



SOMMAIRE

Introduction générale.....	4
CHAPITRE 1: PRESENTATION DE L'ORGANISME D'ACCUEIL.....	5
1.1 Introduction :.....	5
1.2 Groupe CEGELEC :.....	5
1.3 CEGELEC au Maroc :	8
1.4 Secteurs d'activité :	8
1.4.1 Centrales de production d'énergie électrique :	8
1.4.2 Postes de transformation et d'interconnexion :	9
1.4.3 Lignes de transport d'énergie électrique :	9
1.4.4 Electrification rurale :	9
1.4.5 Electricité Industrielle :.....	10
1.4.6 Automatismes et Instrumentation :.....	10
1.4.7 Pompage :.....	10
1.4.8 Génie Climatique :.....	11
1.4.9 Infrastructure de Télécommunication :	11
1.5 Conclusion :	12
CHAPITRE 2: PRESENTATION DU PROJET ET CAHIER DES CHARGES	13
2.1 Positionnement du problème :	13
2.2 Techniques de restauration des lignes électriques :.....	16
2.3 Réparation de la structure :.....	16
2.3.1 Construction d'un nouveau pylône :.....	16
2.3.2 Restauration temporaire :.....	16
2.4 Cahier des charges :.....	18
2.5 Démarche à suivre :.....	20
2.6 Conclusion :	20
CHAPITRE 3 : REGLES DE CONCEPTION DES LIGNES ELECTRIQUES ET CALCUL DES CABLES.....	21
3.1 Introduction :.....	21
3.2 Généralité sur les lignes électriques :.....	21



3.2.1	Introduction :.....	21
3.2.2	Composants des lignes aériennes à très hautes tension :.....	22
3.3	Dimensionnement des lignes électriques aériennes :.....	30
3.3.1	Critères électriques :	31
3.3.2	Contraintes géométriques imposées par le site :.....	32
3.3.3	Comportement mécanique des câbles :.....	35
3.3.4	Influence de la température et équation de changement d'état :	49
3.3.5	Application Excel :	52
CHAPITRE 4 : CHOIX DE LA SOLUTION.....		55
4.1	Introduction :.....	55
4.2	Conformité de la structure aux critères spécifiés par le cahier des charges :.....	55
4.3	Présentation des composants de la structure :.....	56
4.4	Choix des composantes de la structure :	58
4.4.1	Choix des isolateurs :.....	58
4.4.2	Choix des dimensions des modules :.....	60
4.4.3	Choix des haubans :.....	61
4.4.4	Choix de la base :.....	63
4.4.5	Choix du matériau :	64
CHAPITRE 5 : ANALYSE DE LA STRUCTURE PAR LA METHODE DES ELEMENTS FINIS.....		69
5.1	Calcul des structures par la méthode des éléments finis :.....	69
5.2	Présentation du logiciel ROBOBAT :	70
5.2.1	Description générale :	70
5.2.2	Caractéristiques du logiciel :	70
5.3	Vérification du mât modulaire:.....	71
5.3.1	Hypothèses de charges climatiques :	71
5.3.2	Proposition du cas de dépannage :.....	72
5.4	Conception et vérification de la base :.....	95
5.4.1	Description :	95
5.4.2	Vérification de la base :	96
5.5	Vérification des isolateurs :.....	99
5.6	Vérification des haubans :.....	99
5.7	Choix des assemblages et dimensionnement des boulons :.....	100
5.7.1	Introduction :.....	100
5.7.2	Généralité sur les boulons :.....	100



5.7.3 Dispositions pratiques des boulons :.....	102
Chapitre 6 : Etude de quelques cas de dépannage	108
6.1 Premier cas de dépannage :	108
6.2 Second cas de dépannage :	115
Conclusion générale	118
Annexes	119
Bibliographie.....	127



Introduction générale

Le réseau de transport d'électricité est confronté à différentes contraintes qui peuvent affecter l'acheminement de l'électricité. Les pannes sur une ligne électrique peuvent être provoquées par divers événements : violents orages, tempête, glissement de terrain, agression extérieure, accumulation de neige collante ou incident technique. L'endommagement des pylônes qui supportent les câbles transporteurs reste parmi les pannes névralgiques et qui nécessitent un temps énorme pour la réparation.

Les structures de dépannage utilisées dans notre pays restent traditionnelles, difficiles à transporter et à implanter, et non sécuritaires. La structure la plus utilisée est celle constituée de portiques en bois, cette dernière n'est applicable que pour des hauteurs limitées et présente une vulnérabilité considérable face aux conditions climatiques violentes.

Le présent projet vise la conception d'une solution de dépannage rapide en structures métalliques modulaire légère, qui permettra des gains au niveau de temps d'intervention, une facilité d'implémentation et de transport ainsi que sur l'adaptabilité, et ayant une robustesse lui permettant de faire face aux conditions climatiques les plus défavorables.

Afin d'assurer une conception correcte, le logiciel ROBOBAT est choisi comme outil de calcul vu sa performance.

CHAPITRE 1: PRESENTATION DE L'ORGANISME D'ACCUEIL

1.1 Introduction :

Nous avons réservé ce premier chapitre pour la présentation de l'organisme qui nous a accueillis dans le cadre de notre projet de fin d'études, à savoir le groupe CEGELEC.

Nous commencerons dans un premier temps par la présentation du groupe CEGELEC au niveau mondial et les solutions et services que la société offre à ses clients. Ensuite nous présenterons la filiale du groupe installée au Maroc depuis 1946, et nous terminerons par la présentation des secteurs d'activité dans lesquels le groupe excelle, ainsi qu'une présentation service LRA (lignes réseaux ateliers).

1.2 Groupe CEGELEC :

CEGELEC est un Groupe mondial intégré de services technologiques aux entreprises et aux collectivités. Le Groupe réalise 24,4% de son chiffre d'affaire dans l'industrie, 27,7% dans les infrastructures, 17% dans le tertiaire et 30,0% dans la maintenance.

CEGELEC est présent sur tout le cycle du service au client, de la conception au sein de ses bureaux d'études jusqu'à l'installation des équipements et des infrastructures et leur maintenance, en s'appuyant sur ses propres équipes spécialisées.

CEGELEC compte 25 000 collaborateurs et est présent dans plus de 30 pays en France, en Europe et dans le monde, au travers de 200 agences ou centres de travaux et plus de 1200 bureaux.

CEGELEC est une société indépendante constituée à la suite du rachat, en juillet 2001, du secteur Contracting d'Alstom au travers d'un LMBO (Leverage Management Buy-Out). A la faveur d'un deuxième LMBO, LBO France est devenu le



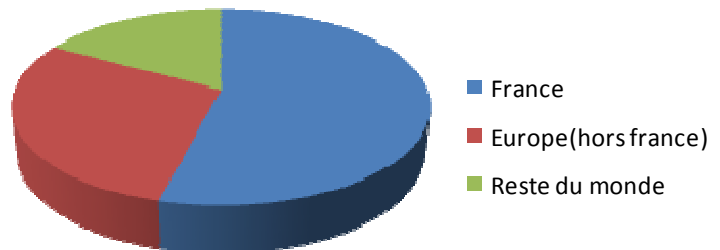
principal actionnaire (90%) de Cegelec en mars 2006 aux côtés du management et des collaborateurs de l'entreprise (10%).

Depuis le 22 octobre 2008, la société Qatari Dia est officiellement devenue le nouvel actionnaire majoritaire de Cegelec. Ce nouvel actionnaire devra permettre à cegelec de confirmer son indépendance par rapport à tout groupe industriel, et de lui apporter un atout commercial et financier auxquels les clients de Cegelec ont toujours été sensibles.

CHIFFRE D'AFFAIRES

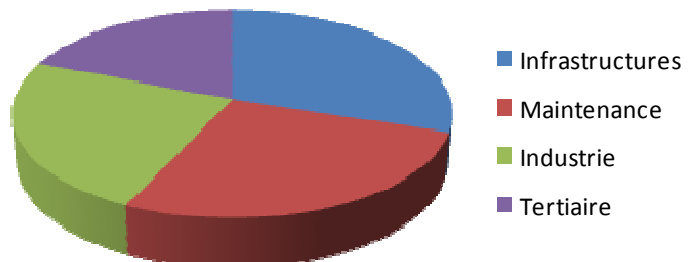
Par pays de destination

- France 56%
- Europe (hors France) 29%
- Reste du monde 15%



Par secteur d'activité

- Infrastructures 30%
- Maintenance 27%
- Industrie 23%
- Tertiaire 20%



L'organigramme général de CEGELEC, présenté ci-après **Figure 1.1**, montre une large présence du groupe sur plusieurs continents.

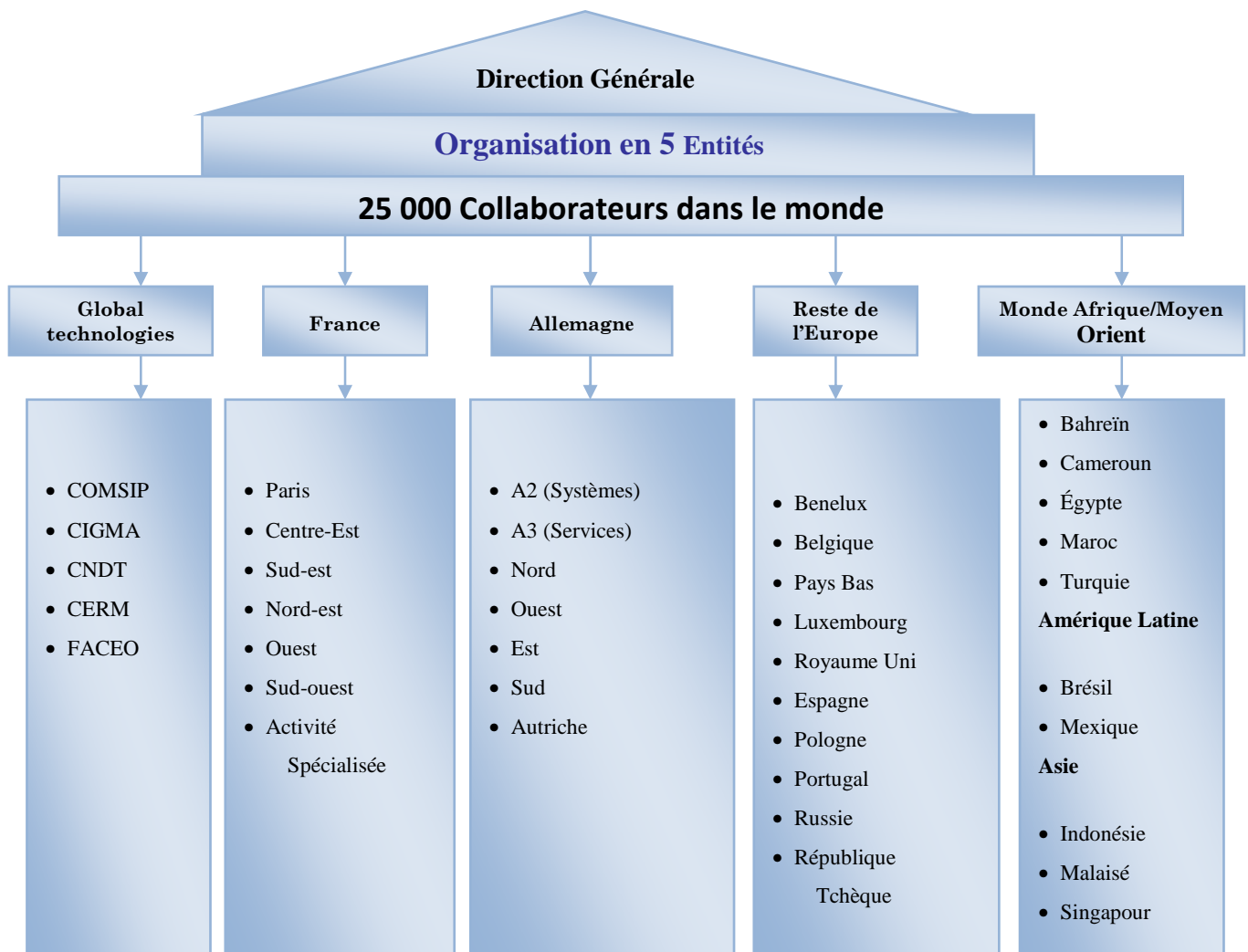


Figure 1.1 : Organigramme général de CEGELEC

CEGELEC adopte un comportement de véritable partenaire du développement local et international de ses clients. Il offre des solutions technologiques performantes en :

- système d'information de production, de contrôle commande et d'automatisation.
- Instrumentation.
- technologies de l'information et de la communication.



- énergie, électricité.
- génie climatique.
- mécanique, électromécanique.
- maintenance globale.

Par ailleurs, CEGELEC met à la disposition de ses clients une gamme complète de services.

1.3 CEGELEC au Maroc :

CEGELEC enregistre une forte présence au Maroc, grâce aux structures de sa filiale locale :

- un effectif de 1 700 personnes dont 105 ingénieurs,
- la certification ISO 9001 version 2000 de ses activités,
- un chiffre d'affaires de 800 millions de DH.

CEGELEC est constituée de quatre grandes directions supervisées par la Direction Générale.

CEGELEC présente des solutions et des services dans de nombreux secteurs d'activité :

1.4 Secteurs d'activité :

La couverture sectorielle assurée par CEGELEC est très large, et concerne des domaines très variés. Nous donnons ci-après, un aperçu général sur ces domaines et sur le niveau d'intervention de CEGELEC.

Centrales de production d'énergie électrique :

- Diesel.
- Hydraulique.
- Éolienne.

Principales références :

- Centrale thermique de Jorf Lasfar/IMACID.
- Parc éolien Abdelkhalek TORRES (Koudia El Baida).
- Centrale diesel 3 x 8 MW de Laâyoune.



- Centrale hydraulique 3 x 80 MW de Matmata

Postes de transformation et d'interconnexion :

CEGELEC, une maîtrise reconnue de :

- Postes THT 400 KV - 225 KV.
- Postes HT 60 KV.
- Postes MT 22 KV.

Des solutions intégrant le contrôle commande à technologie numérique.

Principales références :

- ONE.
- REGIES.
- CONCESSIONS.
- CIMENTERIES.
- MINES.
- INDUSTRIES.

Lignes de transport d'énergie électrique :

CEGELEC, plus de 50 ans d'expérience dans le transport d'énergie :

- Lignes 400 KV.
- Lignes 225 KV.
- Lignes 60 KV.

Electrification rurale :

CEGELEC, plus de 2000 villages électrifiés depuis le début du programme lancé par l'ONE (1998) :

- Etude, Topographique.
- Conception et dimensionnement des lignes.
- Ingénierie et fabrication :
 - Pylônes.
 - Armements.
 - Poteaux béton.
- Réalisation des projets clés en main.



Electricité Industrielle :

CEGELEC est un acteur de longue date du secteur industriel au Maroc à travers une diversité de projets dans le domaine de l'énergie électrique :

- Poste de transformation, HT/MT/BT.
- Centrale groupe électrogène.
- Tableaux électriques.
- Alimentation forces motrices.
- Distribution éclairage et prises de courant.
- Montage essai et mise en service.
- Maintenance et assistance.

Automatisme et Instrumentation :

CEGELEC Entreprise développe, étudie, installe et met en service des solutions technologiques performantes dans les domaines :

- Contrôle commande.
- Automatisation.
- Instrumentation.
- Télégestion.

Pompage :

CEGELEC, des prestations adaptées aux besoins des clients dans les domaines de :

- L'irrigation.
- L'eau potable.
- L'assainissement.

Elle offre des solutions globales et des services : étude, conception et installation :

- Alimentation MT, Poste, Distribution BT.
- Tableaux électriques.
- Contrôle commande.



- Appareillage de mesure et régulation.
- Groupe motopompe.
- Tuyauterie, robinetterie, protection anti-bélier.
- Filtration, vide et production d'eau claire.
- Moyens de manutention.
- Automates programmables, supervision, télégestion.
- Maintenance et assistance.

Génie Climatique :

CEGELEC a aussi une bonne maîtrise des technologies de :

- Climatisation.
- Chauffage.
- Réfrigération.
- Plomberie, sanitaire.
- Air comprimé.
- Protection contre l'incendie.

Infrastructure de Télécommunication :

❖ Réseaux fixes :

- Génie civil et câble.
- Ingénierie et équipement tertiaire.
- Pose et raccordement fibre optique.

❖ Réseaux mobiles :

- Recherche et négociation de site.
- Ingénierie de réseaux.
- Ingénierie, fabrication et montage pylônes.
- Ingénierie et intégration de shelters.



- Transmission radio.
- Electrification des sites en réseau MT/BT.
- Fourniture et gestion des alimentations secourues.
- Génie climatique - Génie civil.
- Maintenance des sites.

1.5 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté le groupe CEGELEC qui nous a accueillis au sein du service LRA section THT.

Le chapitre qui suit sera réservé à la présentation du projet sur lequel nous avons travaillé et les spécifications du cahier des charges que nous avons suivi.

CHAPITRE 2: PRESENTATION DU PROJET ET CAHIER DES CHARGES

2.1 Positionnement du problème :

Les ruptures des lignes électriques aériennes sont, en général, provoquées par des conditions climatiques extrêmes : violents orages, tempête, accumulation de neige collante. Cela entraîne des coûts très élevés encourus par les compagnies électriques (pénalités pour chaque jour de non-transmission). De plus, cette situation provoque également des retombées importantes aux niveaux politique et social.



Figure 2.1 : pylône endommagé

En octobre 2008, le Maroc connaît des conditions climatiques exceptionnelles. Des pluies torrentielles ont touché le nord et le sud du Pays. Les inondations provoquées par les intenses orages n'épargnent pas l'infrastructure électrique. En particulier le réseau ONE de la région d'ERRACHIDIA.

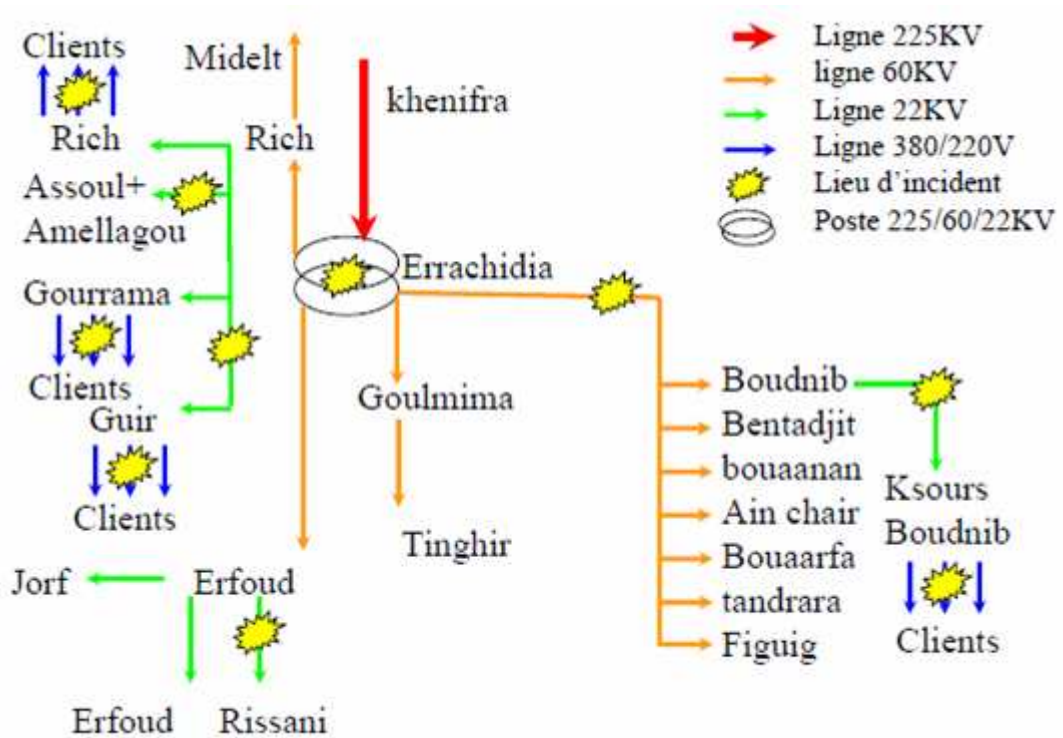


Figure 2.2 : schéma simplifiée du réseau ONE de la région d'ERRACHIDIA

Cette région compte environ 100 000 foyers qui ont été privés d'électricité. Des efforts et des moyens considérables ont été nécessaires pour revenir à une situation d'alimentation électrique normale. Le rétablissement des liaisons aériennes de haute et très haute tension a été exécuté par CEGELEEC. La solution qui a été appliquée est la restauration temporaire des lignes en utilisant des portiques en bois.



Figure 2.3 : Rétablissement d'une ligne 60 KV en utilisant les portiques en bois

Vue sont coût et sa simplicité, cette solution s'est avérée pratique. Néanmoins, les portiques en bois ont présenté plusieurs problèmes. Leur vulnérabilité face à des conditions climatiques extrêmes a causé la chute de quelques portiques. Ceci a provoqué beaucoup de coupures de courant. Donc plusieurs interventions de restauration de supports de dépannage ont été nécessaires.

D'autre part, les portiques en bois ne sont pas conformes aux règles de calcul des lignes électriques aériennes. En effet, les pylônes métalliques peuvent atteindre (pour la très haute tension) environ 50 m en hauteur. Une telle hauteur est pratiquement irréalisable par des structures constituée par des poteaux en bois.



En matière de logistique, le transport des poteaux en bois est généralement difficile, vue l'inaccessibilité de certains sites par les camions. Des moyens de transport plus légers ne sont pas en mesure de transporter des poteaux en bois de 12 m de hauteur pesant environ 2700 Kg.

L'objet de ce projet est de concevoir une structure de dépannage rapide et efficace des lignes électriques aériennes qui permettra de surmonter les difficultés et contraintes rencontrées avec les portiques en bois.

2.2 Techniques de restauration des lignes électriques :

L'intervention pour la réparation des pylônes endommagés dépend de la gravité de la panne, la disponibilité du matériel et l'accessibilité au site de l'intervention.

2.3 Réparation de la structure :

Dans le cas où l'endommagement est partiel et ne touche que la structure métallique du pylône, la réparation peut se limiter seulement au changement de la partie endommagée.

Construction d'un nouveau pylône :

Dans le cas où l'endommagement touche la fondation, la construction d'un nouveau pylône est obligatoire et son emplacement doit être proche du site du pylône endommagé.

Restauration temporaire :

De façon général, quand l'interruption de l'électricité est due à l'endommagement d'un ou plusieurs pylônes, le remplacement temporaire des pylônes endommagés est nécessaire. Et ce, jusqu'à ce que l'équipe d'intervention retire les pylônes endommagés, construise des nouvelles fondations, transporte les nouveaux pylônes au site et les installe. Ce processus peut prendre aussi peu qu'une à deux

semaines (tours disponibles, journées de travail de 24h, équipes efficaces) ou aussi longtemps que 5 ou 6 semaines.

Parmi les solutions les plus utilisées en restauration temporaire des figurent les portiques en bois, les poteaux en béton et les mâts modulaires.

- **Portiques en bois :**

Cette solution est la plus utilisée à cause de son coût, mais elle n'est pas efficace car elle est difficile à transporter et à implanter.



Figure 2.4 : portique de restauration en bois

- **Pylônes en béton :**

En général les pylônes en béton ne sont pas bons pour les systèmes de restauration rapide à cause de leurs poids et la difficulté de transport et d'implantation.

- **Mâts modulaires**

Ne nécessitant pas de fondation et pouvant être utilisée pour n'importe tout niveau de tension (THT, HT, ...) et tout type de structures (suspension, angle, ancrage). Les structures modulaires présentent la solution la plus efficace et la plus économique.



Figure 2.5 : Mât modulaire pour la restauration

La modularité de ces structures offre une grande adaptabilité aux différents cas de dépannage et une interchangeabilité entre les composants de différentes structures. Cette solution est souvent réalisée en matériau léger (aluminium).

2.4 Cahier des charges :

Ce projet vise la conception d'une solution de dépannage rapide pour les lignes électrique à très haute tension en structure métallique modulaire légère.

Cette structure doit respecter les critères suivants :

- Robustesse et stabilité :

Ces deux critères s'imposent par les conditions climatiques extrêmes qui causent l'endommagement des pylônes électriques et qui subsistent pendant les opérations de dépannage.

- Adaptabilité :

Les cas de dépannage se caractérisent par le niveau de tension, la nature du terrain et la configuration géométrique de la ligne. Ceci engendre une multitude de cas de dépannage aux quels la solution doit s'adapter.



- Facilité de montage et démontage :

Le temps est le facteur le plus contraignant dans les opérations de dépannage des lignes électriques, à cause des impacts socioéconomiques des coupures d'électricité. Donc le montage de la structure de dépannage doit être rapide.

- Facilité de transport et stockage :

La difficulté d'accès à certains sites impose à la structure d'être facilement transportable (par véhicules légers ou par les hommes).

La conception de la structure se base sur les actions suivantes :

- Simulation des différents cas possibles de dépannage :

La structure est destinée à remplacer des pylônes endommagés quelque soit leurs types, dimensions et emplacements. Ceci nécessite l'étude de plusieurs cas de dépannage.

- Conception des différents éléments constituant le système de dépannage :

Les composantes de la structure de dépannage doivent être adaptées à n'importe quel cas d'intervention et conçues en respectant les différents critères spécifiés par le cahier des charges.

- Etablissement des outils de choix des structures de restauration :

Les structures seront conçues pour servir dans différents cas de dépannage. Chaque cas se caractérise par un mode de chargement mécanique. Une application informatique facilitera la tâche du choix de la structure selon le cas de chargement.



2.5 Démarche à suivre :

- Etude du comportement mécanique des câbles et modélisation du calcul des câbles sur Excel.
- Choix de la structure et de ses composants.
- Détermination des cas de charge à appliquer sur les structures.
- Modélisations et vérification des structures sur le logiciel ROBOBAT.

2.6 Conclusion :

Après la présentation générale qui a fait l'objet de ce chapitre. Il reste à entamer les étapes de conception de la structure. Le chapitre suivant aborde l'étude du comportement mécanique des câbles.



CHAPITRE 3 : REGLES DE CONCEPTION DES LIGNES ELECTRIQUES ET CALCUL DES CABLES

3.1 Introduction :

La conception de la solution de dépannage doit respecter les règles de conception des lignes électrique aériennes à très haute tension. Ce chapitre vise la présentation de ces règles de calcul, particulièrement les règles de calcul des câbles conducteurs.

3.2 Généralité sur les lignes électriques :

Introduction :

Les lignes à très haute tension sont les lignes principales des réseaux de transport d'électricité. Elles peuvent être aussi bien aériennes que souterraines ou sous-marines, quoique les professionnels réservent plutôt le terme aux liaisons aériennes. Elles servent au transport sur les longues distances de l'électricité produite par les diverses centrales électriques, ainsi qu'à l'interconnexion des réseaux électriques.

L'utilisation des lignes aériennes à très haute tension s'avère inévitable lorsqu'il s'agit du transport de l'électricité sur des distances dépassants quelques kilomètres. Et ce, a fin de réduire les chutes de tension en ligne, les pertes en ligne, et d'améliorer la stabilité des réseaux.

Les pertes en ligne sont dues à l'effet Joule, qui dépend de la résistance et le courant ($P = R \cdot I^2$). L'utilisation de la haute tension permet, à puissance transportée ($P = U \cdot I$) équivalente, de diminuer le courant et donc les pertes. Par ailleurs, pour diminuer la résistance, aux fréquences industrielles, il n'y a que deux facteurs, la résistivité des matériaux utilisés pour fabriquer les câbles de transport, et la section de ces câbles.

Le terme « haute tension » désigne les valeurs de tension supérieures à 50 kV en courant alternatif. Par contre le terme « très haute tension » n'a pas de définition officielle. Les tensions utilisées varient d'un pays à l'autre. Au Maroc, on trouve 60 kV



comme haute tension pour de la distribution urbaine ou régionale et 225 KV et 400 KV comme très haute tension pour les échanges entre régions et pour les principales interconnexions nationales. Dans d'autres pays, on utilise aussi du 800 kV (comme au Canada), et même des tensions plus élevées comme en Chine (1 100 kV), Inde (projet 1 200 kV), Japon (projet 1 100 kV) et dans l'ex-URSS où des essais de transport en « ultra haute tension » ont été effectués en 1 500 kV — mais ce type de tension ne se justifie que pour un transport sur une distance de l'ordre du millier de kilomètres, pour lequel un transport en courant continu peut être une solution intéressante.

Composants des lignes aériennes à très hautes tension :

Les principaux composants des lignes aériennes à très hautes tension sont :

- Les conducteurs (Phases + câble(s) de garde) ;
- Les isolateurs ;
- Le pylône ;
- Les fondations ;
- Autres accessoires (pinces de suspension, jonctions de connecteurs, amortisseurs dynamiques,...).

a. Conducteurs :

Les conducteurs transportent l'énergie électrique sous forme triphasée. Alors, on trouvera au moins 3 conducteurs par ligne. Pour une phase, on peut aussi trouver un faisceau de conducteurs (de 2 à 4) à la place d'un simple conducteur.

Les lignes aériennes à très haute tension doivent répondre à plusieurs critères en même temps : Résistance électrique minimale (pour réduire les pertes), distance d'isolement suffisante par rapport au sol, résistance suffisante pour supporter les charges appliquées, coût raisonnable en vue des centaines ou des milliers de kilomètres de réseau à installer. Il existe une grande variété de spécifications des câbles afin de pouvoir satisfaire les différentes exigences en ce qui concerne l'intensité de charge admissible pour diverses conditions climatiques et types de terrain.

Pour les conducteurs aériens à grande distance, on préfère souvent l'aluminium au cuivre – malgré sa conductivité électrique inférieure, l'aluminium offre des avantages en termes de densité et de coût. Pour les câbles composés d'acier et d'Al, l'acier supporte en grande partie toute la charge mécanique et l'Al la transmission du courant électrique.

Les câbles aériens ont souvent des diamètres entre 5 et 40 mm. Ils se présentent sous forme d'enroulements hélicoïdaux par couche, en alternant le sens de la torsion entre les couches. Les différents torons ont en général un diamètre de 2-4 mm et sont adaptés au tréfilage et à l'enroulement de fils. Pour les câbles renforcés, les torons qui supportent essentiellement la charge sont placés à l'intérieur.



ACSR: Aluminum Conductor Steel Reinforced



AAAC: All Aluminum Alloy Conductor



ACAR: Aluminum Alloy Conductor Reinforced



GTACSR: Conducteur en Aluminium renforcé d'acier

Figure 3.1 : Types des conducteurs utilisés dans le transport de l'électricité

NB : Le type de conducteurs utilisé pour la très haute tension au Maroc est l'ACSR.

b. Câbles de garde :

Les câbles de garde ne transportent pas le courant. Ils sont situés au-dessus des conducteurs. Ils jouent un rôle de paratonnerre au-dessus de la ligne, en attirant les coups de foudre, et en évitant le foudroiement des conducteurs. Ils sont en général réalisés en almelec-acier. Au centre du câble de garde on place parfois un câble fibre optique qui sert à la communication de l'exploitant. Si on décide d'installer la fibre optique sur un câble de garde déjà existant, on utilise alors un robot qui viendra enrouler en spirale la fibre optique autour du câble de garde.

