

## Chapitre 4 Etude et Analyse des contraintes mécaniques agissant sur un pylône

### **Introduction**

Après avoir présenté les bases et les hypothèses théoriques de calcul, dans ce chapitre je vais entamer l'étude de tout effet susceptible d'avoir un impact sur la stabilité du pylône et sur son bon fonctionnement. En effet, pour la détermination de la descente de charge, je vais faire l'étude des effets dont le pylône est soumis comme son poids propre, la charge de vent appliquée sur sa surface, et d'autre part modéliser et calculer les efforts appliqués par les autres composants assemblés sur le pylônes pour toutes les configurations possibles.

Cette analyse commence par une description des montages des pylônes pour les lignes ferroviaires et Tramway, voir les équipements qui ont un grand impact sur la stabilité globale du poteau et faire une modélisation des efforts appliqués et en extraire les différentes sollicitations dont le pylône est soumis.

L'analyse de l'effet de vent est basée sur les hypothèses que j'ai citées dans le chapitre 3 et qui proviennent des normes NV65. Les pressions utilisées sont corrigées en les multipliant par les différents coefficients qui tiennent compte de la nature du site, et les dimensions du pylône. Dans ce travail et comme cité dans le chapitre III, je vais traiter l'effet de vent en considérant deux cas, vent soufflant parallèlement aux voies et l'autre cas quand il est perpendiculaire aux voies.

Les flèches en tête des pylônes vont être calculé pour chaque effet de chargement et à la fin sommer pour avoir la flèche totale.

Les calculs des moments de chaque chargement vont être ramenés à l'encastrement des pylônes.

Les équipements traités sont ceux dont l'impact sur le pylône est prépondérant, ces éléments sont :

Les armements, les câbles d'alimentation, les appareils tendeurs...

## 4.1. Etude des montages mécaniques des lignes électriques de voies ferrées

### 4.1.1. Construction de la ligne aérienne de contact (LAC)

Comme tous les appareils qui concourent à la marche et à la sécurité des trains : voies, signaux, etc. la caténaire exige une grande rigueur d'appellation dans l'emploi des termes utilisés.

Avant de se lancer dans la reproduction de cet équipement, il est indispensable d'en connaître les caractéristiques techniques. Je vais décrire les principaux organes constituant une caténaire polygonale régularisée.

### 4.1.2. Principaux éléments constitutifs de LAC

#### 4.1.2.1. Caténaire

Les fils de la caténaire sont parcourus par une intensité moindre qu'en continu et peuvent être de section réduite. La caténaire est composée d'un câble porteur en bronze à l'étain et d'un fil de contact en cuivre électrolytique.

Le fil de contact (figure 4.1) possède deux rainures longitudinales permettant la fixation des pendules le reliant au porteur.

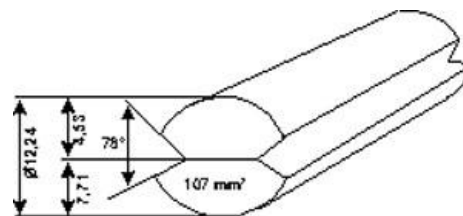


Figure 4.1 Fil de contact

Cette caténaire est maintenue au-dessus de la voie par les consoles, haubans et anti-balançant isolés fixés sur les poteaux. Les liaisons entre le poteaux et les isolateurs des consoles et haubans sont articulées. L'ensemble du dispositif de soutien, l'armement, peut bouger latéralement vers la droite ou vers la gauche. Les réglages sont étalonnés pour une température moyenne de 20°C.

#### 4.1.2.2. Armement (figure 4.2)

Constitué d'une console tubulaire en acier galvanisé de 38 ou 49 mm de diamètre. Elle est équipée d'un isolateur dont le pied est articulé sur le poteau. La console est soutenue par un hauban, tube d'acier de 28 mm de diamètre, lui aussi doté d'un isolateur articulé sur le poteau. Les isolateurs sont en porcelaine ou en verre.

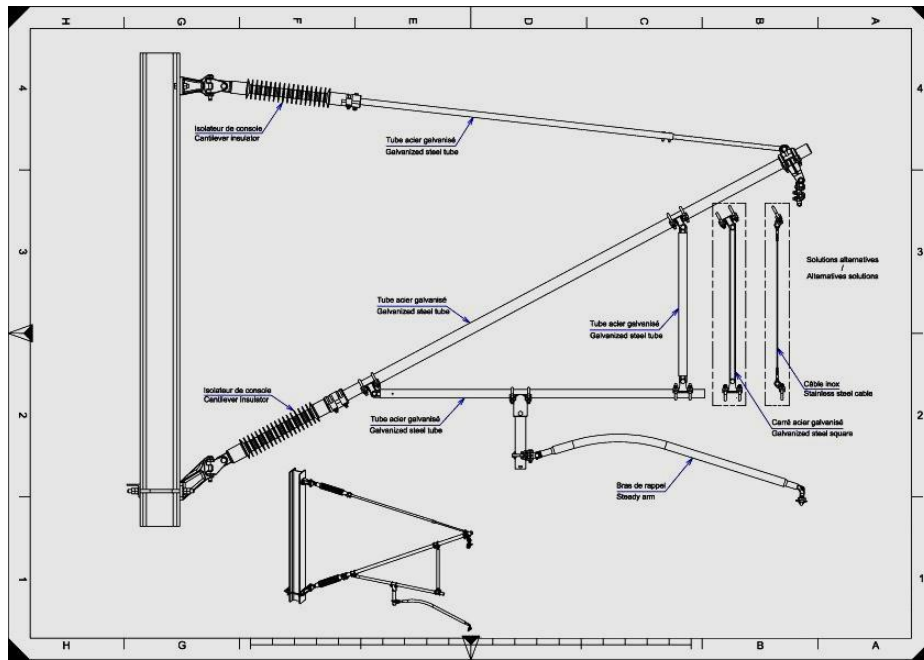


Figure 4.2 Armement pour ligne caténaire

Le câble porteur et le hauban sont fixés sur la console par un ensemble de ferrures (pièce d'attache + pince de suspension). Le fil de contact est maintenu par un bras articulé sur l'antibalançant. Cette pièce elle est aussi articulée sur la console et soutenue à l'horizontale par un fil de suspension. Au passage de l'archet du pantographe, le bras de rappel peut se soulever selon une amplitude limitée.

La caténaire est de type polygonal c'est-à-dire que le plan formé par le porteur, le fil de contact et les pendules restent sensiblement vertical ; les courbes de la voie sont suivies selon des segments de droites successifs.

#### 4.1.2.3. Désaxements des fils de contacts (figure 4.3)

En alignement, pour répartir l'usure des archets des pantographes, le fil de contact n'est pas rigoureusement rectiligne. Sa position oscille de + 200 mm à - 200 mm par rapport à l'axe de la voie. Ce désaxement est obtenu grâce à deux montages articulés, ces pièces ne sauraient être soumises à un effort de compression. C'est pourquoi, si l'on veut rapprocher le fil de contact du poteau, le bras de rappel est monté du côté de celui-ci. L'antibalançant est alors soumis à un effort de traction, ce montage est dit "en tension". Si l'on veut écarter le fil de

contact du poteau, le bras de rappel est monté à l'opposé du poteau et l'antibalançant est soumis à une compression, c'est un montage "en compression".

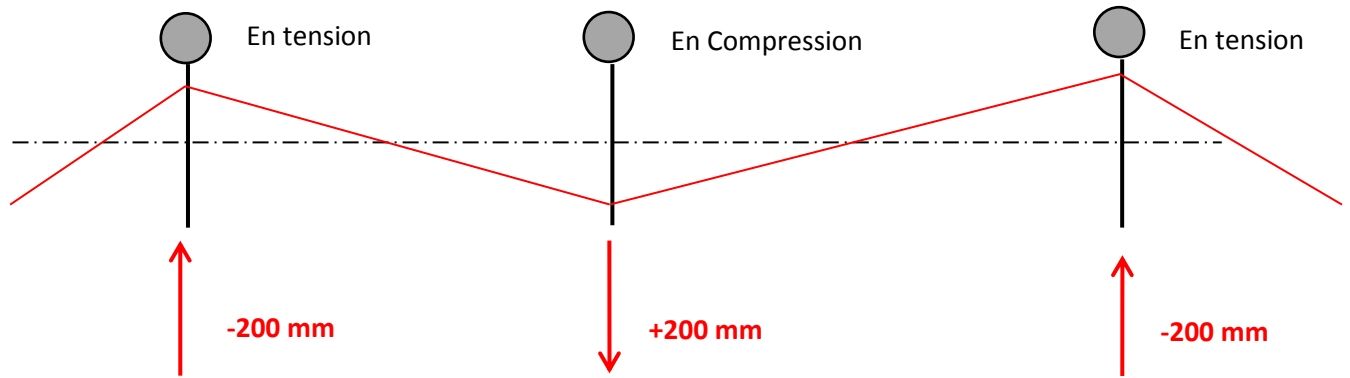


Figure 4.3 Principe de désaxement en alignement

En courbe (figure 4.4.), le désaxement du fil de contact est calculé en fonction du rayon, de façon à être en contact avec la partie active de la semelle du pantographe sans risque d'échappement vers le haut. Pour respecter les règles d'utilisation des bras de rappel, les poteaux situés à l'extérieur de la courbe sont équipés de montages en tension et ceux situés à l'intérieur reçoivent des montages en compression. En double voie, les montages des poteaux vis-à-vis sont décalés (un en traction, l'autre en compression) pour maintenir une distance de sécurité suffisante entre les supports caténaire.

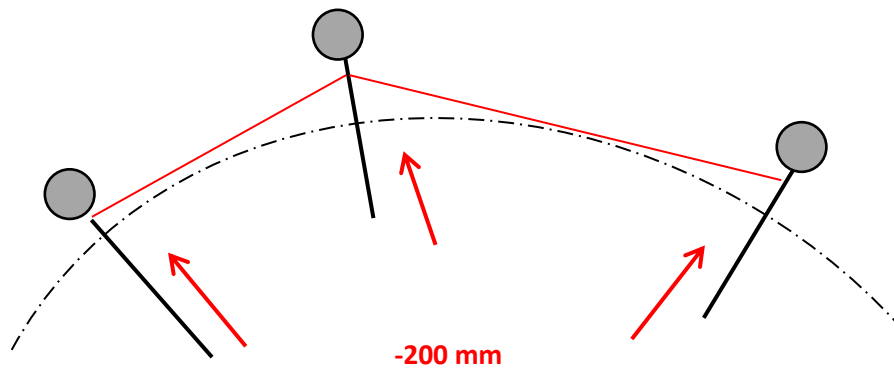


Figure 4.4 Principe de désaxement en courbe

#### 4.1.2.4. Les contres poids

L'élasticité de la caténaire dépend de sa tension mécanique. La longueur de pose entre deux ancrages peut atteindre 1400 mètres (figure 4.5) et il est évident que les variations de température entraînent des allongements et retraits importants. C'est une des raisons pour lesquelles les haubans et consoles ne sont pas fixés rigidement sur les poteaux.

