

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



Remerciement

Toute notre gratitude, grâce et remerciement vont à dieu le tout puissant qui nous a donné la force, la patience, le courage et la volonté pour élaborer ce travail.

Nous citons nommément :

*- Notre encadreur **M. ABDEMEZIANE Nabil**. Pour avoir accepté de nous prendre en charge, pour sa disponibilité, ses précieux conseils.*

- Aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre travail.

- Toute notre gratitude va à tous les enseignants qui ont contribué à notre formation.

- Nous remercions aussi tous particulièrement

***M. NOURI Nacer** pour l'aide qu'il nous accordé pour achever ce travail.*

Enfin, Nos plus vifs remerciements s'adressent à nos très chers parents pour leurs soutiens et leurs patiences et à tous ceux qui nous ont aidés, encourager et nous ont soutenus.

NOURI Nesrine

BOUNABI Souad

Résumé

Le Projet de fin d'étude a porté essentiellement sur l'étude de la structure métallique d'un pylône électrique à haut tension selon les normes.

L'objectif de cette étude est de réaliser une structure répondant aux exigences de la résistance, la stabilité d'un pylône métallique destiné au transport d'électricité.

Les pylônes auxquels nous nous sommes intéressés sont de type treillis utilisés plus spécifiquement dans le transport électrique par des lignes de haute tension.

Le travail à consiste à calculer les différents types de charges transmises au pylône, à savoir les charges transmises par les câbles et les actions du vent.

La seconde partie du mémoire qui n'est que l'application sur ordinateur s'est déroulée en quatre étapes :

- ✓ La modélisation du pylône avec Autodesk ROBOT Structural Analysis.
- ✓ Le chargement.
- ✓ Analyse statique et dynamique.
- ✓ La vérification d'assemblages.

Le chargement des actions, le calcul et la vérification des assemblages ont été réalisés à l'aide du logiciel *ROBOT 2014*.

Ce travail nous a permis de comprendre le comportement de structure spécifique que sont les pylônes en treillis. En effet même si leur calcul semble simple, ils restent, cependant, en raison de leur élancement de leur légèreté et de la faiblesse de section des barres utilisées, très sensible au phénomène d'instabilité.

Mots clés : pylône électrique HT, métallique, câbles, assemblage, modélisation, treillis, analyse.

ملخص:

ركز مشروع نهاية الدراسة على دراسة الهيكل المعدني للدعامات الكهربائي عالي الجهد وفقاً للمعايير. الهدف من هذه الدراسة هو تحقيق هيكل يلبي متطلبات المقاومة والاستقرار الصرح المعدني لنقل الكهرباء. الأعمدة التي نهتم بها هي من النوع الشبكي المستخدم بشكل أكثر تحديداً في النقل الكهربائي بواسطة خطوط الجهد العالي. تألف العمل من حساب الأنواع المختلفة من الأحمال المنقولة إلى الدعامات، أي الأحمال المنقولة بواسطة الكابلات وتصرفات الرياح

الجزء الثاني من المذكرة هو مجرد تطبيق لبرنامج الكمبيوتر، في أربع خطوات:

- ✓ نمذجة الهيكل المعدني مع التحليل الهيكلي بواسطة البرنامج AutodeskROBOTStructural analysis.
- ✓ تحميل.
- ✓ تحليل ساكن وديناميكي.
- ✓ التحقق من التركيب.

تم تنفيذ تحميل الإجراءات والحساب والتحقق من التركيب باستخدام برنامج Robot 2014. سمح لنا هذا العمل بفهم سلوك هيكل تحديداً الدعامات المثالية. حتى إذا كان حسابهم يبدو بسيطاً، إلا أنهم يظلون بسبب ضعفهم في الخفة وضعف قسم الأعمدة المستخدمة، الحساسية للغاية لظاهرة عدم الاستقرار.

الكلمات المفتاحية:

دعامات كهربائية عالية الجهد، معدني، كابلات، تجميع، تصميم، مثلثيات، تحليل.

Abstract:

The end-of-study Project focused on the study of the metal structure of a high voltage electrical pylon according to the standards.

The objective of this study is to achieve a structure meeting the requirements of resistance, stability

A metal pylon for the transmission of electricity.

The pylons we are interested in are lattice type used more specifically in the electrical transport by high voltage lines.

The work consisted of calculating the different types of loads transmitted to the pylon, namely the loads transmitted by the cables and the actions of the wind.

The second part of the memory, which is just the computer application, was done in four steps:

- ✓ Pylon modelling with Autodesk ROBOT Structural Analysis.
- ✓ The loading.
- ✓ Static and dynamic analysis.
- ✓ Verification of assemblies.

The loading of the actions, the calculation and the verification of the assemblies were carried out using the software *ROBOT 2014*.

This work allowed us to understand the specific structure behavior that are lattice pylons. Even if their computation seems simple, they remain, however, because of their slenderness of their lightness and the weakness of section of the bars used, very sensitive to the phenomenon of instability.

Key words: HT electric pylon, metallic, cables, assembly, modeling, trellis, analysis.

Introduction Générale :

Depuis plusieurs siècles, l'homme cherche à parfaire ces constructions en se basant sur des techniques de bon sens, sur l'expérimentation ou encore en utilisant des normes qui assurent la sécurité des ouvrages. Vu les avantages que la construction métallique présente (grande rigidité, grande résistance et faible masse, l'homme l'a choisi comme solution pour plusieurs ouvrages. De ce fait on la retrouve dans plusieurs applications : Ponts, structure de toiture, structure portante, pylône, coques...

Les pylônes ont pour fonction de maintenir les câbles à une distance minimale de sécurité du sol et des obstacles environnants, afin d'assurer la sécurité des personnes et des installations situées au voisinage des lignes. Leur forme, leur hauteur et leur robustesse, ou résistance mécanique, dépendent de leur environnement (conditions climatiques) et des contraintes mécaniques (terrain) auxquelles ils sont soumis. Leur silhouette est caractérisée par la disposition des câbles conducteurs.

Bien que les pylônes à treillis soient utilisés depuis très longtemps, et ce, partout à travers le monde, les connaissances actuelles ne permettent toujours pas de déterminer avec suffisamment de précision la capacité structurale de ce type de structure [1].

Le dimensionnement de toute structure métallique selon ces normes repose sur un concept clair, définissant les méthodes de calcul et les types de vérifications à effectuer pour garantir son aptitude au service et sa sécurité structurale d'où la nécessité de connaître et maîtriser ces références.

Cependant ce genre de structures légère et élancée est sensible aux effets d'instabilités dues aux sollicitations climatique en général .Il est donc nécessaire de veiller lors de leur dimensionnement à s'assurer justement de leur stabilité. Cela passe par une analyse de dimensionnement précise et une vérification des différents problèmes d'instabilités (flambement, déversement, voilement etc.)

Nous nous proposons dans ce travail de mener une analyse statique non linéaire et une analyse dynamique sur la structure de type pylône. Le but étant d'anticiper les éventuelles instabilités d'éléments locaux composants le pylône (comme le flambement local de barre par exemple).

Cette analyse est menée au moyen d'une analyse numérique utilisant le logiciel Autodesk ROBOT Analysis Professionnel 2014 dans un comportement d'analyse non linéaire incluant le flambement en tenant compte de l'effet P-Delta.

Pour cela notre travail composées essentiellement en deux partie :

- Partie bibliographie
 - Généralités sur les pylônes
 - Généralité sur les pièces métalliques.
 - Conception d'un pylône électrique.
 - Principe de la modélisation et simulation numérique de pylône.
- Partie calcul et analyse :
 - Analyse statique et dimensionnement.
 - Etude dynamique (Modale et sismique).
 - Etude d'assemblage et fondations.

Et le dernier chapitre aborde la Technologie et exigences.

Finalement nous avons étudié 3 variantes, Complété par une étude comparative, avec une conclusion générale qui résume les principaux axes de notre projet.

Chapitre I

Généralités sur les pylônes

I-1.Introduction :

Dans ce chapitre, on va commencer par une étude bibliographique qui consiste à faire une recherche sur l'historique des pylônes et les différents types existants. Enfin, on va finir par une étude qualitative des normes utilisées pour le dimensionnement de notre pylône.

I-2. Evolution historique des réseaux et pylônes électriques :

Un pylône (terme issu du grec « *pulon* », signifiant *portail*) est considéré comme étant une construction monumentale formée de deux tours à base rectangulaire surmontées d'un linteau, entourant une porte d'entrée dans les temples égyptiens. À l'extérieur, des renforcements permettaient de planter d'immenses mâts à l'extrémité desquels flottaient des oriflammes, annonçant de loin la présence de la maison divine [2].

Le 2 juillet 1729, la première transmission d'impulsions électriques sur une longue distance a été faite par le physicien Stephen Gray qui a utilisé des cordes de chanvre humide suspendus par des fils de soie (l'importance des conducteurs métalliques n'était pas appréciée à l'époque). Il voulait prouver la possibilité de transférer de l'électricité par ce moyen. La première déclinaison pratique en sera la télégraphie [3].

XIX^e siècle :

- ✓ En 1882, la première transmission à haute tension se fait entre Munich et Bad Brook.
- ✓ En 1891, le premier usage de courant alternatif triphasé sur lignes aériennes se fait à l'occasion du Salon international de l'électricité, à Francfort.
- ✓ En 1892, la ligne aérienne triphasée du salon international de l'électricité sera prolongée jusqu'à Heilbronn. C'est donc la première ville au monde à être alimentée en électricité par des lignes aériennes de longue distance.

XX^e siècle :

- ✓ En 1912, la première ligne à haute tension (110 kV) entre en service.
- ✓ En 1923, pour la première fois, c'est une tension de 220 kV qui est appliquée à la ligne.
- ✓ En 1957, la ligne aérienne traversant le détroit de Messine a été mise en service en Italie.
- ✓ Dès 1967 en Russie et aux États-Unis, des lignes à haute tension de 765 kV sont construites.

XXI^e siècle :

- ✓ En 2003, la construction de la plus grande ligne à haute tension a débuté en Chine
- ✓ En 2009, la state Grid Corporation of China Active sa première ligne à 1 000 kV.
- ✓ L'Inde prévoit un fort développement de son réseau 800kV, et vers 2013-2014, la Mise en service d'un réseau 1 200 KV.

Actuellement, le pylône est une structure verticale en bois, en béton armé ou en métal, utilisée comme support pour les câbles aériens (Pylônes de lignes électriques) ou les antennes (pylône Global System for Mobile communication GSM) [2].

I-3. Définition de pylône :

Structure métallique ou en béton armé verticale destiné à porter des câbles aériens (Pylône de ligne électrique), des antennes de toutes sortes (pylône GSM), les ponts suspendus, l'éclairage public etc.

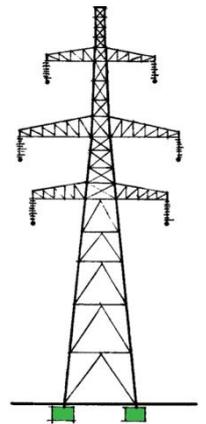
I-4. Avantages et inconvénients :

Aventages

- Faciliter de montage et démontage soit en pièces ou en éléments
- Léger et résistant aux intempéries (neige, vent , pluie)
- Rentable (réalisation de grande distance en un temps record)
- Entretien facile

Inconvénients

- Demande de main d'œuvre qualifier
- Prix de revient
- Présente un certain danger



I-5. Importance de l'utilité du pylône :



Un pylône de télécommunication, support généralement métallique utilisé pour supporter des antennes de télécommunications



Un pylône électrique, support généralement métallique utilisé pour les lignes de transport d'électricité par câble



Un pylône (remontée mécanique), support généralement métallique utilisé pour supporter les câbles de remontées mécaniques : téléskis, télésièges, télécabines, téléphériques...



Un pylône (Égypte antique), une porte monumentale située à l'entrée d'un temple de l'Égypte antique



Un pylône (construction), support utilisé dans la construction de pont suspendu ou de pont à haubans



Pylone d'éclairage ,des lanternes stylisés,des structure routieres lumineuses et de signalisation,des appareils d'éclairage.

I-6. Les différents types de pylône :

Les pylônes sont des structures généralement réalisées avec des éléments métalliques pour des raisons de légèreté et de résistance et ils ne sont pas identiques, si bien qu'il en existe plusieurs sortes selon les contraintes engendrés, leurs formes, leurs matériaux constitutifs. Selon les matériaux, on distingue les pylônes métalliques, en béton, et en bois. **Les pylônes électrique** sont des supports verticaux portant les conducteurs d'une ligne à haute tension et peuvent se subdiviser en trois (03) grandes catégories selon les contraintes engendrées : Les pylônes monopodes, auto-stable (en treillis) et haubanés [4].

I-6-1 Pylône auto-stable (en treillis) :

C'est un pylône métallique constitué par un assemblage de membrures formant un treillis et destiné à la plupart des lignes de transport de l'électricité, sous forme de tension alternative ou de tension continue. Il comporte un fût quadrangulaire et des consoles ou des traverses. Les fondations sont généralement à pieds séparés. On les appelle des pylônes tétrapodes. Il existe plusieurs modèles de pylônes à treillis.

				
<i>Pylône à un triangle</i>	<i>Pylône à deux triangles</i>	<i>Pylône à trois triangles</i>	<i>Pylône à quatre triangles</i>	<i>Pylône à six triangles</i>

Tableau I-1 : Schéma de pylônes à triangles.



Fig. I-1: Pylône chat .

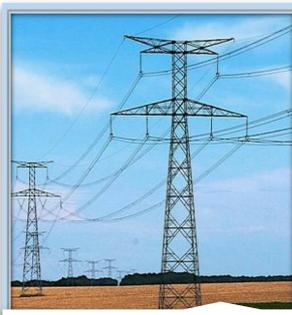


Fig I-2: Pylône électrique de type Beaubourg.



Fig I-3: Pylône électrique portique.

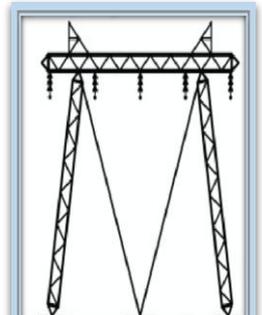


Fig I-4: Pylône Trianon.

I-6-2 Pylône haubané :

C'est un mât soutenu par des haubans ou câbles en acier, le mât se présente, en général, sous forme Triangulaire, il est constitué d'éléments tubulaires soudés avec des autres solides et angulaires formants un treillis. Ce type de pylône n'est pas assez rigide car la section transversale du treillis et les sections des barres qui le constituent sont faibles. En plus cette solution représente un inconvénient majeur qui est l'encombrement des câbles.

I-6-3 Pylône haubané en V :

Le pylône en V haubané est un pylône métallique en treillis. À la différence du pylône traditionnel, son fût forme un V fermé par la console. Il est fixé au sol par sa base et par quatre haubans en acier. Il a l'avantage d'être beaucoup plus léger que le pylône en treillis traditionnel.

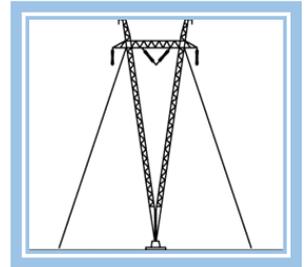


Fig.I-5 : Pylône électrique haubané en V.

I-6-4 Pylône haubané à chaînette :

Facile à monter et de fabrication simple, le pylône à chaînette est utilisé sur certaines sections des lignes. Il 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.

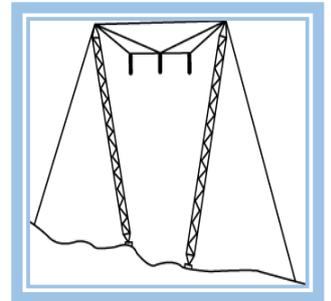


Fig.I-6 : Pylône électrique à chaînette.

I-6-5 Les pylônes monopodes :

C'est un pylône constitué d'un ensemble de tronçons sous forme de tubes creux, fabriqués en acier Galvanisé, et assemblés par boulonnage au niveau des brides. Ce type de pylône est relativement cher compte tenu du procédé de fabrication mais il est facile à monter. Les pylônes monotubulaires sont principalement utilisés dans les zones urbaines car ils offrent un encombrement réduit au niveau de leur base.



Fig.I-7: Pylône électrique Muget.



Fig.I-8: Monopode Fougère.

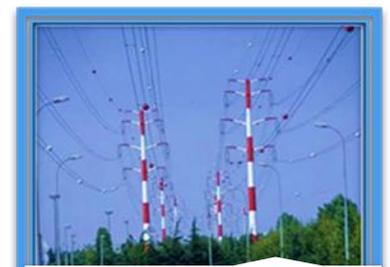


Fig.I-9: Pylône monopode roseau.

I-6-6 Les pylônes modernes :



Fig.I-10 : Les pylônes en future.

I-7. Choix des matériaux :

La majorité des pylônes doit être :

I-7-1 Finalités de la construction :

<i>Résistant et stable</i>	On doit pour cela avoir une sécurité suffisante avec l'impératif de l'économie.
<i>Durable</i>	Pour éviter des entretiens trop fréquents
<i>Economique</i>	On ne doit pas perdre de vue dans la conception tout ce qui pourrait augmenter le coût du projet, notamment, le surdimensionnement, les délais d'exécution, le type de matériau à utiliser, le moyen de transport, la main d'œuvre...

I-7-2 Matériaux structuraux :

Selon les matériaux, il y a différents types des pylônes y compris le pylône en béton renforcé, en bois et en acier.

<i>Matériau</i>	<i>Justification</i>
<i>Le bois</i>	Ne convient pas parce qu'il n'est pas assez résistant pour des hauteurs importantes et représente par ailleurs des difficultés de point de vue réalisation donc non économique .
<i>Béton armé</i>	Ne convient pas parce que vu la hauteur du pylône, le béton armé ne sera pas économique, en effet la pression du vent va entraîner des grandes sollicitations ce qui va aboutir à des sections importantes donc de poids propre plus important, ajoutant les problèmes d'exécution.
<i>Métallique (et plus spécialement l'acier)</i>	Le plus lus utilisé c'est la meilleure solution vu les avantages suivants : <ul style="list-style-type: none"> • Légèreté et résistance. • Surfaces exposées au vent sont réduites c'est un grand avantage car la structure est très élancée et par conséquent les effets du vent sont prépondérants pour le dimensionnement de la structure. • Gain énorme sur le coffrage. • Délai d'exécution réduit. • Facilité de montage et de démontage.

Le métal présente toutefois un inconvénient majeur celui de la corrosion. En revanche toutes les précautions seront prises pour lutter contre. Concernant la nuance d'acier, il est recommandé d'utiliser l'acier doux au lieu de l'acier à haute résistance, pour la construction des pylônes, vu que ce dernier présente l'inconvénient d'être plus fragiles aux basses températures et vulnérable aux chocs lors de la construction et Le transport. L'acier doux est d'ailleurs moins corrodants. D'où on utilisera la nuance Fe E24 disponible sur le marché algérien.

I-8. Les éléments constituant d'un pylône :

Tous les pylônes de façon générale peuvent être décomposés en trois parties à savoir : la tête, le fût et les pieds. La figure ci-dessous nous permettra de mieux comprendre le rôle des différentes parties (*figure.I-11*).

I-8-1. La tête :

Est constituée des consoles et du chevalet de câble de garde les consoles ont pour rôle de :

- Supporter conducteurs
- Assurer les distances électriques entre câbles
- Assurer les distances à la masse entre câbles et pylône
- Le chevalet de câble de garde à 2 fonctions :
 - Assurer l'angle de protection du câble de garde
 - Supporter le câble de garde

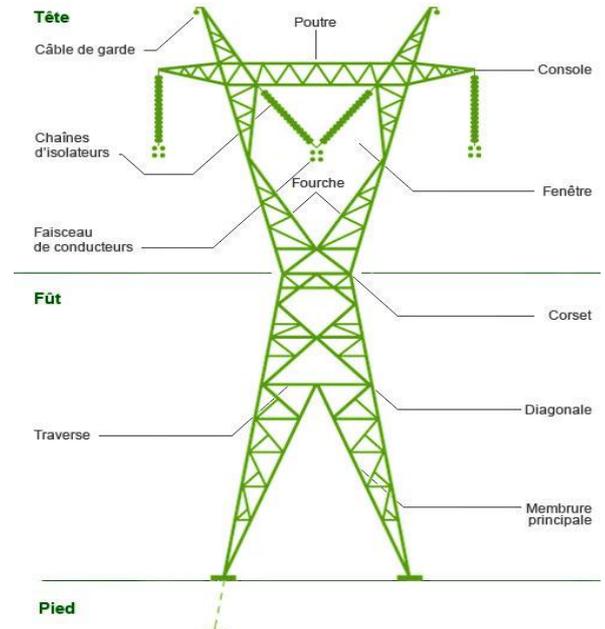


Fig.I-11 : Composants d'un pylône.

I-8-2. Le fût :

Composé du tronc, des extensions et des pieds, sa fonction est de :

- Maintenir la tête (et donc les câbles) à une certaine distance du sol.
- Transmettre au sol les efforts dus aux charges appliquées sur les câbles.

I-8-3. Le pied :

Assure la liaison entre la superstructure et la fondation.

I-8-4. Les conducteurs :

Les conducteurs ont pour rôle de véhiculer l'énergie électrique ; ils peuvent être aériens ou souterrains (et parfois sous-marins).



Fig.I-12: Ligne aériennes.



Fig.I-13: Ligne souterraines.



Fig I-14: Ligne sous-marines.

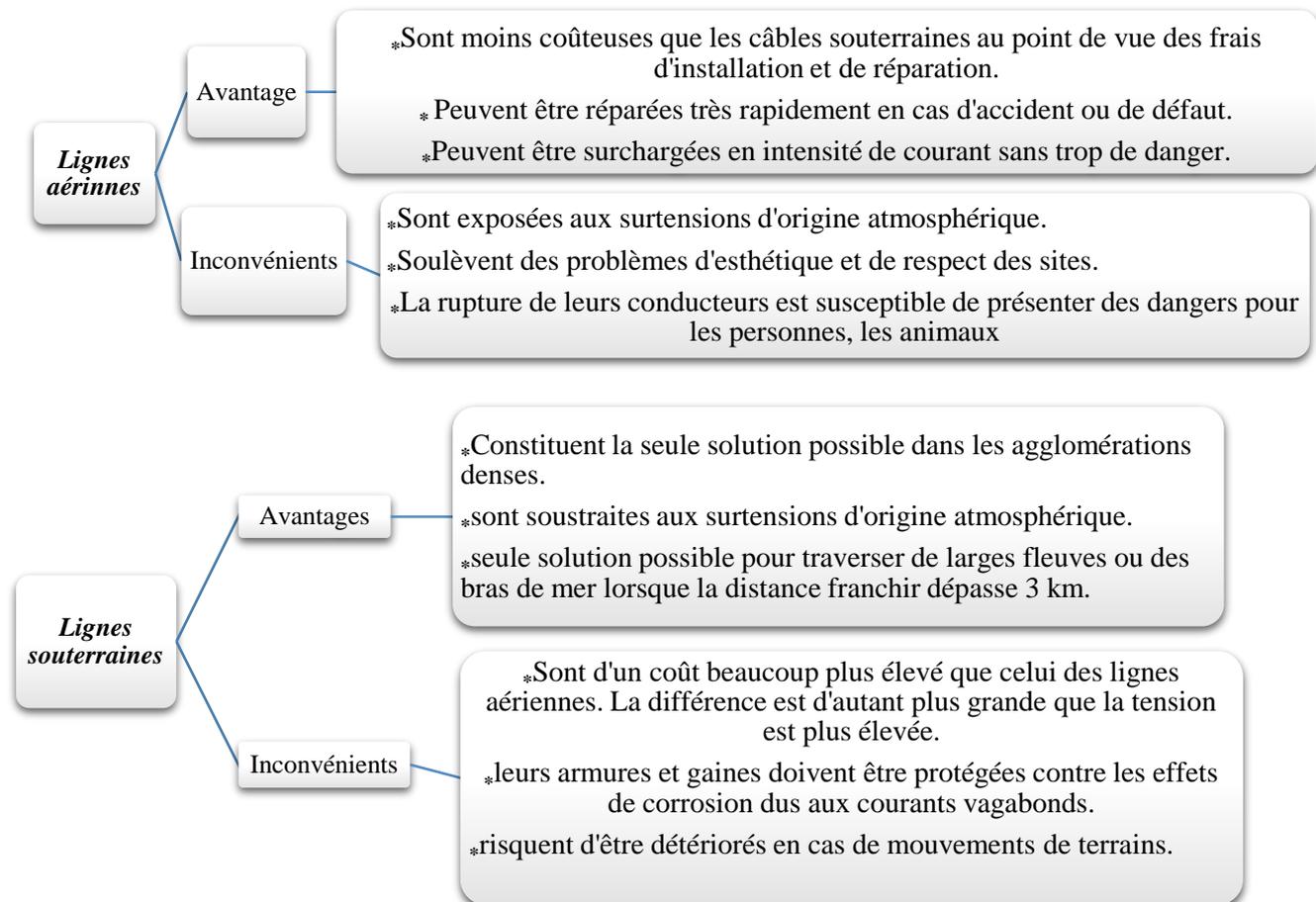


Fig.I-15 : Schéma représenter les avantages et les inconvénients des lignes aériennes et lignes souterrains.

Les conducteurs aériens sont soumis à l'action des facteurs atmosphériques : température, vent, pluie, givre... et doivent par conséquent être choisis de façon à résister à toutes ces intempéries. (Montré dans l'image suivante)

De nos jours les matériaux les plus utilisés dans la production des câbles sont : l'aluminium, le cuivre, l'acier [5].

I-8-4-1. Nature et section des conducteurs de phase :

Ils existent trois types de conducteurs : câblés (toronnée), massif et conducteurs creux. Actuellement les câbles les plus couramment utilisés pour les Lignes haute tension sont les conducteurs en aluminium avec âme en fils d'acier connus sous le diminutif d'ACSR, les conducteurs homogènes en alliage d'aluminium connus sous le diminutif d'AAAC et, dans une moindre mesure les Conducteurs en alliage d'aluminium avec

âme en fils d'acier connus sous le Diminutif d'ACAR, Les conducteurs AAAC sont de plus en plus utilisés car ils offrent de nombreux avantages techniques sur les conducteurs ACSR [6].

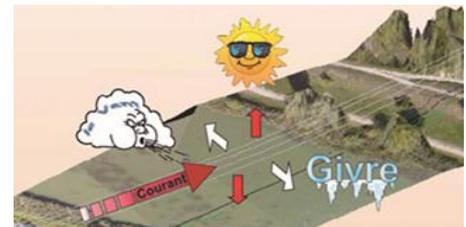


Fig.I-16 : Conducteurs câblés (toronnée).

I-8-4-2. Nature et section des câbles de garde :

Les câbles de garde ont des rôles multiples :

- ✦ Ils permettent principalement de réduire le taux d'amorçage de l'isolement par coup de
- ✦ Foudre, spécialement dans le cas des hautes tensions.
- ✦ Etant reliés à la terre ils réduisent sensiblement les tensions induites par les lignes HT Dans les circuits de télécommunications parallèles à ces lignes, Le choix du type et de la section du câble de garde est déterminé par des considérations mécaniques (flèche inférieure ou égale à celle des conducteurs de phase) et électriques (tenue au courant de court-circuit).

I-8-5. Les isolateurs :

La fixation et l'isolation entre les conducteurs et les pylônes sont assurées par des isolateurs, ils ont un rôle à la fois mécanique (porte le conducteur) et électrique (isole le conducteur par rapport au pylône) matériaux Isolant : Verre, céramique, matériaux synthétiques.

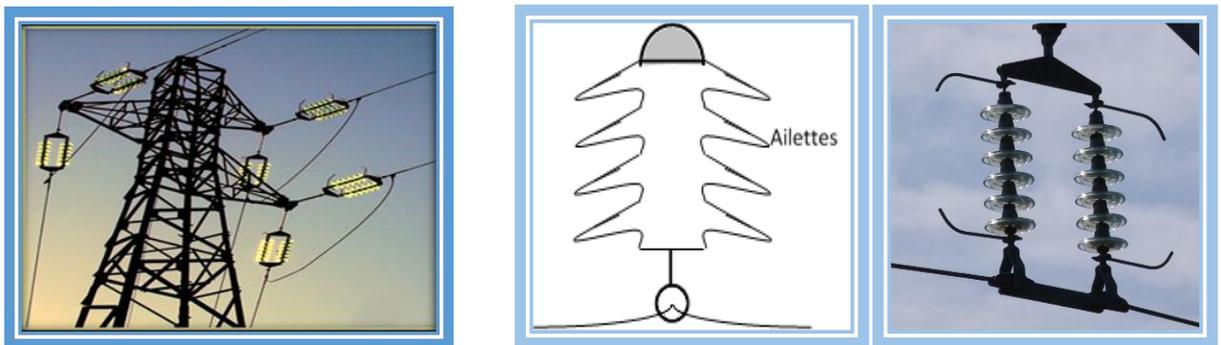


Fig.I-17 : Les isolateurs aériens.

I-8-5-1. Pollution des isolateurs :

La pollution est un phénomène qui constitue un sérieux problème sur l'isolement des ouvrages de haute tension, dont il faut tenir compte lors du dimensionnement de l'isolement des lignes de haute tension [7].

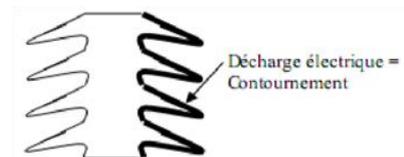


Fig. I-18 : Pollution des isolateurs.

I-8-5-2. Définition de contournement :

On dit que le contournement se produit sur la surface de l'isolateur lorsqu'une décharge électrique s'établit entre ses extrémités et contourne la surface de l'isolateur.

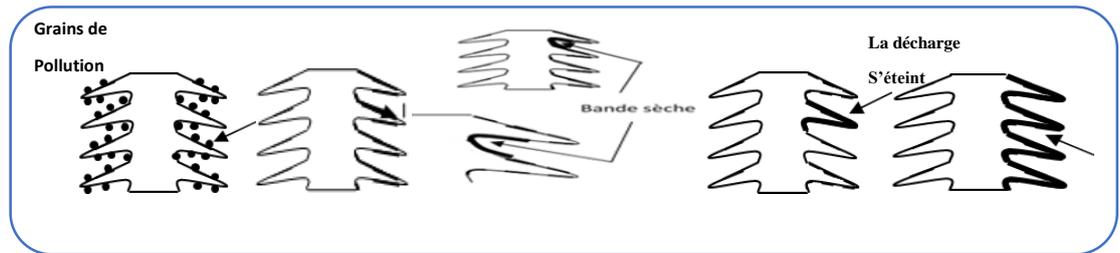


Fig. I-19 : Déroulement du contournement.

I-8-6. Accessoires pour les lignes :

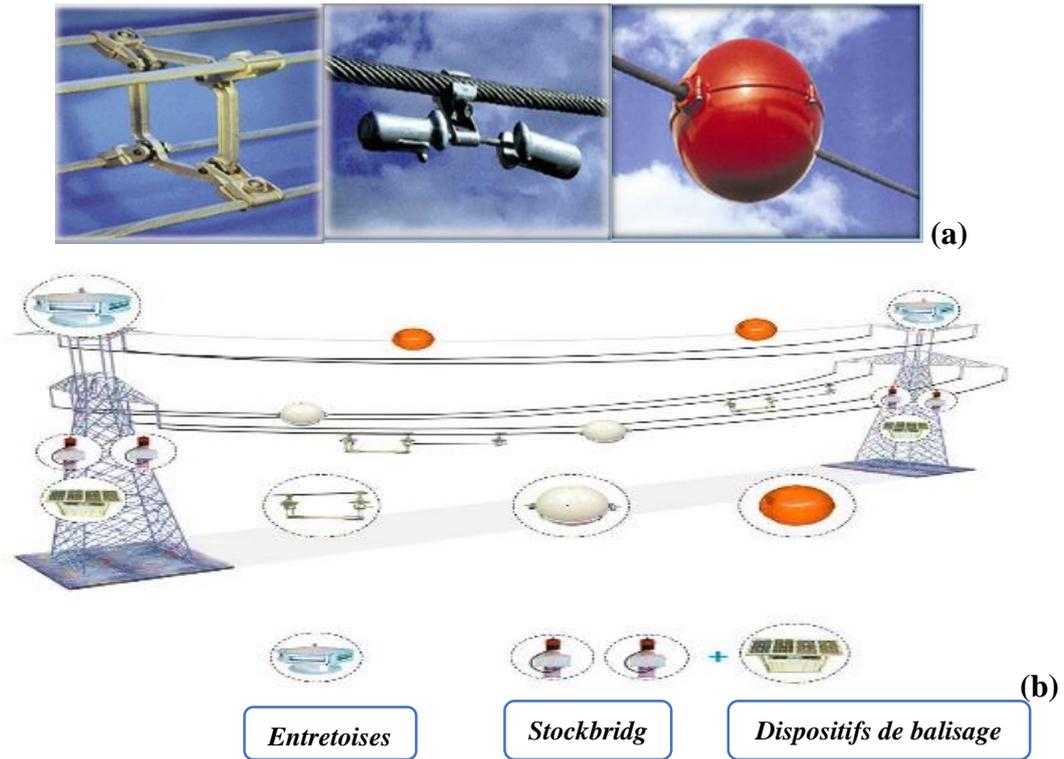


Fig. I-20 : Accessoires pour les lignes.

I-9. Les différentes centrales électriques :

Il existe plusieurs types de centrales électriques caractérisées par la source d'énergie primaire utilisée. Les principales sources de production d'électricité sont : nucléaire, hydraulique, énergies renouvelables et thermique.

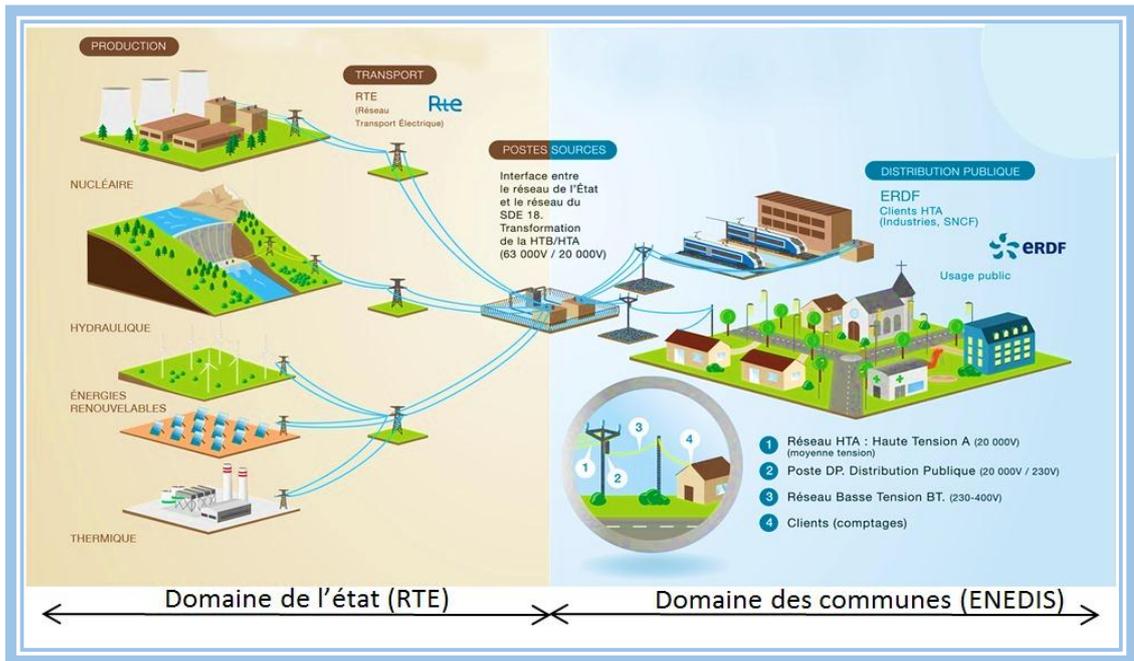


Fig.I-21 : Les centrales de productions d'énergie électrique.

I-10. Les réseaux électriques :

Un réseau électrique se définit comme un ensemble de lignes électriques reliées directement entre elles et fonctionnant sous la même tension, qui est la tension nominale de ce réseau. Cette valeur nominale de tension est classée par la norme française NF C 11-201 en différentes catégories comme indiqué ci-dessous [8] :

<i>Très basse tension</i>		$U < 50 V$
<i>Basse tension</i>	1 ^{er} catégorie (A)	$50 V < U < 500 V$
	2 ^{eme} catégorie (B)	$500 V < U < 1000 V$
<i>Haute tension</i>	1 ^{er} catégorie (A)	$1000 V < U < 50000 V$
	2 ^{eme} catégorie (B)	$U > 50000 V$

Tableau I- 2 : Différentes catégories de tension.

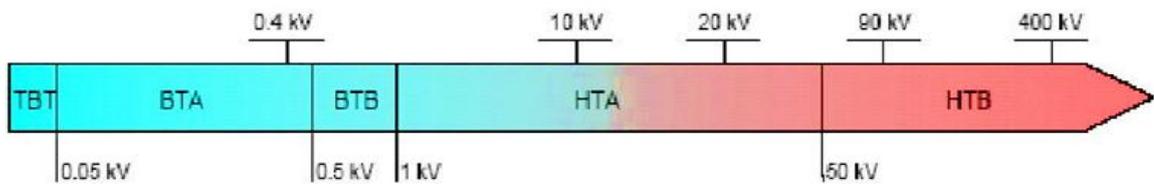


Fig.I-22 : Niveaux de tensions normalisées.

A partir de la tension et de puissances maximales que peuvent supporter les réseaux électriques, on peut les classer en trois types différents qui sont : les réseaux de transport, de répartition et de distribution [9]. Ils sont caractérisés comme suit :

<i>Tension</i>	<i>Catégorie</i>	<i>Types de réseaux</i>	<i>P_{max} de lignes</i>
230 V /400 V	Basse tension	Réseau de distribution	Environ 250 KVA
15/20/33 KV	HTA	Réseau de distribution	Entre 10 et 15 MVA
63/90/110 KV	HTB	Réseau de répartition	De 100 à 150 MVA
225 /380 KV	THT	Réseau de transport	De 500 à 1500 MVA

Tableau I-3 : Différents types de réseaux.

Chaque pylône électrique possède une base commune pour maintenir les câbles électriques écartés entre eux, à une certaine distance du sol et éloignés des obstacles rencontrés. Cela permet d'assurer la sécurité des personnes et des installations situées à proximité du réseau électrique. Si la fonctionnalité des pylônes reste la même, d'autres critères sont pris en compte pour adapter leur architecture : la topographie des lieux, le respect de l'environnement et les conditions climatiques. Par ailleurs, certains pylônes ont une résistance plus importante que d'autres. Lorsque la ligne change de direction par exemple car l'angle augmente les efforts mécaniques du pylône. On utilisera alors un pylône beaucoup plus résistant que l'on appelle « pylône d'ancrage », par rapport aux autres pylônes qui sont dit de suspension.

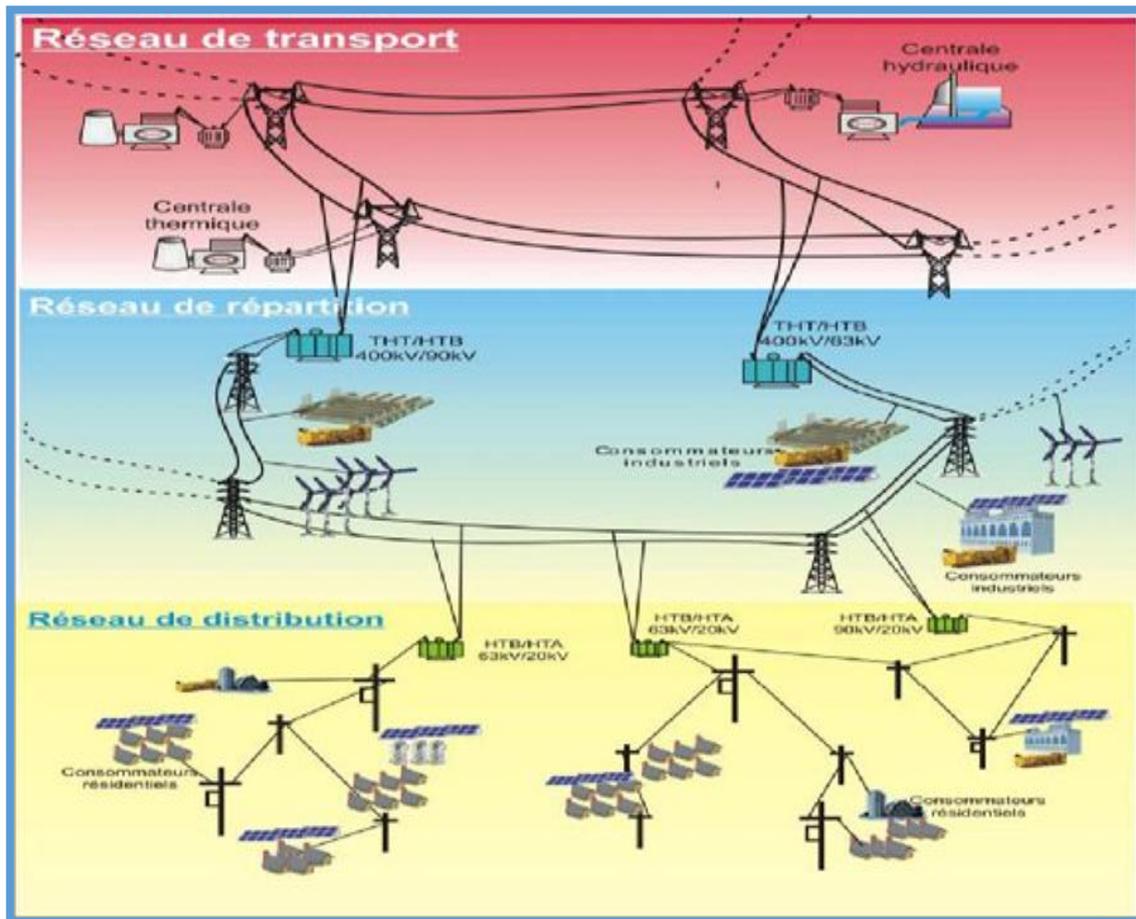


Fig. I-23 : Architecture d'un réseau électrique moderne.