L'Almelec est un alliage d'aluminium, spécialement mis au point pour la fabrication des conducteurs électriques. Il contient de faibles additions (0,5% environ) de Silicium et de magnésium et grâce à une combinaison de traitements thermiques et mécaniques, il acquiert une charge de rupture sensiblement double de celle de l'aluminium pur écroui, tout en conservant une conductibilité peu inférieure à celle du métal pur (15 %).

c. Isolateurs:

L'isolation entre les conducteurs et les pylônes est assurée par des isolateurs. Ceux-ci sont réalisés en verre, en céramique, ou en matériau synthétique. Les isolateurs en verre ou céramique ont en général la forme d'une assiette. On les associe entre eux pour former des chaînes d'isolateurs. Plus la tension de la ligne est élevée, plus le nombre d'isolateurs dans la chaîne est important. Sur une ligne 400 kV (400 000V), les chaînes d'isolateurs comportent 19 assiettes. On peut alors deviner la tension des lignes en multipliant le nombre d'isolateurs par 20kV environ. De plus ces isolateurs sont protégés par un système de corne : anneaux entre lesquels se développe un arc électrique en cas d'amorçage.

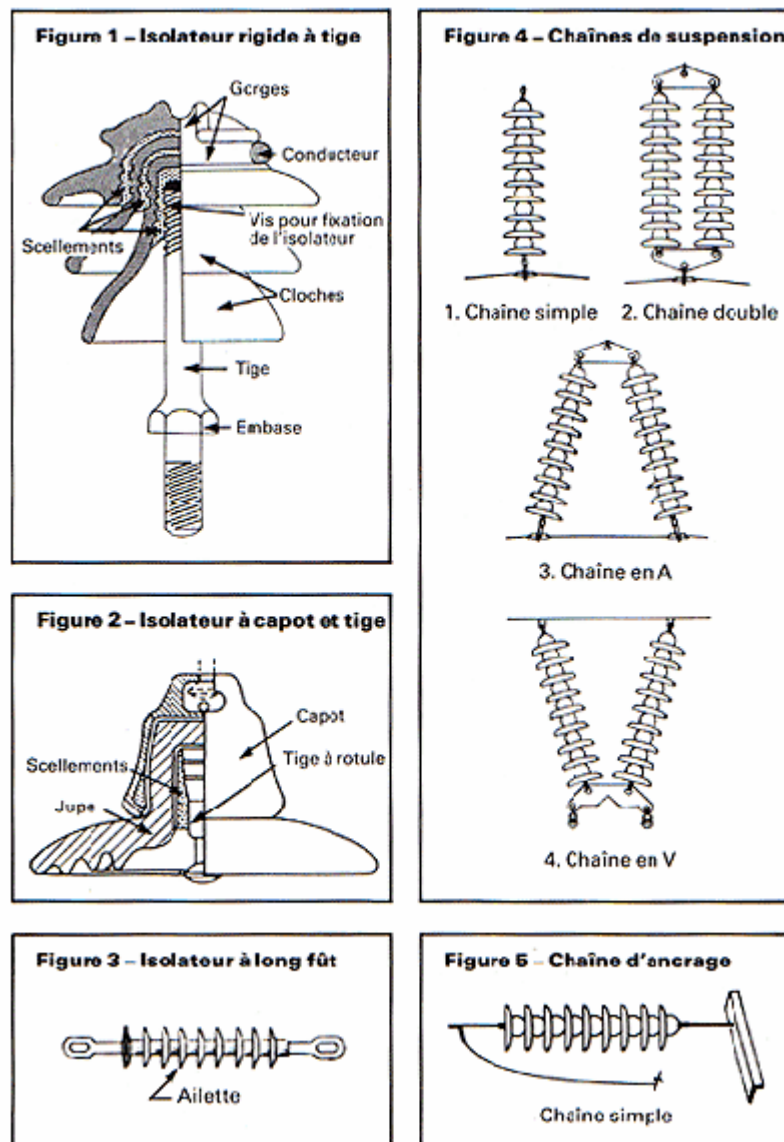


Figure 3.2 : Différents types d'isolateurs

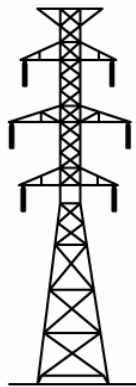
d. Pylône :

Un pylône est un support vertical, généralement constitué par un assemblage de membrures formant un treillis métallique, et portant les conducteurs d'une ligne électrique à haute ou très haute tension.

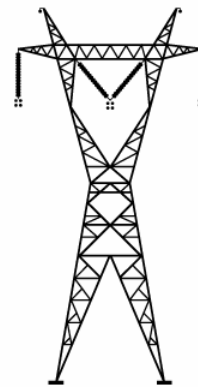
Les pylônes sont des maillons nécessaires à la constitution des lignes aériennes.

Ils sont définis en fonction des contraintes mécaniques principalement créées par les conducteurs qu'ils supportent et en fonction des contraintes d'isolement électrique.

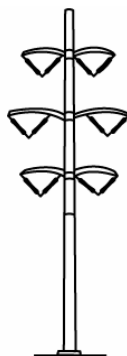
Les pylônes électriques présentent plusieurs silhouettes. Parmi elle :



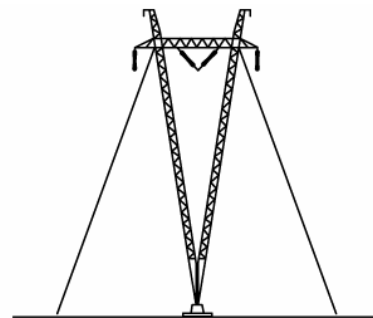
Occupant une place réduite au sol, ce pylône est utilisé pour des paliers de tension allant de 110 000 à 400 000 volts. Sa hauteur varie entre 25 et 60 mètres.



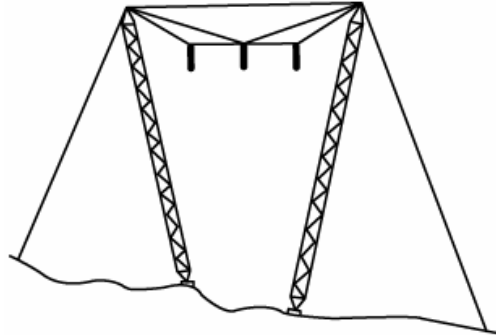
C'est le pylône le plus utilisé pour les lignes de transport. Il sert aux paliers de tension allant de 110 000 à 735 000 volts. Ce pylône convient aux lignes qui traversent des terrains très accidentés, car il peut être assemblé facilement.



Ce support porte également le nom poétique de pylône « muguet ». Il est moins massif que les autres pylônes et s'intègre plus facilement au milieu. On l'utilise de plus en plus dans les centres urbains. Il mesure entre 27 et 45 mètres et sert aux paliers de tension allant de 110 000 à 315 000 volts.



Ce pylône est utilisé pour les paliers de tension allant de 230 000 à 735 000 volts pour les lignes. Il a l'avantage d'être plus économique que les pylônes à armement en triangle ou en nappe.



Facile à monter et de fabrication simple, le pylône à chaînette supporte des conducteurs à 735 000 volts. Ce type de pylône nécessite moins d'acier galvanisé que le pylône haubané en V ; il est donc comparativement moins lourd et moins cher.

e. Classification des supports électrique :

i. Familles utilisée en lignes courante :

Il existe quatre types de familles A, B, C, D

- A et B =400KV et 225KV
- C=225 et HT
- D=HT

ii. Classification selon la résistance mécanique :

Par ordre de résistance croissante, les divers types de pylônes sont désignés par les lettres : K N T A S

- Pylône type K : pylône d'alignement pour les zones à givre léger pouvant supporter la portée courante.



- Pylône type N: pylône d'alignement pour les zones à givre moyen pouvant supporter la portée courante avec câbles de garde.
- Pylône type T : pylône de suspension pouvant supporter, la portée courante et un angle souple d'environ 15grade.
- Pylône type A : pylône d'ancrage dans les zones de givre léger pouvant supporter la portée courante et un angle de 30 grades.
- Pylône type S : pylône d'ancrage pouvant supporter :
 - ✓ Dans les zones de givre léger : la portée courante et un angle de 70 grades.
 - ✓ Dans les zones de givre moyen : la portée courante et un angle de 30 grades.

✓ Pylône d'alignement :

Pylône conçu pour une portion rectiligne du tracé de la ligne.

✓ Pylône d'ancrage :

Pylône sur lequel les conducteurs sont ancrés par des chaînes d'isolateurs horizontales et dans lequel les efforts exercés par chacune des deux portées adjacentes sont transmis indépendamment aux points d'attache du support.

Pour une ligne de distribution comme pour une ligne de transport, le pylône d'ancrage peut être installé soit sur une portion rectiligne du tracé, soit dans un angle.

✓ Pylône d'angle

Pylône situé à un point où le tracé de la ligne présente, dans le plan horizontal, un changement de direction. Les conducteurs sont reliés au pylône par les chaînes d'isolateurs horizontales ou verticales selon le degré de l'angle.

iii. Classification selon le type d'armement :

C'est la disposition géométrique des conducteurs, accessoirement des câbles de garde.

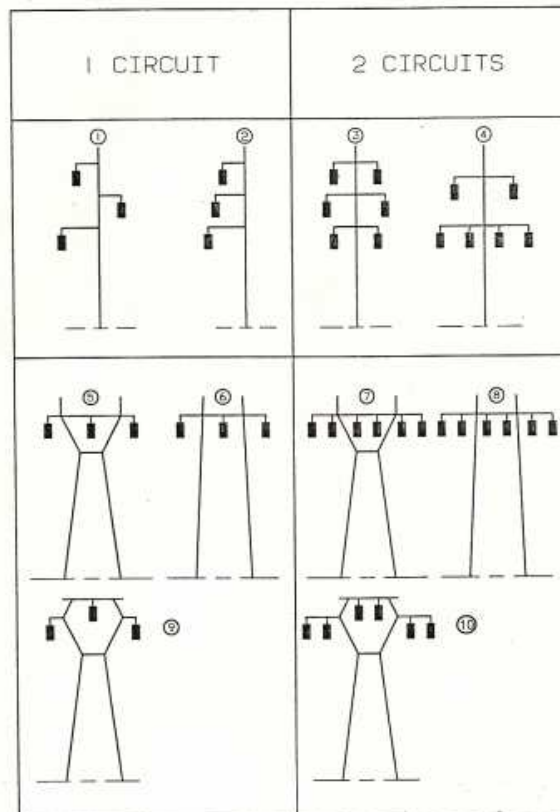


Figure 3.3 : Types d'armement couramment utilisés

La figure ci-dessus représente les armements utilisés couramment. Ils se partagent en deux grandes classes :

- L'une dans laquelle les conducteurs sont disposés à des étages différents : pylônes triangle(1), drapeau(2), double drapeau sapin ou tonneau (3), double triangle appelé danube (4).
- L'autre dans laquelle les conducteurs sont disposés au même niveau ou à des niveaux peu différents : pylônes ou portiques à nappe horizontale,(5à6), pylônes voûte ou chat(9et10).



f. Fondation :

On appelle fondation, la partie d'un ouvrage qui se trouve en contact direct avec le terrain d'assise et qui a pour fonction de transmettre à celui-ci le poids et les différentes surcharges appliquées à la structure.

Une fondation peut être unique (monobloc) ou à raison d'un massif par pied (multi-pode) leur nature dépend du type de pylône.

3.3 Dimensionnement des lignes électriques aériennes :

Le dimensionnement des lignes aériennes prend en considération plusieurs critères :

- Les critères électriques.
- Les contraintes géométriques imposées par le site.
- Le comportement mécanique des câbles.
- L'influence de la température sur les câbles.

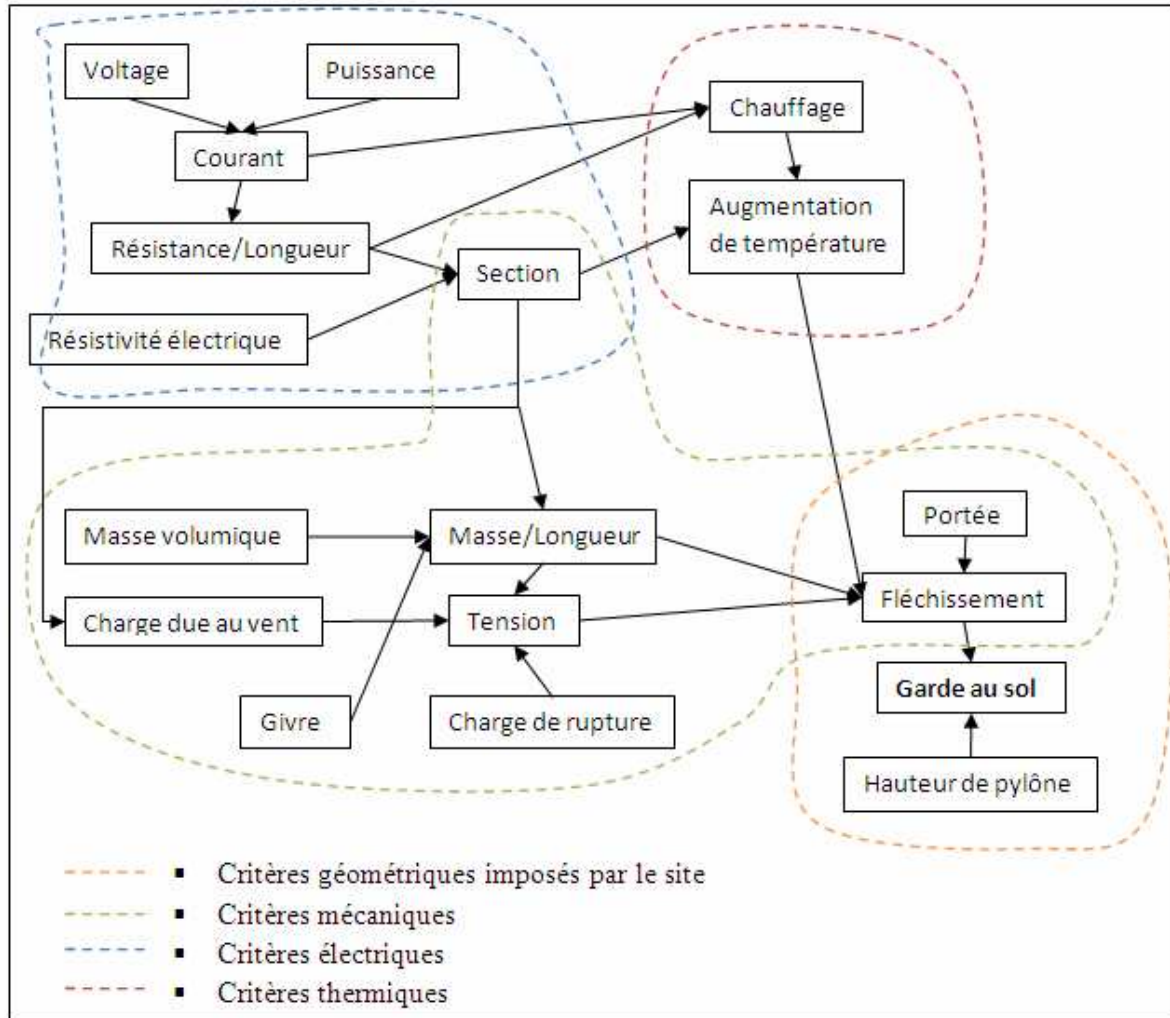


Figure 3.4 : Dimensionnement des lignes électrique aériennes

Critères électriques :

Les critères électriques permettant le dimensionnement de la section des conducteurs des lignes aériennes sont en général le courant nominal, le courant de court circuit et la chute de tension.

Les critères électriques sont aussi importants que les critères mécaniques pour le dimensionnement des conducteurs des lignes aériennes de très haute tension. Dans ce projet la section des conducteurs nous est imposée. En effet, le câble conducteur Constituant le réseau THT au Maroc est : Le conducteur nu Equibrin en Alliage d'Aluminium 570 mm² (Almélec-Acier 570.0 mm²).

Contraintes géométriques imposées par le site :

Les distances minimales au sol, appelées jeu, et aux obstacles qui doivent être respectées sont celles de l'Arrêté Technique du 15 mars 1963, majorées pour tenir compte des surcharges temporaires mécaniques ou électriques, des imprécisions du profil en long ou du réglage des conducteurs.

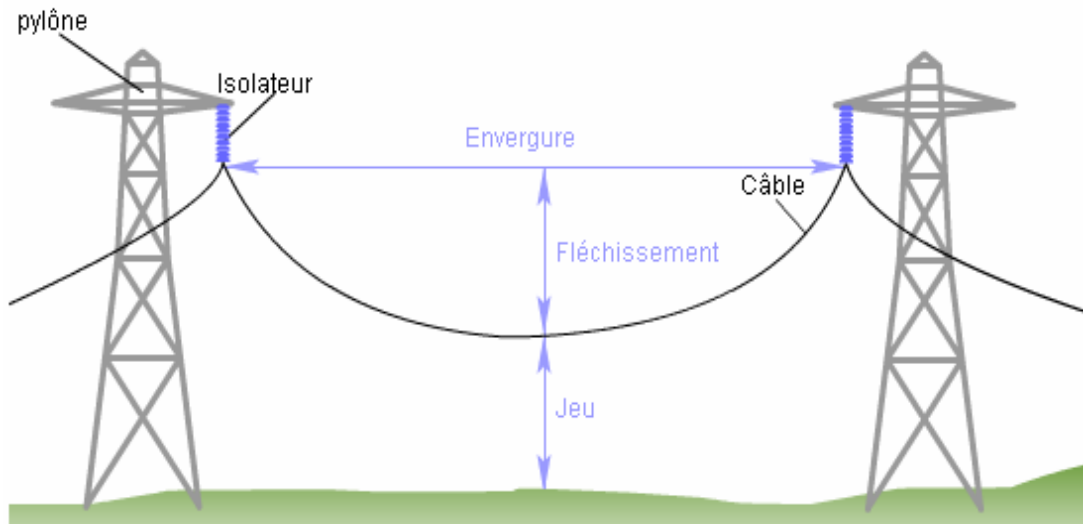


Figure 3.5 : contraintes géométriques imposées par le site

a. La garde au sol:

La garde au sol est la distance de sécurité entre la ligne électrique et le sol ou des obstacles rencontrés.

GARDE AU SOL	Hauteurs de l'arrêté technique du 15 mars 1963 (en mètre)	DISTANCES MINIMALES (en mètre)				
		Portées courantes				Grandes portées (2)
		63KV	90KV	225KV	400KV	f : flèche médiane (en mètre)
Terrain agricole	6.00 m	7.00 (1)	7.00 (1)	7.00 (1)	8.50 (1)	$3 + 0.6\sqrt{f} + t_2$



Terrain d'évolution ou de passage d'engins agricoles de grande hauteur (h=hauteur des engins)	$h + 1 + t_2$	h+2.00	h+2.50	h+2.50	h+3.50	$h - 2 + 0.6\sqrt{f} + t_2$
---	---------------	--------	--------	--------	--------	-----------------------------

Tableau 1 : distances minimales pour la garde au sol

La distance de tension t, fonction de la d'une personne ou d'un objet au voisinage de la ligne probabilité d'apparition d'une surtension et de la présence simultanée d'une personne ou d'un objet au voisinage de la ligne.

On définit trois valeurs pour cette distance :

- $t_1 = 0,0025 U$ pour une probabilité de voisinage faible
- $t_2 = 0,0050 U$ pour une probabilité de voisinage moyenne
- $t_3 = 0,0075 U$ pour une probabilité de voisinage forte

b. Distances aux obstacles :

La distance h à l'obstacle doit être vérifié à l'aide de la formule suivante avec un minimum égal à la distance indiqué dans le tableau ci-dessus :

$$h = 1 + \frac{2x}{a} (0,6\sqrt{f} - 1) + t_2$$

Avec :

- a : longueur de la portée en mètre
- f : flèche de la portée en mètre
- x : distance au support le plus proche en mètre

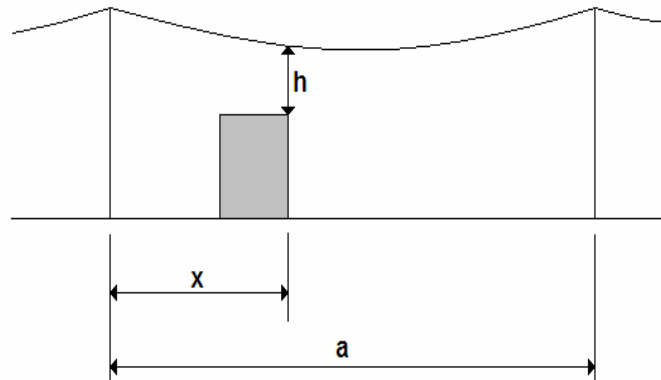


Figure 3.6: Distances aux obstacles

c. Distances entre conducteurs eux-mêmes :

La tenue diélectrique des ouvrages impose de respecter les distances de tensions entre les câbles supportées par une même file de pylône. Des distances minimales à respecter entre les câbles doivent donc être définies. Elles sont données par l'abaque (Annexe1).

La tenue diélectrique d'un milieu isolant représente la valeur maximum du champ électrique que le milieu peut supporter avant le déclenchement d'un arc électrique.

d. Conclusion :

Les critères géométriques imposés par la nature du site sont très importants pour la conception des lignes électriques aériennes, car ils relèvent de la sécurité des humains et du bon fonctionnement du matériel.

La structure de dépannage qui fait l'objet de ce projet doit respecter ces critères, et ce, quelque soit le type du terrain et des obstacles.

Comportement mécanique des câbles :

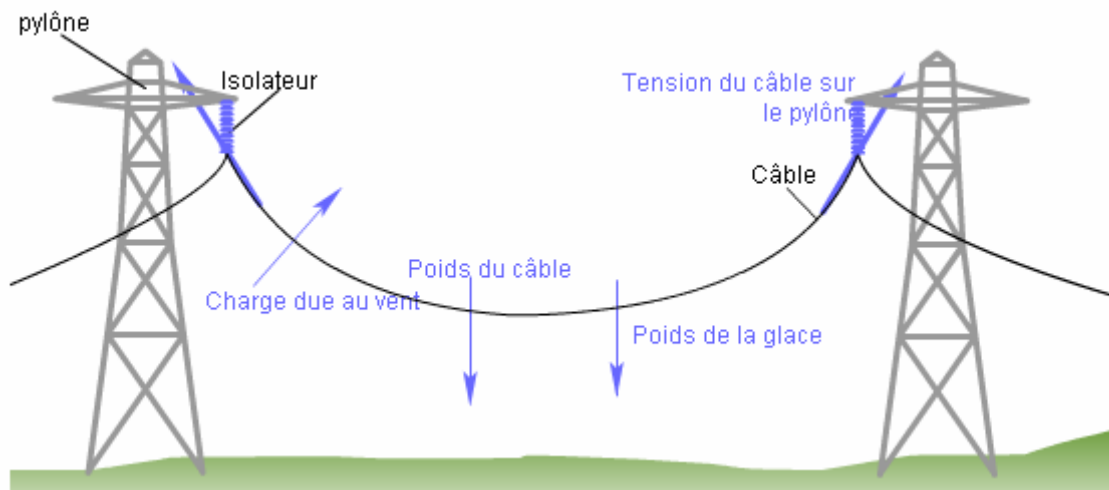


Figure 3.7: Efforts mécaniques appliqués sur le câble

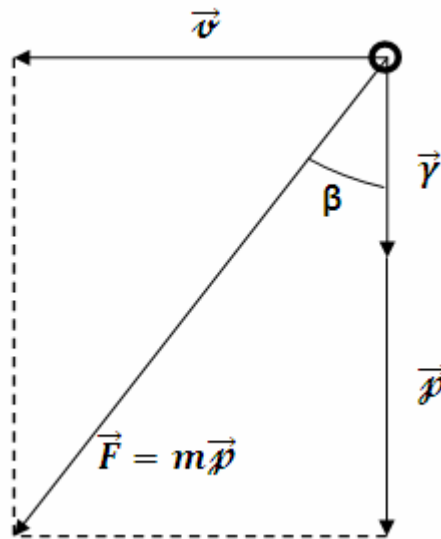
a. Calcul du coefficient de surcharge :

Pour simplifier le calcul des câbles on introduit les efforts appliqués par le vent et le givre en multipliant le poids linéique du câble par un coefficient appelé le coefficient de surcharge m .

Le câble est soumis aux efforts suivants :

- Le poids propre du câble par mètre linéaire : $p(\text{daN/m})$
- Le poids du givre sur le câble par mètre linéaire : $\gamma(\text{daN/m})$

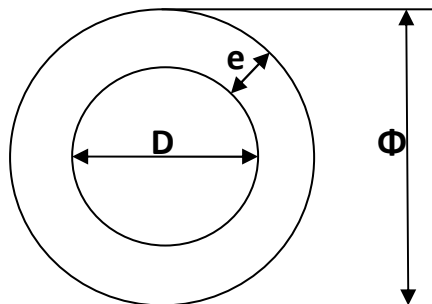
- Le vent sur le câble éventuellement givré par mètre linéaire : v (daN/m)



On définit la notion de poids apparent $m\vec{p}$, on a ainsi :

$$\begin{cases} m = \frac{\sqrt{(\varphi + \gamma)^2 + v^2}}{p} \\ \beta = \tan^{-1}\left(\frac{v}{\varphi + \gamma}\right) \end{cases}$$

Pour un câble donné on a :



- D : diamètre du câble
- e : épaisseur du givre



- Φ : diamètre apparent du câble givré = $D + 2e$

Le poids linéaire du givre sur le câble est :

$$\gamma = \pi \left[\frac{(D + 2e)^2}{4} - \frac{D^2}{4} \right] \Gamma = \pi e(D + e)\Gamma$$

- Γ étant la densité du givre prise égale à 0,6
- p_v est la pression du vent en daN/m ; $v = p_v(D + 2e)$

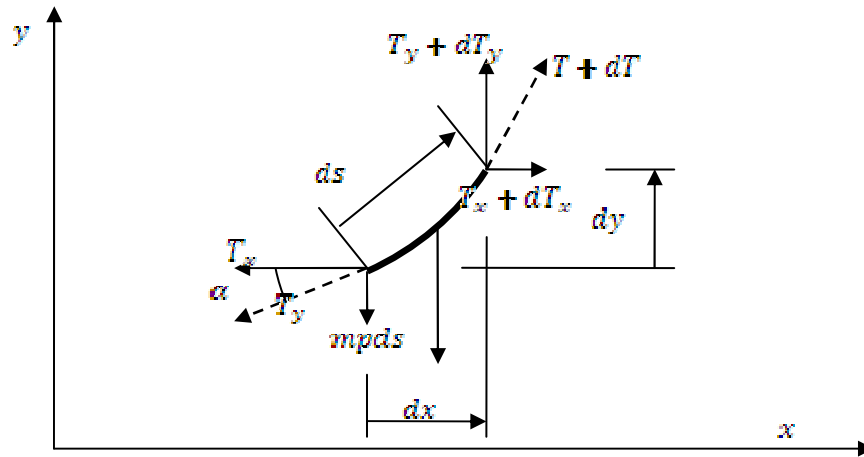
Ce qui nous donne :

$$m = \frac{\sqrt{\left[p + \pi \left[\frac{(D + 2e)^2}{4} - \frac{D^2}{4} \right] \Gamma \right]^2 + [p_v(D + 2e)]^2}}{p}$$

Et :

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{p_v(D + 2e)}{p + \pi \left[\frac{(D + 2e)^2}{4} - \frac{D^2}{4} \right] \Gamma} \right)$$

- b. Equation de la courbe d'équilibre du câble :



On se place dans le champ de force \vec{F}

Isolons un tronçon ds de câble par deux coupes voisines : trois forces apparaissent : T (tension), mp ds poids du tronçon et T+dT. Les composantes de T sont désignés par Tx et Ty : elles ne sont pas indépendantes puisque le support de T et

connu par l'angle α ; on a $\frac{T_y}{T_x} = \text{tg}\alpha = y'$ et donc : $T_y = T_x y'$ (*)

L'équilibre des trois forces T, mp ds et T+dT donne

$$\sum F_x = -T_x + T_x + dT_x = 0$$

$$\sum F_y = -T_y - mp ds + T_y + dT_y = 0$$

La première équation conduit à $dH = 0$, donc $T_x = T_0 = \text{cte}$

On déduit l'importante propriété suivante : la composante horizontale de la tension est constante. Alors on définit le paramètre ρ .

$$\rho = \frac{T_0}{mp}$$



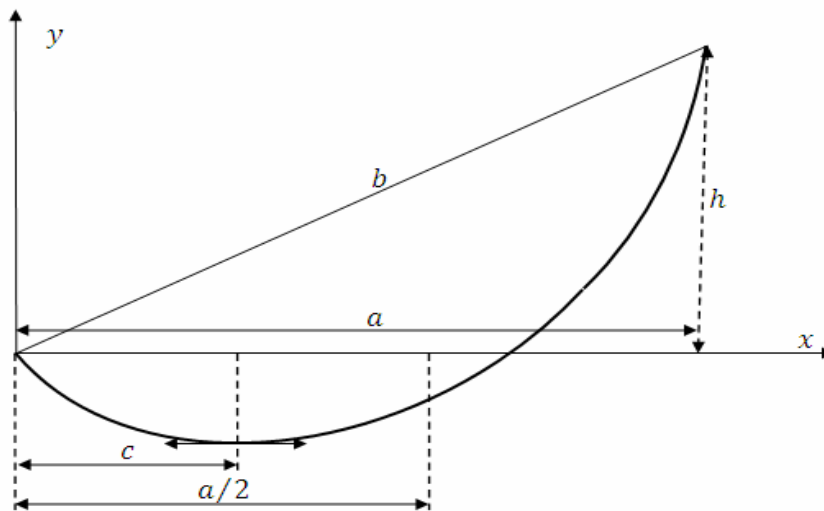
La seconde équation fournit $Ty' = mpds/dx$ et avec (*) on obtient : $y'' = \frac{ds}{\rho dx}$

On a $ds^2 = dx^2 + dy^2$ donc $\frac{ds}{dx} = \sqrt{1 + y'^2}$

D'où $y'' = \frac{1}{\rho} \int \sqrt{1 + y'^2} dx$

Celle-ci est l'équation différentielle du câble. Sa résolution fournit la configuration $y(x)$ du câble, dite aussi forme d'équilibre.