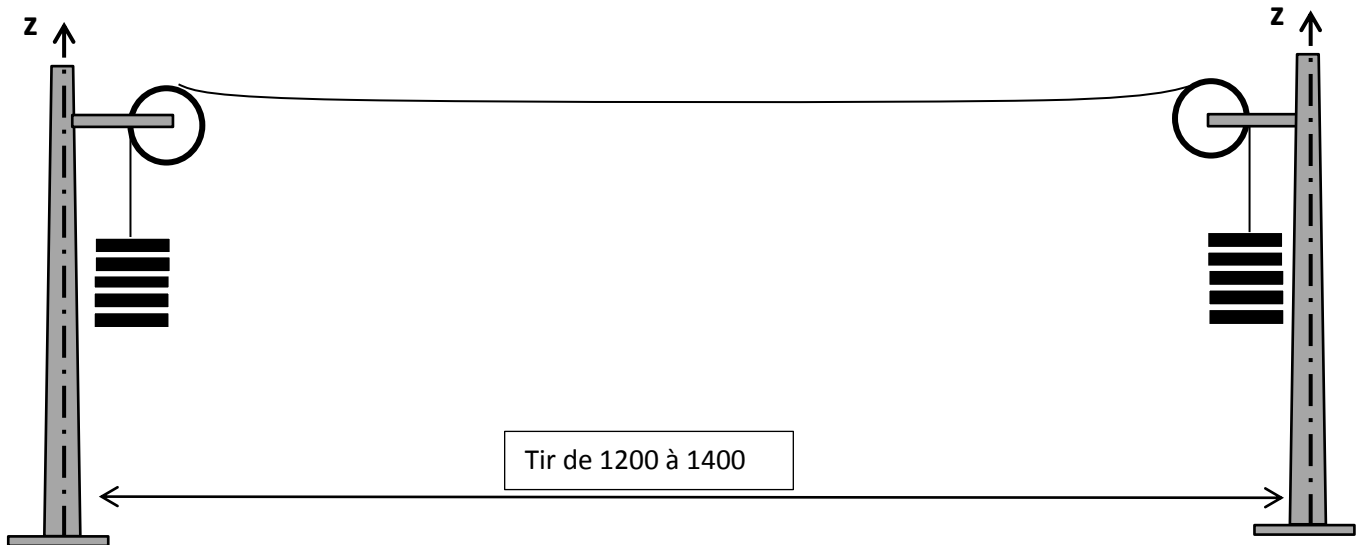


Figure 4.5 Principe de la régulation mécanique de la caténaire

Selon les cas, la caténaire est tendue à ses deux extrémités (cantons de pose longs) ou seulement à une seule (cantons de pose courts, inférieur à 700 m). Dans la majorité des cas et tout particulièrement sur les voies uniques parcourues par définition par des trains allant dans les deux sens, nous trouvons des cantons de pose à deux dispositifs tendeurs. La tension mécanique de la caténaire peut atteindre 2 000 kg.



Figure 4.6 Les contres poids

Leur point commun est de diviser la force de tension par 5 et limiter ainsi la masse des contrepoids à environ 400 kg.(figure 4.6)

Bien sûr, tout cela se complique lorsqu'il faut passer sous un tunnel ou sous des ouvrages à gabarit réduit. De multiples précautions doivent être prises pour éviter que des amorçages ne se forment entre la caténaire et son environnement. Il en va de même aux passages à niveau où le fil de contact doit rester à 1 mètre au-dessus du véhicule routier le plus haut.

A l'approche d'un passage à gabarit réduit, le fil de contact, normalement parallèle à la voie doit descendre progressivement d'une portée à l'autre. De 5,5 m en position normale, le fil peut s'abaisser à 4,70 m en 6 portées dont la longueur va en décroissant jusqu'à 27 m.

#### 4.1.2.5. Les pendules (figure 4.7)

Les pendules sont destinées à supporter le fil de contact à partir du câble porteur. Constitués de fil de cuivre ou de bronze de 5 mm de diamètre, leur longueur varie en fonction de la flèche du porteur, le fil de contact pouvant être considéré à peu près horizontal. Leur nombre varie selon la portée.

L'écartement standard entre deux pendules est de 9 mètres sauf près des poteaux. Le premier demi-intervalle mesuré depuis l'axe du poteau est de 2,25 m. Il est suivi par un intervalle de 6,75 m puis un autre dont la longueur peut varier de 9 m à 4,5 m.

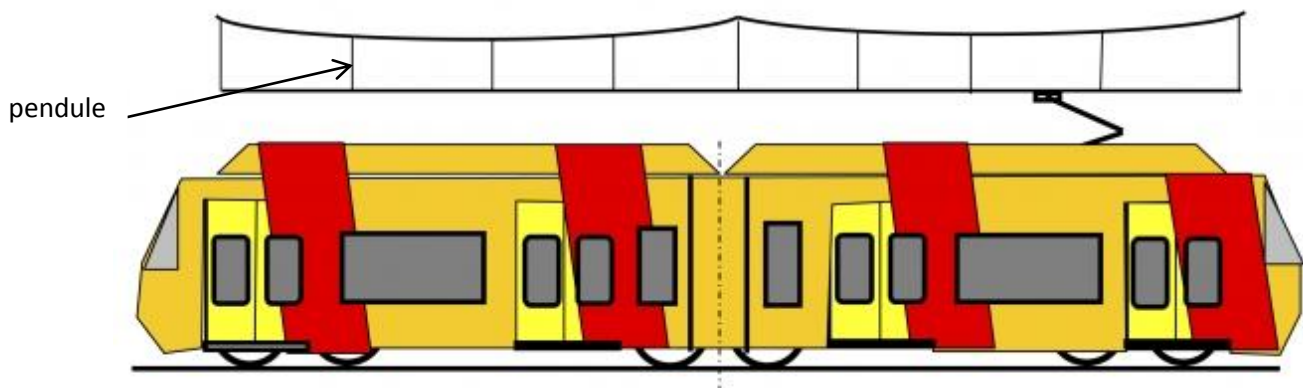


Figure 4.7 pendules

## 4.2. Montage du pylône

### 4.2.1. Montage Simple

Un montage simple (figure 4.8) est lorsqu'on assemble un seul armement sur le pylône

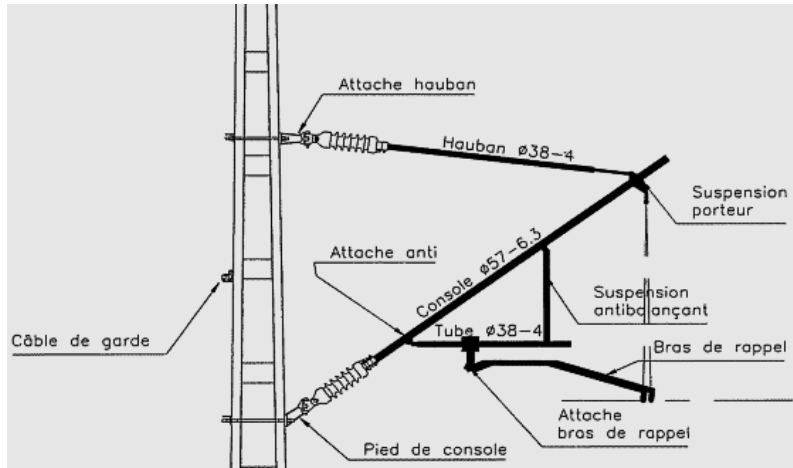


Figure 4.8 Montage simple d'armement

Selon le sens de la tension radiale  $T_r$  exercée par la caténaire sur l'antibalançant de types de montage (figure 4.9) qui dérive du montage simple à considérer :

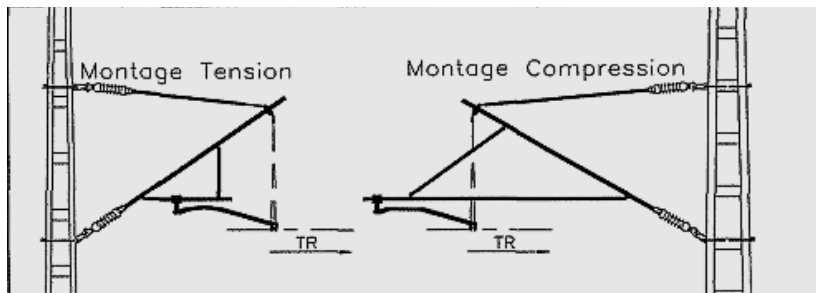


Figure 4.9 Cas de montage (tension, compression)

#### 4.2.2. Montage double

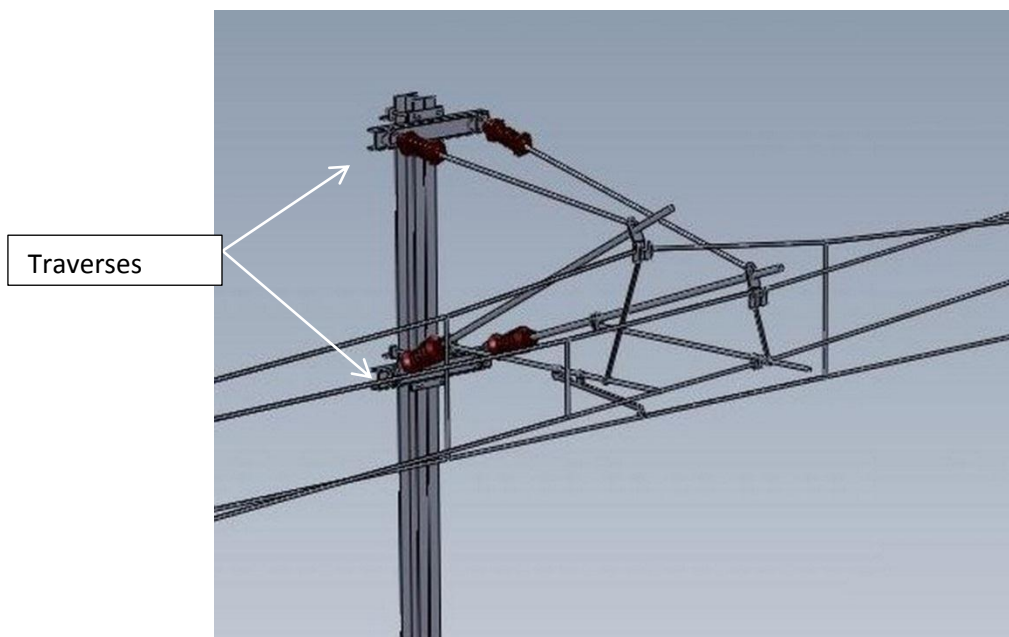


Figure 4.10 Montage double

Les armements sont placés côte à côte sur deux traverses placées perpendiculairement au poteau, au droit des points de fixation des consoles et haubans.(figure 4.10)

Il se peut que le nombre d'armement monté sur le pylône augmente, par exemple dans le cas d'aiguillage on peut avoir trois armements montés sur une traverse longue.

