

Chapitre 3 : Données techniques et hypothèses de calcul

Introduction

Le présent chapitre met en évidence les divers paramètres intervenant dans les calculs de la structure des poteaux pour les lignes aériennes de contact LAC.

Les pylônes des LAC font partie des structures métalliques dont les calculs et l'évaluation nécessite d'avoir une référence approprié .C'est ainsi je définirai en premier lieu la Norme Eurocode 3 que j'utiliserai le long de mon Projet comme une source de relations et d'interprétations pour mes résultats. Ensuite je spécifie l'ensemble des éléments et paramètres techniques à implanter pour pouvoir cerner le problème. En effet ,je me suis intéressé d'abord à analyser les hypothèses d'entrées en ce qui concerne les effets environnementaux (climat, vent...) en présentant les considérations à prendre et les étapes à suivre pour évaluer ces effets vis-à-vis la structure du pylône. Puis j'ai exposé certains nombre de paramètres techniques spécifiques aux projets LAC et qu'il faut intégrer dans les analyses qui vont suivre .En fait vu les extensions possibles du problème, il va falloir cerner un grand nombre d'hypothèses pour pouvoir donner un cadre pour la problématique.

3.1. Normes de calcul et Conventions

3.1.1. Norme générale

3.1.1.1. Présentation de la norme EUROCODE 3

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

« Règles de calcul des constructions en acier » dites « Règles CM66 » qui réglementait tous les bâtiments en acier.

Le titre V du fascicule 61 du cahier des prescriptions communes, intitulé « conception et calcul des ponts et construction métalliques en acier » qui réglementaient tous les ouvrages d'art.

Des normes NF , qui régissaient les calculs des assemblages et des éléments à parois minces.

Depuis 1993, une nouvelle réglementation est entrée en vigueur et impose, en remplaçant ces divers et précédents textes, un code unique : **l'EUROCODE 3**.

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

3.1.2. Danger des constructions métalliques

Les constructions métalliques exigent qu'une attention toute particulière soit portée sur certains points « névralgiques » notamment :

- Les pièces soumises à des sollicitations combinées, et qui travaillent sous des charges variables provoquant des anomalies pour l'ouvrage métallique.
- L'assemblage (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 amplifie considérablement les contraintes dans les pièces, et qui sont particulièrement redoutables en constructions métalliques.

3.1.3. Notations et conventions

3.1.3.1. Notations générales

3.1.3.1.1. Symboles

Les notations générales utilisées dans ce travail sont celles retenues dans le règlement EUROCODE 3.

Ces notations sont classées par rubriques et par ordre alphabétique ; l'alphabet romain d'abord (majuscule, puis minuscules) suivi de l'alphabet grec .

- Actions :

A Charges accidentelle

F Charge ponctuelle en générale

G Charge permanente ponctuelle

Q Charge d'exploitation ponctuelle

p Charge uniformément répartie

g Charge permanente uniformément répartie

W_n Charge de vent normale

W_e Charge de vent extrême

- Sollicitations/Contraintes/Déformations

E Module d'élasticité longitudinale de l'acier ($E= 210\ 000$ Mpa)

G Module d'élasticité transversale de l'acier ($G=81000$ Mpa)

M Moment sollicitant en général

M_{eff} Moment efficace

M_{el} Moment elastique

N Effort normal, en général

V Effort tranchant sollicitant

f Flèche

f_u Contrainte de rupture d'une pièce

f_{ub} Contrainte de rupture d'un boulon

f_y Limite élastique de l'acier

σ Contrainte normale

τ Contrainte tangentielle ou de cisaillement

ν Coefficient de poisson (acier =0,3)

δ Déplacement horizontal en tête de poteaux

- Coefficient en grandeurs sans dimensions

K Coefficient d'encastrement ou de rigidité poteau/poutre

n N/Npl ou nombre de boulon

ε Coefficient de réduction élastique de l'acier ($\varepsilon = \sqrt{235/f_y}$)

λ Elancement ($\lambda = \frac{l_k}{i}$)

χ Coefficient de réduction de flambement

γ Coefficient partiel de sécurité

- Caractéristiques géométriques

A Section brute d'une pièce

A_{eff} Section efficace d'une pièce (classe 4)

I_x Moment d'inertie de flexion maximal

I_y Moment d'inertie de flexion minimal

W_{eff} Module de résistance efficace

W_{el} Module de résistance élastique

W_{pl} Module de résistance plastique

d Diamètre nominal des tiges des boulons

i Rayon de giration d'une section ($\sqrt{\frac{I}{A}}$)

t Epaisseur d'une tôle

3.1.3.1.2. Unités

Dans ce travail j'ai adopté les unités qui sont employés dans la pratique .Le tableau ci-après donne les unités utilisées, leurs équivalences avec les unités théoriques (tableau 3.1)

Tableau 3.1 Les systèmes d'unité utilisés

Grandeurs	Unités Pratiques	Unités Théoriques	Equivalence
Efforts	daN	N	1 daN=10 N
Longueurs	mm	m	1mm = $10^{-3} m$
Sections	mm ²	m ²	1 mm ² = $10^{-6} m^2$
Moments fléchissant	daN.m	Nm	1 daN.m=10 N.m
Moments statiques	cm ³	m ³	1 cm ³ = $10^{-6} m^3$
Moments d'inertie	cm ⁴	m ⁴	1 cm ⁴ = $10^{-8} m^4$
Contraintes	daN/mm ²	N/m ² =Pa	1 daN/mm ² = $10^7 Pa$
Surcharge	daN/m ²	N/m ²	1 daN/m ² =10 Pa

3.1.3.2. Conventions et repérage

3.1.3.2.1. Système d'axe des poteaux

Le système utilisé est un système d'axes de coordonnées cartésiennes liées à la section, dont l'origine passe par le centre de gravité de la section du poteau.

Quel que soit le profil utilisé, on adopte le système d'axe montré sur les figures (3.1 et 3.2) :

- L'axe des y est l'axe de plus forte inertie
- L'axe des x est l'axe de plus faible inertie
- L'axe des z est l'axe longitudinal perpendiculaire à la section

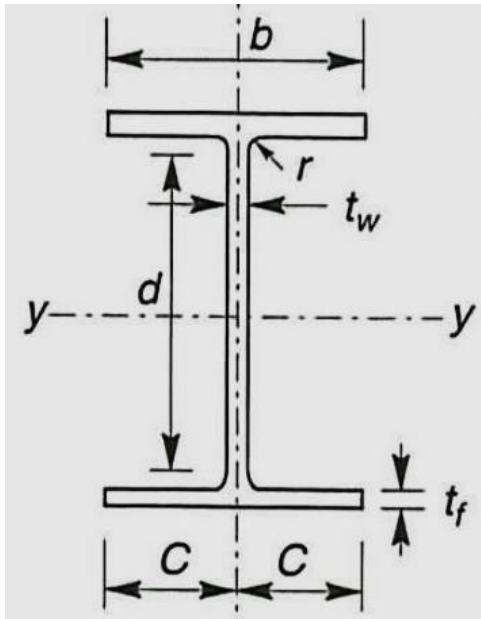


Figure 3.1. Système d'axe lié au poteau

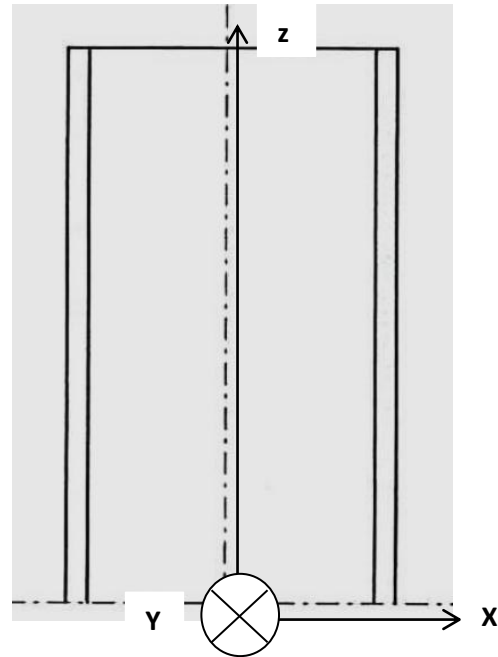


Figure 3.2. Représentation du système d'axe

3.1.3.2.2. Système de repérage vis-à-vis la position du poteau par rapport aux voies

Les systèmes d'axes choisis sont adaptés au fonctionnement permanent des supports dans les lignes ferroviaires, en effet, les efforts ayant plus d'impact sur les poteaux sont souvent orientés perpendiculairement aux voies, notamment les efforts résultant des tensions mécaniques des câbles caténaires, et les efforts liés aux équipements assemblés sur le poteau. Ainsi parallèlement aux voies, on aura le moment maximal autour de l'axe de plus forte inertie y , et perpendiculairement aux voies le cas contraire donc l'axe x .