➤ Les futurs réseaux électriques distribués :

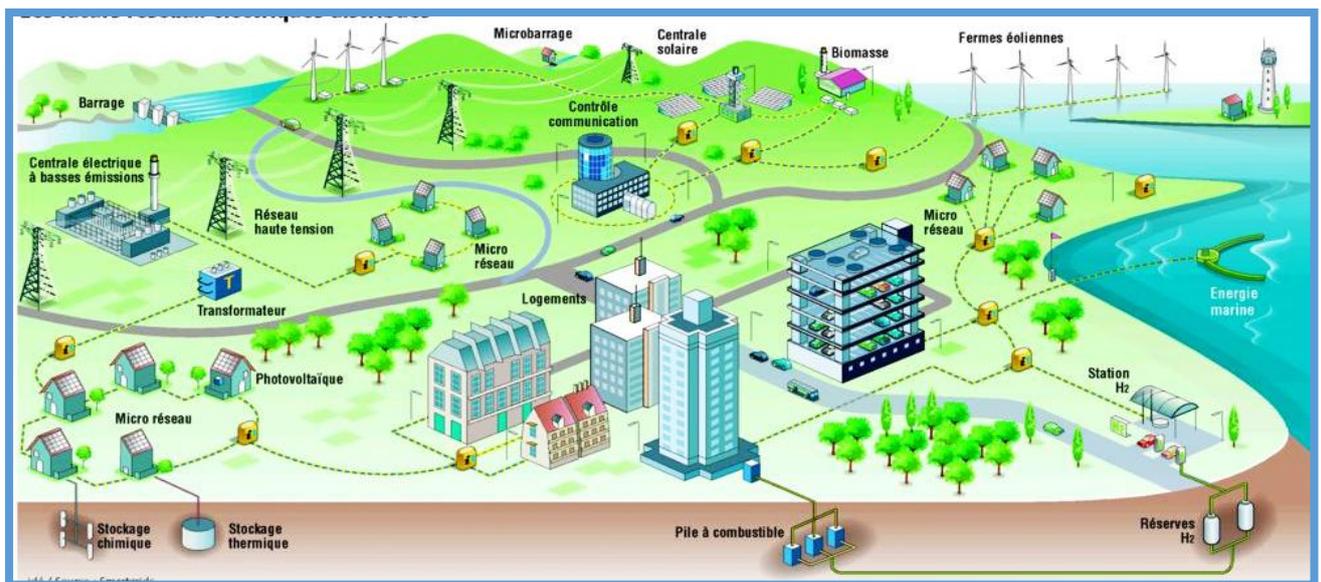


Fig.I-24 : Les futurs réseaux électriques.

I-11. Les charges transmises aux pylônes :

Les pylônes sont destinés à maintenir les conducteurs à une hauteur suffisante du sol, en tenant compte de la flèche maximum et à résister aux charges qui leur sont appliquées dans toutes les hypothèses administratives définies à partir des conditions climatiques prises en considération. Les charges transmises par les conducteurs et les câbles de garde peuvent être décomposées suivant trois directions orthogonales choisies de manière à simplifier les calculs. Par convention on appelle :

- ✓ Face élévation, la face perpendiculaire à l'axe de la ligne.
- ✓ Face profil, le plan parallèle à la ligne.

Pylône d'alignement :

Il est d'usage de choisir comme charges de référence :

Les charges verticales (V) :

- ✓ Au poids propre du pylône, des conducteurs, des câbles de garde et des chaînes d'isolateurs.
- ✓ Eventuellement au poids du givre sur les câbles.
- ✓ A la composante verticale due à la tension des conducteurs et des câbles de garde pour les pylônes dénivelés (pylônes chargés ou déchargés).

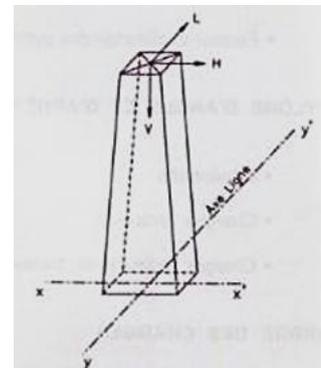


Fig. I-25 : Face Elévation et Axe de la Ligne.

Les Charges horizontales transversales (H) :

Ces charges sont dues à l'action du vent soufflant perpendiculairement à la ligne et agissent sur les faces élévation du pylône, l'action du vent soufflant transversalement sur les conducteurs, les câbles de garde (avec ou sans givre) et les chaînes d'isolateurs.

Les Charges horizontales longitudinales (L) :

Ces charges éventuelles agissent sur les faces profils du pylône. Elles sont dues à plusieurs causes. Le cahier des charges donne les hypothèses de calcul à considérer.

- ✓ Différence de tension de part et d'autre de la chaîne d'alignement due au givre.
- ✓ Dissymétrique.
- ✓ Rupture d'un conducteur ou d'un câble de garde.

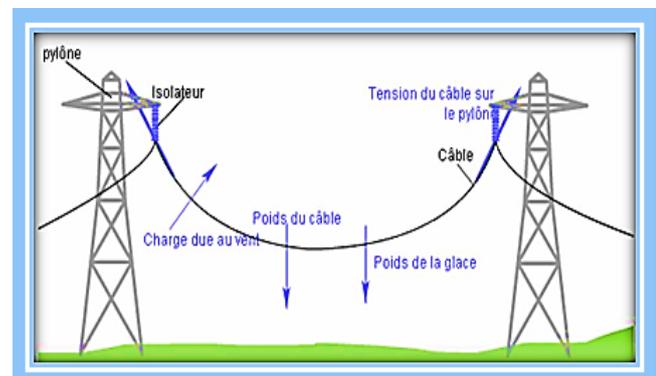


Fig.I-26 : Effort mécanique appliqués sur le câble.

- ✓ Glissement des câbles dans la pince.
- ✓ Haubanage du pylône au cours du déroulage.
- ✓ Ancrage provisoire des câbles au relevage.

I-12. Les règlements et Normes utilisées pour le dimensionnement des pylônes :

Il existe un nombre important de normes de calcul et vérification des pylônes, chaque norme ayant une philosophie bien particulière. Dans ce qui suit, on va se focaliser sur les normes utilisées dans notre étude. Entre autres, les deux normes françaises pour le calcul des structures métalliques CM66-additif 80 et EC3 (EC3), Le CCM97 est le règlement technique Algérien qui vient substituer le CM66 pour le calcul des constructions métalliques, R.N.V1999 pour le calcul des effets du vent et R.P.A.99/ version 2003 pour l'impact du séisme.

I-12-1. Règles CM66 et additif 80 :

Les règles françaises CM66 (1966) ont pour but de codifier les méthodes de calcul applicables à l'étude des projets de constructions en acier y compris les pylônes. L'additif 80 : Ce règlement, qui est issu des progrès réalisés dans l'étude du comportement élastoplastique des matériaux, adopte le critère de Von Mises et permet de mener des calculs qui se basent sur le module de plasticité des profils. Pour le calcul, l'acier est supposé avoir un comportement élastoplastique parfait.

I-12-2. EUROCODE 3 (EC3) :

Faisant parti des EUROCODES publiés par le comité Européen de Normalisation (CEN), l'EC3 est l'ensemble des règles communes européennes de conception et de dimensionnement des structures en acier définissant les exigences de résistance, d'aptitude au service et de durabilité. L'Eurocode3, qui peut s'apparenter à un règlement par « pondération ses charges aux états limites », apporte cependant plus de rigueur et de cohérence et surtout une approche « semi-probabiliste » identique pour tous les matériaux.

I-12-3. Règles CCM97 :

Est un règlement très novateur, qui fixe des règles très pertinentes, et qui propose diverses alternatives de dimensionnement à l'ingénieur (calculs en élasticité ou en plasticité, calculs selon des analyses au premier ou au second ordre). Ces calculs sont basés sur le principe de sécurité semi-probabiliste qui conduit à une formulation plus précise des expressions de résistance, de rigidité et de stabilité.

I-12-4. Règles Neige et Vent R.N.V 1999 :

Le présent règlement est élaboré sous l'égide de la commission technique permanente (C.T.P.) pour le contrôle technique de la construction que celle-ci a adopté lors de sa 18ème session tenue le 11 Avril 1999. Il traite des constructions courantes, mettant à la disposition des professionnels et concepteurs de la construction des méthodes d'évaluation des actions climatiques (neige et vent) et des surcharges de sable en zones sahariennes. Le document est fondé sur une approche probabiliste : les actions « normales » et « extrêmes » des anciennes règles sont remplacées par le concept unique d'action caractéristique définie par référence à un zonage territorial (neige - vent - sable) liée aux spécificités climatiques locales.

I-12-5. Règles RPA99/version 2003 :

La réglementation parasismique est le document technique "DTR BC 2-48" dit : "REGLES PARASISMIQUES ALGERIENNES RPA99». La première version a été RPA81 qui fut suivie par le RPA81 version de 1983 après le séisme de Chlef du 10 Octobre 1980. La troisième version RPA88 a été suivie par la version RPA99. Les règles RPA99 tiennent compte des errements des séismes tels que le tremblement de terre d'Oued Djer (Algérie) en octobre 1988 et celui d'Ain Témouchent en 22.12.1999. Ainsi elle introduit 4 Sites de sol au lieu des 2 sites (sol meuble et sol ferme) du RPA88. Enfin le RPA99 version 2003, est en vigueur après le séisme du 21 Mai 2003. Le RPA99 est applicable à toutes les constructions courantes. Il n'est pas directement applicable aux constructions telles que les ouvrages d'art et ceux enterrés.

I-13. Conclusion :

Dans ce chapitre, on a mis la lumière sur les différents types de pylônes qui existent et leurs accessoires, ainsi que sur les normes qui permettent leur dimensionnement, étudié théoriquement les constituant d'un réseau d'énergie électrique ainsi ces classifications.

Chapitre II

**Généralité sur les pièces
métalliques**

II-1. Introduction :

Une charpente est un ouvrage composé de pièces de métal assemblées entre elles pour constituer l'ossature d'une construction (hangar, salle, pont, pylône électrique) Ou de certains des éléments. Entrent également dans le domaine de la charpente, les dispositifs accessoire et provisoire, comme les échafaudages et le coffrage, ainsi que les éléments fixes porteurs. Cette importance croissante que revêt la charpente métallique a été toujours impulsée et soutenue par un travail de recherche et de normalisation sur l'acier, et a qui aboutit à une meilleure maîtrise du calcul et de l'exécution.

II-2. Avantages et inconvénients :

Avantages	inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> • Souplesse architecturale. • Compétitivité. • Facilement démontable. • Chantier plus propre. • Volume peu encombré, structure élancée. • Extension facilitée. • Construction propre, sans rejet et recyclage. 	<ul style="list-style-type: none"> • Légèreté de la structure (instable devant le vent). • Tenue au feu médiocre. • Des protections au feu et à la corrosion sont souvent nécessaires. • Montage délicat.

II-3. Caractéristiques des aciers de construction :

II.1.1 Caractéristiques mécaniques des aciers de construction :

L'acier possède de très bonnes capacités de résistance lorsqu'il est soumis à la traction. En effet les valeurs de la limite d'élasticité et de la résistance à la traction de ce matériaux sont très élevés .en compression, le comportement de l'acier est identique au comportement en traction, mis à part les phénomènes d'instabilité éventuels [10].

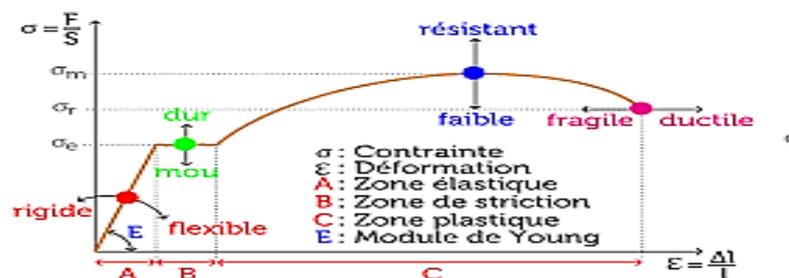


Fig. II-1 : Diagramme contrainte –déformation de l'éprouvette de traction.

Dans la norme EC3 les propriétés mécaniques sont :

- ✓ La limite élastique f_y , limite ultime f_u .
- ✓ Le module de Young E et le coefficient de poisson ν .
- ✓ Le module d'élasticité longitudinale $E = 210000$ MPa.
- ✓ Le coefficient de poisson $\nu = 0.3$.
- ✓ Le module d'élasticité transversale $G = E / [2(1 + \nu)] = 81000$ MPa.
- ✓ Le poids volumique de l'acier $\rho = 78.5$ KN/m³.
- ✓ Coefficient de dilatation linéaire $\alpha = 12.10^{-6}$ /°C.

Les nuances d'acier produites et disponibles sur le marché sont : S235, S275, S355

Pour les profilés on adopte les caractéristiques mécaniques suivantes [11] :

Caractéristiques mécaniques des profilés en fonction de leur épaisseur t	Nuance des aciers		
	S.235	S.275	S.355
Limites élastique f_y (MPa) $t \leq 16$ mm	235	275	355
$16 \leq t \leq 40$ mm	225	265	345
$40 \leq t \leq 63$ mm	215	255	335
Contraintes de rupture en traction f_u (MPa) $t \leq 3$ mm	360/510	430/580	510/680
$3 \leq t \leq 100$ mm	340/470	410/560	490/630
Allongement minimal moyen ϵ $t \leq 3$ mm	18%	15%	15%
$3 \leq t \leq 150$ mm	23%	19%	19%

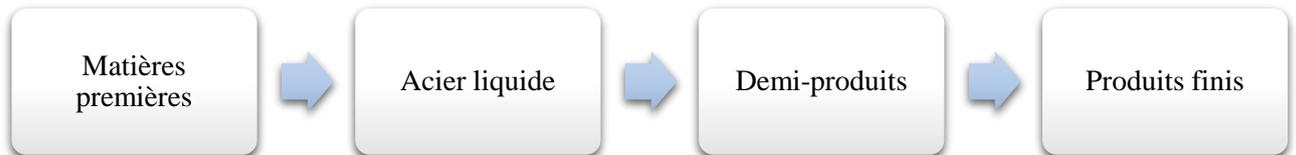
Tableau II-1 : Les Caractéristiques mécaniques des profilés en fonction de leur épaisseur t .

II-3-1. Caractéristiques géométriques des Profils de construction :

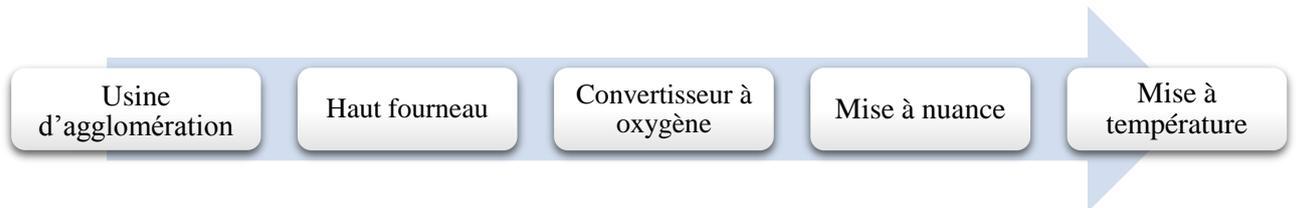
- ✓ A : aire de la section en cm²
- ✓ M : masse en Kg/m
- ✓ I_y : moment d'inertie par rapport à l'axe G_y en cm⁴
- ✓ I_z : moment d'inertie par rapport à l'axe G_z en cm⁴
- ✓ W_{ely} : module d'inertie élastique en cm³ → $W_{ely} = I_y / v$ tel que : $v = h/2$
- ✓ W_{elz} : module d'inertie élastique en cm³ → $W_{elz} = I_z / w$ tel que : $w = b/2$

- ✓ W_{ply} : module d'inertie plastique en cm^3 → W_{ply} =moment statique par rapport à l'axe de flexion G_y
- ✓ W_{plz} : module d'inertie plastique en cm^3 → W_{plz} =moment statique par rapport à l'axe de flexion G_z
- ✓ A_{vy} : section soumise au cisaillement en cm^2

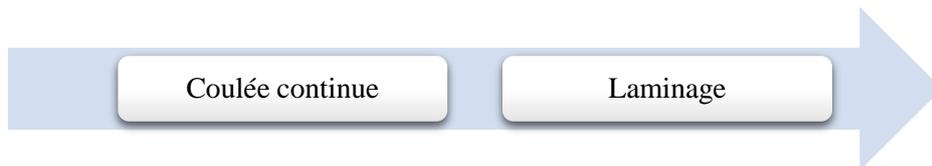
II-4. Fabrication d'acier :



- ✓ **Matières premières** → **Acier liquide**



- ✓ **Acier liquide** → **Demi-produits** → **Produits finis**



II-5. Les pièces en acier :

L'acier liquide est coulé ensuite dans des lingotières en cuivre carrées ou rectangulaires. On obtient ainsi des blooms, des brames et des billettes dits semi-produits qui vont par la suite être laminés pour donner au métal les dimensions et formes souhaitées. Les aciéries (industrie de fabrication de l'acier) ont pu élaborer des profilés métalliques normaux PN tel que : IPN, IPE, UAP, HEA, HEB, HEM, des laminés ou profilés marchands PM tel que les cornières L, les plats -, les tés T, les ronds pleins □, les carrés pleins ■, les tubes et des tôles planes ou ondulées.

Le type de profilé	Les caractéristiques principales
Profilés I	Ils représentent fort déséquilibre entre les deux inerties Principales et sont donc optimisés pour les applications En flexion simple.
Profilés H	Ils représentent une inertie latérale plus importante que les profilés I et sont donc adaptés pour reprendre des efforts de compression et des sollicitations combinées, y compris des torsions limitées.
Profilés U	Il s'agit de profilés utilisés essentiellement pour des pièces secondaires en flexion (fers de rive de planchers) et éventuellement dans les triangulations d'ossatures en treillis ou ils sont alors jumelés.
Cornières à aires égales ou inégales	Servent à la construction des assemblages simples de profils en I ou H.

Tableaux II-2 : Les caractéristiques principales.

Poutrelles IPE	Poutrelles IPN	Poutrelles H	Poutrelles U (ailes droites)	Poutrelles U (ailes inclinées)	Désignation	Forme de la Section	Dimensions extrêmes (mm)	Poids/mètre extrêmes (kg/m)	Normes dimensions et tolérances
					Cornières égales Ou inégales		15 x 1,5 ou 20 x 15 x 2 à 100 x 5 ou 100 x 50 x 5	0,3 à 7,5	NFA 37-101
					Couliasses		11 x 30 à 200 x 80 épaisseur : 2 à 6	0,6 à 15,8	
IPE 80 à 600 ; 750 IPE A 80 à 600 IPE O 180 à 600 IPE R 140 à 600	IPN 80 à 500 ; 550	HEA HEB HEM } 100 à 1100 HEC 300 HEAA 100 à 1100 HL 1000 & 1100 HD 260 à 400 HP 220 à 400	UAP 80 à 300 UAP-A 250 & 300	UPN 80 à 400 UPN-A 240 à 400	C		30 x 11,5 x 2 à 140 x 50 x 3	1,3 à 6	
					Omegas		17 x 25 x 12 x 1,5 70 x 38 x 30 x 4	0,8 à 6,5	
					Profilés en Z		120 à 250 épaisseur : 1,5 à 5	3 à 16,5	

Tableau II-3 : Profilés classique.

Tableau II-4 : Profils minces.

Désignation	Forme de la Section	Dimensions extrêmes (mm)	Poids/mètre extrêmes (kg/m)	Normes dimensions et tolérances
Profils creux Ronds		extér : 21,3 à 1 620 épaisseur : 2,3 à 40	1 à 1 164	NF A 49-501 (finis à chaud). et NF A 49-541 (finis à froid)
Profils creux Carrés		côté : 22 à 350 épaisseur : 2,3 à 12	1,5 à 124	
Profils creux rectangulaires		35 x 20 à 400 x 300 épaisseur : 2,3 à 12	1,8 à 124	

Tableau II-5 : Profilés creux.

II-6. Les critères de choix d'un profilé :

Le choix d'une section de profilé s'effectue selon 3 critères :

- ✓ **Le rôle structurel** : L'élément qui transfère les charges par la flexion nécessite un profil creux rectangulaire ou circulaire.
- ✓ **Le rôle esthétique** : Visibilité de la structure et des détails d'assemblages et encombrement du volume.
- ✓ La possibilité de jouer un rôle **secondaire** : Assemblages de gaines et conduits techniques à l'intérieur des profilés.

II-7. Classification des sections transversales :

L'Eurocode 3 et CCM97 ont introduit la notion de classe de sections, une notion très novatrice qui définit quatre classes de section de la plus performante (classe 1) à la plus faible (classe 4). Sont définies [12] :

• Sections transversales de classe 1

- les sections pouvant atteindre leur résistance plastique, sans risque de voilement local, et possèdent une capacité de rotation importante pour former une rotule plastique.

• Sections transversales de classe 2

- les sections pouvant atteindre leur résistance plastique, sans risque de voilement local, mais avec une capacité de rotation limitée.

• Sections transversales de classe 3

- les sections pouvant atteindre leur résistance élastique en fibre extrême, mais non leur résistance plastique, du fait des risques de voilement local.

• Sections transversales de classe 4

- les sections ne pouvant pas atteindre leur résistance élastique, du fait des risques de voilement local. Leur résistance est calculée par des méthodes appropriées en introduisant la notion de largeur efficace.

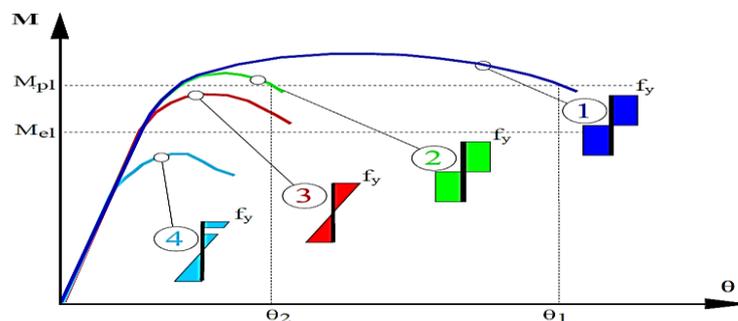


Fig.II-2 : Classification des sections à partir de la relation moment-rotation transversales.

II-8. Etude de contreventement :

Le contreventement est défini comme étant un système statique permettant d'assurer la stabilité d'un ouvrage vis-à-vis des sollicitations horizontales issues des éventuelles actions appliquées sur celui-ci (par exemple : vent, séisme, choc, freinage, etc.). Il sert également à stabiliser localement certaines parties de l'ouvrage (poutres, colonnes) relativement aux phénomènes d'instabilité (flambage ou déversement). C'est donc un élément essentiel dans la conception d'un ouvrage.

Afin d'assurer la stabilité globale d'un bâtiment, il est nécessaire que celui-ci soit contreventé selon au moins 3 plans verticaux non colinéaires et un plan horizontal ; on distingue donc les contreventements verticaux (destinés à transmettre les efforts horizontaux dans les fondations) des contreventements horizontaux (destinés à s'opposer aux effets de torsion dus à ces efforts).

Il existe quatre types de contreventements :

- ✓ Contreventement en V
- ✓ Contreventement en K
- ✓ Contreventement en N
- ✓ Contreventement en croix de saint André X

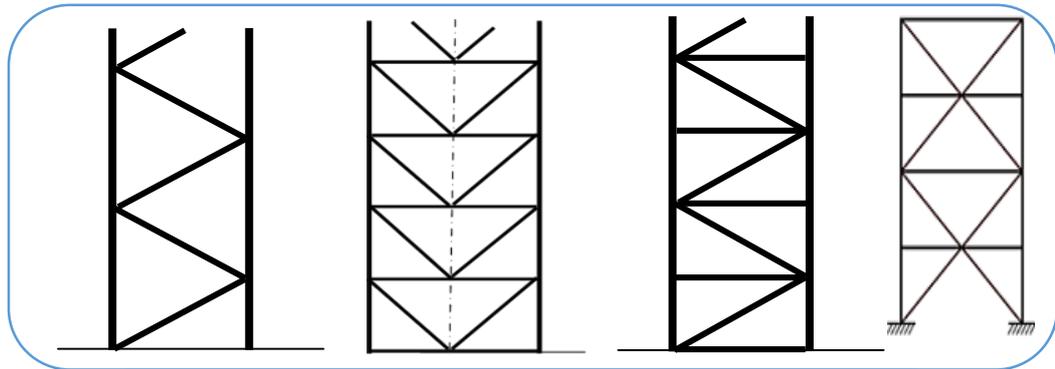


Fig.II-3 : Système de contreventement.

II-9. Les Treillis :

Un treillis est un assemblage de barres verticales, horizontales et diagonales formant un système triangulé, de sorte que chaque barre subisse un effort acceptable et que la déformation de l'ensemble soit faible. L'utilisation de treillis a pour objectifs de :

- ✓ Minimiser le poids de la structure.
- ✓ Maximiser la rigidité.



Fig.II-4 : Les éléments en treillis.

II-10. Les Composants métalliques des pièces tendus et comprimés :

II.10.1 Composants tendus [13] :

II.10.1.1 Définitions :

Un composant est dit tendu ou en traction pure lorsque ses extrémités sont soumises à des efforts qui imposent un allongement uniforme à toutes les fibres du composant. Dans le cadre de la schématisation de la théorie des poutres, le composant est tendu si la résultante des efforts s'exerçant sur une section quelconque se réduit à un effort normal appliqué au centre de gravité **G** de la section et dirigé de la section vers l'extérieur de l'élément comme illustré sur la figure II-5.

L'axe de l'effort normal est confondu avec la fibre moyenne de l'élément.

Dans les poutres en treillis, une des membrures et certain Industriel diagonal sont toujours des éléments tendus (figureII.6)

Les haubans ou câbles métalliques sont des éléments tendus particuliers qui ne fonctionnent qu'à la traction. Ils sont utilisés comme éléments porteurs dans les ponts suspendus (figureII.7)

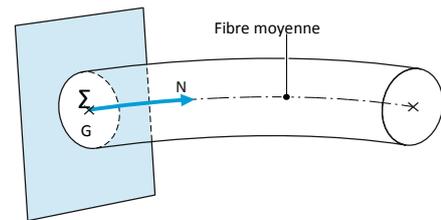
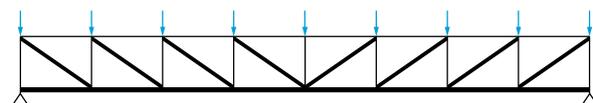


Fig.II-5 : Section courante Σ et partie du composant située à droite.



- Composants tendus
- - - Composants comprimés
- Charges verticales dirigées vers le bas

Fig.II-6 : Poutre à treillis en N.

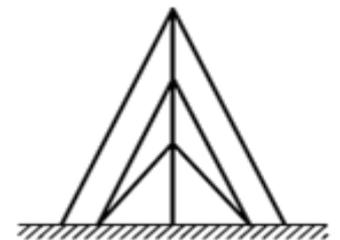


Fig.II-7 : Mât haubané.

II.10.1.2 Modes de ruine :

La ruine ou la défaillance d'un élément tendu peut avoir lieu dans la zone courante ou dans la zone d'assemblage. La défaillance dans la zone courante est due aux allongements excessifs résultant de la plastification des sections.

Les phénomènes pouvant concourir à une défaillance dans les zones d'assemblages comprennent :
Pour les assemblages boulonnés, la rupture des sections comportant les trous de boulons.

II.10.1.3 Assemblage :

L'assemblage, zone d'interconnexion de deux éléments ou plus, a pour rôle de transmettre les efforts entre ces éléments [14].

On dispose de trois types d'assemblages :

- ✓ L'assemblage riveté.
- ✓ L'assemblage boulonné par boulons ordinaires ou par boulons haute résistance (HR ou BP).
- ✓ L'assemblage soudé.

	<i>Boulonnage</i>	<i>Soudage</i>
<i>Avantages</i>	- Mise en œuvre facile - Economique	- Pas de besoin d'usinage
<i>Inconvénients</i>	- Problème local de corrosion (galvanisation, peinture)	- Temps unitaire long - Pas applicable à tous les aciers - Défaut de soudure à contrôler
<i>Utilisation</i>	- Montage sur chantier	- Assemblage en atelier. - Réhabilitation. - PRS

II-10-1-3-1. Rôle et fonctionnement des assemblages :

Un assemblage peut être souple ou rigide. L'assemblage souple doit permettre la transmission d'un effort normal, d'un effort tranchant. L'assemblage rigide permet de transmettre toutes les sollicitations (M, N, V).

a)- **Fonctionnement par obstacle** : c'est le cas des boulons ordinaires, non précontraints dont les tiges reprennent les efforts et fonctionnement en cisaillement.

b)- **Fonctionnement par adhérence** : dans ce cas, la transmission des efforts s'opère par adhérence des surfaces des pièces en contact. Cela concerne le soudage, et le boulonnage par boulons HR.

c)- **Fonctionnement mixte** : c'est le cas du rivetage (et dans les cas extrêmes, du boulonnage HR) à savoir que les rivets assurent la transmission des efforts par Adhérence des pièces jusqu'à une certaine limite, qui lorsqu'elle est dépassée, fait intervenir les rivets par obstacle, au cisaillement.

II-10-1-3-2. Mode d'assemblages :

Les différentes formes d'assemblages ci-dessus mentionnés sont généralement réalisées par les principaux modes d'assemblages suivants :

A/ Le Rivetage :

Les rivets ont été le premier moyen d'assemblage utilisé en construction métallique. Actuellement, l'emploi des rivets est limité et on leur préfère, dans la plupart des pays industrialisés, les boulons et la soudure. On les rencontre donc essentiellement dans des structures anciennes, datant du début de ce siècle .leur diamètre varie généralement de 10 à 28mm. (figure II-8)

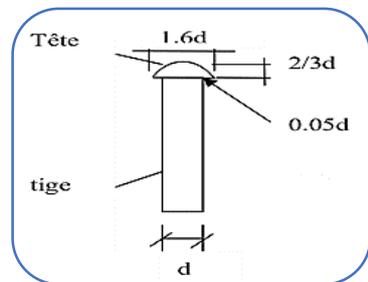


Fig.II-8 : Le Rivetage.

Le boulonnage et le soudage sont les deux assemblages les plus utilisés aujourd'hui

B/Le Boulonnage :

Les boulons traditionnels : un boulon traditionnel est composé d'une vis, d'un écrou et d'une ou deux rondelles (dans certains cas facultatives). généralement, la tête de la vis et l'écrou sont de forme hexagonale ce qui facilite le serrage qui se fait à l'aide de clefs.

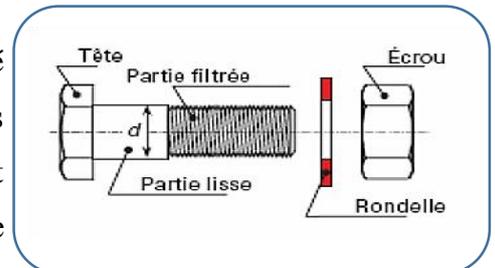


Fig.II-9 : Les composants de boulons.

On distingue deux catégories de boulons traditionnels :

❖ Les boulons ordinaires :

Ils ne nécessitent pas de précaution particulière lors de leur mise en œuvre. La qualité d'un boulon est définie par son appartenance à des classes. Ces classes sont fonction de la limite d'élasticité et de la résistance à la traction ultime (ou limite de rupture) du boulon considéré.

- **Caractéristiques des boulons :**
- ✦ **Caractéristiques géométriques :**

Classe	4.6	4.8	5.6	5.8	6.6	6.8	8.8	10.9
f_{yb} (N/mm ²)	240	320	300	400	360	480	640	900
f_{ub} (N/mm ²)	400	400	500	500	600	600	800	1 000

Tableau II-6 : Valeurs de la limite d'élasticité f_{yb} et de la résistance à la traction f_{ub} des boulons.

Désignation	M10	M12	M14	M16	M18	M20	M22	M24	M27	M30
d (mm)	10	12	14	16	18	20	22	24	27	30
d_0(mm)	11	13	15	18	20	22	24	26	30	33
Aire section fileté A_s (mm ²)	58	84.3	115	157	192	245	303	353	459	561

Tableau II- 7 : Aires des sections filetées et non filetées des boulons.

- **Vérification des boulons ordinaires :**

Le tableau suivant permettant de calculer les résistances individuelles des boulons selon l'effort auquel ils sont soumis :

Mode de ruine	Vérification (pour un seul boulon)
Résistance au cisaillement par plan de cisaillement	<p>-si le plan de cisaillement passe par la partie fileté du boulon</p> <ul style="list-style-type: none"> • pour les classes 4.6, 5.6, 6.6 et 8.8 $F_{V,Rd} = \frac{0.6f_{ub}A_s}{\gamma_{Mb1}}$ <ul style="list-style-type: none"> • pour les classes 4.8, 5.8, 6.8 et 10.9 $F_{V,Rd} = \frac{0.5f_{ub}A_s}{\gamma_{Mb1}}$ <p>- si le plan de cisaillement passe par la partie non fileté du boulon</p> $F_{V,Rd} = \frac{0.6f_{ub}A_s}{\gamma_{Mb1}}$
Résistance à la pression diamétrale	$F_{b,Rd} = \frac{2.5\alpha f_u dt}{\gamma_{Mb1}}$

	Où $\alpha = \min \left\{ \frac{e_1}{3d_0} ; \frac{p_1}{3d_0} - \frac{1}{4} ; \frac{f_{ub}}{f_u} \text{ ou } 1 \right\}$
Résistance en traction	$F_{t,Rd} = \frac{0.9f_{ub}A_s}{\gamma_{Mb2}}$
Cisaillement et traction combinés	$\frac{F_{t,sd}}{1.4F_{t,Rd}} + \frac{F_{V,sd}}{F_{V,Rd}} \leq 1$
Notations	<ul style="list-style-type: none"> • A : aire de la section brute du boulon • A_s:aire de la section filetée du boulon • d : diamètre du boulon • d₀:diamètre du trou • γ_{Mb1}:coefficient partiel de sécurité pour la résistance au cisaillement = 1,25 • γ_{Mb2}:coefficient partiel de sécurité pour la résistance en traction = 1,50 • t : épaisseur de la plaque. <p>Condition d'EC3 : e₁ ≥ 1.2 d₀, p₁ ≥ 2.2 d₀, e₂ ≥ 1.5 d₀, p₂ ≥ 3 d₀</p>

Tableau II-8 : Résistance de calcul des boulons ordinaires.

- ✓ Vérification d'un boulon à la traction : la sollicitation en traction ne doit pas dépasser la résistance individuelle du boulon à la traction, soit $F_{t,sd} \leq F_{t,Rd}$
- ✓ Vérification d'un boulon au cisaillement : on doit avoir $F_{V,sd} \leq F_{V,Rd}$
- ✓ Vérification d'un boulon à la pression diamétrale : on doit avoir $F_{b,sd} \leq F_{b,Rd}$
- ✓ Vérification d'un boulon au cisaillement et à la traction combinés : au tableau ci-dessus

❖ **Les boulons Haute Résistance ou Précontraints :**

Ces boulons sont réalisés dans des aciers à haute limite d'élasticité. Leurs caractéristiques mécaniques sont obtenues par traitement thermique. Il est toutefois important de souligner que pour que l'assemblage soit considéré comme HR, tous les éléments de celui-ci doivent être marqués HR.

La précontrainte de ces boulons dépend de la qualité de leur mise en œuvre, d'où la nécessité d'une main d'œuvre qualifiée.

➤ **Vérification des boulons précontraints :**

Si F_p est l'effort de précontrainte axial dans un boulon et F_s l'effort de cisaillement transmis par l'assemblage et sollicitant le dit boulon, il faut vérifier que l'interface des pièces en contact puisse transmettre l'effort tangent, sans glissement, soit : $F_s \leq \mu \cdot F_p$

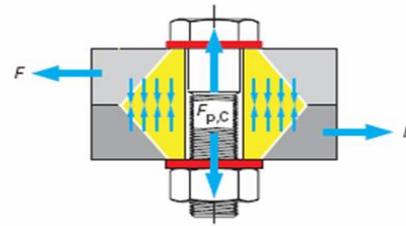
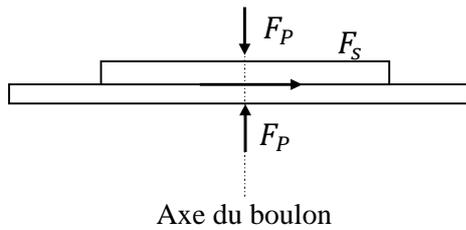


Fig.II-10 : Boulon précontraint.

Classement	Description du traitement	μ
classe A	Correspond aux surfaces grenillées ou sablées	$\mu = 0.50$
classe B	Surfaces décapée par grenailage ou sablage et peintes	$\mu = 0.40$
classe C	Aux surfaces brossées	$\mu = 0.30$
classe D	Surfaces non traitées.	$\mu = 0.20$

Tableau II-9 : Coefficient de frottement.

★ **Caractéristiques mécaniques des boulons HR :**

Il existe deux classes de boulons HR, définies en fonction de leur contrainte limite d'élasticité f_{yb} et de leur contrainte de rupture f_{ub} .

- ✓ Les boulons HR1 ou HR 10.9
- ✓ Les boulons HR2 ou HR 8.8

Désignation	Classe de qualité	f_{ub} (MPa)	f_{yb} (MPa)	$\Delta L/L$ (%)
HR 1	HR 10.9	1000	900	≥ 8
HR 2	HR 8.8	800	640	≥ 12

➤ **Assemblages résistant au glissement :**

La résistance au glissement F_s d'un boulon HR précontraint vaut : $F_s = k_s \cdot m \cdot \mu \cdot \frac{F_p}{\gamma_{Ms}}$

Avec F_p est l'effort de précontrainte autorisé dans les boulons vaut : $F_p = 0.7 \cdot f_{ub} \cdot A_s$

m est le nombre d'interfaces de frottement et k_s est un coefficient dépend des trous de perçage et vaut :

Description	k_s
Boulons utilisés dans des trous normaux.	1,0
Boulons utilisés soit dans des trous surdimensionnés soit dans des trous oblongs courts dont l'axe longitudinal est perpendiculaire à la direction des efforts.	0,85
Boulons utilisés dans des trous oblongs longs dont l'axe longitudinal est perpendiculaire à la direction des efforts.	0,7
Boulons utilisés dans des trous oblongs courts dont l'axe longitudinal est parallèle à la direction des efforts.	0,76
Boulons utilisés dans des trous oblongs longs dont l'axe longitudinal est parallèle à la direction des efforts.	0,63

Tableau II-10 : Coefficient de dimension des trous.

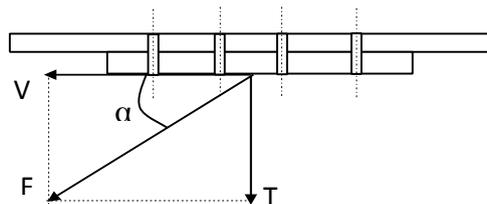
Le coefficient partiel de sécurité γ_{Ms} est donné ci-après :

Trous normalisés et oblongs dont l'axe de la fente est perpendiculaire à la direction de l'effort.	ELU	1.25
	ELS	1.1
Trous circulaires surdimensionnés et oblongs dont l'axe de la fente est parallèle à la direction de l'effort.	ELU	1.40

➤ **Assemblages sollicités simultanément au cisaillement et à la traction :**

Si un assemblage résistant au glissement est soumis à un effort de traction **T** concomitant à un effort de cisaillement **V**, qui tend à provoquer le glissement, la résistance au glissement par boulon doit être calculée selon la formule ci-après.

$$\left[\begin{aligned} V_1 &\leq F_s = k_s \cdot \mu \cdot \frac{(F_p \cdot 0,8T_1)}{\gamma_{Ms}} \\ V_1 &= \frac{V}{n} = \frac{F \cdot \cos \alpha}{n} \quad \text{et} \quad T_1 = \frac{T}{n} = \frac{F \cdot \sin \alpha}{n} \end{aligned} \right.$$



C/Le Soudage :

Les assemblages soudés ont pour rôle de solidariser plusieurs pièces entre elles, en assurant la transmission et la répartition des diverses sollicitations entre les pièces. La réalisation d'un cordon de soudure permet de bloquer dans toutes les directions. Le cordon de soudure doit principalement travailler au cisaillement. Il faudrait éviter de soumettre un cordon à des contraintes de traction toutes fois il est possible de soumettre un cordon à une extension. La réalisation d'un cordon nécessite une source de chaleur puissante et régulière.

➤ **Les assemblages soudés présentent des inconvénients et des problèmes tel que :**

- ✓ Apparition de micro fissures dues au refroidissement.
- ✓ Apparition de déformations géométriques de la pièce dues aux effets de dilatations et aux retraits.
- ✓ Main d'œuvre qualifiée et matériel spécifique.
- ✓ Contraintes résiduelles dans le cordon.

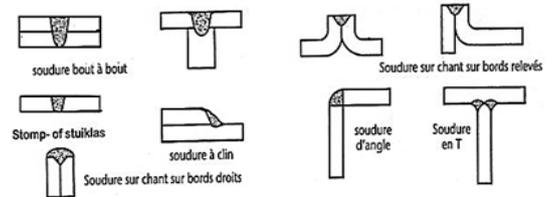
➤ **Les procédés de soudage :**

Les procédés de soudage sont multiples et sont utilisés selon la nature des pièces à souder, on distingue trois méthodes :

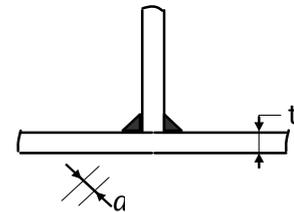
- ✓ Procédé par pression.
- ✓ Procédé par résistance électrique.
- ✓ Procédé à l'arc électrique.

➤ **Différents types de soudure :**

- ✓ Les soudures d'angle.
- ✓ Les soudures d'angle discontinues.
- ✓ Les soudures bout à bout.
- ✓ Les soudures en entaille et en bouchon.



t (mm)	4	6	7	8	10	12	14	16	18
a (mm)	3	4	5	6	7	8	10	11	13



Calculs des cordons de soudures :

❖ **Les Soudures bout à bout :**

Aucun calcul n'est exigé pour les soudures bout à bout. On admet qu'il y a continuité de matière, donc continuité des pièces. Deux conditions doivent être vérifiées :

- ✓ L'épaisseur de la soudure est au moins égale à l'épaisseur de la plus faible des pièces assemblées.
- ✓ Le métal d'apport a des caractéristiques mécaniques au moins égale à celle du métal de base.

