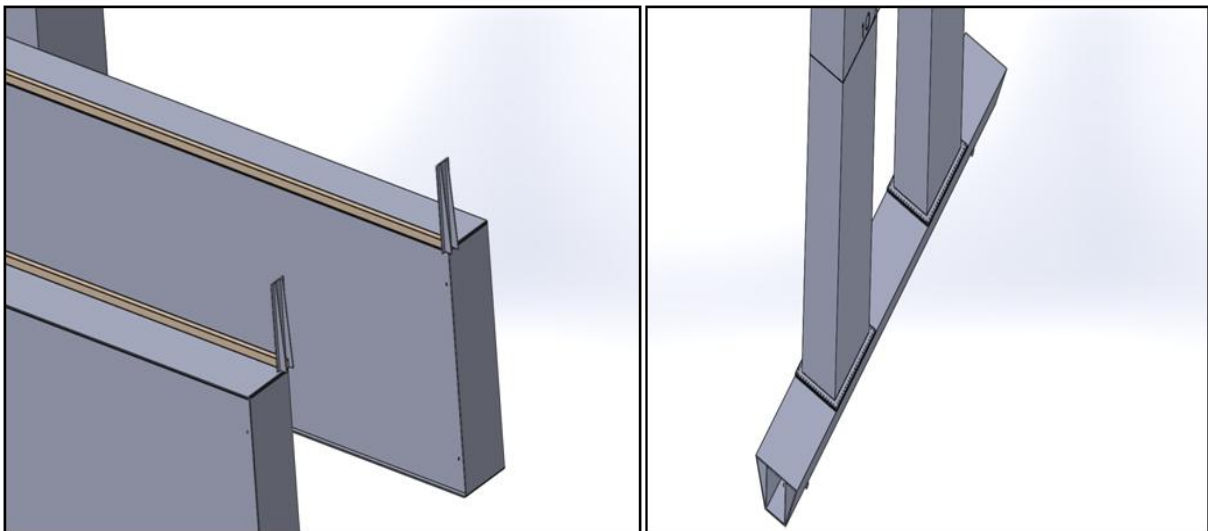


Figure V.8 : Rails de roulement et butée chariot

Figure V.9 : Assemblage des pieds et sommier

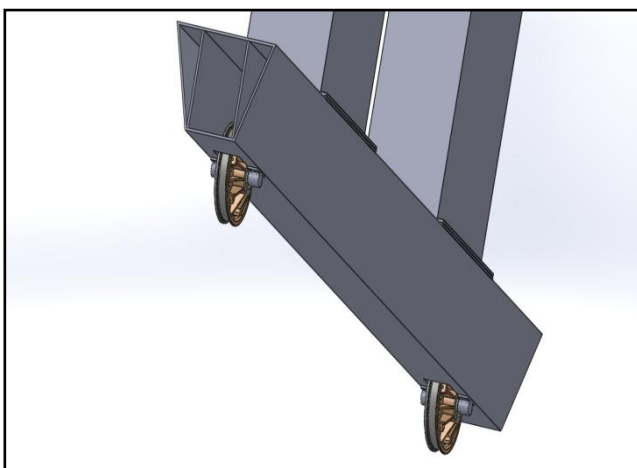


Figure V.10 : Galets et sommier principal

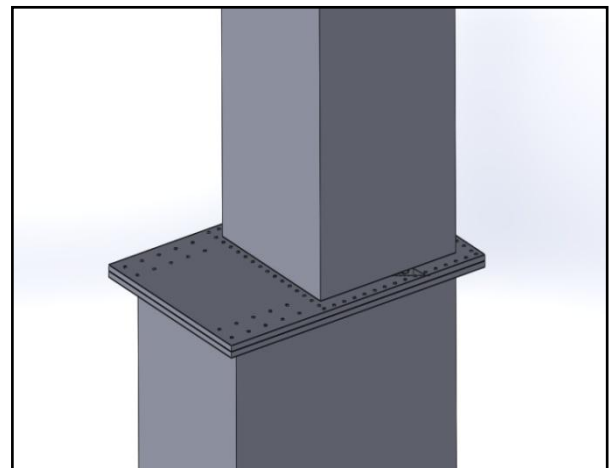


Figure V.11 : Assemblage des parties du pied

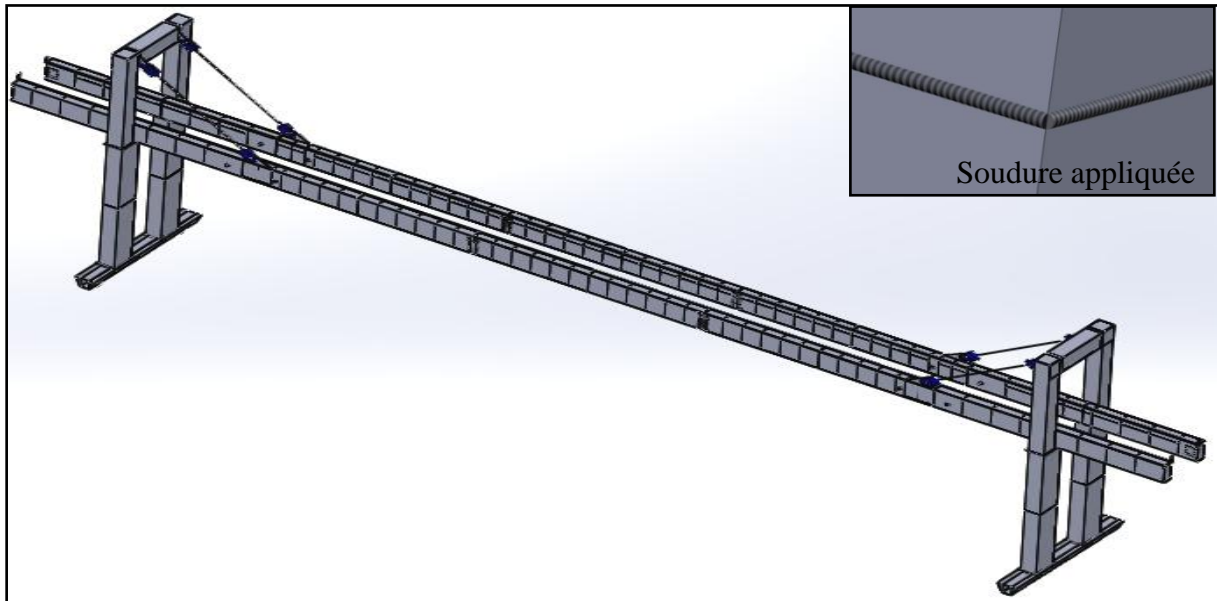


Figure V.12 : Assemblage du portique roulant

V.1.3.2) partie simulation

Après la conception de tous les éléments de la charpente et d'assemblage, on les rassemble avec des contraintes ou avec des soudures ; puis on procède à la simulation de ce modèle CAO dans un logiciel de calcul de structure, on utilisant la méthode des éléments finis.

V.1.3.2.1) Méthode des éléments finis

La modélisation des problèmes physiques en analytique se révèle être parfois irréalisable, la montée en puissance de l'informatique nous a permis d'envisager de traiter un problème physique en le ramenant à une construction matricielle.

La **méthode des éléments finis (MEF)** est une manière numérique de résoudre certains des problèmes de physique. C'est une méthode qui permet de déterminer une solution approchée sur un domaine spatial, c'est-à-dire qui permet de calculer un champ (de scalaires, de vecteurs, de tenseurs) qui correspond à certaines équations et à certaines conditions imposées.

La méthode consiste à découper le domaine spatial en petits éléments, également appelés mailles, et à rechercher une formulation simplifiée du problème sur chaque élément, c'est-à-dire à transformer le système d'équations quelconque en un système d'équations linéaires. Chaque système d'équations linéaires peut se représenter par une matrice. Les