Le moment maximal sera autour de l'axe parallèle a la voie Y (figure 3.3) .Le poteau sera positionné de manière à présenter la plus grande inertie autour de cet axe Y

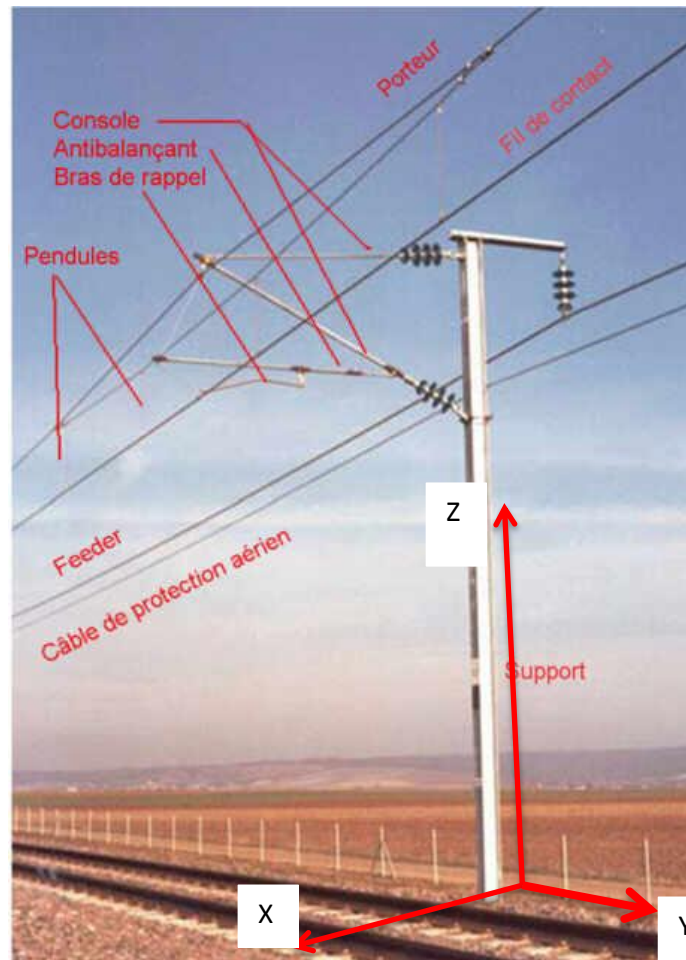


Figure 3.3. Système de repérage du poteau

3.2. Hypothèses environnementales

3.2.1. Hypothèses sur l'effet de température

Tous les calculs effectués, sont donnés dans l'intervalle de température $[-10^{\circ}\text{C}, +50^{\circ}\text{C}]$.

Les températures -10°C et $+50^{\circ}\text{C}$ correspondent aux cas de températures les plus défavorables. L'effet des efforts appliqués change en fonction de la température et chaque équipement est dimensionné pour résister à ces modifications de températures.

Par contre cet effet n'est pas pris en charge, puisque entre cette plage de température on considèrera que les variations en fonctions de la température sont négligeables sur les structures des poteaux et que les tensions mécaniques des câbles caténaires et les autres câble utilisés sont régularisées à l'aide des appareils tendeurs entre -10°C et $+50^{\circ}\text{C}$.

3.2.2. Hypothèses et calcul de l'action du vent

3.2.2.1. Définitions

Surfaces au vent : Surface exposé directement au vent

Surface sus vent : surface caché

Maître-couple : projection de la surface exposée au vent sur un plan perpendiculaire à la direction du vent.

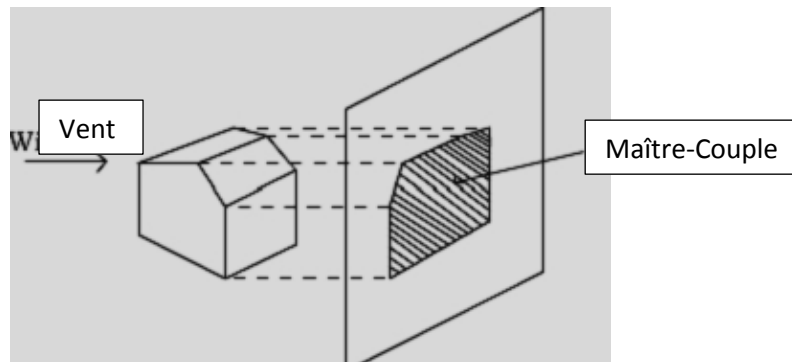


Figure 3.4. Le Maître coupe d'une structure

3.2.2.2. Calcul de l'effet du vent

a) Norme de calcul

Le calcul de l'effet de vent, et les détails des formules de celui-ci sont basée sur la norme NV65 .

L'Action exercée par le vent sur une face dépend de :

- La vitesse et la pression dynamique du vent
- Forme et catégorie de la construction
- L'emplacement de la paroi dans la construction et son orientation par rapport à la direction du vent.
- Action d'ensemble sur une construction

Pour une direction donnée du vent, l'action de sur les structures caténares (supports, équipements câbles, haubans...) est la résultante géométrique de toutes les actions s'exerçant sur toutes les parois.

b) Types de forces dues au vent :

- La force de traînée qui provoque un effet de renversement et d'entraînement.
- La portance verticale provoquant un effet de soulèvement.

Pour les structures de supports caténares on ne considère que les effets de la force de traînée.

3.2.2.3. Pressions dynamiques du vent

a) Pression dynamique de base notée q_{10} .

Elle est donnée par la formule de Bernoulli

$$q_{base} = \frac{v^2}{16,3} \quad (3-1)$$

Par convention : Les pressions dynamiques de base sont celles qui s'exercent à une hauteur de 10 m au-dessus du sol pour un site normal sur un élément dont la plus grande dimension est égale à 0,50 m.

b) Pression q_H à une hauteur H du sol

Pour H compris entre 0 et 500 m on calcule la pression q_H par la formule :

$$q_H = 2,5 * \frac{H+18}{H+60} * q_{10} \quad (3-2)$$

La hauteur H est prise depuis le pied de la construction si celle-ci est placée sur un terrain dont la pente est inférieure à 0,3.

Vu que les hauteurs des poteaux dans les projets caténaire ou tramway sont de l'ordre de 10 m, on considère que la pression dynamique q_H reste constante sur le mât et ayant une répartition uniforme selon la figure

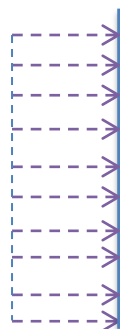


Figure 3.5 Répartition de la charge du vent

3.2.2.4. Corrections des Pressions dynamiques

Les constructions utilisées dans les projets d'électrifications des lignes caténares ou les lignes de tramway sont implantées dans des zones selon une utilisation et configuration données et qui ne sont pas toujours identiques. Dès lors la position et l'endroit de

l'implantation du poteau entraîne des modifications importantes sur les calculs de l'effet de vent, qu'on doit tenir en compte.

Plusieurs corrections sont à apporter dans les formules de calcul, notamment des coefficients de majorations pour les pressions dynamiques dépendant du site d'implantation et les structures à côté, de la construction elle-même et ses dimensions.

a) Effet de site (coefficient de site K_s) :

La nature du site d'implantation des installations caténaïres (supports, portiques, consoles, câbles..) peut conduire à une diminution ou une augmentation de la vitesse du vent et donc des pressions correspondantes.