### 4.2.3. Cas de figures typiques de montage

#### 4.2.3.1.L'anticheminement (figure 4.11)

Lors du passage d'un engin électrique, il se produit un frottement entre l'archet du pantographe et le fil de contact qui a pour conséquence de tirer la caténaire dans le sens de marche du train. Pour éviter que l'ensemble de la caténaire ne se déplace vers l'un ou l'autre contrepoids, un point d'ancrage assure "l'anticheminement". Il est placé au milieu de la distance séparant deux appareils tendeurs successifs.

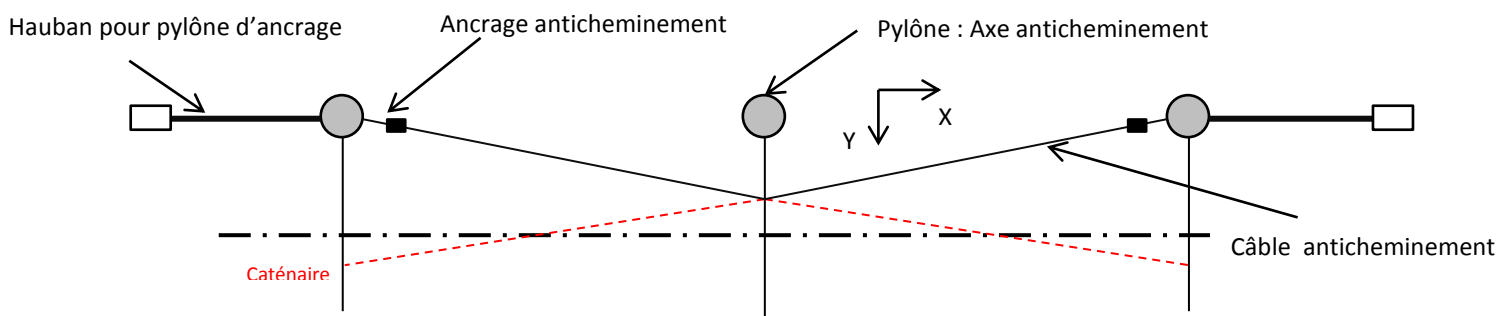


Figure 4.11 Schéma de montage d'un anticheminement

La console du pylône d'axe d'anticheminement est immobilisée au moyen d'un câble ancré aux deux supports encadrant. Ce câble appelé câble d'anticheminement est fixé dans la pince à deux gorges de suspension du porteur (figure 4.12)

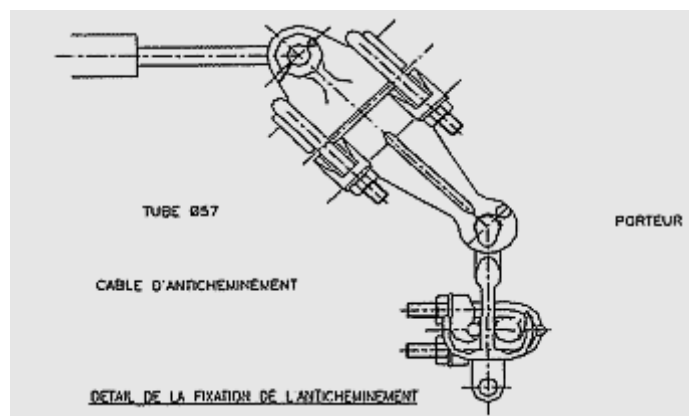


Figure 4.12 Pince de fixation du câble anticheminement



#### 4.2.3.2. Chevauchement (figure 4.13)

Un équipement tendeur peut être réparti sur quatre poteaux. Le premier poteau d'ancrage possède un appareil tendeur. La caténaire y est reliée par un isolateur suivi d'un balancier répartissant l'effort de traction entre le porteur et le fil de contact. Le poteau intermédiaire n°1 est doté d'un double armement (console + hauban + antibalançant). L'armement de la partie de caténaire devant se terminer est complet alors que celui de celle qui commence est plus étroit et ne possède pas de bras de rappel. La caténaire "naissante", moins haute que l'autre peut passer à l'intérieur. Les fils se croisent sans se toucher. La situation est inverse au poteau intermédiaire n°2. La caténaire se terminant devient moins haute et s'écarte légèrement en direction du deuxième porteur d'ancrage. La continuité de captage électrique est assurée par ce double mouvement d'une caténaire "nouvelle" allant en descendant légèrement alors que "l'ancienne" commence à remonter. A un moment donné, l'archet peut frotter sur les deux fils de contact en même temps.

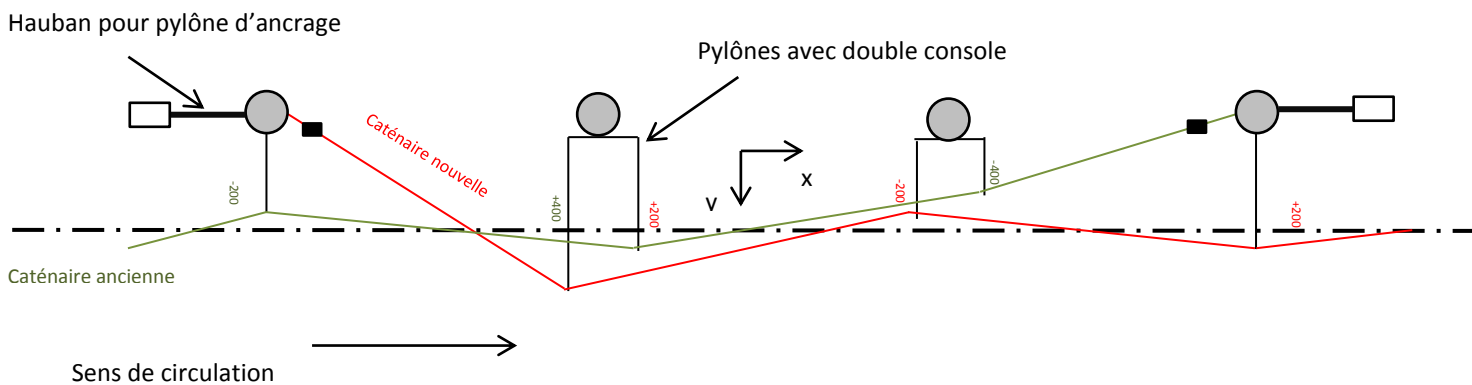


Figure 4.13 Principe de montage d'un chevauchement

De part et d'autre du support d'axe, les conducteurs de chaque caténaire sont relevés sur les poteaux intermédiaires puis réunis par un palonnier. Ce palonnier est placé après la console de relèvement.

#### 4.2.3.3. Sectionnement

Un équipement tendeur réalise une coupure mécanique entre deux cantons de pose. Pour des raisons d'exploitation, de maintenance et pour limiter les conséquences d'incidents, il est nécessaire de séparer électriquement les secteurs tout en assurant le passage du pantographe. Un tel appareillage ressemble en plus compliqué à un équipement tendeur.

Le sectionnement est parfois réparti sur 5 poteaux, celui du milieu portant un sectionneur dont la commande est généralement effectuée sur place.

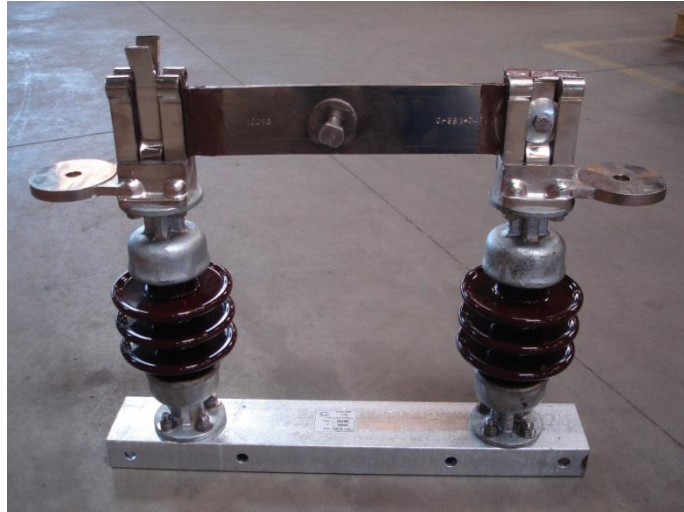


Figure 4.14 Interrupteur

Pour interrompre la continuité électrique, les tronçons de caténares sont isolés électriquement par des dispositifs (simple lame d'air) ou isolateur (figure 4.15) dont la forme varie en fonction de la vitesse de franchissement.

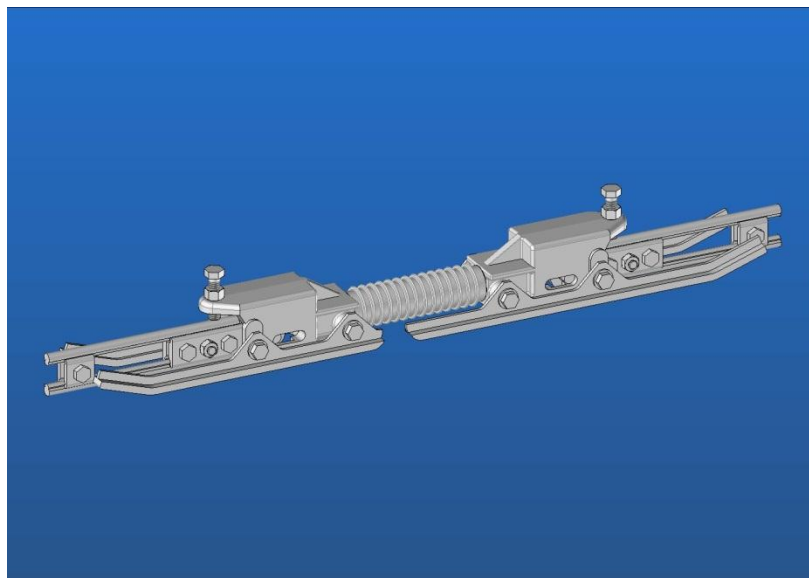


Figure 4.15 Isolateur de section

#### 4.2.3.4. Aiguillage

Les poteaux situés sensiblement au niveau des cœurs d'aiguilles doivent supporter deux lignes de contact. Le pantographe frotte sur deux fils de contact jusqu'au moment où les deux caténares se séparent. Pour cela, les deux armements sont dotés de bras de rappel et les deux antibalançants sont sensiblement au même niveau. Il arrive même que plusieurs aiguilles se suivent et il devient nécessaire de monter trois armements sur le même poteau.