systèmes d'équations pour tous les éléments sont ensuite rassemblés, ce qui forme une grande matrice ; la résolution de ce système global donne la solution approchée au problème. [6]

Un certain nombre de problèmes physiques sont décrits par des équations aux dérivées partielles (ÉDP) sur un domaine spatial (un volume). Il s'agit d'une généralisation des équations différentielles aux fonctions de plusieurs variables. Par exemple, si l'on a une fonction de trois variables $f(x_1, x_2, x_3)$, l'équation suivante :

$$a_1 \frac{\partial f}{\partial x_1} + a_2 \frac{\partial f}{\partial x_2} + a_3 \frac{\partial f}{\partial x_3} + A = 0$$

C'est une équation aux dérivées partielles. Cette équation est assortie de conditions aux limites : valeurs de la fonction ou de ses dérivées partielles en certains points.

Notons que

- la fonction f peut être une fonction vectorielle,
- l'équation fait souvent intervenir des dérivées secondes $\partial^2 f / \partial x_i^2$ ou $\partial^2 f / \partial x_i \partial x_j$ (voire d'ordres plus élevés),
- et que les coefficients a_i et A ne sont pas nécessairement des constantes mais peuvent être des fonctions.

La résolution exacte, analytique, de telles équations devient vite impossible manuellement. Par contre, si l'on découpe le domaine spatial en petites cellules, appelées « éléments finis » (ÉF), on peut résoudre simplement l'ÉDP sur chaque élément.

- **Démarche générale**

La méthode des éléments finis (MEF) consiste donc à :

- découper le modèle spatial en éléments finis : c'est le maillage ;
- écrire une version simplifiée de l'ÉDP sur chaque élément fini ; notons que les conditions limites d'un élément ne sont pas connues, on ne connaît que les conditions globales ;
- rassembler les expressions des ÉDP locales pour appliquer les conditions aux limites du problème.