Les règles NV 65 considèrent trois types de site :

- site protégé : par exemple, fond de cuvette bordée de collines sur tout son pourtour ou site urbain dense ;
- site normal : par exemple, plaine de grande étendue avec des dénivellations peu importantes, de pente inférieure à 10 % ;
- site exposé : par exemple, littoral en général sur une profondeur de 6 km, sommet des falaises, îles ou presqu'îles étroites, vallées étroites.

En fonction du site, les pressions de base normales et extrêmes doivent être pondérées par un coefficient de site K_s

Tableau 3.2 Valeur du coefficient de site selon les types de site

Type Site	Définition	K_s
Site protégé	Cuvette bordée de collines, site urbain	0,8
Site normal	Exemple :plaine de grande étendue avec des dénivellations ,pente <10%	1,00
Site exposé	Sommets, îles , vallées	1,35

La nature du site doit être définie par le cahier des charges du projet. À défaut de précisions, on adoptera une implantation de type site normal

b) Effet de masque :

Si la structure est masquée et protégée par d'autres constructions de grande probabilité de durée. (Risque de turbulence engendré par les autres constructions à côté des poteaux)

c) Effet de dimension :

La vitesse du vent n'est pas uniforme dans l'espace. Si la surface frappée est beaucoup plus grande, la résultante moyenne des efforts pourra donc être réduite en pondérant les pressions dynamiques de base par un coefficient de réduction $\delta < 1$.

Pour les supports caténaux de hauteur inférieure à 30 m la formule de calcul du coefficient de majoration due à l'effet de vent est :

$$\delta = 1 - 0,13 * (\log(h) + 0,301) \quad (3-3)$$

Ainsi la pression dynamique corrigée est déduite de la pression dynamique q_H en la multipliant par ces coefficients de correction

$$q = K_S * K_m * \delta * q_H \quad (3-4)$$

3.2.2.5. Calcul des actions statiques du vent

Seule l'action horizontale dans la direction du vent (traînée) doit être prise en compte (en général les actions dans les directions perpendiculaires au vent seront plus faibles). Elle produit un effet d'entraînement et de renversement sur le poteau, dans les directions les plus défavorables, selon l'effet considéré. Sont à prendre en compte :

$$F_v = C_t * q * S_{Maitre-coupe} \quad (3-5)$$

Avec

q : la pression dynamique corrigée avec les coefficient de majorations en daN/m²

$S_{Maitre-coupe}$ Surface du maître-coupe de l'élément à calculer en m²

C_t : Coefficient global de traînée pour l'élément à calculer de dimension finie et donné par $C_t = C_{t0} * \psi_\lambda$

Pour obtenir C_t pour un élément de section polygonale ou circulaire dont le rapport $\lambda = \frac{H}{b}$ est fini (b diamètre à mi-hauteur) on considère les tableaux de calcul suivants :

Tableau 3.3 Tableau de calcul du coefficient ψ_λ

$\lambda = \frac{H}{b}$	$1 \leq \lambda \leq 10$	$10 \leq \lambda \leq 100$
ψ_λ	$0,6 + 0,1 * \log(\lambda)$	$0,45 + 0,25 * \log(\lambda)$

Tableau 3.4. Tableau de calcul du coefficient C_{t0}

Catégorie	Types de construction	Coefficients c_{t0}	
I	Prismes de trois ou quatre côtés	1,30	
II	Prismes de plus de quatre côtés et de dix côtés au plus avec ou sans nervures arrondies		
	— cinq côtés	1,05	
	— six côtés	0,95	
	— huit côtés	0,85	
	— dix côtés	0,80	
III	Prismes de plus de dix côtés et de vingt côtés au plus, avec ou sans nervures arrondies (1) (n étant le nombre de côtés).		
	• $d \geq 0,28$	$1,05 - 0,025 n$	
	• $d < 0,28$ {	$d\sqrt{q} \geq 1,5$	$1,05 - 0,025 n$
		$0,5 < d\sqrt{q} < 1,5$	$0,80 - 0,02 d\sqrt{q} - 0,25(n - 10)$
	$d\sqrt{q} \leq 0,5$	$0,85 - 0,005 n$	
IV	Cylindres à base circulaire avec nervures minces ou épaisses à arêtes vives (saillies comprises entre 0,01 d et 0,10 d)	0,75	
V	Prismes à vingt côtés et plus, avec ou sans nervures arrondies. Cylindres rugueux à base circulaire sans nervure (1).		
	• $d \geq 0,28$	0,55	
	• $d < 0,28$ {	$d\sqrt{q} \geq 1,5$	0,55
		$0,5 < d\sqrt{q} < 1,5$	$0,85 - 0,20 d\sqrt{q}$
	$d\sqrt{q} \leq 0,5$	0,75	
VI	Cylindres lisses à base circulaire sans nervure et possédant un poli spéculaire et durable (1).		
	• $d \geq 0,28$	0,45	
	• $d < 0,28$ {	$d\sqrt{q} \geq 1,5$	0,45
		$0,5 < d\sqrt{q} < 1,5$	$0,90 - 0,30 d\sqrt{q}$
	$d\sqrt{q} \leq 0,5$	0,75	

(1) Dans les inégalités, d est exprimé en mètres et q en décanewtons par mètre carré (daN/m²).

(d diamètre à mi-hauteur et q la pression dynamique corrigées)

3.2.2.6. Calcul des actions dynamique du vent

Pour tenir compte de l'amplification de l'action du vent exercée sur les installations due à la réponse dynamique de ce dernier, les pressions dynamiques servant au calcul de l'action d'ensemble sont à multiplier, par un coefficient de majoration dynamique β (sans dimension) donné par la formule :

$$\beta = 1 + \xi * \tau \quad (3-6)$$

ξ est le coefficient de réponse donné en fonction de la période T (en secondes) du mode fondamental d'oscillation de la structure (support, portiques...) par le tableau ci-dessous :

Tableau 3.4 Valeurs de ξ en fonction de la période propre du poteau

T(s)	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	>6
ξ	0,75	1,31	1,80	2,20	2,50	2,75	2,90	3,08	3,19	3,25	3,29	3,30

τ Est le coefficient de pulsation donné en fonction de la hauteur h (en mètre)

Pour notre cas h est de l'ordre de 10 m τ est égale à 0,36.

Une carte de vent du Maroc, donnant la répartition des pressions et des vitesses dans les différentes régions du pays (Voie Annexe 1)

Les calculs des coefficients ont été automatisés à l'aide d'Excel dans des Datasheets avec tous les détails (Voir Annexe 2)

3.2.2.7. Hypothèses à prendre pour l'effet de vent

Sauf dans une situation différente ou une spécification technique particulière du maître d'ouvrage, plusieurs hypothèses peuvent être considérées :

- La plage de température considérée est entre -10°C et 20°C
- Effet de la hauteur au-dessus du sol : On ne considère pas cet effet
- Effet de site : Un seul type de site est considéré pour l'aménagement ferroviaire de la zone Site normal .On prend donc un coefficient de site égal à $K_s = 1$ (hypothèse qui n'est pas toujours vraie pour le cas des projets de Tramway)
- Effet de masque : On ne considère pas cet effet

3.3. Données géographique et topographiques

3.3.1. Piquetage des voies (Voir Annexe 3)

Il consiste à reporter sur le terrain les limites des ouvrages ou des propriétés d'un plan d'implantation. Il permet aussi de voir et vérifier les types de terrains et les situations des lieux de renseigner des informations qui seront utiles dans l'étude du projet. Cette opération est réalisée par un topographe ou un géomètre.

Les plans issus du piquetage des voies sont ainsi nécessaires pour déterminer les éléments à implanter dans les lignes, leurs répartitions et leurs configurations.

3.3.1.1. Longueur des portées

On désigne par portée, la distance séparant deux poteaux consécutifs. Cette longueur est exprimée en mètre, est généralement multiple de 4,5.