La charge est constante ($mp = cte$) donc l'intégration de l'équation fournit la courbe :

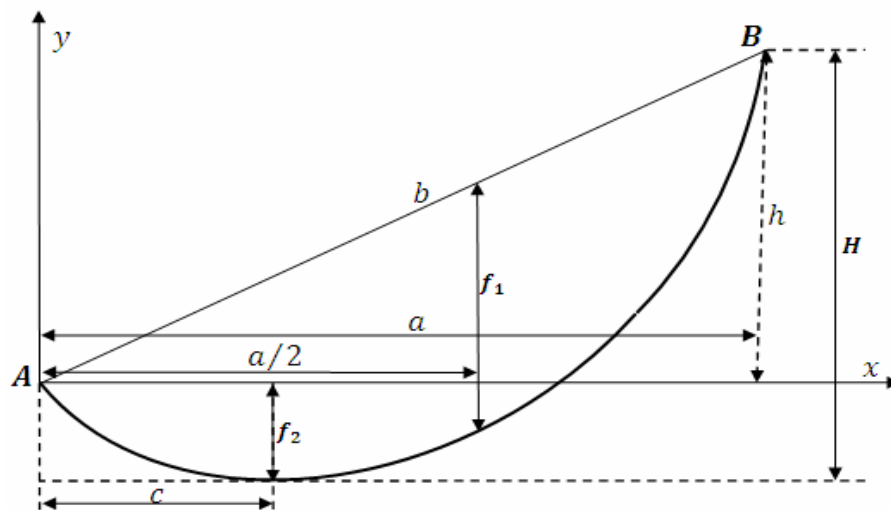


$$y = \rho \left[ch \frac{(x - c)}{\rho} - ch \frac{c}{\rho} \right] \quad \text{avec} \quad c = \frac{a}{2} - \rho \sin^{-1} \frac{h}{2\rho sh \frac{a}{2\rho}}$$

Notations :

- a : portée
- b : portée dénivelée ou corde $b = \sqrt{a^2 + h^2}$
- c : abscisse du point bas

c. Calcul de la flèche :



❖ Flèche médiane :

On calcule $y(a/2)$ $f_1 = y\left(\frac{a}{2}\right) + \frac{h}{2}$

$$f_1 = \rho \left(ch \frac{a}{2\rho} - 1 \right) \sqrt{1 + \frac{h^2}{4\rho^2 sh^2 \frac{a}{2\rho}}}$$

Ce qui nous donne

On développe au 2ème ordre et on trouve :

$$f_1 = \frac{ab}{8\rho}$$

Et pour $h=0$ $f_1 = \frac{a^2}{8\rho}$



❖ Flèche basse et creux :

On calcule $y(c)$:

$$y(c) = \rho \left[ch \frac{a}{2\rho} \sqrt{1 + \frac{h^2}{4\rho^2 s h^2 \frac{a}{2\rho}} - 1} - \frac{h}{2} \right]$$

On a $f_2 = y(c)$ et $H = y(c) + h$

On développe au 2ème ordre et on trouve :

$$f_2 = \frac{-h}{2} + \frac{ab}{8\rho} + \rho * \frac{b-a}{a} \quad \text{et} \quad H = \frac{h}{2} + \frac{ab}{8\rho} + \rho * \frac{b-a}{a}$$

d. Longueur de l'arc :

Pour une portée de niveau on a :

$$\begin{cases} ds = \sqrt{1 + y'^2} dx \\ \text{avec } y = \rho \cosh \frac{x}{\rho} \end{cases}$$

Donc

$$ds = \sqrt{1 + sh^2} \frac{x}{\rho} dx = \sqrt{ch^2} \frac{x}{\rho} dx = ch \frac{x}{\rho} dx$$

$$s = 2 \int_0^{\frac{a}{2}} ch \frac{x}{\rho} dx$$

D'où

$$s = 2\rho sh \frac{a}{2\rho}$$

Approximation :

$$s = 2\rho \left[\frac{a}{2\rho} + \frac{a^3}{6 * 8 * \rho^3} + \dots \right]$$

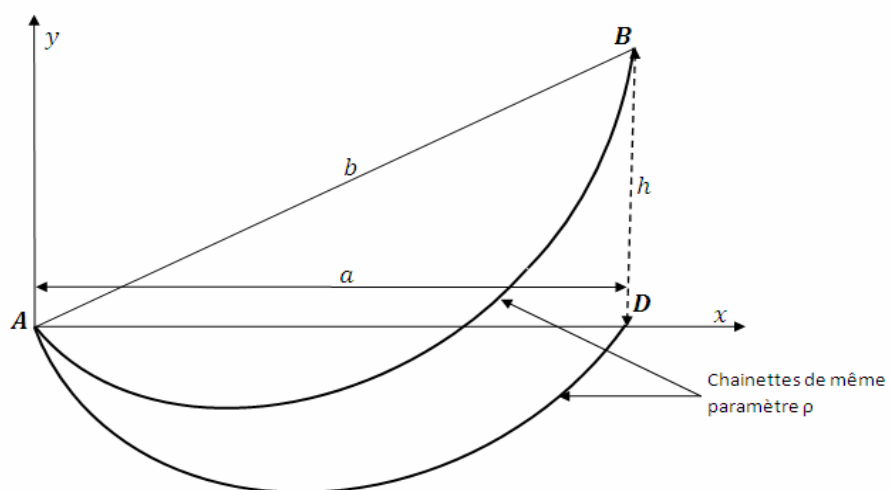
Au premier ordre :

$$s = a$$

Au 3eme ordre :

$$s = a + \frac{a^3}{24\rho^2}$$

Théorème de Pythagore Silva :



Donne

$$s_{AB}^2 = s_{AD}^2 + h^2$$



Ce qui donne

$$s_{AB}^2 = \left(2\rho \operatorname{sh} \frac{a}{2\rho} \right)^2 + h^2$$

Donc

$$s_{AB} = 2\rho \operatorname{sh} \frac{a}{2\rho} \sqrt{1 + \frac{h^2}{4\rho^2 \sinh^2 \frac{a}{2\rho}}}$$

Approximation :

$$\left. \begin{array}{l} 2\rho \operatorname{sh} \frac{a}{2\rho} = a \\ \sqrt{1 + \frac{h^2}{4\rho^2 \sinh^2 \frac{a}{2\rho}}} = \sqrt{1 + \frac{h^2}{a^2}} \end{array} \right\} \text{ d'où } s = a \sqrt{1 + \frac{h^2}{a^2}} = b \text{ au premier ordre}$$

au 3^e ordre on trouve $s = b + \frac{a^3}{24\rho^2} \left(\frac{a}{b} \right)$

e. Tension aux points d'accrochage :

On se place dans le champ de force \vec{F}

$$T = \frac{T_0}{\cos\alpha} \text{ avec } \cos\alpha = \frac{dx}{ds} = \frac{dx}{\sqrt{dx^2 + dy^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + y'^2}}$$

où $y = \rho \left[ch \frac{(x-c)}{\rho} - ch \frac{c}{\rho} \right]$ avec $c = \frac{a}{2} - \rho \sin^{-1} \frac{h}{2\rho \operatorname{sh} \frac{a}{2\rho}}$

donc $y' = \operatorname{sh} \frac{x-c}{\rho}$ $\cos\alpha = \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{sh}^2 \frac{x-c}{\rho}}} = \frac{1}{ch \frac{x-c}{\rho}}$

$$T = \frac{T_0}{\cos \alpha} = T_0 \cosh \frac{x-c}{\rho} = mpp \cosh \frac{x-c}{\rho}$$

$$T = mpp + mp \left[\rho \cosh \frac{x-c}{\rho} - \rho \right]$$

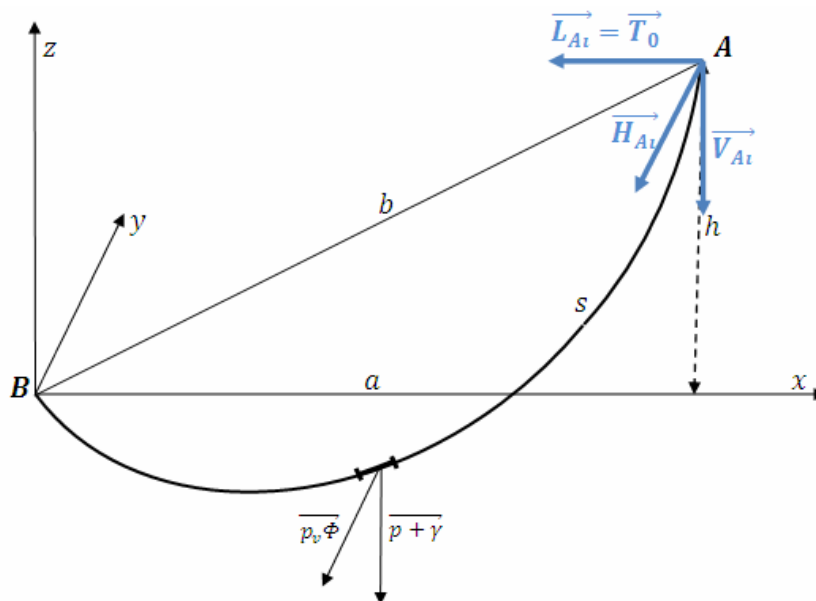
Donc la tension au point d'accrochage A est :

$$T_A = mpp + mp \left[\rho \cosh \frac{-c}{\rho} - \rho \right] = T_0 + mp f_a$$

Donc la tension au point d'accrochage B est :

$$T_B = mpp + mp \left[\rho \cosh \frac{\alpha-c}{\rho} - \rho \right] = T_0 + mp H$$

f. Calcul des efforts dus à une portée :





❖ Calcul de l'effort vertical :

Moment par rapport à l'axe \vec{y}

$$\int_0^a (p + \gamma)x ds - V * a = -T_0 h$$

Si on fait l'approximation suivante

$$\frac{ds}{s} = \frac{dx}{a}$$

$$\int_0^a (p + \gamma) \frac{s}{a} x dx - V_{At} * a = -T_0 h$$

$$(p + \gamma) * \frac{s}{a} * \frac{a^2}{2} + T_0 h = V_{At} * a$$

Donc

$$V_{At} = (p + \gamma) \frac{s}{2} + T_0 \frac{h}{a}$$

Or s est très voisin de b d'où

$$V_{At} = (p + \gamma) \frac{b}{2} + T_0 \frac{h}{a}$$

❖ Calcul de l'effort transversal :

Moment par rapport à l'axe \vec{z}

$$\int_0^a P_V \Phi x ds - L_{At} * a = 0$$

Si on fait l'approximation suivante

$$\frac{ds}{s} = \frac{dx}{a}$$

$$\int_0^a P_V \Phi x \frac{s}{a} dx - L_{At} * a = P_V \Phi \frac{s a^2}{2}$$



$$H_{Ai} = \frac{P_V \Phi s}{2}$$

Et puisque s est très voisin de b :

$$H_{Ai} = \frac{P_V \Phi b}{2}$$

❖ Calcul de l'effort longitudinal :

L'effort longitudinal est la tension horizontale : $L_{Ai} = T_0$

❖ Calcul de la tension au point d'accrochage :

La résultante des efforts dus aux câbles donne la valeur de la tension du câble au point d'accrochage.

$$T_A = \sqrt{V_{Ai}^2 + H_{Ai}^2 + L_{Ai}^2}$$

g. Efforts appliqués par câble sur le pylône pour deux portées adjacentes :

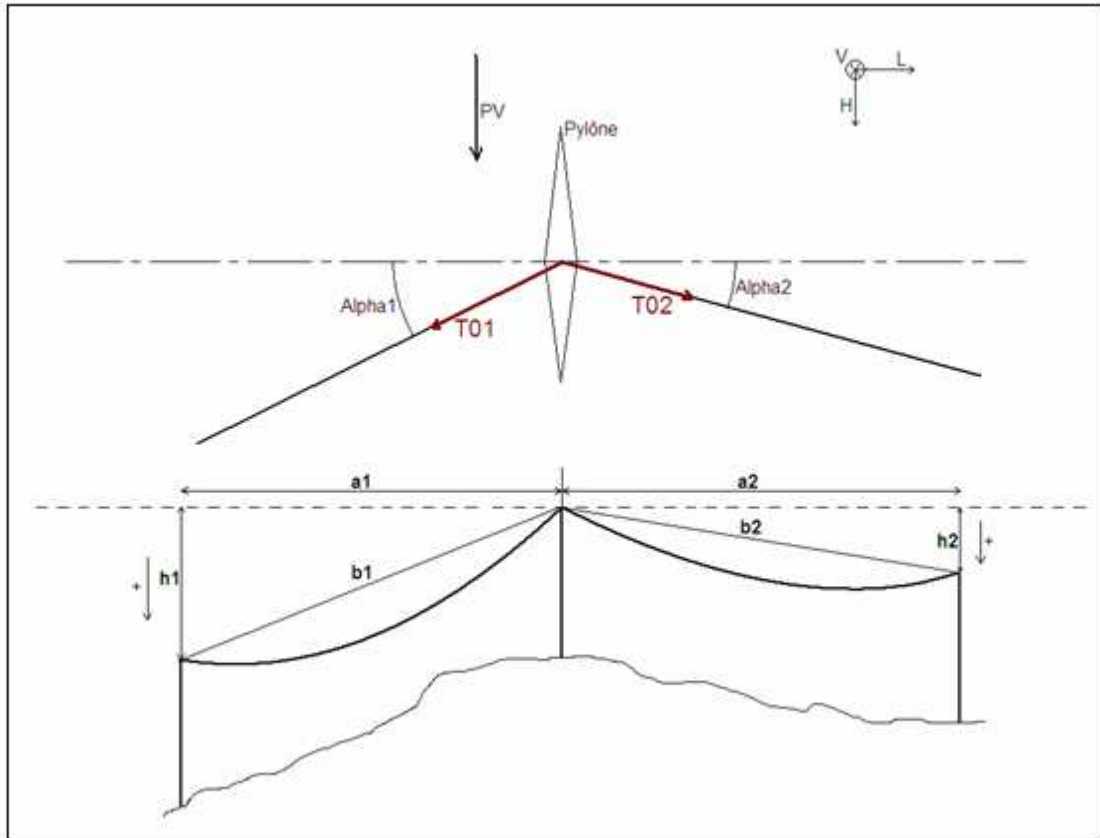


Figure 3.8: Configuration de l'incidence des portées sur le support

Pour la configuration donnée dans la figure ci-dessus on aura :

$$\begin{cases} V_A = (p + \gamma) \frac{b_1 + b_2}{2} + T_{01} \frac{h_1}{a_1} + T_{02} \frac{h_2}{a_2} \\ H_A = P_V \Phi \left[\frac{b_1}{2} \cos \alpha_1 + \frac{b_2}{2} \cos \alpha_2 \right] + [T_{01} \sin \alpha_1 + T_{02} \sin \alpha_2] \\ L_A = T_{01} \cos \alpha_1 + T_{02} \cos \alpha_2 \end{cases}$$

h. Définition du paramètre :

❖ Définition :

Un câble tendu entre deux points décrit une courbe, dite chaînette d'équation $y = \rho \operatorname{ch}\left(\frac{x}{\rho}\right)$ dans le repère orthonormé (x, y) . ρ est appelé paramètre. C'est le rayon de courbure de la courbe au point de coordonnées $(x = 0, y = \rho)$.

A partir d'un état initial donné du câble, ρ varie en fonction des hypothèses climatiques suivant une équation dite de changement d'état qui permet de déterminer la nouvelle valeur de ρ pour un état final du câble.

Chaque état du câble et déterminer par :

- La température du câble
- Le coefficient de surcharge
- Le paramètre

❖ Paramètre de répartition :

Le paramètre de répartition correspond à la position la plus basse de la chaînette compte tenu d'un état initial caractérisé par le paramètre de référence. Ce dernier est obtenu pour la température maximale de fonctionnement du câble. Mais dans certains cas de répartition en zone de givre moyen ou lourd c'est en hypothèse de givre que les câbles ont leur position la plus basse. C'est dans cette position que l'on vérifiera les distances par rapport aux obstacles et au sol.

La température définissant le paramètre de répartition est indiquée par l'hypothèse de répartition donnée par le cahier des spécifications techniques de l'ONE concernant le projet à réaliser.

En général l'hypothèse de répartition présente les caractéristiques suivantes :

- Température de répartition +70°C (sauf cas particulier)

- Vent nul

❖ Paramètre de réglage des câbles :

Le paramètre de réglage est défini à partir de l'état initial caractérisé par le paramètre de référence, et ce, en utilisant l'équation d'état qui met en jeu les paramètres de l'état de référence et ceux caractérisant l'état de réglage.

i. Conclusion :

L'étude du comportement mécanique des câbles nous permet d'évaluer les efforts principaux transmis à la structure en fonction des conditions climatiques et des emplacements des supports. Ceci va nous permettre de dimensionner les modules de la structure en prenant compte des conditions climatiques les plus défavorables.

Influence de la température et équation de changement d'état :

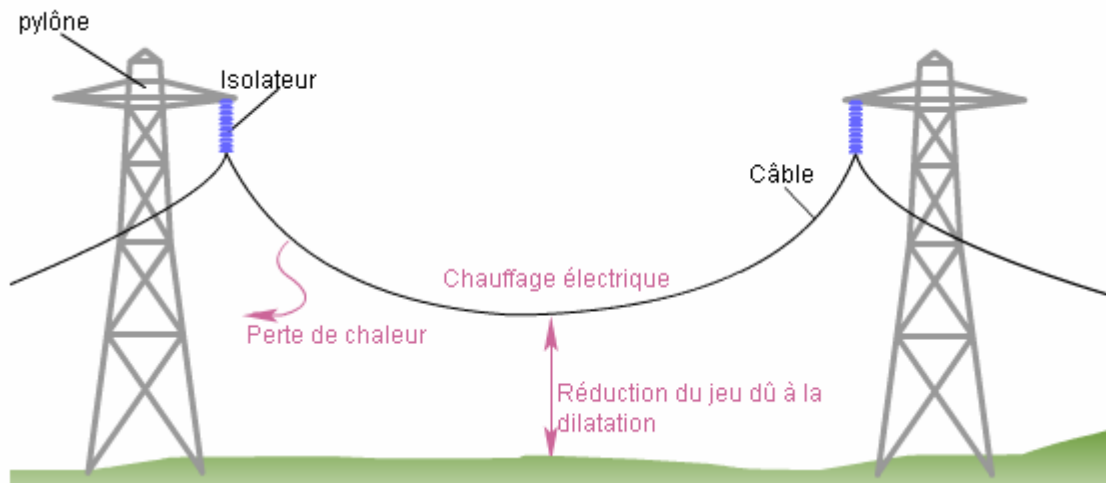
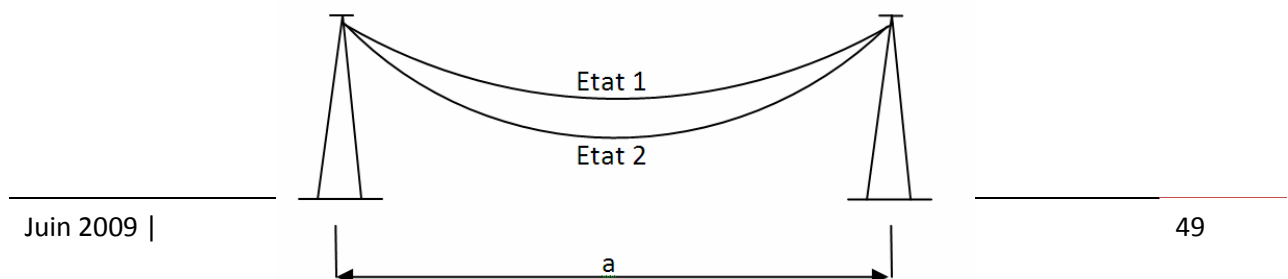


Figure 3.9: Influence de la température sur le câble conducteur

L'équation d'état permet de déterminer la composante horizontale de la tension du câble à un état final en connaissant sa valeur à l'état initial.





Chaque état est caractérisé par :

- La température θ
- Le coefficient de surcharge m .
- La tension T_0

La variation de la longueur du câble est due à la dilatation mécanique et la dilatation thermique.

La dilatation mécanique est :

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = \frac{\sigma}{E} = \frac{\Delta T}{ES} \quad \text{dans notre cas} \quad \frac{\Delta s}{s} = \frac{T_{02} - T_{01}}{ES}$$

La dilatation thermique est :

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = \alpha \Delta \theta \quad \text{dans notre cas} \quad \frac{\Delta s}{s} = \alpha (\theta_2 - \theta_1)$$

On écrit donc :

$$s_2 - s_1 = s \frac{T_{02} - T_{01}}{ES} + s \alpha (\theta_2 - \theta_1)$$

D'où

$$\left(a + \frac{a^3}{24\rho_2^2} \right) - \left(a + \frac{a^3}{24\rho_1^2} \right) = a \frac{T_{02} - T_{01}}{ES} + a \alpha (\theta_2 - \theta_1)$$

Et puisque $\rho = \frac{T_0}{mp}$

On retrouve l'équation d'état :

$$\frac{a^2}{24} \left[\left(\frac{m_2 p}{T_{02}} \right)^2 - \left(\frac{m_1 p}{T_{01}} \right)^2 \right] = \frac{T_{02} - T_{01}}{ES} + \alpha (\theta_2 - \theta_1)$$

On constate que l'expression suivante est constante quelque soit l'état i.



$$\frac{a^2 \left(\frac{m_1 p}{T_{01}}\right)^2}{24} - \frac{T_{01}}{ES} - \alpha(\theta_1) = cte$$

En multipliant par $T_{02}^2 ES$ et en isolant les termes en T_{02} on trouve l'équation suivante :

$$T_{02}^3 + T_{02}^2 \left[\alpha^2 \left(\frac{m_1 p}{T_{01}}\right)^2 \frac{ES}{24} - T_{01} + ES\alpha(\theta_2 - \theta_1) \right] = \frac{\alpha^2 m_1^2 p^2 ES}{24}$$

Equation de changement d'état en portée sèche dénivelée :

On refait le même raisonnement mais dans ce cas $s = b + \frac{\rho^3}{24\rho} \left(\frac{a}{b}\right)$

Et la tension moyenne est $T = T_0 \frac{a}{b}$

D'où l'équation :

$$\left(b + \frac{a^4}{24\rho_2^2}\right) - \left(b + \frac{a^4}{24\rho_1^2}\right) = b \left(\frac{T_{02} b/a - T_{01} b/a}{ES}\right) + b * (\theta_2 - \theta_1)$$

Ce qui donne :

$$\frac{a^4}{24b^2} \left[\frac{1}{\rho_2^2} - \frac{1}{\rho_1^2}\right] = \frac{T_{02} - T_{01}}{ES \frac{a}{b}} + \alpha(\theta_2 - \theta_1)$$

Conclusion :

L'équation d'état s'avère utile pour la détermination de la tension des câbles et de leur fléchissement après un changement des conditions climatiques (Température et coefficient de surcharge).

Le système de dépannage qui fait l'objet de ce projet est destiné à servir pendant une courte période (le temps nécessaire pour reconstruire les supports



endommagés). Alors, nous n'avons pas besoin de prendre en compte l'influence des changements climatiques sur les câbles.

Néanmoins, dans certain cas de dépannage, la ligne de restauration doit être installée avec le même paramètre de la ligne endommagée. Et ce à fin de préserver l'équilibre des pylônes non endommagés reliés par la ligne de dépannage. Alors, les flèches à appliquer sur la ligne de restauration doivent être calculé à partir du paramètre de répartition en utilisant l'équation d'état.

Application Excel :

La programmation du calcul des câbles sur Excel s'avère utile à cause du grand nombre de paramètre et d'équations régissant le comportement mécanique des câbles.

Les notations utilisées sur l'application sont définies sur la figure (3.8).

La première table sert à introduire les caractéristiques du câble conducteur :

câble	Masse linéique du câble (Kg/Km)	1574,000
	Coefficient de dilatation (1/°C)	2,30E-05
	Module de Young (daN/mm ²)	5400,000
	Poids linéique du câble (daN/m)	1,544
	Diamètre du câble (cm)	3,105
	Section du câble (mm ²)	570,000

La deuxième table sert à définir les états de calcul des portées :

ETAT 1	Epaisseur du givre (cm)	0,500
	Poids du givre (daN/m)	0,333
	Pression du vent (daN/m ²)	158,000
	Effort du vent (daN/m)	6,486
	Coefficient de surcharge	1,228
	Température (°C)	
	Paramètre (m)	1600,000
ETAT 2	Epaisseur du givre (cm)	
	Poids du givre (daN/m)	0,000
	Pression du vent (daN/m ²)	

Effort du vent (daN/m)	0,000
Coefficient de surcharge	1,000
Température (°C)	25,000
Paramètre (m)	1450,623

La troisième table sert à l'introduction des caractéristiques géométrique des portées et au calcul de la tension du câble dans les deux états :

Portée 1		Portée 2	
Portée (m)	300,000	Portée (m)	300,000
Angle d'arrivée alpha 1 (degré)	0	Angle de sortie alpha 2 (degré)	0
Dénivelée (m)	0,000	Dénivelée (m)	0,000
Portée oblique (m)	300,000	Portée oblique (m)	300,000
T01 (daN)	3033,361	T02 (daN)	3033,361
T01' (daN)	2239,899	T02' (daN)	2239,899
valeur initiale : 9000		valeur initiale : 9000	
	1499,130		1499,130
	2408,422		2408,422
	2206,263		2206,263
	2246,798		2246,798
	2238,491		2238,491
	2240,186		2240,186
<u>Itérations</u>	2239,840	<u>Itérations</u>	2239,840
	2239,911		2239,911
	2239,896		2239,896
	2239,899		2239,899
	2239,898		2239,898
	2239,899		2239,899
valeur finale : 2239,899		valeur finale : 2239,899	
flèche basse (m)	7,031	flèche basse (m)	7,031
Tension au point d'accrochage	3046,691	Tension au point d'accrochage	3046,691
α au point d'accrochage	5,362	α au point d'accrochage	5,362

La quatrième table donne les efforts appliqués sur le support par les deux portées :

Efforts appliqués au support (daN)	
ETAT	ETAT 1
T01	3033,36



T02	3033,36
Va	563,12
Ha	1945,77
La	0,00
RESULTANTE	2025,62

L'application Excel permet essentiellement le calcul des efforts appliqués par les câbles conducteurs sur un pylône, en tenant compte de la configuration géométrique des deux portées supportées par le pylône et des conditions climatiques. De plus, l'application permet le calcul du changement d'état des portées.

CHAPITRE 4 : CHOIX DE LA SOLUTION

4.1 Introduction :

Après l'analyse du dimensionnement des lignes électriques et l'étude de la structure des pylônes et de leurs différentes composantes. Ce chapitre sera consacré au choix et à la conception de la solution optimale aux spécifications du cahier des charges.

4.2 Conformité de la structure aux critères spécifiés par le cahier des charges :

Le tableau ci-dessous résume les critères exigés par le cahier des charges et les solutions proposées pour répondre à ces critères.

Critère	Solution	Commentaire
Facilité de transport et stockage	Matériau léger	Le transport et le montage d'une structure légère peut être effectué par des engins qui peuvent accéder les sites accidentés.
	Modularité	La subdivision de la structure en module minimise les dimensions linéaires des éléments à transporter et à stocker.
Adaptabilité	Modularité	La modularité permet le montage de structures avec différentes hauteurs et différentes formes, selon la nature de la ligne électrique à restaurer.



	Géométrie et dimensions	La section transversale carrée, comparée à la section triangulaire, offre plus de possibilités de montage des accessoires (haubans, isolateurs) sur la structure.
Robustesse et stabilité	Structure haubanée	La structure n'a pas de fondation en béton. Afin de la stabiliser l'utilisation des haubans est indispensable.
	Structure en treillis	Les structures en treillis ne présentent pas de grandes surfaces exposées au vent et offrent un bon rapport résistance/poids propre.
Facilité de montage et démontage	Modularité	Une structure modulaire présente moins d'éléments à monter par rapport aux structures en treillis ordinaires.

Tableau 2 : réponses aux critères du cahier des charges

Après la proposition des caractéristiques de la structure, il reste à définir les composants et leurs dimensions.

4.3 Présentation des composants de la structure :

La structure se compose de quatre éléments principaux, la figure ci-dessous illustre les différents éléments :

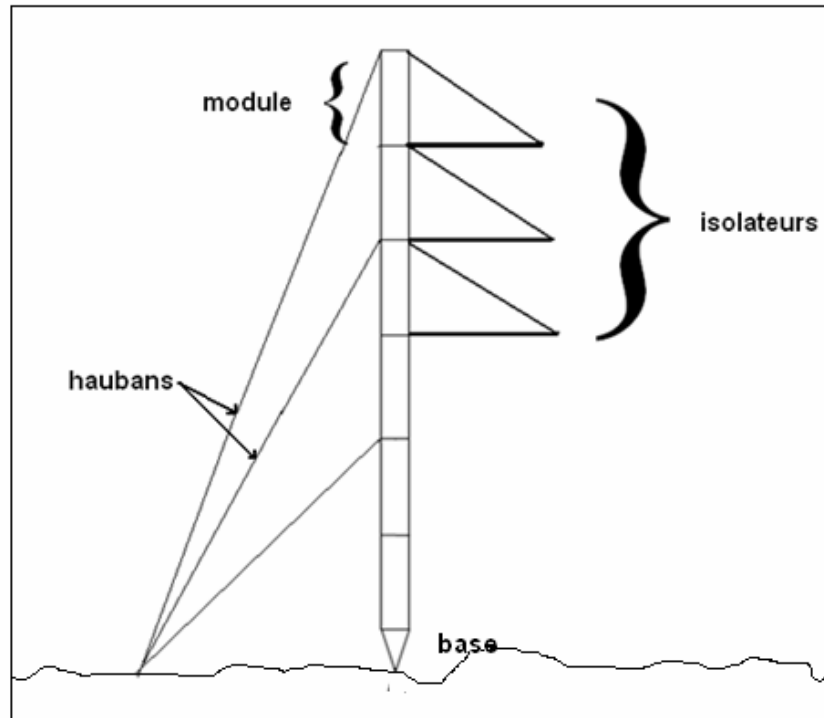


Figure 4.1: Composants de la structure modulaire

- Mâts modulaires :

Les modules seront légers, facile à transporter.

- Base :

La base joue deux rôles principaux. Le premier est d'assurer la fixation de la structure. Le deuxième consiste en une liaison permettant à la structure de passer du plan horizontal au plan vertical, lors du montage.

- Les haubans :

Les haubans sont destinés à assurer l'équilibre du pylône, car la structure n'a pas de fondation en béton.