### 4.3. Modélisation et calcul des chargements agissants sur un pylône

#### 4.3.1. Charges permanentes

Le chargement vertical global dû au poids, comprend le poids maximum du support, de l'armement, des fils de la caténaire.

##### 4.3.1.1. Poids Propre du pylône

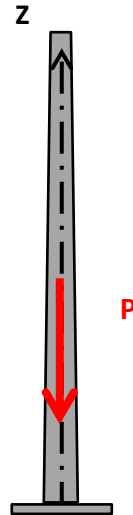


Figure 4.16 Charge de poids du poteau

Le poids propre de chaque poteau s'ajoute aux efforts verticaux selon Z et se calcul en daN

Avec :

$$P = M * g$$

M Est la masse totale du mât (1 Kg=0,981 daN)

g La gravité

Le poids est appliqué pour chaque pylône dans son centre de gravité.

##### 4.3.1.2. Poids des équipements

###### a) Poids des armements

Ces éléments qu'on utilise pour la suspension des câbles engendrent des charges par leurs poids qui s'ajoutent aux charges verticaux appliquées sur le pylône. Cependant, vue leur emplacement par rapport à l'axe vertical Z, ces composants génèrent des moments de flexion importants sur le poteau.

*Modélisation des efforts appliqués par le poids des pièces constituant l'armement sur le pylône :*

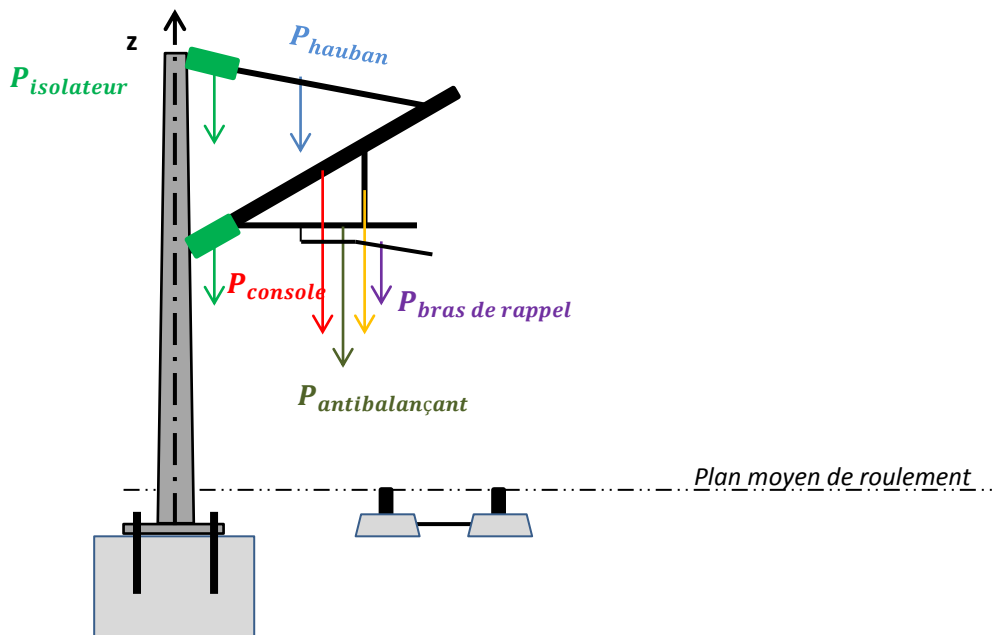


Figure 4.17 Charge de poids des éléments de l'armement

- ✓ Calcul géométrique pour chercher le point d'application du poids de l'armement sur le pylône.

Pour une ligne électrique type caténaire, Cegelec déploie un type spécifique d'armement pour une caténaire polygonale. (Pour montage Tension et Compression)

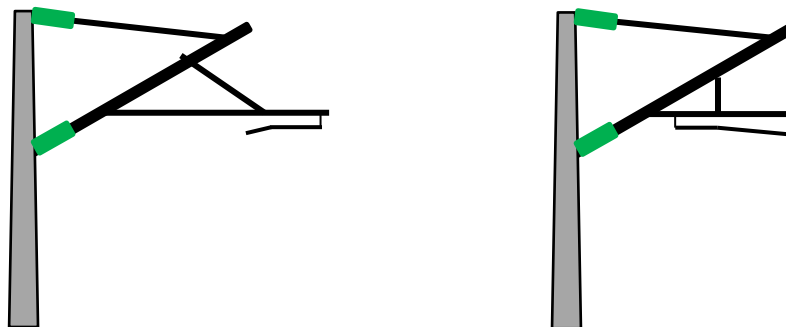


Figure 4.18 Types d'armements

Le problème dans les calculs réside dans la recherche du point d'application géométrique du poids de l'armement pour les deux cas. Cela nécessite un calcul géométrique de la forme des armements. Dès lors le recours aux outils informatiques est une solution idéale pour ce type de problème. C'est ainsi AutoCad permet d'offrir cette tâche avec un module de calcul de centre de gravité des contours.

La commande INF-CENTRO permet de déterminer le barycentre de la forme géométrique de l'armement (figure 4.19 et figure 4.20)

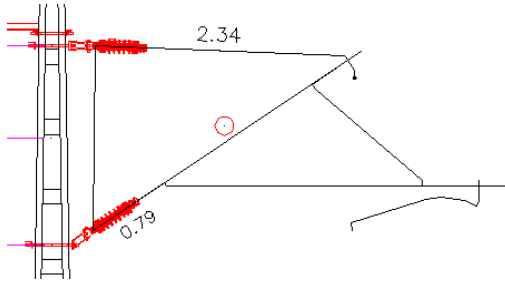


Figure 4.19 Centre de gravité pour montage compression

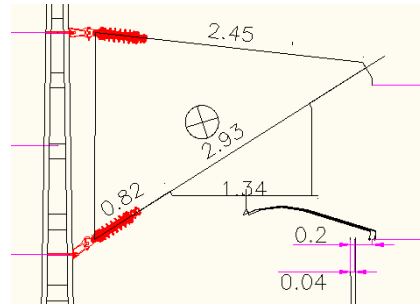


Figure 4.20 Centre de gravité pour montage tension

Calcul de l'effort axial sur le pylône :

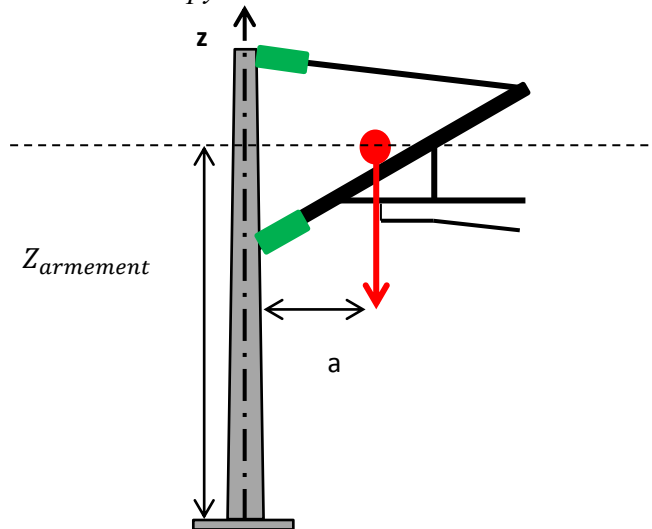


Figure 4.21 Modélisation de l'effort de poids de l'armement

Le poids de l'armement que j'ai approché par le poids de la console peut être ramené sur l'axe vertical du poteau (l'axe Z). Cet effort doit être ajouté au poids propre du poteau.

$$P_{armement} = (M_{console} + M_{Bras\ de\ rapel} + M_{Hauban} + M_{Isolateurs}) * g$$

Calcul du moment autour de Y engendré par le poids de l'armement :

Le moment appliqué à l'encastrement s'écrit

$$M_{armement} = P_{armement} * a$$

**b) Poids des câbles caténaire**

Pour le cas des chemins ferroviaires, les supports des caténaires doivent faire la suspension de deux câbles, un câble porteur et les fils de contact. Pour les lignes de tramway le calcul d'impact du poids des câbles sur le pylône se base sur le même principe que je vais citer ci-après.

On considère que le poids linéique du câble porteur est uniformément réparti sur tous les points du câble.

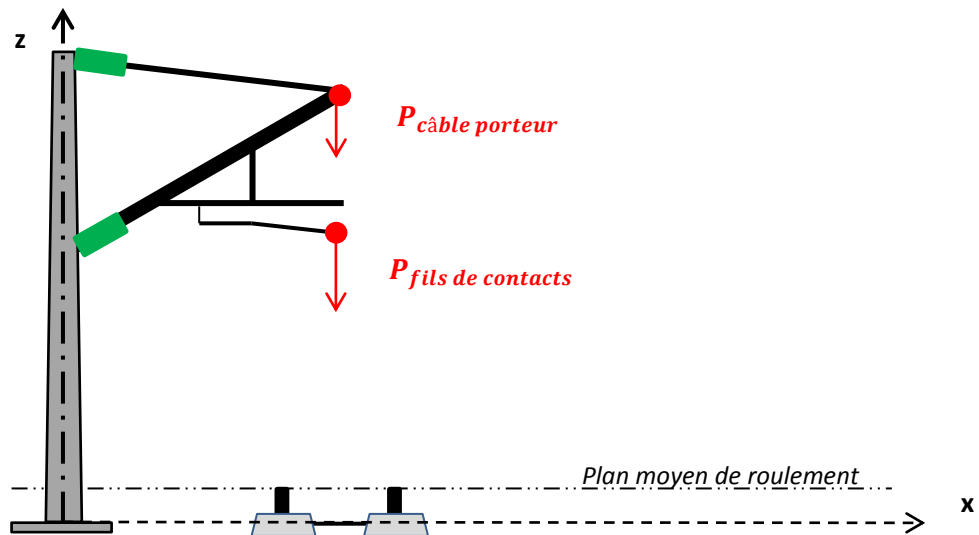


Figure 4.22 Charges de poids des câbles

Soit le poteau à calculer (figure 4.23) entre deux autres poteaux dont les portées sont  $a_1$  et  $a_2$ . L'uniformité de la répartition du poids linéique implique que au point de suspension, le poteau n'est soumis qu'à la charge du poids engendrée par la moitié du câble des deux côtés :