Les longueurs possibles des portées s'échelonnent selon ce tableau :

Tableau 3.5 Valeurs de portées

63	58,5	54	49,5	45	40,5	36	31,5	27	22,5	18
----	------	----	------	----	------	----	------	----	------	----

Les valeurs des portées se différent selon la nature des positions des supports caténaire et de la nature des voies, situation d'alignement ou en courbe.

Les portées normalisées en fonctions des rayons de courbes sont données par ce tableau :

Tableau 3.6 Valeurs de portées en fonction du rayon de courbe

Rayons (m)	Portées (m)
$R > 2500$	63
$1800 < R < 2500$	58,5
$1350 < R < 1800$	54
$1050 < R < 1350$	49,5
$1050 < R < 800$	45
$800 < R < 600$	40,5
$600 < R < 450$	36
$450 < R < 350$	31,5

3.3.1.2. Plan de contact, plan moyen de roulement

Le piquetage des voies permet de donner des mesures sur le plan de contact, qui est un plan tangent au fils de contact et au plan du pantographe en d'autre terme, c'est la hauteur des fils de contact par rapport au plan moyen de roulement

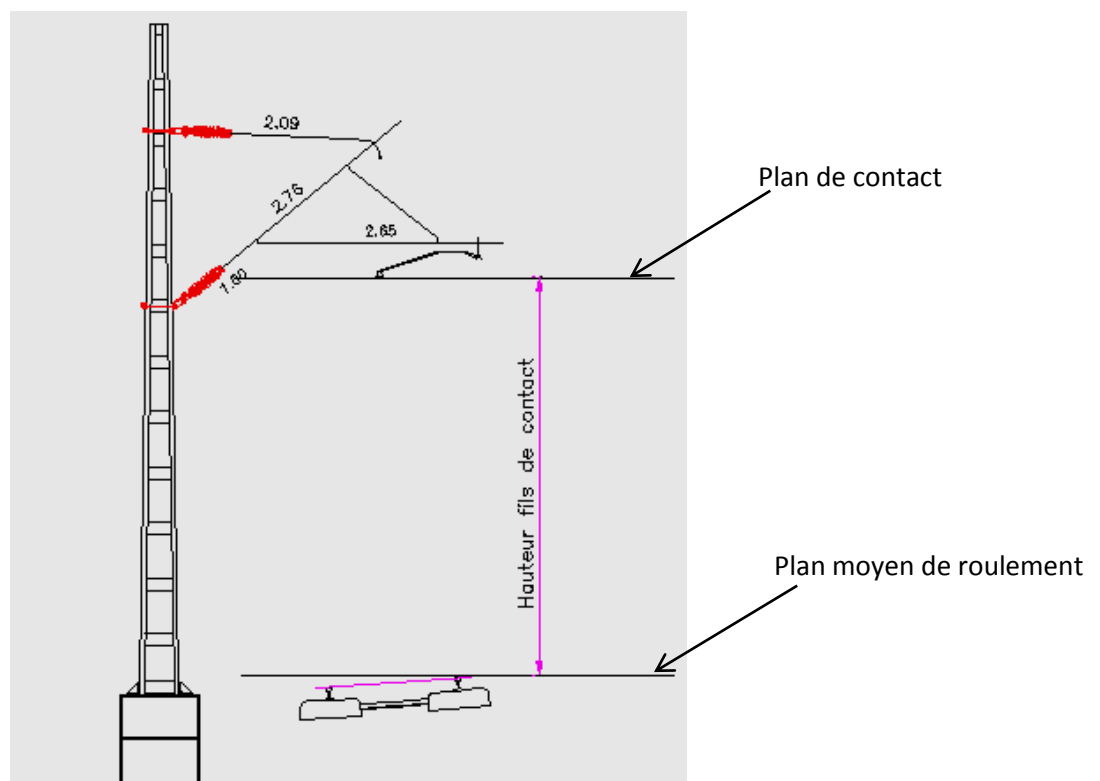


Figure 3.6 Représentation du Plan de contact et plan moyen de roulement

Valeurs forfaitaires :

- ✓ La hauteur normale est de 5,50m en voie courante
- ✓ La hauteur maxi est de 6,0 m aux passages à niveau
- ✓ La hauteur mini est de 4,70 m sous les ponts -routes (Pro)

3.3.1.3. Implantations des pylônes

L'implantation i est la distance minimale entre le nu du support et le bord extérieur du rail le plus proche.

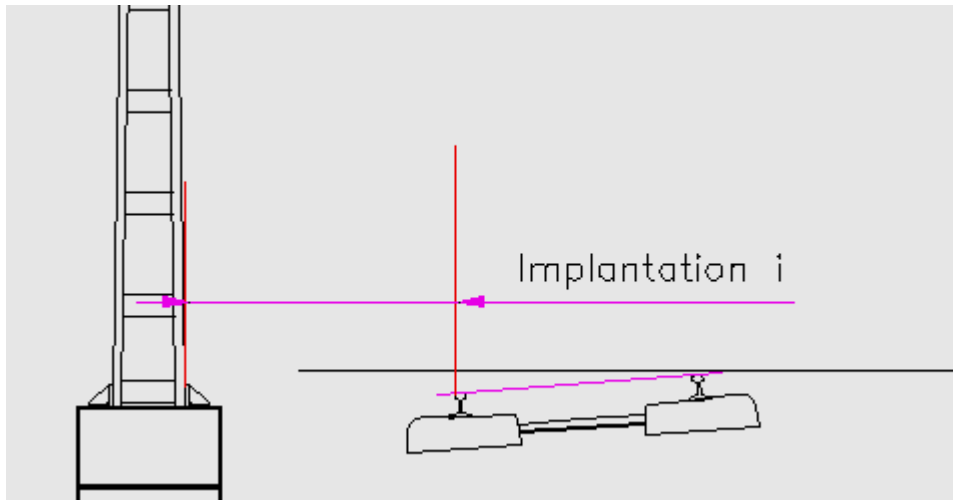


Figure 3.7 Représentation de l'implantation

Cette implantation est majorée sur quai (type de terrain spécifique aux zones des gares) où elle peut dépasser 3,4 m à la demande du réseau exploitant lors des tournés de validation des piquetages.

3.3.1.4. Arasement des massifs

La fixation des supports caténaires au sol se fait à l'aide de plusieurs types massifs en béton arasés dans le sol selon des divers critères :

- ✓ Les charges engendrées par la caténaire sur les pylônes (moments à l'encastrement)
- ✓ Le type et le profil du terrain
- ✓ La nature du sol

La distance entre le plan moyen de roulement et le bout du massifs est appelée Arasement A

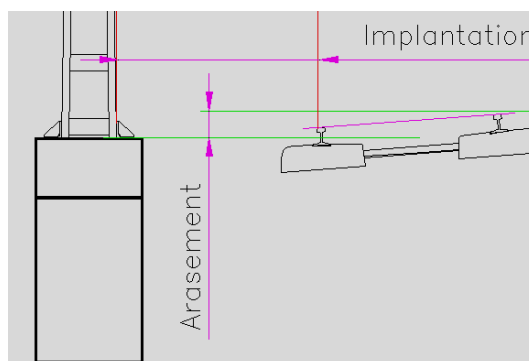


Figure 3.8 Représentation de l'Arasement

Valeurs forfaitaires :

- ✓ Massifs de pylônes indépendants Ils sont arasés à 0,15m au-dessous du plan de roulement en alignement et plan moyen de roulement en courbe.
- ✓ Massifs de pylônes de portique
Ces massifs sont arasés de 0,15m au-dessous du plan de comparaison (plan horizontal passant par le rail le plus bas de la voie la plus haute).
- ✓ Massifs sur quai
Les massifs sur quai pour pylônes et haubans d'ancrage sont arasés au niveau du quai.
- ✓ Massifs d'ancrage voie courante
Ces massifs sont arasés à 0,15m au-dessous du plan de comparaison (plan horizontal passant par le rail le plus bas de la voie la plus haute)

3.3.1.5.Types de terrains

Pour identifier les fondations (massifs) à utiliser dans le projet, le piquetage renseigne les types de terrain pour chaque position et emplacement de pylônes .En général il y'a trois types de terrains à prendre en compte :

- Les Déblais : Terrain plat et tranchée
- Les Remblai : Talus
- Les Quais : pour les zones situées dans les gares.