- Isolateurs :

L'isolateur sert à retenir mécaniquement les conducteurs aux supports et à assurer l'isolement électrique entre ces deux éléments. Dans les pylônes ordinaires les isolateurs sont supportés par des bras en treillis. La structure de dépannage ne contiendra pas de bras supportant les isolateurs et ce dans le but de minimiser la matière et d'alléger la structure.

4.4 Choix des composantes de la structure :

Choix des isolateurs :

Le choix de l'isolateur dépend essentiellement de la tension transmise. Le tableau tiré du catalogue joint dans l'annexe (2) nous a permis de choisir les isolateurs suivants :

❖ Pour 400 KV

Fixed assembly with 0° inclination.

- ✓ Suspension type: ISI-ROK-A42-41-120EE.
- ✓ Post insulating type: ISI-MAX-A46+45 BHB.

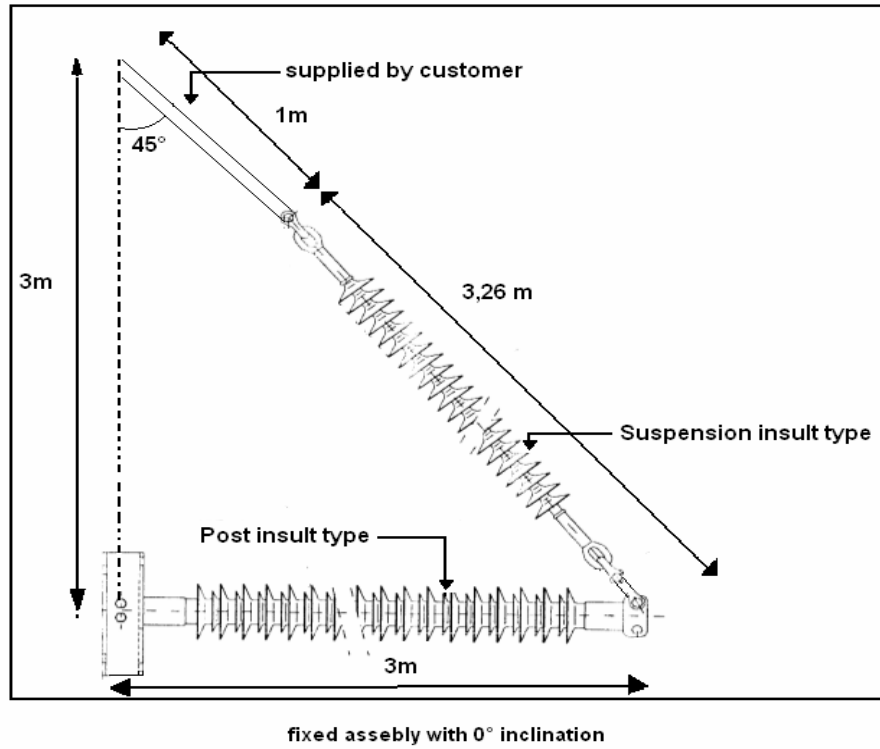


Figure 4.2: Fixed assembly with 0° inclination pour 400KV

La longueur entre les deux points d'accrochage est de 3m



Pour 225 KV

Fixed assembly with 0° inclination.

- ✓ Suspension type: ISI-ROK-A28+27-120EE.
- ✓ Post insulating type: ISI-BIG-38+37-BHB.

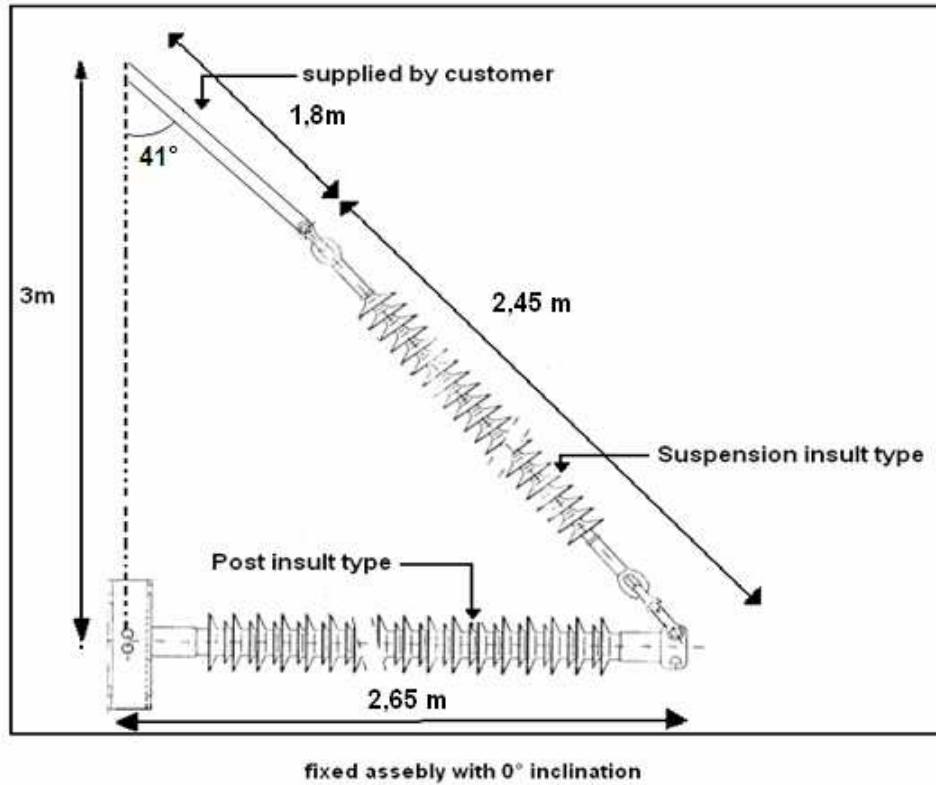


Figure 4.3: Fixed assembly with 0° inclination pour 225KV

Afin d'avoir la même distance entre les deux points d'accrochage pour les deux tensions (400KV-225KV), le câble choisi par l'utilisateur doit être de :

- ✓ 1m pour l'isolateur 400KV
- ✓ 1,8 m pour l'isolateur 225KV

Choix des dimensions des modules :

Le choix de la hauteur des modules dépend de plusieurs paramètres :

- L'isolateur : L'isolateur choisi présente une longueur de 3m entre ses deux points d'accrochage.

- L'entre-phase maximale : Pour fixer l'entre-phase il faut tout d'abord fixer une flèche maximale des conducteurs, pour ce faire, nous avons choisi une flèche de 20m. L'abaque (Annexe1) donne avec un coefficient de surcharge maximal de 1,23 une entre-phase de 6m.
- Longueur transportable : la longueur transportable par les camions maximale est 12m.

La longueur transportable nous donne une longueur de module de 12m. Ceci limitera les hauteurs que peut prendre le mât (12, 24, 36, 48m). Donc il est préférable de se basé sur la distance entre les points d'accrochage des isolateurs. Car le choix de modules de 3m renforcera la structure au niveau de ces points d'accrochage où sont transmis les efforts appliqués par les conducteurs au mât.

La figure ci-dessous présente les dimensions du module :

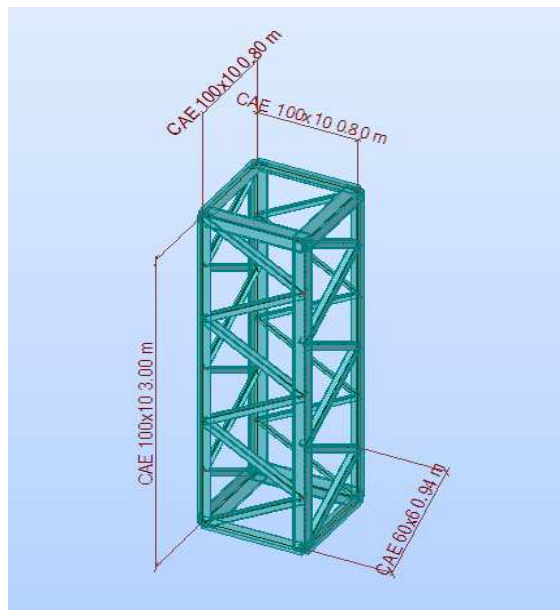


Figure 4.4: Dimensions du module

Choix des haubans :

- i. Poussée du vent sur les haubans



Le calcul de la poussée du vent sur les câbles est basé sur le même principe que celui du calcul de la pression du vent sur le pylône. Soit Φ_h et l_h le diamètre et la longueur des haubans ; la projection de l'hauban servant au calcul de la poussée du vent est donnée par la relation suivant :

$$A_h = \Phi_h \cdot l_h$$

Ainsi la force développée par l'action du vent sur les haubans est donnée par la formule :

$$F_h = A_h \cdot P$$

Où P est la pression du vent utilisée pour le calcul du pylône.

- ii. ancrage des haubans
 - ❖ Configuration des points d'ancrage

La configuration des points d'ancrage est telle qu'elle permet d'assurer un équilibre statique du pylône. La force de traction exercée et déterminée par l'analyse statique doit être telle que l'effort repris par chaque hauban soit admissible ; c'est-à-dire que la contrainte engendrée dans le brin de l'hauban soit inférieure à sa contrainte ultime.

La force de traction sera donnée par le logiciel ROBOBAT, et le choix du câble d'haubanage sera fait à partir au catalogue (Annexe 3).

Selon la hauteur du pylône, on peut être amené à utiliser 2, 4, 6, 8 haubans dont les points d'ancrage sont répartis sur un cercle d'une façon équidistante.

- ❖ Réalisation des points d'ancrage



Il existe quatre types d'ancrage utilisés pour assurer la fixation des haubans assurant l'équilibre du pylône ; le type choisit est fonction du support destiné à recevoir le pylône. Le tableau suivant montre les différentes alternatives possibles.

Type de support	Ancrage recommandé
Sable	De béton
Gravier	De béton
Argile	Type Duckbill
Sol rocailleux	Type Duckbill
Sol graveleux	Type Duckbill ou Auguer
Roche tendre	Boulon long à expansion
Roche dure	Boulon court à expansion

Tableau 3 : types d'ancrages selon les types du sol

Les ancrages en béton sont a éliminé car ils prennent beaucoup de temps, donc le choix du type d'ancrage sera confié à l'utilisateur et sera selon la nature du sol.

Choix de la base :

Les efforts appliqués sur la structure seront transmis aux appuis qui sont les haubans et la base.

✓ Plaque de base :

S'installe directement sur un sol nivelé.

✓ Base articulée :

Repose directement sur la plaque de base. Une liaison double pivot permettra le Pivotement dans toutes les directions pour faciliter le montage et l'érection du mât.

En plus, elle éliminera les moments de flexion.

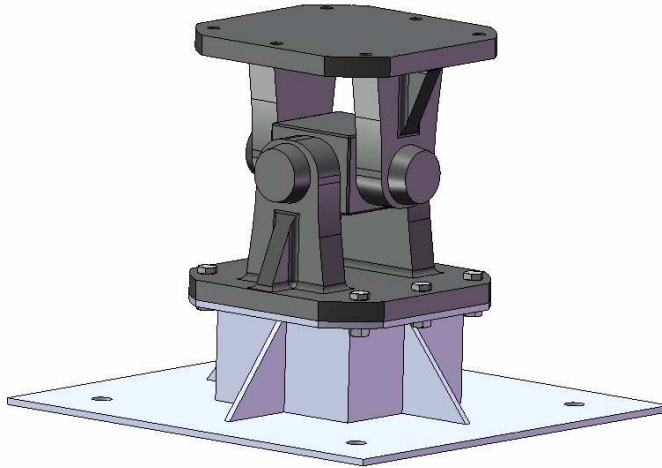


Figure 4.5 : La base de la structure

Choix du matériau :

i. Introduction :

Le matériau qui sera utilisé pour la construction de la structure doit répondre à plusieurs critères (résistance contre la corrosion, résistance à la rupture, légèreté, assemblage non permanent.....)

Afin de choisir le matériau le plus adéquat à la construction de la structure une étude comparative est indispensable. L'aluminium, acier, le PVC et les composites sont tous des types à étudier.

Les matières plastiques tel que le PVC, à part leur légèreté, ils présentent une rigidité et une résistance plus faible et aussi des pertes de vieillissement sous contraintes.

Concernant les matériaux composites même s'ils présentent une bonne rigidité, ils ne sont pas disponibles sous forme de profilés et présentent des assemblages fragiles.

Donc les deux matériaux à comparer sont l'aluminium et l'acier.

ii. Etude comparative Aluminium/Acier :

a. Propriété de base du fer et de l'aluminium :

j.		Fer	Aluminium
k.	Poids spécifique (kg/dm ³)	7,85	2,7
	Température de fusion (°C)	1536	660
l.	Coefficient de conductibilité thermique (W/mK)	75	238
m.	Coefficient de dilatation thermique (1/K)	12,3x10 ⁻⁶	23,8x10 ⁻⁶
	Module d'élasticité E (MPa)	210.000	72.000
n.	Résistance à la traction R _m (MPa)	270-410	80
o.	Limite d'allongement R _{p0,2} (MPa)	180-250	35

Tableau 4 : comparaison des propriétés de base fer/aluminium

b. Nuances d'acier utilisé dans la construction des pylônes :

Les nuances d'aciers les plus utilisés sont S235JR et S355J0 conformément aux prescriptions de la norme NFEN 10025.

L'acier S235 (anciennement appelé acier E24) convient plus particulièrement aux barres de grand élancement mécanique, telles que les diagonales et les treillis de contre flambement.

L'acier S355 (anciennement appelé acier E36) est réservé aux barres de faible élancement mécanique telles que les membrures. Il permet des gains appréciables de masse mais est d'un prix plus élevé que l'acier E24.

c. Les alliages de l'aluminium utilisés dans la construction des pylônes :

Dans ses principales applications, l'aluminium est utilisé sous forme d'alliages, ce qui augmente sa résistance mécanique, mais souvent au détriment d'autres propriétés.

Pour trouver le meilleur compromis entre les propriétés pour un usage donné, les métallurgistes agissent sur la composition de l'alliage, mais aussi sur les traitements thermiques ou thermomécaniques auxquels il est soumis.

Les éléments d'alliage les plus courants sont le magnésium, le silicium, le cuivre, le manganèse et le zinc, seuls ou en combinaison. Les teneurs sont en général de l'ordre de quelques unités %. Il existe plusieurs centaines d'alliages commerciaux.

Les alliages utilisés dans la construction des pylônes sont les alliages (magnésium et silicium).

d. Tableau comparatif Acier/Aluminium :

caractéristique	Acier	Aluminium	commentaire
Module d'élasticité	210 000 MPa	72 000 MPa	Une structure d'aluminium se déforme 3 fois plus qu'une structure en acier. La tenue de l'aluminium au flambement est moins satisfaisante qu'avec l'acier mais le procédé de fabrication des profilés (filage) permet d'obtenir une section bien adaptée aux efforts de flambement.
Poids spécifique	7 ,85 Kg /dm ³	2,7 Kg /dm ³	Un pylône en aluminium a une masse environ trois fois plus faible qu'un même pylône en acier. Un pylône en aluminium ne nécessite que des engins de manutention très légers qui ne demandent généralement pas la réalisation de voies d'accès importantes.
Resistance contre la corrosion	Faible	Très bonne	L'aluminium offre une résistance accrue à la corrosion grâce à la couche d'oxyde qui se forme naturellement à sa surface.
Coût	Moins cher	Cher	Le coût, montage compris, d'un pylône en alliage d'aluminium en terrain facile est plus cher (de l'ordre de 20%) que le pylône en acier galvanisé de même utilisation.

Tableau 5 : comparaison acier /aluminium



Cette étude comparative montre que l'aluminium est léger, présente une très bonne résistance contre la corrosion. L'acier de son côté est moins cher mais présente l'inconvénient du poids et de la corrosion. Puisque le critère le plus important pour notre structure est la légèreté on va opter pour l'aluminium et on cherchera la nuance qui possède les caractéristiques mécaniques les plus élevées.

Cette nuance devra aussi convenir au profilage par extrusion, puisque notre structure doit être en profilés aluminium.

iii. Choix de la nuance d'aluminium :

Dans un premier temps, une comparaison entre la résistance mécanique des différentes nuances d'alliages sera utile pour réduire la plage de choix.

Les alliages de corroyés sont utilisés pour la fabrication des profilés.

Le tableau suivant compare la résistance des principaux alliages d'aluminium corroyés.

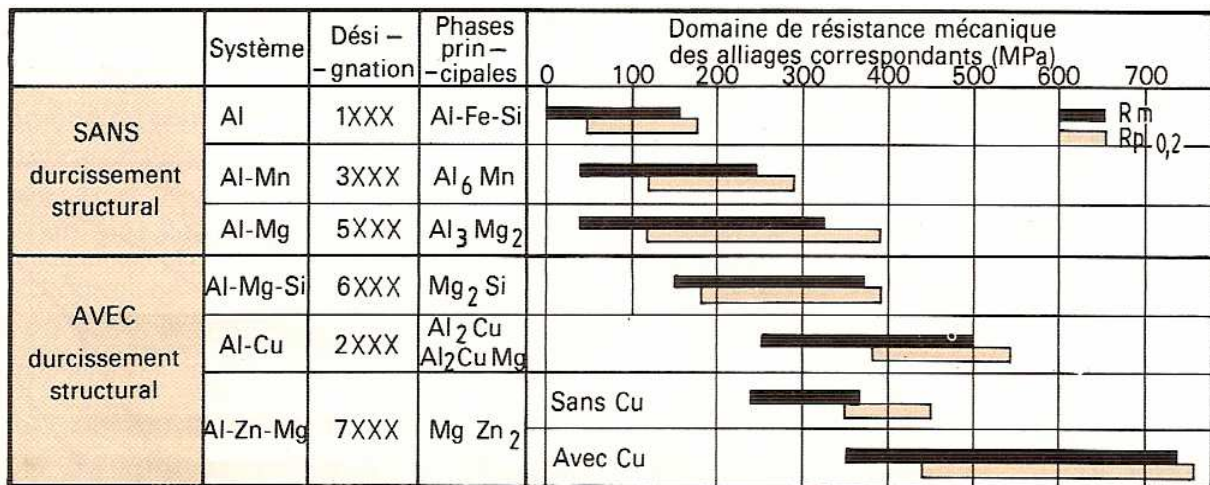


Tableau 6: résistance des principaux alliages d'aluminium corroyés

On constate que les alliages avec durcissement structural sont plus résistants mécaniquement, donc notre choix sera entre les trois alliages : Al-Mg-Si (6XXX), Al-Cu (2XXX) destiné principalement à la transformation par déformation plastique tel



que l'emboutissage et utilisé dans les carrosseries, certains de ces alliages ont des résistances mécaniques élevées mais une soudabilité et une résistance à la corrosion faible et Al-Zn-Mg (7XXX).

Les alliages trempants ayant une vitesse de trempe élevée (série 2XXX ou Al-Cu) présentent des défauts de soudage. Il peut également exister des dangers de corrosion feuilletante après soudage des alliages de la série 7XXX(ou Al-Zn).

La série la plus adéquate à notre cas est la série 6XXX.

Parmi les alliages 6XXX, l'alliage 6061 possède les meilleures propriétés mécaniques et la meilleure résistance à la corrosion.

Nuance	État	R_m (MPa)	$R_{p0,2}$ (MPa)	A %
6060 (A-GS/35) 6061	T 5	185	145	
	T 651 filé	310	275	17
6082	T 5	290	270	11
	T 4	230	130	20
	T 6	320	280	12,5

Le tableau suivant regroupe les propriétés de quelques alliages

Tableau 7: propriétés des alliages aluminium-silicium-magnésium

Parmi ces alliages l'état T 651 (trempé revenu dur avec détensionnement par traction) présente l'avantage d'être filé.

Le choix définitif du matériau est fixé pour l'aluminium 6061-T6.

CHAPITRE 5 : ANALYSE DE LA STRUCTURE PAR LA METHODE DES ELEMENTS FINIS

5.1 Calcul des structures par la méthode des éléments finis :

Dans ce paragraphe nous allons présenter le principe de base de la méthode des éléments finis du type déplacements pour pouvoir utiliser efficacement un logiciel existant dans le cadre d'un calcul de structure dans le domaine linéaire statique.

Principe de la méthode :

La méthode basée sur l'approche déplacements consiste à minimiser l'énergie potentielle d'une structure et aboutir à l'équation algébrique suivante :

$$\{F\} = [K]\{q\}$$

Où $\{F\}$ sont les forces et $\{q\}$ les déplacements inconnus aux nœuds de la structure maillée (forme discrète des équations d'équilibre), la matrice $[K]$ est appelée matrice de rigidité globale de la structure ; elle est toujours symétrique définie positive. Cette matrice de rigidité globale $[K]$ est obtenue par assemblage des matrices des rigidités élémentaires $[K_{ei}]$. Ces dernières sont obtenues à partir de l'expression de l'énergie de déformation par éléments :

$$W_{ei} = \tau = \frac{1}{2} \{q_{ei}\}^t [K_{ei}] \{q_{ei}\}$$

Les logiciels de calcul des structures par la méthode des éléments finis proposent à l'utilisateur un large choix d'éléments: barres, poutres, plaques, coques, liaisons élastiques ou rigides... Pour traiter différents problèmes de structures aussi complexes soient-ils. Actuellement ces logiciels sont dotés d'interfaces facilitant l'introduction des données matérielles, géométriques, des conditions aux limites, et permettant aussi le contrôle de la modélisation, le maillage, la visualisation des résultats...



Parmi Les logiciels les plus courants on peut citer SAMCEF, ABAQUS, ROBOBAT...

5.2 Présentation du logiciel ROBOBAT :

Description générale :

ROBOBAT est un Logiciel de calcul de structures très performant qui est utilisé dans différents domaines et métiers (Bâtiment et Béton Armé ; charpente métallique ; charpente en bois...) Il permet de modéliser, de vérifier ou de dimensionner plusieurs types de structures, il permet aussi la visualisation 3D du modèle ainsi que la génération des notes de calcul pour la structure dimensionnée.

Caractéristiques du logiciel :

Les caractéristiques principales du logiciel Robot sont les suivantes :

- Définition de la structure en mode entièrement graphique dans l'éditeur conçu à cet effet.
- Possibilité d'utiliser un grand nombre d'éléments.
- Possibilité de présentation graphique de la structure étudiée et de représenter à l'écran les différents types de résultats de calcul (efforts, déplacements, travail simultané en plusieurs fenêtres ouvertes, etc.).
- Possibilité de calculer (dimensionner) une structure selon plusieurs normes.
- Possibilité d'effectuer l'analyse statique et dynamique de la structure.



5.3 Vérification du mât modulaire:

Hypothèses de charges climatiques :

La structure de dépannage est destinée à remplacer des supports endommagés, en général, par des conditions climatiques extrêmes. Ces conditions persistent durant l'opération de dépannage. Ceci impose que la vérification de la structure prenne en compte les conditions climatiques les plus défavorables. Ces conditions concernent en général le vent et le givre.

L'épaisseur du givre est calculée sur Excel à partir du coefficient de surcharge maximal, $m=1,23$ relevé sur l'abaque (Annexe1).

$$e = 0,5 \text{ cm}$$

D'après la carte de répartition des zones de vent au Maroc (Annexe4) et celle du réseau électrique THT de l'ONE (Annexe5), la zone de vent maximal contenant une ligne électrique THT est la zone 4.

Les efforts générés par le vent de la zone 4 sur les nœuds du mât de la structure seront calculés sur ROBOBAT selon la norme NV65.

Le logiciel ROBOBAT ne permet pas la génération des efforts du vent sur les structures haubanées. Donc nous sommes contraints d'introduire les efforts du vent sur les haubans manuellement :

La pression du vent de la zone 4 est $p = 158 \frac{\text{daN}}{\text{m}^2}$.

La section des haubans proposés est 1 cm^2 , donc le diamètre est :

$$D = 1,13 \text{ cm.}$$

Donc la force linéique appliquée par le vent sur les haubans est :

$$p * D = 1,79 \text{ daN.}$$

Proposition du cas de dépannage :

i. Description :

Supposant la destruction de trois pylônes d'alignement supportant une ligne 400 KV simple terre à deux faisceaux. La déviation de la ligne par une distance d'environ 200m s'impose à fin de ne pas entraver les travaux de reconstruction des pylônes.

Dans ce cas, nous proposons une ligne de dépannage déviée par 40° et constituée de six supports de 32 m séparés par des portées de 300 m.

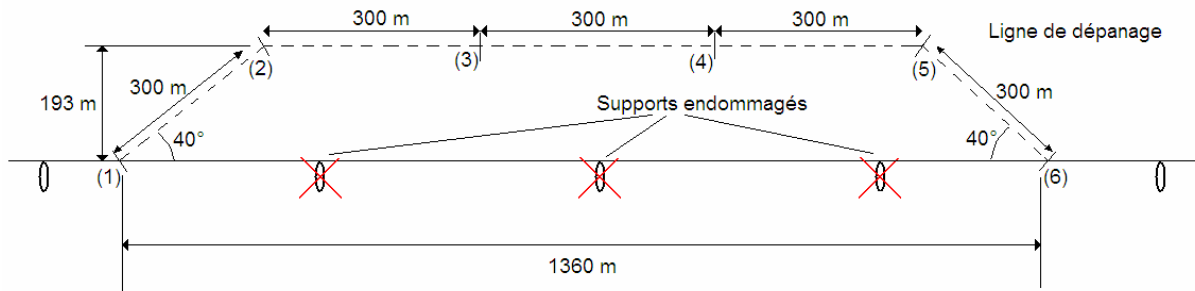


Figure 5.1: Schéma du cas de dépannage

Les portées de la ligne de dépannage sont supposés nivelées car c'est le cas défavorable. En effet, les portées dénivelées peuvent respecter la garde au sol avec des paramètres (tension horizontale dans les câbles) moins importants que les paramètres requis par les portées nivelées :

D'après les formules présentées dans le chapitre 3 nous avons :



- Pour une portée dénivelée la flèche est : $f_2 = \frac{-h}{2} + \frac{ab}{8\rho}$
- Pour une portée nivelée la flèche est : $f_2 = \frac{ab}{8\rho}$

Pour respecter la même garde au sol pour les deux portées il faut que les deux flèches soient identiques :

$$\frac{ab}{8\rho_{nivelée}} = \frac{-h}{2} + \frac{ab}{8\rho_{dénivelée}}$$

Donc $\rho_{nivelée} > \rho_{dénivelée}$

ii. Chargement :

❖ **Paramètre :**

Le choix du paramètre pour la ligne de dépannage doit respecter la flèche maximale fixée dans le chapitre précédent. Sa valeur est, en général, comprise entre 1100 et 1600m, pour les lignes THT. Nous prenons pour ce cas de dépannage un paramètre de 1100m.

❖ **Efforts appliqués par les câbles conducteurs sur les supports de dépannage :**

D'après la Figure 5.1 on distingue deux cas de figure ; celui des supports (1), (2), (5) et (6) qui se caractérise par un angle de 40° et celui des supports (3) et (4) qui présente un angle nul. Donc le calcul des efforts appliqués par les conducteurs sur les supports revient au calcul des efforts appliqués sur les supports (1) et (3).

- **Introduction du paramètre et des conditions climatiques :**

Epaisseur du givre (cm)	0,500
-------------------------	-------



Poids du givre (daN/m)	0,333
Pression du vent (daN/m ²)	158,000
Effort du vent (daN/m)	6,486
Coefficient de surcharge	1,228
Paramètre (m)	1600,000

- **Introduction des caractéristiques géométriques des portées :**

Support (1)			
Portée 1		Portée 2	
Portée (m)	300,000	Portée (m)	300,000
Angle d'arrivée alpha 1 (degré)	0	Angle de sortie alpha 2 (degré)	0
Dénivelée (m)	0,000	Dénivelée (m)	0,000
Portée oblique (m)	300,000	Portée oblique (m)	300,000
T01 (daN)	3033,361	T02 (daN)	3033,361
flèche basse (m)	10,227	flèche basse (m)	10,227
Tension au point d'accrochage	2088,684	Tension au point d'accrochage	2088,684

Portée 1		Portée 2	
Portée (m)	300,000	Portée (m)	300,000
Angle d'arrivée alpha 1 (degré)	20	Angle de sortie alpha 2 (degré)	20
Dénivelée (m)	0,000	Dénivelée (m)	0,000
Portée oblique (m)	300,000	Portée oblique (m)	300,000
T01 (daN)	2069,443	T02 (daN)	2069,443
flèche basse (m)	10,227	flèche basse (m)	10,227
Tension au point d'accrochage	2088,684	Tension au point d'accrochage	2088,684

- **Efforts appliqués au support :**



Efforts appliqués au support (1) (daN)	
ETAT	ETAT 1
T01	3033,36
T02	3033,36
Va	563,12
Ha	1945,77
La	0,00
RESULTANTE	2025,62

Efforts appliqués au support (3) (daN)	
ETAT	ETAT 1
T01	2069,44
T02	2069,44
Va	563,12
Ha	4155,49
La	0,00
RESULTANTE	4193,47

Les efforts verticaux appliqués aux deux supports sont identiques. Mais l'effort horizontal appliqué au support (3) est plus important à celui appliqué au support (1). Ainsi la vérification de la structure doit prendre en compte le chargement appliqué au support (3). Ces efforts doivent être multipliés par 2 car la ligne est à deux faisceaux.

❖ **Cas de charge et combinaisons :**

Les cas de charge considérés sont :

- ✓ Le poids propre.
- ✓ Les efforts appliqués par les conducteurs.
- ✓ Le chargement du vent provenant de la première direction réglementaire, selon NV65.

- ✓ Le chargement du vent provenant de la deuxième direction réglementaire, selon NV65.

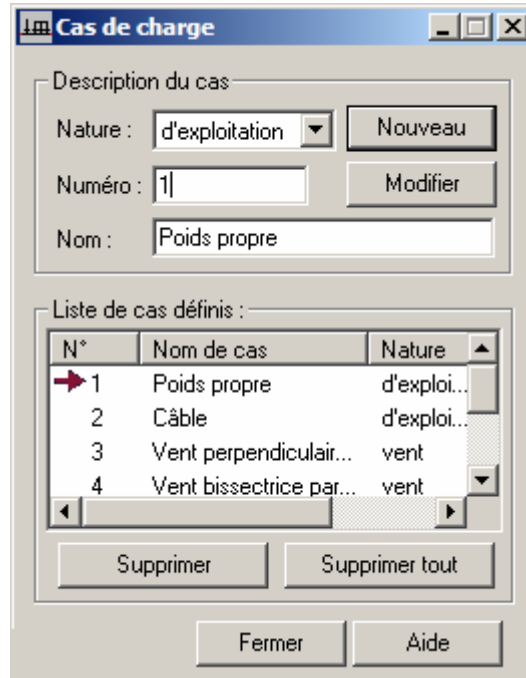


Figure 5.2: Introduction des cas de charge

Les combinaisons des cas de charge considérées sont :

- ✓ Poids propre + Câble + Vent 1
- ✓ Poids propre + Câble + Vent 2

Combinaison	Nom	Type d'analyse	Nature de la	Nature du cas	Définition
5	COMB1	Combinaison no	ELU		(1+2+3)*1.50
6	COMB2	Combinaison no	ELU		(1+2+4)*1.50

Figure 5.3: Introduction des combinaisons

iii. Modélisation :

Les sections :

- Les montants CAE 100x10 sont considérés comme poutres.
- Les triangulations CAE 60x6 sont considérées comme barres.