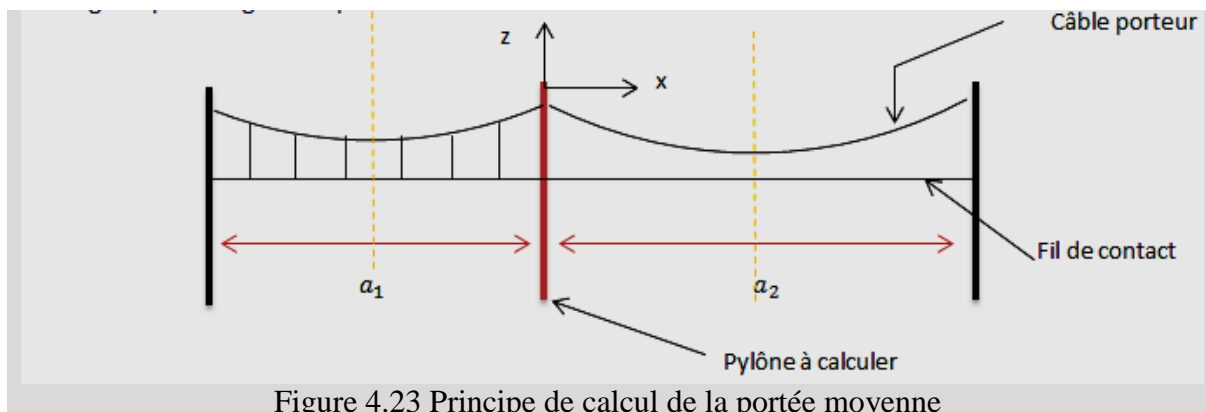


Figure 4.23 Principe de calcul de la portée moyenne

Calcul de l'effort axial sur le pylône

On définit la portée moyenne la valeur :

$$a = \frac{a_1 + a_2}{2}$$

Alors l'effort dû au poids du câble porteur (cp) appliqué sur le poteau au point de suspension et selon l'axe z est :

$$\begin{aligned} P_{\text{câble porteur}} &= a \times (\text{Poids linéaire câble porteur}) = a \times P_L \text{ (en Kg)} \\ &= 0,981 \times a \times P_{L, cp} \text{ (en daN)} \end{aligned}$$

Même chose pour les fils de contact (fc):

$$P_{\text{fils de contact}} = 0,981 \times a \times P_{L, fc} \text{ (en daN)}$$

Les poids linéiques et les caractéristiques des câbles sont dans présentés dans le tableau 3.1 du chapitre 3.

Les deux poids appliqués aux points de suspension peuvent être ajouté aux charges verticales appliquées selon Z sur le pylône.

Calcul du moment autour de Y engendré par le poids des câbles sur le pylône :

De la même façon le moment de flexion appliqué à l'encastrement est donné par :

$$M_{\text{câbles}} = P_{\text{câbles}} * c$$

**c) Poids des appareils tendeurs (avec des contre poids figure 4.24)**

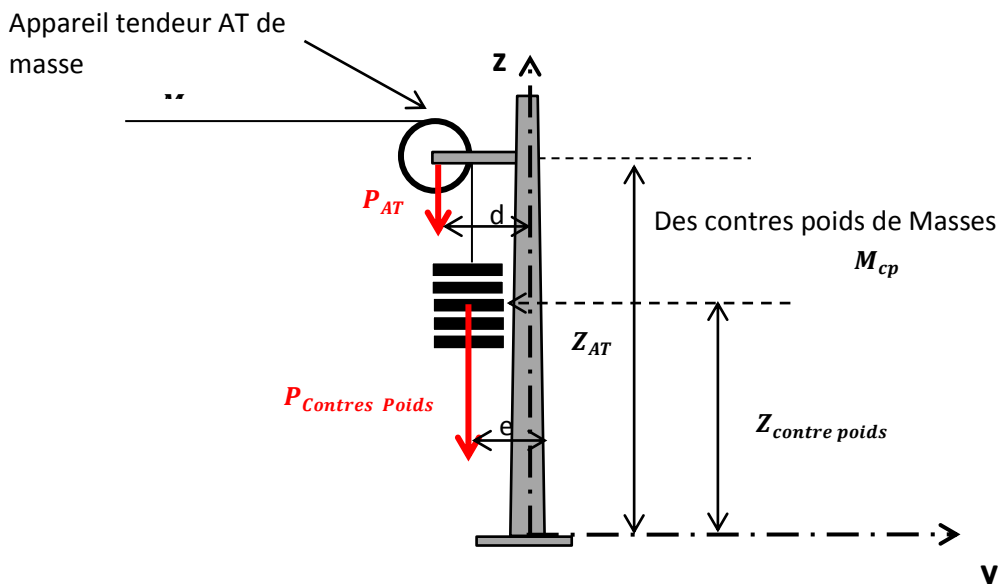


Figure 4.24 Modélisation de la charge DES APPAREILS TENDEURS

Calcul de l'effort axial sur le pylône

Les poids de l'appareil tendeur et des contres poids s'ajoutent directement aux charges verticales agissant sur le pylône.

Calcul du moment à l'encastrement autour de l'axe X engendré par l'effort du poids

$$M_{total} = P_{AT} * d + P_{contres\ poids} * e$$

Calcul de la flèche en tête

$$f_{max} = P_{AT} * d * \frac{z_{AT}^2}{2 * E * I_x} + P_{contres\ poids} * d * \frac{z_{contres\ poids}^2}{2 * E * I_x}$$

**d) Poids câble de protection aérienne CDPA (figure 4.25)**

Le principe de calcul de l'effet du poids du câble de protection aérien est le même principe de calcul des poids des câbles conducteurs.

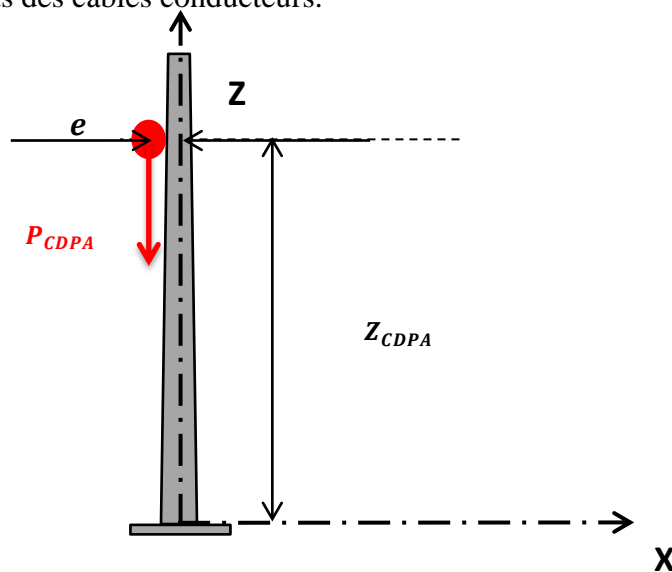


Figure 4.25 Modélisation de la charge du poids du CDPA

Pour le câble de protection, on possède comme caractéristique mécanique le poids par mètre linéaire  $P_{L,cdpa}$  on aura la même méthode de calcul que celle utilisé dans les calculs de l'effet du poids du câble porteur et du fil de contact

$$P_{cdpa} = P_{L,cdpa} * a$$

Avec : a la portée moyenne du cdpa.



L'effort du poids du cdpa s'ajoute directement aux chargements axiaux appliqués sur le pylône.

*Moment résultant à l'encastrement :*

$$M = P_{L,cdpa} * a * e$$

#### e) Poids des autres éléments équipant le pylône :

Le montage du pylône dans la ligne ferroviaire ou tramway dépend du rôle que va jouer le poteau dans une position donnée. L'ajout des équipements sur le mât nécessite de prendre en considération leurs poids et leur effet dans les notes de calcul, puisque il y'a toujours des sollicitations qui s'ajoutent et qui agissent sur la stabilité de toute la structure.

A chaque fois le montage implique un élément à employer et à installer sur le mât, les notes de calcul doit en tenir compte, en précisant ses caractéristiques mécaniques et géométriques afin de l'intégrer dans le calcul total de la structure du poteau.

#### 4.3.2. Effets de vent

Les effets du vent sur les lignes aériennes de traction électrique et leurs structures font partie des calculs de l'effet du vent sur les structures métalliques dans la norme NV65.

Bien que l'ensemble du projet se situe dans une région considérée comme une zone à haute pression de vent, les pressions à adopter sont celles d'une zone à vent fort

Deux hypothèses sont à considérer :

Hypothèse A : à la température moyenne de +20°C avec vent normal

Hypothèse B : à la température minimum de -10°C avec vent réduit

Dans le cas de mon projet, la ligne de contact est régularisée ou non régularisée selon le tracé. Les hypothèses A et B seront toujours prises en compte pour déterminer le cas de charges le plus défavorable.

Les efforts de vent, soufflant perpendiculairement et parallèlement aux voies sur les éléments constitutifs de la ligne, sont résumés dans les tableaux Excel dans le chapitre 6

##### 4.3.2.1. Les cas de charges

Chaque poteau sera dimensionné sous le cas de charges le plus défavorable des différentes combinaisons suivantes :

- ✓ Hypothèse A - A la température de +20°C

- ❖ Vent soufflant perpendiculairement aux voies
- Poids et charges permanentes (tensions avec vent, à +20°C) + vent soufflant perpendiculairement aux voies
- ❖ Vent soufflant parallèlement aux voies
- Poids et charges permanentes (tensions sans vent, à +20°C) + vent soufflant parallèlement aux voies.
- ✓ **Hypothèse B** - A la température de -10°C
  - ❖ Vent soufflant perpendiculairement aux voies
  - Poids et charges permanentes (tensions avec vent, à -10°C) + vent soufflant perpendiculairement aux voies.
  - ❖ Vent soufflant parallèlement aux voies
  - Poids et charges permanentes (tensions sans vent, à -10°C) + vent soufflant parallèlement aux voies.

En réalité, dans la grande majorité des cas, l'hypothèse A sera dimensionnante. En effet, puisque les lignes de contact sont majoritairement régularisées, leur tension mécanique est maintenue quasiment constante. Il est alors évident que les cas de charges prenant en compte les pressions de vent les plus élevées sont les plus défavorables

#### 4.3.2.2. Effet de vent sur le pylône

La nature et le profil du pylône sont déterminants de l'intensité de la force de vent. Pour une pression  $P$ , on détermine d'abord tous les coefficients de correction nécessaire pour la correction de la pression dynamique.