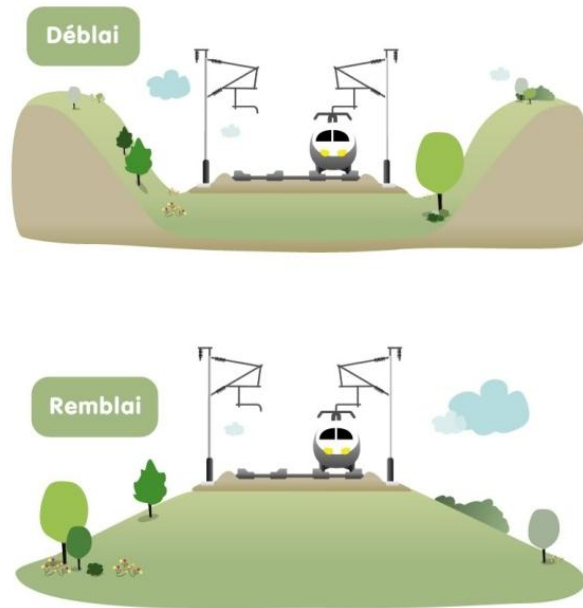


Figure 3.9 Types de terrains

3.3.2. Plans et documents de piquetage

Les plans de piquetage sont réalisés par un topographe ou géomètre, et ayant des réglementations particulière en terme de symboles et notifications. Aussi il faut vérifier ces plans par des tournées sur les terrains.

3.4. Caractéristiques générale des caténaires

3.4.1. Description de la caténaire

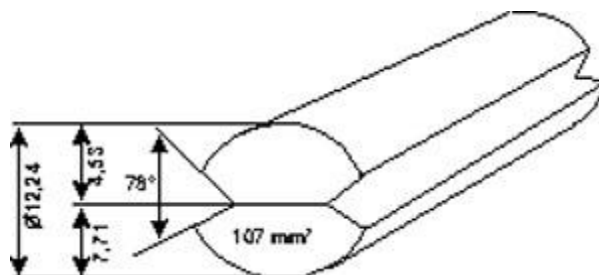


Figure 3.10 fils de contact rainuré

3.4.1.1. Voies principales

Un câble porteur de 153 mm^2 de section en cuivre à 98% de conductibilité tendu à 1400daN dans la plage de régularisation.

- Deux fils de contact rainurés de 107 mm^2 de section en cuivre écroui dur à 98% de conductibilité tendu à 1000 daN par fil dans la plage de régularisation.
- Les fils de contact de 107 mm^2 sont suspendu au câble porteur alternativement par des pendules en câblette en bronze (pendules) .La distance entre deux pendules consécutifs est de 4,5 m sur un même fil de contact.
- Le pendulage est défini pour que les fils de contacts présentent une flèche égale à $1/1000$ de la longueur de la portée, dans la plage de régulation.

L'encombrement (distance entre le porteur et les fils de contact) normal de la caténaire au droit des des suspensions est de 1,40 m.

Cette valeur est réduite aux supports encadrant les ponts en fonction de la portée de la caténaire déterminée par la hauteur et la largeur de l'ouvrage.

Les tensions mécaniques du porteur et des fils de contact sont régularisées au moyen d'appareils indépendants assurant des tensions mécaniques constantes de -10°C à $+50^\circ\text{C}$.

Pour les voies courantes et les voies principales de gare, tous les supports d'une même voie sont reliés entre eux par un câble de protection aérien (CdPA) lui-même relié à la terre tous les 1200 mètres.

En voie courante le câble de protection est constitué d'un câble Al.Ac de $116,2\text{mm}^2$ de section.

3.4.1.2. Voies secondaires

Les voies secondaires sont équipées de caténaires légères régularisées.

La caténaire légère est constituée par :

- Un porteur de 93 mm^2 de section en cuivre tendu à 800 daN à $+20^\circ\text{C}$
- Un fil de contact rainuré de 107 mm^2 de section en cuivre tendu à 1000 daN à $+20^\circ\text{C}$

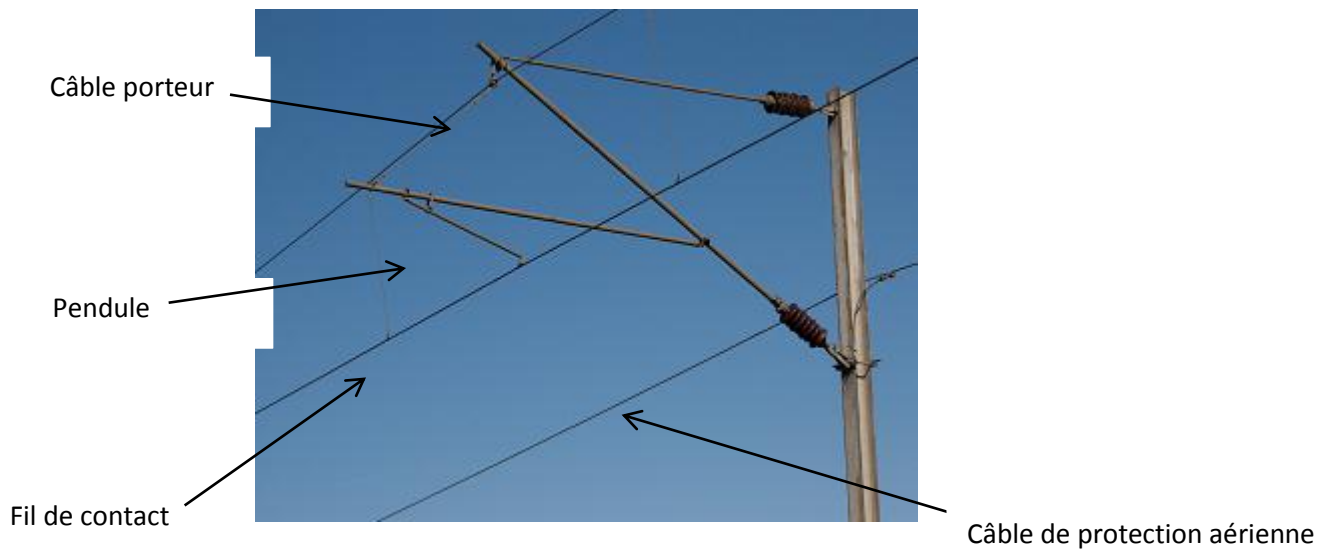


Figure 3.11 Composition de la caténaire

3.4.2. Propriétés des câbles et des fils

Ce tableau résume les propriétés des câbles et des fils qu'on utilise dans les projets d'électrification des lignes ferroviaires.

Les valeurs de tensions mécaniques de ces câbles sont standards dans la marge de température entre -10° et +50°

Tableau 3.7 Caractéristiques mécaniques des câbles dans les lignes aériennes de contact

	<u>Porteur voie principale</u>	<u>Porteur voie secondaire</u>	<u>Fils de Contact</u>	<u>Liaison pylônes - rail</u>	<u>Câble Anti cheminement</u>	<u>Feeder</u>	<u>Elingue d'ancrage</u>	<u>Connexion parafoudre</u>	<u>Mise à la terre</u>	<u>Fil pour pendule</u>
<u>Matériau</u>	CU	CU	CU	Al. AC	AC	AC	CU	BZ	CU	BZ
<u>Section mm²</u>	153	93	107	116,2	151	48,2	153	116,2	C75	12
<u>Diamètre mm</u>	16,1	12,6	12,24	14	18	9	16,1	14	I2.5	5
<u>Poids linéaire Kg/m</u>	1414	0,834	0,932	0,433	1,350	0,410	1414	1040	0,70	0,103
<u>Coefficient Allongement</u>	0,000083	0,000083	0,000083	0,000132	0,00016	0,000115	0,000083	0,000118	0,000083	0,000118
<u>Coefficient de dilatation</u>	0,000017	0,000017	0,000017	0,000018	0,0000115	0,000550	0,000017	0,000017	0,000017	0,000017
<u>Tension daN</u>	1400	800	1000	800		1000	800	1400	**	
<u>Tension de rupture daN</u>	6060	3820	3852	4310da	6980daN	6282	6060	8500	**	≥695