Les câbles :

Les haubans, les câbles d'ancrage de la base et les câbles de suspension des isolateurs sont modélisés en éléments câble.

Les appuis :

- Les appuis des câbles fixent les trois déplacements.
- La base de la structure est appuyée par une liaison double pivot fixant les trois déplacements et la rotation autour de l'axe Z.

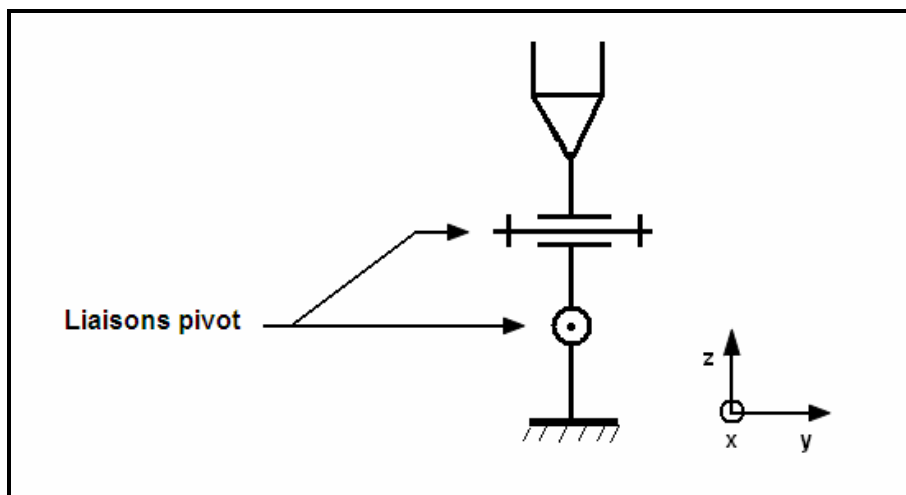


Figure 5.4: Schéma cinématique de la liaison de la base

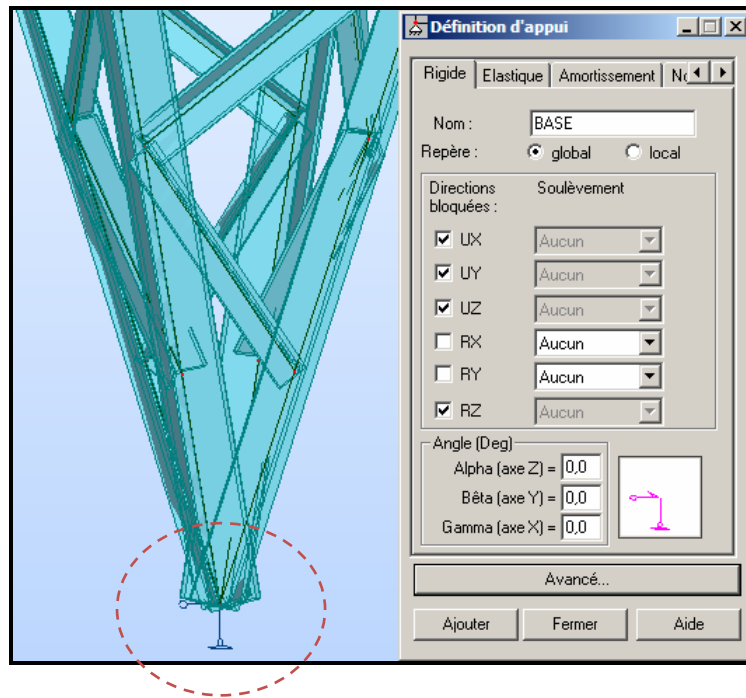


Figure 5.5: Introduction de la liaison de la base

Les isolateurs :

Le catalogue des isolateurs ne fournit ni la contrainte admissible maximale ni le module d'élasticité du matériau. Donc il est impossible d'introduire les isolateurs sur Robobat comme éléments déformable. Le seul critère sur lequel nous pouvons nous basés pour vérifier la tenue mécanique des isolateurs est l'effort admissible maximal précisé dans le catalogue. Pour cela, nous avons modélisés les isolateurs en liaisons rigides. Les efforts transmis par ces liaisons seront comparés aux efforts spécifiés par le fabriquant.

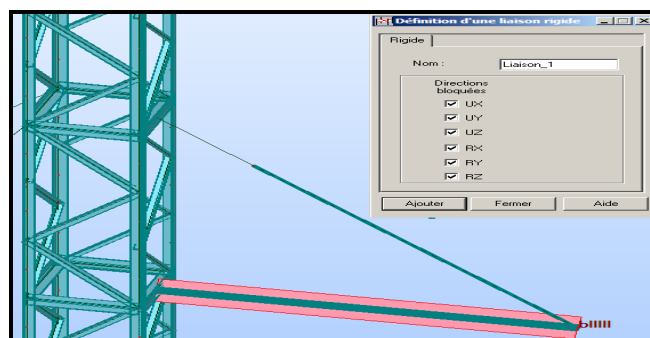


Figure 5.6: Introduction de la liaison rigide

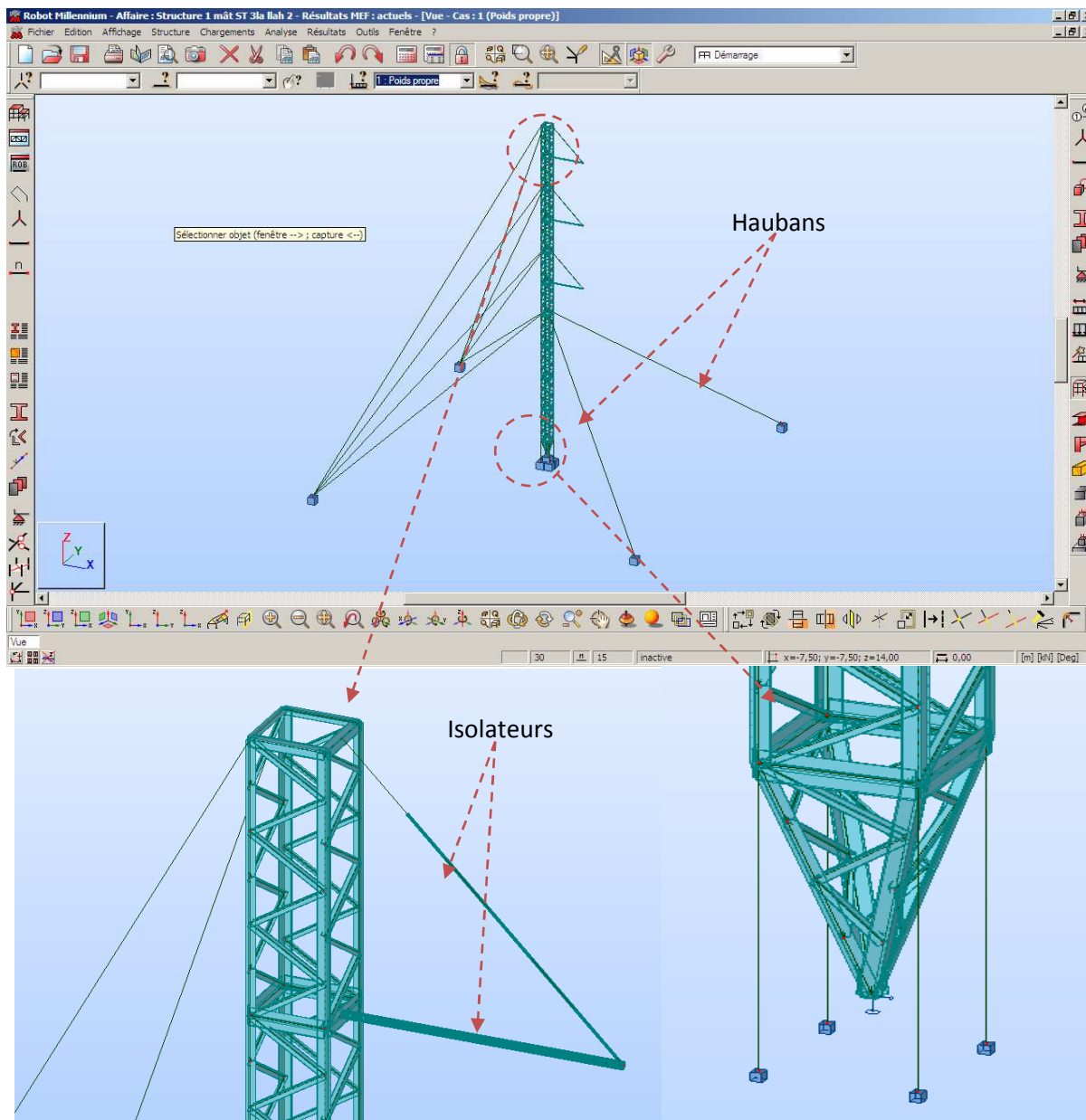


Figure 5.7: Vue générale de la structure

❖ **Génération de l'effort du vent et du givre :**

ROBOBAT contient une fonction qui sert à générer les charges de givre et vent sur les structures de type pylônes de type treillis, selon les règles de calcul NV65.

Les entrées de la fonction sont :

- ✓ La région du vent (1, 2, 3, 4, 5)

- ✓ Le type du vent (extrême, normal)
- ✓ La nature du site (exposé, protégé, normal)
- ✓ La hauteur de la structure

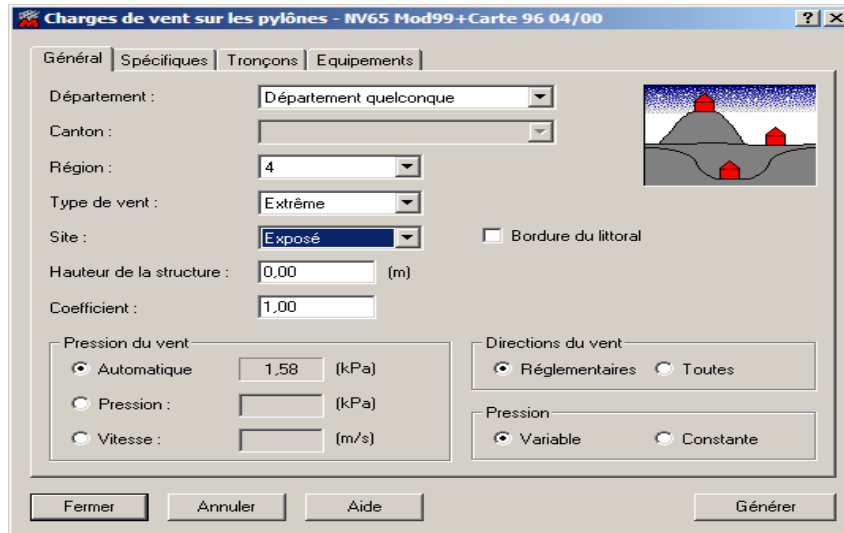


Figure 5.8: Génération des efforts du vent et neige (1)

La fonction permet aussi l'introduction de l'effet givre et la prise en compte des actions dynamiques du vent.

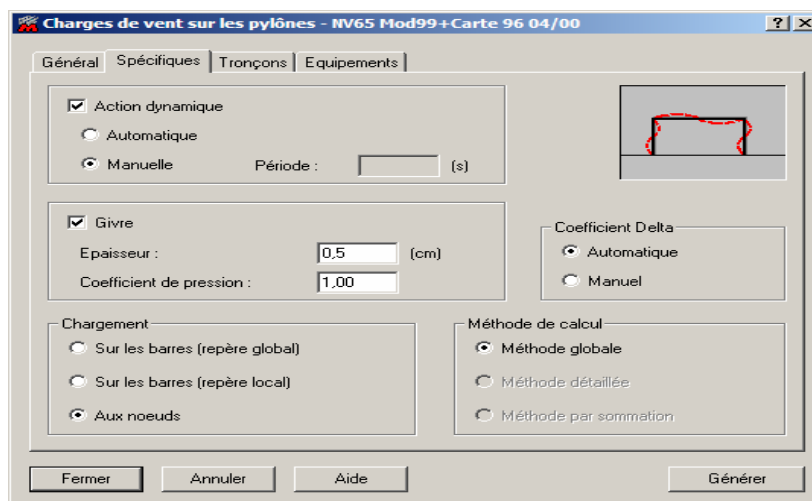


Figure 5.9: Génération des efforts du vent et neige (2)

A fin de prendre en compte les efforts du vent le plus défavorable, nous choisissons :

- ✓ La région du vent : 4
- ✓ Le type du vent : extrême
- ✓ La nature du site : exposé.
- ✓ La hauteur de la structure : prise automatiquement par le logiciel.

En ce qui concerne l'effet givre, comme il est déjà précisé, l'épaisseur choisie est 0,5 cm. D'autre part, la considération de l'effet dynamique du vent exige l'introduction de la période propre de la structure. Pour cela, nous avons amené une analyse modale sur ROBOBAT afin de déterminer le mode propre de la structure. Le tableau suivant présente les résultats de cette analyse.

Cas	Valeur propre	Fréquence (Hz)	Période (sec)	Précision	Pulsation (1/sec)
1	68,72	1,32	0,76	0,00	8,29

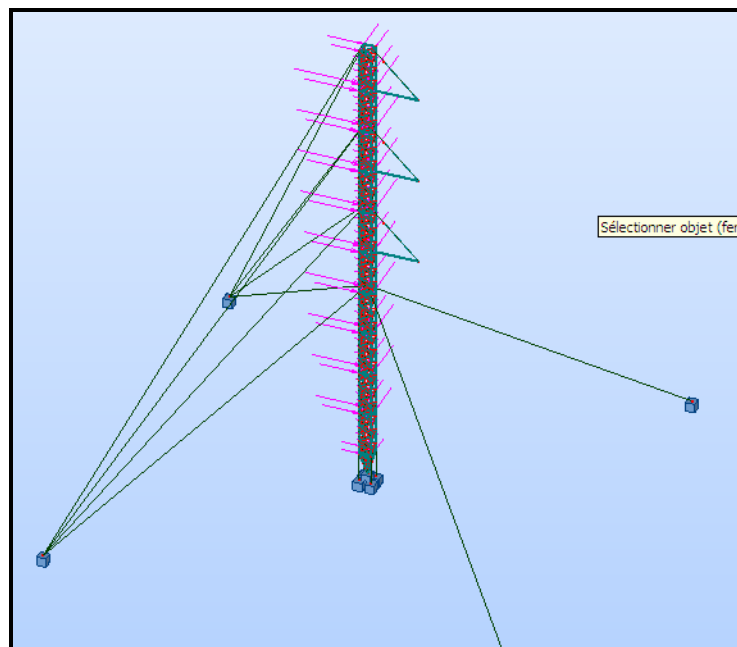


Figure 5.10: Chargement du vent (2ème direction réglementaire NV65)

iv. Analyse de la structure:

- **Réglage des prétentions des haubans :**

Avant d'entamer l'analyse de la structure il faut régler les prétentions dans les câbles de telle sorte que la structure ait une position verticale. Dans un premier temps, nous avons pris une tension de 0,3 KN dans les haubans accrochés à la droite de la structure (figure) et une tension de 0,07 KN dans les haubans de l'autre côté. La figure ci-dessous présente le déplacement de la structure.

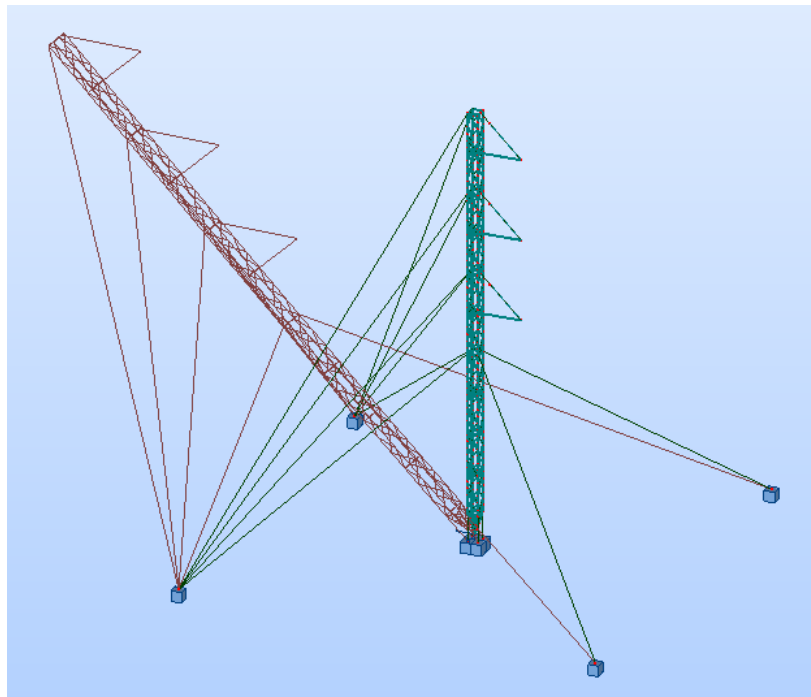


Figure 5.11 : Déplacement du mât avant réglage des prétentions

Pour redresser le mât nous avons diminué la prétention des câbles accrochés à gauche de la structure. La nouvelle prétention vaut 0,058 KN. La figure ci-dessous illustre la nouvelle position du mât.

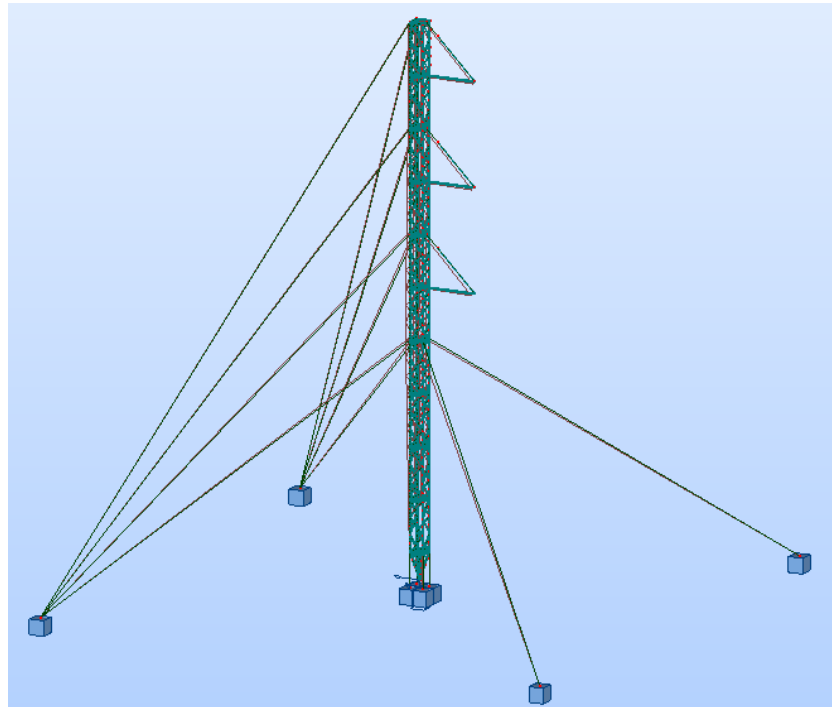


Figure 5.12: Déplacement du mât après réglage des prétentions

- **Analyse des triangulations CAE 60x6 :**

Les résultats de vérification des triangulations CAE 60x6 sont présentés par le graphe des ratios ci-dessous :

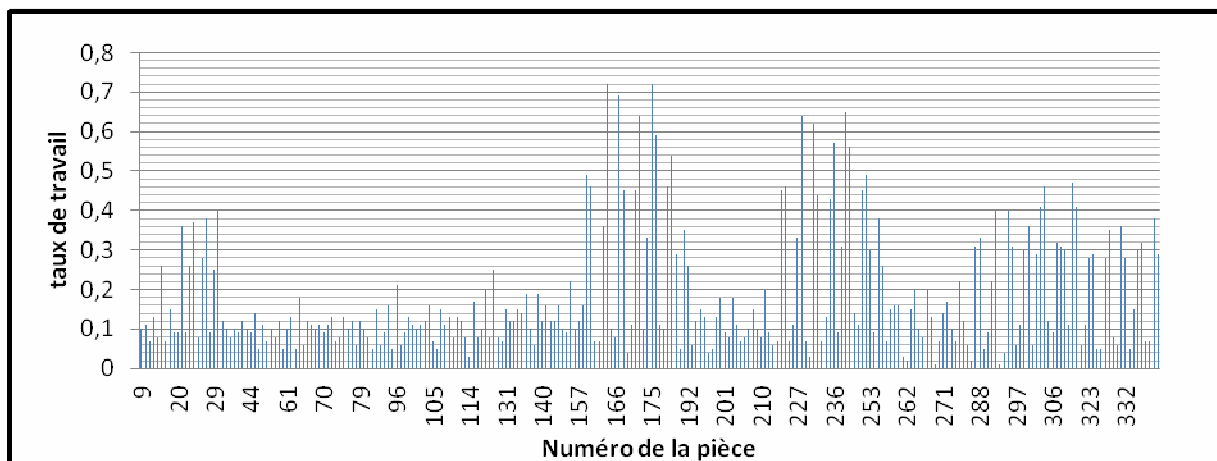


Figure 5.13: Vérification des triangulations CAE 60X6



Cette analyse se base sur le taux de travail dans les barres. Ce taux est défini comme valeur maximale des trois valeurs suivantes :

Pour les barres :

$$\frac{k1 \times \text{SigN} + kFy \times \text{SigFy} + kFz \times \text{SigFz}}{\text{Sig}_E}$$

$$\frac{1.54 \times \text{Tauy}}{\text{Sig}_E}$$

$$\frac{1.54 \times \text{Tauz}}{\text{Sig}_E}$$

Pour les poutres :

$$\frac{\text{SigN} + \text{KD} \times kFy \times \text{SigFy} + kFz \times \text{SigFz}}{\text{Sig}_E}$$

$$\frac{1.54 \times \text{Tauy}}{\text{Sig}_E}$$

$$\frac{1.54 \times \text{Tauz}}{\text{Sig}_E}$$

Avec :

- Tauy : contrainte de cisaillement - direction y
- Tauz : contrainte de cisaillement - direction z
- SigN : contrainte de compression totale
- SigFy : contrainte de flexion My dans la fibre supérieure
- SigFz : contrainte de flexion Mz dans la fibre droite
- K1 : coefficient d'amplification des contraintes de compression



- KD : coefficient de longueur de déversement.
- k_{Fy} : coefficient d'amplification des contraintes de flexion, dû au flambement par rapport à l'axe z.
- k_{Fz} : coefficient d'amplification des contraintes de flexion, dû au flambement par rapport à l'axe z.

- **Constat :**

Nous constatons que les ratios des barres CAE 60x6 ne dépassent pas 0,7. Donc, les sections sont correctes au niveau des triangulations. Mais la valeur moyenne des ratios est 0,15, ce qui veut dire que la disposition géométrique des barres n'est pas optimisée.

- **Modification apportée :**

Nous allons rectifier les modules en diminuant le nombre de barres et en changeant leur disposition. La figure ci-dessous illustre les modifications apportées aux modules.

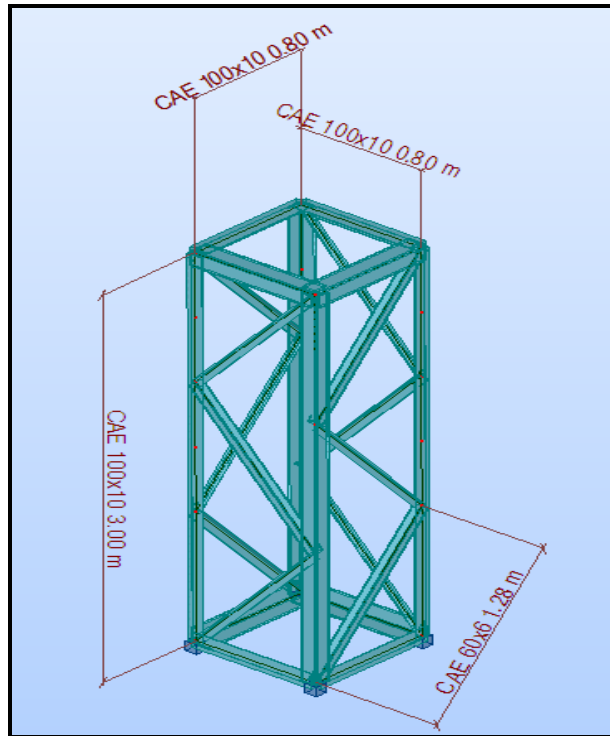


Figure 5.14: Dimensions du module après rectification

Après rectification, l'analyse de la structure a donné les résultats présentés sur le graphe ci-dessous :

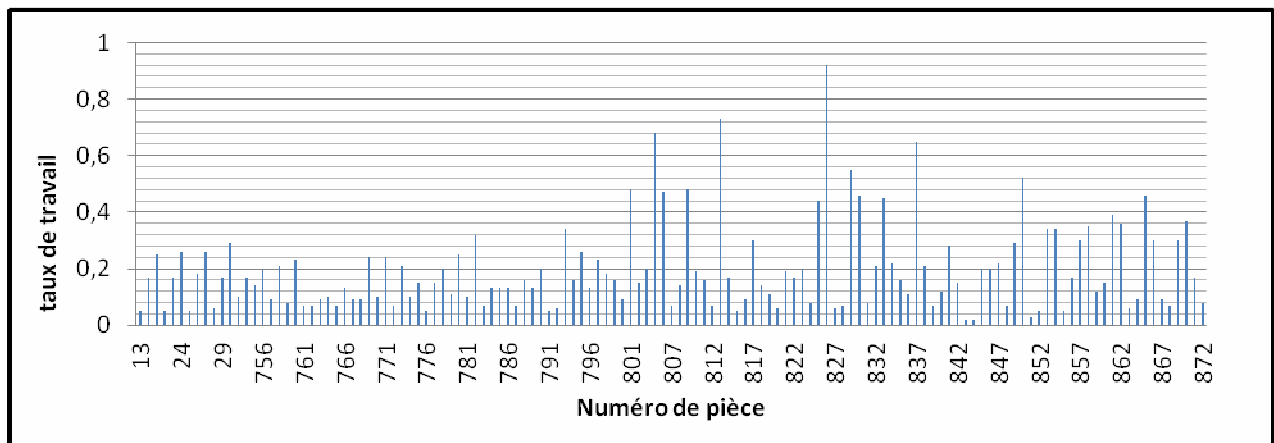


Figure 5.15: Vérification des barres après rectification



La valeur moyenne des ratios est 2. Donc les barres dans la nouvelle disposition travail plus que dans la disposition initiale. Mais il reste que même dans cette disposition la majorité des barres ne dépassent pas un ratio de 0,4. L'amélioration de ce seuil nécessite la modification des sections les moins sollicités. Ceci n'est pas acceptable dans notre cas car les modules doivent rester similaires et symétriques.

- **Analyse des traverses CAE 100x10 :**

La figure ci-dessous présente une capture du tableau de vérification des montants :

Pièce	Profil	Matériau	Lay	Laz	Ratio	Cas
704	✘ DCAE 100x10	ALUM	19.30	26.34	1.24	5 COMB1
688	✘ DCAE 100x10	ALUM	19.30	26.34	1.24	5 COMB1
720	✘ DCAE 100x10	ALUM	19.30	26.34	1.24	5 COMB1
689	✔ DCAE 100x10	ALUM	19.30	26.34	0.69	6 COMB2
705	✔ DCAE 100x10	ALUM	19.30	26.34	0.66	6 COMB2
721	✔ DCAE 100x10	ALUM	19.30	26.34	0.62	6 COMB2
691	✔ DCAE 100x10	ALUM	19.30	26.34	0.59	5 COMB1

Figure 5.16: tableau de vérification des montants

Les profilés incorrects sont : 704, 688 et 720. La figure ci-dessous montre leurs emplacements sur la structure.

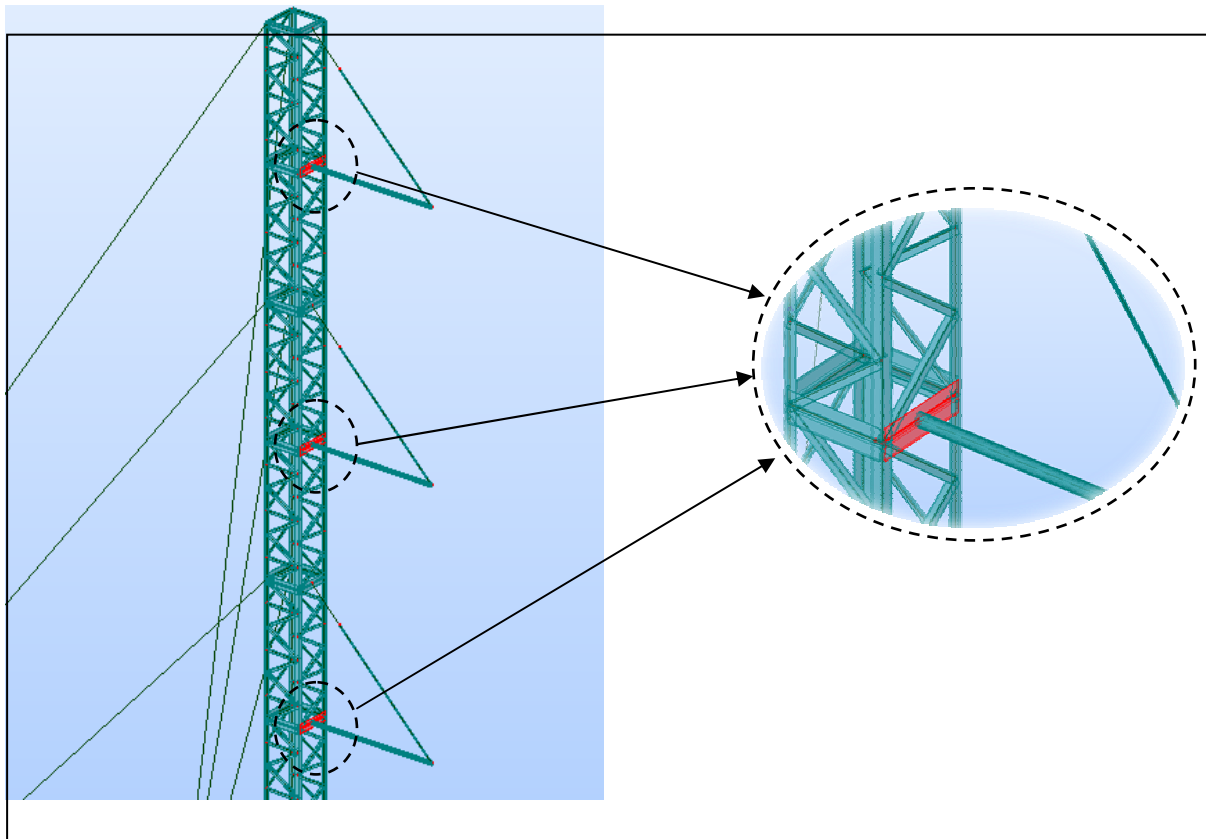


Figure 5.17: Localisation des profilés incorrects

- **Constats :**

Les profilés incorrects sont les traverses séparant les modules et supportant les isolateurs. Ceci est dû à l'effort transmis par les isolateurs. Nous avons supposé dans la modélisation que cet effort est transmis en un point qui est le centre des traverses incorrectes. Mais en réalité, les isolateurs sont équipés d'une base qui se monte sur la structure. Donc les efforts ne sont pas transmis en un point, mais sur toute la longueur de la barre.