❖ **Les Soudures d'angle :**

Notations

- ✓ ℓ : longueur utile du cordon.
- ✓ N : effort pondéré appliqué à chaque cordon, supposé être centré au milieu de la longueur du cordon.

Fig.II-11 : Soudure d'angle.

- ✓ $\tau_{//}, \sigma, \tau_{\perp}$ sont les composantes de la contrainte moyenne rapportée à la section de la gorge du cordon, Soit :
- ✓ σ : composante perpendiculaire à la section.
- ✓ τ_{\perp} : composante dans le plan de la section perpendiculaire à l'axe longitudinal du cordon.
- ✓ $\tau_{//}$: composante dans le plan de la section parallèle à l'axe longitudinal du cordon.

➤ **Formule fondamentale :**

Les dimensions du cordon de soudure doivent satisfaire à la condition :

$$\beta_w \cdot \sqrt{\sigma^2 + 3 \cdot (\tau_{\perp}^2 + \tau_{//}^2)} \leq \frac{f_u}{\gamma_{Mw}}$$

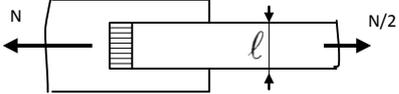
Les coefficients β_w et γ_{Mw} sont variables selon la nuance d'acier :

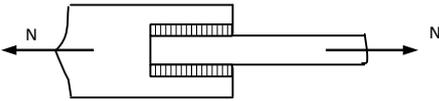
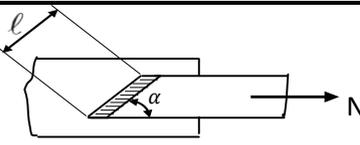
Nuances d'acier		γ_{Mw}	β_w	$\beta_w \cdot \gamma_{Mw}$
f_y (MPa)	f_u (MPa)			
235	360	1,25	0,80	1,00
275	430	1,30	0,85	1,10
355	510	1,35	0,90	1,20

Tableau II-11 : Coefficient de β_w et γ_{Mw} .

Nous allons établir ci-après des formules de calculs pour des cordons reliant :

- ✓ Soit des pièces orthogonales.
- ✓ Soit des pièces obliques.

Formule fondamentale		
	Cordons reliant des pièces orthogonales	Cordons reliant des pièces obliques
Cordons frontaux	 $a \cdot \sum \ell \geq \beta_w \cdot \gamma_{Mw} \cdot \frac{N \cdot \sqrt{2}}{f_u}$	<p>Pour l'angle obtus on vérifie :</p> $a \cdot \sum \ell \geq \beta_w \cdot \gamma_{Mw} \cdot \frac{N \cdot \sqrt{2 - \sin \theta}}{f_u}$ <p>pour l'angle aigu on vérifie :</p> $a \cdot \sum \ell \geq \beta_w \cdot \gamma_{Mw} \cdot \frac{N \cdot \sqrt{2 + \sin \theta}}{f_u}$

Cordons latéraux	 $a \cdot \sum \ell \geq \beta_w \cdot \gamma_{Mw} \cdot \frac{N \cdot \sqrt{3}}{f_u}$	$a \cdot \sum \ell \geq \beta_w \cdot \gamma_{Mw} \cdot \frac{N \cdot \sqrt{3}}{f_u}$
Cordons obliques	 $a \cdot \sum \ell \geq \beta_w \cdot \gamma_{Mw} \cdot \frac{N \cdot \sqrt{3 - \sin^2 \alpha}}{f_u}$	<p>Pour un angle obtus :</p> $a \cdot \sum \ell \geq \beta_w \cdot \gamma_{Mw} \cdot \frac{N \cdot \sqrt{3 - (1 + \sin \theta) \sin^2 \alpha}}{f_u}$ <p>Pour un angle aigu :</p> $a \cdot \sum \ell \geq \beta_w \cdot \gamma_{Mw} \cdot \frac{N \cdot \sqrt{3 - (1 - \sin \theta) \sin^2 \alpha}}{f_u}$

II.10.2 Composants comprimés [13] :

II.10.2.1 Définitions :

Un composant est dit comprimé ou en compression pure lorsque ses extrémités sont soumises à des efforts qui imposent un rétrécissement uniforme à toutes ses fibres.

II.10.2.2 Mode de ruine :

Les modes de ruine d'un composant comprimé comprennent :

- ❖ la plastification complète de la section courante.

La plastification complète de la section courante entraîne des déformations importantes pour tout effort supérieur au seuil de plastification. C'est un mode de ruine que l'on peut rencontrer sur des pièces très courtes ou massives. Dans la plupart des cas, les composants comprimés atteignent leurs seuils d'instabilité par voilement local ou flambement d'ensemble avant le seuil de plastification.

- ❖ phénomène d'instabilité élastique (flambement, voilement et diversement).

II-11. Conclusion :

Grâce à ces avantages, la charpente métallique est un mode de construction de tout premier ordre, qui se développe de plus en plus dans le monde.

L'utilisation des matériaux acier, s'est imposée d'abord par ses qualités de résistance, ses avantages esthétiques, mais également parce qu'elle permet l'édification des ossatures dont les sections exigées occupaient moins de place que les autres matériaux employés, jusqu'alors du coup, l'ensemble de la charpente métallique acquiert un aspect de légèreté, tout en permettant de donner aux pièces porteuses des portées inusitées.

Chapitre III

**Conception d'un pylône
électrique**

III-1. Introduction :

Les pylônes ont pour fonction de maintenir les câbles à une distance minimale de sécurité du sol et des obstacles environnants, afin d'assurer la sécurité des personnes et des installations situées au voisinage des lignes. Leur forme, leur hauteur et leur robustesse, ou résistance mécanique, dépendent de leur environnement (conditions climatiques) et des contraintes mécaniques (terrain) auxquelles ils sont soumis. Leur silhouette est caractérisée par la disposition des câbles conducteurs. Il y a plusieurs types de pylône (pylône de télécommunication, pylône d'éclairage ...) notre thème consiste à étudier le pylône électrique.

III-2. Les pylônes électriques :

Un pylône électrique est un support vertical portant les conducteurs d'une ligne à haute tension. Le plus souvent métallique, il est conçu pour supporter un ou plusieurs câbles aériens et résister aux aléas. Météorologiques et sismiques (foudre y compris), aux vibrations des câbles et/ou du pylône.

Exemple des différents types de pylône en fonction de leur tension et leur poids [15] :



Pylone Muguet Hauteur et poids moyen 54m en 400KV(33t)42m en 220KV (15t)



Pylônes Trianon Hauteur et poids moyen 35m en 400kV (21t) 25 m en 225kV (12t)



Pylônes Chat 225kV Hauteur et poids moyen 35m (6t)



Poteaux métallique ou Poteaux en béton Hauteur et poids moyen 30 m (17t)

III-3. Classification des pylônes :

On peut classer les pylônes suivants plusieurs critères [5] :

- ✓ Classification d'après leur constitution Ils peuvent être en treillis où ils peuvent être tubulaires.



Fig.III-1: Pylône en treillis.



Fig.III-2: Pylône tubulaire.

✓ Classification d'après la disposition des consoles

❖ phases étagées

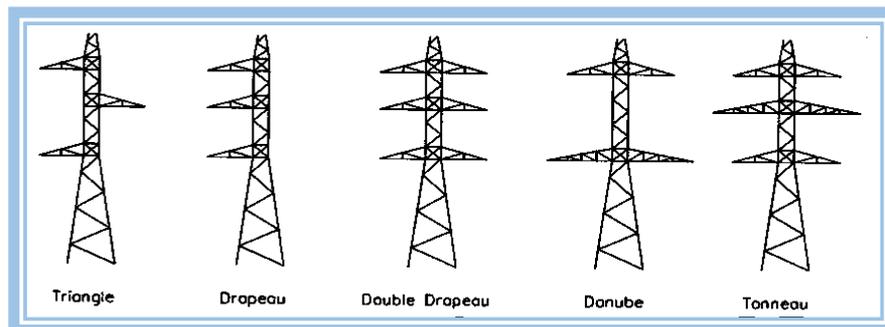


Fig.III-3 : Différentes formes de pylônes en fonction des consoles.

✓ Classification d'après leur fonction sur la ligne. Suivant le profil en tracé de la ligne il existe plusieurs types de supports adaptés à chaque cas et ayant une fonction spécifique. Le tableau et le schéma ci-dessous nous permettront de mieux comprendre la notion de fonction d'un support.

<i>Nom du pylône</i>	<i>Fonction</i>	<i>Angle de déviation</i>	<i>Chaînes d'isolateurs</i>
T	Alignement	0-2°	Suspension
A	Angle faible / anti cascade	2-30° / 0°	Ancrage
WAE	Angle fort / arrêt	30-60° / 0°	Ancrage

Tableau III-1 : Les types de pylônes en fonction de leur position sur une ligne.



Fig.III-4 : Extrait du tracé d'une ligne.

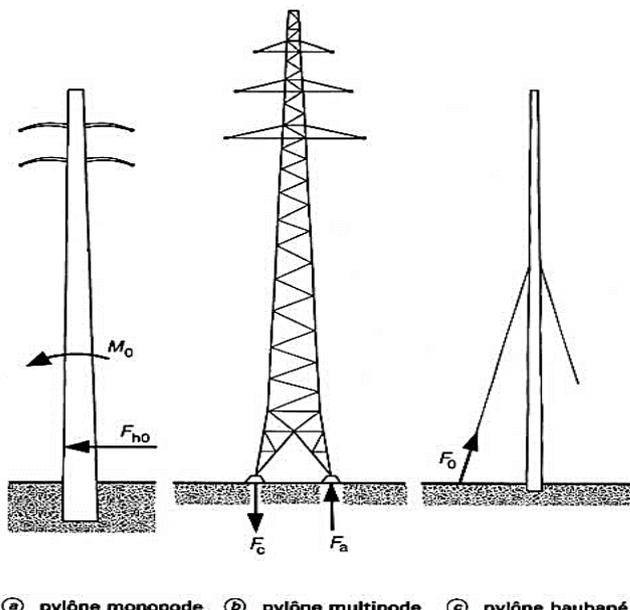
III-4. Les différentes catégories de pylônes :

Il existe différentes catégories et modèles de pylônes en fonction de :

- ✓ La tension.
- ✓ L'aspect des lieux.
- ✓ Le respect de l'environnement.
- ✓ Les conditions climatiques.

III-5. Fondations pour pylônes :

Les fondations des pylônes se distinguent des fondations des ouvrages courants de génie civil par la prédominance d'efforts d'arrachement ou d'efforts horizontaux, eux-mêmes associés avec des moments de renversement en tête de la fondation [16].



Ⓐ pylône monopode Ⓑ pylône multipode Ⓒ pylône haubané
d'arrachement (figure c).

- ✦ Les pylônes monopodes appliquent des efforts horizontaux et des moments de renversement sur la fondation (figure a).
- ✦ Les pylônes multipodes conduisent à des efforts d'arrachement sur certains appuis et de compression sur d'autres ; des efforts horizontaux souvent modestes sont également à prendre en compte (figure b).
- ✦ Les massifs d'ancrage des mâts et pylônes haubanés doivent résister à des efforts obliques

Fig.III-5 : Sollicitations prépondérantes.

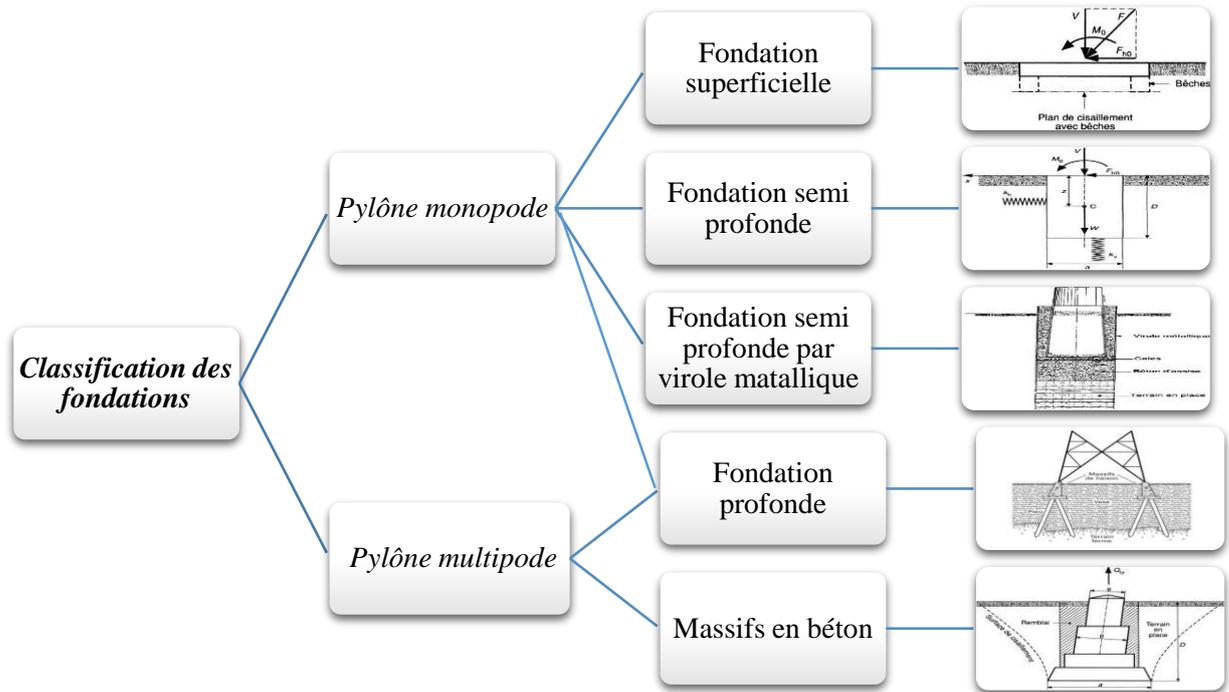


Fig.III-6 : Classification des fondations.

III-6. Les charges et les actions sur les pylônes :

Afin de bien dimensionner notre pylône il est nécessaire de recenser et de quantifier toutes les charges qu'il devra supporter pendant sa durée de vie : du poids et des différents mouvements de la chaîne d'isolateurs, du conducteur, du câble de garde en fonction des conditions climatiques « hypothèses »

[5]. Le calcul des efforts qui s'appliquent sur un pylône peut être décomposé en 2 parties :

III-6-1. Efforts concernant la structure métallique :

Ces efforts sont particulièrement le poids du pylône même et l'effort du vent sur ces différentes faces mais elles ne feront pas partie de cette étude car relevant du service construction métallique. Ceci étant nous pourrions quand même faire un arbre de charges dans lequel nous tiendrions compte des efforts transmis par les éléments de la ligne sur le pylône.

III-6-2. Efforts des éléments extérieurs aux pylônes :

a-Efforts transversaux : Ils tiennent particulièrement compte de l'action du vent sur les différents éléments sur le pylône. et peuvent être décomposés comme suit :

- ✓ Force exercée par le vent sur le conducteur.
- ✓ Force exercée par le vent sur la chaîne d'isolateurs.
- ✓ Composante d'angle suivant la fonction du pylône.

b-Efforts verticaux :

Ils sont dus aux poids des différents éléments sur le pylône :

- ✓ Poids de la chaîne d'isolateurs et des autres accessoires donné par le constructeur.
- ✓ Poids du conducteur et du câble de garde.

c-Efforts longitudinaux :

Ces efforts ne concernent que les câbles ; ils sont appliqués au niveau du conducteur et du câble de garde et dépendent à majeure partie de la tension au niveau du câble.

III-7. L'instabilité des pylônes :

Le bon dimensionnement des pylônes nous renvoie à bien étudier leurs comportements vis-à-vis les phénomènes d'instabilité, car les pylônes sont généralement accessibles au public, en ville ou dans la campagne. Les grandes déformations affectant les zones comprimées des pièces peuvent être présentées en trois types de comportements caractéristiques dénommés phénomènes d'instabilité qui sont :

- ✓ Le flambement, affectant les barres simplement comprimées ou comprimées fléchies.
- ✓ Le voilement, qui affecte les âmes des pièces fléchies.
- ✓ Le déversement, qui affecte les semelles comprimées des pièces fléchies.

L'étude des phénomènes d'instabilité élastique est particulièrement importante en construction métallique, car ils sont très fréquents du fait de l'utilisation des éléments minces et les grands élancements que subissent les éléments de la structure. Le flambement est donc le phénomène le plus rencontré dans le cas des pylônes, sous ses deux aspects théoriques et réglementaires.

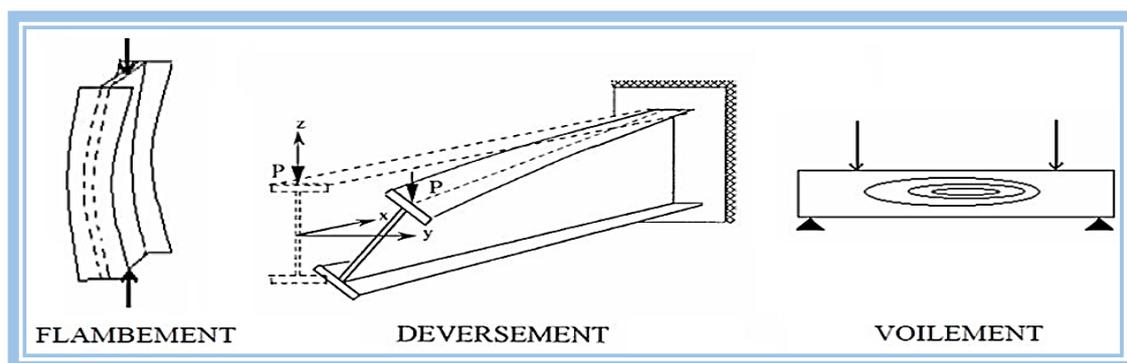


Fig.III-7 : Phénomène d'instabilités.

III-7-1. Exemples d'instabilité de pylônes :

Nous présentons dans les figures suivantes quelques cas de d'instabilité rencontré pour les pylônes suite une plastification de quelques éléments du pylône ou à un flambement par bifurcation amenant dans la plupart des cas à la ruine du pylône.



Fig.III-8: Vue de la rupture de pylône.



Fig.III-9: Un pylône électrique pour lignes à haute tension.



Fig.III-10: Vue de la rupture et des barres flambées de pylône



Fig.III-11: Pylônes complètement tondus suite à la plastification totale de ses éléments causée par une tempête .



Fig.III-12: Un pylône électrique endommagé par une grande plastification /flambement à cause d'un tempête -ruine.



Fig.III-13: Ruine d'un pylône sous le poids de la glace accumulé sur les lignes de transmission.

III-7-2. Phénomène d'instabilité :

III-7-2-1. Flambement :

A/ Aspect théorique du flambement :

❖ **Flambement simple :**

Le flambement simple affecte les pièces soumises à la flexion simple. Lorsque l'effort normal N croît, à partir de zéro, l'état d'équilibre initial évolue vers un état curviligne fléchi. D'après la loi fondamentale de la flexion, le moment fléchissant s'écrit :

$$M = -EI \frac{d^2y}{dz^2} \text{ ou } M = Ny, \text{ donc } Ny + EI \frac{d^2y}{dz^2} = 0$$

Donc La force critique d'EULER : $N_k = \frac{\pi^2}{10} EI$

Soit σ_k une contrainte critique correspondant à la force critique d'EULER N_k a étant la section

droite de la Poutre, on aurait : $\sigma_k = \frac{\pi^2}{10} E \times \frac{I}{A} = \frac{\pi^2}{10} E \times i^2$

Avec $i = \sqrt{\frac{I}{A}}$: rayon de giration minimale correspondant à l'élancement maximal $\rightarrow \lambda = \frac{10}{i}$

D'où finalement : $\sigma_k = \frac{\pi^2}{\lambda^2} E$

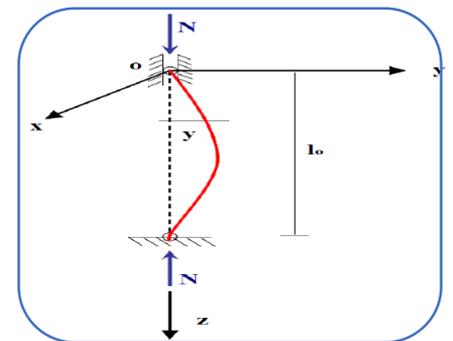


Fig.III-14 : Modèle d'Euler.

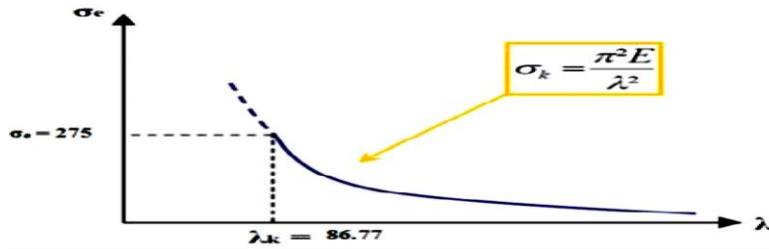


Fig.III-15 : Courbe contrainte critique-élancement maximal.

✓ Lorsque $\sigma_k < \sigma_e$, aucun risque de flambement n'est à craindre et la ruine survient pour

$$\sigma = \sigma_e$$

✓ Lorsque $\sigma_k > \sigma_e$, il y a ruine par flambement dès lors $\sigma_k = \sigma$.

D'une manière générale, selon les conditions aux appuis, la force critique d'EULER vaut :

$$N_k = m \frac{\pi^2 EI}{l_0^2}$$

l_0 : étant la longueur réelle de la barre

En introduisant la longueur de

flambement l_k , elle s'écrit : $N_k =$

$$\frac{\pi^2 EI}{l_k^2} \text{ avec } l_k = \frac{l_0}{\sqrt{m}}$$

Des calculs analogues pour une poutre bi-articulée conduisent à des

équations différentielles de déformées, qui se résolvent

aisément et qui conduisent à des

valeurs de m et de l_k récapitulées

dans le tableau ci-dessous :

Conditions d'appuis		m	l_k
• Sans déplacements des extrémités			
		1	l_0
	encastrement parfait	2	$0,7 l_0$
		4	$0,5 l_0$
	encastrement élastique	$1 < m < 2$	$> 0,7 l_0$
• Avec liberté de déplacements aux extrémités			
		$\frac{1}{4}$	$2 l_0$
		1	l_0
		$m < \frac{1}{4}$	$> 2 l_0$

Tableau III-2 : Longueurs du flambement selon le type d'appui.

❖ **Flambement par flexion :**

Il s'agit dans ce cas, d'une poutre rectiligne, soumise simultanément à un effort N et à un Moment fléchissant M_0 . En comparaison au flambement simple, il y a dans ce cas une amplification de la déformée et donc des contraintes de flexion et de compression.

Si $M_0(z)$ est le moment fléchissant initial, le moment fléchissant total dans la poutre,

comprimée et fléchie, vaut : $M(z) = M_0(z) + Ny$

La déformée a pour équation : $EI \frac{d^2z}{dz^2} + Ny = -M_0(z)$

Pour des flexions simples de $M_0(z)$, l'intégration est possible. Les résultats obtenus sont rassemblés dans le tableau ci-après, dans lequel : $t = \frac{\alpha l}{2}$

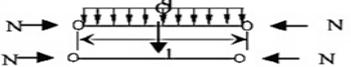
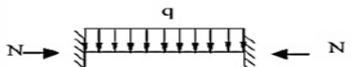
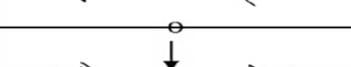
Conditions aux appuis	Cas de charges	M_0 Max pour $z = l/2$	M Max pour $z = l/2$	Coeff. D'amplification des moments $r = \frac{M_{max}}{M_0}$
Bi-articulés		$q \frac{l^2}{8}$	$q \frac{l^2}{8} r$	$\frac{2}{t^2} (\frac{1}{\cos t} - 1)$
		$Q \frac{l}{4}$	$Q \frac{l}{4} r$	$\frac{1}{t} \tan t$
Bi-encastrés		$q \frac{l^2}{24}$	$q \frac{l^2}{24} r$	$\frac{3}{t \sin 2t} - \frac{3}{2t^2}$
		$Q \frac{l}{8}$	$Q \frac{l}{8} r$	$\frac{1}{t} \tan t$

Tableau III-3 : Exemple des résultats de calcul du coefficient d'amplification des moments.

B/ Aspect réglementaire du flambement :

La théorie d'EULER établie pour des poutres idéales reste insuffisante en raison des imperfections de centrage et de rectitude. Il est donc impératif de prendre en compte ces imperfections.

❖ **Vérification selon EUROCODE 3 :**

✦ **Flambement simple :**

Le risque de flambement n'est considéré que si : $\bar{\lambda} > 0.2$

Dans ce cas, la sollicitation N de compression simple doit satisfaire : $N \leq \chi \cdot \beta_A \frac{f_y}{\gamma_{M1}}$

D'où : $\beta_A = 1$: pour les sections transversales de Classe 1 ou 2
 $\beta_A = \frac{A_{eff}}{A}$: Pour les sections transversales de classe 4

χ : Coefficient de flambement pour le mode de flambement à considérer Pour les éléments à section transversale constantes, sollicités en compression axiale constante, la valeur de χ pour l'élanement réduit $\bar{\lambda}$, peut être déterminée par la formule suivante : $\chi =$

$$1 / \left(\phi + \left[\sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2} \right] \right) \leq 1$$

D'où : $\phi = 0.5[1 + \alpha.(\bar{\lambda} - 0.2) + \bar{\lambda}^2]$

α : Facteur d'imperfection
 $\bar{\lambda} = \sqrt{\beta_A \cdot A \frac{f_y}{N_{cr}}}$
 f_y : Limite élastique (en N/mm²)

Avec N_{cr} : l'effort axial critique élastique pour le mode de flambement approprié
 λ : L'élancement pour le mode de flambement à considérer $\rightarrow \lambda = \frac{l_K}{i}$

Le Facteur d'imperfection α correspondant à la courbe appropriée du flambement vaut :

Courbe de flambement	a	b	c	d
Facteur d'imperfection (α)	0.21	0.34	0.49	0.76

Tableau III-4 : Valeur du facteur d'imperfection.

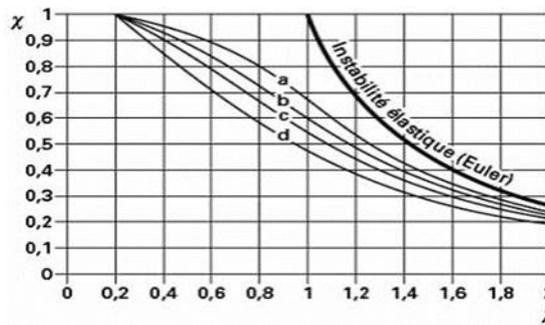


Fig.III-16 : Coefficient de réduction χ en fonction de l'élancement réduit (λ).

III-7-2-2. Déversement :

Ce phénomène d'instabilité élastique se produit, de façon générale, lorsqu'une poutre fléchie présente une faible inertie à la flexion transversale et à la torsion. La partie supérieure de la poutre, comprimée, flambe latéralement et il existe une valeur critique du moment de flexion (selon le plan de plus grande raideur), comme il existe un effort normal critique provoquant le flambement pour une barre comprimée, pour lequel la poutre fléchit dans le plan de sa plus faible raideur et entre en torsion. La flexion n'est alors plus plane, mais déviée, et s'accompagne d'une torsion et d'un gauchissement de la section (Bi-moment).

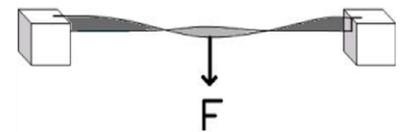


Fig.III-17 : Phénomène du Déversement.

III-7-2-3. Voilement :

Expérimentalement, si l'on soumet une plaque rectangulaire à une compression uniforme sur deux côtés, parallèlement à son plan moyen, on observe que la plaque, au-delà d'une certaine charge, se déforme transversalement. Il s'agit du phénomène de voilement, qui se manifeste par des ondulations, qui

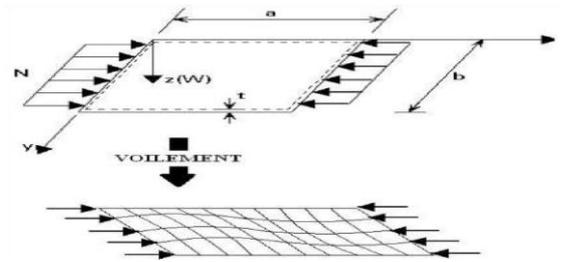


Fig.III-18 : Phénomène du voilement.

ne sont pas sans rappeler le phénomène de flambement pour des pièces à une dimension, à la différence près que le voilement se développe plus progressivement, les grandes déformations n'apparaissent pas brutalement et ne conduisant généralement pas à la ruine de la pièce. Le phénomène de voilement peut également apparaître sous un effort de cisaillement simple. Les âmes des poutres utilisées en construction métallique sont généralement minces et donc susceptibles de se voiler sous des efforts de compression ou de cisaillement excessifs.

III-8. Le comportement de pylône :

III-8-1. Analyse statique non-linéaire :

L'analyse non-linéaire consiste à appliquer les charges de façon incrémentielle. Cela signifie que les charges ne sont pas prises en compte dans les calculs dans leur totalité, mais elles sont incrémentées et les états d'équilibre successifs sont résolus.

Le comportement non-linéaire de la structure peut être lié à un simple élément de la structure (non-linéarité structurelle ou matérielle) ou peut être due au rapport non-linéaire entre les efforts et la déformation de la structure entière (non-linéarité géométrique).

III-8-2. Calcul non-linéaire, analyse limite, plasticité :

Les problèmes précédemment traités étudiaient le comportement élastique des matériaux. Cependant les lois de comportement élastiques linéaires ne sont pas toujours valables. Lors de sollicitations exceptionnelles ou accidentelles, des contraintes supérieures à la limite élastique du matériau peuvent

se produire et entraîner des déformations permanentes tandis que la structure peut continuer à résister sans s'effondrer. Nous étudions alors la stabilité globale de la structure suite à l'apparition locale de la plasticité. Cette étude de stabilité s'appelle analyse limite en RDM [17].

III-8-2-1. Modèles de comportement des matériaux :

Si l'on trace les courbes de comportement $\sigma - \varepsilon$ pour un matériau ductile on obtient une courbe de même type que celle de la *figure III.19. (a)*. à partir de cette courbe de comportement, on peut adopter plusieurs modélisations :

- ✦ *Figure III.19. (b)* : modèle élasto-plastique avec écrouissage.
- ✦ *Figure III.19. (c)* : modèle élasto-plastique parfait.
- ✦ *Figure III.19. (d)* : modèle rigide plastique ou plastique parfait.

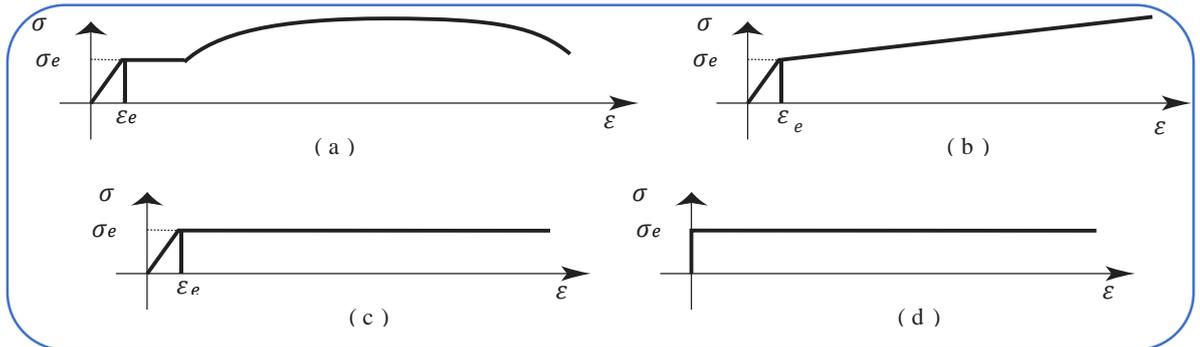


Fig.III-19 : Lois de comportement : matériau ductile (a), modèle élasto-plastique écrouissable (b), modèle élasto-plastique parfait (c), modèle rigide plastique (d).

III-8-2-2. Plastification en flexion : notion de moment plastique et rotule plastique :

- ✦ **phase élastique** : comportement « classique » d'une section en flexion.
- ✦ **État 1** : limite élastique. Le moment sollicitant est alors égal au moment maximum élastique M_e .
- ✦ **État 2** : plastification progressive de la section ($M > M_e$).
- ✦ **État 3** : plastification complète de la section. Formation d'une **rotule plastique**.

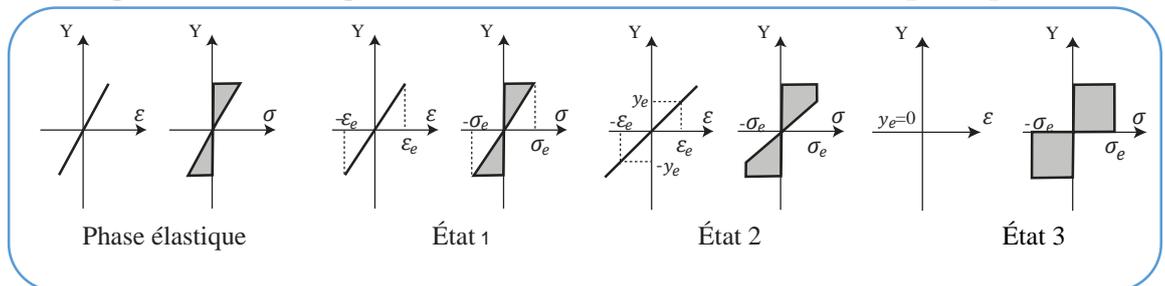


Fig.III-20 : Différentes phases de comportement d'une section en flexion.

III-8-3. Dynamique et vibrations :

Pour un problème dynamique, le chargement et les paramètres de réponse sont fonction du temps.

La principale caractéristique d'un problème dynamique est la présence d'efforts d'inertie non-

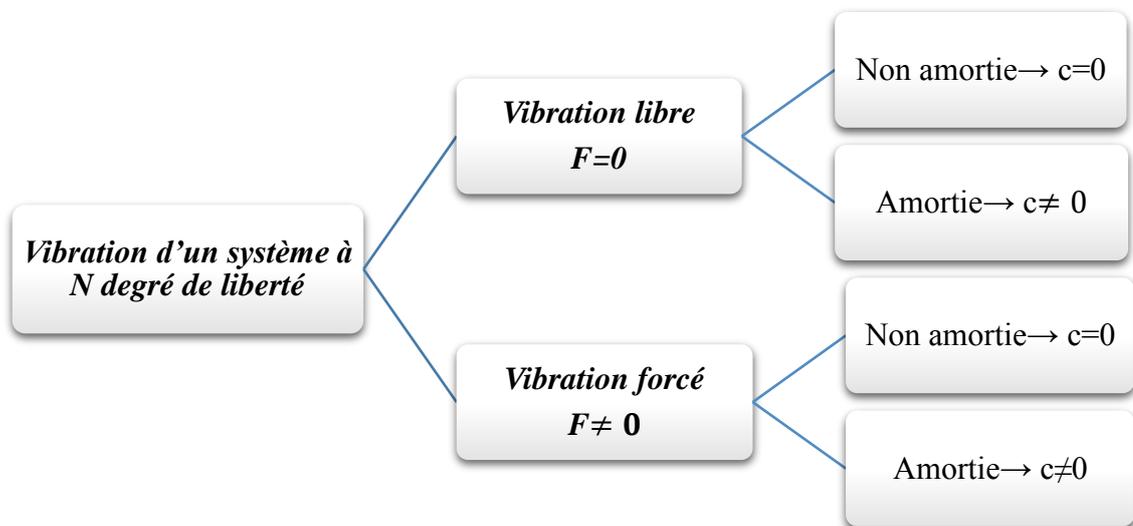
négligeables qui, d'après le principe de d'Alembert, s'opposent au mouvement imposé par le chargement appliqué [19].

III-8-3-1. Vibration d'un système à N degré de liberté :

III-8-3-1-1. Équations du mouvement :

Après discrétisation du problème mécanique, de manière analogue par exemple à la méthode des éléments finis en statique, nous pouvons construire les matrices de masse **M**, d'amortissement visqueux **C**, de raideur **K** et le vecteur des efforts extérieurs **F**. L'équation générale du mouvement s'écrit sous forme suivante : $M\ddot{U} + C\dot{U} + KU = F$

U : est le vecteur des déplacements des degrés de liberté considérés.

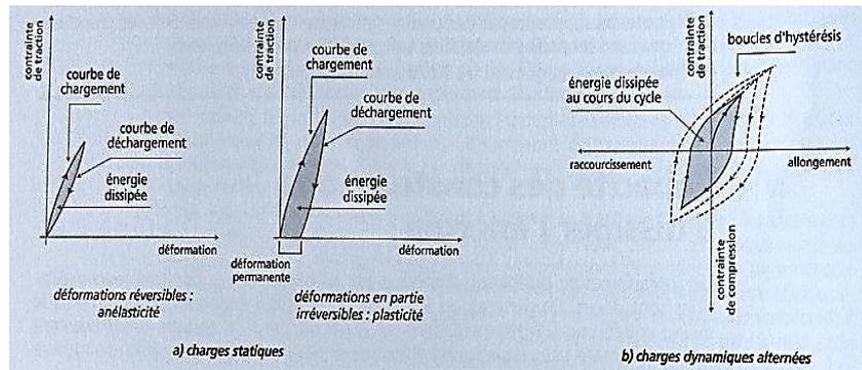


	Portiques		Voiles ou murs
	Béton armé	Acier	Béton armé/maçonnerie
Léger	6	4	10
Dense	7	5	

Tableau III-5 : Valeurs de ξ (%).

III-8-3-1-2. Amortissement :

Le travail, qui est un transfert d'énergie, est défini par le produit d'une force par une longueur, qui peut être présenté sur les Schéma ci-dessous par les surfaces grisées.



III-8-3-1-3. Signification des modes propres et fréquences propres :

Nous supposons dans cette partie un système discret, conservatif ($C = 0$) et sans chargement extérieur. L'équation discrète du mouvement prendra la forme suivante : $M\ddot{U} + KU = 0$

Prenons l'exemple d'un pylône pour chaque mode les masses sont ainsi animées d'un mouvement harmonique de même phase [18].

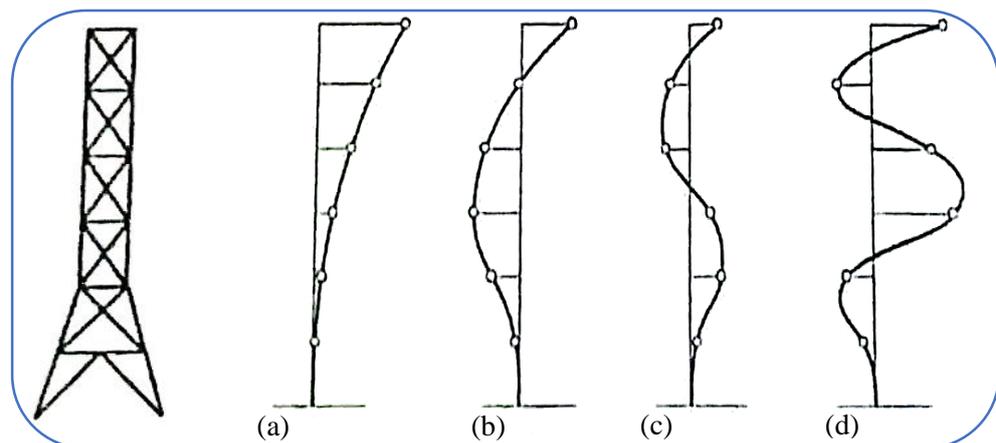


Fig.III-21 : Déformées des quatre premiers modes d'un pylône.

III-9. Exécution des travaux d'un pylône [19] :

III-9-1. Les tâches principales du chantier :

- ✓ Achat des matériaux (acier, béton, peinture...)
- ✓ Coupe et Façonnage des aciers en usine
- ✓ Assemblage des tubes pour réaliser les tronçons
- ✓ Première couche de peinture
- ✓ Transport des tronçons un à un
- ✓ Préparation du terrain : terrassement, implantation et fondation
- ✓ Le premier tronçon sera fixé sur la fondation

✓ Les autres tronçons seront hissés les uns sur les autres à l'aide de grue et d'échafaudage vu que la hauteur du pylône est important. A l'aide de la grue on soulève le tronçon pour le mettre en place puis les ouvriers vont se mettre sur l'échafaudage réalisé pour fixer les boulons

- Fixation de l'escalier
- Fixation de la herse
- Couche de peinture
- Nettoyage du site

III-9-2. Préparation sur chantier :

L'organisation du chantier nécessite l'installation d' :

- ✓ Un entrepôt pour le matériel et les matériaux
- ✓ Un abri pour les ouvriers
- ✓ Tout le matériel nécessaire pour l'exécution de la fondation et le montage du pylône.

Il faut ensuite commencer par terrasser :

- Enlever le mauvais sol préparé par rapport à point fixe la position où sera installé le pylône.
- Préparer la fondation en exécutant des fouilles pour la mise en place du coffrage
- Mettre en place le coffrage et le ferrailage
- Couler le béton - réaliser une pente de 3% au -dessus de fondation
- Attendre 8 jours temps nécessaire pour le durcissement du béton
- Décoffrage
- Mise en place de drain.

III-9-3. Préparatifs en atelier :

Il faut :

- ✓ Préparer les plans d'avant-projet et les plans d'exécution pour pouvoir passer la commande des pièces maîtresses à savoir les membrures et les diagonales.
- ✓ Tracer des gabarits en en carton ou en bois, les réaliser et les vérifier en faisant un montage à blanc.



- ✓ Protéger le métal du pylône contre la corrosion en galvanisant les barres si les dimensions des bains d'immersion le permettent sinon en métallisant les pièces longues après sablage.

III-9-4. Transport et montage :

Les tronçons assemblés en atelier sont transportés par des camions avec remorques.

- ✓ On monte le premier tronçon au moyen d'une grue et pour un lieu difficilement accessible on utilisera moyen d'un hélicoptère.
- ✓ On ajoute sa verticalité par des cales.
- ✓ On monte ensuite, successivement, les autres tronçons à l'aide d'un mât de levage qu'on déplace progressivement le long d'une face du pylône au fur et à mesure du levage.
- ✓ On prend le tronçon au sol et l'amène en place par rotation sur lui-même.