3.4.3. Caractéristiques et propriétés des supports caténaire

3.4.3.1. Description des éléments de suspension de la caténaire

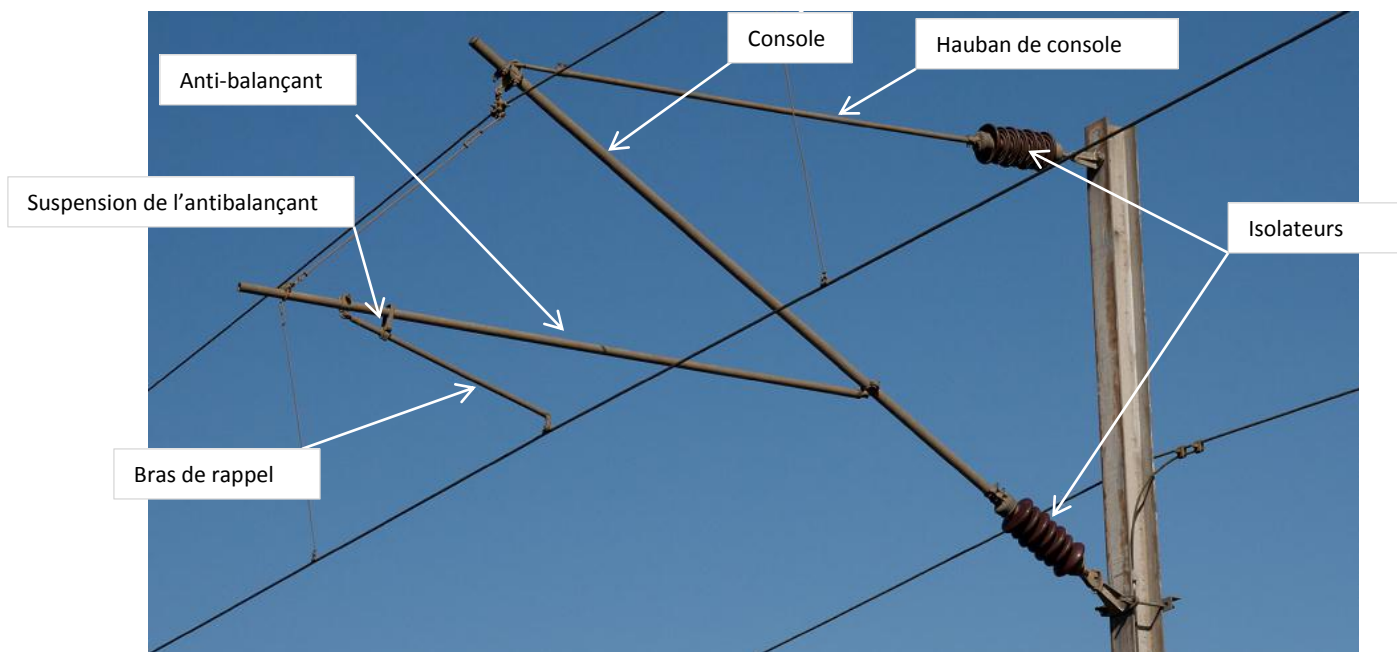


Figure 3.12 Les Eléments de suspension de la caténaire

3.4.3.2. Consoles

Les consoles sont constituées de tubes en acier galvanisé de diamètre extérieur 57 mm. Ce tube est rendu solidaire du capot d'un isolateur, à une extrémité et muni d'un bouchon, en polyéthylène de couleur noire, à l'autre extrémité pour éviter l'infiltration d'eau.

Les consoles sont fixées sur les pylônes (ou sur des traverses dans le cas de montage de plusieurs suspensions sur le même pylône) par l'intermédiaire de pieds mobiles.

3.4.3.3. Haubans de console

Les haubans de consoles sont constitués de tube en acier galvanisé de diamètre extérieur 38mm ou 30mm suivant les cas de montage. Les haubans sont réglables en longueur (avec pas suffisants) pour permettre un réglage minutieux.

Les haubans de console sont fixés sur le pylône (ou sur une traverse) par l'intermédiaire d'un pied mobile.

3.4.3.4. Antibalançants

Les Antibalançants sont constitués de tubes en acier galvanisé de diamètre 38 mm ou de 48mm suivant les cas de montage.

A une extrémité est fixé un crochet par rivetage et à l'autre extrémité un bouchon enfoncé par force. Le crochet d'Antibalançants est en cupro-aluminium. En général

L'Antibalançants est installé horizontalement à une distance suffisante au-dessus des fils de contact, permettant une flexibilité et un bon comportement des fils de contact.

3.4.3.5. Bras de rappel

Les bras de rappel sont en tube d'alliage d'aluminium (coudé pour permettre un bon dégagement du gabarit du pantographe) de diamètre extérieur 30 mm. La longueur du type normal du bras de rappel doit être unique pour caténaire de voie principale.

3.4.3.6. Suspension de l'Antibalançants

L'Antibalançants est soutenu par un tube, en acier galvanisé, de diamètre 38mm fixé à la console.

3.4.3.7. Pieds de consoles et de haubans

Ces pièces sont en fonte malléable galvanisée à chaud et permettent la libre rotation de $\pm 90^\circ$ de la console et du hauban sans risque de choc de l'isolateur sur le pylône. Les axes de rotation sont en acier inoxydable.

3.4.3.8. Isolateurs

Les isolateurs sont de deux types, en porcelaine pour les consoles et hauban et en verre trempé pour les ancrages dans les zones normales et du type composite pour les haubans.

3.5. Les pylônes

Les pylônes sont les éléments qui servent à supporter les équipements de suspension de la caténaire, ou bien ils servent comme pylône d'ancrage. L'étude de ces pylônes doit être établie avec le plus grand soin. Le choix d'un poteau dans une position donnée nécessite la connaissance de ses propriétés mécaniques, des éléments qui l'entourent, et de son emplacement par rapport aux autres pylônes.

3.5.1. Matériaux

Les valeurs des propriétés des matériaux, en particulier les caractéristiques mécaniques, à prendre en compte dans les calculs sont celles définies dans les normes de produits Aciers.

Les normes suivantes définissent les propriétés des aciers dans les constructions des mâts et pylônes :

NF EN 10025 , NF EN 101113 , NF EN 10149. **(Voir Annexe 4)**

Dans les constructions des pylônes, on se limite à trois nuances principales d'acier (S.235 dans la majorité des cas, S.275 et S.355 plus rarement). En effet, le calcul en plasticité peut être utilisé dans l'analyse globale de ces structures ou de leurs éléments (boulons, tige d'ancrages...) aux conditions que l'acier satisfasse aux trois exigences suivantes :

- ✓ La contrainte à la rupture f_u doit être supérieure de 20% au moins à la limite d'élasticité f_y :

$$f_u \geq 1,2 f_y$$

- ✓ L'allongement à rupture ε_u doit être supérieur à 15% :

$$\varepsilon_u \geq 0,15$$

- ✓ L'allongement à rupture ε_u (correspondant à f_u) doit être supérieure à 20 fois l'allongement ε_y (correspondant à f_y)

Tableau 3.8 Caractéristiques mécaniques de l'acier utilisé dans la fabrication des pylônes

Caractéristiques mécaniques des Aciers en fonction de leur épaisseur t	Nuances d'Aciers		
	S.235	S.275	S.355
Limites élastique f_y (MPa)			
- $t \leq 16 \text{ mm}$	235	275	355
- $16 < t \leq 40 \text{ mm}$	225	265	345
- $40 < t \leq 63 \text{ mm}$	215	255	335
Contrainte de rupture en traction f_u (MPa)			
- $t \leq 3 \text{ mm}$	360/510	430/580	510/680
- $3 < t \leq 100 \text{ mm}$	340/470	410/560	490/630
Allongement minimal moyen ε			
- $t \leq 3 \text{ mm}$	18%	15%	15%
- $3 < t \leq 150 \text{ mm}$	23%	19%	19%

Dans les calculs que j'ai mis pour ce travail, je me suis basé sur les valeurs suivantes pour un acier courant E28 :

- Module d'élasticité longitudinale : $E=210000 \text{ N/mm}^2$
- Module de cisaillement : $G=E / (2*(1+\nu))$
- Coefficient de poisson : $\nu=0,3$
- Masse Volumique : $\rho=7850 \text{ kg/m}^3$

Les propriétés des éléments de fixations (boulons, tiges d'ancrage, béton ...) sont présentes dans l'annexe 5

3.5.2. Types de pylônes

Dans cette partie, je vais présenter les divers types de pylônes avec leurs propriétés géométriques. Ces poteaux sont ceux utilisés par la société Cegelec dans les projets d'électrification des lignes ferroviaires et Tramway, aussi ce sont les poteaux les plus demandés par les clients et dont l'achat ou la fabrication ne présente pas un problème pour Cegelec.