- **Modification apportée :**

Afin de remédier à ce problème nous allons introduire la base de fixation de l'isolateur comme plaque d'épaisseur 10 mm.

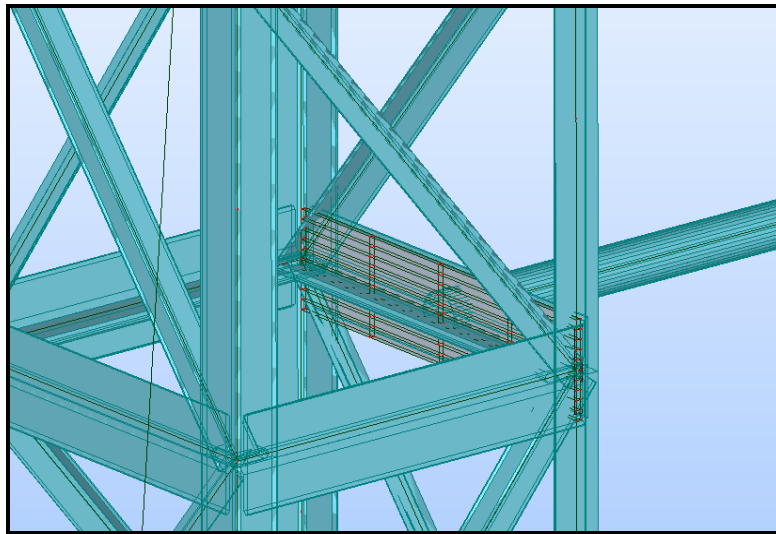


Figure 5.18: Modélisation de la plaque

Après l'introduction des plaques, la vérification des traverses confirme que la section CAE 100x10 est correcte. Le graphe ci-dessous illustre les résultats de cette analyse.

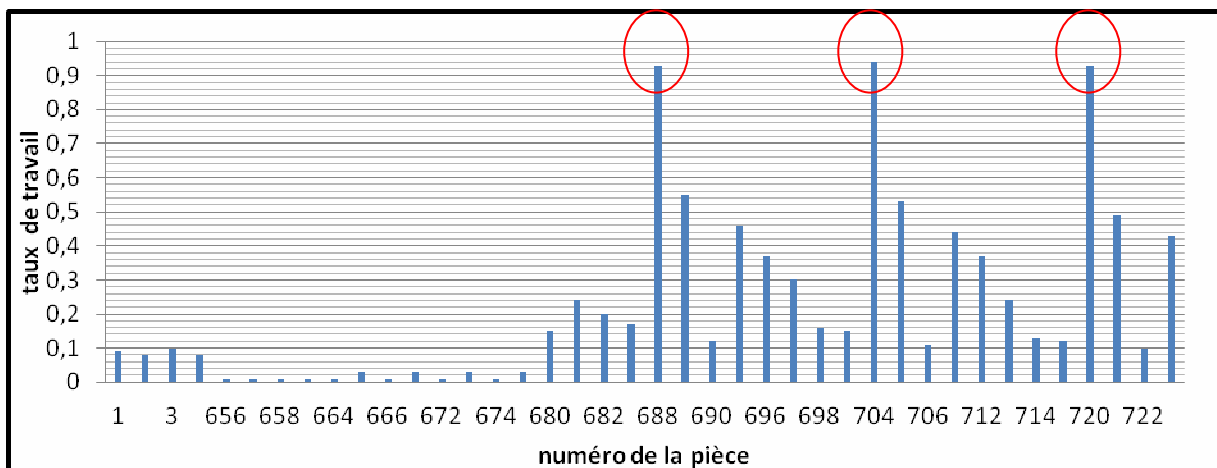


Figure 5.19: Vérification des traverses après introduction des plaques

D'après le graphe des résultats de la vérification, nous constatons que le taux de travail des traverses supportant les isolateurs est au dessous de 1. Mais, sa valeur, qui est 0,9 n'offre pas beaucoup de sécurité.

- **Modification apportée :**

A fin de diminuer le taux de travail des traverses nous avons proposés le renforcement de la base des modules supportant les isolateurs par une barre CAE 100x10. La figure ci-dessous illustre cette modification.

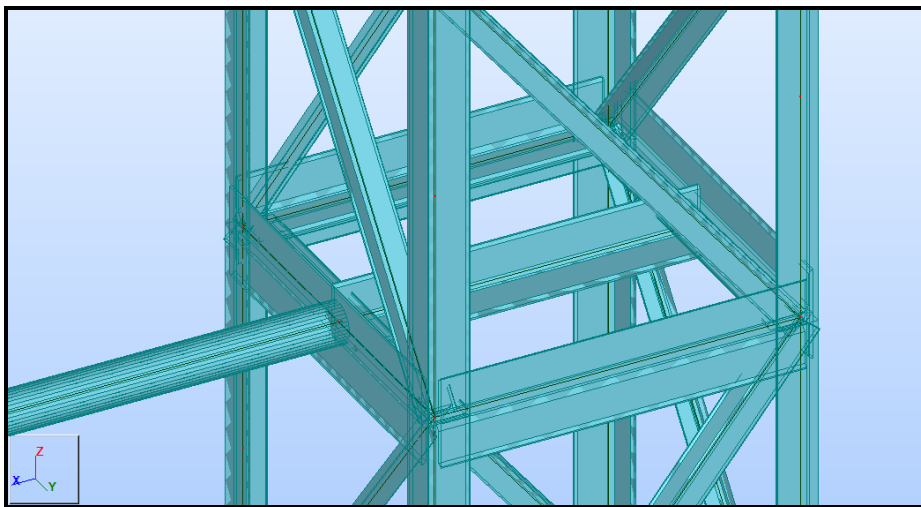


Figure 5.20: renforcement des bases des modules

Après cette modification l'analyse de la structure donne les résultats présentés sur le graphe ci-dessous.

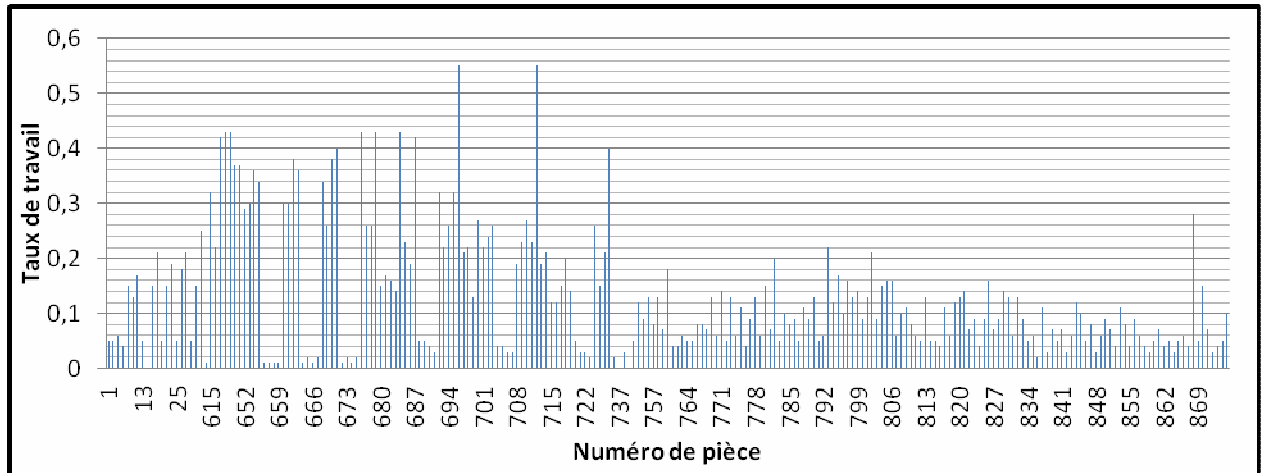


Figure 5.21: Analyse de la structure après introduction du renforcement

Nous constatons qu'aucune traverse ne dépasse un taux de travail de 0,55. Donc, cette modification a apporté plus de sécurité à la structure. Les traverses ajoutées ne seront pas soudées sur les modules. Elles seront boulonnées et elle ne seront montées que sur les modules supportant les isolateurs.

- **Analyse des montants CAE 100x10 :**

La vérification des montants verticaux a donnée les résultats présentés dans le graphe suivant :

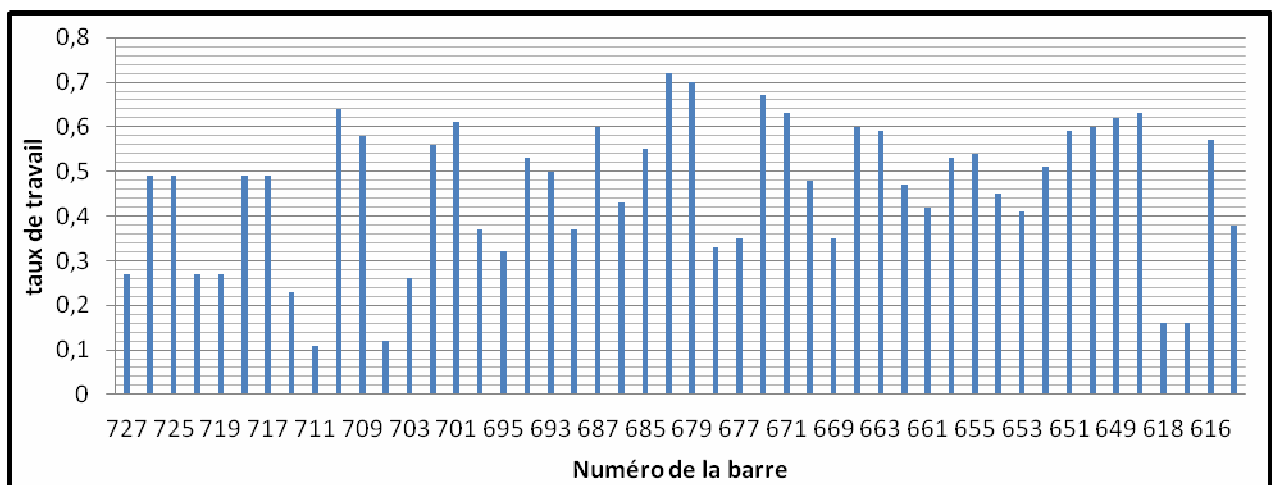


Figure 5.22: Analyse des montants 100x10

- **Constat :**

D'après les résultats les profilés sont tous corrects. La valeur moyenne des taux de travail est 0,45, ce qui veut dire que les efforts sont bien répartis sur les montants. Mais le ratio maximal est de 0,72, donc la diminution de la section peut être possible.

- **Modification apportée :**

Nous allons vérifier les montants avec les profilés proposés par le logiciel qui sont CAE 90x9. Le graphe ci-dessous présente les résultats de la vérification :

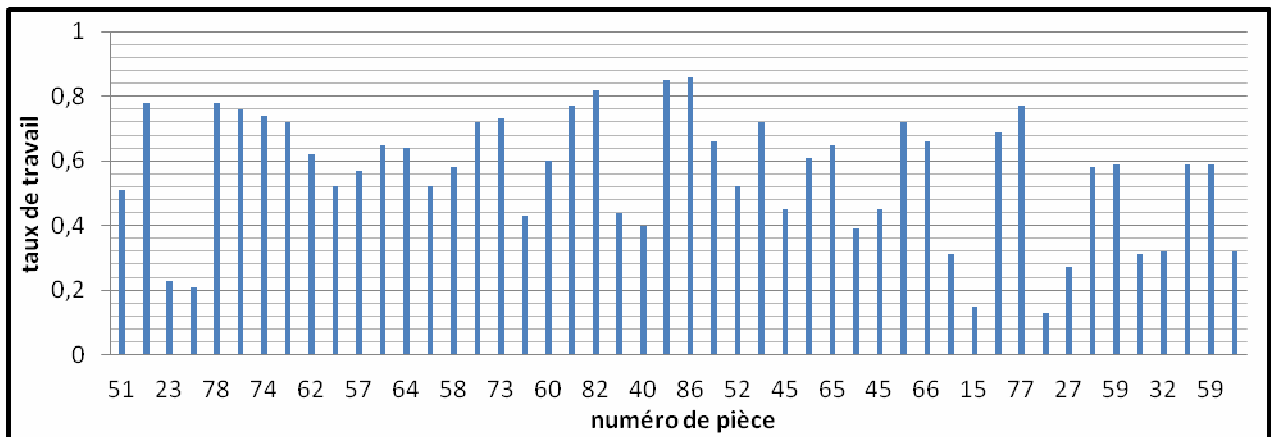


Figure 5.23: Analyse des montants avec les valeurs proposées par le logiciel

Nous constatons que toutes les sections sont correctes.

- **Conclusion :**

Après les modifications apportées aux modules de la structure. La masse des modules finals est 29Kg. Comparés aux modules initiaux pesant 44 Kg, nous constatons une diminution de masse 34%. Ceci facilitera de plus le transport des modules. La figure ci-dessous illustre un module avant et après modification.

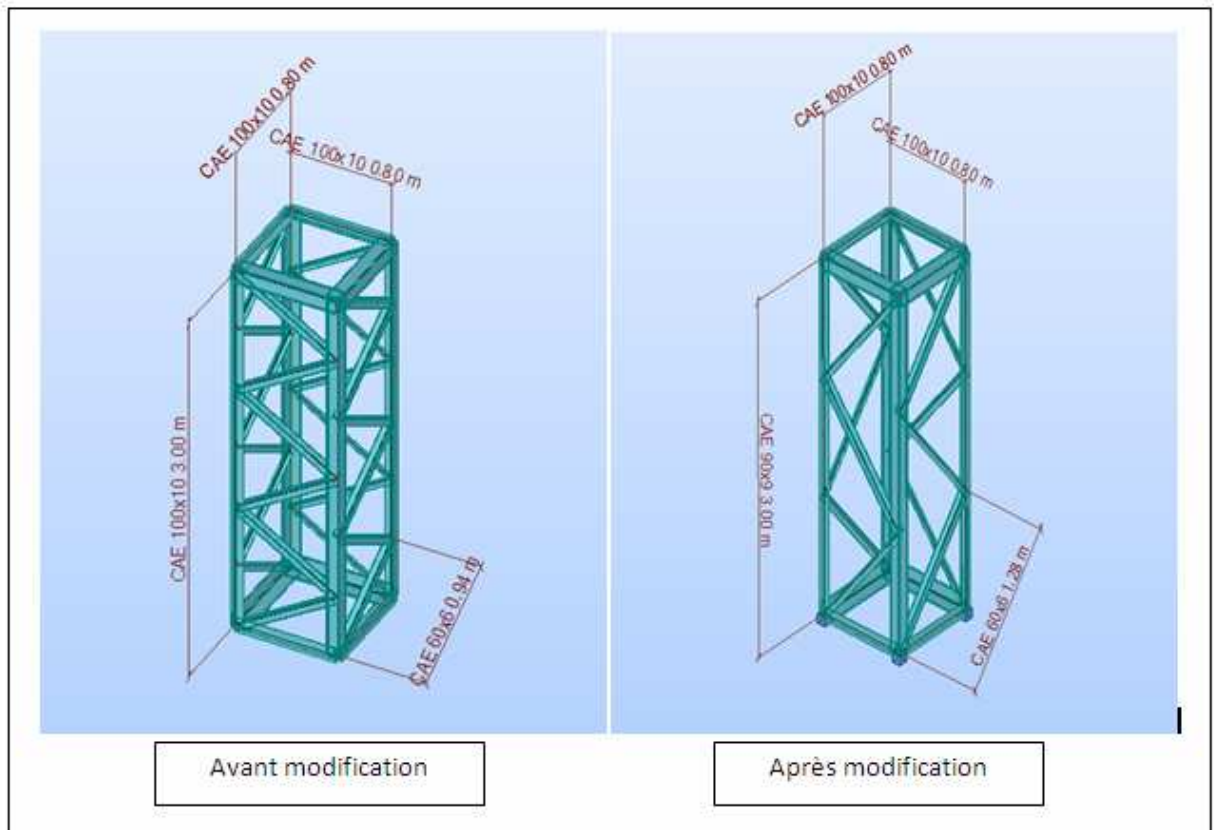


Figure 5.24: Comparaison des dimensions des modules avant et après modification

Les sections et dimensions des barres formant le module final sont présentées par le tableau suivant :

Section	nombre de barres	Longueur(m)	longueur totale(m)
CAE 60x6	12	1,28	15,36
CAE 90x9	4	3	12
CAE 100x10	8	0,8	6,4

Tableau 8: caractéristiques des barres formant le module final

Les dimensions du module de base sont présentées par la figure ci-dessous.

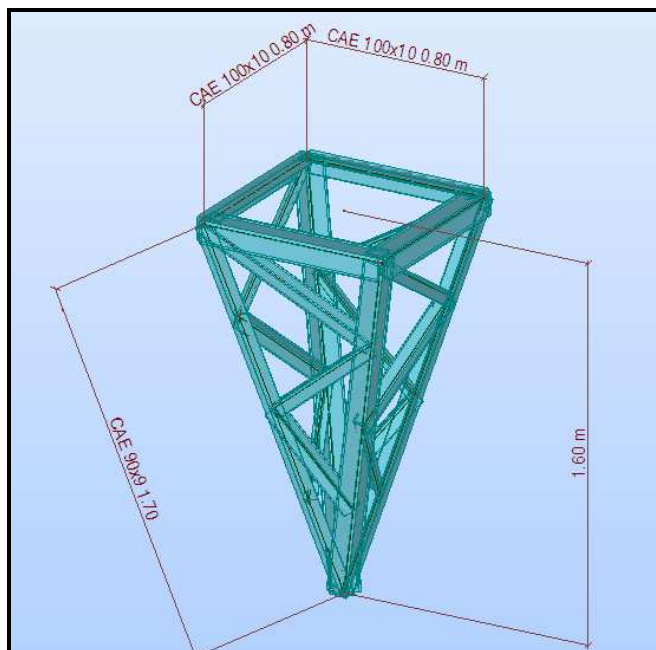


Figure 5.25: Dimensions du module de la base

Les sections et dimensions des barres formant le module de base final sont présentées par le tableau suivant :

Section	Nombre de barres	Longueur(m)	Longueur totale(m)
CAE 60x6	4	0,81	7,88
	4	0,65	
	4	0,51	
CAE 90x9	4	1,7	6,8
CAE 100x10	4	0,8	3,2

Tableau 9: caractéristiques des barres formant le module final de la base

5.4 Conception et vérification de la base :

Description :

La base est l'élément le plus sollicité de la structure. Elle se compose de deux éléments :

- Le joint de cardan :

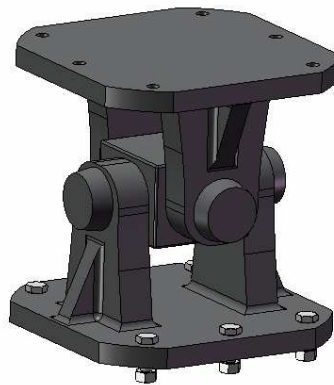


Figure 5.26: Joint de cardan

C'est l'élément qui assure la liaison double pivot. Ses axes seront montés par frettage sur les pallier.

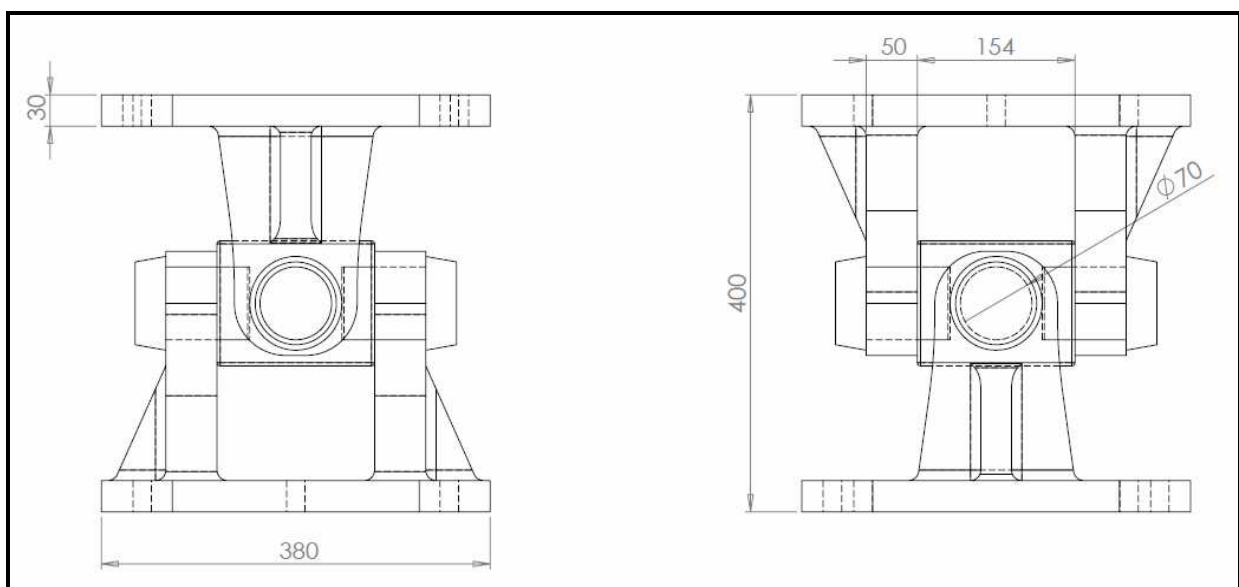


Figure 5.27: Dessin du joint de cardan

- La table :

Le rôle de la table est la fixation de la base au sol. Elle est en Aluminium 60 61 T6.

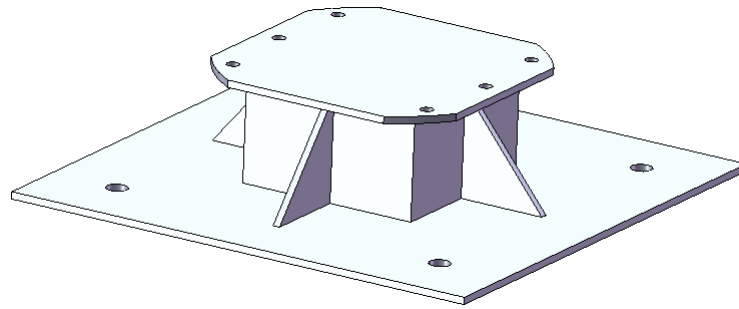


Figure 5.28: La table de la base

Vérification de la base :

Afin de vérifier la base nous avons utilisé le logiciel COSMOSWORKS. L'effort introduit sur le logiciel est la réaction à la base de la structure calculée sur RoboBat.

Cette réaction vaut : $R_z = 210 \text{ KN}$

La figure ci-dessous montre le chargement et le déplacement imposés à la base.

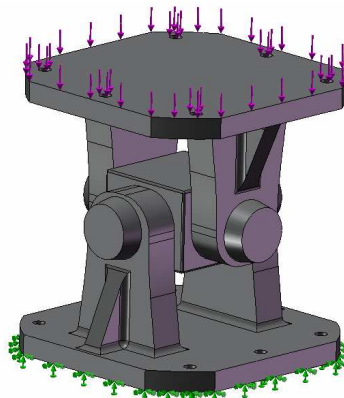


Figure 5.29: Chargement du joint de cardan

Après le chargement nous avons lancé le maillage et le calcul de la distribution du facteur de sécurité se basant sur la contrainte équivalente de Van Mises. Les figures ci-dessous illustrent ces étapes.

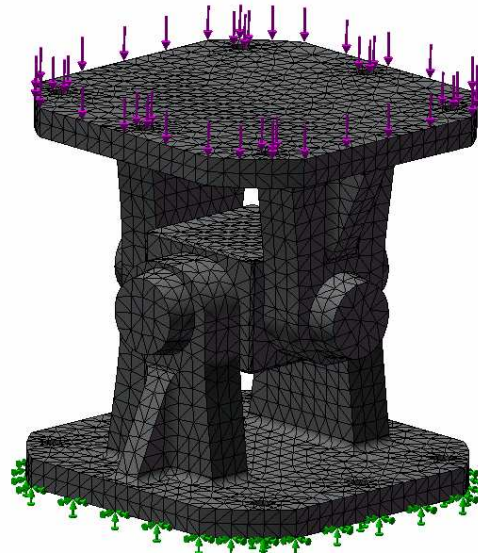


Figure 5.30: Maillage de la base

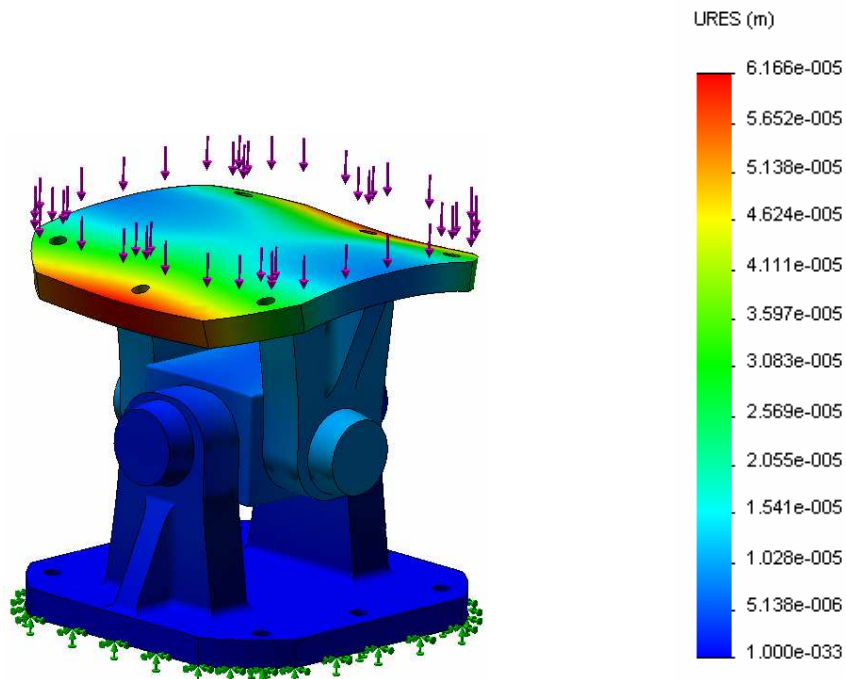


Figure 5.31: déplacement

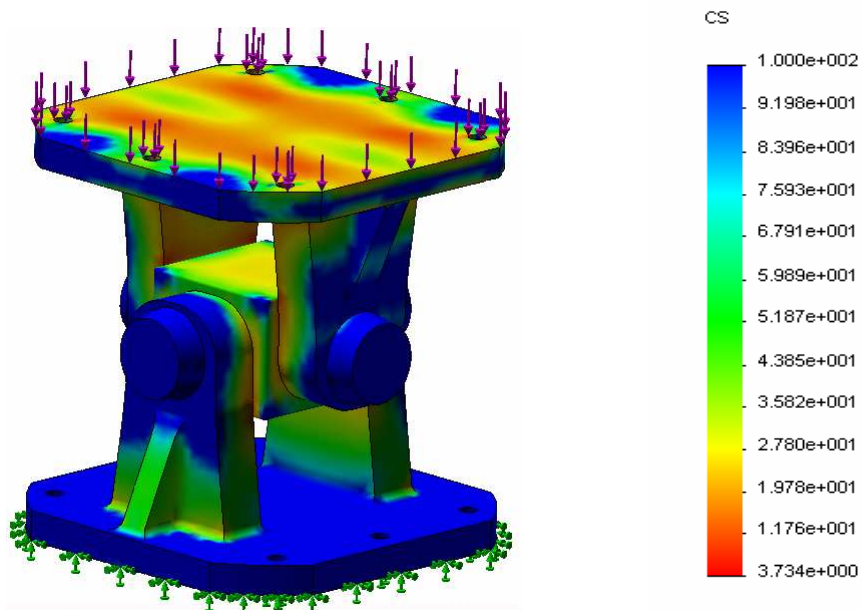


Figure 5.32: distribution du coefficient de sécurité

Le coefficient de sécurité minimal est 3,7. Donc le cardan est bien vérifié. Il reste maintenant à vérifier la table. Pour ce, nous avons appliqué le même effort appliqué au joint de cardan à la table. La figure ci-dessous illustre le chargement de la table et la répartition du coefficient de sécurité.

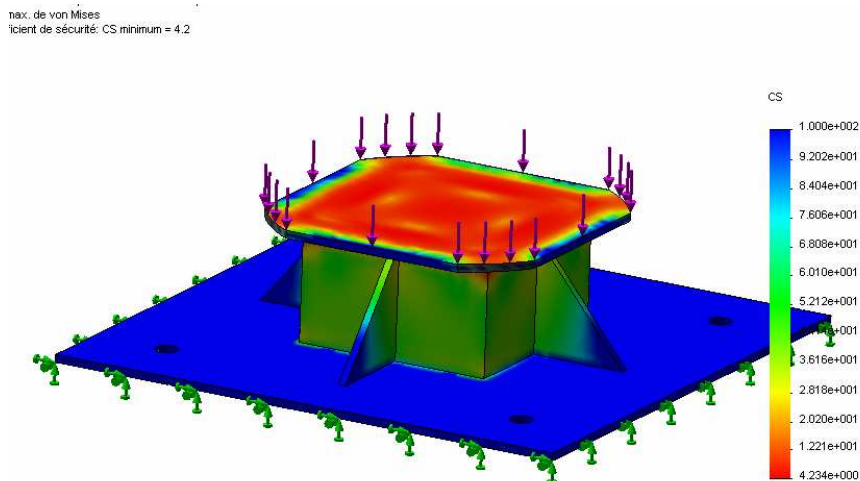


Figure 5.33: Coefficient de sécurité de la table

5.5 Vérification des isolateurs :

Comme nous l'avons déjà expliqué, la vérification des isolateurs se fera en comparant les efforts transmis par les liaisons rigide et ceux indiqués par le catalogue.

Pour l'isolateur POST la valeur de l'effort normal transmis par la liaison rigide est 44 KN. La valeur spécifiée par le catalogue (Annexe 2) est 210 KN. Alors cet isolateur est vérifié avec un facteur de sécurité de 4,9.