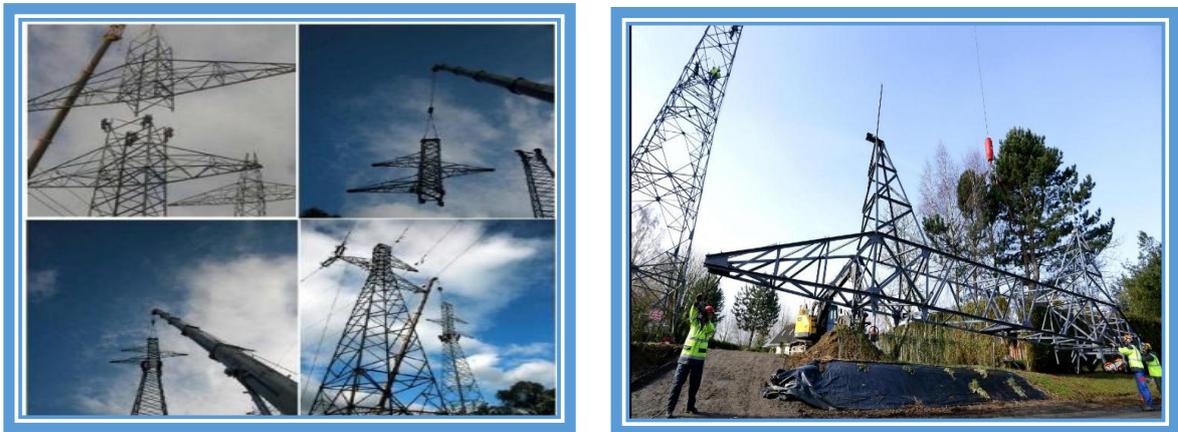


Fig.III-22 : Montage des tronçons de pylône à l'aide d'une grue.



Fig.III-23 : Montage des tronçons de pylône à l'aide d'un hélicoptère.

III-9-5. Matériel utilisées :



La Galvanisation des pieces.



Les Différentes pièces.



Les Boulons



Les Pièces de sécurité.



III-10. Endommagement :

III-10-1 Risque de la corrosion :

Les structures extérieures en acier sont vulnérables à la corrosion. Il est important de prévenir la corrosion, car celle-ci affecte la capacité structurale des ouvrages et en diminue ainsi leur fiabilité. Bien que des méthodes existent pour ralentir la corrosion, elle est souvent inévitable et des réparations ou des remplacements partiels ou complets de structures doivent être réalisés. Pour cette raison, la corrosion de l'acier devient alors un problème économique important [14].

Les différents procédés de protection contre la corrosion, sont :

- Galvanisation à chaud.
- Zingage électrolytique.
- Mise en peinture.
- Métallisation par projection suivie de mise en peinture.
- Galvanisation à chaud suivie de mise en peinture.

❖ La corrosion d'une surface peinte :

**Cause :**

- Défaut de protection
- Mauvaise qualité de peinture
- Mauvaise préparation du support
- Mauvaise application de la peinture
- Vieillessement de la protection

Solutions :

- Brossage de la zone et nouvelle mise en peinture

❖ La corrosion d'une surface galvanisée :

**Cause :**

- Mauvaise préparation du support (restes de graisses, peintures, etc.)
- Mauvais rinçage des supports (acide de décapage reste et réagit avec le zinc pour former de la corrosion)

Solutions :

- Décapage du support et protection par peinture ou galvanisation à froid

III-10-2 Les impacts environnementaux :

Type de contraintes	Description
Impact visuel	Modification de l'aspect du territoire
Occupation du terrain en phase de construction	Analyse du risque d'empêchement ou de dérangement des activités s'opérant sur l'aire de construction
Occupation permanente du terrain	Paramètre tenant compte des dérangements après la mise en service de la ligne, zone non utilisable pour les activités humaines
Impacts sur la faune et la flore	Impact sur l'environnement

Tableau III-6 : Descriptif des contraintes environnementales.

III-10-3 Plaque d'identification :

Les grands pylônes comportant une plaque d'identification permettant de connaître la puissance exprimée en Kilo volts et le nom de la ou des lignes supportées ainsi que le numéro de pylône.



Fig.III-24 : La plaque d'identification vous fournit toutes les informations nécessaires.

III-11. Suivi et entretien :

Les pylônes sont régulièrement inspectés et entretenus (éventuel décapage, réparations et peinture antirouille)

**III-12. Conclusion :**

Malgré l'enfouissement de plus en plus généralisé des lignes, les pylônes restent tout de même un moyen économique de supporter les lignes électriques et un moyen efficace de diffuser les ondes hertziennes.

L'implantation d'un pylône implique de nombreuses contraintes. En effet, il faut non seulement le concevoir, mais également définir un mode de mise en place, tenir compte des règles de sécurité et des aspects environnementaux et législatifs.

Chapitre IV

**Principe de la modélisation
et simulation numérique du
pylône**

IV-1. Introduction :

Les pylônes que nous calculons font partie des structures discrètes qui sont composées d'éléments barres assemblées par boulonnage en des points appelés «nœuds», et soumises à des forces extérieures que sont : la pression due au vent, le poids propre du pylône et des câbles. Sous l'effet de ces forces, le pylône peut se déformer et des contraintes internes dans chaque élément peuvent se manifester. Cette dernière est entièrement définie par les caractéristiques géométriques de la section courante (aire, module d'Young etc.) et la géométrie de la fibre moyenne. Les efforts appliqués à chaque barre sont schématisés comme charges ponctuelles.

L'application de la théorie des poutres à des structures simples comme les treillis simples, conduit à des solutions analytiques complètes. En revanche, pour les structures plus complexes comme le pylône, le recours à une méthode numérique est nécessaire telle que la méthode aux éléments finis qui est systématiquement et aisément programmable. Le problème de l'analyse linéaire des structures formées de poutres par la méthode des éléments finis est bien connu. Nous nous limiterons, ici, à évoquer les formulations éléments-finis utilisées dans le GENIE avec les références nécessaires pour l'analyse statique et modale des structures de type treillis plans obtenus par assemblage de barres articulées aux extrémités. Les éléments d'un treillis ne travaillent qu'en traction ou compression. Ils sont modélisés par des éléments finis de type barres (*figure IV-1*).

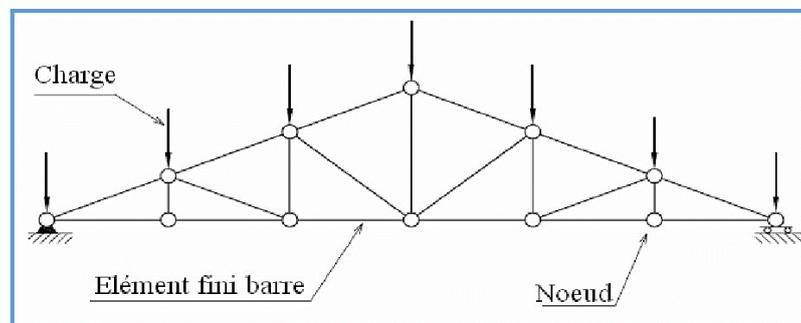


Fig.IV-1 : Discretisation en éléments finis d'un treillis plan.

IV-2. Modélisation par éléments finis :

« **Modélisé** » consiste à simplifier les unités caractéristiques d'un ouvrage (unité géométrique mécanique et/ou cinématique) et à les soumettre à des conditions théoriques de liaisons et de chargements.

IV-3. Modélisation et discrétisation :

La méthode des éléments finis est donc une procédure générale de discrétisation pour la résolution des problèmes des milieux continus. Donc Pour s'assurer qu'une analyse numérique simulera au mieux un problème réel donné, il faut effectuer deux opérations essentielles, la *modélisation* dans un premier temps et la *discrétisation* dans un deuxième temps (*figure IV-3*) ces opérations portant sur deux aspects principaux du problème pratique.

- ✓ Représentation de la géométrie, des charges, des conditions aux limites.
- ✓ Choix des éléments finis et du maillage.

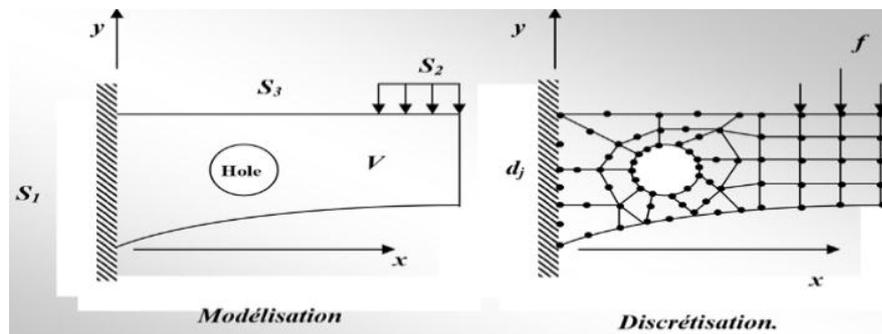


Fig.IV-2 : Conditions aux limites.

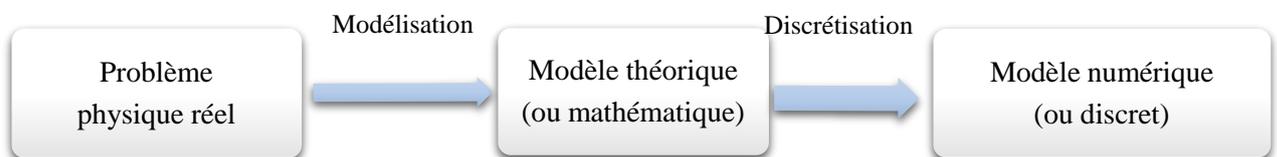


Fig.IV-3 : Étape de l'analyse d'un problème aux limites.

IV-4. Concept de base de la méthode des éléments finis :

La méthode des éléments finis (M.E.F.) est un des outils les plus efficaces et les plus généraux pour l'analyse des structures dans de nombreux secteurs de l'industrie : aérospatial, automobile, nucléaire, génie civil, construction navale, mécanique, constructions off-shore, etc...

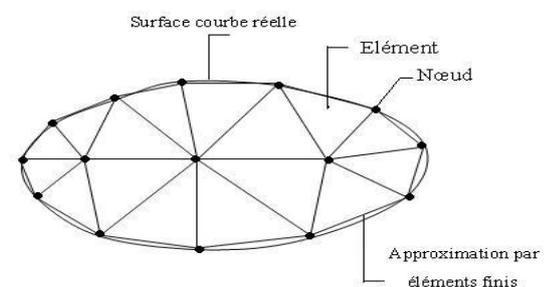


Fig.IV-4 : Maillage du domaine en triangles à trois nœuds.

La M.E.F. est basée sur une décomposition du domaine dans lequel on désire effectuer la simulation en sous-domaines de forme géométrique simple

appelés « éléments finis » pour lesquels on procède à des approximations nodales des champs de déplacements ou de contraintes qui prennent en général la forme de fonctions polynomiales. L'ensemble de ces éléments constitue ce que l'on appelle le maillage du domaine.

Ces éléments sont liés par un nombre fini de conditions de continuité, exprimées en certains points communs à plusieurs éléments appelés 'nœuds'. Ce sont les méthodes classiques du calcul des structures, méthode des déplacements et méthode des forces, qui sont à la base de la M.E.F [20]. Dans la méthode

des déplacements, la formulation du problème est faite en fonction des déplacements aux nœuds qui sont les inconnues cinématiques. La structure est préalablement discrétisée en éléments finis. Le calcul est conduit suivant deux niveaux de formulation : élémentaire au niveau de l'élément fini et globale au niveau de la structure complète.

A/ La formulation élémentaire au niveau de l'élément fini :

Pour chaque élément et dans un repère local, on choisit une fonction d'interpolation qui représente la variation des déplacements à l'intérieur de cet élément en termes de déplacements nodaux. Puis, on calcule pour chaque élément ses matrices de rigidité et de masse ainsi que son vecteur des forces. Ces caractéristiques élémentaires sont transformées par la suite dans le repère global de la structure.

B/La formulation globale au niveau de la structure complète :

Elle consiste à rechercher pour la structure complète l'expression matricielle de l'énergie potentielle en fonction des déplacements inconnus en tous les nœuds de la structure. Cette étape nécessite l'assemblage des matrices de rigidité et de masse et les vecteurs forces et déplacements de la structure à partir des caractéristiques élémentaires (matrices de rigidité et de masse et vecteurs forces et déplacements de chaque élément).

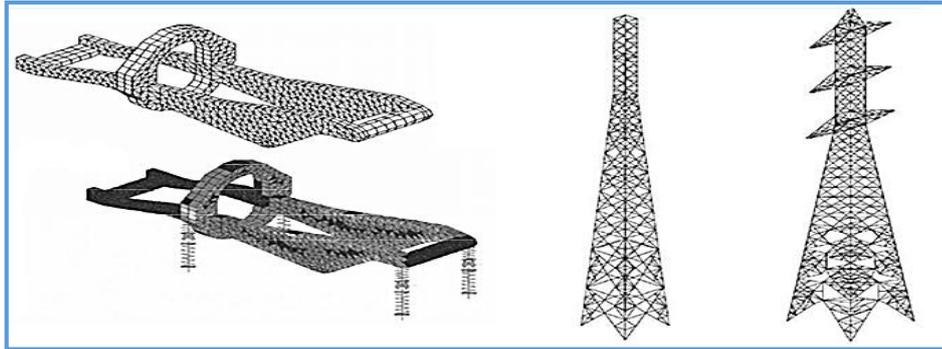


Fig.IV-5 : Exemples de modélisation par la M.E.F.

IV-5. Les Avantages de la M.E.F :

- ✦ La puissance de la méthode des éléments finis réside essentiellement dans sa souplesse.
- ✦ Exploitation facile des résultats.
- ✦ La méthode des éléments finis réside dans le fait que le modèle qu'elle utilise est très proche de la structure réelle.

IV-6. Étapes de la méthode des éléments finis :

Dans diverses applications précitées, les éléments finis perdent leur signification physique d'éléments structuraux : la méthode des éléments finis est considérée comme un outil de mathématiques appliquées destiné à résoudre les équations différentielles.

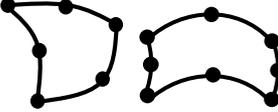
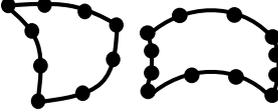
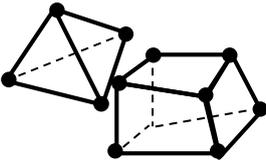
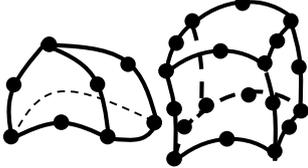
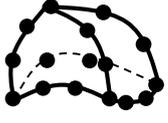
Néanmoins, les étapes de l'étude d'un problème aux limites sont toujours les mêmes, on peut les résumer en sept étapes :

- ✓ Découpage du domaine en un maillage d'éléments finis (*figure IV-4*).
- ✓ Interpolation en respectant les critères de convergence.
- ✓ Calcul des caractéristiques de chaque élément.
- ✓ Assemblage.
- ✓ Introduction des conditions aux limites essentielles et résolution.
- ✓ Évaluation, dans chaque élément, des grandeurs utiles (contraintes, déplacements...).
- ✓ Jugement de manière critique les résultats obtenus.

IV-7. Classes d'éléments finis suivant leur géométrie :

La Méthode des Eléments Finis a développé une série de types d'éléments finis qui, pour le début, peuvent être classifiés en :

- Eléments finis unidimensionnels (**1D**) (barres ou poutres).
- Eléments finis bidimensionnels (**2D**) (membranes, plaques et coques).
- Eléments finis tridimensionnels (**3D**) (éléments de volume ou coques épaisses).

<i>Eléments</i>	<i>Linéaires</i>	<i>Paraboliques (quadratiques)</i>	<i>Cubiques</i>
Unidimensionnels			
Bidimensionnels			
Tridimensionnels			
<i>Autres types</i>	● Masse	 Ressort	 Contact

IV-8. 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 : $\{F\} = [K]\{U\}$

Où $\{F\}$ sont les forces et $\{U\}$ 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.

IV-9. Les éléments pour la modélisation d'un pylône [21] :

IV-9-1. Élément fini câble :

IV-9-1-1. Définition :

Les câbles sont des structures souples qui peuvent subir de grands déplacements. Leur analyse est donc non linéaire. Au point de vue mécanique, un câble ne peut supporter aucun moment et n'est le siège que d'un effort normal appelé tension. L'expression du travail virtuel et sa différentiation par rapport aux déplacements conduisent à la modélisation en éléments finis : matrice de rigidité dépendant du déplacement des nœuds et matrice de masse constante.

Par la suite, les câbles peuvent être animés de mouvements de grande amplitude sous l'impulsion de la pression du vent, de la chute de manchons de givre ou, en cas d'incident, des forces de Laplace résultant des courants de court-circuit. Ils exercent alors sur leurs supports des efforts beaucoup plus élevés que les efforts statiques. On doit en tenir compte dans la conception des ouvrages.

IV-9-1-2. Hypothèses mécaniques :

Les câbles sont considérés comme des fils parfaitement flexibles, qui ne peuvent supporter aucun moment, ni fléchissant, ni de torsion, et ne sont le siège que d'une tension normale. Cette tension joue le rôle d'une contrainte généralisée.

On veut calculer le champ de déplacement $u(s_0, t)$ à l'instant t par rapport à la situation de référence. Celle-ci est une configuration statique du câble soumis, par exemple, à la pesanteur et à la température T_0 ; elle est définie par le champ de vectrice position $x(s_0)$.

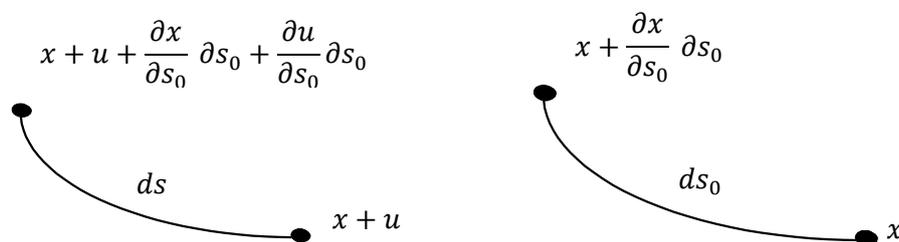


Fig.IV-6 : Tronçon de câble en situations de référence et déplacée.

IV-9-2. Élément fini barre :

IV-9-2-1. Définition :

Géométriquement une barre correspond à un solide orienté dans la direction x (repère local). Les dimensions dans le plan $(y-z)$ normal à x sont relativement petites par rapport à la dimension longitudinale (*figure IV-7*). Un élément fini barre (*figure IV-8*) schématise un composant d'une structure qui travaille uniquement en traction ou compression. C'est généralement un élément à 2 nœuds, qui comporte 3 inconnues ou degrés de liberté (d.d.l.) par nœud représentant les composantes de son déplacement dans l'espace.

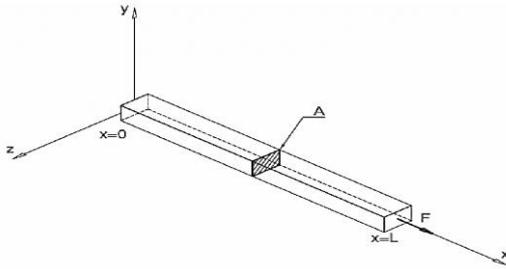


Fig.IV-7 : Géométrie d'un élément fini barre.

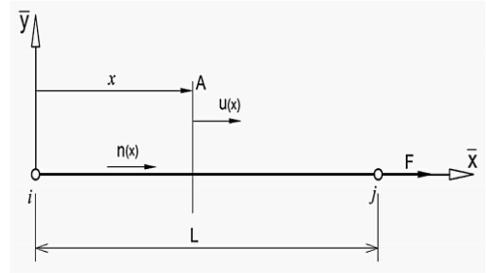


Fig.IV-8 : Modélisation d'un élément fini barre.

Les principales hypothèses pour un élément barre rectiligne qui ne travaille qu'en traction ou compression sont :

- Petits déplacements $\rightarrow \vec{u}_{(M,t)} = \mathbf{u}_{(x,t)} \vec{X}$ (1)
- Déformations en petits déplacements $\rightarrow \boldsymbol{\varepsilon} = \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial x}$ (2)
- Loi de Hooke dans un milieu isotrope homogène élastique $\rightarrow \boldsymbol{\sigma} = \mathbf{E} \boldsymbol{\varepsilon}$ (3)

avec $\boldsymbol{\sigma}$ est la contrainte dans la barre et \mathbf{E} est le module de Young du matériau.

IV-9-2-2. Formulation de l'élément barre dans le plan :

a-Identification du problème :

Considérons un élément barre dans le plan défini par deux nœuds i et j , de longueur L et de section uniforme A (figure-9-)

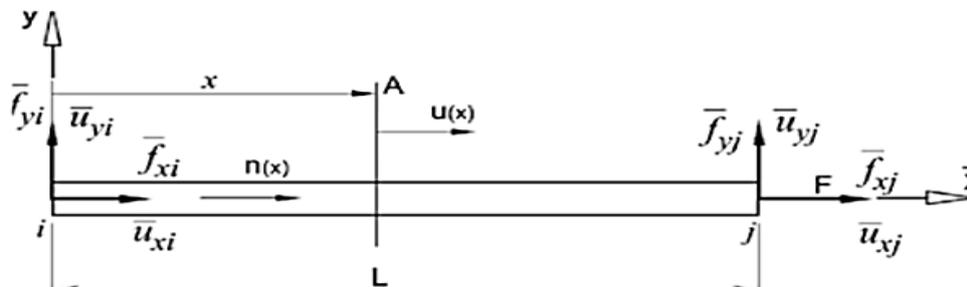


Fig.IV-9 : Elément fini barre dans le repère local (i, \bar{x}, \bar{y}) .

Dans le repère local (i, \bar{x}, \bar{y}) on note par \bar{u}_{xi} et \bar{u}_{xj} les déplacements aux nœuds i et j , et par \bar{f}_{xi} et \bar{f}_{xj} les force aux nœuds i et j .

Le vecteur force relatif à l'élément e est donné par : $\mathbf{F}^e = [\bar{f}_{xi}, \bar{f}_{yi}, \bar{f}_{xj}, \bar{f}_{yj}]^T$ (4)

Le vecteur déplacement est donné par : $\mathbf{U}^e = [\bar{u}_{xi}, \bar{u}_{yi}, \bar{u}_{xj}, \bar{u}_{yj}]^T$ (5)

Dans le cas qui nous occupe $\bar{f}_{yi}, \bar{f}_{yj}, \bar{u}_{yi}, \bar{u}_{yj}$ sont nuls puisque l'élément barre ne travaille qu'en traction ou compression.

b-Fonction d'interpolation :

Pour un problème statique, lorsque l'élément est chargé au niveau de ses nœuds, l'effort normal est uniforme. Pour chercher cette solution, nous allons utiliser une approximation polynomiale linéaire de la forme [21] :

$$\mathbf{u}(x) = N_1 \bar{u}_{xi} + N_2 \bar{u}_{xj} \quad (6)$$

Où N_1 et N_2 sont les coordonnées naturelles.

Nous identifions aux nœuds i ($x=0$) et j ($x=L$) la valeur de l'approximation des déplacements axiaux. Nous en déduisons : $N_1 = 1 - \frac{x}{L}$ et $N_2 = \frac{x}{L}$ (7)

$$\text{Sous forme matricielle nous écrivons : } \mathbf{u}(x) = \mathbf{N}^T \mathbf{U}^e = \left[1 - \frac{x}{L} \quad \frac{x}{L} \right] \begin{bmatrix} \bar{u}_{xi} \\ \bar{u}_{xj} \end{bmatrix} \quad (8)$$

La matrice \mathbf{N} d'interpolation reliant les déplacements d'un point intérieur de l'élément aux déplacements nodaux est donc : $\mathbf{N} = \left[1 - x/L \quad x/L \right]^T$ (9)

c-Relation entre déformation et déplacement :

$$\{\varepsilon\} = \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{1}{L} \begin{bmatrix} -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{u}_{xi} \\ \bar{u}_{xj} \end{bmatrix} = \mathbf{B} \mathbf{U}^e \quad (10)$$

La matrice \mathbf{B} reliant les déformations de l'élément à ses déplacements nodaux est alors :

$$\mathbf{B} = \frac{1}{L} \begin{bmatrix} -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

d-Matrice de rigidité élémentaire d'une barre dans le plan :

$$\bar{\mathbf{K}}^e = \frac{EA}{L} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

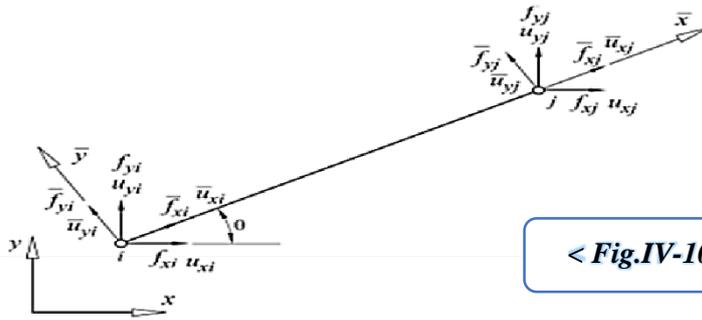
e-Matrice de masse d'une barre dans le plan :

$$\bar{\mathbf{M}}^e = \frac{\rho AL}{6} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \quad (13)$$

Où ρ est la masse volumique du matériau constituant l'élément.

F-Transformation dans le repère global :

Soit $u_{xi}, u_{yi}, u_{xj}, u_{yj}$ les déplacements aux nœuds i et j exprimés dans le repère global (figure IV-10).



< Fig.IV-10 : Elément fini dans le repère global.

La matrice de rigidité exprimée dans le repère global sera déduite de la matrice de rigidité exprimée dans le repère local par la relation : $K^e = T^T \bar{K}^e T$ (14)

Avec T La matrice transformation du repère local au repère global est : $T = \begin{bmatrix} c_x & c_y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c_x & c_y \end{bmatrix}$ (15)

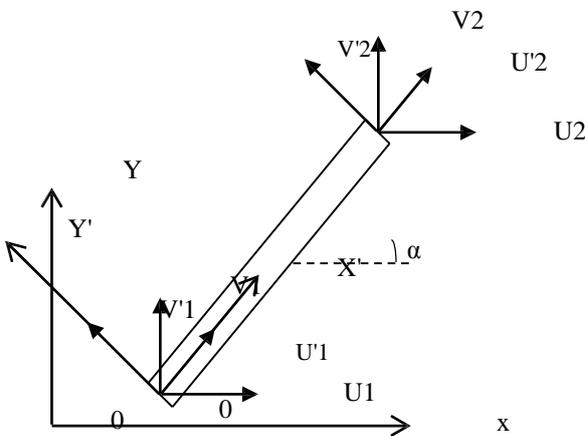
Où c_x et c_y sont les cosinus directeurs définis par :

$$c_x = \frac{1}{L}(x_j - x_i) \text{ et } c_y = \frac{1}{L}(y_j - y_i) \quad (16)$$

De même, la matrice de masse de l'élément barre dans le plan exprimée dans le repère global est :

$$M^e = T^T \bar{M}^e \quad (17)$$

IV-9-2-3. Elément de barre incliné [22] :



< Fig.IV-11 : Elément barre incliné.

La figure IV-11 montre une barre inclinée d'un angle α par rapport à l'axe horizontal du repère (oxy). On note (u, v) les composantes du déplacement dans ce système et (u', v') celles du déplacement dans le repère (o'x'y') lié à la barre. On note aussi R la matrice de rotation de repère qui permet de faire le passage du système (oxy) au nouveau système (o'x'y') On peut ainsi écrire les relations suivantes :

$$\begin{Bmatrix} u'_1 \\ v'_1 \\ u'_2 \\ v'_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} c & s & 0 & 0 \\ -s & c & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c & s \\ 0 & 0 & -s & c \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_2 \\ v_2 \end{Bmatrix}; U'^e = RU^e$$

avec $c = \cos(\alpha)$ et $s = \sin(\alpha)$.

Soit avec la totalité des vecteurs des déplacements élémentaires U^e et U'^e

On obtient ainsi la relation entre les expressions de la matrice de rigidité dans les deux repères :

$$K^e = R^T \bar{K}^e K \quad \text{Soit : } K^e = \frac{AE}{L} \begin{bmatrix} c^2 & cs & -c^2 & -cs \\ cs & s^2 & -cs & -s^2 \\ -c^2 & -cs & c^2 & cs \\ -cs & -s^2 & cs & s^2 \end{bmatrix}$$

La matrice de rigidité, la matrice masse cohérente ou concentrée reste inchangée à la rotation de repère. En effet du point de vue de la physique, la masse est indépendante de l'orientation du repère.

IV-9-3. Élément de ressort [23] :

De par son fonctionnement également uniaxial, l'élément ressort suit exactement les mêmes règles de construction que

l'élément barre. Sa seule différence se situe dans le terme rigidité K . Les matrices de rigidité élémentaires sont donc tout à fait similaires, la valeur de K se substituant à la rigidité $\frac{EA}{L}$ de l'élément barre.

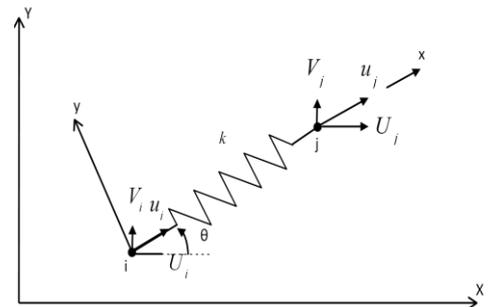


Fig.IV-12 : Élément ressort 2D.

$$K^e = K \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} u_i \\ u_j \end{pmatrix} = K \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} u_i \\ v_i \\ u_j \\ v_j \end{pmatrix}$$

De ce fait et en cas de nécessité, l'élément barre peut être substitué à un élément ressort en remplaçant K par une combinaison de termes E , A et L .

IV-9-4. Élément fini poutre :

IV-9-4-1. Définition :

Un élément fini poutre est un élément dont le comportement est tridimensionnel. Ce comportement dans le cadre de la théorie linéaire est obtenu par superposition de trois modèles mathématiques :

le modèle de traction, le modèle de torsion et le modèle de flexion [21]. C'est généralement un élément à 2 nœuds,

qui comporte 6 inconnues ou d.d.l. par nœud associés aux composantes de son déplacement et de sa rotation dans l'espace. Pour une poutre plane, chaque nœud possède trois degrés de liberté par nœud (deux déplacements et une rotation), alors que pour une poutre tridimensionnelle, le nombre de degrés de liberté par nœud est six : trois rotations et trois translations.

IV-9-4-2. Formulation d'un élément poutre dans le plan :

a-Identification du problème :

La figure (IV-13) illustre un élément poutre dans le plan (x-y) orienté suivant son axe local \bar{x}

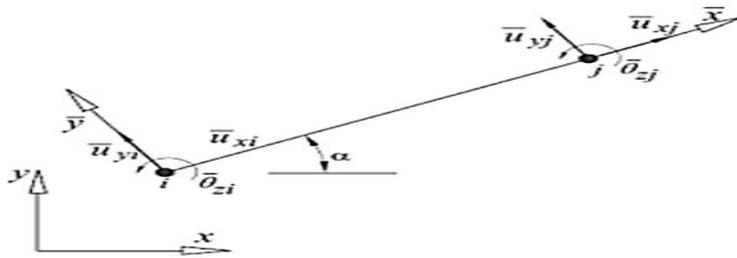


Fig.IV-13 : Élément poutre dans le plan avec 6 degrés de liberté.

Cet élément possède six degrés de liberté correspondant au vecteur déplacement suivant :

$$U^e = [\bar{u}_{xi}, \bar{u}_{yi}, \bar{\theta}_{zi}, \bar{u}_{xj}, \bar{u}_{yj}, \bar{\theta}_{zj}]^T \quad (18)$$

Où \bar{u}_{xi} , \bar{u}_{yi} , \bar{u}_{xj} et \bar{u}_{yj} sont les déplacements aux nœuds i et j suivant \bar{x} , \bar{y} , $\bar{\theta}_{zi}$ et $\bar{\theta}_{zj}$ sont les rotations aux nœuds i et j autour de l'axe \bar{z} .

Les coefficients de la matrice de rigidité de cet élément qui sont dus aux déplacements axiaux sont ceux définis pour un élément barre et n'influence pas le comportement de l'élément sous l'effet de \bar{u}_{yi} , \bar{u}_{yj} , $\bar{\theta}_{zj}$ et $\bar{\theta}_{zi}$.

Dans la suite nous cherchons à déterminer les coefficients de la matrice de rigidité relatifs aux déplacements \bar{u}_{yi} , \bar{u}_{yj} , $\bar{\theta}_{zj}$ et $\bar{\theta}_{zi}$.

b-Fonction d'interpolation :

On choisit une fonction d'interpolation qui définit d'une façon approximative l'état de déplacement de tous les points de l'élément. Puisque l'élément possède quatre degrés de liberté de \bar{u}_{yi} , \bar{u}_{yj} , $\bar{\theta}_{zj}$ et $\bar{\theta}_{zi}$, quatre coefficients inconnus doivent apparaître dans le polynôme représentant le modèle du déplacement [21]. Soit :

$$\bar{u}_y = a_1 N_1^3 + a_2 N_2^3 + a_3 N_1^2 N_2 + a_4 N_1 N_2^2 \quad (19)$$

Où N_1 et N_2 sont les coordonnées naturelles données par l'expression (7) et a_1, a_2, a_3 et a_4 sont des coefficients à déterminer.

Sous forme matricielle l'expression (19) s'écrit : $\bar{u}_y = N^T \bar{U}^e$ (20)

La rotation θ est liée au déplacement \bar{u}_y par la relation :

$$\theta = \frac{\partial \bar{u}_y}{\partial x} = \frac{1}{L} [3a_2 N_2^2 + a_3 N_1^2 + 2a_4 N_1 N_2 - 3a_1 N_1^2 - 2a_3 N_1 N_2 - a_4 N_2^2] \quad (21)$$

En égalant cette expression aux rotations au nœud $i(x=0)$ et au nœud $j(x=L)$; on en déduit :

$$N = [N_1^2(3 - 2N_1) \quad N_1^2 N_2 L \quad N_2^2(3 - N_2) \quad -N_1 N_2^2 L]^T \quad (22)$$

c-Relation entre déformation et déplacement :

La seule déformation à considérer est la courbure autour de l'axe y. Le vecteur de déformation est

donné par : $\epsilon(x, y) = -y \frac{\partial^2 \bar{u}_y}{\partial x^2}$ (23)

La contrainte σ et le moment m_z dus à la flexion dans le plan (x-y) sont :

$$\sigma = -E y \frac{\partial^2 \bar{u}_y}{\partial x^2} \quad (24)$$

$$m_z = -E I_z \frac{\partial^2 \bar{u}_y}{\partial x^2} \quad (25)$$

Si E est le module de Young du matériau et I_z est le moment d'inertie de la section par rapport à l'axe \bar{z} . Compte tenu des expressions (20) et (22), on a :

$$m_z = -\frac{EI_z}{L} [(6 - 12N_1) \quad L(2N_2 - 4N_1) \quad (6 - 12N_2) \quad L(4N_2 - 2N_1)] \bar{U}^e \quad (26)$$

Les contraintes σ et les déformations ϵ correspondant au moment interne dans la poutre sont reliées par la relation : $\sigma = D \{\epsilon\} = DB \bar{U}^e$ (27)

Dans ce cas particulier, la matrice D contient un seul terme correspondant à la rigidité de flexion $E I_z$.

La matrice reliant les déformations de l'élément à ses déplacements nodaux est donc :

$$B = \left[\frac{6}{L^2} - \frac{12x}{L^3} \quad \frac{4}{L} - \frac{6x}{L^2} \quad -\frac{6}{L^2} + \frac{12x}{L^3} \quad \frac{2}{L} - \frac{6x}{L^2} \right] \quad (28)$$

d- La matrice de rigidité élémentaire d'une poutre dans le plan :

Élément à 4 d.d.l :

$$K^B = \begin{bmatrix} \frac{12EI_z}{L^3} & \frac{6EI_z}{L^2} & -\frac{12EI_z}{L^3} & \frac{6EI_z}{L^2} \\ & \frac{4EI_z}{L} & -\frac{6EI_z}{L^2} & \frac{2EI_z}{L} \\ & & \frac{12EI_z}{L^3} & -\frac{6EI_z}{L^2} \\ \text{sym.} & & & \frac{4EI_z}{L} \end{bmatrix}$$

Élément à 6 d.d.l :

$$K^e = \begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & 0 & 0 & -\frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI_z}{L^3} & \frac{6EI_z}{L^2} & 0 & -\frac{12EI_z}{L^3} & \frac{6EI_z}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI_z}{L^2} & \frac{4EI_z}{L} & 0 & -\frac{6EI_z}{L^2} & \frac{2EI_z}{L} \\ \text{Sym} & & & \frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ & & & 0 & \frac{12EI_z}{L^3} & -\frac{6EI_z}{L^2} \\ & & & & -\frac{6EI_z}{L^2} & \frac{4EI_z}{L} \end{bmatrix}$$

e-Matrice de masse d'un élément poutre dans le plan :

Élément à 4 d.d.l :

$$\bar{M}^e = \frac{\rho AL}{420} \begin{bmatrix} 156 & 22L & 54 & -13L \\ 22L & 4L^2 & 13L & -3L^2 \\ 54 & 13L & 156 & -22L \\ -13L & -3L^2 & -22L & 4L^2 \end{bmatrix}$$

Élément à 6 d.d.l :

$$\bar{M}^e = \frac{\rho AL}{420} \begin{bmatrix} 140 & 0 & 0 & 70 & 0 & 0 \\ 0 & 156 & 22L & 0 & 54 & -13L \\ 0 & 22L & 4L^2 & 0 & 13L & -3L^2 \\ 70 & 0 & 0 & 140 & 0 & 0 \\ 0 & 54 & 13L & 0 & 156 & -22L \\ 0 & -13L & -3L^2 & 0 & -22L & 4L^2 \end{bmatrix}$$

IV-10. Programme de résolution statique par la MEF :

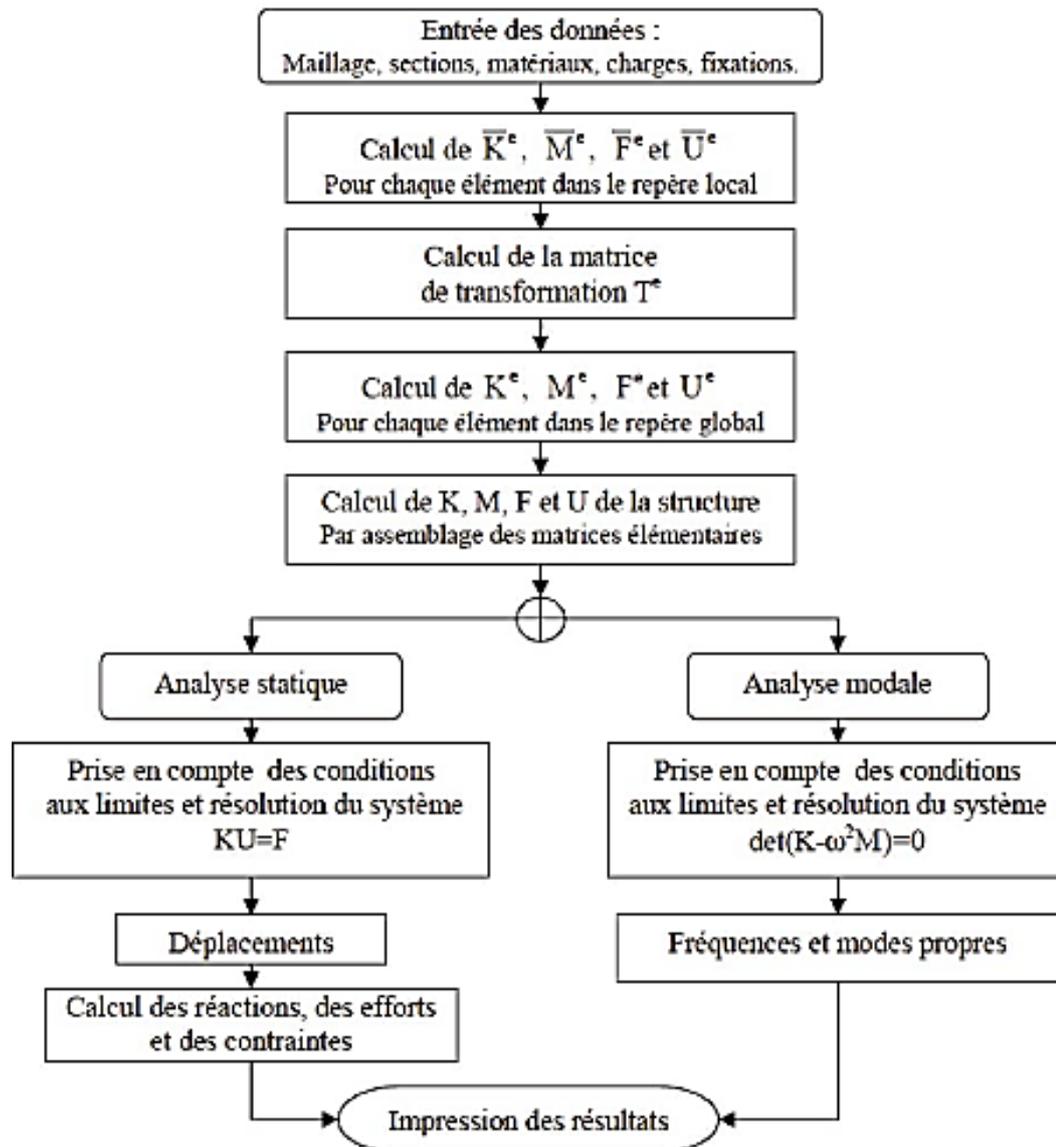


Fig.IV-14 : Organigramme global du programme.

IV-11. Présentation du logiciel :

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 SAP, ABAQUS, ROBOT...

Le logiciel de calcul utilisé est AUTODESK ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS Professionnel 2014.

IV-12. ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS :

IV-12-1. Définition :

ROBOT 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.