Les pylônes les plus adoptés et qui font l'objet de mes calculs, sont les poteaux X, Z avec ses variantes, les poteaux H, les poteaux cylindro-conique et les Multi-pans.

3.5.3. Pylônes X et Z

Profile et forme

Ce sont des pylônes en treillis à embase en acier galvanisé, constitué de montant en UPN assemblés par des entretoises en fer plat. Les variantes de ces types de pylônes sont :

X1 – X2 – X3 - X3A –Z3-Z5-Z6Bis.

Voici un exemple de pylône X2

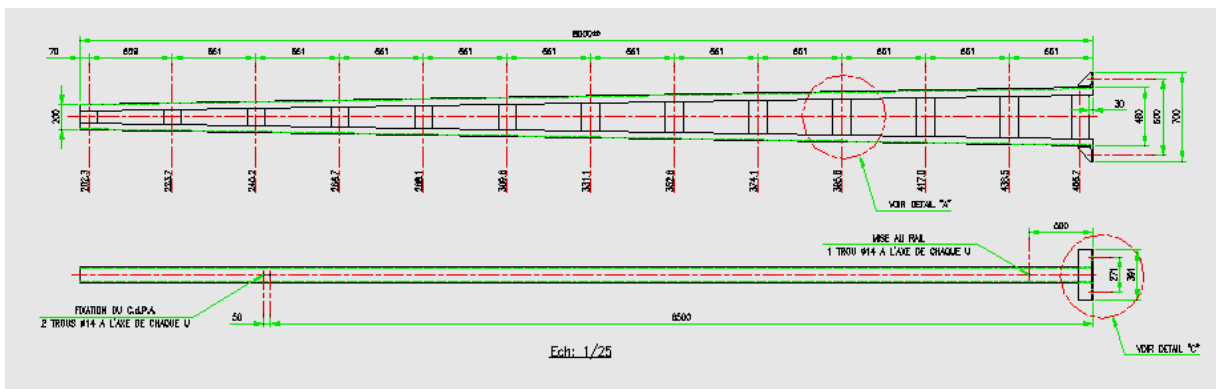


Figure 3.13 Forme de pylône type X2

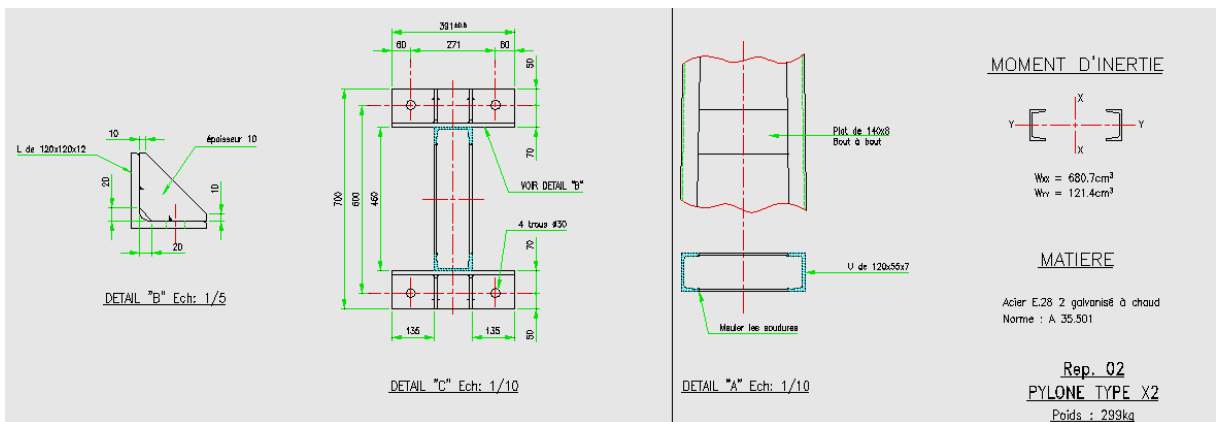


Figure 3.14 Les géométries et mécaniques du pylône X2

Ces pylônes sont clairement détaillés avec leurs schémas de plan conçu sur AutoCad (Voir Annexe 6)

Caractéristiques des pylônes (éléments de calcul)

Ce tableau donne les caractéristiques géométriques et mécaniques de ce type de pylônes :

Tableau 3.9 donnant les propriétés géométriques et mécaniques pour pylône X et Z

Ech.	P (kg/m)	A (cm ²)	I _x ⊥ aux voies (cm ⁴)	M _x =I _x /v _x (cm ³)	I _x moyen (cm ⁴)	I _y // aux voies (cm ⁴)	M _y =I _y /v _y (cm ³)
X1	30,50	27,00	12481,37	542,67	7233,92	412,00	82,40
X2	38,00	34,00	15657,04	680,74	9071,24	728,00	121,40
X3	45,50	40,80	18549,15	806,48	10725,75	1210,00	172,80
X3A	45,50	40,80	22180,35	887,21	13510,35	1210,00	172,80
Z3	58,50	56,00	30058,44	1202,34	18277,44	2700,00	300,00
Z5	73,00	74,80	39482,95	1579,32	23952,60	5380,00	490,00
Z6bis	106,50	106,60	113186,48	3233,90	68936,82	12560,00	896,00

Avec

I_{moyen} ⊥ : moment d'inertie dans le sens X perpendiculairement à la voie calculé à mi-hauteur du pylône

I_{//} : moment d'inertie dans le sens parallèle à la voie

W_⊥ : module de flexion dans le sens ⊥ à la voie calculé à mi-hauteur

W_{//} : module de flexion dans le sens // à la voie

3.5.4. Pylônes H

Profile

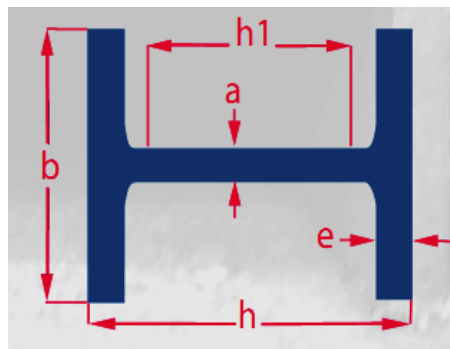
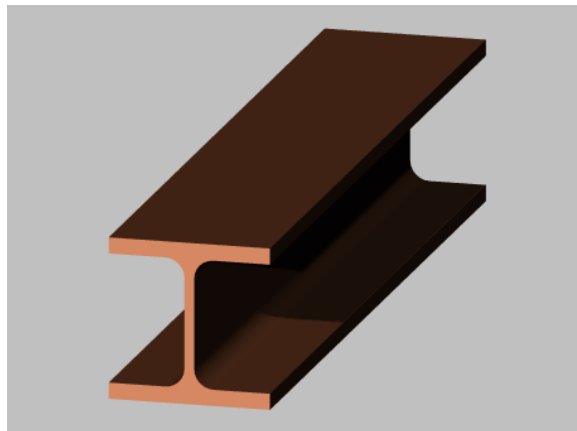


Figure 3.15 Caractéristiques dimensionnelles des profils en H

Autres types qu'on utilise dans l'électrification des lignes pour support de caténaire sont les poutrelles en H, ces types de pylône sont très utilisés car ils sont très disponibles sur le marché, aussi leur bon fonctionnement pour une longue durée.