La force de pression résultante est alors dépendante de la surface du maître-couple de la partie du pylône exposée à la direction de soufflement du vent. La répartition de la pression (figure 4.26) par unité de surface est supposée uniforme le long du poteau. Et qu'elle est toujours dans le plan horizontal parallèlement au plan XY

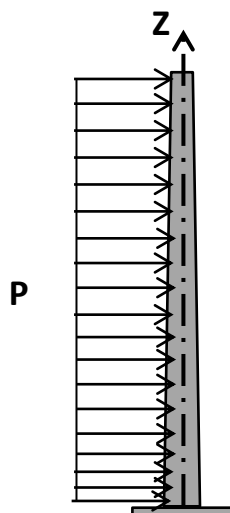


Figure 4.26 répartition de la charge du vent

Pour le calcul de l'effet de vent sur les pylônes je considère les profils des pylônes que j'ai cités dans le chapitre 3.

Les poteaux H, X, Z, Cylindro-coniques et les multi-pans.

La force résultante (figure 4.28) appliquée se déduit directement par la multiplication de la pression du vent par la surface du maître-coupe.

Je vais considérer les deux cas de charges du vent, cas où il souffle parallèlement aux voies (suivant Y) et l'autre cas quand il souffle perpendiculairement aux voies (suivant X)

Soit le pylône à dimensionner de hauteur H

Et **b** la largeur de à mi-hauteur de la surface du maître-couple exposée à la direction du vent parallèle aux voies et **a** la largeur à mi-hauteur de la section du maître-couple exposé à la direction du vent soufflant perpendiculairement aux voies

- Si le vent est parallèle aux voies alors la force de pression résultante est

$$F = P_{\text{corrigée}} * b * h$$

- Si le vent est perpendiculaire aux voies alors la force de pression résultante est

$$F = P_{\text{corrigée}} * a * h$$

Avec  $P_{\text{corrigée}} = C_{\text{global}} * P$

Et  $C_{\text{global}} = C_{\text{trainée}} * K_s * \delta * \beta$

Les détails au chapitre 3

Le point d'application de cette force se situe à mi-hauteur

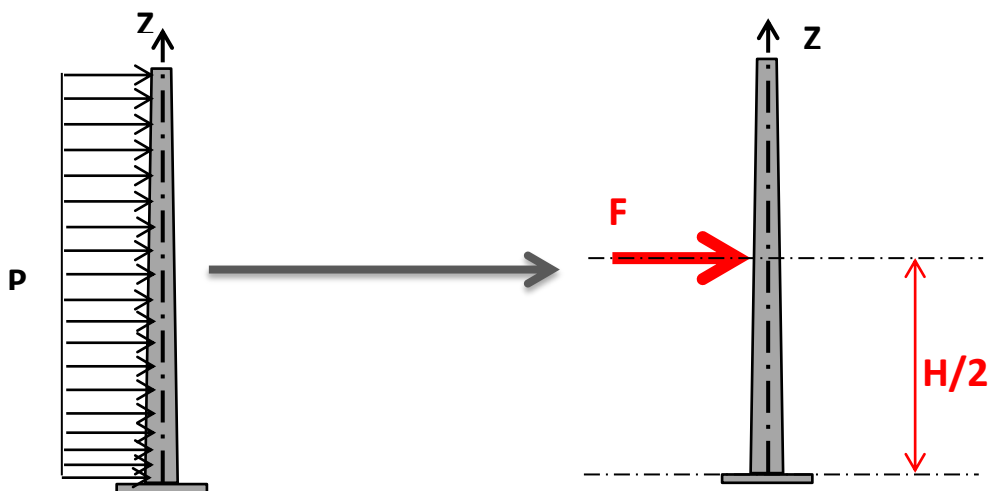


Figure 4.27 répartition de la charge du vent

Figure 4.28 Résultante de la charge du vent

Moment à l'encastrement engendré par l'effet de vent :

$$M_{vent \text{ à l'encastrement}} = \frac{F * H}{2}$$

Calcul de la flèche en tête du pylône pour une direction de vent parallèle aux voies (suivant Y) :

$$f_{max} = \frac{5 * F * H^2}{24 * E * I_x}$$

Calcul de la flèche en tête du pylône si vent souffle perpendiculairement aux voies (suivant X)

$$f_{max} = \frac{5 * F * H^2}{24 * E * I_y}$$

Avec  $I_x$  et  $I_y$  les moments d'inertie moyens calculés à mi-hauteur du pylône.

Les bases de calcul des flèches sont présentées dans l'annexe 8

#### 4.3.2.3.Effet de vent sur les câbles (figure 4.29)

Un seul cas à envisager pour les câbles, c'est le cas où le vent souffle perpendiculairement aux voies. On considère que cet effet est nul dans les directions parallèles des voies et n'a aucun impact sur la structure du support.

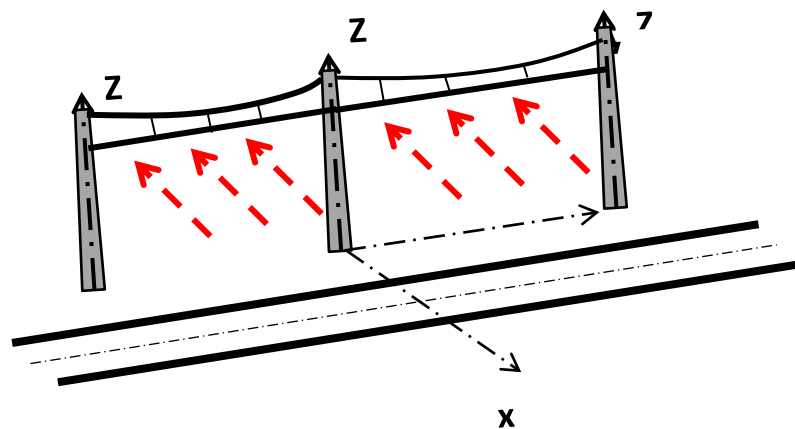


Figure 4.29 Charge du vent à considérer pour les câbles

Le coefficient de correction global relatif aux câbles est de l'ordre de 1,2 .En effet, soit q la pression dynamique du vent soufflant perpendiculairement aux fils de diamètre d.

On a :

$$d * \sqrt{q} < 0,5 \text{ D'après le tableau du chapitre 3 ce qui donne } C_t = 1,2$$

Ainsi la force appliquée sur le pylône dû à l'effet du vent sur les câbles s'écrit :

$$F = p * d * a$$

Avec

p: la pression du vent corrigée

d :Le diamètre des câbles conducteurs

a : est la portée moyenne

F est compté positivement dans le sens pylône-Voies et négativement s'il souffle dans le sens voies-pylône

Cette formule est valable pour toute sorte de câble installé dans la ligne de traction aérienne (LAC)

#### **4.3.2.4.L'effet de vent sur les divers équipements constitutifs**

Pour les équipements qu'on monte sur le pylône, on peut faire des calculs selon la géométrie de chaque élément. Aussi il faut envisager tous les cas de charge possible du vent et son orientation vis-à-vis la position de l'équipement sur le pylône.

On a les cas particuliers suivants :

- ✓ Effet nul sur la console et armement si le vent est perpendiculaire aux voies
- ✓ Effet nul sur les traverses si le vent souffle parallèlement aux voies
- ✓ Effet nul sur les appareils tendeurs si vent parallèle aux voies

#### **4.3.3. Charges d'exploitations**

##### **4.3.3.1.Les tensions mécaniques des câbles (efforts radiales Tr) Cas pylône de suspension (figure 4.30)**

Le calcul de la tension mécanique à laquelle sont soumis les conducteurs dans diverses hypothèses est nécessaire lors de l'établissement d'un projet de ligne aérienne de contact

En effet la détermination des efforts transmis aux divers éléments de la caténaire doit être telle que les règles de l'art de la caténaire soient respectées.

Le calcul des tensions mécaniques des conducteurs aux différentes températures est effectué en partant de l'équation de changement d'état. Les tableaux Excel dans le chapitre

6 qui récapitulent les tensions mécaniques des câbles pour les différentes températures sont basés sur ce principe de calcul que je ne vais pas entamer dans mon PFE.

Le désaxement (chapitre 3) des câbles conducteurs dans la ligne impose une forme particulière de l'effort appliqué résultant. En fait le pylône est soumis en amont et en aval aux tensions mécaniques des conducteurs. La résultante de ces tensions est radiale appliquée directement aux points de suspensions.

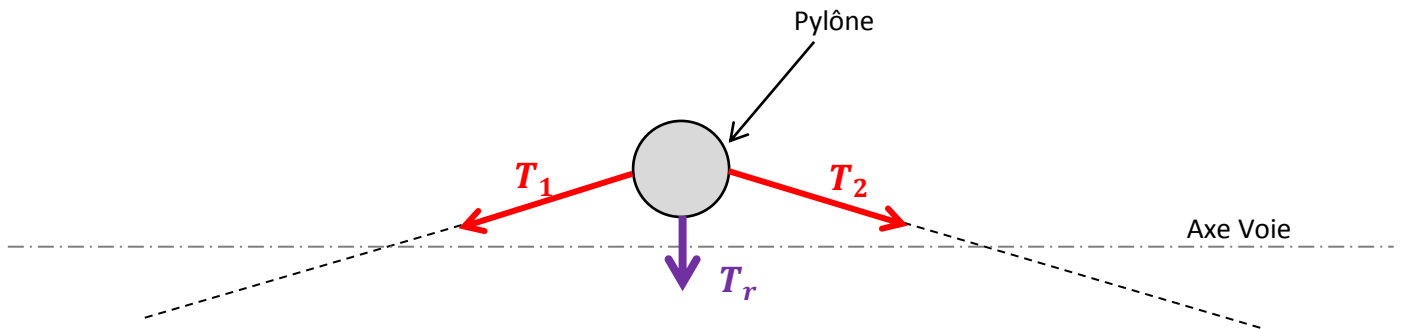


Figure 4.30 Tension mécanique des câbles

Les câbles étant régularisés à l'aide d'un système d'appareil tendeur on considère que :

$$T_1 = T_2 = T$$

Le calcul de la résultante  $T_r$  repose sur la notion de l'angle de déviation que j'explique dans ce schéma :