On retrouve la démarche générale analyse-synthèse.

D'un point de vue pratique, la mise en œuvre de la méthode comporte les étapes suivantes :

1. Analyse du problème : définition de l'objectif du calcul, recherche des zones pouvant poser problème, éventuellement calcul manuel avec un modèle très simplifié pour avoir un ordre de grandeur du résultat.
2. Définition du modèle de calcul : la géométrie du système est dessinée ou conçue avec un logiciel de dessin ou de conception assisté par ordinateur (DAO ou CAO). Si le modèle numérique contient des géométries complexes, il faut le simplifier afin d'avoir un calcul :
 - plus rapide (modèle « léger ») ;
 - ne présentant pas de singularités : les singularités sont des points particuliers se comportant mal vis-à-vis de l'algorithme de calcul ; en ces point-là, les résultats sont en général éloignés de la réalité.
3. Maillage : découpage du modèle en éléments finis ; il convient de choisir des formes d'éléments adaptés, permettant d'avoir un maillage régulier, et de vérifier la qualité du maillage. Le maillage est fait par l'ordinateur suivant les paramètres définis par l'utilisateur.
4. Calcul, fait par l'ordinateur.
5. Affichage des résultats, vérification de leur cohérence et post-traitement

• Différentes représentations des éléments

Un élément fini est une maille ; il est défini par ses nœuds, c'est-à-dire les angles pour une figure plane, ou les sommets pour un volume, chaque élément a une forme :

- éléments linéiques :
 - linéaire (rectiligne, segment de droite passant par deux nœuds)
 - quadratique (courbe passant par trois nœuds)
 - cubique (courbe passant par quatre nœuds)
- éléments coque :
 - triangulaire
 - linéaire (élément plan, les côtés étant rectilignes)
 - quadratique (les côtés sont courbes et passent par trois nœuds)

- cubique (les côtés sont courbes et passent par quatre nœuds)
- quadrangulaire (carré)
 - linéaire
 - quadratique
 - cubique
- éléments volumiques :
 - tétraèdre
 - linéaire (les côtés sont rectilignes),
 - quadratique (les côtés sont courbes et passent par trois nœuds),
 - cubique (les côtés sont courbes et passent par quatre nœuds),
 - hexaèdre (cube) : linéaire, quadratique ou cubique
 - pentaèdre (prisme),
 - linéaire, quadratique ou cubique.

V.1.3.2.2) Simulation numérique

Connaissant les conditions aux limites (articulations au niveau du sommier) pour le modèle du portique, et la charge de service qui est 20 tonnes (application à l'état limite ultime dans l'étude, $F = 30\text{Tonnes}$) on lance les étapes de la simulation dans un logiciel de calcul de structure.

V.1.3.3) Discussion des résultats

Pour alléger le modèle numérique on applique les simplifications suivantes :

- Suppression des détails : (butée de fin de course, rails de roulement, galets, etc...)
- Enlèvement des raidisseurs car ils interviennent que dans la vérification au voilement par cisaillement
- Simplification due à la symétrie parfaite du modèle

Pour interpréter les résultats de cette étude, on observe deux comparaisons : La première est entre le modèle numérique avec câbles et celui qui est sans câble pour justifier le choix d'utilisation de la solution de câblage comme appuis aux poutres maitresses, quant à la deuxième, elle sera entre la flèche admissible (« $L/1000$ » pour les poutres et « $L/300$ » pour les pieds) et celle qui est récupérée après simulation.

- **Maillage :** le maillage appliqué pour le modèle est volumique car les résultats obtenus concernant les déformations et les contraintes sont plus proche à la réalité.