IV-12-2. Dimensionnement du pylône à l'aide de logiciel ROBOT ANALYSIS Professionnel 2014 :

Le dimensionnement du pylône a consisté en la détermination des efforts dans les barres du pylône. Avant les calculs des efforts étaient effectués manuellement et la seule façon de s'entier était de ramener le calcul du pylône au calcul de sous-ensembles. Parmi les méthodes utilisées nous pouvons citer :

- ❖ La méthode graphique de Cremona .
- ❖ La méthode analytique (Méthode de RITTER ou des moments).

Actuellement, avec l'arrivée de l'ordinateur capable de résoudre très facilement un très grand nombre d'équations, on traite le calcul en spatial.

IV-12-3. Présentation du logiciel et de son environnement :

Il est le regroupement de plusieurs modules parmi lesquels nous pouvons citer : l'étude d'une coque, l'étude d'un treillis spatial, l'étude d'un portique spatial etc...Ce logiciel intègre la méthode

de calcul aux ETATS LIMITES et prend en compte les coefficients de sécurités réglementaires selon plusieurs facteurs d'insécurité à l'égard :

- ❖ D'une part de l'état limite ultime (ELU) correspondant à la ruine d'un des éléments de l'ouvrage.
- ❖ D'autre part de l'état limite de service (ELS) correspondant à l'état limite de fissuration et de déformation.

Les figures IV (15-16) montrent l'environnement AUTODESK ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS Professionnel 2014.

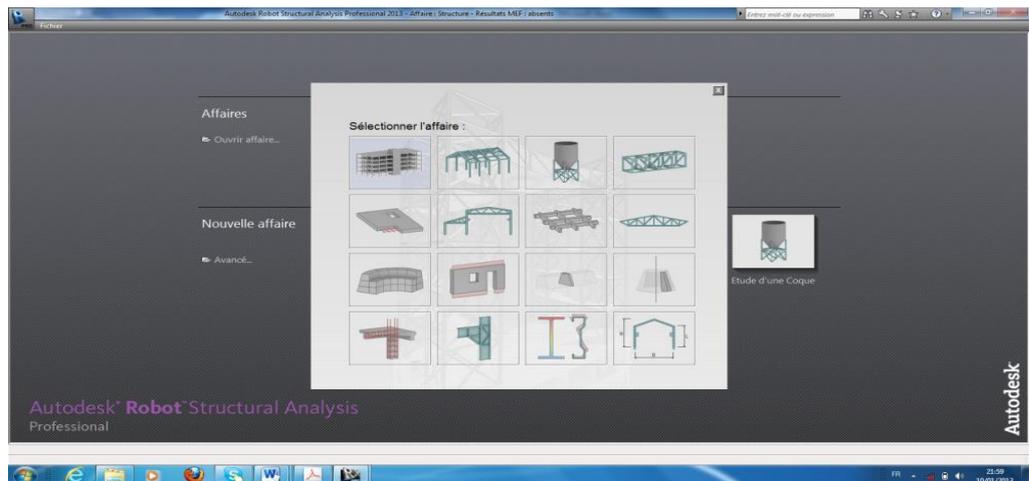


Fig.IV-15 : Environnement AUTODESK ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS Professionnel 2014.

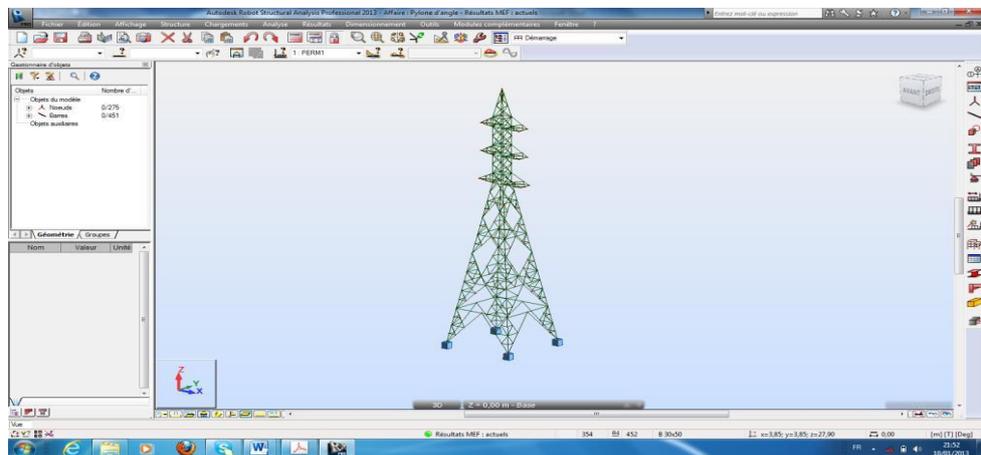


Fig.IV-16 : Vue en 3D du pylône modélisé.

IV-13. Les étapes de modélisation ont consisté en :

- ✓ La définition des lignes de construction.
- ✓ La sélection des normes.
- ✓ La définition des barres de la structure.

✓ La définition des appuis.

Après avoir terminé la modélisation nous sommes passés à la définition des différentes charges calculées.

- La définition des cas de charges.
- La définition des charges pour les cas de charges définis.
- La définition des charges de vent sur le pylône.

IV-14. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les formulations élémentaires et globales utilisées dans les codes de programmations pour l'analyse statique et modale des structures formées de poutres par la méthode des éléments finis.

Chapitre V

**Analyse statique et
dimensionnement**

V-1. Introduction :

Les pylônes que nous nous proposons de calculer font partie des structures discrètes qui sont composées d'éléments barres assemblées par boulonnage en des points appelés «nœuds», et soumises à des forces extérieures que sont : la pression due au vent, le poids propre du pylône et des câbles pour les pylônes de transport électrique. Sous l'effet de ces forces, le pylône peut se déformer et des contraintes internes dans chaque élément peuvent se manifester. Les efforts appliqués à chaque barre sont schématisés comme charges ponctuelles. Les sollicitations résultantes sont obtenues sous la forme d'un seul effort (effort axial) en chaque point de la fibre moyenne.

V-2. Description et justification de la solution :

V-2-1. Choix de la structure :

Dans le cas d'une économie de matériel, le pylône en treillis en acier est le plus efficace pour l'utilisation des matériaux.

Le pylône en treillis aux avantages d'avoir une grande résistance, un poids léger est une faible résistance au vent comme son treillis ouvert évite de présenter la largeur totale de la structure face au vent.

Dans le cadre de notre travail, nous nous proposons d'analyser deux pylônes qui sont exploités à traversé de la ville de Bordj Bou Arreridj, près de la route menant à BIR SNAB, de Pylône d'alignement de type **A** et de type **B** équipé de chaînes d'isolateurs de suspension et pouvant aussi être utilisé, si nécessaire.

V-2-2. Choix des matériaux :

➤ Cornières :

Tous les éléments constituant notre pylône seront des cornières à ailes égales en acier laminé à chaud et sont conformes à la norme EN 10025-2, le matériau utilisé étant l'acier E24 (S235).

Les valeurs de la limite à la rupture et de la limite d'élasticité sont données dans le tableau suivant:

Description de l'acier	S235
f_{bu} : limite à la rupture minimale en traction	360 N/mm ²
f_y : limite d'élasticité minimale garantie	235 N/mm ²

Tableau V-1 : Les valeurs de la limite à la rupture et de la limite.

➤ Boulons, écrous et rondelles :

Les assemblages par boulons permettent de reprendre des efforts d'orientation quelconque par rapport à l'axe du boulon. Il est d'usage d'envisager séparément les efforts parallèles et les efforts perpendiculaires

à l'axe du boulon, qui correspondent à des modes de fonctionnement différents et requièrent donc des vérifications propres.

Les valeurs de la limite à la rupture et de la limite d'élasticité des boulons, écrous et rondelles sont données dans le *Tableau V-2* suivant :

Description des boulons	Boulons ordinaire classe 6.8
f_{ub} : Limite à la rupture minimale en traction	600 N/mm ²
f_y : Limite d'élasticité minimale garantie	480 N/mm ²

Tableau V-2 : Les valeurs de la limite à la rupture et de la limite d'élasticité des boulons.

Les boulons seront matés. Les boulons ordinaires M20, M22 seront utilisés pour la fixation des cornières du pylône.

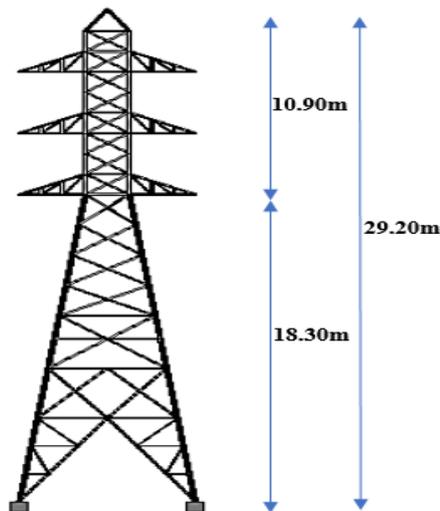
V-3. Présentation de la structure :

Dans le présent travail on aura à dimensionner deux exemples de ces ouvrages métalliques à savoir un pylône d'électrique.

Description des pylônes étudiée et des mécanismes d'effondrement Les pylônes, en structure métallique, est autoportant, et se compose des tronçons en treillis a base carrée au niveau des fondations, et d'un mât porte les câbles.

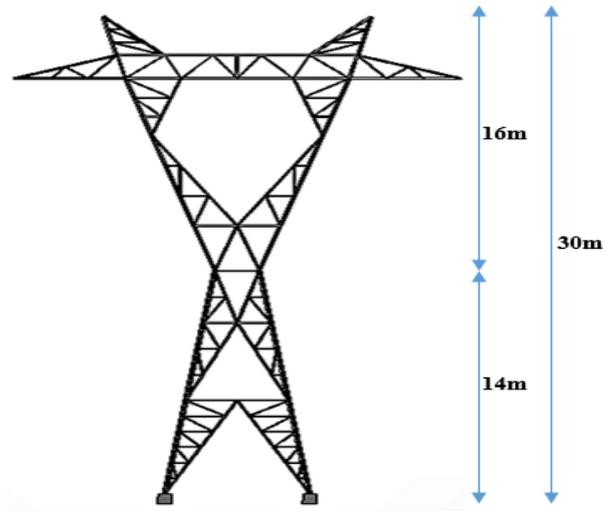
La géométrie de pylône type A :

C'est un type Pylône à une forme carrée de 6 m de côté, une hauteur totale 29.20m.



La géométrie de pylône type B :

C'est un type Pylône à une forme carrée de 6.5 m de côté, une hauteur totale 30.00m.



V-4. Modélisation des pylônes en 3D avec ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS :

Pour modéliser la structure en trois dimensions, nous allons utiliser le logiciel AUTODESK ROBOT 2014.

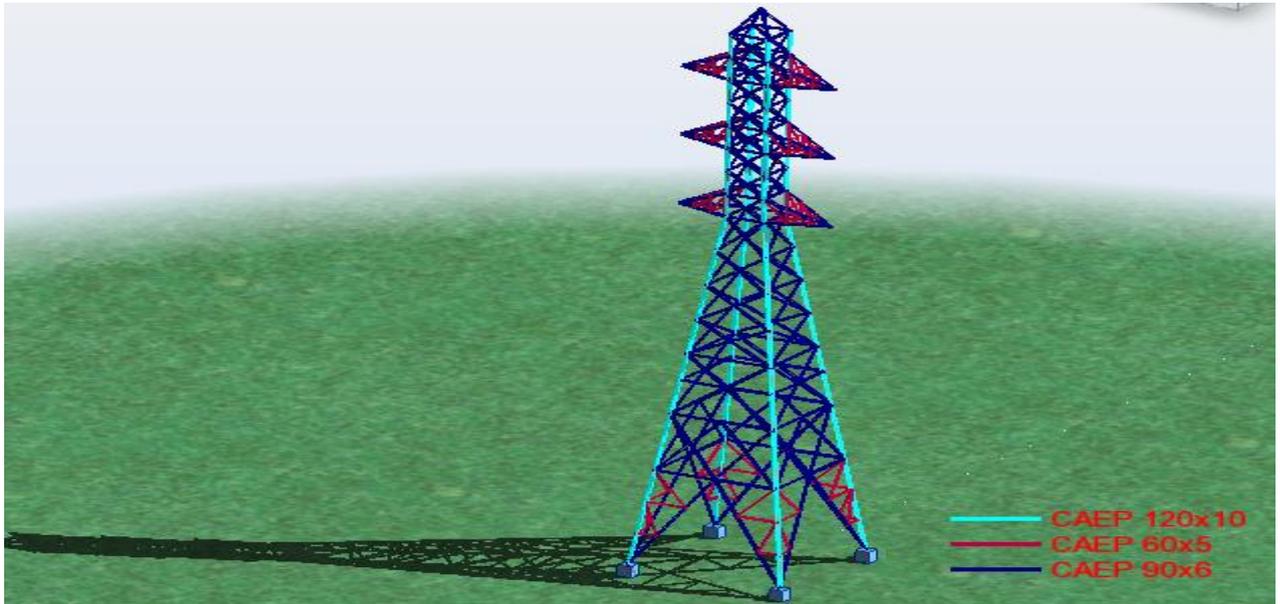


Fig. V-1 : Vue en 3D du pylône et les différents profilés utilisées dans la structure de type (A).

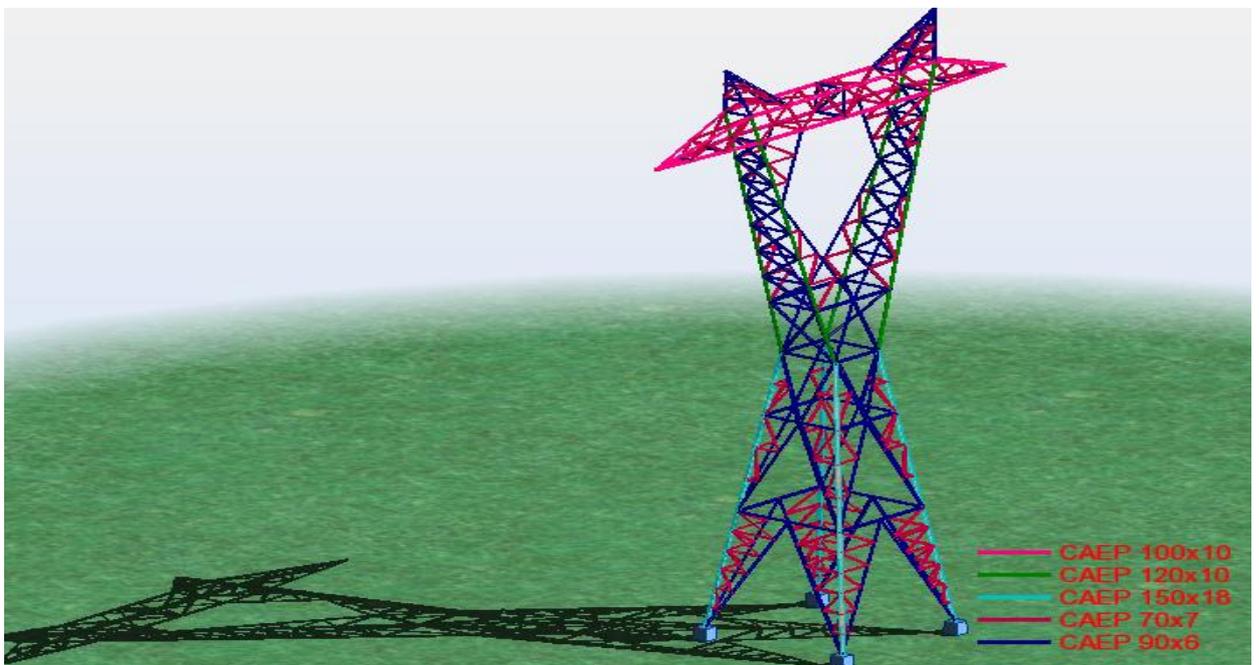


Fig. V-2 : Vue en 3D du pylône et les différents profilés utilisées dans la structure de type (B).

V-5. Evaluation des charges :

On suppose que :

- ✦ Chaque treillis plan correspondant à une face ne peut opposer aucune résistance à un effort perpendiculaire à son plan. C'est-à-dire que la rigidité est nulle dans le plan perpendiculaire au plan du treillis. Il ne reprend que l'effort exercé dans son plan.
- ✦ Les diagonales (comprimés et tendues) sont suffisamment très minces.
- ✦ Le poids propre de la structure qui sera supposé supporter par les membrures.

V-6. Méthode de calcul :

Le mât de pylône sera divisé en tronçons, chaque tronçon sera dimensionné suivant ses éléments les plus sollicités. Donc le pylône sera calculé tronçon par tronçon du bas vers le haut. Nous rechercherons les sollicitations les plus défavorables à la base de chaque tronçon. On supposera, pour les pressions dynamiques du vent, une distribution trapézoïdale pour chaque tronçon. Cette distribution, certes non sécuritaire, sera compensée par un surdimensionnement des barres (en ne les faisant pas travailler à leur limite élastique).

V-6-1. Calcul de l'action du vent :

D'après "R.N.V.99" [24], la catégorie de construction qui est étudiée est :

Catégorie II : cette catégorie regroupe les constructions ajourées telles que les structures verticales en treillis (pylônes, grues, échafaudages, etc.), les cheminées et ouvrages similaires.

➤ Calcul de la pression due au vent :

Pour les constructions de catégorie II, la pression due au vent q_j qui s'exerce sur un élément de surface j est donnée par :

$$q_j = C_d \times W(z_j) \quad [\text{N/m}^2] \quad (1)$$

$$\text{❖ } C_d \text{ Le coefficient dynamique est donné par : } C_d = \frac{1+2 \times I_V(z_{eq}) \times \sqrt{Q_0^2 + R_x^2}}{1+2 \times g \times I_V(z_{eq})} \quad (2)$$

- ✓ z_{eq} : Est la hauteur équivalente de la construction (en m), (*Tableau 1 Annexes-A*).
- ✓ $I_V(z_{eq})$: Est l'intensité de la turbulence pour $z = z_{eq}$.
- ✓ Q_0^2 : Est la partie quasi-statique.
- ✓ R_x^2 : Est la partie résonnante.
- ✓ g : Est le facteur de pointe.

a. Hauteur équivalente :

$$z_{eq} = \text{Max.} [0.6 \times h ; z_{min}] \quad (3)$$

- ✓ h : La hauteur de la construction(en m).

✓ z_{min} : Hauteur minimale(en m), (*Tableau 2 Annexes-A-*).

ZONE III : $Z_{min} = 8$ m

	<i>pylône (A)</i>	<i>pylône (B)</i>
z_{eq} (m)	17.52	18

b. Intensité de la turbulence :

$$I_V(z) = \frac{1}{C_t(z) \times \ln\left[\frac{z_{eq}}{z_0}\right]} \quad (4)$$

✓ $C_t(z)$: Est le coefficient de topographie, (*Tableau 3 Annexes-A-*).

✓ z_0 : Est le paramètre de rugosité (en m), (*Tableau 2 Annexes-A-*).

	<i>pylône (A)</i>	<i>pylône (B)</i>
$C_t(z) = 1$ $z_0 = 0.3$		
$I_V(z)$	0.246	0.244

c. Partie quasi-statique :

$$Q_0^2 = \frac{1}{1 + 0.9 \times \left(\frac{b+h}{L_i(z_{eq})}\right)^{0.63}} \quad (5)$$

✓ **b** et **h** sont la largeur et la hauteur de la construction (en m).

✓ $L_i(z_{eq})$: Est l'échelle intégrale de turbulence pour $z=z_{eq}$ (en m).

$$L_i(z_{eq}) = 300 \times (z_{eq}/300)^\varepsilon \quad (6) \quad \text{avec } \varepsilon = 0.37$$

	$L_i(z_{eq})$ [m]	b [m]	h [m]	Q_0^2
<i>pylône (A)</i>	104.880	6m	29.20	0.689
<i>pylône (B)</i>	105.934	6.5	30	0.685

d. Partie résonnante :

$$R_x^2 = \frac{\pi^2}{2 \times \delta} \times R_N \times R_h \times R_b \quad (7)$$

✓ R_N : Est la fonction adimensionnelle de la densité spectrale de puissance.

✓ δ : Est le décrétement logarithmique d'amortissement des vibrations dans la direction du vent.

✓ R_h et R_b : Sont des fonctions d'admittance aérodynamique.

$$\diamond R_N = \frac{6.8 \times N_x}{(1 + (10.2 \times N_x))^{5/3}} \quad (8)$$

✓ N_x : Est la fréquence adimensionnelle dans la direction x du vent $\longrightarrow N_x = \frac{n_{1,x} \times L_i(z_{eq})}{V_m(z_{eq})}$
(9)

✓ $n_{1,x}$: Est la fréquence fondamentale de vibration en flexion dans la direction x du vent.

✓ $L_i(z_{eq})$: Est l'échelle intégrale de turbulence pour $z = z_{eq}$.

✓ $V_m(z_{eq})$: Est la vitesse moyenne du vent pour $z = z_{eq}$ (en m/s).

$$\diamond n_{1,x} = \frac{f_m \times b}{h_{eff}^2} \times \sqrt{\frac{M_s}{M_t}} \quad [HZ] \quad (10)$$

✓ h_{eff} : Est donnée par $h_{eff} = h_1 + h_2/3$ (en m) (figure A4.2, R.N.V).

✓ b : Est le diamètre en tête de la cheminée (en m).

✓ M_s : Est la masse des éléments structuraux contribuant à la rigidité de la cheminée (en kg).

✓ M_t : Est la masse totale de la cheminée (en kg).

✓ f_m : Est un coefficient ; il est égal à 1000 pour les cheminées en acier, et 700 pour les cheminées en béton ou en maçonnerie.

$$\left[\begin{array}{l} \frac{M_s}{M_t} = 1 \\ f_m = 1000 \end{array} \right.$$

	h_{eff} [m]	b [m]	$n_{1,x}$ [HZ]
<i>pylône (A)</i>	17.10	1.5	5.130
<i>pylône (B)</i>	20.667	10.79	25.263

$$\diamond V_m(z_{eq}) = C_r(z_{eq}) \times C_t(z_{eq}) \times V_{réf} \quad [m/s] \quad (11)$$

✓ $C_r(z_{eq})$: Est le coefficient de rugosité.

✓ $C_t(z_{eq})$: Est le coefficient de topographie.

✓ $V_{réf}$: Est la vitesse de référence (en m/s), (Tableau 4 Annexes-A-).

$$\checkmark C_r(z_{eq}) = K_T \times \ln\left(\frac{z_{eq}}{z_0}\right) \quad (12)$$

$$\left[\begin{array}{l} K_T = 0.22 \\ z_0 = 0.3 \end{array} \right.$$

	z_{eq} [m]	$C_r(z_{eq})$
<i>pylône (A)</i>	17.52	0.895
<i>pylône (B)</i>	18	0.901

$C_t(z_{eq}) = 1$, BORDJ BOU ARIRIDJ: ZONE I $\longrightarrow V_{réf} = 25$ [m/s]

	$V_m(z_{eq})$ [m/s]	$L_i(z_{eq})$ [m]	N_x	R_N
<i>pylône (A)</i>	22.375	104.880	24.046	0.017
<i>pylône (B)</i>	22.525	105.934	118.809	0.005

$$\diamond \delta = \delta_s + \delta_a \tag{13}$$

- ✓ δ_s : Est le décrétement logarithmique d'amortissement structural.
- ✓ δ_a : Est le décrétement logarithmique d'amortissement aérodynamique

$$\diamond \delta_s = (a_1 \times n_{1,x}) + b_1 \text{ avec } \delta_s > \delta_{min} \tag{14}$$

- ✓ a_1, b_1 et δ_{min} : Sont des paramètres donné dans *le tableau 6 Annexes-A-* pour différents types de construction.

$a_1 = 0.045$ $b_1 = 0$ $\delta_{min} = 0.05$		<i>pylône (A)</i>	<i>pylône (B)</i>
	δ_s	0.234	1.264

$$\diamond \delta_a = \frac{\rho \times b \times C_f}{2 \times n_{1,x} \times m_{1,x}} \times V_m(z_{eq}) \tag{15}$$

- ✓ ρ : Est la masse volumique de l'air ($\rho = 1,20$ kg/m³) (en kg/m³).
- ✓ b : Est la dimension de la construction perpendiculaire au vent (en m).
- ✓ C_f : Est le coefficient de force (*cf. chapitre 4, R.N.V.*).
- ✓ $n_{1,x}$: Est la fréquence propre du mode fondamental dans la direction x du vent (en Hz).
- ✓ $m_{1,x}$: Est la masse équivalente pour le mode fondamental et dans la direction x du vent(en kg/m).
- ✓ $V_m(z_{eq})$: Est la vitesse moyenne du vent pour $z = z_{eq}$ (en m/s).

$$m_{1,x} = \frac{\int_0^h m \cdot \phi_1^2(z) \cdot dz}{\int_0^h \phi_1^2(z) \cdot dz} \quad [\text{Kg/m}] \tag{16}$$

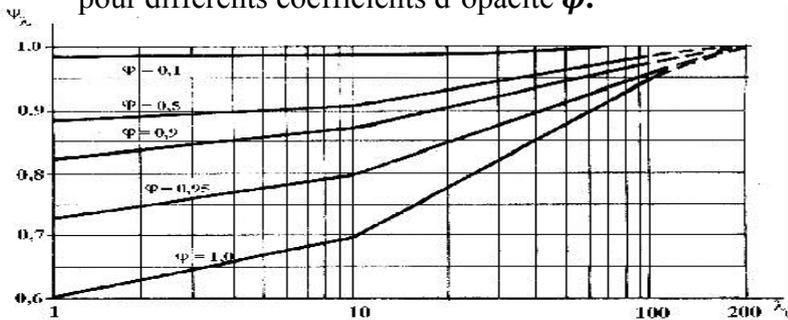
- ✓ m : Est la masse par unité de longueur (en kg/m).
- ✓ h : Est soit la hauteur totale de la construction(en m).
- ✓ ϕ_1 : Est la déformée pour le mode fondamental $\longrightarrow \phi_1(z) = \left(\frac{z}{h}\right)^\xi$ (17)
- ✓ h : Est la hauteur totale de la structure par rapport au sol (en m).
- ✓ z : Est la hauteur par rapport au sol du point considéré(en m).
- ✓ ξ : Est un coefficient ($\xi=2.5$ pour les structures en treillis).

	z [m]	h [m]	ϕ_1	$m_{1,x}$ [kg/m]
<i>pylône (A)</i>	17.520	29.20	0.279	244.487
<i>pylône (B)</i>	18	30	0.319	394.832

$$C_f = C_{f,0} \times \Psi_\lambda \times \Psi_r \tag{18}$$

- ✓ $C_{f,0}$: Est le coefficient de force des constructions en considérant un élancement effectif infini.
- ✓ Ψ_λ : Est le facteur d'élancement.
- ✓ Ψ_r : Est un facteur de correction du coefficient de force, est égal à 1 pour l'ensemble des constructions.

Le facteur d'élancement Ψ_λ est donné par la figure V-3 en fonction de l'élancement effectif λ_e et pour différents coefficients d'opacité ϕ .



< Fig.V-3 : Facteur d'élancement Ψ_λ .

$$\Psi_\lambda \begin{cases} \phi = A/A_c = 0.1 \\ \lambda_e = L/\ell \end{cases} \quad \begin{cases} C_{f,0} = 2.1, \text{ (Fig.3 Annexes-A-)} \\ \Psi_r = 1 \end{cases}$$

	Ψ_λ	C_f	δ_a
<i>pylône (A)</i>	0.984	2.006	0.132
<i>pylône (B)</i>	0.971	2.039	0.016

	<i>pylône (A)</i>	<i>pylône (B)</i>
$\delta = \delta_s + \delta_a$	0.366	1.280

Les fonctions admittance aérodynamique R_h et R_b sont données par :

$$R_h \text{ ou } R_b = \left(\frac{1}{\eta}\right) - \left(\frac{1}{2 \times \eta^2}\right) \times (1 - e^{-2\eta}) \quad \text{Pour } \eta > 0 \tag{19}$$

$$\eta = \frac{4.6 \times N_x \times d}{L_i(z_{eq})} \tag{20}$$

- ✓ N_x : Est la fréquence adimensionnelle.

- ✓ $L_i(z_{eq})$: Est l'échelle intégrale de turbulence.
- ✓ $d=h$ pour le calcul de R_h , $d=b$ pour le calcul R_b .

	N_x	$L_i(z_{eq})[m]$	η_h	η_b	R_h	R_b	R_x^2
<i>pylône (A)</i>	24.046	104.880	30.796	6.328	0.032	0.145	0.001
<i>pylône (B)</i>	118.809	105.934	154.772	33.534	0.006	0.029	3.354×10^{-6}

e. Facteur de pointe :

$$g = \sqrt{2 \times \ln(v \times t)} + \frac{0.6}{\sqrt{2 \times \ln(v \times t)}} \quad (21)$$

- ✓ t : Est la durée sur laquelle est établie la vitesse de référence (en s) ; dans le cadre de ce D.T.R (R.N.V), $t = 600$ s
- ✓ v : Est la fréquence moyenne(en Hz).

Avec :

$$v = \sqrt{\frac{v_0^2 \times Q_0^2 + n^2 \times R_x^2}{Q_0^2 + R_x^2}} \quad [HZ] \quad (22)$$

$$v_0 = \frac{v_m(z_{eq})}{L_i(z_{eq})} \times \frac{1}{1.11 \times S^{0.615}} \quad [HZ] \quad (23)$$

$$S = 0.46 \times \left(\frac{(b+h)}{L_i(z_{eq})} \right) + 10.58 \times \left(\frac{\sqrt{b \times h}}{L_i(z_{eq})} \right) \quad (24)$$

	S	v_0 [HZ]	v [HZ]	g
<i>pylône (A)</i>	1.490	0.150	0.247	3.352
<i>pylône (B)</i>	1.553	0.146	0.157	3.214

	<i>pylône (A)</i>	<i>pylône (B)</i>
C_d	0.532	0.547

$C_d < 1.2$ Donc la structure sera donc considérée peu sensible aux excitations dynamiques.

- ✓ $W(z_j)$ Est la pression exercée sur l'élément de surface j donnée par :

$$W(z_j) = q_{dyn}(z_j) \times C_{fj} \quad [N/m^2] \quad (25)$$

- ✓ $q_{dyn}(z_j)$: Est la pression dynamique du vent calculée à la hauteur z_j relative à l'élément de surface j (en N/m²).
- ✓ C_{fj} : Est le coefficient de force correspondant à la section transversale de la construction au niveau de l'élément de surface j considéré.

$$q_{\text{dyn}}(z_j) = q_{\text{réf}} \times C_e(z) \quad [\text{N/m}^2] \quad (26)$$

✓ $q_{\text{réf}}$: Est la pression dynamique de référence pour les constructions permanentes(en N/m^2) ; $q_{\text{réf}}$ est donnée par *le tableau 5 annexe-A*- en fonction de la zone de vent.

✓ $C_e(z)$: Le coefficient d'exposition au vent.

$$C_e(z) = C_t(z)^2 \times C_r(z)^2 \times \left[1 + \frac{7 \times K_T}{C_r(z) \times C_t(z)} \right] \quad (27)$$

BORDJ BOU ARIRIDJ: ZONE I $q_{\text{réf}} = 375 \text{ [N/m}^2\text{]}$

z [m]	Ln (z/z ₀)	C _r	I _v	C _e (z)	q _{dyn} [N/m ²]	W(z _j)[N/m ²]	q _j [N/m ²]
5	2.813	0.619	0.355	1.336	501	1035.066	550.655
8	3.283	0.722	0.305	1.633	612.375	1265.167	673.069
11	3.602	0.792	0.278	1.847	692.625	1430.963	761.273
18.3	4.111	0.904	0.243	2.209	828.375	1711.423	910.477
21.9	4.290	0.944	0.233	2.345	879.375	1816.789	966.532
25.5	4.443	0.977	0.225	2.459	922.125	1905.110	1013.519
29.2	4.578	1.007	0.218	2.565	961.875	1987.234	1057.208

Tableau V-3 : la pression due au vent Pylône (A).

z [m]	Ln (z/z ₀)	C _r	I _v	C _e (z)	q _{dyn} [N/m ²]	W(z _j)[N/m ²]	q _j [N/m ²]
6	3	0.660	0.333	1.452	544.5	1110.236	607.299
11	3.602	0.792	0.278	1.847	692.625	1412.262	772.507
14	3.843	0.845	0.260	2.015	755.625	1540.719	842.773
17	4.037	0.888	0.248	2.156	808.500	1648.532	901.747
23	4.339	0.955	0.230	2.383	893.625	1822.101	996.689
26	4.462	0.982	0.224	2.477	928.875	1893.976	1036.005
27.5	4.518	0.994	0.221	2.519	944.625	1926.090	1053.571
30	4.605	1.013	0.217	2.586	969.750	1977.320	1081.594

Tableau V-4 : la pression due au vent Pylône (B).

Les cas de charges élémentaires :

- **Le poids propre** : Calculé automatique par le logiciel *ROBOT*.
- **Charge de vent** : Pour définir les charges de vent sur le pylône il faut le diviser en « Tronçons » c'est ainsi que nous avons divisé notre pylône en 7 tronçons pour pylône (A) et 8 tançons pour pylône (B) (*figure V-4*).

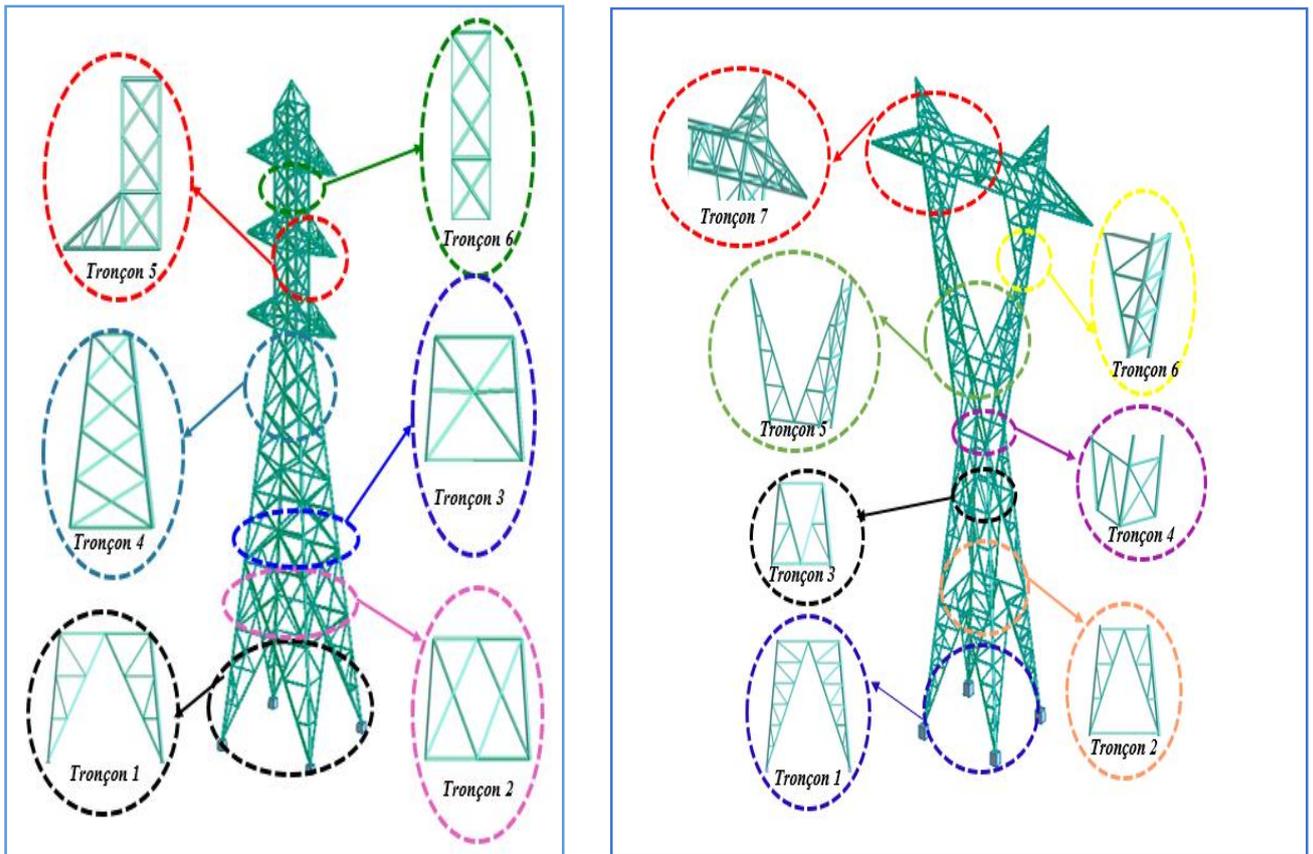


Fig.V-4 : Description conçue des pylônes A et B.

Pour le calcul des constructions, on suppose que la direction du vent est horizontale, mais sa pression se définit par rapport à la surface qu'elle rencontre. Selon la norme R. N.V.99, il ya deux directions.

Cette charge par niveau est répartie sur la surface qu'offres les éléments (cornières) au vent.

En divisant notre pylône en zone et en répartissant le chargement selon les surfaces de chaque zone, nous obtenons les charges ponctuelles appliquées aux deux nœuds de chaque niveau choisi (Figure V-5- 1et V-6).

Charge ponctuelle appliquées plan (Z-X) :

Cote Z [m]	Charge Vent 1 (à répartir sur les deux Nœuds du niveau) [daN]
5	825.983
8	482.591
11	463.615
18.30	1090.023
19.50	32.621
21.90	108.735
23.10	30.405
25.50	121.622
26.70	30.859
27.90	30.859
29.20	36.217

Tableau V-5 : La charge de vent du Pylône (A) dans plan (Z-X).

Cote Z [m]	Charge Vent 1 (à répartir sur les deux Nœuds du niveau) [daN]
6	1184.233
11	930.871
14	432.343
17	338.155
23	1258.818
26	1184.154
27.5	768.843
30	213.615

Tableau V-6 : La charge de vent du Pylône (B) dans plan (Z-X).

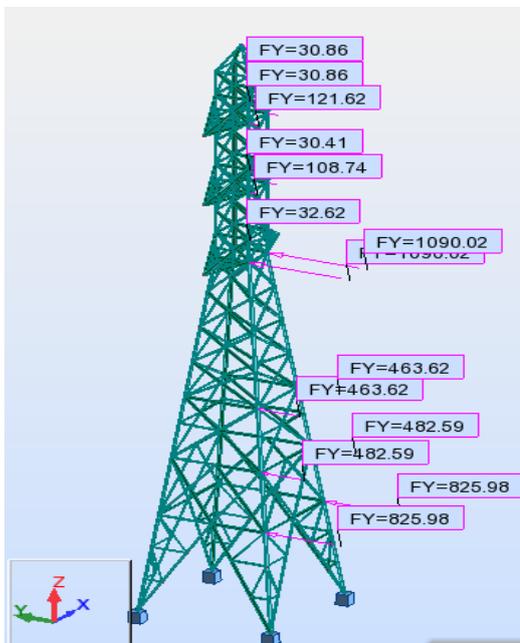


Fig.V-5 : Charge de vent du Pylône (A) dans le plan (Z-X).

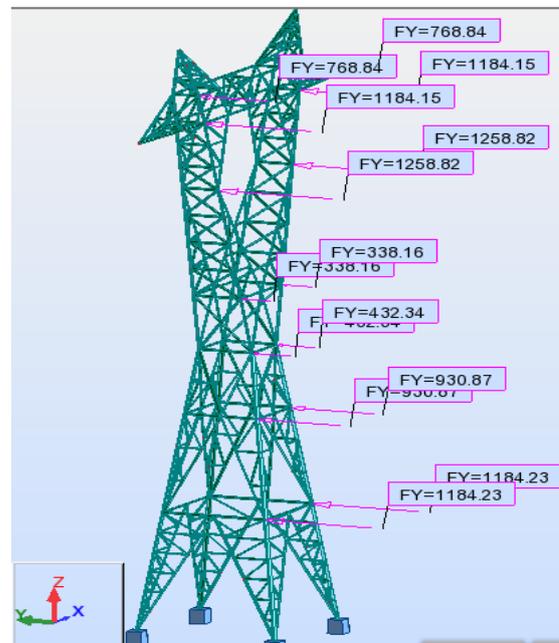


Fig.V-6 : Charge de vent du Pylône (B) dans le plan (Z-X).

Charge ponctuelle appliquées plan (Z-Y) :

Pour pylône (A) V1 de plan (Z-X) = V2 de plan (Z-Y) (le pylône (A) symétrique pour les quatre coté).

Cote Z [m]	Charge Vent 2 (plan Z-Y) (à repartir sur les deux Nœuds du niveau) [daN]
6	1184.233
1	930.871
4	432.343
7	338.155
3	666.785
6	262.627
7.50	107.464
30	164.943

Tableau V-7 : La charge de vent du Pylône (B) dans plan (Z-Y).

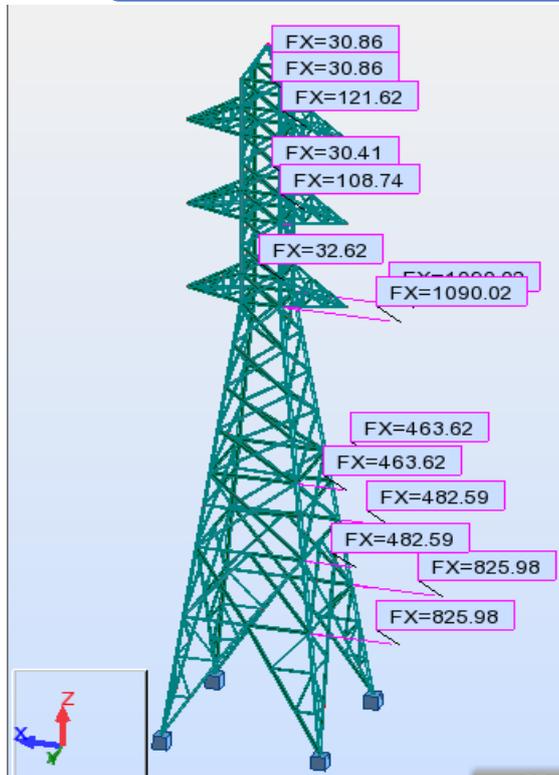


Fig.V-7 : Charge de vent du Pylône (A) dans le plan (Z-Y).