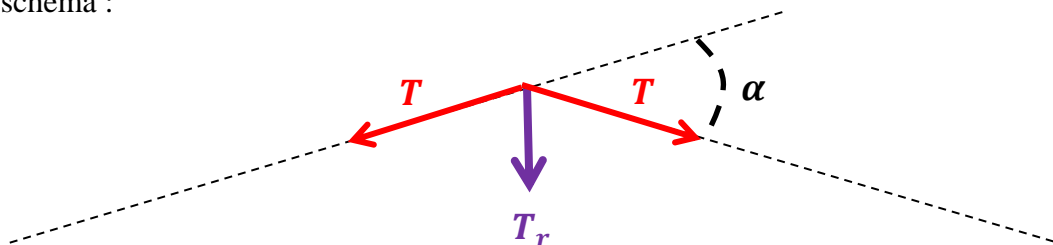


Figure 4.31 Principe de calcul de la Tension radiale

La formule de calcul de  $T_r$  est :

$$T_r = 2T \sin(\alpha) = K * T$$

Le calcul du coefficient K dépend de :

- Le désaxement des câbles en alignement et en courbe
  - Rayon de courbe topographique de la position du pylône
  - Les valeurs des portées en amont et en aval
- Les formules de calcul de K (figure 4.32 et 4.33)

En alignement

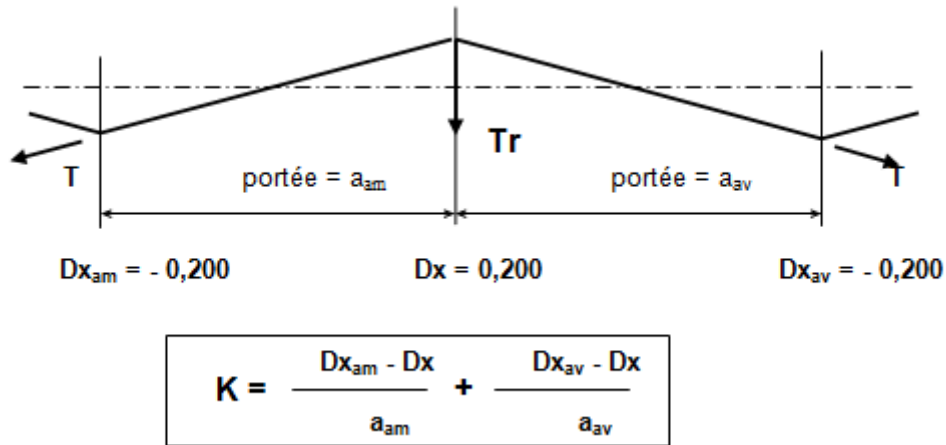


Figure 4.32 Schéma de calcul de la Tension radiale en alignement

En courbe

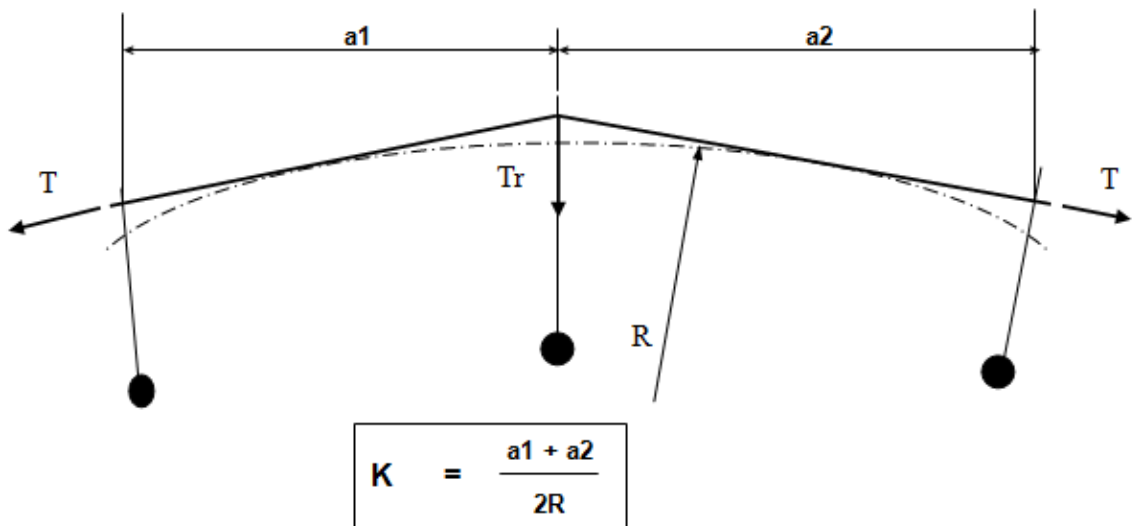


Figure 4.33 Principe de calcul de la Tension radiale en courbe

Modélisation de l'effort radial résultant des tensions mécaniques des câbles cas de montage en traction :

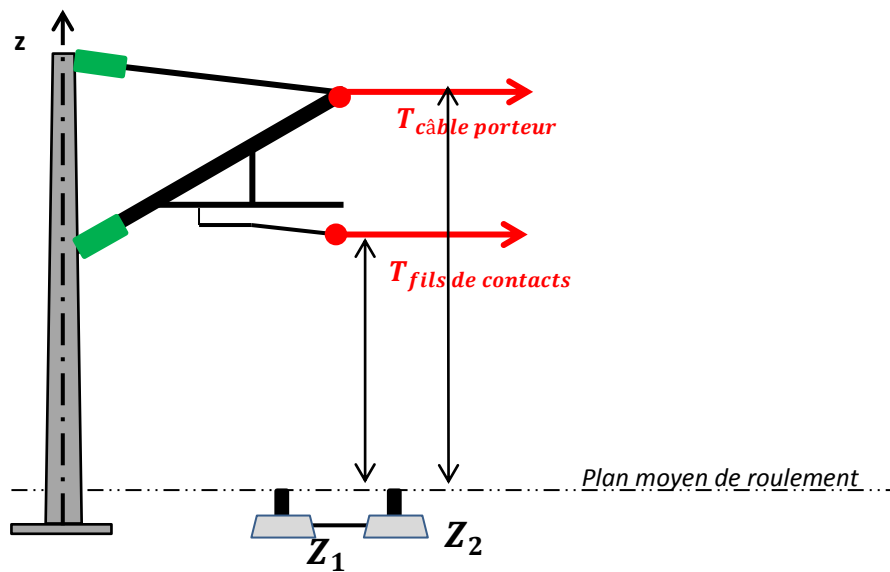


Figure 4.34 Modélisation effort radial pour montage tension

Pour un montage en compression :

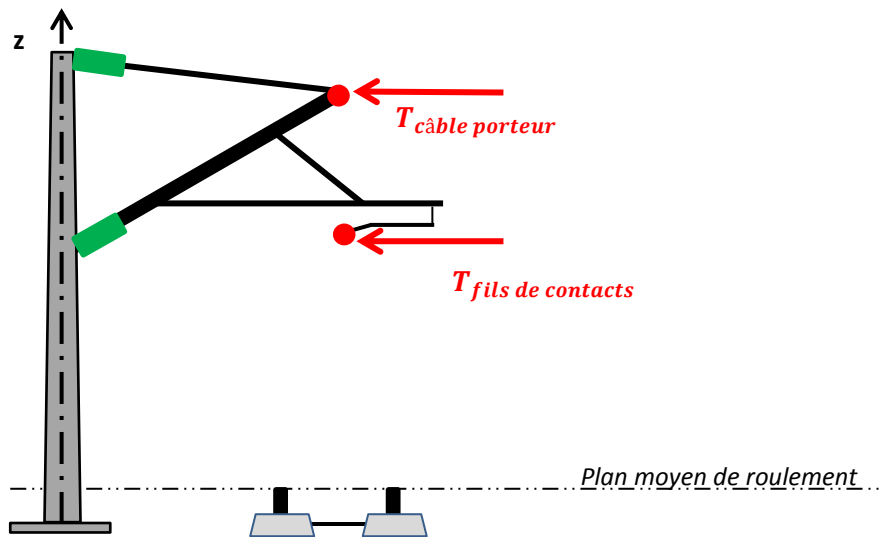


Figure 4.35 Modélisation effort radial pour montage compression

Les efforts radiaux des tensions mécaniques sont appliqués suivant l'axe X (perpendiculairement aux voies) (figure 4.35)

Calcul du moment à l'encastrement :



La résultante radiale de l'action de la tension mécanique d'un câble sur le pylône peut être ramenée à l'axe de ce dernier

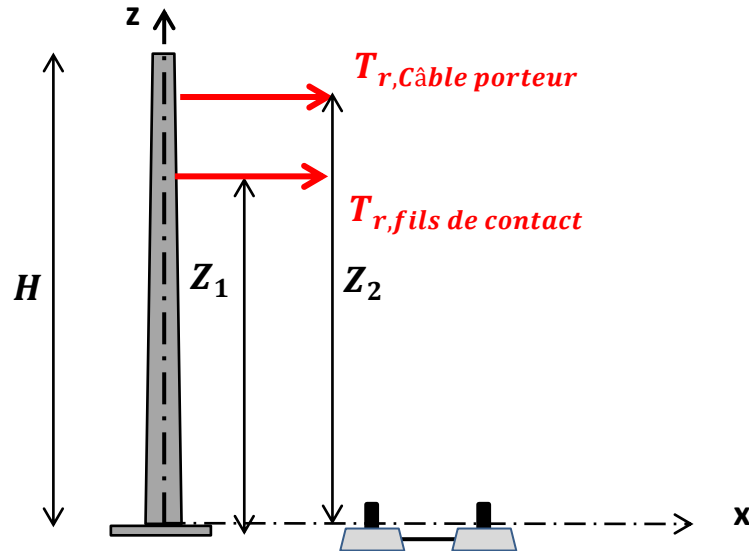


Figure 4.36 Modélisation effort radial appliqué sur le poteau

Ce qui donne pour le moment à l'encastrement la formule

$$M_{Tr} = T_r * Z$$

Calcul de la flèche en tête du pylône :

En se basant sur la formule à l'annexe 8 de calcul de la flèche maximale en tête on a l'expression suivante

$$f_{max} = \frac{T_r * Z^2}{E * I_y} * \left(\frac{H}{2} - \frac{Z}{6}\right)$$

#### 4.3.3.2. Les tensions mécaniques des câbles (efforts radiales Tr) Cas pylône d'ancrage

Dans le cas où le câble est ancré sur le pylône, pour une fin de tir de ce dernier que j'ai détaillé dans les parties précédentes. L'expression de l'effort radial change mais son orientation vis-à-vis le pylône est la même, selon le schéma suivant l'expression du coefficient K :

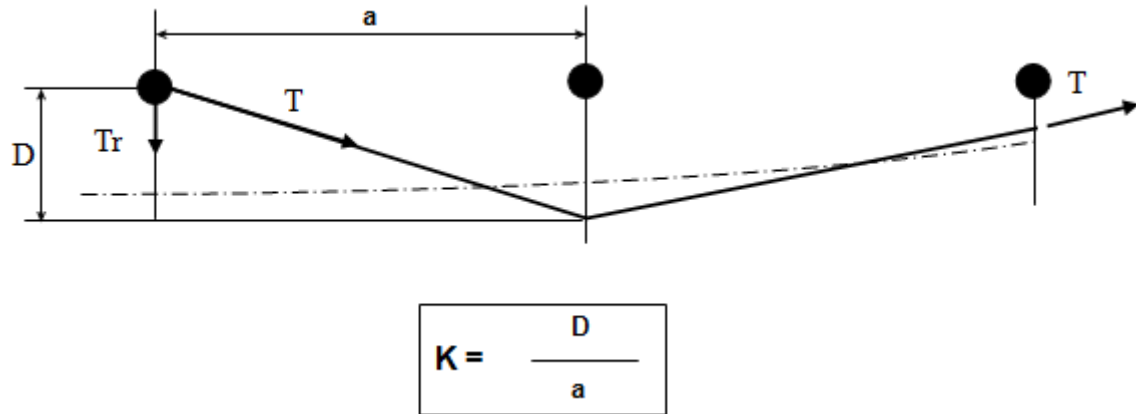


Figure 4.37 Méthode de calcul en cas d'ancrage

La tension mécanique  $T$  des câbles pour le cas d'ancrage est presque identique à celle utilisée dans le cas de suspension

Le calcul du moment engendré et la flèche en tête du pylône est le même que pour le cas de suspension.