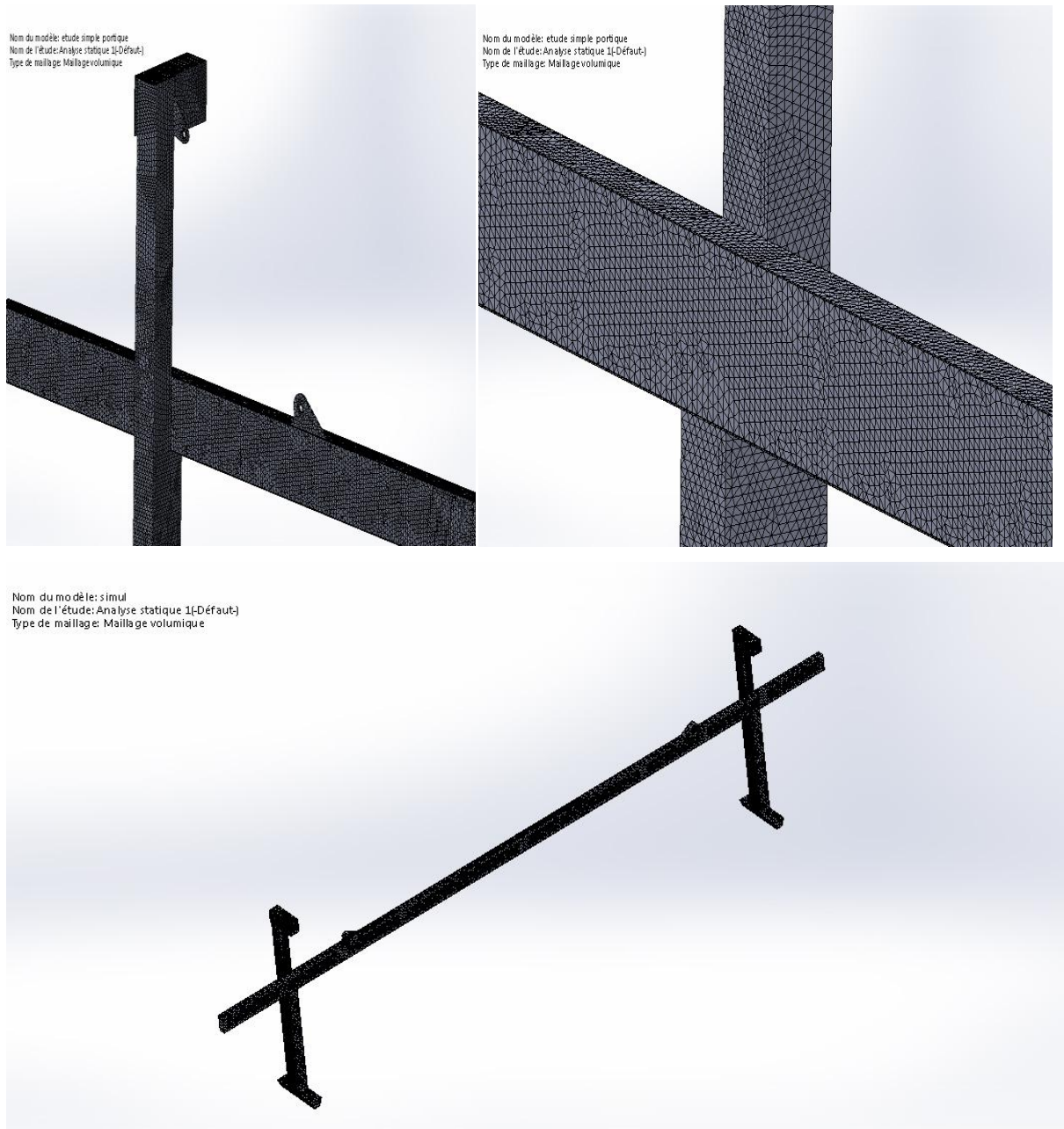


Figure V.13 : Maillage du modèle 3D

❖ Comparaison N°1 :

- Les résultats du modèle sans câbles :