Pour l'isolateur de suspension la valeur de l'effort normal transmis par la liaison rigide est 28 KN. La valeur spécifiée par le catalogue (Annexe 2) est 50 KN. Donc, l'isolateur est vérifié avec un facteur de sécurité de 1,8.

5.6 Vérification des haubans :

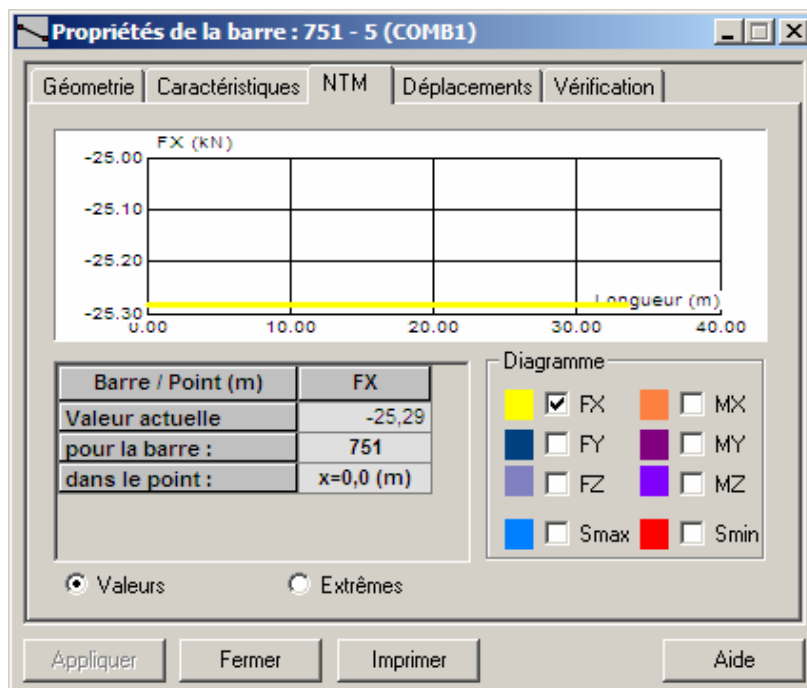


Figure 5.34: Effort dans le hauban le plus sollicité

D'après les résultats de l'analyse de la structure sur RoboBat, la tension maximale dans les haubans est :

$$T = 25,29 \text{ KN}$$



D'après le catalogue des câbles en acier, le câble standard 6 torons 19 fils de diamètre 12 mm a une limite de rupture de 79,8 KN. Donc, il offre un facteur de sécurité de 3,2.

5.7 Choix des assemblages et dimensionnement des boulons :

Introduction :

La connaissance des caractéristiques des moyens d'assemblages est indispensable pour choisir le type le mieux adapté à la structure, ainsi que pour imaginer des assemblages simples, facilement réalisables et par conséquent économiques.

Le boulonnage et le soudage sont les deux principales méthodes utilisées pour l'assemblage de la charpente métalliques.

Pour l'assemblage de la structure de dépannage, les cornières de triangulations seront assemblées par soudage vu la légèreté qui représente comparé au boulonnage, ce dernier nécessite une platine pour l'assemblage de chaque nœud de la structure. Concernant l'assemblage des modules la seule solution possible est d'utiliser le boulonnage qui permet la démontrabilité.

Généralité sur les boulons :

On distingue deux types de boulons, qui se différencient par leurs caractéristiques mécaniques plus ou moins élevées :

- Les boulons de charpente métallique
- Les boulons à très haute résistance

Quel que soit le type de boulons, le jeu normal entre la tige du boulon et le trou des pièces à assembler est fixé à 2mm pour les diamètres de boulons d inférieurs ou égaux à 24 mm, et à 3 mm pour les diamètres de boulons égaux ou supérieurs à 27mm. Le diamètre d_0 du trou vaut donc :

$$d_0 = d + 2\text{mm pour } d \leq 24\text{mm}$$

$$d_0 = d + 3\text{mm pour } d \geq 27\text{mm}$$

Les différentes parties d'un boulon de charpente métallique sont présentés dans la figure suivante :

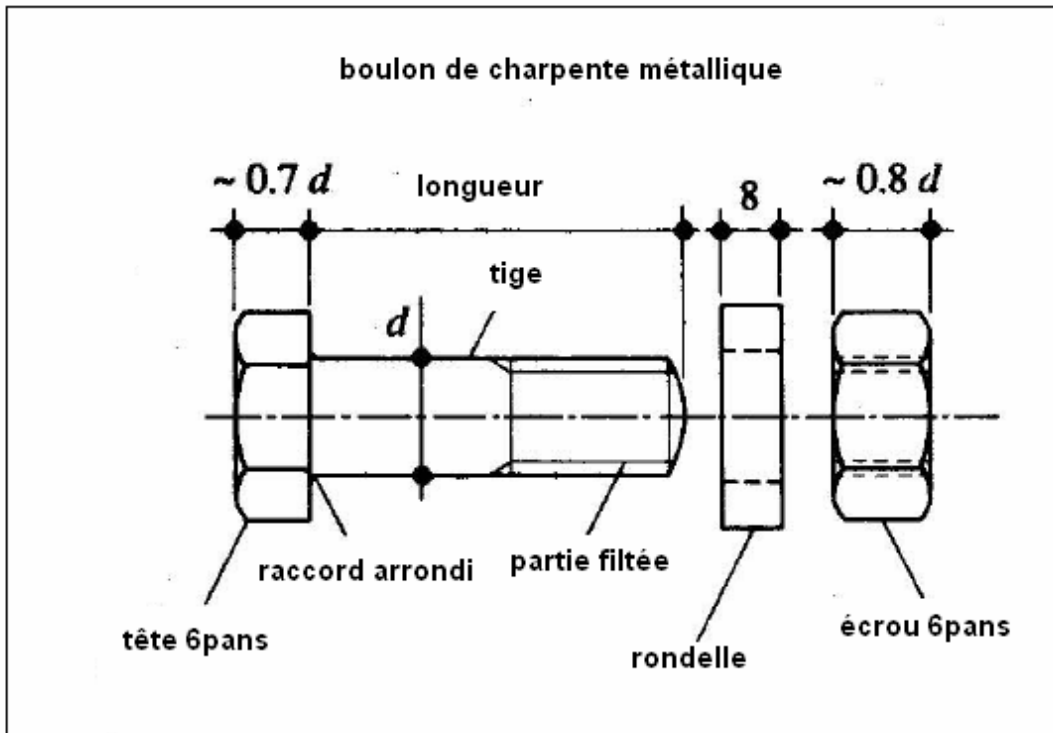


Figure 5.35: Dessin du boulon de charpente métallique

Le tableau suivant donne les principales caractéristiques et symboles des boulons normalisés les plus utilisés.

	M 12	M 16	M 20	M 24	M 27
Diamètre de la tige d [mm]	12	16	20	24	27
Diamètre du trou d_o [mm]	14	18	22	26	30
Section de la tige A [mm ²]	113	201	314	452	573
Section résistante A_s [mm ²]	84	157	245	353	459
Symbole boulon de charpente					
Symbole HR non précontraint					
Symbole HR précontraint					

Tableau 10: Principales caractéristiques des boulons normalisés

Dispositions pratiques des boulons :

Certaines mesures constructives sont respecter pour que les assemblages boulonnés puissent être facilement réalisés et pour qu'ils puissent assurer pleinement leur rôle d'élément de liaison. il s'agit notamment de choisir un diamètre de boulon bien adapté a l'épaisseur des pièces à assembler, ainsi que disposer les boulons de façon adéquate.

- Diamètre des boulons :

Pour des raisons pratiques, on évitera la mise en œuvre dans un même assemblage de boulons de diamètre différents, tandis que l'utilisation de boulons de même diamètre mais de classe de qualité différentes est carrément proscrite.

Le choix du diamètre des boulons se fera en déterminant leur résistance ou celle de pièces assemblées sur la base d'une bonne estimation des efforts à transmettre. Comme le diamètre d des boulons et l'épaisseur t des pièces à assembler ne sont pas totalement indépendants, le domaine d'utilisation des différents types de boulons est à peu près le suivant (entre parenthèse les diamètres utilisé moins couramment) :

- $t < 10 \text{ mm}$: $d = (12), 16 \text{ mm}$



- $10\text{ mm} \leq t \leq 25\text{ mm}$: $d = 16, 20, 24\text{ mm}$
- $t > 25\text{ mm}$: $d = 24, (27), (30)\text{ mm}$
- Disposition des boulons :

Les distances entre les axes des boulons (entraxe p) ainsi qu'entre les axes des boulons et des bords de la pièce (pince e) doivent être comprises entre certaines limites pour raisons suivantes :

- Valeurs minimales ; pour permettre la mise en place des boulons (outillage) et pour éviter la rupture de la tôle lorsque la pince est trop faible ;
- Valeurs maximales ; pour qu'il existe toujours un contact entre les pièces de l'assemblage (corrosion) et pour éviter de réaliser des assemblages trop longs.

Le tableau suivant donne des indicateurs sur les valeurs usuelles (entraxe $p_1 = 3d$ et $e_1 = 2d$ pince) et minimales ($e_1 = 1,4d$) à donner à l'entraxe des boulons et à la pince ; il faut de plus tenir compte des exigences particulières pour la mise en œuvre, ou autrement dit prévoir une place suffisante pour manœuvrer les clés de serrage manuelles ou pneumatique.

Boulons	Valeurs usuelles [mm]			Valeurs minimales [mm]		
	p_1, p_2	e_1	e_2	p_1, p_2	e_1	e_2
M 12	40	25	20	35	20	15
M 16	50	35	25	40	25	20
M 20	60	40	30	45	30	25
M 24	70	50	40	55	35	30
M 27	80	55	45	65	40	35

Tableau 11: Valeurs usuelles et minimales des entraxes et des pinces

L'Eurocode donne les valeurs minimales suivantes (d_0 est le diamètre du trou) :

$$e_1 = 1,2d_0 \quad e_2 = 1,5d_0 \quad P_1 = 2,2d_0 \quad \text{et} \quad P_2 = 3,0d_0$$



- Dimensionnement des boulons :

Les boulons assurant l'assemblage des modules sont sollicités à la fois au cisaillement et à la traction. La résistance ultime de tels boulons est dictée par une loi d'interaction, obtenue à partir d'essais, faisant intervenir les résistances ultimes au cisaillement pur et à la traction pure des boulons, cette loi se formule ainsi :

$$\left(\frac{T_{dB}}{T_R/\gamma_R}\right)^2 + \left(\frac{V_{dB}}{V_R/\gamma_R}\right)^2 \leq 1.0 \quad (1)$$

Où

T_{dB} : valeur de dimensionnement de l'effort de traction transmis par le boulon.

T_R : résistance ultime de la traction du boulon.

V_{dB} : valeur de dimensionnement de l'effort de cisaillement transmis par une section du boulon.

V_R : résistance ultime d'une section cisailée du boulon.

γ_R : facteur de résistance = (1.1)

La résistance ultime à la traction est donnée par la relation suivante :

$$T_R = 0.75 \frac{1}{\gamma_M} f_{uB} A_S \quad (2)$$

T_R : résistance ultime à la traction

f_{uB} : valeur de calcul de la résistance à la traction du boulon

A_S : aire de la section résistante du boulon

γ_M : marge supplémentaire pour la résistance des moyens d'assemblage ($\gamma_M = 1.25$)

La résistance ultime au cisaillement est donnée par la relation suivante :

$$V_R = 0.5 f_{uB} A_S \quad (3)$$

En injectant les équations 2 et 3 dans l'équation 1 on trouve que l'aire de la section résistante du boulon doit satisfaire l'inégalité suivante:

$$A_t = \left(\frac{Y_M Y_R T_{dB}}{0.75 f_{uB}} \right)^2 + \left(\frac{V_{dB} Y_R}{0.5 f_{uB}} \right)^2 \leq A_S^2$$

On a $f_{uB} = 1000 \text{ N/mm}^2$ pour l'acier 10.9

Une étude statique effectuée à l'aide du logiciel ROBOBAT donne les sollicitations dans les différentes sections du mât. Ces sollicitation vont nous permettre de calculer T_{dB} et V_{dB} par les relations suivantes :

$$T_{dB} = \frac{M_y}{l \times 5} \quad \text{et} \quad V_{dB} = \frac{F_x}{12}$$

La figure suivante illustre une section d'assemblage du mât :

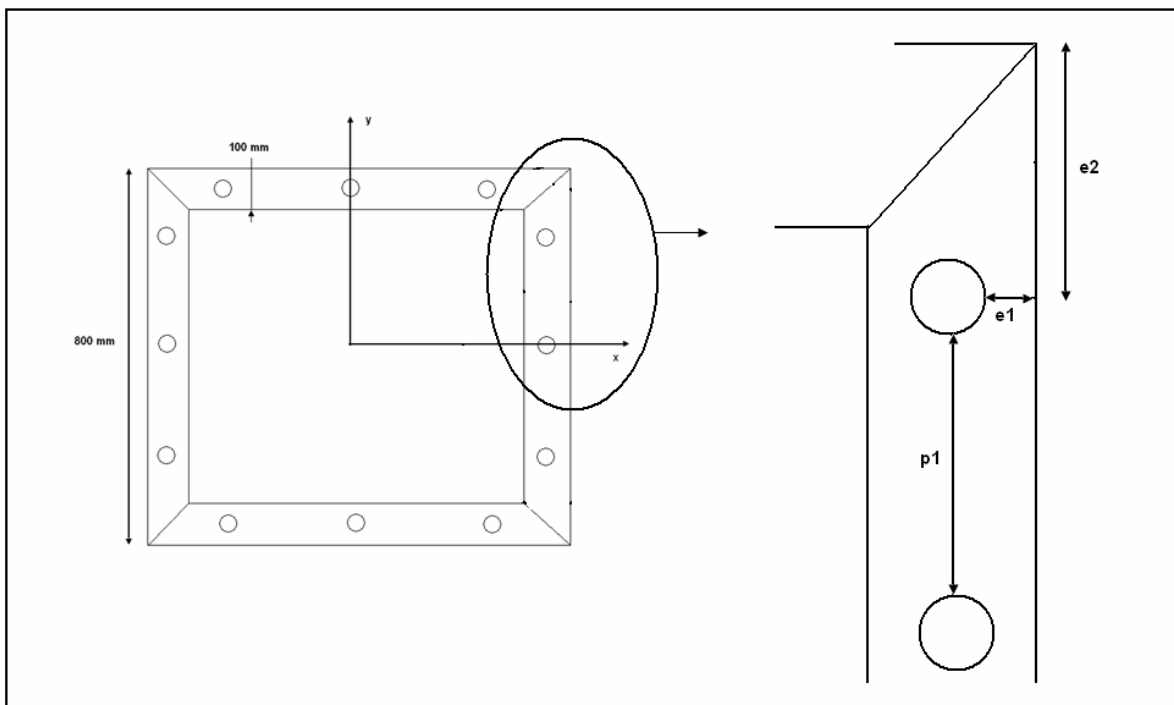


Figure 5.36: Entraxe et pince pour les traverses d'assemblage

L'entraxe p_1 et les pinces e_1 et e_2 doivent satisfaire les relations citées dans la partie disposition des boulons.

Pour cela, une feuille EXEL a été faite pour comparer la valeur limite A_l que A_s doit dépasser.

SECTION	FX (KN)	FY (KN)	MX (KN)	MY (KN)	TdB	VdB	A_l (mm ²)
BASE/MODULE1	636,75	0,00	0,00	0,00	0,00	53,06	116,74
MODULE1/MODULE2	636,75	0,00	0,00	20,55	0,01	53,06	116,74
MODULE3/MODULE4	636,75	0,00	0,00	46,88	0,01	53,06	116,74
MODULE4/MODULE5	636,75	0,00	0,00	64,21	0,02	53,06	116,74
MODULE1/MODULE5	636,75	0,00	0,00	72,53	0,02	53,06	116,74
MODULE5/MODULE6	248,36	0,00	0,00	71,86	0,02	20,70	45,53
MODULE6/MODULE7	248,43	0,00	0,00	50,21	0,01	20,70	45,55
MODULE7/MODULE8	130,67	0,00	0,00	-88,02	-0,02	10,89	23,96
MODULE8/MODULE9	130,48	0,00	0,00	1,02	0,00	10,87	23,92
MODULE9/MODULE10	52,06	0,00	0,00	-28,04	-0,01	4,34	9,54
MODULE10/MODULE11	52,65	0,00	0,00	42,74	0,01	4,39	9,65
						MAX	116,74

Tableau 12: Sollicitations aux différentes bases du mât

Donc A_s doit vérifier l'inégalité suivante :

$$116,74 \leq A_s$$

Par suite notre choix est fixé pour le boulon normalisé M16

Le tableau suivant montre ces caractéristiques ;

Diamètre de la tige d (mm)	16
Diamètre du trou d_0 (mm)	18
Section de la tige A (mm ²)	201
Section résistante A_s (mm ²)	157

Tableau 13: Caractéristiques du boulon normalisé M16

Une fois le choix de boulon est effectué, le choix de l'écrou est facile il suffit de prendre un écrou d'épaisseur égale à $0,8d$ comme le montre la figure 5.35. Dans notre



cas le boulon choisi est diamètre égale à 16, donc l'épaisseur de l'écrou choisi est égale à 12,8.

Chapitre 6 : Etude de quelques cas de dépannage

6.1 Premier cas de dépannage :

❖ **Description :**

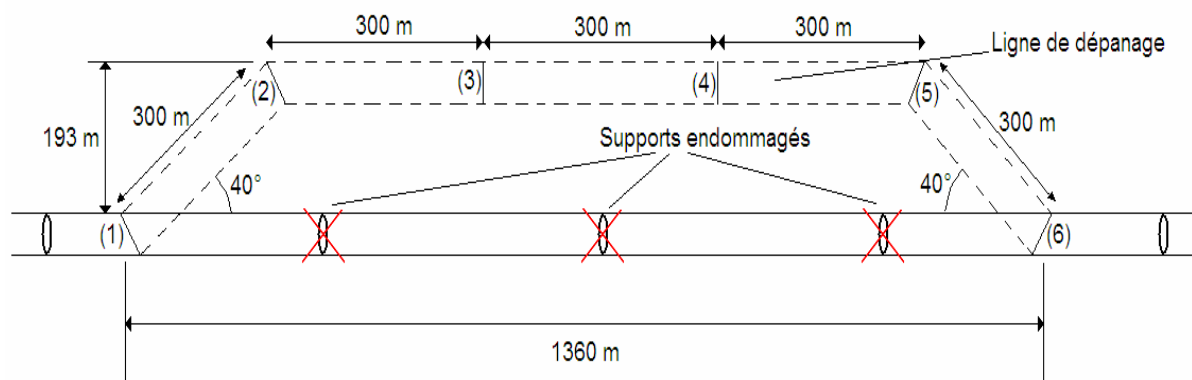


Figure 6.1 : Schéma du cas de dépannage

Mettons nous dans le même cas de dépannage du chapitre (5) avec, cette fois-ci, une ligne double tresse au lieu d'une ligne simple tresse. La structure doit supporter trois phases de chaque coté. Ce ci n'est pas faisable moyennant la structure vérifiée précédemment car les haubans seraient à proximité des conducteurs. La figure ci-dessous illustre ce problème.

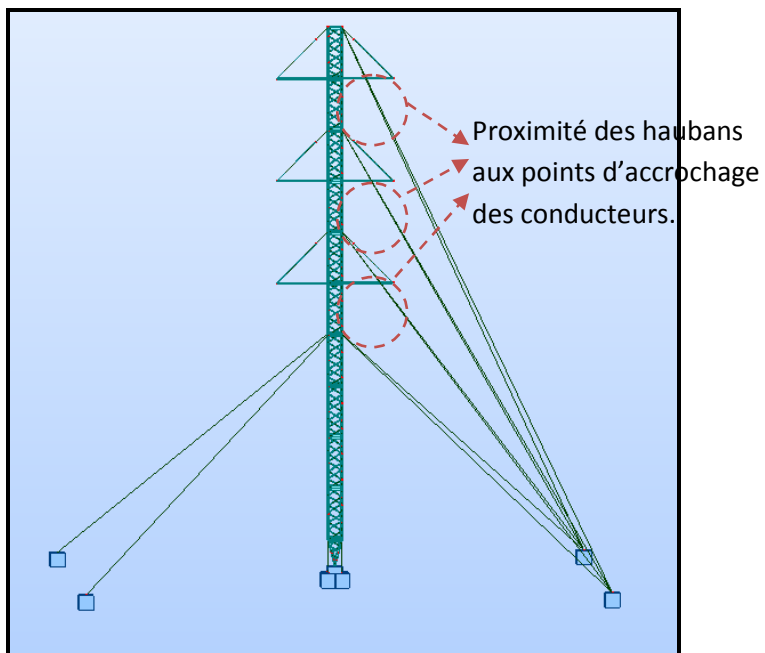


Figure 6.2 : Chevauchement haubans-conducteurs

A fin de remédier à ce problème, nous proposons la structure suivante :

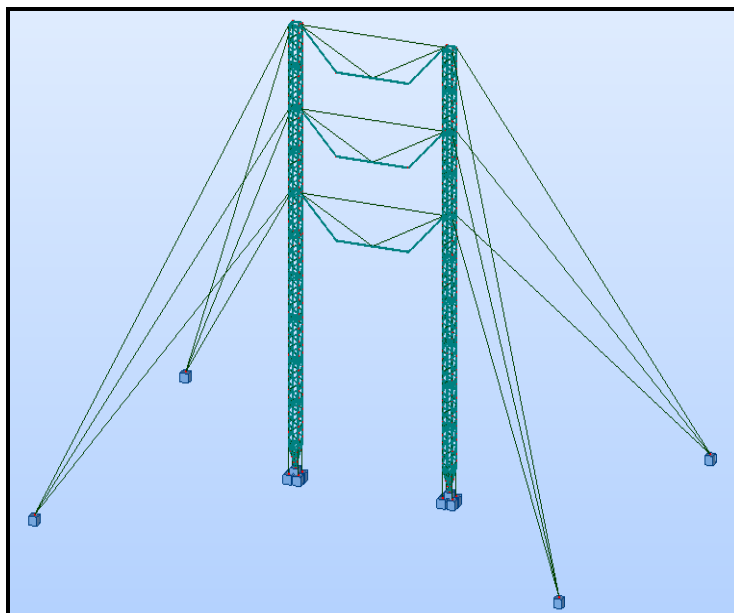


Figure 6.3 : Structure à deux mâts

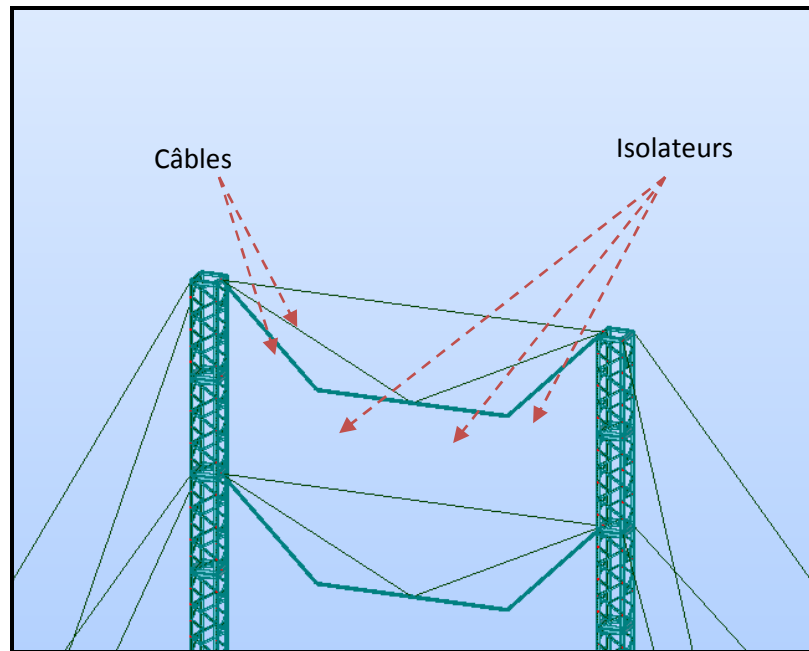


Figure 6.4 : Système de suspension des câbles

La structure est constituée de deux mâts similaires au mât de la structure précédente reliés par des câbles en acier.

❖ **Vérification :**

La vérification de la structure est effectuée, avec les mêmes cas de charge définis précédemment, pour les emplacements (1), (2), (5) et (6) présentant un angle de 40° et pour les emplacements (3) et (4) ayant un angle nul.

Les graphes ci-dessous donnent les résultats de la vérification :

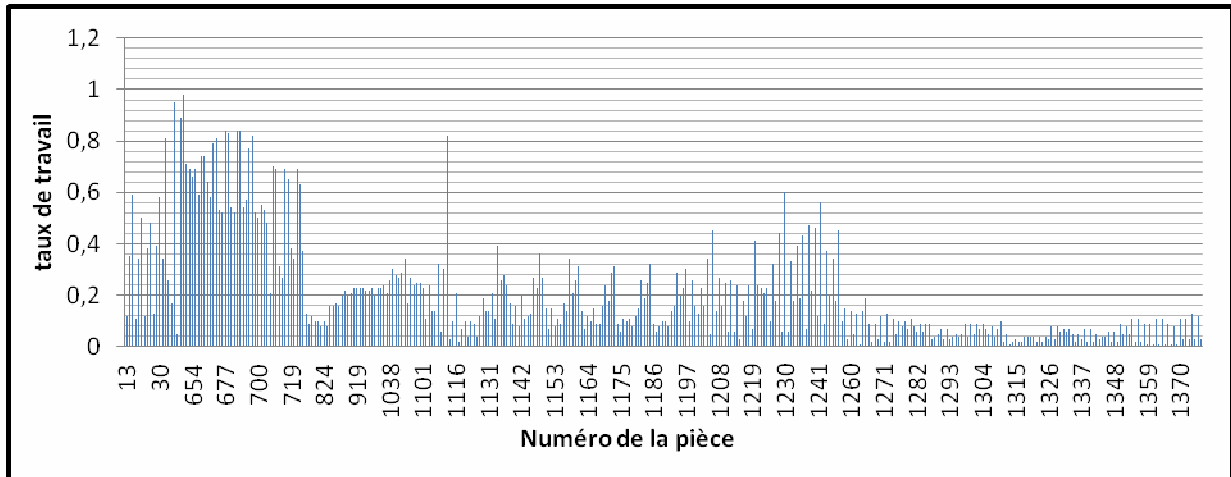


Figure 6.5 : Résultats de la vérification sur les emplacements (3) et (4)

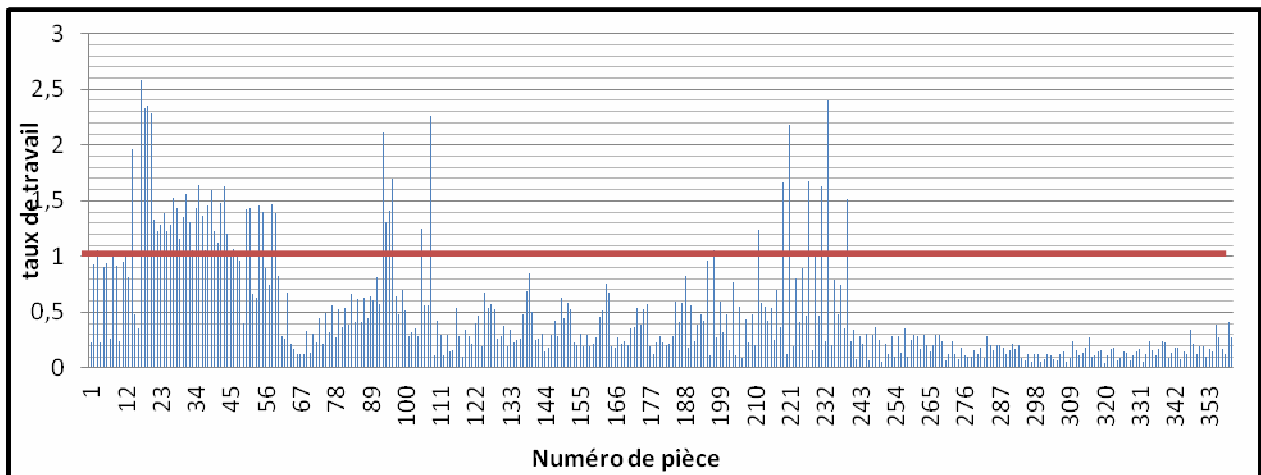


Figure 6.6: Résultats de la vérification sur les emplacements (1), (2), (5) et (6)

❖ **Constats :**

Les résultats de la vérification, pour les emplacements (1), (2), (5) et (6) figure 5.37 montrent que la structure ne supporte pas les combinaisons de cas de charge définis précédemment, avec un angle de 40°. La modification des profilés incorrects n'est pas possible car les modules sont déjà définis. D'autre part, la structure est bien vérifiée pour les emplacements (3) et (4) où la ligne présente un angle nul.

❖ **Solution proposée :**

Le dépannage sur les emplacements d'angle sera effectué par deux structures à un seul mât. La structure à deux mâts sera utilisée comme support d'alignement sur les emplacements (5) et (6).

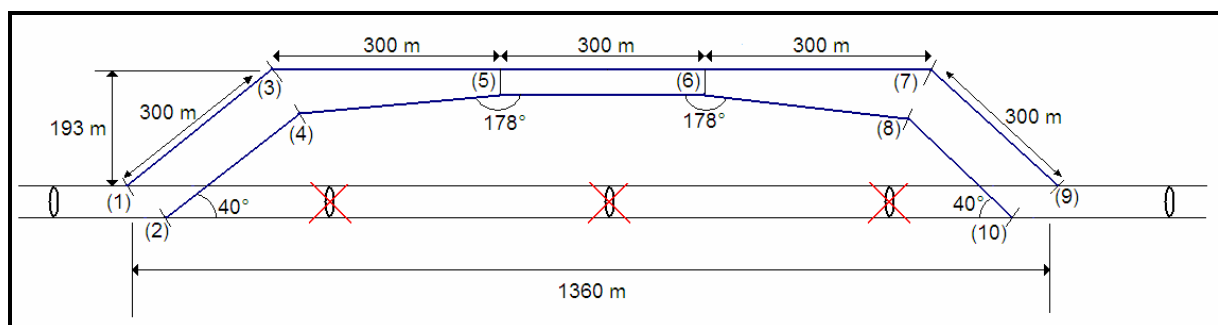


Figure 6.7 : Schéma du cas de dépannage

❖ **Vérification de la solution :**

La vérification de la structure s'effectuera avec les mêmes cas de charge considérés précédemment, sauf le cas de charge appliqué par les câbles conducteurs. Ainsi, ce cas de charge doit être recalculé.

Les conducteurs supportés par la structure présentent un angle nul sur un côté et un angle de 2° sur l'autre.