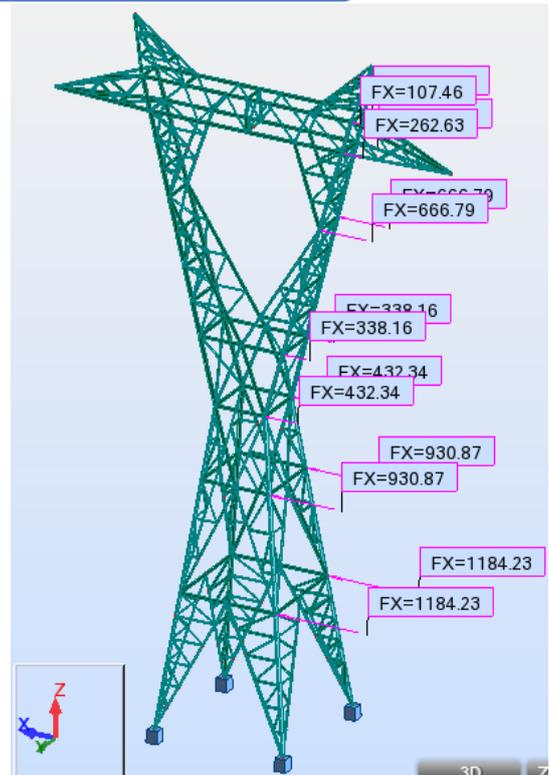


Fig.V-8 : Charge de vent du Pylône (B) dans le plan (Z-Y).

V-6-2. Calcul de charge de câble :

Le câble qui utilisé pour notre étude un câble de type AAAC en aluminium sa section

$S_A = 288 \text{ mm}^2$ Pour le pylône (A) et $S_B = 411 \text{ mm}^2$ pour le pylône (B), le poids propre de ce câble est de $777.60 \times 10^{-3} \text{ Kg/m}$ (A) et $1109.70 \times 10^{-3} \text{ Kg/m}$ (B). La distance entre pylônes est de 300m.

Chaque câble prend demi-longueur (150 m).

Donc le poids de chaque câble est :

$$116.64 \text{ Kg} = 1166.40 \text{ N} \longrightarrow \text{pylône (A)}$$

$$166.455 \text{ Kg} = 1664.55 \text{ N} \longrightarrow \text{pylône (B)}$$

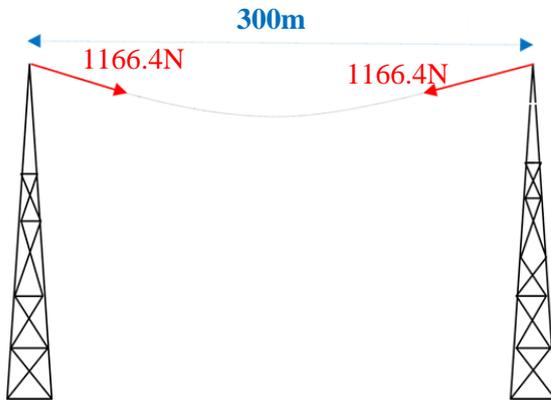


Fig. V-9 : Schéma de charge de câble du pylône (A).

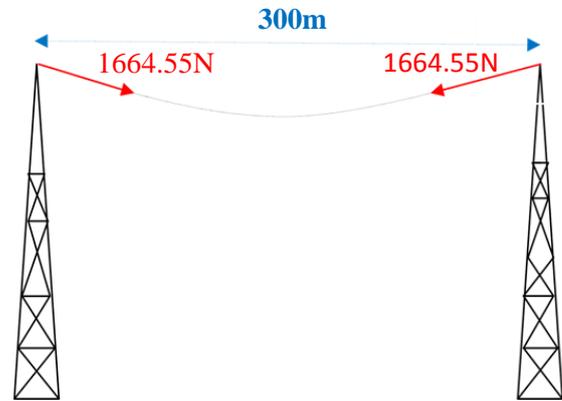


Fig. V-10 : Schéma de charge de câble du pylône (B).

En tenant compte de la longueur réelle du câble (Fléchi) .Cette flèche crée un angle petite de 4.25° ;

en remplace le vecteur de charge incliné par deux vecteurs, suivent deux direction (X et Z).

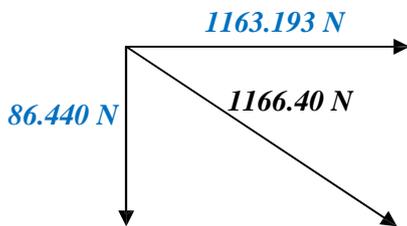


Fig.V-11 : Vecteur de charge de câble pylône.

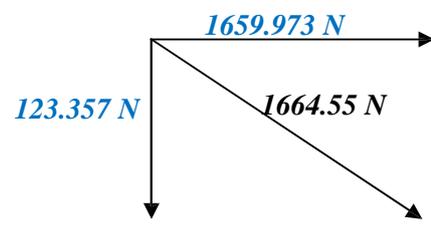


Fig.V-12 : Vecteur de charge de câble pylône.

➤ **Charge de câble :**

Les charges dues au câbles sont calculé en considérant notre pylône comme pylône en bout liaison (cas défavorable par rapport à un pylône intermédiaire) et donc le pylône subit l'action de traction des câble d'un seul côté. Les distance entres pylônes différent selon leur capacité et le nombre de câbles qu'ils soutiennent. Dans notre cas la distance entre pylônes est de 300m. Ainsi pour évaluer la charge des câbles, on doit tenir compte de la longueur réelle de du câble entre deux pylônes (distance développé selon la courbure du câble du a son poids propre).

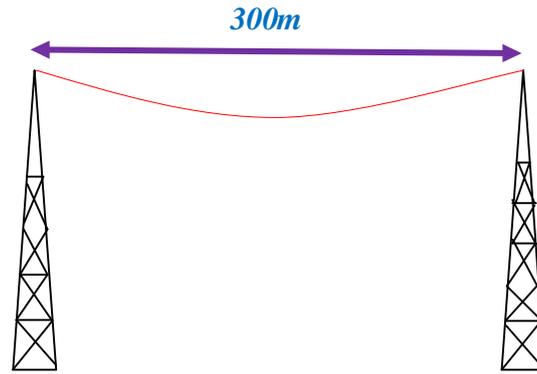


Fig.V-13 : la longueur réelle du câble.

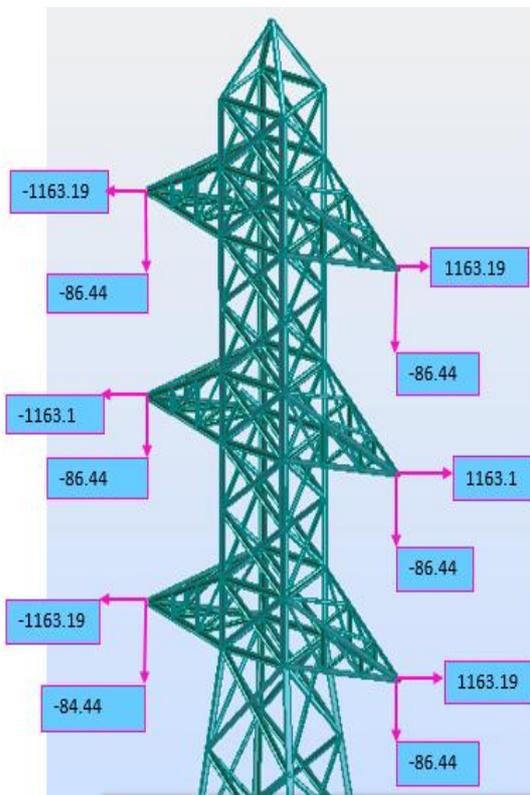


Fig.V-14 : Les charges des câbles pour pylône (A).

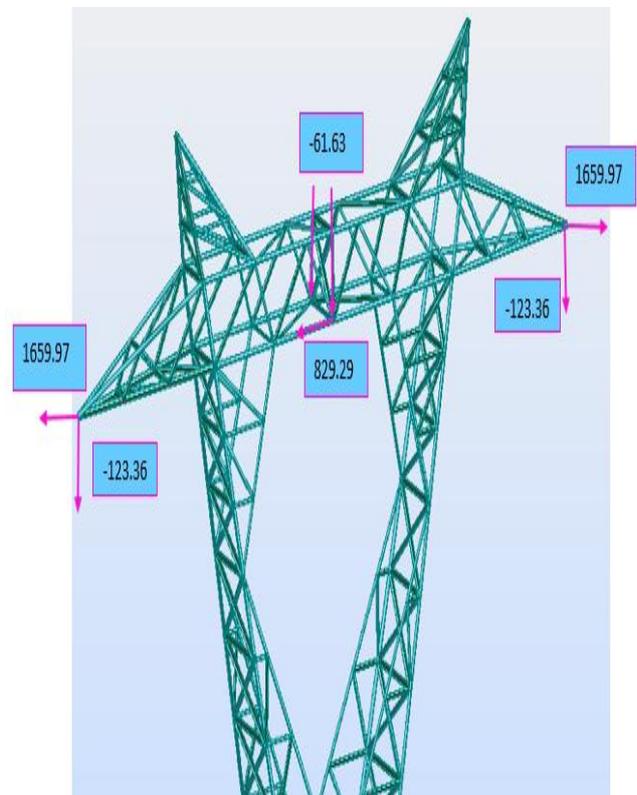


Fig.V-15 : Les charges des câbles pour pylône (B).

V-7. Analyse statique :

L'analyse statique est nécessaire pour déterminer la position d'équilibre statique du système.

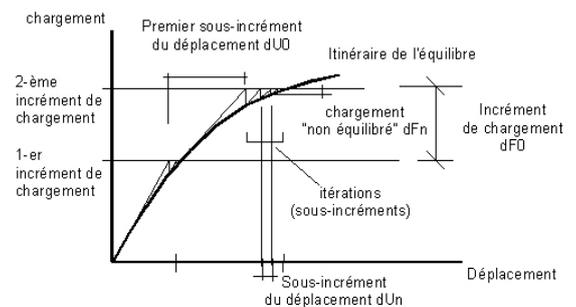
V-7-1. Procédure de l'analyse statique :

L'analyse statique consiste à déterminer séparément la rigidité de chaque élément du système dans son repère local. Puis, après avoir calculé les différentes rigidités des différents éléments, les matrices de rigidités élémentaires seront combinées dans un repère global dans une nouvelle matrice appelée matrice de rigidité globale.

Afin de résoudre l'équation d'équilibre tenant compte du problème de non linéarité, la procédure d'analyse statique utilise une approche itérative et incrémentale : la matrice de rigidité globale $[K]$ est recalculée à chaque itération jusqu'à ce que l'équilibre soit obtenu.

L'exemple du déroulement de la procédure non-linéaire dans la méthode incrémentale est représenté sur la figure ci-dessous qui illustre les grandeurs utilisées lors des calculs non-linéaires.

Pour sélectionner un algorithme de résolution de Newton-Raphson du problème non-linéaire disponible dans le logiciel *ROBOT*, il faut définir les paramètres suivants pour l'analyse non-linéaire



✦ Pour la méthode de Newton-Raphson modifiée

(Mise à jour K après chaque sous-division Désactivé).

✦ Pour la méthode de Newton-Raphson complète (Mise à jour K après chaque sous-division - ACTIVE)

Le logiciel vérifie la convergence du processus de façon automatique. L'itération est interrompue au moment où l'état d'équilibre est atteint.

Les incréments des déplacements dUn et les forces non équilibrées dFn sont alors nuls (c'est-à-dire qu'ils sont inférieurs aux tolérances définies pour les deux grandeurs).

V-8. Vérification de la structure selon Eurocode 3 et R.N.V 99 :

V-8-1. Les combinaisons des charges :

La vérification des éléments de la structure est établie suivant la méthode «des états limites ». Les états limites à vérifier sont :

- ✦ L'état limite ultime ELU.
- ✦ L'état limite d'utilisation ou de service ELS.

- ✓ **G** : Ensemble des charges permanentes.
- ✓ **Q** : Ensemble des charges d'exploitations.
- ✓ **W₁** : Charges dues au vent normal (vitesse de vent de base).
- ✓ **W₂** : Charges dues au vent de la bissectrice (vitesse de vent de base).

Les tableaux ci-dessous représentent les combinaisons utilisées dans notre cas :

III-13. Cas	III-14. Etat Limite Ultime (ELU)
III-15. Combinaisons	III-16. 1.35G+1.5W1
	III-17. 1.35G+1.5W2
	III-18. 1.35 (G+Q+W1)
	III-19. 1.35 (G+Q+W2)

Cas	Etat limite de services (ELS)
Combinaisons	G+0.87Q+0.67W1
	G+0.87Q+0.67W1
	G+Q

Tableau V- 8 : Combinaisons ELU selon EC3.

Tableau V-9 : Combinaisons ELS selon EC3.

Désignations des combinaisons :

- | | | | |
|----------------------------------|------------|-------------------|---------------------|
| 1 : G (la charge permanent) | 5 : Vent1 | 9 : Ey | 13 : 1.35 (G+Q+W2) |
| 2 : PP (poids propre) | 6 : Vent2 | 10 : 1.35G+1.5W1 | 14 : G+0.87Q+0.67W1 |
| 3 : Câble | 7 : Modale | 11 : 1.35G+1.5W2 | 15 : G+0.87Q+0.67W2 |
| 4 : Q (la charge d'exploitation) | 8 : Ex | 12 : (1.35G+Q+W1) | 16 : G+Q |

Conventions de signe :

Il s'agit des efforts dont l'orientation est conforme à l'orientation des axes du système local.

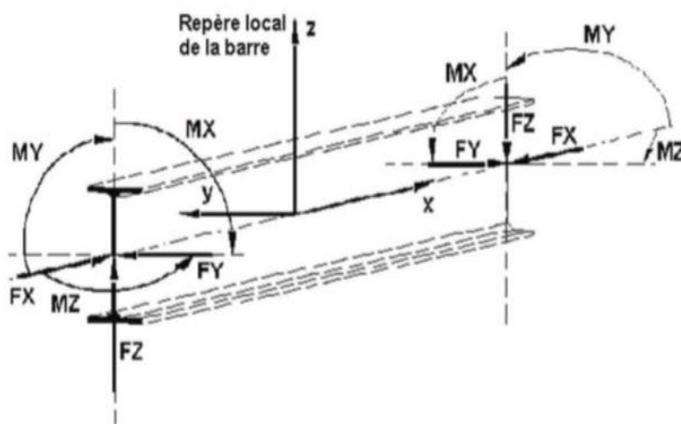


Fig.V-16 : Convention des signes dans repère locale.

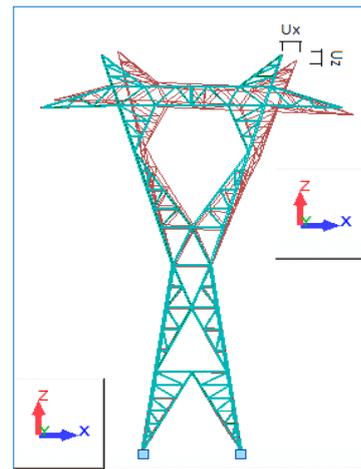


Fig.V-17 : Convention des signes dans repère globale.

Remarque :

Les résultats obtenus par logiciel

Les efforts et contrainte sur le repère local.

Les déplacements des nœuds (en nœuds) sur le repère global.

V-8-2. Vérification des contraintes :

Les contraintes maximales régissant notre structure sont relatives à la combinaison la plus critique de l'état limite ultime qui est : 1.35G + 1.5 W1 les résultats de ces contraintes sont regroupés dans les tableaux suivant :

➤ *Pour pylône A :*

	S max [MPa]	S min [MPa]	S max(My) [MPa]	S max(Mz) [MPa]	S min(My) [MPa]	S min(Mz) [MPa]	Fx/Ax [MPa]
MAX	38,42	28,83	20,21	17,54	0,0	4,07	29,35
Barre	54	54	1407	1403	1	344	1698
Noeud	3	24	45	180	46	188	197
Cas (combinaison)	11 (C)	11 (C)	10 (C)	10 (C)	1	10 (C)	10 (C)
MIN	-27,44	-38,65	0,0	-3,28	-18,24	-18,51	-28,53
Barre	1701	1701	1	1582	2	317	1701
Noeud	25	1	46	228	58	175	25
Cas	10 (C)	10 (C)	1	10 (C)	10 (C)	10 (C)	10 (C)

Tableau V-10 : Contrainte maximale de la structure (pylône A).

On remarque que la contrainte maximale 29.35MPa est au niveau de la barre 1698, celle-ci représente un montant dont le matériau est E24 qui a une limite d'élasticité égale à 235 MPa.

Ainsi, pour la barre 1701 qui a une contrainte de 28.53 MPa est un montant en E24.

Puisque 29.35 MPa < 235 MPa et 28.53MPa < 235 MPa, alors le critère de résistance est bien vérifié. La figure ci-dessous représente la localisation des barres 1698 et 1701.

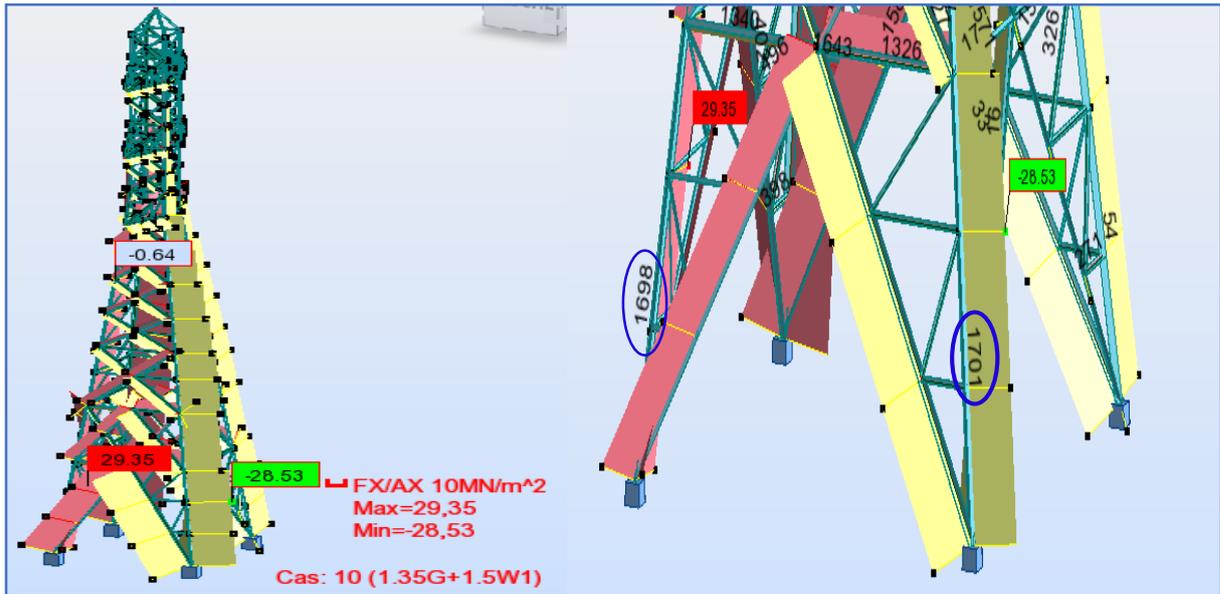


Fig. V-18 : Position des barres 1698 et 1701.

➤ Pour pylône B :

	S max [MPa]	S min [MPa]	S max(My) [MPa]	S max(Mz) [MPa]	S min(My) [MPa]	S min(Mz) [MPa]	Fx/Ax [MPa]
MAX	127,78	85,19	63,17	58,62	0,0	21,96	93,14
Barre	176	178	664	1	1	568	178
Noeud	226	227	228	1	1	17	227
Cas	10	10	10	10	1	10	10
MIN	-82,97	-123,22	0,0	-24,99	-63,17	-60,23	-91,95
Barre	11	1	1	568	664	176	11
Noeud	2	1	1	229	228	226	2
Cas	10	10	1	10	10	10	10

Tableau V-11 : Contrainte maximale de la structure (pylône B).

On remarque d’après le tableau que la contrainte maximale 93.14 MPa est au niveau de la barre 178 et pour la barre 11 qui a une contrainte de 91.95 MPa est inférieure à 235 MPa, alors le critère de résistance est bien vérifié.

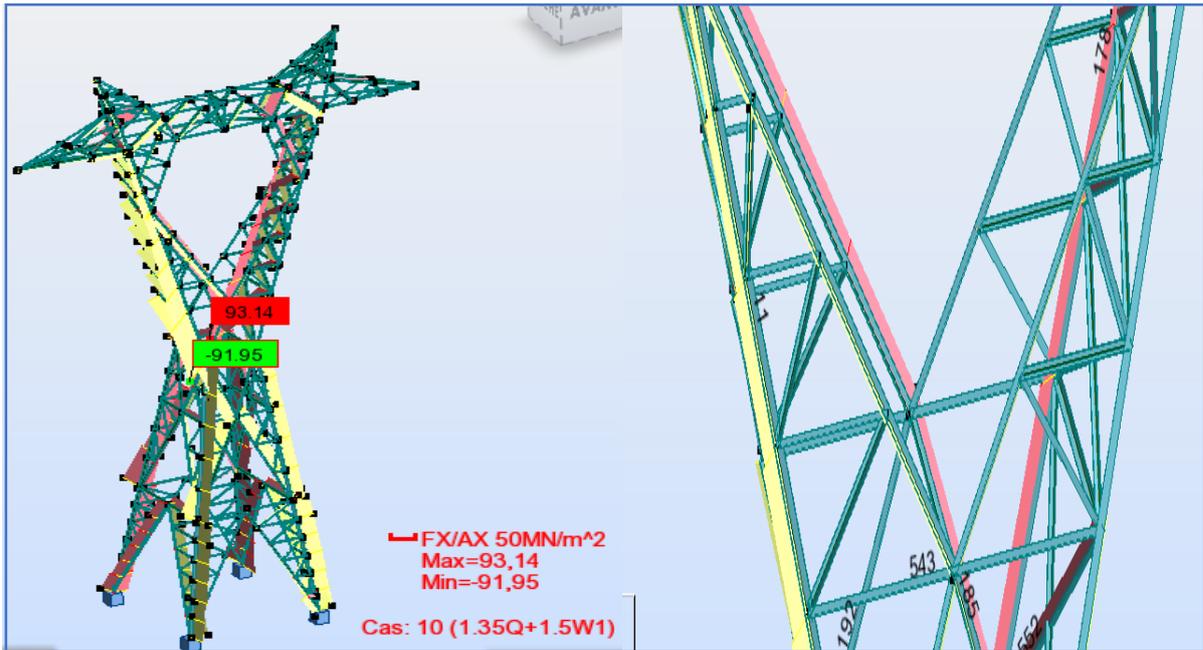


Fig. V-19 : Position des barres 178 et 11.

➤ Calcul manuel de la contrainte :

$$\sigma = \frac{N}{A_{brut}} < f_y = 235 \text{ MPa} , \text{ avec } \begin{cases} N : \text{Effort normal (traction ou compression).} \\ A : \text{La section des barres des pylônes } \textit{tableau 7 annexe-A-} \end{cases}$$

	N _{max} [daN]	N _{min} [daN]	A _{brut} [cm ²]	σ _{max} [Mpa]	σ _{min} [Mpa]	σ _{max} < 235	σ _{min} < 235
<i>Pylône A</i>	6804.73	-6612.55	23.18	29.356	-28.526	C.V	C.V
<i>Pylône B</i>	21591.73	-21316.14	23.18	93.148	-91.959	C.V	C.V

Tableaux V- 12 : Vérification des contraintes avec A_{brut}.

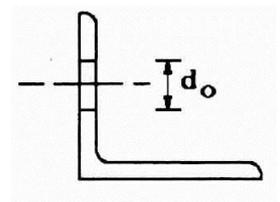
On remarque que les résultantes des contraintes qui calculé plus proche que les qui donné avec logicielle.

C.V : Condition vérifiée.

➤ Vérification de la contrainte avec A_{net} :

$$\sigma = \frac{N}{A_{net}} < f_u = 360 \text{ MPa} ; A_{net} = A_{brut} - (t \times d_{tv})$$

- ✓ A_{net} : L'aire nette est égale à l'aire brute diminuée des aires des trous.
- ✓ A_{brut} : L'aire brute est obtenue en prenant les dimensions nominales de la section sans déductions.
- ✓ t : L'épaisseur des barre (t=10mm pour les deux pylônes).



✓ d_{tv} : Diamètre du trou (pour pylône A : M20 → $d_{tv} = 22\text{mm}$, pylône B : M22 → $d_{tv} = 24\text{mm}$).

	N_{\max} [daN]	N_{\min} [daN]	d_{tv} [mm]	A_{net} [cm ²]	σ_{\max} [Mpa]	σ_{\min} [Mpa]	$\sigma_{\max} < 360$	$\sigma_{\min} < 360$
<i>Pylône A</i>	6804.73	-6612.55	22	20.98	32.434	-31.518	C.V	C.V
<i>Pylône B</i>	21591.73	-21316.14	24	20.78	103.906	-102.580	C.V	C.V

Tableaux V- 13 : Vérification des contraintes avec A_{net}

V-8-3. Le déplacement du pylône type A et B :

nœuds	combinaison	U_x [cm]	U_y [cm]	U_z [cm]
60	10	0.0	2.5	0.0
	11	2.5	0.0	0.0

Tableau V – 14 : Déplacement maximal de la structure (pylône A).

On remarque que le déplacement maximal est au sommet (Nœud 60), comme on l'indique dans la figure suivante :

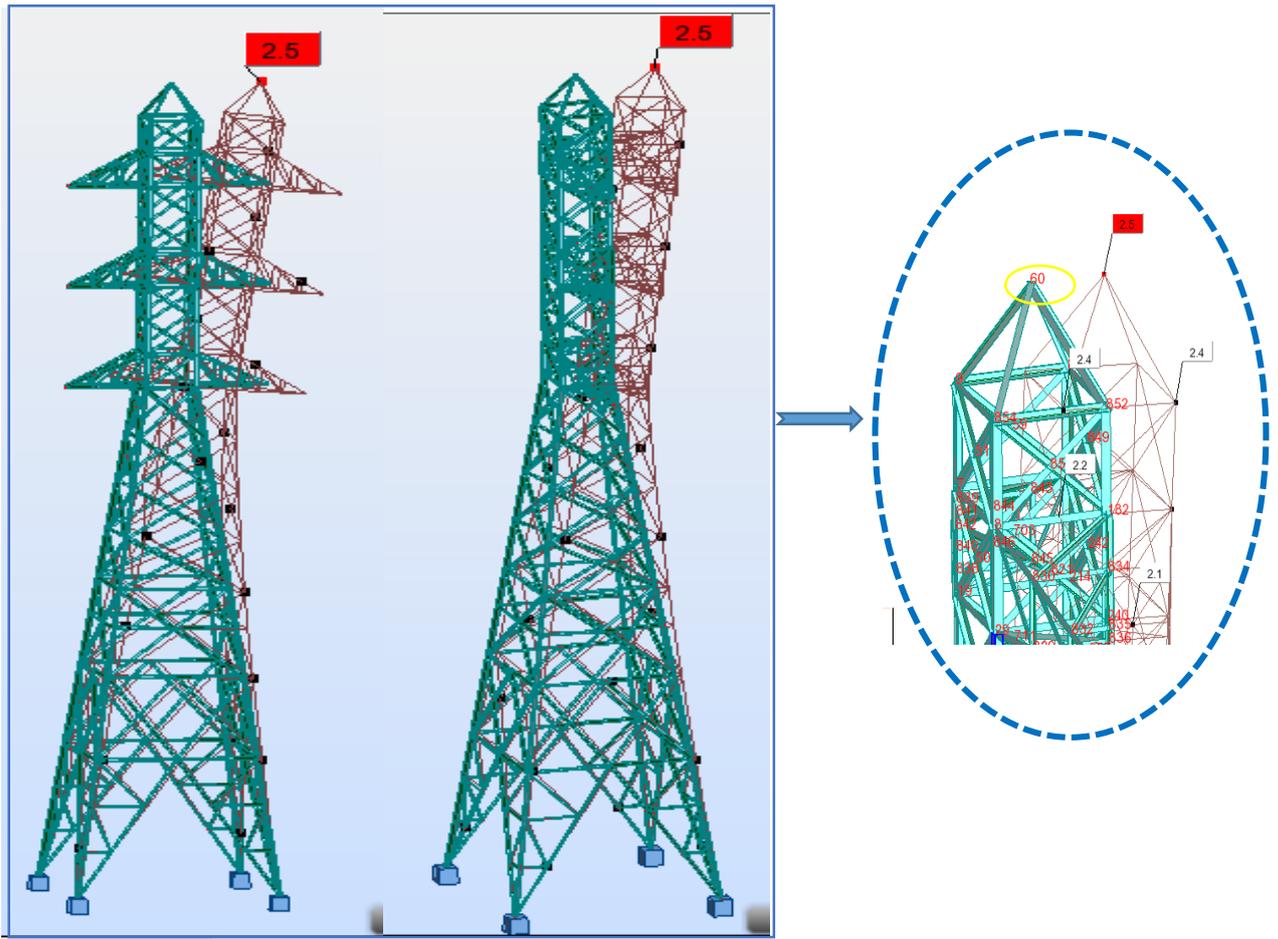


Fig. V-20 : Déplacement du pylône type A et la position du nœud 60.

Nœuds	Combinaison	Ux [cm]	Uy [cm]	Uz [cm]
212	10	1.8	7.2	-0.6
	11	4.2	0.0	-1.2

Tableau V-15 : Déplacement maximal de la structure (pylône B).

On remarque que le déplacement maximal est au sommet (Nœud 212), comme on l'indique dans la figure suivante :

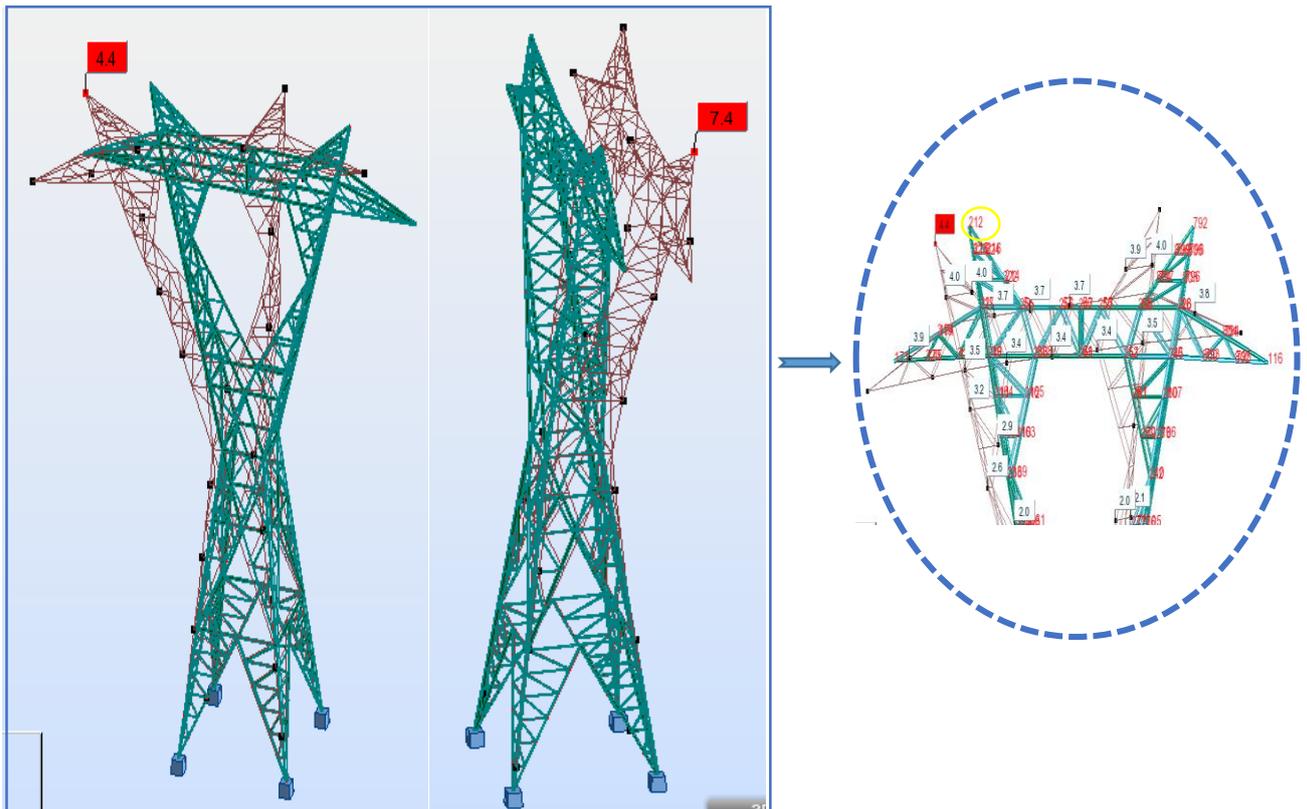
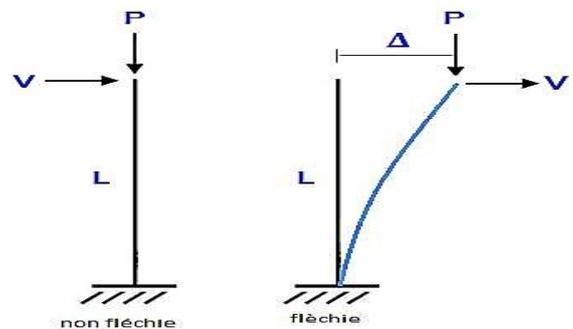


Fig. V-21 : Déplacement du pylône type B et la position du nœud 212.

V-8-4. Vérification de l'effet P-delta :

L'effet P-delta est un moment de déstabilisation égale à la force de gravité, multipliée par le déplacement horizontal d'une structure subit lorsqu'il est chargé latéralement.

Fig. V-22 : schéma présent l'effet p-Δ.>



❖ Justification vis-à-vis de de l'effet P-Delta :

Les effets du 2° ordre (ou effet P- Δ) peuvent être négligés dans le cas des bâtiments si la condition suivante est satisfaite à tous les niveaux :

L'article 5.9 du RPA99/version 2003. p.40 [25].

$$\theta = P_K \Delta_K / V_K h_K \leq 0.10$$

- ✓ P_K : Poids total de la structure et des charges d'exploitation associées au-dessus du niveau "k",

$$P_K = \sum_{i=k}^n (W_{Gi} + \beta W_{qi})$$

- ✓ V_K : Effort tranchant d'étage au niveau "k".
- ✓ Δ_K : Déplacement relatif du niveau "k" par rapport au niveau "k-1".
- ✓ h_K : Hauteur de l'étage "k".

Si $0.10 < \theta_K \leq 0.20$, les effets P- Δ peuvent être pris en compte de manière approximative en amplifiant les effets de l'action sismique calculé au moyen d'une analyse élastique du 1^o ordre par le facteur $1/(1 - \theta_K)$.

Si $\theta_K > 0.20$, la structure est potentiellement instable et doit être redimensionnée.

➤ **Sens longitudinal :**

	P_K [Kg]	Δ_K [m]	V_x [daN]	h_K [m]	θ	$\theta \leq 0.10$
<i>Pylône A</i>	7087.29	0.025	889.18	29.2	0.007	C.V
<i>Pylône B</i>	10308.57	0.044	1452.05	30	0.01	C.V

Tableau V-16 : Valeur l'effet P- Δ (Sens longitudinal).

➤ **Sens transversal :**

	P_K [Kg]	Δ_K [m]	V_y [daN]	h_K [m]	θ	$\theta \leq 0.10$
<i>Pylône A</i>	7087.29	0.025	1256.17	29.2	0.005	C.V
<i>Pylône B</i>	10308.57	0.074	1382.12	30	0.02	C.V

Tableau V-17 : Valeur l'effet P- Δ (Sens transversal).

Remarque :

Puisque le coefficient θ est inférieur à 0,10 donc l'effet P- Δ peut être négligé pour les deux sens.

V-9. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons vu la géométrie et la distribution de l'action du vent sur les deux pylônes qui ont été étudié, la vérification des contraintes et l'effet p- Δ est largement vérifiée. Cette vérification montre que les deux pylônes sont stables.

Chapitre VI

Etude dynamique

VI-1. Introduction :

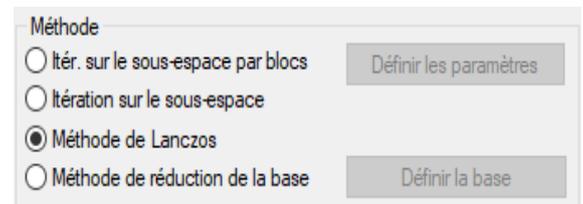
L'objectif initial de l'étude dynamique d'une structure est la détermination des caractéristiques dynamiques propres de la structure lors de ses vibrations. Une telle étude pour notre structure telle qu'elle se présente, est souvent très complexe c'est pourquoi on fait souvent appel à des modélisations qui permettent de simplifier suffisamment les problèmes pour permettre l'analyse.

Le but de ce chapitre est de définir un modèle de structure qui vérifie toutes les conditions et critères de sécurité imposés par les règlements parasismiques Algériens **RPA99/Version 2003**.

VI-2. Analyse modale :

L'analyse modale permet de calculer les valeurs propres et leurs valeurs connexes (pulsations propres, fréquences propres ou périodes propres), précision, vecteurs propres, coefficients de participation et masses participantes pour l'étude aux vibrations propres de la structure.

Dans le logiciel il existe quatre méthodes pour l'analyse modale qui correspondent à *La figure suivante*.



La méthode de **Lanczos** modifiée est conseillée pour l'analyse sismique et spectrale de grandes structures lorsque plusieurs modes sont requis.

Lanczos est une méthode de Lanczos modifiée permettant d'éviter la factorisation de matrices de taille importante. La méthode de gradient conjugué avec l'utilisation de préconditionnement est utilisée pour la composition de l'ensemble de vecteurs de Lanczos au lieu d'effectuer la résolution inversée (back resolution) de la matrice de rigidité factorisée.

VI-2-1. La période modale T :

Cette période T est déterminée en effectuant une analyse modale du pylône sous **ROBOT**, qui utilise la méthode de **LANCZOS**. Cette analyse modale est l'opération qui consiste à rechercher les caractéristiques des modes propres de la structure.

➤ *Pylône A :*

Mode	Fréquence [Hz]	Période [sec]	Masses Cumulées UX [%]	Masses Cumulées UY [%]
1	3,70	0,27	0,00	49,36
2	3,81	0,26	49,91	49,36
3	6,10	0,16	49,91	49,36
4	8,35	0,12	51,01	56,33
5	8,35	0,12	57,94	57,44
6	11,21	0,09	57,94	57,44
7	11,68	0,09	57,94	57,44
8	12,45	0,08	57,94	57,88
9	12,94	0,08	57,94	58,10
10	13,20	0,08	58,01	74,00
11	13,22	0,08	73,38	74,07
12	14,57	0,07	73,41	83,74
13	14,64	0,07	84,00	83,76
14	15,99	0,06	84,00	83,76
15	16,68	0,06	84,03	84,03
16	16,69	0,06	84,37	84,06
17	18,00	0,06	84,37	84,06
18	18,06	0,06	84,37	84,06
19	19,43	0,05	84,37	84,06
20	20,26	0,05	84,37	85,08
21	20,30	0,05	85,20	85,08
22	21,37	0,05	85,21	85,08
23	22,16	0,05	85,21	85,16
24	22,19	0,05	85,26	85,17
25	23,20	0,04	85,26	85,18
26	24,28	0,04	85,26	85,18
27	24,80	0,04	85,26	85,24
28	25,32	0,04	85,26	85,25
29	26,31	0,04	85,26	94,11
30	26,80	0,04	94,54	94,11

Tableau VI -1 : Les modes fondamentaux de la structure (pylône A).

➤ *Pylône B :*

Mode	Fréquence [Hz]	Période [sec]	Masses Cumulées UX [%]	Masses Cumulées UY [%]
1	2,66	0,38	0,00	0,00
2	3,26	0,31	44,36	0,00
3	3,38	0,30	44,36	42,90
4	4,97	0,20	44,37	42,90
5	7,25	0,14	50,56	43,28
6	7,25	0,14	50,93	49,63
7	8,64	0,12	50,95	49,64
8	9,28	0,11	50,95	49,65
9	10,19	0,10	50,95	74,85
10	10,73	0,09	74,52	74,85
11	11,46	0,09	74,65	76,09
12	11,78	0,08	74,65	76,09
13	11,99	0,08	74,82	76,21
14	12,53	0,08	75,22	76,70
15	12,72	0,08	75,23	78,35
16	13,28	0,08	83,57	78,44
17	13,56	0,07	88,59	78,45
18	13,64	0,07	88,72	78,48
19	14,50	0,07	88,79	78,74
20	14,87	0,07	89,14	86,85
21	15,52	0,06	89,39	90,27
22	16,02	0,06	89,39	90,44
23	17,38	0,06	89,39	90,50
24	17,59	0,06	89,84	90,52
25	18,91	0,05	89,84	90,52
26	19,22	0,05	89,88	91,77
27	19,45	0,05	91,08	91,85

Tableau VI -2 : Les modes fondamentaux de la structure (pylône B).