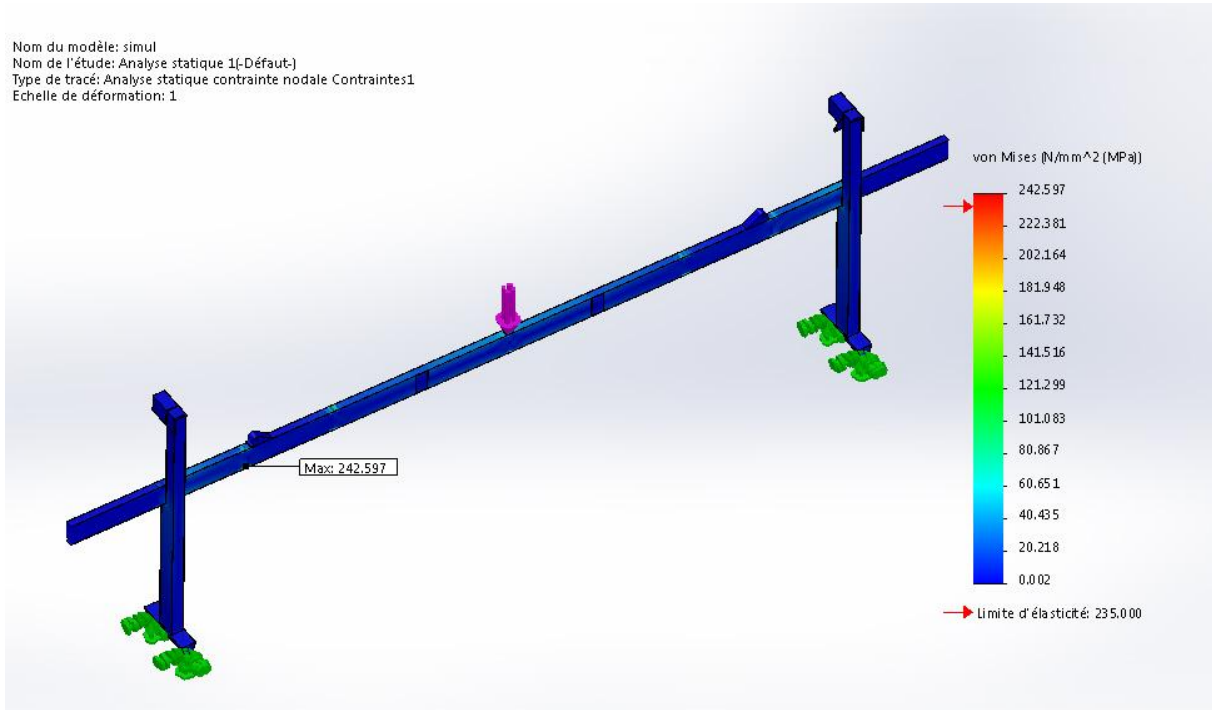


Figure V.14 : Contrainte de Von Mises du modèle du portique sans câbles

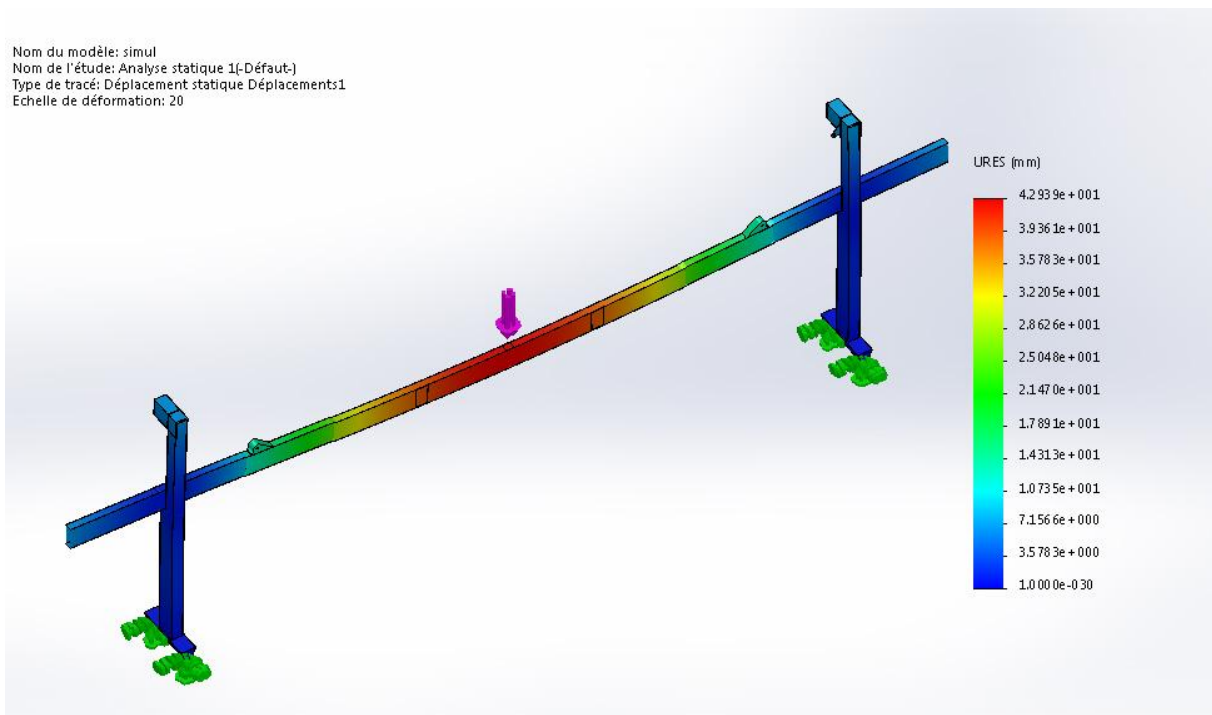


Figure V.15 : Déplacement résultant du modèle du portique sans câbles

- Les résultats du modèle avec câbles

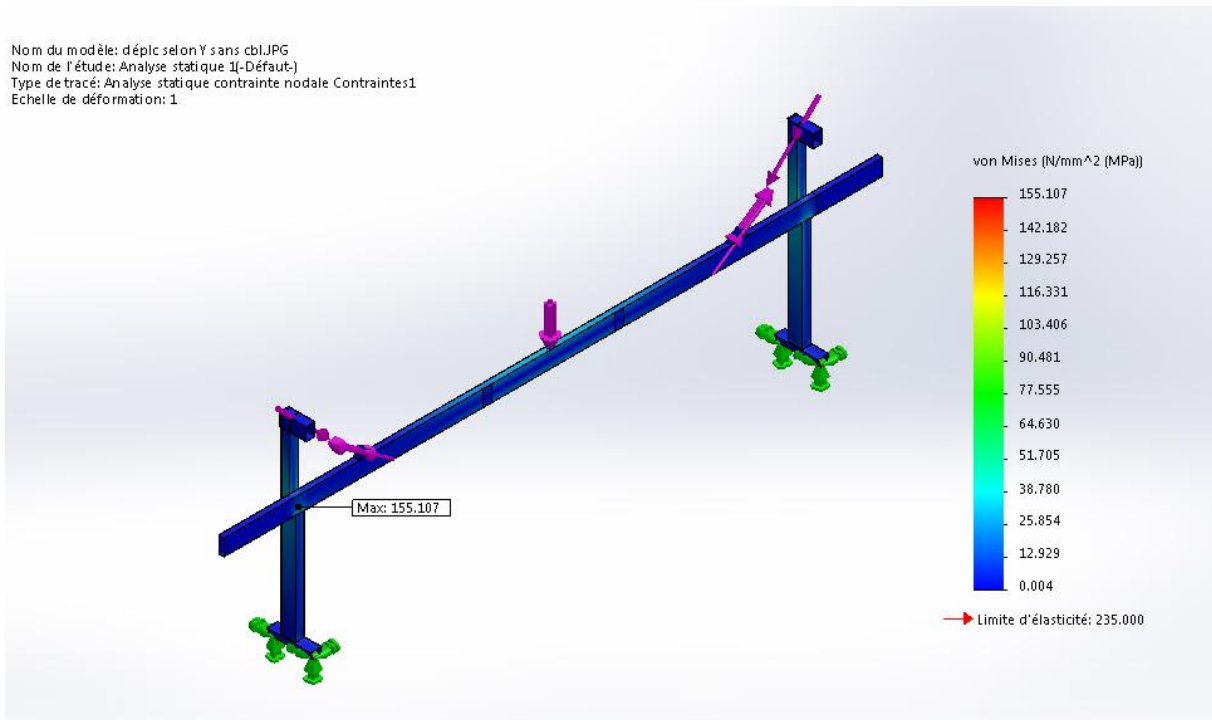


Figure V.16 : Contraintes de Von Mises du modèle du portique avec câbles

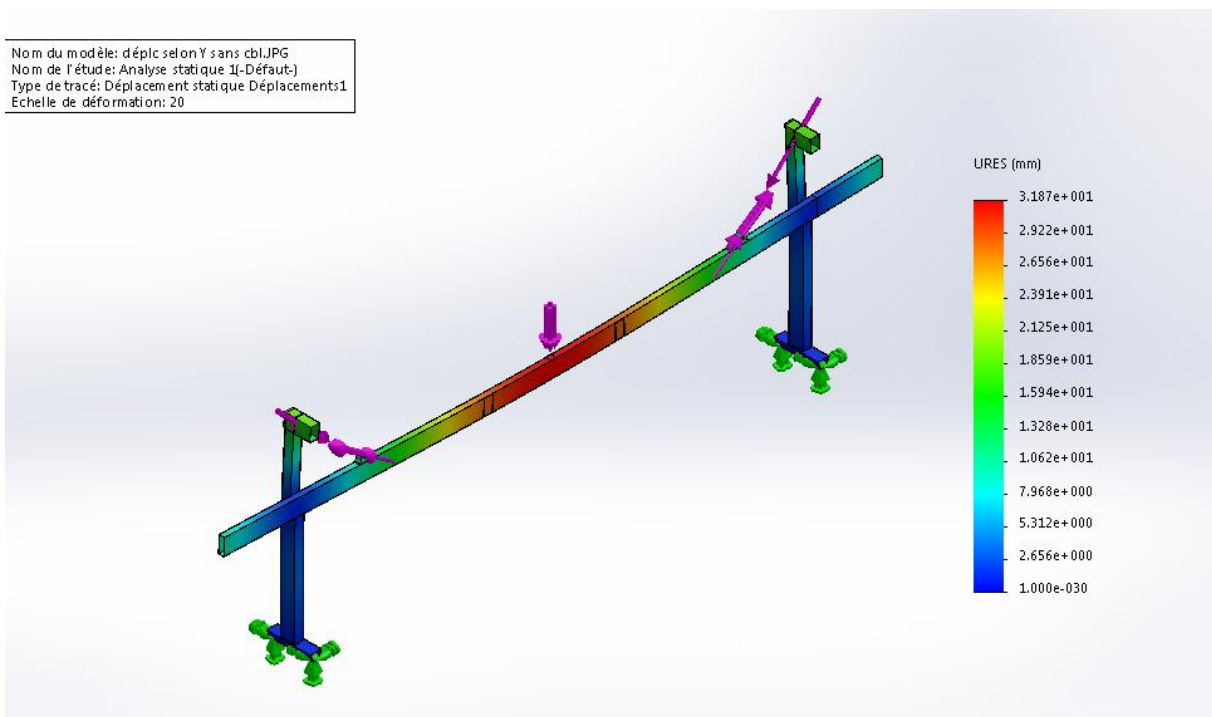


Figure V.17 : Déplacement résultant du modèle du portique avec câbles

D'après les résultats obtenus des deux modèles simulés, on remarque que les contraintes de Von Mises dans le modèle sans câbles (242, 59 MPa) dépassent la limite d'élasticité de l'acier utilisé ($f_y = 235$ MPa), contrairement à celle du modèle avec câbles qui est de (157, 107 MPa), d'autre part la flèche du premier modèle (42,93 mm) est largement supérieure à celle du deuxième (31, 87 mm) ; ces deux remarques justifient l'importance d'utilisation des câbles pour ce portique.