Les poteaux en H existe dans le marché sur plusieurs genres, les HEB , les HEA , et les HEM sont les plus adoptés par la société Cegelec. La connaissance de leurs caractéristiques mécaniques et géométriques va permettre de savoir leurs comportements mécaniques au cours du fonctionnement.

Tableau 3.10 Pylône HEA

Ech.	h (mm)	b (mm)	a (mm)	e (mm)	P (kg/m)	A (cm ²)	I _x (cm ⁴)	m _x (cm ³)	I _x moyen (cm ⁴)	I _y (cm ⁴)	m _y (cm ³)	J (cm ⁴)
HEA100	96	100	5	8	16,7	21,2	349	73	349	134	27	4,69
HEA120	114	120	5	8	19,9	25,3	606	106	606	231	38	5,63
HEA140	133	140	5,5	8,5	24,7	31,4	1033	155	1033	389	56	7,97
HEA160	152	160	6	9	30,4	38,8	1673	220	1673	616	77	10,9
HEA180	171	180	6	9,5	35,5	45,3	2510	294	2510	925	103	14,2
HEA200	190	200	6,5	10	42,3	53,8	3692	389	3692	1336	134	18,6
HEA220	210	220	7	11	50,5	64,3	5410	515	5410	1955	178	27,1
HEA240	230	240	7,5	12	60,3	76,8	7763	675	7763	2769	231	38,2
HEA260	250	260	7,5	12,5	68,2	86,8	10460	836	10460	3668	282	46,3
HEA280	270	280	8	13	76,4	97,3	13670	1010	13670	4763	340	56,5
HEA300	290	300	8,5	14	88,3	112,5	18260	1260	18260	6310	421	75,3
HEA320	310	300	9	15,5	97,6	124,4	22930	1480	22930	6985	466	102
HEA340	330	300	9,5	16,5	105	133,5	27700	1680	27700	7436	496	123
HEA360	350	300	10	17,5	112	142,8	33090	1890	33090	7887	526	147
HEA400	390	300	11	19	125	159	45070	2310	45070	8564	571	191

Tableau 3.11 Pylône HEB

Ech.	h (mm)	b (mm)	a (mm)	e (mm)	P (kg/m)	A (cm ²)	Ix (cm ⁴)	mx (cm ³)	Ix moyen (cm ⁴)	Iy (cm ⁴)	my (cm ³)	J (cm ⁴)
HEB100	100	100	6	10	20,4	26	450	90	450	167	33	9,05
HEB120	120	120	6,5	11	26,7	34	864	144	864	318	53	14,4
HEB140	140	140	7	12	33,7	43	1509	216	1509	550	79	21,8
HEB160	160	160	8	13	42,6	54,3	2492	311	2492	889	111	32,2
HEB180	180	180	8,5	14	51,2	65,3	3831	426	3831	1363	151	45,1
HEB200	200	200	9	15	61,3	78,1	5696	570	5696	2003	200	61,4
HEB220	220	220	9,5	16	71,5	91	8091	736	8091	2843	258	81,8
HEB240	240	240	10	17	83,2	106	11260	938	11260	3923	327	107
HEB260	260	260	10	17,5	93	118,4	14920	1150	14920	5135	395	125
HEB280	280	280	10,5	18	103	131,4	19270	1380	19270	6595	471	148
HEB300	300	300	11	19	117	149,1	25170	1680	25170	8563	571	186
HEB320	320	300	11,5	20,5	127	161,3	30820	1930	30820	9239	616	233
HEB340	340	300	12	21,5	134	170,9	36660	2160	36660	9690	646	270
HEB360	360	300	12,5	22,5	142	180,6	43190	2400	43190	10140	676	310
HEB400	400	300	13,5	24	155	197,8	57680	2880	57680	10820	721	382

Tableau 3.12 Pylône HEM

Ech.	h (mm)	b (mm)	a (mm)	e (mm)	P (kg/m)	A (cm ²)	Ix (cm ⁴)	mx (cm ³)	Ix moyen (cm ⁴)	Iy (cm ⁴)	my (cm ³)	J (cm ⁴)
HEM100	120	106	12	20	41,8	53,2	1143	190	1143	399	75	76,4
HEM120	140	126	12,5	21	52,1	66,4	2018	288	2018	703	112	105
HEM140	160	146	13	22	63,2	80,6	3291	411	3291	1144	157	140
HEM160	180	166	14	23	76,2	97,1	5098	566	5098	1759	212	184
HEM180	200	186	14,5	24	88,9	113,3	7483	748	7483	2580	277	234
HEM200	220	206	15	25	103	131,3	10642	967	10642	3651	354	292
HEM220	240	226	15,5	26	117	149,4	14605	1220	14605	5012	444	360
HEM240	270	248	18	32	157	199,6	24290	1800	24290	8153	657	727
HEM260	290	268	18	32,5	172	219,6	31310	2160	31310	10450	780	821
HEM280	310	288	18,5	33	189	240,2	39550	2550	39550	13160	914	927
HEM300C	320	305	16	29	177	225,1	40950	2560	40950	13740	901	665
HEM300	340	310	21	39	238	303,1	59200	3480	59200	19400	1252	1634
HEM320	359	309	21	40	245	312	68140	3800	68140	19710	1280	1756
HEM340	377	309	21	40	248	315,8	76370	4050	76370	19710	1280	1763
HEM360	395	308	21	40	250	318,8	84870	4300	84870	19520	1270	1764
HEM400	432	307	21	40	256	325,8	104100	4820	104100	19340	1260	1773

3.5.5. Pylônes Cylindro-Coniques

Ce genre de pylônes étant spécifique pour les projets Tramway, son utilisation dans les zones urbaines lui impose une forme esthétique particulière.



Figure 3.16 Pylône cylindro-conique

Classes	type d'acier	□ base (mm)	□ tête (mm)	épais (mm)	poids du mât (kg)
CCH1-400	S235	430	270	4	400
CCH1-800	S235	430	270	5	510
CCH1-1200	S235	430	270	8	765
CCH1-1600	S235	430	270	10	935
CCH1-2400	S235	430	270	14,04	1385
CCH1-3200	S235	430	270	24,5	2360
CCH2-800	S235	430	240	6	670
CCH2-1200	S235	430	240	10	1055
CCH2-1600	S235	430	240	13,19	1460
CCH2-2400	S235	430	240	21,85	2430
CCH2-3200	S235	430	240	26,5	2965

Les dérivées de ces mâts se diffèrent par leurs diamètres de base et de tête.

3.5.6. Pylônes Multi-pan MP

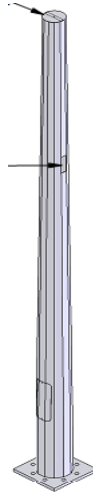


Figure 3.17 Pylône Multi-pan

Classes	type d'acier	f base/ang (mm)	f tête/ang (mm)	épais (mm)	pois du mât (kg)
MPH1-800	S355	510	310	4	490
MPH1-1200	S355	510	310	4	510
MPH1-1600	S355	510	310	5	615
MPH1-2400	S355	510	310	8	985
MPH1-3200	S355	510	310	10	1210
MPH2-800	S355	680	340	4	760
MPH2-1200	S355	680	340	4	790
MPH2-1600	S355	680	340	4	815
MPH2-2400	S355	680	340	6	1150
MPH2-3200	S355	680	340	8	1490

Voir détails poteaux cylindro-coniques et multi-pan dans (**Annexe 7**)

Conclusion

A travers les éléments présentés dans le chapitre 3, on peut cerner le cadre général du problème et on peut par la suite fixer les analyses à faire et les considérations à prendre. En fait, cela va permettre d'entamer l'étude des configurations dimensionnant les poteaux et qui définissent la forme géométrique de leurs structure. C'est ainsi dans le chapitre 4, j'entamerai l'étude et l'analyse des contraintes mécaniques agissant sur un pylône.