On constate qu'il faut 30 modes de vibration du pylône type A et 27 modes pour le type B pour atteindre 90% de participation des masses modales exigées par le *R.P.A. 99 /VERSION 2003 ART 4.3.4.a.*

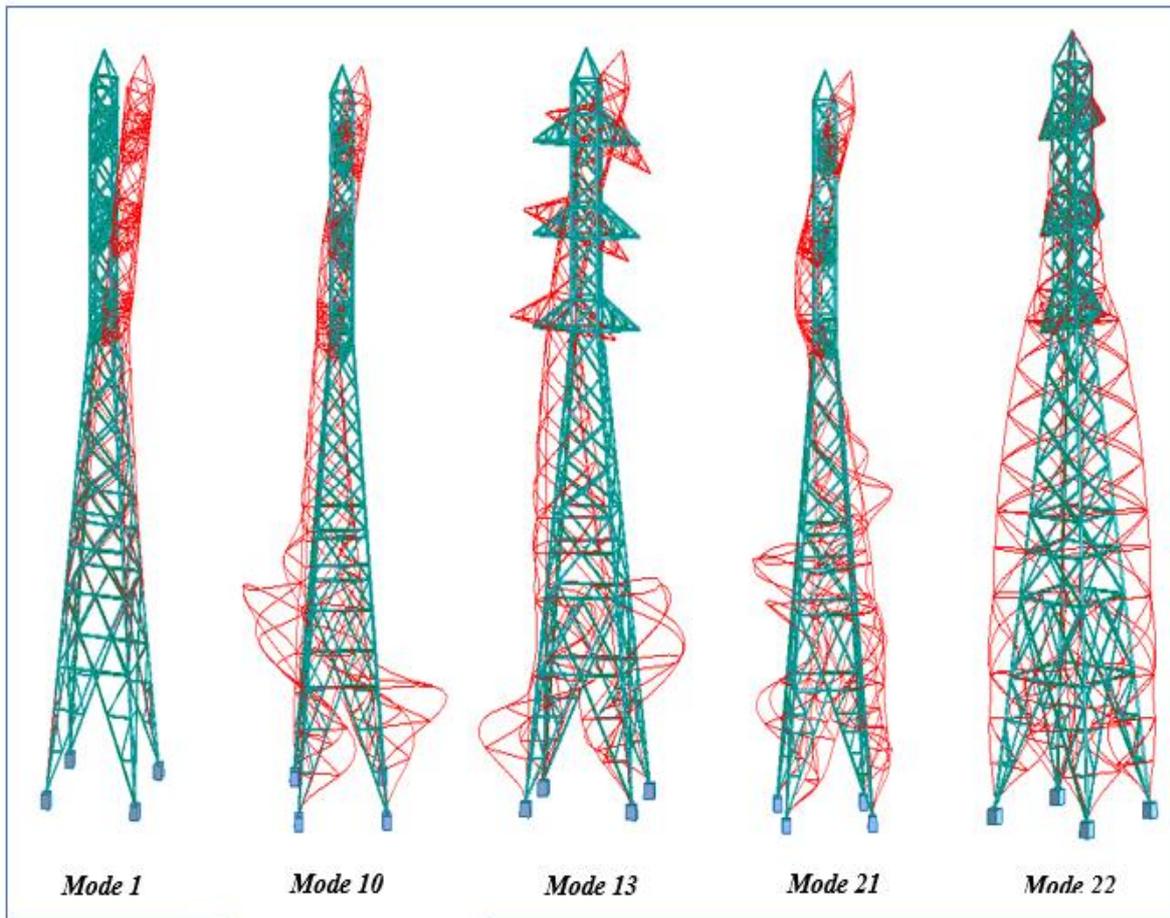
Les résultats obtenue de la période fondamentale de *pylône A* est **0.27s** et *pylône B* est **0.38s**.

VI-2-2. Période fondamentale :

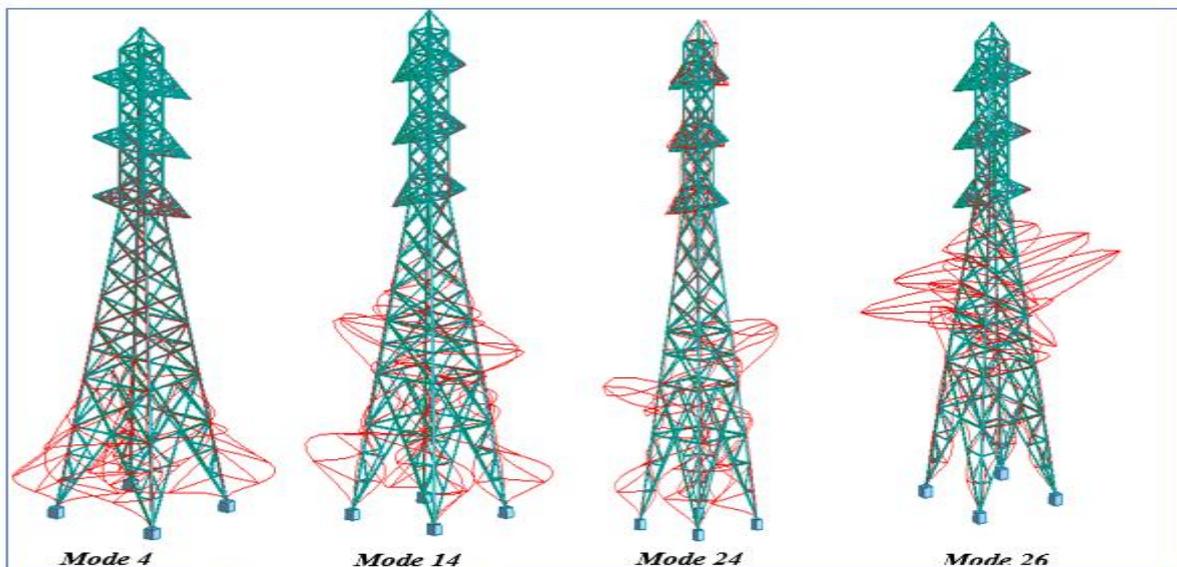
RPA99/Versions 2003 préconise (*Art 4.2.4.4*), qu'il faut que la valeur de T_{dyn} calculé par la méthode numérique (*ROBOT*), ne dépasse pas la valeur T_e estimée par les méthodes empiriques appropriées de plus de 30 %.

VI-2-3. Les modes de vibrations :

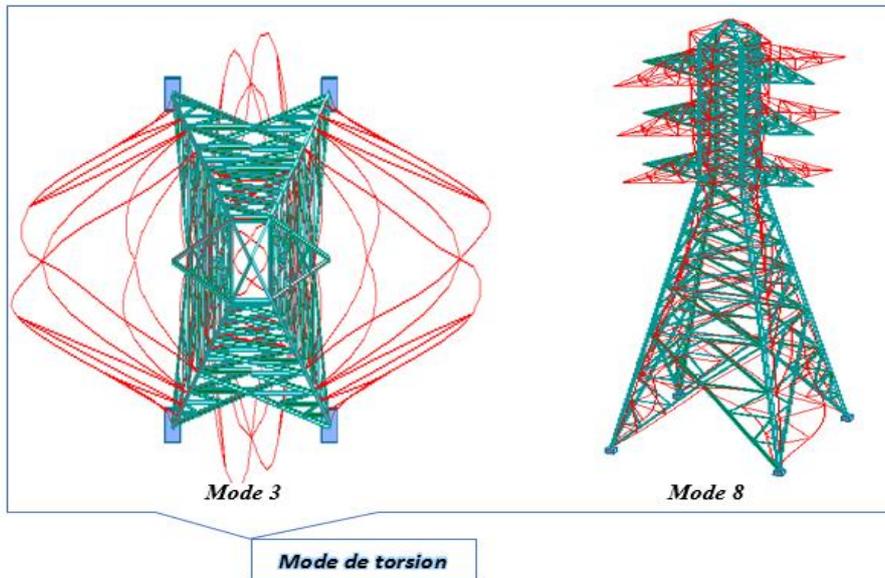
➤ Pylône A



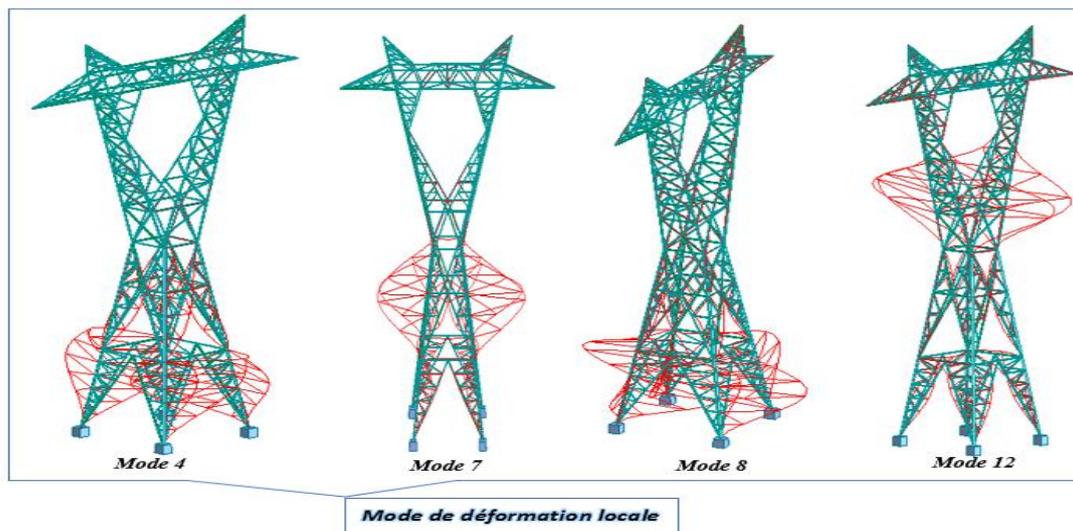
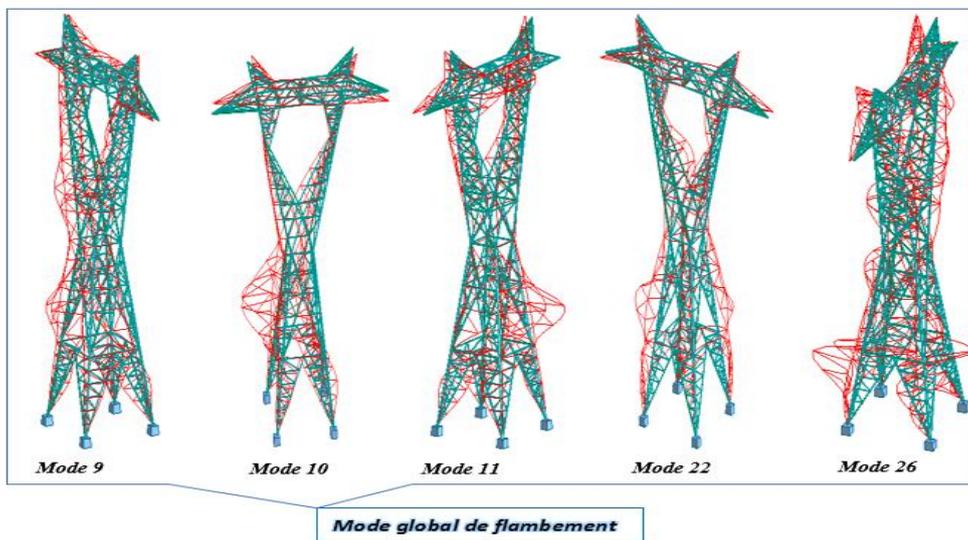
Mode globale de flambement

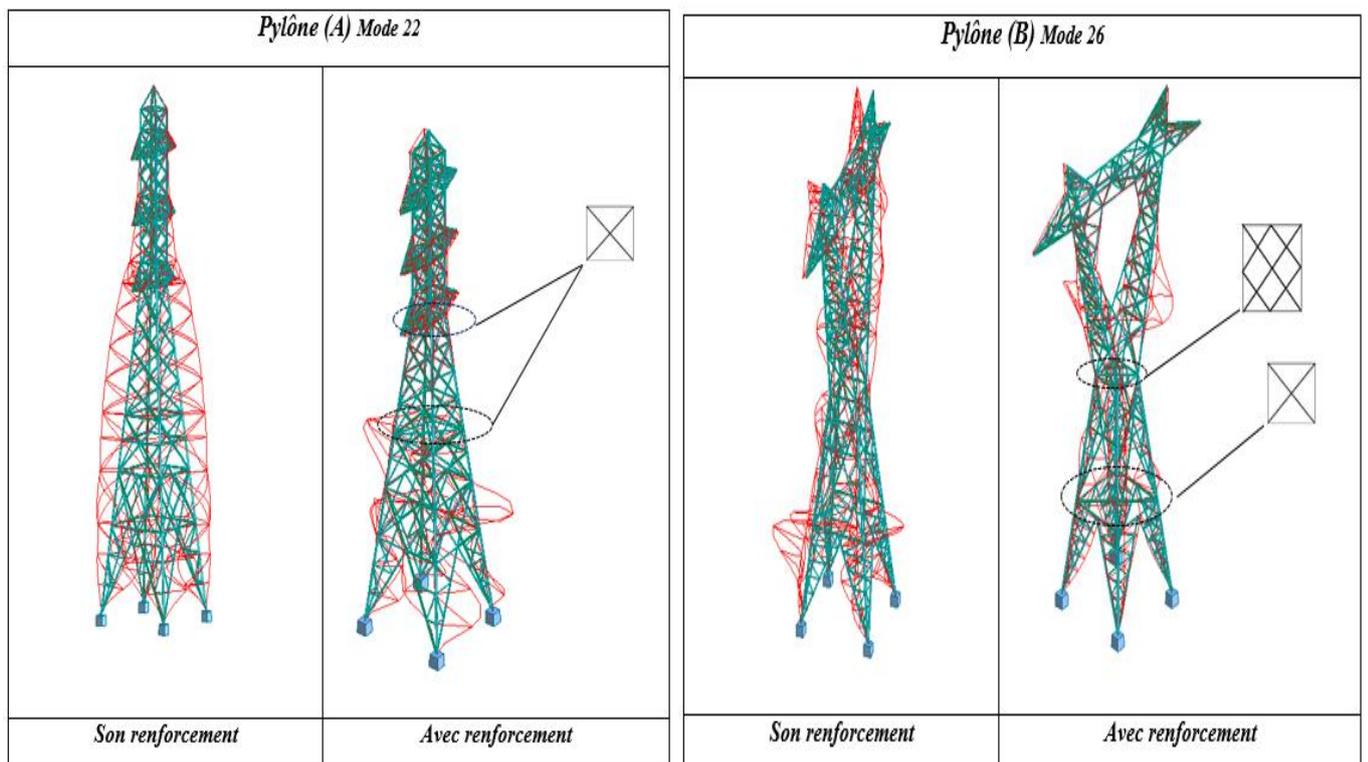
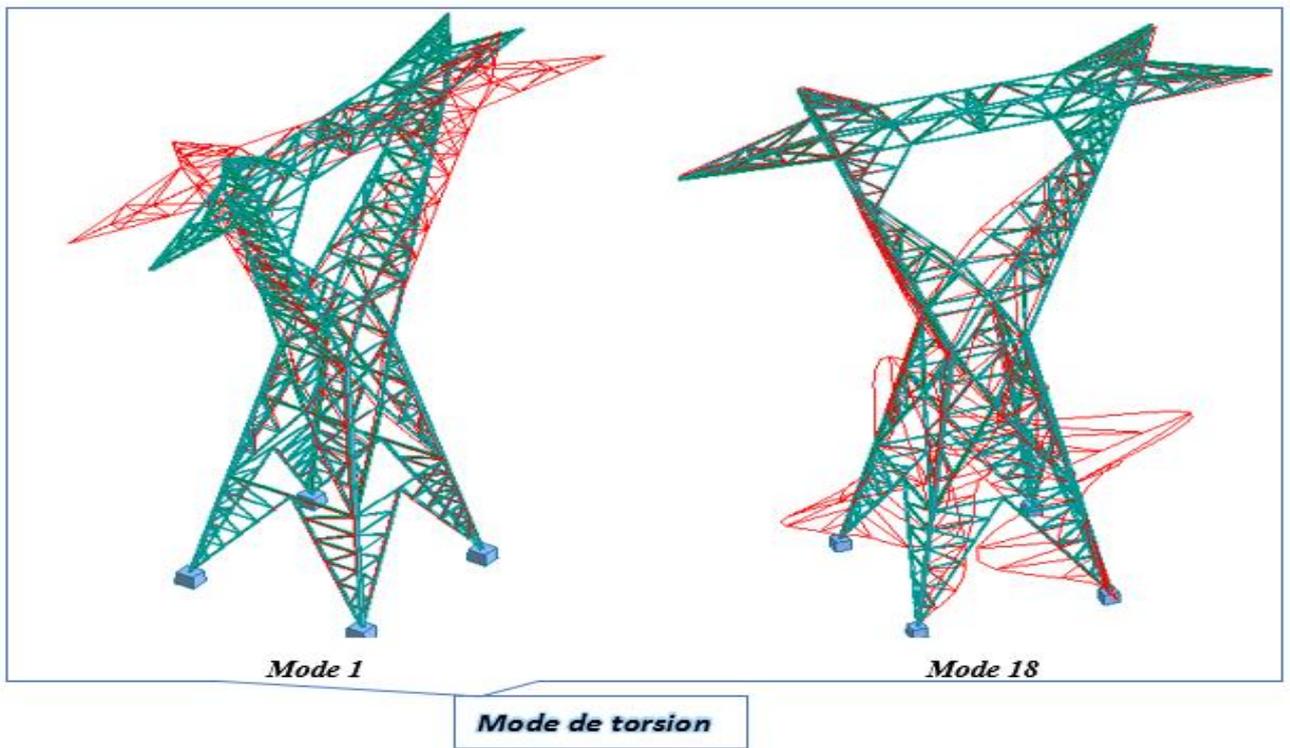


Mode de déformation locale



➤ *Pylône B*





Nous observe qu'après le renforcement la déformation est diminuée.

VI-3. Etude sismique :

Un séisme est une libération brutale de l'énergie potentielle accumulée dans les roches par le jeu des mouvements relatifs des différentes parties de l'écorce terrestre. Lorsque les contraintes dépassent un certain seuil, une rupture d'équilibre se produit et donne naissance aux ondes sismiques qui se propagent dans toutes les directions et atteignent la surface du sol.

Ces mouvements du sol excitent les ouvrages par déplacement de leurs appuis et sont plus ou moins amplifiés dans la structure. Le niveau d'amplification dépend essentiellement de la période de la structure et de la nature du sol. Ceci implique de faire une étude parasismique pour essayer de mettre en exergue le comportement de structure sous l'effet des actions dynamique dues au séisme et doit être justifié *selon les règles parasismiques algériennes*.

VI-3-1. Choix de la méthode de calcul : (art.4.1 de R.P.A 99/version 2003)

Le calcul des forces sismique peut être mené suivant trois méthodes :

- ✓ Par la méthode statique équivalente.
- ✓ Par la méthode d'analyse modale spectrale.
- ✓ Par la méthode d'analyse dynamique par accélérogrammes.

La hauteur de notre structure (*zone IIa, groupe d'usage 1B*) est supérieur à 17 mètres, donc la méthode statique équivalente est inapplicable (*R.P.A.99. Art 4.1.2*).

La méthode d'analyse dynamique par accélérogrammes nécessite l'intervention d'un personnel qualifié, donc la méthode qui convient pour notre cas est la méthode d'analyse modale spectrale.

VI-3-2. Présentation de la méthode modale spectrale :

La méthode modale spectrale est sans doute la méthode la plus utilisée pour l'analyse sismique des structures. Dans cette méthode, on recherche pour chaque mode de vibration le maximum des effets engendrés dans la structure par les forces sismiques représentées par un spectre de réponse de calcul. Ces effets vont être combinés par la suite suivant la combinaison la plus appropriée pour obtenir la réponse totale de la structure.

Une fois l'effort dynamique est calculé, le *R.P.A.* prévoit de faire la vérification suivante :

$$V_{\text{dyn}} \geq 0.8 V_{\text{st}}$$

Dans le cas où la condition n'est pas vérifiée, toutes les réponses obtenues à partir de la méthode Dynamique doivent être majorés de $(0.8 V_{\text{st}} / V_{\text{dyn}})$.

Avec V_{dyn} : L'effort tranchant dynamique (calculé par la méthode modal spectral)

$$V_{st} = \frac{A \times D \times Q \times W}{R} \longrightarrow V_{st} : \text{L'effort tranchant statique à la base du bâtiment.}$$

- Tel que :
- A** : Coefficient d'accélération de zone.
 - D** : Facteur d'amplification dynamique moyen.
 - W** : Poids total de la structure.
 - R** : Coefficient de comportement de la structure.
 - Q** : Facteur de qualité.

Les paramètres cités au-dessus dépendent des caractéristiques de notre structure :

Groupe d'usage (1B)
Zone sismique (IIa) \longrightarrow **A=0.20** (Tableau 4.1, R.P.A)

- ✓ Dans le cas de notre projet, on adopte un système de contreventement ossature contreventée par palées en V, donc : **R = 3**. (Tableau 4.3, RPA).
- ✓ **Q = 1 + \sum_1^6 p_q** R.P.A.99/2003 (Formule 4.4)
- ✓ **p_q**: est la pénalité à retenir selon que le critère de qualité (q) est observé ou non.

On considérés que tous les critères de qualité sont satisfait ce que nous donne Q=1 (Tableau 4.4, RPA).

- ✓ **W = \sum_{i=1}^n W_i** avec $W_i = W_{Gi} + \beta W_{Qi}$ RPA99 (Formule 4.5)
- ✓ **W_{Gi}**: Poids dû aux charges permanentes et à celles des équipements fixes éventuels, solidaires à la structure.
- ✓ **W_{Qi}**: Charges d'exploitation.
- ✓ **\beta** : Coefficient de pondération, il est fonction de la nature et de la durée de la charge d'exploitation.

Le poids de la structure est :

- W=7087.29 Kg** (pylône A)
- W=10308.57 Kg** (pylône B)

$$D = \begin{cases} 2.5\eta & 0 \leq T \leq T_2 \\ 2.5\eta(T_2/T)^{\frac{2}{3}} & T_2 \leq T \leq 3.0s \\ 2.5\eta(T_2/3.0)^{\frac{2}{3}} (3.0/T)^{\frac{5}{3}} & T \geq 3.0s \end{cases}$$

- ✓ **\eta**: Facteur de correction d'amortissement donné par la formule : $\eta = \sqrt{7/(2 + \xi)} \geq 0.7$

- ✓ ξ : Le pourcentage d'amortissement critique fonction du matériau constitutif, du type de structure et de l'importance des assemblages.

Pour notre structure (charpente métallique) : $\xi = 2\%$ —————> D'où, $\eta = 1.323$

On a un site ferme meuble S2 $\left\{ \begin{array}{l} T_1 = 0.15 \\ T_2 = 0.40 \end{array} \right.$ R.P.A.99/2003 (Tableau 4.7)

➤ **Calcul de la période fondamentale de la structure :**

h_N : Hauteur total du pylône. $\left\{ \begin{array}{l} h = 29.2 \text{ m pylône (A).} \\ h = 30 \text{ m pylône (B).} \end{array} \right.$

$C_T = 0.085$: Coefficient qui dépend du système de contreventement utilisé.
(Tableau 4.6 du RPA99/2003)

$T = C_T h_N^{3/4}$ $\left\{ \begin{array}{l} T = 1.068 \text{ s pylône (A).} \\ T = 1.090 \text{ s pylône (B).} \end{array} \right.$

Ce qui donne : $D = 2.5\eta(T_2/T)^{2/3}$ $\left\{ \begin{array}{l} D = 1.719 \text{ pylône (A).} \\ D = 1.695 \text{ pylône (B).} \end{array} \right.$

➤ **La force sismique totale à la base de la structure est :**

$$V_{st} = \frac{A \times D \times Q \times W}{R} \quad \text{R.P.A.99 (Art4.2.3)}$$

$$V_{st} = \frac{0.15 \times 1.719 \times 1 \times 7087.29}{3} = 609.153 \text{ kg} \longrightarrow \text{Pylône A.}$$

$$V_{st} = \frac{0.15 \times 1.695 \times 1 \times 10308.57}{3} = 873.651 \text{ kg} \longrightarrow \text{Pylône B.}$$

➤ **Spectre de réponse de calcul :**

Pour la méthode dynamique modale spectrale, les forces sismiques sont représentées par spectre de réponse de calcul suivant :

$$(S_a / g) = \begin{cases} 1,25A [1+ (T/T_1) (2,5\eta (Q/R)-1)] & 0 \leq T \leq T_1 \\ 2,5\eta (1,25A) (Q/R) & T_1 \leq T \leq T_2 \\ 2,5\eta (1,25A) (Q/R) (T_2/T)^{2/3} & T_2 \leq T \leq 3,0 \text{ s} \\ 2,5\eta (1,25A) (T_2/3)^{2/3} (3/T)^{3/5} (Q/R) & T \geq 3,0 \text{ s} \end{cases}$$

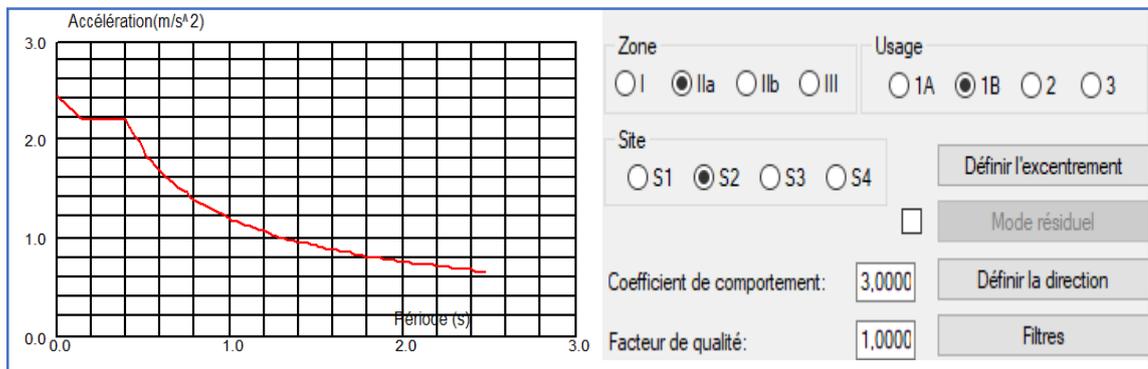


Fig. VI -1 : Spectre de réponse pour pylône (A).

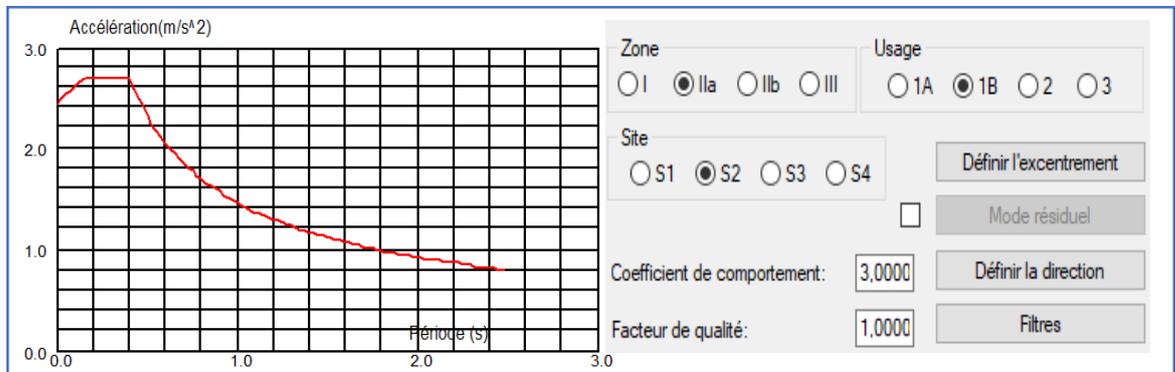


Fig. VI -2 : Spectre de réponse pour pylône (B).

VI-4. Vérification des résultats vis-à-vis du R.P.A. 99/Version2003 :

VI-4-1. Vérification du résultant de la période fondamentale de la structure :

	T_e [s]	$1.3T_e$ [s]	T_{dyn} [s]	$T_{dyn} \leq 1.3 T_e$
<i>Pylône A</i>	1.068	1.388	0.27	Vérifié
<i>Pylône B</i>	1.090	1.417	0.38	Vérifié

Tableau VI -3 : Vérification du résultant de La période fondamentale.

VI-4-2. Vérification de la résultante des forces sismiques :

	V_{st} [Kg]	$0.8 V_{st}$ [Kg]	V_{dyn} [kg]	$V_{dyn} \geq 0.8V_{st}$
<i>Pylône A</i>	609.153	487.322	1256.77	Vérifié
<i>Pylône B</i>	873.652	698.923	1452.05	Vérifié

Tableau VI -4 : Vérification de la résultante des forces.

VI-5. Conclusion :

Chaque séisme est caractérisé par un spectre de réponse en accélération et chaque structure est caractérisée par une période propre T et un facteur d'amortissement ξ .

La réponse de la structure sous séisme dépend de ses modes propres de vibration. Ces modes propres de vibrations ne dépendent pas au séisme et peuvent être visualisées lorsque la structure est en oscillations libres, donc il s'agit d'une structure légère où l'effet de séisme est négligeable.

Vis-à-vis des mouvements du sol, les structures se comportent comme des oscillateurs dont les modes propres d'oscillation dépendent notamment de la rigidité (la période) des éléments de la structure.

Chapitre VII

**Etude d'Assemblages
et fondations**

VII-1. Etude d'assemblages :

Un assemblage est un dispositif qui permet de réunir et de solidariser plusieurs pièces entre elles, en assurant la transmission et la répartition des diverses sollicitations entre les pièces, sans générer des sollicitations parasites, notamment de torsion.

VII-1-1. Vérification d'assemblages :

Nous avons vérifié les assemblages de ces barres selon la norme EC3, on utilise les formule qui cité dans *chapitre II tableaux II-8* (vérification du Boulon ordinaire au cisaillement, à la traction et à la pression diamétrales). Les calculs des assemblages avec le logiciel nous donnons à *l'ANNEXE B*.

On vérifié l'assemblage des quatre nœuds de chaque pylône.

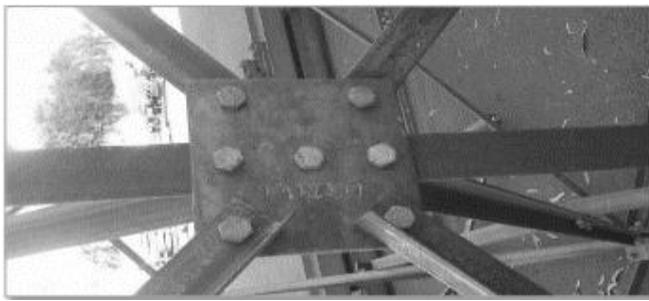


Fig.VII-1 : - Jonction : Cornière + Goussets + Boulons.

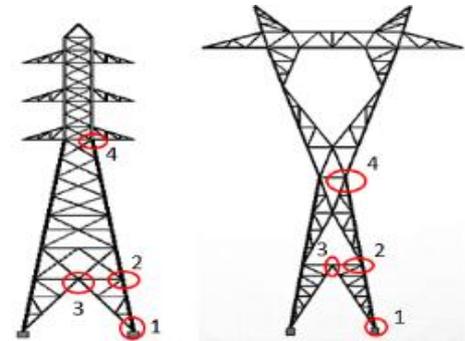


Fig. VII-2 : la position des nœuds d'assemblages.

Pylône A : M20 $\left\{ \begin{array}{l} d= 20\text{mm} \\ d_0= 22\text{mm} \\ A_s=245\text{mm}^2 \end{array} \right.$

pylône B : M22 $\left\{ \begin{array}{l} d =22\text{mm} \\ d_0=24\text{mm} \\ A_s=303\text{mm}^2 \end{array} \right.$

a. Vérification au cisaillement :

	$F_{V.sd} [daN]$				n_b :nombre des boulon				$F_{V.sd}/n_b [daN]$			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Pylône A	6548.79	6612.55	2798.49	1763.67	6	3	1	3	1091.465	2204.183	2798.49	587.89
pylône B	26064.72	29604.06	2567.72	21316.14	6	5	1	3	4344.12	5920.812	2567.72	7105.38

	$F_{V,Rd} = \frac{0.5f_{ub}A_s}{\gamma_{Mb1}}$ [daN]	$F_{V,sd}/n_b \leq F_{V,Rd}$			
		1	2	3	4
Pylône A	5880.00	C.V	C.V	C.V	C.V
pylône B	7272.00	C.V	C.V	C.V	C.V

Tableau VII-1 : Vérification au cisaillement.

b. Vérification à la traction :

	$F_{t,sd}/n_b$ [daN]				$F_{t,Rd}$ [daN] $= \frac{0.9f_{ub}A_s}{\gamma_{Mb2}}$	$F_{t,sd}/n_b \leq F_{t,Rd}$			
	1	2	3	4		1	2	3	4
Pylône A	1091.465	2204.183	2798.49	587.89	8820.00	C.V	C.V	C.V	C.V
pylône B	4344.12	5920.812	2567.72	7105.38	10908.00	C.V	C.V	C.V	C.V

Tableau VII-2 : Vérification à la traction.

c. Vérification aux pressions diamétrales :

	$F_{b,sd}/n_b$ [daN]				$F_{b,Rd} = \frac{2.5\alpha f_u dt}{\gamma_{Mb1}}$				$F_{b,sd}/n_b \leq F_{b,Rd}$			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Pylône A	1091.465	2204.183	2798.49	587.89	10560	10560	6336	10560	C.V	C.V	C.V	C.V
pylône B	4344.12	5920.812	2567.72	7105.38	20736	20736	6912	11520	C.V	C.V	C.V	C.V

Tableau VII-3 : Vérification aux pressions diamétrales.

VII-1-2. Conclusion :

Le dimensionnement des boulons ordinaires ne présente pas un problème dans notre structure.

Il s'agit en fait des vérifications à faire. Cependant, le rôle des boulons n'est pas négligeable et mérite d'être traité sous ses aspects réglementaires et constructifs.

On effectue de même toutes les vérifications nécessaires, on déduit que les assemblages sont valables pour les pylônes.

VII-2. Etude des fondations :

En plus du choix du pylône, il existe plusieurs choix de fondations qui diffèrent d'un pylône à l'autre et selon le lieu et la nature du sol.

Les fondations pour les pylônes ont un double rôle : d'une part de transmettre les charges concentrées au sol, et d'autre part de résister aux moments créés par les pylônes, c'est-à-dire à la force ascendante créée.

VII-2-1. Définition de l'interaction sol structure :

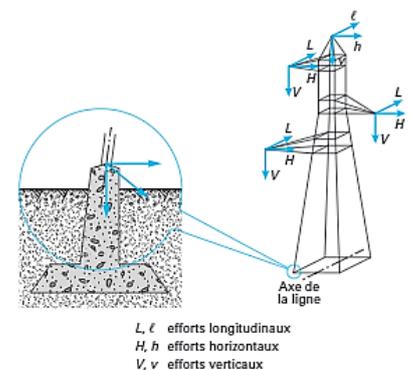
Le sol n'est pas parfaitement rigide. Sous l'effet d'un chargement dynamique, le sol et la superstructure vibrent simultanément et interagissent l'un avec l'autre. La vibration de la superstructure entraîne des forces sur la fondation qui sont transmises au sol modifiant sa réponse. Le phénomène de la modification de la réponse du sol (de la structure) par la présence de la structure (le sol) s'appelle interaction sol-structure et il couvre deux phénomènes physiques [26] :

- L'action et la réaction entre le sol et la structure causant la déformation du sol et des mouvements de la structure. Il s'agit de l'interaction inertielle.
- La compatibilité des déplacements entre la fondation, le sol et la structure. Il s'agit de l'interaction cinématique.

VII-2-2. Stabilité des fondations :

Les massifs de fondations doivent être en équilibre sous l'action :

- Des sollicitations dues à la superstructure qui sont : des forces verticales ascendantes ou descendantes, des forces obliques, des forces horizontales et des moments de flexion ou de torsion
- Des sollicitations dues au sol qui sont : des forces verticales ascendantes ou descendantes et des forces obliques (adhérence, remblais...).



Les massifs de fondations doivent être stables ; c'est-à-dire qu'ils ne doivent donner lieu à des tassements que si ceux-ci permettent la tenue de l'ouvrage ; des tassements uniformes sont admissibles dans certaines limites ; mais des tassements différentiels sont rarement compatibles avec la tenue de l'ouvrage. Il est donc nécessaire d'adapter le type et la structure des fondations à la nature du sol qui va supporter l'ouvrage : l'étude géologique et géotechnique a pour but de

préciser le type, le nombre et la dimension des fondations nécessaires pour fonder un ouvrage donné sur un sol donné.

VII-2-3. Les vérifications d'instabilité :

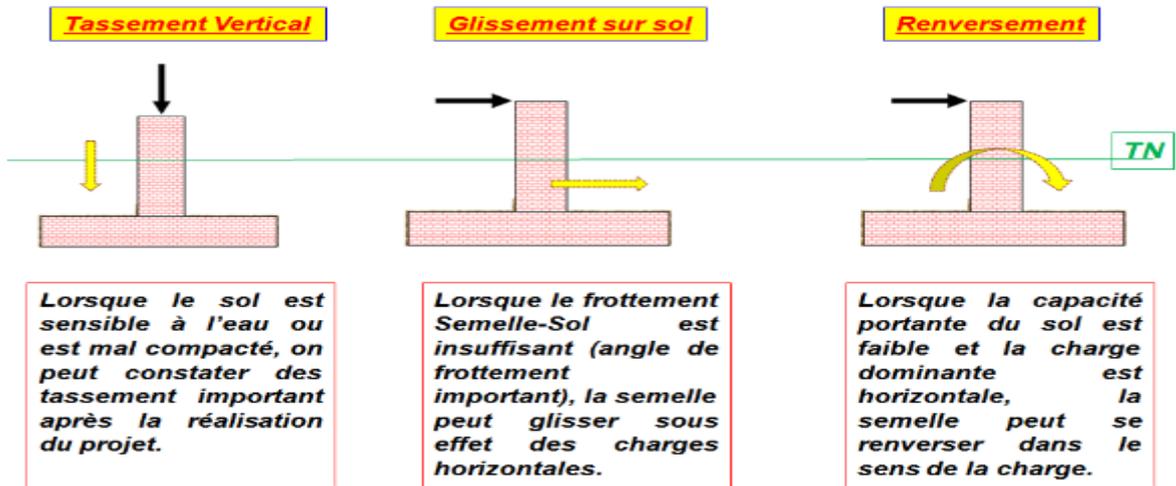
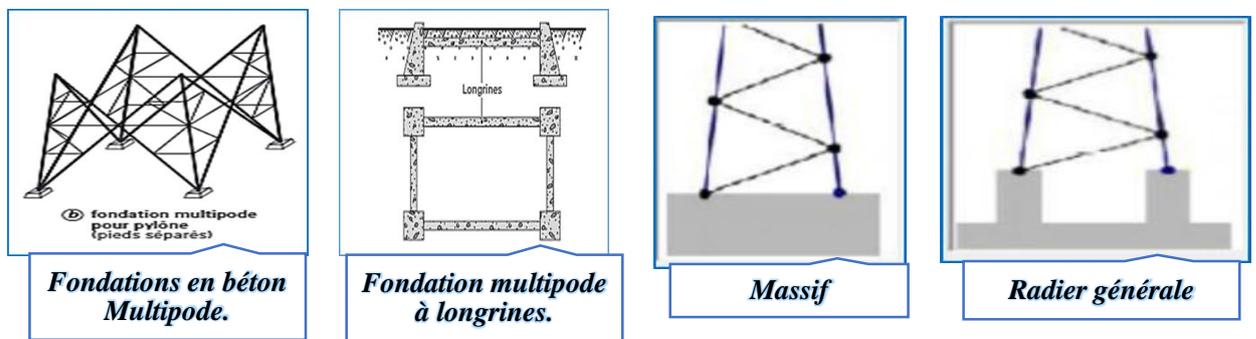


Fig.VII-3 : L'instabilité des fondations.

VII-2-4. Différents types de fondations sous pylônes :



VII-2-5. La forme du bloc de fondation :

La fondation d'un pylône peut être de forme carrée, rectangulaire ou circulaire. Cette forme est généralement la plus utilisée car elle s'adapte à la forme du pylône et présente une symétrie dans tous les sens. Il faut toujours vérifier la capacité portante du sol sous l'effet de la pression développée par le pylône au droit de la

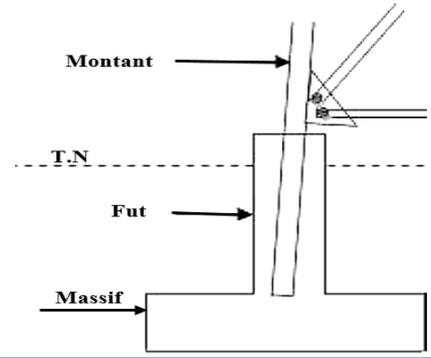


Fig.VII-4 : Fondation d'un pylône à pied séparé.

fondation, La pression sur le sol est la réaction due au vent sur le pylône et le poids total cumulé sur la fondation.

Dans notre cas on a choisi 4 points d'appuis sur un massif en béton armé de section carrée pour assurer l'ancrage et la stabilité du pylône.

VII-2-6. Choix du type de fondation :

Le choix du type de fondation dépend du :

- ✓ Type d'ouvrage construire.
- ✓ La nature et l'homogénéité du bon sol.
- ✓ La capacité portance de terrain de fondation.
- ✓ La charge totale transmise au sol.
- ✓ La raison économique.
- ✓ La facilité de réalisation.

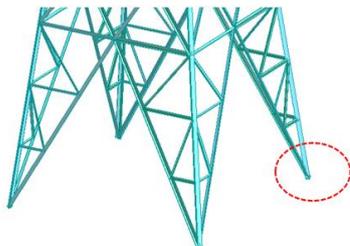
VII-2-7. Combinaison d'action :

- pour le dimensionnement ELS.
- pour le ferrailage ELU.

VII-2-8. Les caractéristiques des matériaux :

<i>Données concernant les matériaux</i>	
<i>Béton f_{c28} Mpa</i>	25
<i>Acier f_eMpa</i>	400
<i>γ_s (coefficient de sécurité des aciers)</i>	1.15
<i>f_{t28}Mpa</i>	2.1
<i>$\bar{\sigma}_{sol}$.....bar</i>	3

VII-2-9. Pré dimensionnement de fondation pour pylône A :



	Fx [daN]	Fy [daN]	Fz [daN]
ELS	87.75	-0.26	-0.84
ELU	6731.94	-18.79	1.36

VII-2-10. Les conditions de vérifications :

a-vérification à la résistance :

$$\sigma = \frac{F_X}{s} \leq \bar{\sigma}_{sol} \longrightarrow s \geq \frac{F_X}{\bar{\sigma}_{sol}} \quad \left\{ \begin{array}{l} S=A \times B \text{ et } A=B \end{array} \right.$$

F_X [daN]	$\bar{\sigma}_{sol}$ [Bar]	$A \geq$ [cm]
87.75	3	29.25

On remarque que la section est pratiquement négligeable ce qui nous oblige à revoir la section en hausse.

Soit $A > 60 \text{ cm}$ pour vérifier la condition prévue par *M.BLAZOUGUI son guide calcul des ouvrages en béton arme [27]*, donc on prend $A = 80\text{cm}$.

Pour avoir à éviter la vérification au cisaillement, on a intérêt à choisir h assez grand, par exemple en prenant comme avec la méthode des bielles [27].

$$h \geq \frac{A-a}{4}$$

On prend $a = 30\text{cm} \longrightarrow h \geq 12.5 \text{ cm}$.