❖ **Comparaison N°2 (entre flèche admissible et flèche maximale numérique)**

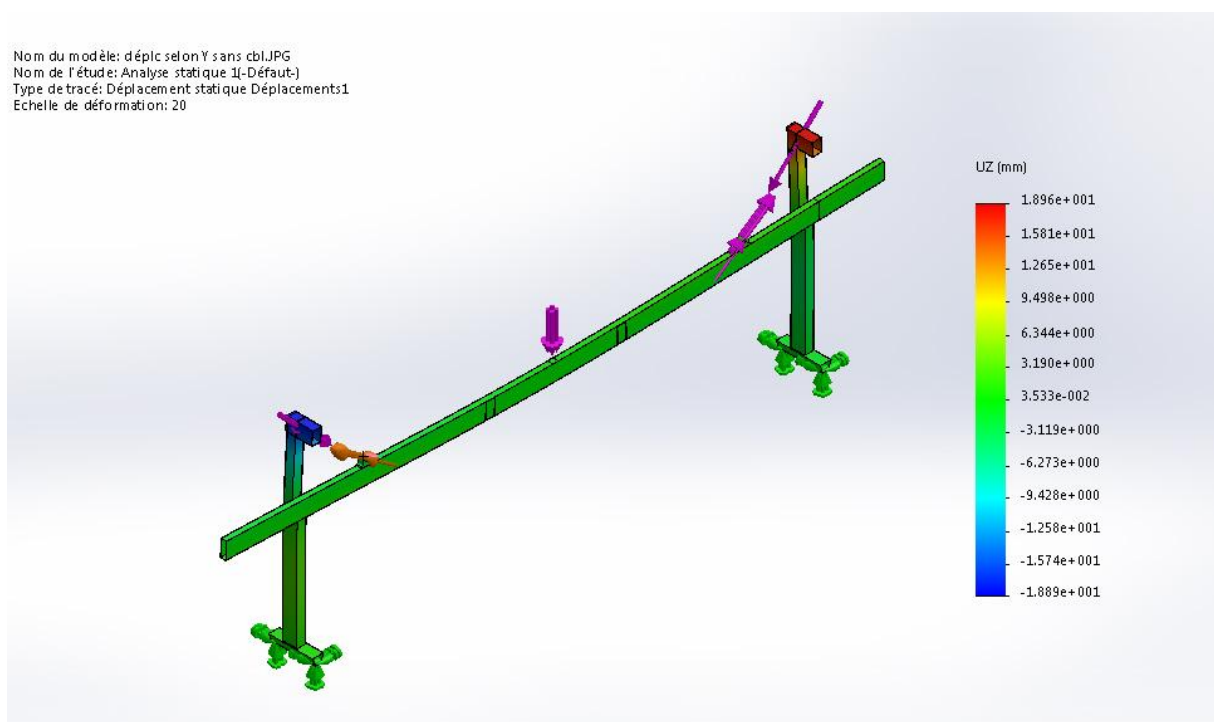


Figure V.18 : Déplacement selon l'axe z du modèle

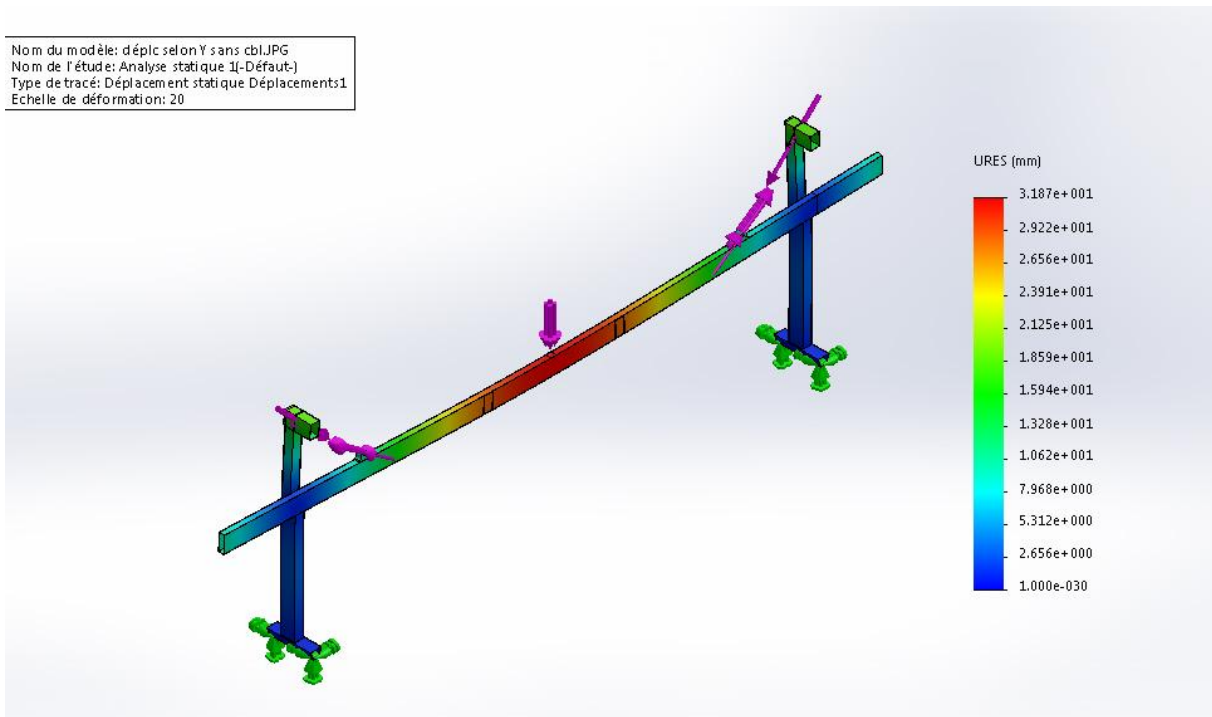


Figure V.19 : Déplacement résultant du modèle

On remarque d'après ces résultats illustrés que :

- La flèche maximale [numérique] selon z (sert pour la vérification des pieds) $f_{\max} = 18,9$ mm est inférieure à la flèche admissible $f_{\text{adm}} = L/300 = 58.33$ mm.
- La flèche maximale [numérique] selon y (sert pour la vérification des poutres maitresses) $f_{\max} = 31,87$ mm est inférieure à la flèche théorique $f_{\text{th}} = 33,36$ mm, cette dernière est inférieure à la flèche admissible $f_{\text{adm}} = L/1000 = 36$ mm.

$$(f_{\max} < f_{\text{th}} < f_{\text{adm}})$$

• conclusion

Les résultats de cette simulation conduisent à conclure que la structure métallique n'est pas exposée au risque d'effondrement et ces éléments sont prémunis contre les risques de ruines causées par les phénomènes d'instabilités et les déplacements imposés.

On se basant sur l'étude théorique et numérique et le comportement des éléments et leurs assemblages, on déduit que la charpente du portique roulant résiste aux différentes sollicitations.

Conclusion générale

Le dimensionnement des constructions métalliques et de divers produits est soumis à plusieurs vérifications selon des normes homologuées et des règles de calculs, qui assurent une analyse très profonde des phénomènes et des problématiques afin de démontrer la fiabilité du produit, mais en ce qui concerne les assemblages, c'est préférable voire important de les tester sur une maquette numérique ou réelle.