Le calcul des efforts appliqués par les câbles conducteurs sur la structure sont calculés sur Excel. Les tables suivantes présentent les données et les résultats du calcul.

Tables de calcul pour les conducteurs d'angle 0° :

Portée 1		Portée 2	
Portée (m)	300,000	Portée (m)	300,000
Angle d'arrivée alpha 1 (degré)	0	Angle de sortie alpha 2 (degré)	0
Dénivelée (m)	0,000	Dénivelée (m)	0,000
Portée oblique (m)	300,000	Portée oblique (m)	300,000
T01 (daN)	3010,099	T02 (daN)	3010,099
T01' (daN)	2235,963	T02' (daN)	2235,963
flèche basse (m)	7,031	flèche basse (m)	7,031
Tension au point d'accrochage	3023,327	Tension au point d'accrochage	3023,327
α au point d'accrochage	5,362	α au point d'accrochage	5,362

Efforts appliqués au support (daN)	
ETAT	ETAT 1
T01	3010,10
T02	3010,10
Va	563,12
Ha	923,63
La	0,00
RESULTANTE	1081,75

Tables de calcul pour les conducteurs d'angle 2° :

Portée 1		Portée 2	
Portée (m)	300,000	Portée (m)	300,000
Angle d'arrivée alpha 1 (degré)	2	Angle de sortie alpha 2 (degré)	2
Dénivelée (m)	0,000	Dénivelée (m)	0,000
Portée oblique (m)	300,000	Portée oblique (m)	300,000
T01 (daN)	3010,099	T02 (daN)	3010,099



T01' (daN) 2235,963	T02' (daN) 2235,963
flèche basse (m) 7,031	flèche basse (m) 7,031
Tension au point d'accrochage 3023,327	Tension au point d'accrochage 3023,327
α au point d'accrochage 5,362	α au point d'accrochage 5,362

Efforts appliqués au support (daN)	
ETAT	ETAT 1
T01	3010,10
T02	3010,10
Va	563,12
Ha	5089,79
La	0,00
RESULTANTE	5120,84

❖ Résultats :

A partir des résultats de la vérification sur RoboBat présentés dans le graphe ci-dessous, la structure supporte les deux combinaisons de cas de charge lui sont appliquées.

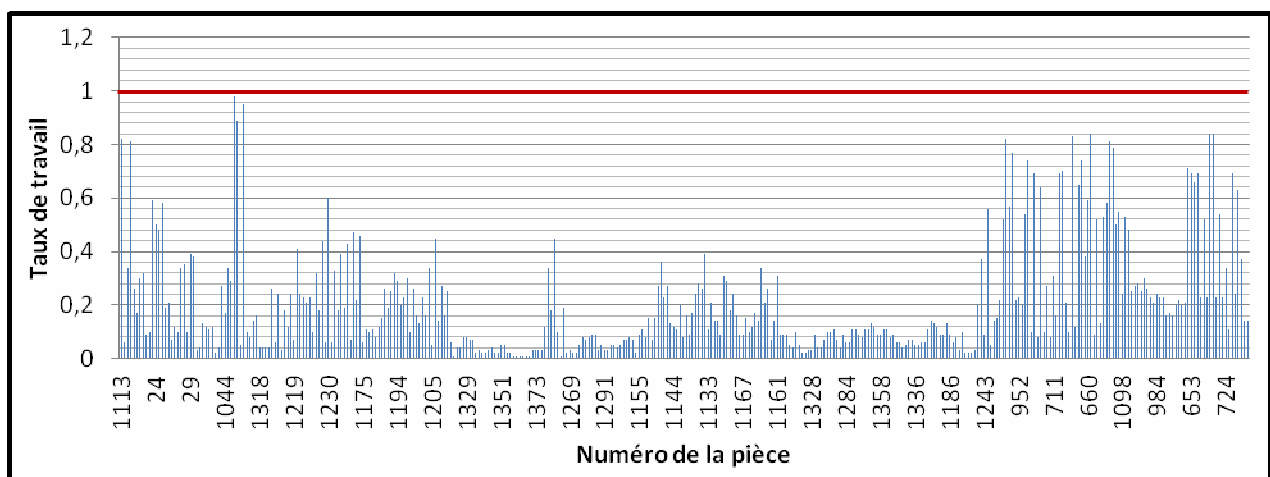


Figure 6.8 : Graphe des taux de travail

6.2 Second cas de dépannage :

❖ Description :

Mettons nous dans un cas de dépannage similaire aux cas précédents avec, cette fois-ci, un terrain ne permettant pas l'application de portées de 300 m. A titre d'exemple prenant le cas d'une ligne traversant une rivière. La géographie du site, dans ce cas, nous oblige à prendre une portée de 600 m.

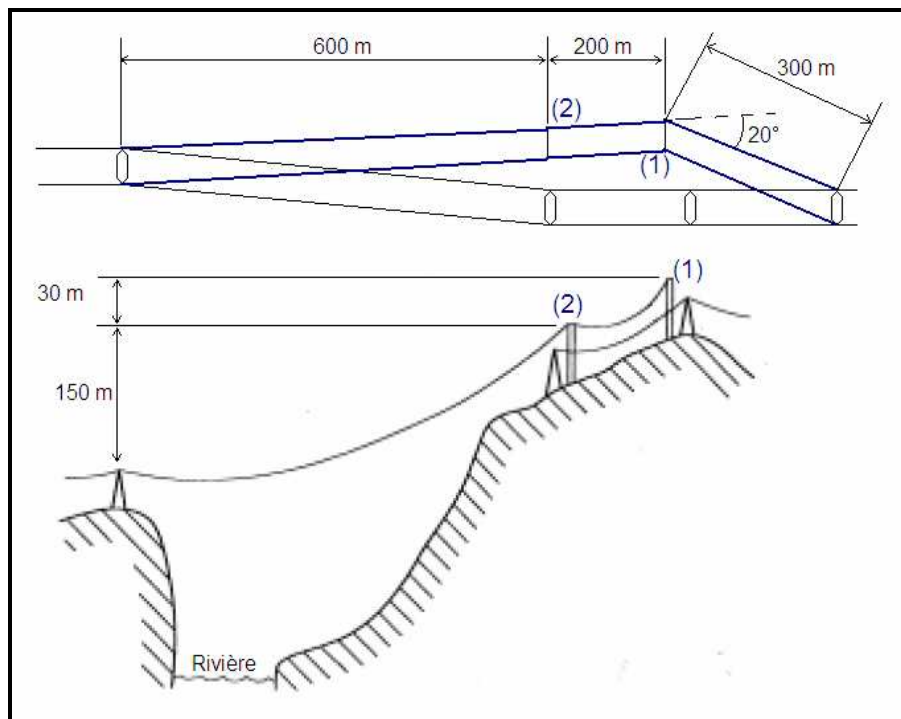


Figure 6.9 : Cas de dépannage

Le dépannage sur l'emplacement (1) s'effectuera en utilisant la structure à un seul mât. La vérification de cette structure n'est pas nécessaire, puisque les portées ne dépassent pas 300m et l'angle ne dépasse pas 40°. Donc, la vérification déjà effectuée est valable pour ce cas.

❖ Vérification :

Calculons maintenant les efforts appliqués par les conducteurs sur la structure sur l'emplacement (2).

Les tables suivantes présentent les résultats de calcul des câbles :

Portée 1		Portée 2	
Portée (m)	200,000	Portée (m)	600,000
Angle d'arrivée alpha 1 (degré)	0	Angle de sortie alpha 2 (degré)	0
Dénivelée (m)	-30,000	Dénivelée (m)	150,000
Portée oblique (m)	202,237	Portée oblique (m)	618,466
T01 (daN)	3010,099	T02 (daN)	3010,099
flèche basse (m)	36,060	flèche basse (m)	3,233
Tension au point d'accrochage	3077,939	Tension au point d'accrochage	3016,181
α au point d'accrochage	12,052	α au point d'accrochage	3,639

Efforts appliqués au support (daN)	
ETAT	ETAT 1
T01	3010,10
T02	3010,10
Va	1071,27
Ha	1263,37
La	0,00
RESULTANTE	1656,42

Nous distinguons deux cas de figures :

- ✓ Ligne simple terre
- ✓ Ligne double terre

❖ Cas d'une ligne simple terne :

Pour la ligne simple terne les résultats de la vérification présentés dans sur le graphe ci-dessous montrent bien que la structure à un seul mât (figure 5.7) supporte le chargement sur l'emplacement (2).

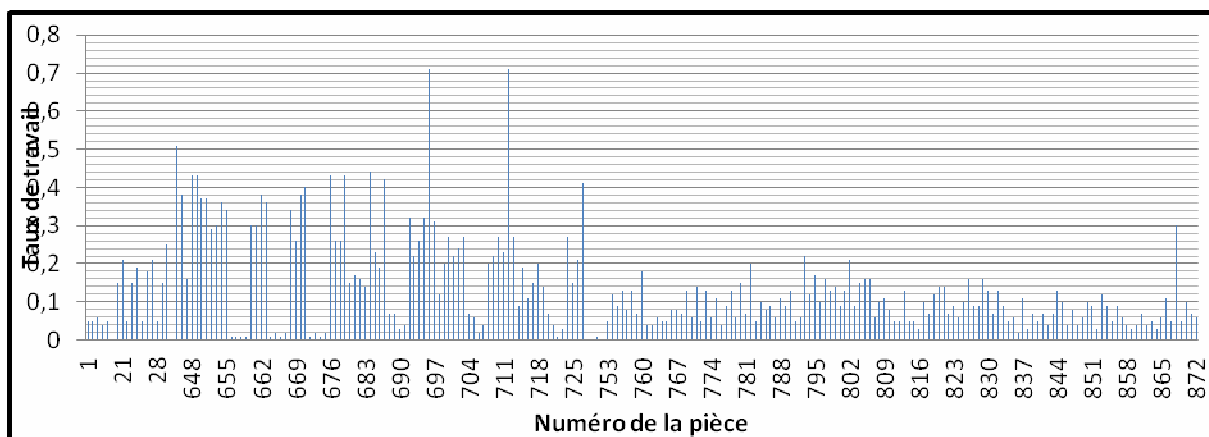


Figure 6.10 : Graphe des taux de travail

❖ Cas d'une Ligne double terne :

Pour la ligne double terne les résultats de la vérification présentés sur le graphe ci-dessous montrent bien que la structure à deux mâts (figure 5.39) supporte le chargement sur l'emplacement (2).

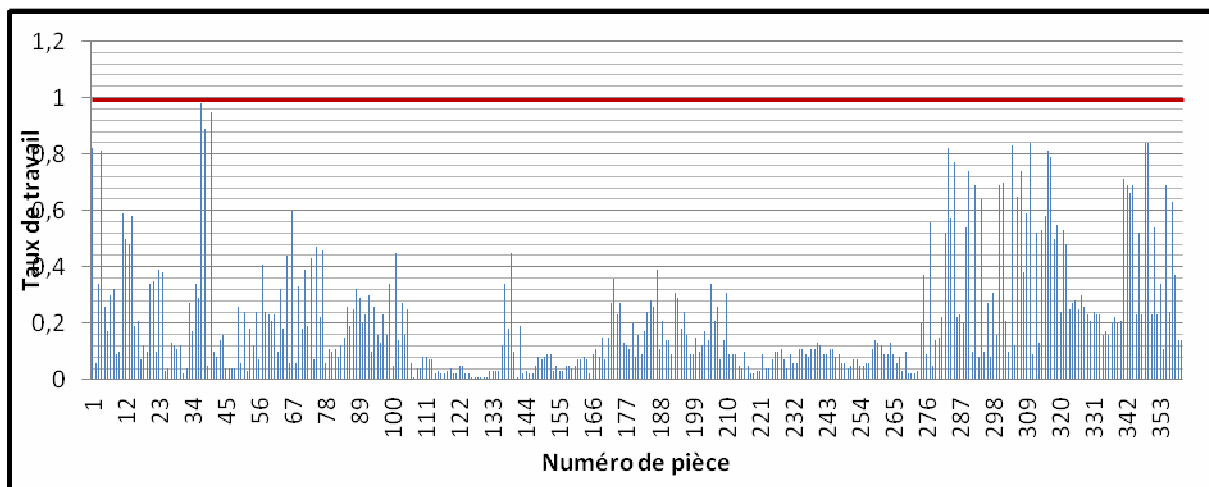


Figure 6.11 : Graphe des taux de travail



Conclusion générale

La structure développée dans ce projet a comme fonction principale la restauration des lignes endommagées, mais elle peut aussi aider dans la construction des nouvelles lignes où l'accès au site de construction est difficile.

La planification et la préparation ainsi que la mise en œuvre de cette solution requièrent des ressources humaines qualifiées, un matériel performant et des moyens de montage fiables.

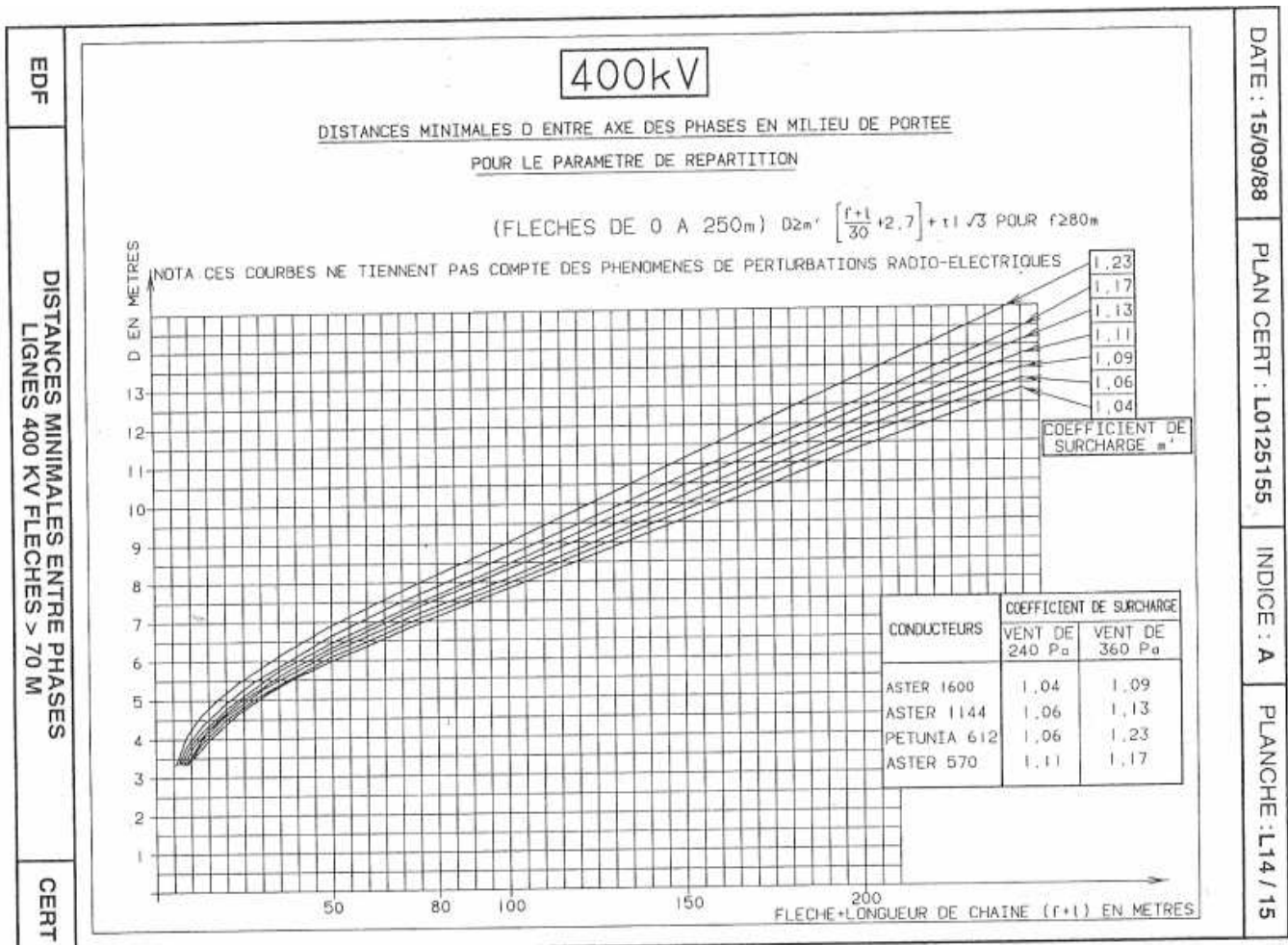
Des études complètes sur les cas d'intervention prenant en compte tout les paramètres intervenant dans le choix des dimensions des mâts à remplacer et aux accessoires adéquats doivent être faites par des spécialistes dans le domaine.

Pour cette cause nous recommandons aux responsables de CEGELEC Maroc de penser à la création d'un bureau d'études spécialisé dans la restauration rapide modulaire. Ce bureau aura comme missions principales, le développement de la solution proposée dans ce projet et la formation du personnel capable d'utiliser cette solution et assurer sa fiabilité.



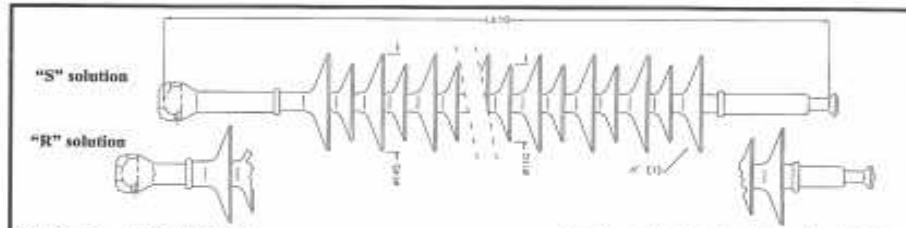
Annexes

Annexe 1 : Distance minimale entre axe des phases en milieu de portée pour le paramètre de répartition.



Annexe 2 : Catalogue des isolateurs.

**Transmission Composite Suspension - Tension Insulators
in Silicone Rubber type ISI-ROK-* class 160 kN or class 210 kN**



Dimensions tolerance acc. to IEC 61109

Note: It's possible to have intermediate numbers of sheds

Selection Guide (Line Voltage, kV)		Catalogue Code (*)	n° of Sheds A n° (I)	Length L ± 10 mm	Leakage distance mm	Dry arc distance mm	Power frequency withstand 50 Hz		Lightning impul. withstand 1,2/50		Weight - kg
12	15						30	170	250	400	
		ISI-ROK-*	9+8	950	2270	640	275	195	460	495	4,4
		ISI-ROK-*	10+9	1020	2530	710	310	230	515	550	4,9
		ISI-ROK-*	12+11	1160	3050	850	340	265	570	615	5,4
		ISI-ROK-*	14+13	1300	3570	990	380	300	620	670	5,9
		ISI-ROK-*	15+14	1370	3830	1060	415	335	670	725	6,4
		ISI-ROK-*	17+16	1510	4350	1200	450	370	720	780	6,9
		ISI-ROK-*	19+18	1650	4870	1340	485	405	770	835	7,4
		ISI-ROK-*	21+20	1790	5390	1480	520	435	830	900	7,9
		ISI-ROK-*	22+21	1860	5650	1550	565	475	915	990	8,4
		ISI-ROK-*	24+23	2000	6170	1690	615	515	1000	1080	8,9
		ISI-ROK-*	26+25	2140	6690	1830	645	545	1070	1155	9,4
		ISI-ROK-*	27+26	2210	6950	1900	675	575	1140	1230	9,7
		ISI-ROK-*	29+28	2350	7470	2040	710	605	1210	1310	10,4
		ISI-ROK-*	31+30	2490	8100	2180	760	640	1270	1370	10,9
		ISI-ROK-*	33+32	2630	8620	2320	810	675	1330	1430	11,4
		ISI-ROK-*	35+34	2770	9180	2460	860	710	1390	1490	11,9
		ISI-ROK-*	36+35	2840	9440	2530	875	720	1455	1565	12,4
		ISI-ROK-*	38+37	2980	9990	2670	890	740	1520	1640	12,9
		ISI-ROK-*	40+39	3120	10500	2810	905	750	1585	1715	13,4
		ISI-ROK-*	42+41	3260	11000	2950	920	760	1650	1800	13,9

NOTE : Once chosen the insulator that is the most suitable to the characteristics of the line on which you have to install it, in order to obtain the total length of the insulator (L), please, select the kind of fitting end you have to use (see page 18) and refer to the following table :

Ground fitting	Line fitting	Code (Z)	Length change (L)
SOCKET	BALL	SB	0
SOCKET	EYE	SE	+25
EYE	EYE	EE	+54
EYE	BALL	EB	+19
EYE	TONGUE	ET	+17
CLEVIS	BALL	CB	+2
CLEVIS	TONGUE	CT	0
Y-CLEVIS	TONGUE	YT	+5
Y-CLEVIS	EYE	YE	+42

Specified Mechanical Load

Routine Test Load

Specified Mechanical Load

Routine Test Load

Max torsion Load

SML - IEC 61109

RTL = 50% of SML

160 kN 210 kN

80 kN 105 kN

120 N*m 120 N*m

For voltages above 170 kV refer to page 27 for Corona Rings, the electrical data can be changed.

(*) Key to the catalogue numbers

* Key : ISI-ROK- A(I)-(160 or 210)(2)

Example : ISI-ROK-A22+21-(160 or 210)SB

"S" solution - standard solution with uncovered fittings

"R" solution - fittings partially covered with silicone rubber

These insulators are produced and tested according to IEC 61109. It's possible to have all the other combinations.

Please, don't hesitate to contact us directly for obtaining possible explanations or different solutions.

isoelectric - Italy

INSULATING BRACKET ASSEMBLY – Dimensions and Strength Ratings

FIXED ASSEMBLY with 12° inclination

Typical Voltage	Component Insulators		Dimensions (mm)				Maximum Load* (kN)				Pollution mm/kV
	Suspension type	Post type	A	B	C	D	1*	2*	3*	4*	
138	ISI-CAN-A27-120EH	ISI-BIG-A18+17-BHB	1560	1600	1420	370	55	35	55	5,72	> 23
138	ISI-ROK-A17+16-120EE	ISI-BIG-A24+23-BHB	1685	1675	1775	690	35	35	55	4,42	> 31
145	ISI-ROK-A18+17-120EE	ISI-MAX-A24+23-BHB	1740	1745	1775	635	70	45	70	5,85	> 31
161	ISI-ROK-A17+16-120EH	ISI-BIG-A24+23-BHB	1685	1675	1775	689	35	35	50	4,42	> 27
161	ISI-ROK-A20+19-120EH	ISI-BIG-A27+26-BHB	1910	1885	1950	695	55	35	50	4,22	> 31
170	ISI-ROK-A21+20-120EH	ISI-MAX-A29+28-BHB	1999	1969	2065	770	70	45	60	4,87	> 31
230	ISI-CAN-A48-120EE	ISI-BIG-A31+30-BHB	2335	2410	2185	615	55	35	48	3,57	> 25
230	ISI-ROK-A28+27-120EE	ISI-BIG-A38+37-BHB	2450	2445	2592	1005	35	35	45	2,90	> 31
245	ISI-ROK-A30+29-120EE	ISI-MAX-A41+40-BHB	2593	2585	2770	1095	70	45	50	4,22	> 31

FIXED ASSEMBLY with 0° inclination (Horizontal V)

Typical Voltage	Component Insulators		Dimensions (mm)				Maximum Load* (kN)				Pollution mm/kV
	Suspension type	Post type	A	B	C	D	1*	2*	3*	4*	
138	ISI-CAN-A27-120EE	ISI-BIG-A18+17-BHB	1400	1600	1445	655	50	35	55	5,50	> 23
138	ISI-ROK-A17+16-120EH	ISI-BIG-A24+23-BHB	1490	1675	1800	965	70	35	55	4,20	> 31
145	ISI-ROK-A18+17-120EH	ISI-MAX-A24+23-BHB	1550	1745	1800	930	65	45	70	5,60	> 31
161	ISI-ROK-A17+16-120EH	ISI-BIG-A24+23-BHB	1490	1675	1800	965	50	35	55	4,20	> 27
161	ISI-ROK-A20+19-120EH	ISI-BIG-A27+26-BHB	1675	1885	1985	1940	50	35	55	4,60	> 31
170	ISI-ROK-A21+20-120EH	ISI-MAX-A29+28-BHB	1735	1969	2105	1125	65	45	70	3,60	> 31
230	ISI-CAN-A48-120EE	ISI-BIG-A31+30-BHB	2128	2410	2225	1015	50	35	55	3,30	> 25
230	ISI-ROK-A28+27-120EH	ISI-BIG-A38+37-BHB	2155	2445	2645	1420	70	35	55	2,70	> 31
245	ISI-ROK-A30+29-120EH	ISI-MAX-A41+40-BHB	2280	2585	2825	1500	65	45	70	4,00	> 31

HORIZONTAL & VERTICAL PIVOTING ASSEMBLY with 12° inclination

Typical Voltage	Component Insulators		Dimensions (mm)				Maximum Load* (kN)				Pollution mm/kV
	Suspension type	Post type	A	B	C	D	1*	2*	3*	4*	
138	ISI-CAN-A27-120EH	ISI-BIG-A18+17-BC	1555	1600	1435	385	55	35	55	—	> 23
138	ISI-ROK-A17+16-120EH	ISI-BIG-A24+23-BC	1680	1675	1788	692	35	35	55	—	> 31
145	ISI-ROK-A18+17-120EH	ISI-MAX-A24+23-BC	1735	1745	1790	650	70	45	70	—	> 31
161	ISI-ROK-A17+16-120EH	ISI-BIG-A24+23-BC	1680	1675	1790	695	35	35	50	—	> 27
161	ISI-ROK-A20+19-120EH	ISI-BIG-A27+26-BC	1905	1920	1965	710	55	35	50	—	> 31
170	ISI-ROK-A21+20-120EH	ISI-MAX-A29+28-BC	1985	1990	2088	785	70	45	60	—	> 31
230	ISI-CAN-A48-120EH	ISI-BIG-A31+30-BC	2330	2410	2200	630	55	35	45	—	> 25
230	ISI-ROK-A28+27-120EH	ISI-BIG-A38+37-BC	2445	2445	2610	1020	35	35	45	—	> 31
245	ISI-ROK-A30+29-120EH	ISI-MAX-A41+40-BC	2590	2585	2795	1110	70	45	50	—	> 31

HORIZONTAL & VERTICAL PIVOTING ASSEMBLY with 0° inclination

Typical Voltage	Component Insulators		Dimensions (mm)				Maximum Load* (kN)				Pollution mm/kV
	Suspension type	Post type	A	B	C	D	1*	2*	3*	4*	
138	ISI-CAN-A27-120EH	ISI-BIG-A18+17-BC	1555	1600	1450	400	50	35	55	—	> 23
138	ISI-ROK-A17+16-120EH	ISI-BIG-A24+23-BC	1680	1675	1805	710	50	35	55	—	> 31
145	ISI-ROK-A18+17-120EH	ISI-MAX-A24+23-BC	1735	1745	1805	665	65	45	70	—	> 31
161	ISI-ROK-A17+16-120EH	ISI-BIG-A24+23-BC	1680	1675	1805	710	50	35	55	—	> 27
161	ISI-ROK-A20+19-120EH	ISI-BIG-A27+26-BC	1905	1920	1980	725	50	35	55	—	> 31
170	ISI-ROK-A21+20-120EH	ISI-MAX-A29+28-BC	1985	1995	2095	800	65	45	70	—	> 31
230	ISI-CAN-A48-120EH	ISI-BIG-A31+30-BC	2330	2410	2215	645	50	35	55	—	> 25
230	ISI-ROK-A28+27-120EH	ISI-BIG-A38+37-BC	2445	2445	2625	1038	50	35	45	—	> 31
245	ISI-ROK-A30+29-120EH	ISI-MAX-A41+40-BC	2590	2585	2810	1125	65	45	70	—	> 31

* Maximum load are for single loads in the specified direction: 1=Vertical, 2=Tension, 3=Compression, 4=Longitudinal

Please, don't hesitate to contact us directly for obtaining possible explanations or different solutions.

isoelectric - Italy ...

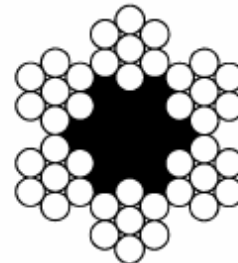
Annexe 3 : Catalogue des câbles d'haubanage.

CÂBLES

• Câble standard 6 torons de 7 fils

AME TEXTILE CABLAGE CROISE PREFORME ACIER GALVANISE 1770N/mm²

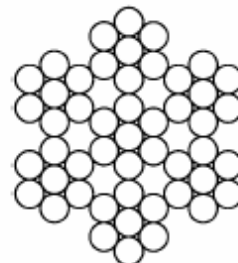
Diamètre (mm)	Rupture minimale (KgF)	Poids (Kg/100m)
2	239	1,30
2,5	400	2,20
2,7	480	2,80
3	538	3,50
4	957	5
5	1500	8,70
6	2150	13,20



• Câble standard 7 torons de 7 fils

AME MÉTALLIQUE CABLAGE CROISE PREFORME ACIER GALVANISE 1960N/mm²

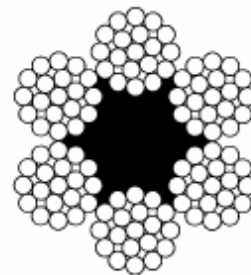
Diamètre (mm)	Rupture minimale (KgF)	Poids (Kg/100m)
1,5	140	0,9
2	330	1,52
2,5	520	2,60
3	720	3,43
4	1260	6,10
5	1790	9,53
6	2580	13,72



• Câble standard 6 torons de 19 fils

AME TEXTILE CABLAGE CROISE PREFORME ACIER GALVANISE 1770N/mm²

Diamètre (mm)	Rupture minimale (KgF)	Poids (Kg/100m)
3	500	3,10
4	890	5,54
5	1380	8,65
6	2000	12,50
7	2710	17,00
8	3550	22,10
9	4490	28,00
10	5540	34,60
11	6710	41,90
12	7980	49,80
13	9370	58,50
14	10900	67,80
16	14200	88,60
18	18000	112,00



Annexe 4 : Répartition des zones de vent au Maroc.



Bibliographie

- Cours de Mr CHOUKRI « Calcul des structures 2008-2009 »
- Cours de Mr MLIHA « Calcul des structures 2007-2008 »
- Précis métallurgie : élaboration, structures-propriétés et normalisation
–J .BARRALIS et G.MAEDER-
- Construction métallique : notations fondamentales et méthodes de dimensionnement
-Manfred A. HIRT ROLF BEZ-
- ONE règles de calcul et dimensionnement des lignes aériennes.
- L'encyclopédie « Technique d'ingénieurs ».
- Règlement CM66.
- Règlement NV65.
- Manuel de l'utilisation du logiciel ROBOBAT.