#### 4.3.3.3. Calcul des pylônes haubanés (figure 4.38)

Les poteaux supportant les dispositifs d'ancrage sont maintenus par un hauban ancré dans la sol à l'aide d'un massif en béton enterré. Les fils doivent traverser la plate-forme et y être solidement attachés.

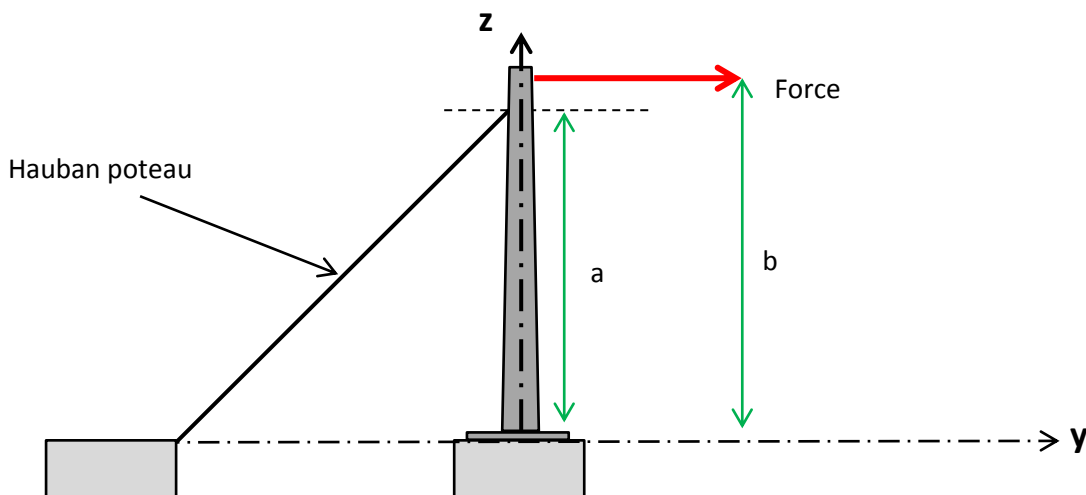


Figure 4.38 Schéma de principe d'ancrage poteau

Le modèle simplifié :

Considérons un poteau retenu par un hauban ancré dans le sol. Soit A le point d'ancrage du câble d'haubanage au sol, B le point où le poteau pénètre le sol et C le point de fixation du hauban au pylône.

Soit F un effort s'exerçant sur ce point de fixation. L'effort F peut se décomposer en deux forces,  $R_h$  et  $R_p$  (figure)

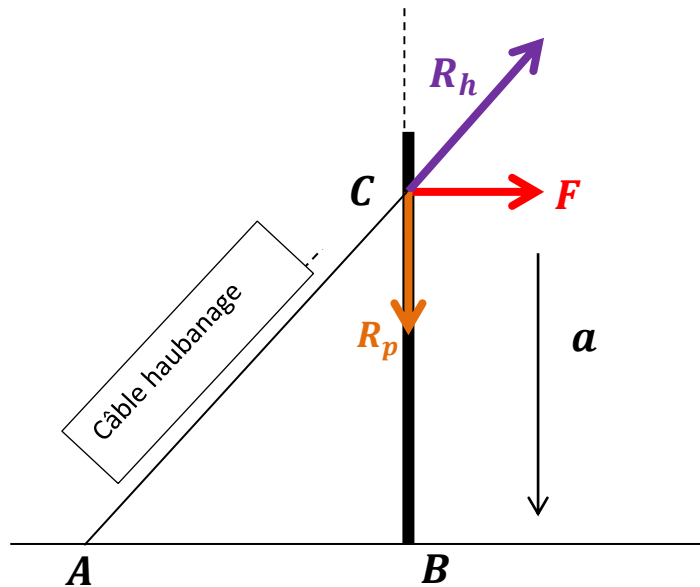


Figure 4.39 Modèle de calcul haubanage

Pour l'angle  $\hat{A}CB$  formé par le poteau et le hauban ; on a :

$$R_h = \frac{F}{\sin(\hat{A}CB)} = F * \frac{AC}{AB} \quad \text{Et} \quad R_p = \frac{F}{\tan(\hat{A}CB)} = F * \frac{CB}{AB}$$

$$\hat{A}CB = \arctan\left(\frac{AB}{CB}\right)$$

Calcul de l'effort axial :

La composante  $R_p$  s'ajoute aux charges axiales appliquées sur le pylône selon Z

#### 4.4. Récapitules des calculs vis-à-vis les données de piquetage

Le calcul que j'ai effectué sur les différents cas de chargements possibles pour un pylône est général, mais c'est le calcul utilisé pour le dimensionnement et le choix des poteaux à installer. Ce sont les calculs qui dimensionnent la structure géométrique et la tenue mécanique du pylône. Dans ce paragraphe je vais faire une récapitulation des calculs vis-à-vis les données de piquetage qu'on utilise réellement pour effectuer les notes de calcul.

Ce schéma contient les données à prendre en considération et à renseigner dans la feuille de calcul.

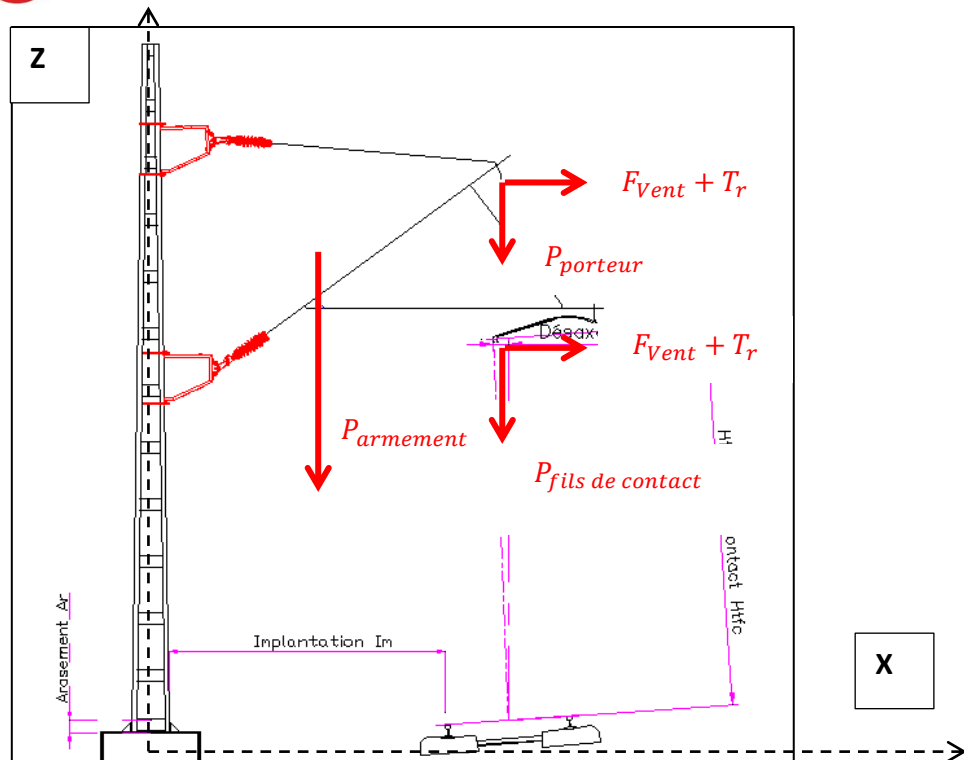


Figure 4.40 Schéma récapitulatif

Ce schéma récapitule les modélisations en fonction des données de piquetage et les points d'application de l'effort. Des approximations de distances peuvent être établis selon l'importance de la charge appliquée.

Torseur total appliqué sur le pylône :

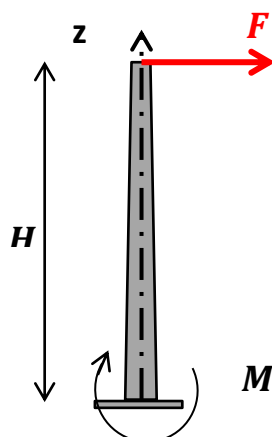
Effort Axial :  $N = \sum Forces_{verticales}$

Effort Tranchant :  $N = \sum Forces_{horizontales}$

Moments à l'encastrement :  $M = \sum Forces_{horizontales} * Z + \sum Forces_{verticales} * X$

Calcul de la flèche totale en tête du pylône :

Les moments appliqués à l'encastrement sont équivalents à une force F appliquée sur la tête du pylône :



$$F = \frac{M}{H}$$

$$f_{max} = \frac{F * H^3}{3 * E * I}$$

## Conclusion

Les modélisations, les formules et les résultats trouvés sont ceux responsables du dimensionnement du pylône, qui vu sa position et les efforts dont il est soumis, nécessite d'avoir une tenue mécanique résistante aux différentes sollicitations. Dès lors, le recours aux normes de vérifications de la résistance mécanique des structures métalliques spécialement la résistance des mâts des lignes électriques ferroviaire et Tramway est devenu une nécessité. C'est ainsi dans le chapitre 5 je présenterai les points de vérifications à considérer pour les structures des mâts en déterminant les hypothèses à prendre en compte puis le cheminement à suivre pour avoir des résultats satisfaisants.