Pour une charpente d'un portique de levage, l'étude analytique se poursuit généralement par une simulation numérique pour vérifier la crédibilité des dimensions calculées.

A l'issue de ce travail, on constate que les résultats obtenus après modélisation et simulation de la maquette numérique du portique de levage sur un logiciel de calcul tendent vers ceux calculés analytiquement.

Il y a lieu de mentionner que la simulation d'un modèle de telles dimensions et géométries semble complexe surtout, si ce dernier est conçu sur un logiciel et simulé sur un autre, ce qui mène à l'obligation de simplifier les détails non-influençant sur le résultat final, cette démarche est basée sur le savoir-faire de l'utilisateur, car lui seul pourra détecter les zones qui peuvent être simplifiées selon les emplacements et la nature des sollicitations, les conditions aux limites et les besoins de l'étude.

Bibliographié

- [1] Fédération européenne de manutention (F.E.M) section I

- [2] Jean Morel « Calcul des structures métallique selon eurocode 3 »
Edition Eyrolles 61Bld Saint-Germain ; 75 240 Paris cedex 05

- [3] Appareils de levage et chariots de manutention ; Ref internet 42118

- [4] Pierre Maitre « Formulaire de la construction métallique » 3^{ème} édition
Edition le moniteur 17 rue d'Urés-75002 Paris

- [5] Arnaud Delaplace, Fabrice Gatuingt, Frédéric Rageneau
« Mécanique des structures, Résistance des matériaux »
Dunod, paris ; 2008 ISN 978-2-10-053958-1

- [6] Jean-Christophe Cuillière « Introduction à la méthode des éléments finis »
Dunod, Paris, 2011 ISBN 978-2-10-056438-5

- [7] appareils et accessoire de levage ; tome 1
Edité par l'afnor Tour Europe-Cedex 7 ; 92080 Paris – La Défence