Donc on prend : $h = 40\text{cm}$ et $h_t = h + 5\text{cm} \longrightarrow h_t = 45\text{cm}$.

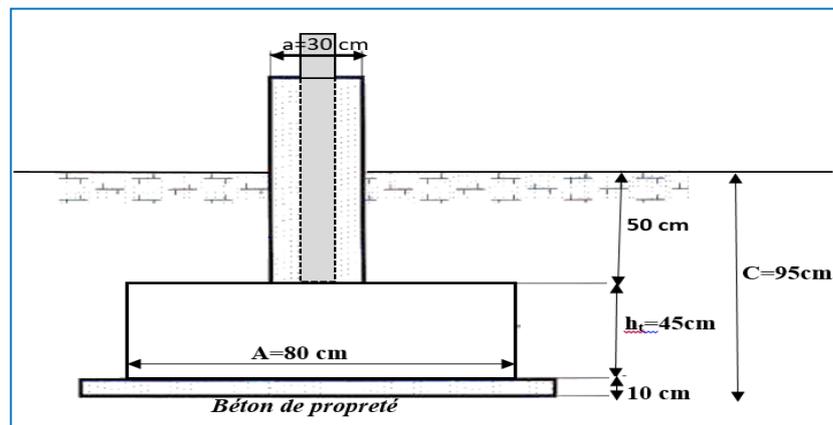


Fig.VII-5 : Dimensionnement de la fondation.

b-vérification au renversement :

$$\frac{M_{st}}{M_{renv}} \geq 1.3 \quad \text{Avec} \quad \left[\begin{array}{l} M_{st} = N \left(\frac{L}{2} \right) \\ M_{renv} = F_H \times c \end{array} \right.$$

- ✓ M_{st} : Moment stabilisant.
- ✓ M_{renv} : Moment renversant.
- ✓ F_H : Effort horizontale appliqué au le fut.

- ✓ **N** : Le poids du pylône.
- ✓ **L** : La distance entre deux pieds de pylône (L=6 m).

N [Kg]	F_H [daN]	L[cm]	C[cm]	M_{st} [Kg.cm]	M_{renv} [Kg.cm]
6731.94	9706.27	600	95	2019.582×10^3	922.095×10^3

$$\frac{M_{st}}{M_{renv}} = \frac{2019.582}{922.095} = 2.20 > 1.3 \dots \dots \dots \text{condition vérifiée.}$$

VII-2-11. Calcul de ferrailage :

D'après la méthode de *Bielle* :

$$A_S = \frac{N_U(A-a)}{8 \times h(f_e/\gamma_s)} \longrightarrow A_S = \frac{6731.94(80-30)}{8 \times 40(400/1.15) \times 10} = 0.01 \text{ cm}^2$$

Remarque : en application des résultats de calcul théorique, on a obtenu un ferrailage en T8 dans les deux sens, en pratique et pour des réseaux de sécurité on opte à utiliser le T12 au lieu de T8.

Donc 4 HA 12, soit $A_S = 4.52 \text{ cm}^2$

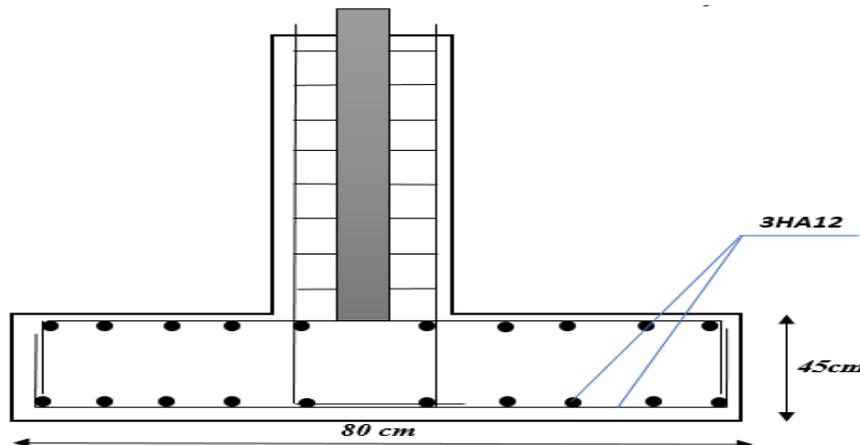


Fig.VII-6 : Schéma de ferrailage de fondation.

VII-3. Conclusion :

Dans une étude des fondations en a vu que la détermination des dimensions des structures des pylônes a pour objet la conservation d'un état d'équilibre stable. Donc les constructions obéissent aux lois générales de l'équilibre, La fondation doit, dans ce cadre, assurer l'équilibre entre la pression engendrée par la sollicitation et la résistance du sol.

Chapitre VIII

Technologies et exigences

VIII-1. Introduction :

On a beau dire que la beauté est une affaire toute subjective, la laideur, quant à elle, se constate aisément et envahit les paysages du quotidien avec une vigueur chaque jour confirmée. La société industrielle ne manque pas d'inventivité pour engendrer des formes et des matériaux médiocres capable de se répandre partout.

Le développement de supports esthétiques contribue à l'insertion des lignes de transport de l'électricité dans le paysage.



La prise en compte de l'impact environnemental dans la conception des supports n'est pas nouvelle. D'une manière générale, le support esthétique est un juste compromis entre les besoins techniques et industriels d'une part et les attentes du public pour une meilleure intégration dans le paysage d'autre part.

VIII-2. Définition et Ordonnancement des tâches à exécuter :

- **Travaux de Génie civil :**
Les fondations

L'emplacement des pylônes étant déjà définis, il ne reste plus qu'à implanter les fondations c'est une partie aussi longue qu'importante car elle nécessite de la précision. Ces travaux peuvent se faire suivant les phases suivantes :

- ✓ **Exécution des fouilles** : Il s'agit de faire des excavations dont les dimensions dépendent des massifs en béton armé afin qui vont supporter les pylônes chargés.



- ✓ **Réglage d'embase** : Pendant cette phase les topographes utilisent leurs relevés pour trouver la position exacte des pieds de chaque pylône. Une fois que c'est fait l'embase est positionnée et est rendue immobile à l'aide de jambes de forces puis le béton est coulé pour former le massif de la fondation. C'est aussi pendant cette phase que les câbles de mise à la terre sont insérés verticalement depuis le fond de la fondation jusqu'à



l'embase. Une fois que la prise du béton de la semelle a été faite on passe à la réalisation du coffrage pour la cheminée

- ✓ **Remblai** : Après l'obtention de notre fondation solide il faut reverser de la terre pour combler les fouilles qui ont été faite et cette étape marque la fin des travaux génie civil.

➤ **Travaux d'assemblage (serrage) :**



Les pièces de pylônes viennent en lots de barres de même dimension et des boulons de dimensions différentes pendant la phase de colisage il faut reconstituer tous les pylônes puis ils sont transportés jusqu'aux différents lieux d'implantation où ils sont assemblés. Une fois l'assemblage terminé il faut vérifier que tous les boulons ont été correctement serrés et



matés et qu'aucune pièce ne manque.

➤ **Révision générale :**

Durant cette phase il est question de contrôler tous les éléments de ligne il s'agit de :

- ✓ Au niveau du pylône vérifier que les boulons ont été bien serrés.
- ✓ Vérifier qu'aucune cornière ne manque et qu'elles sont toutes à l'endroit qui leur est réservé.
- ✓ Vérifier que les mises sur pince ont été bien faites et que les câbles respectent l'écartement minimum qui leur a été affecté.
- ✓ Vérifier les valeurs des mises à la Terre.
- ✓ Pose des plaques de numérotation et de danger.



VIII-3. Protection de pylône :

✦ protection contre la corrosion :



De par ses caractéristiques mécaniques, économiques et en raison de sa longévité, l'acier est un matériau couramment utilisé et industrialisé. Cependant, sans une protection efficace contre la corrosion, l'acier rouille. Les conséquences ne sont pas seulement esthétiques : elles sont aussi

financières à cause des coûts de maintenance élevés.

Il est donc indispensable de trouver une solution pérenne pour le protéger de la corrosion. La galvanisation à chaud est un des procédés les plus efficaces de nombreux procédés de traitement anticorrosion de l'acier par le zinc.

C'est la galvanisation. C'est l'unique méthode qui permette de traiter toute la surface de l'acier, autant intérieure qu'extérieure.

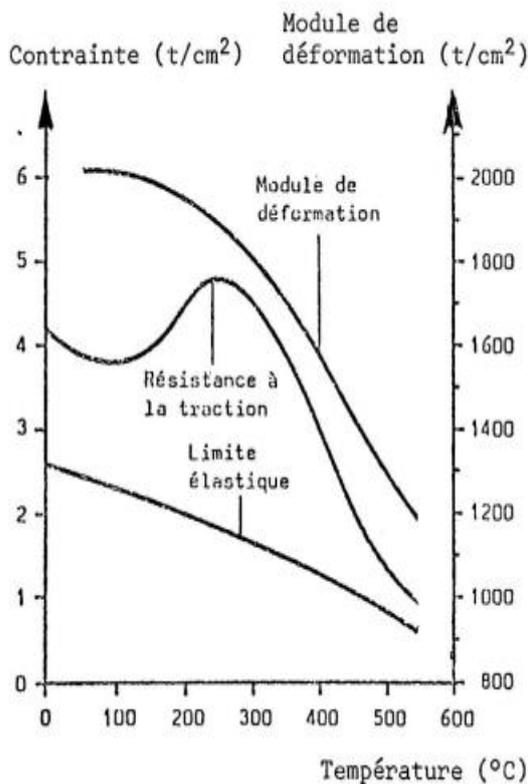
La galvanisation est l'action donc de recouvrir une pièce d'une couche de zinc dans le but de la protéger contre la corrosion. Le traitement est dit anticorrosif.

✦ protection au feu :

L'élévation de température due aux actions thermiques d'un incendie exerce une influence directe sur les principales caractéristiques mécaniques de l'acier, qui déterminent la tenue des éléments de construction : limite d'élasticité, résistance à la rupture et module de déformation E.

La Variation de ces caractéristiques en fonction de la température a été étudiée expérimentalement par divers chercheurs. On connaît ainsi avec assez de précision l'abaissement progressif de la limite d'élasticité et du module de déformation E, du à l'élévation de température.

Les diagrammes de traction obtenus expérimentalement sur des aciers courants de construction sous diverses températures montrent.



Caractéristique de l'acier AC 24/37 a différentes températures.

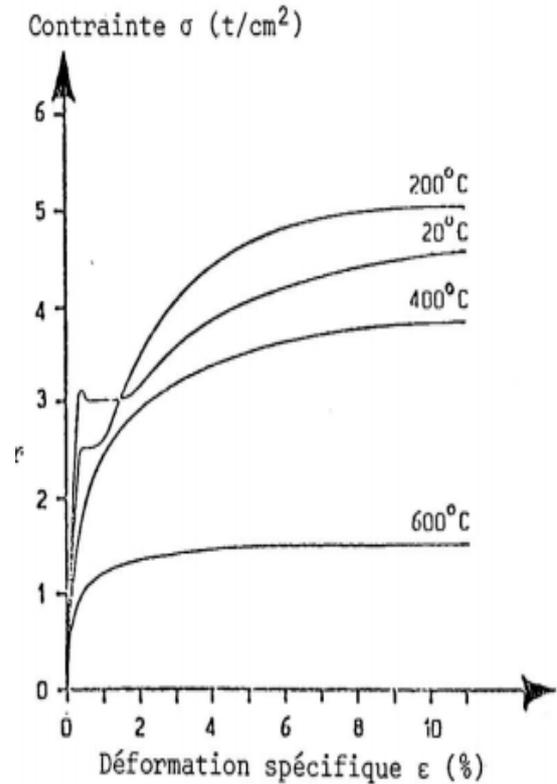


Diagramme contrainte –déformation de l'acier doux ASTM A.36 à différente températures.

✦ Protection de l'environnement :

Etudes d'impact l'environnement fait depuis une vingtaine d'années l'objet de préoccupations constantes. L'implantation de support de lignes et donc de pylônes n'échappe pas à cette règle.

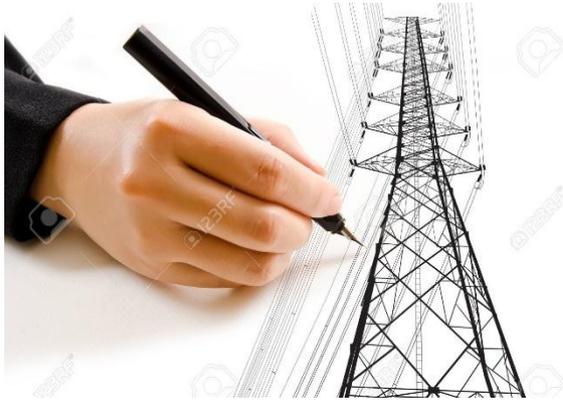
A ce titre, les études préalables à la réalisation d'aménagements ou d'ouvrages qui, par l'importance de leurs dimensions ou leurs incidences sur le milieu naturel, peuvent porter atteinte à ce dernier, doivent comporter une étude d'impact permettant d'en apprécier les conséquences.

Ainsi, l'implantation de pylônes dans le paysage est soumise à une étude d'impact couplée à l'étude de la ligne qu'il va supporter. Ces études doivent, entre autres, apporter une justification à l'ouvrage, analyser l'état environnemental existant et



étudier les modifications potentielles de l'ouvrage sur l'environnement. Elles doivent en outre justifier les solutions techniques validées et donner les mesures envisagées pour réduire l'impact sur l'environnement.

VIII-4. L'esthétique d'un pylône :



Muguet, chat, fougère, roseau, Trianon ou Beaubourg. .. autant de noms aux évocations champêtres ou culturelles pour nommer les pylônes que nos regards croisent sans plus les remarquer. Voir leurs différences, c'est s'amuser et s'ouvrir au fait qu'ils ont été conceptualisés ; leur observation mène petit à petit à une évolution de la pensée, où l'on se met à apprécier leurs

formes géométriques.

Le pylône, comme n'importe quel mobilier urbain, lampadaires, bouches de métro ou stations de bus, ne peut-il bénéficier des avancées design et technologiques.

Les dimensions environnementales et esthétiques sont aujourd'hui prises en compte lors de l'installation de nouvelles lignes électriques. Entre lignes aériennes et souterraines se dessine une troisième voie : celle des pylônes au design novateur.



VIII-5. Conclusion :

Les avantages de pylône sont plus dominants que les inconvénients. A cet effet le pylône devient l'élément le plus demandé et utilisé dans les opérations de transport d'électricité, la télécommunication et autres secteurs économique et industriels.

Vu l'importance de l'utilisation de pylône par rapport à la facilité de montage et démontage ainsi que le transport, l'industrialisation de ce dernier connaît un développement rapide et diversifie travers le monde dans de différents domaines.



Maquette et modélisme :





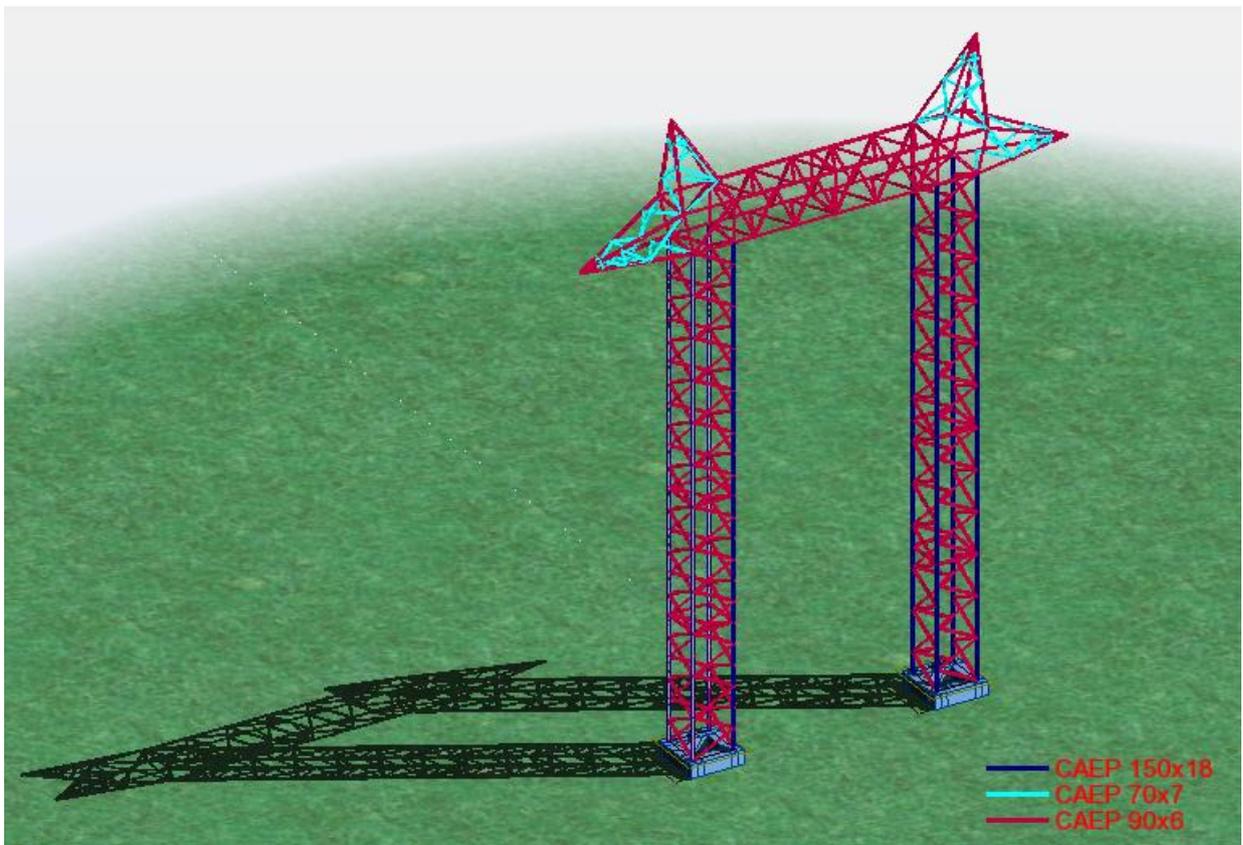
Modèle proposé

Modèle proposé

D'après l'étude optimisée qui déjà fait dans les chapitres précédents nous avons proposé un autre modèle de pylône autostable 'portique' pour faire une comparaison entre les 3 pylônes.

Modélisation des pylônes en 3D avec ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS :

Pour modéliser la structure en trois dimensions, nous allons utiliser le logiciel AUTODESK ROBOT 2014.



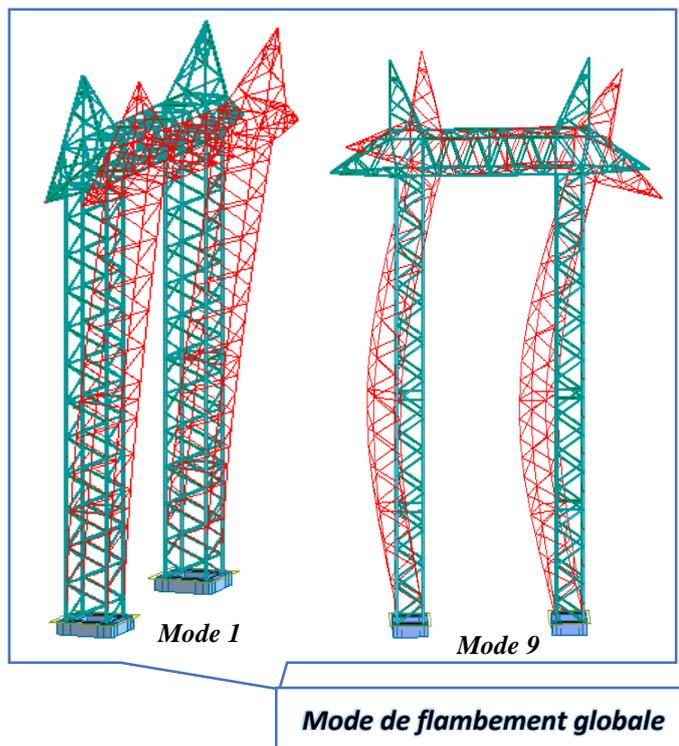
Vue en 3D du pylône et les différents profilés utilisés dans la structure.

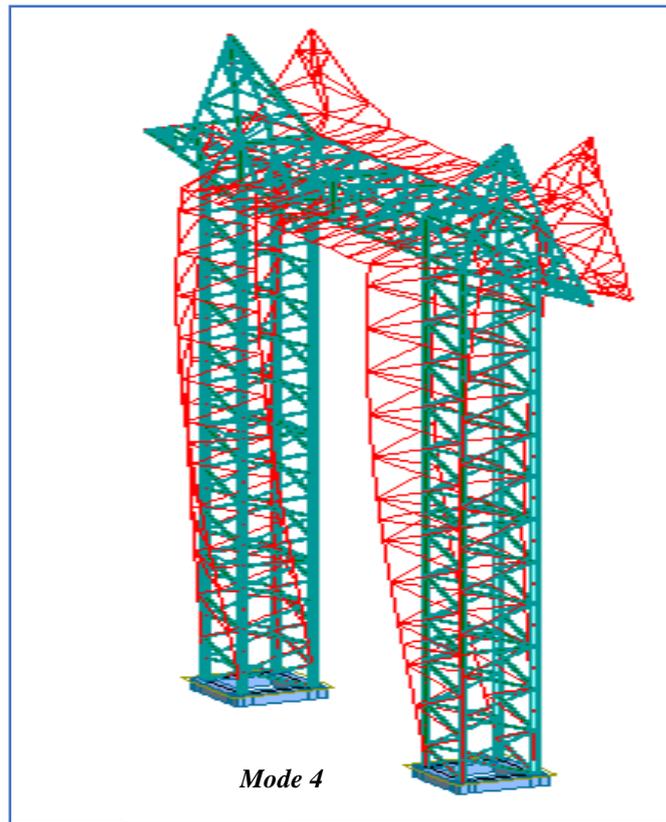
Mode	Fréquence [Hz]	Période [sec]	Masses Cumulées UX [%]	Masses Cumulées UY [%]
1	2,26	0,44	1,36	65,51
2	2,62	0,38	17,35	65,59
3	2,83	0,35	72,68	67,42
4	8,53	0,12	72,68	74,05
5	9,64	0,10	72,68	77,89
6	10,87	0,09	72,71	77,89
7	10,93	0,09	72,73	77,90
8	11,89	0,08	72,75	77,90
9	13,08	0,08	88,51	77,93
10	13,85	0,07	89,09	79,95
11	14,82	0,07	89,23	79,96
12	15,19	0,07	89,23	89,33
13	19,64	0,05	89,23	89,71
14	20,54	0,05	89,23	89,71
15	22,29	0,04	89,23	90,04
16	22,34	0,04	89,24	90,40
17	24,33	0,04	89,24	90,40
18	26,29	0,04	91,92	90,40

Les modes fondamentaux de la structure (pylône C).

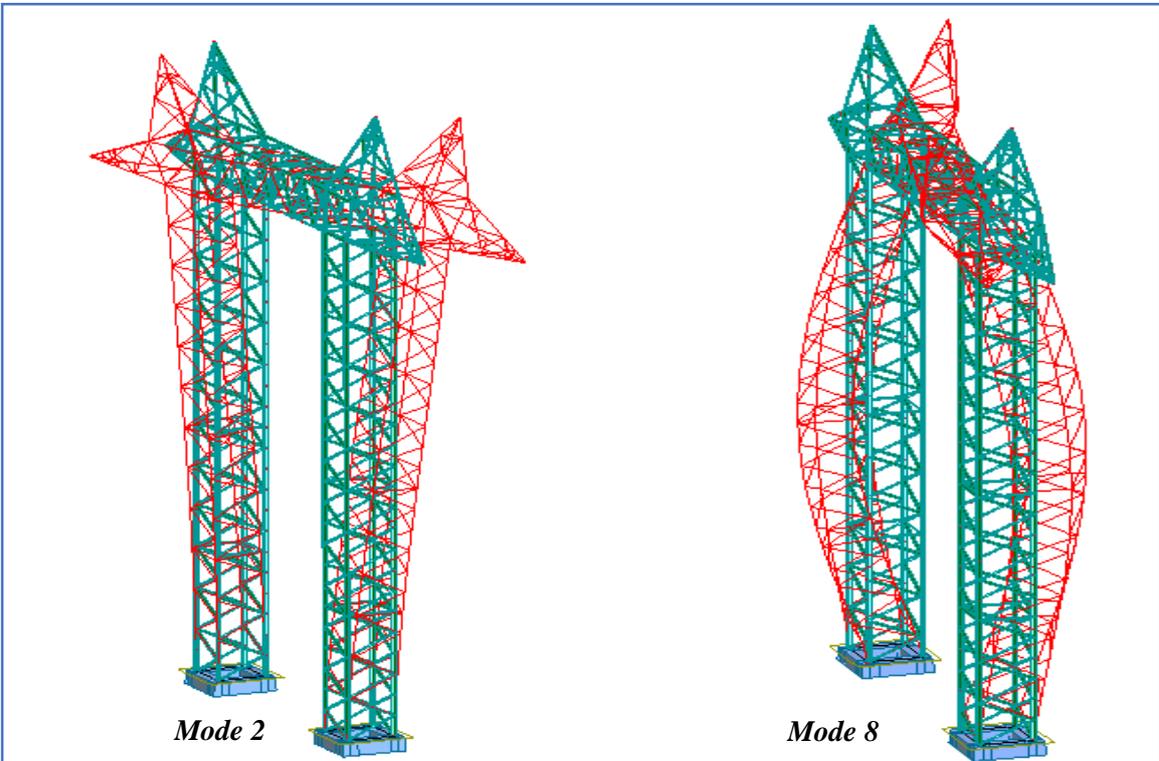
On constate qu'il faut 18 modes de vibration du pylône type C attendre 90% de participation des masses modales exigées par le RPA 99 VERSION 2003 ART 4.3.4.a. Les résultats obtenus de la période fondamentale est **0.44s**.

➤ **Les modes de vibrations :**





Mode de flambement local

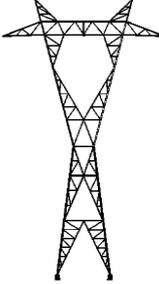


Mode de torsion

Etude comparative supplémentaire

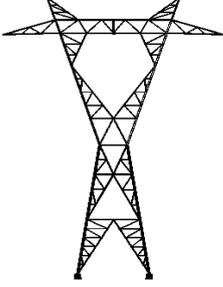
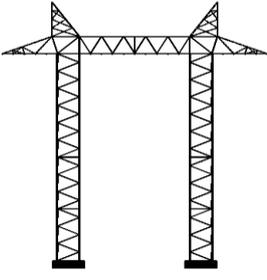
Etude comparative supplémentaire

La comparaison entre les deux pylônes étudiés :

	Pylône A « à six triangle »	Pylône B « Chat »
	 <p> Membrue (120x10) Diagonale (90x6) Treillis (60x5) </p>	 <p> Membrure (150x18) Diagonale (90x6) Treillis (70x7) Console (100x10) </p>
La hauteur (H) [m]	29.2	30
La section (la base) [cm²]	(6 x 6)	(6.5 x 6.5)
Nombre des barres	1718	704
Nombre des nœuds	849	712
Nombre de degré de liberté (DDL)	5094	4272
Le poids. [kg]	7087.29	10308.57
La fréquence (F) [HZ]	3.70	2.66
La période (T) [s]	0.27	0.38
La force normale max (F_{X max}) [daN]	6731.94	26188.94
La réaction max (R_{max}) [daN]	9706.27	14253.93
M_R : Moment renversant. [kg.cm]	922.095x10 ³	14253.93x10 ³
M_S : Moment stabilisant. [kg.cm]	2019.582x10 ³	26188.94x10 ³

Observation : à la lumière des éléments comparatifs du tableau en haut, d'où le poids du pylône « B » est notamment supérieur à celui du pylône « A » ce qui résulte que de premier (B) est plus stable au renversement que la dernière.

Dans cette partie nous avons comparé les trois types des pylônes avec même section des Cornière.

	Pylône A « à six triangle »	Pylône B « Chat »	Pylône C « Portique »
Membrure (150x18)			
Diagonale (90x6)			
Treillis (70x7)			
La hauteur (H) [m]	29.2	30	30
La section (la base) [cm²]	(6 x6)	(6.5x6.5)	(14x2)
Nombre des barres	1718	704	1059
Nombre des nœuds	849	712	862
Nombre de degré de liberté (DDL)	5094	4272	5172
Le poids. [kg]	9961.19	10308.57	14209.42
La fréquence (F) [HZ]	4.49	2.66	2.26
La période (T) [s]	0.22	0.38	0.44

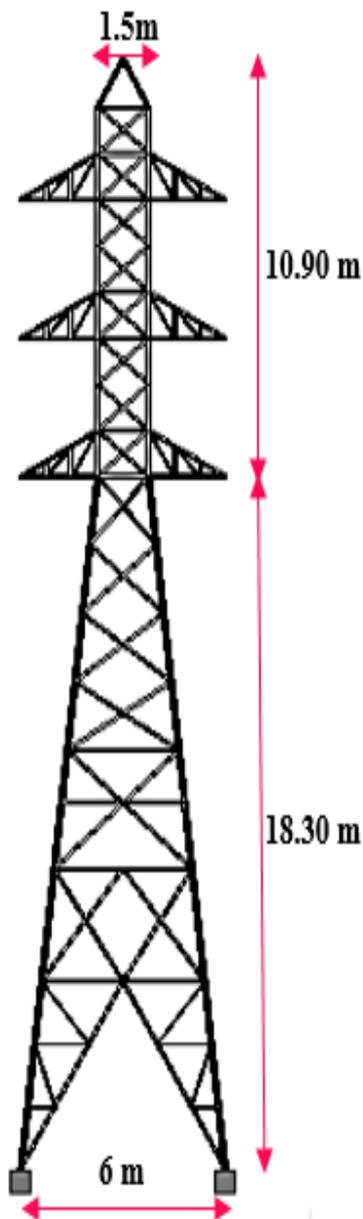
Observation : Nous concluons que la période est augmentée et la rigidité a diminué, donc le pylône « C » est de faible rigidité (flexible) par rapport aux autres pylônes.

D'après les modes de déformations obtenus par le logiciel on observe que le pylône le plus déformable c'est le pylône « C ».

Fiche Technique

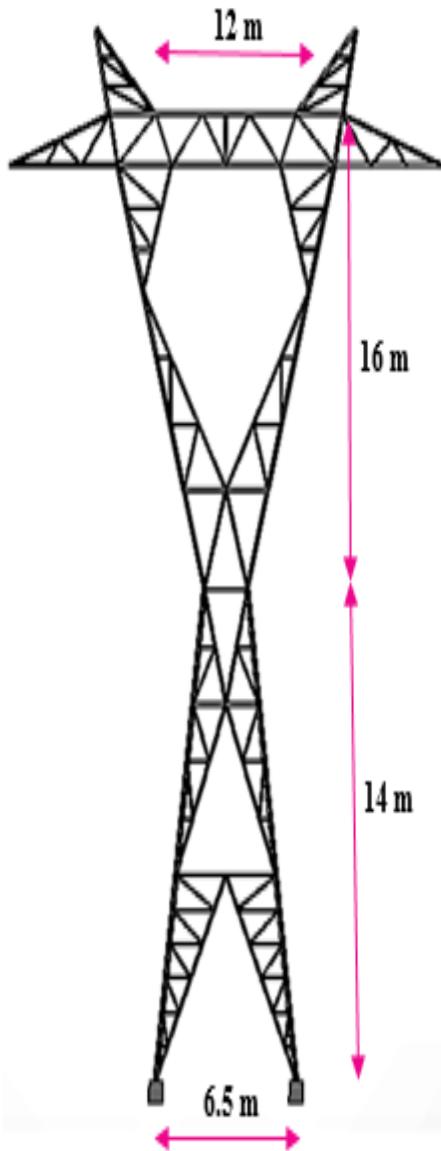
Fiche Technique

Pylône auto-stable à six triangles



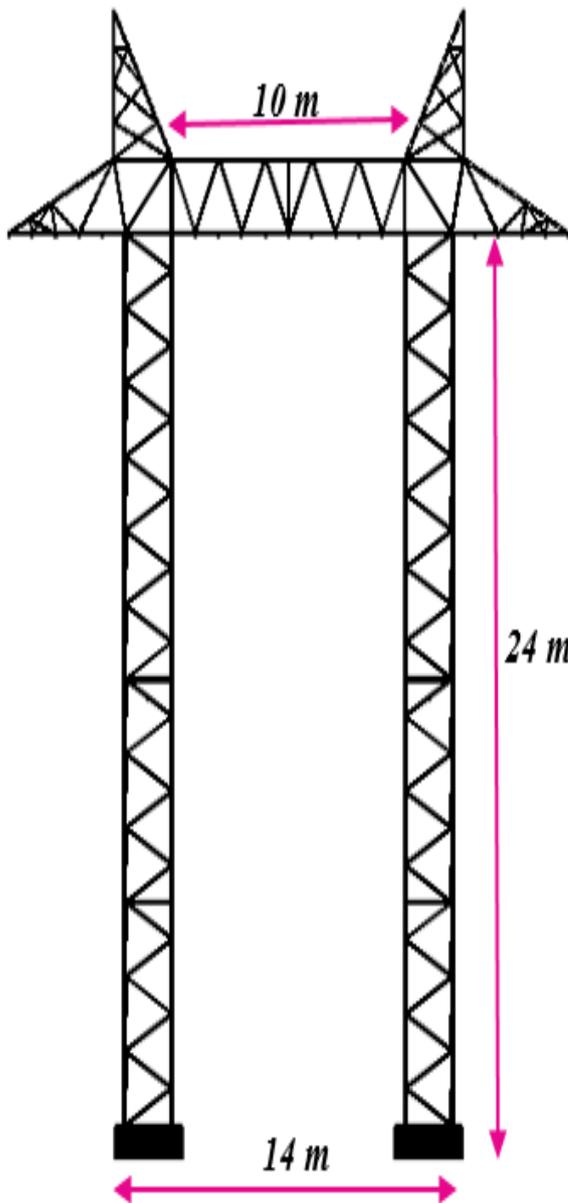
- **Domaine d'utilisation/fonction** : Distribution, Transport d'électricité et haute tension.
- **Hauteur** : 29.20m.
- **Poids** : 7087.29 kg.
- **Nombre de tronçons** : 7 éléments.
- **Matière** : Acier S 235 apte à la galvanisation à chaud.
- **Traitement** : Galvanisation à chaud selon la norme ISO 1461, de tous les éléments, après toute fabrication.
- **Structure métallique** : Tour ou mat en treillis d'acier, cornières, en éléments démontables /transportables.
- **Boulonnerie d'assemblage** : classe 6.8, galvanisée à chaud.
- **Câble** : Type AAAC en aluminium sa section 288mm².
- **Section transversale du pylône** : carrée.
- **Ancrage et Gabarit d'ancrage** : fourni avec chaque pylône (plaques tiges filetées, écrous et rondelles).
- **Plaque d'identification** : constructeur, type, année de construction.
- **Plateforme de travail et marches de repos** : à divers niveau

Pylône auto-stable "Chat"



- **Domaine d'utilisation/fonction** : Distribution, Transport D'électricité et haute tension.
- **Hauteur** : 30m.
- **Poids** : 10308.57 kg.
- **Nombre de tronçon** : 4 éléments
- **Matière** : Acier S 235 apte à la galvanisation à chaud
- **Traitement** : Galvanisation à chaud selon la norme ISO 1461, de tous les éléments, après toute fabrication
- **Structure métallique** : tour ou mat en treillis, cornières, en éléments démontables /transportables
- **Boulonnerie d'assemblage** : classe 6.8, galvanisée à chaud.
- **Câble** : Type AAAC en aluminium sa section 411 mm².
- **Section transversale du pylône** : carrée
- **Ancrage et Gabarit d'ancrage** : fourni avec chaque pylône (plaques tiges filetées, écrous et rondelles)
- **Plaque d'identification** : constructeur, type, année de construction.
- **Plateforme de travail et marches de repos** : à divers niveaux.

Pylône auto-stable "portique"



- **Domanie d'utilisation/fonction :**
Distribution, Transport D'électricité et haute tension.
- **Hauteur :** 30 m.
- **Poids :** 14209.42 kg.
- **Nombre de tronçon :** 3 éléments
- **Matière :** Acier S 235 apte à la galvanisation à chaud
 - **Traitement :** Galvanisation à chaud selon la norme ISO 1461, de tous les éléments, après toute fabrication
 - **Structure métallique :** tour ou mat en treillis, cornières, en éléments démontables /transportables
 - **Boulonnerie d'assemblage :** classe 6.8, galvanisée à chaud.
 - **Câble :** Type AAAC en aluminium sa section 411 mm².
 - **Section transversale du pylône :** rectangulaire
 - **Ancrage et Gabarit d'ancrage :** fourni avec chaque pylône (plaques tiges filetés, écrous et rondelles)
 - **Plaque d'identification :** constructeur, type, année de construction.
- **Plateforme de travail et marches de repos :** à divers niveaux.

Conclusion Générale

Ce projet nous a permis d'acquérir de nouveaux concepts de construction métallique notamment le calcul des structures ajourées comme pour notre cas le pylône d'électrique, et de voir les difficultés rencontrées par les ingénieurs concepteurs de tels projets.

Au cours de ce projet nous avons :

- ✓ Conçu la structure du pylône.
- ✓ Choisi les matériaux convenables.
- ✓ Calculé les sollicitations appliquées sur le pylône.
- ✓ Dimensionnement de pylône.
- ✓ Vérification dynamique selon R.P.A.99/V 2003.
- ✓ Vérification d'assemblage.
- ✓ Dimensionnement des fondations.
- ✓ La comparaison entre les trois variantes.

Nous pouvons dire que ce projet de fin d'étude nous a permis de calculer manuellement les charges exercées sur un pylône d'alignement et de dimensionner ce dernier selon la norme Eurocode 3 avec le logiciel *ROBOT*.

En arrivant au terme de ce travail, nous pouvons affirmer que nous avons beaucoup appris, l'expérience en valait la peine. En effet au-delà des difficultés il y a ce que l'on appelle communément "la leçon", c'est comme la récolte pour le paysan qui a passé de longs mois de dur labeur.

Les sections des cornières obtenues hormis celles des consoles sont toutes supérieures aux sections utilisées sur le terrain. Ces valeurs peuvent s'avérer réalistes puisque sur le terrain les problèmes sont fréquents jusqu'à ce que certains pylônes ont connu le doublement de leurs poteaux. Au vu des résultats obtenus au cours de cette étude, nous recommandons d'autres dimensionnements avec d'autres cas de chargements autres que le cas étudié pour s'approprier l'utilisation du logiciel.

Suggestions :

Ce travail a montré que le domaine étudié est très vaste. Au cours des études menées, des problèmes non résolus ou partiellement résolus ont été rencontrés. Nous suggérons pour les travaux futurs la prise en compte d'un certain nombre de paramètres dont :

- ✓ *Analyse détaillé d'un pylône d'angle ;*

- ✓ *Etude comparative avec un pylône portique et pylône articlé et haubané... ;*
- ✓ *Modélisation du pylône avec l'interaction sol structure, en introduisant des éléments d'interfaces ;*

Etude des pylônes en d'autres matériaux (acier béton par exemple)

- ✓ *Etude par modélisation locale pour définir les zones où se localisent les contraintes critiques (Plastification) afin d'estimer la durée de vie du pylône ;*
- ✓ *Analyse de l'effet du 2^{eme} ordre, imperfection et défaut d'assemblage ;*
- ✓ *Des essais expérimentaux permettant et in-situ de juger de la pertinence du modèle numérique.*
- ✓ *Analyse des pylônes sous une charge de choc.*

Références bibliographiques

- [1]. **Pierre-Luc BOUCHARD**, « *Calcul de la capacité d'un pylône à treillis avec une approche stabilité* », Mémoire de maîtrise Spécialité : Génie Civil, Université de SHERBROOKE, Décembre 2013,131p.
- [2].**BARGACH Doha et HADRI Meryem**, “*Conception et dimensionnement d'un pylône GSM auto-stable de 50mètre selon les normes CM66 additif 80 & Eurocode 3*”, projet Industriel de Fin d'Etudes Année 2013, option GENE MECANIQUE, 131p.
- [3]. https://fr.wikipedia.org/wiki/Ligne_%C3%A0_haute_tension.
- [4].**HADI Samia et MEZHOUD Naïma**, “*Analyse de la stabilité des pylônes à treillis*”, mémoire de mastère en GENIE CIVIL, université BADJI MOKHTAR-ANNABA, (2016) ,79p.
- [5].**Patrice DANGANG et Erick ACHI**,” *Etude de la construction d'une ligne électrique haute tension 90kV PA-WONA*” ’mémoire de mastère en GENIE ELECTRIQUE ET ENERGETIQUE, Ingénieur 2IE Promotion (2013/2014), 43p.
- [6].**Abdelhamid BOUCHAÏR**,”*Contribution au dimensionnement de pylône de transport d'énergie électrique (Haute Tension HT) selon la norme Eurocode : Cas d'un pylône d'angle*”,mémoire de mastère en GENIE CIVIL,Enseignant au 2IE Promotion (2010/2012), 94p.
- [7].**BOUDJAMAA ABDELHAKIM ET SEBTI REDOUANE**,” *Modélisation des phénomènes de pollution des isolateur de haut tension*” ’mémoire de mastère en GENIE ELECTRIQUE ,Université Kasdi Merbah–Ouargla,(2011 /2012) ,59p.
- [8].Norme française NF C 11-201, Octobre 1996, indice de classement C 11-201 ; ICS 29.240.01. Réseaux de distribution d'énergie électrique. Ets Busson, impr. 93218 La plaine St Denis.
- [9].**Alioum MOUSTAPHA**, '*Construction d'une ligne d'interconnexion HTA 33kV ET LE RESEAU HTA/BTA DE YABA*’, mémoire de mastère en Génie ENERGETIQUE ET ENERGIE RENOUVELABLE,Enseignant au 2IE soutenue le 14 /12 /2011,47p.
- [10].**Manfred A. Hirt et Michel Crisinel**, ” *Charpentes métallique*” (volume 11), première édition ISBN 2-88074-359-1 (2001) ,703p.

- [11].**Mlle AMROUNE Mouna**, ''*Calcul des poutres métalliques selon le règlement Algérien C.C.M.97*'', mémoire de mastère en GENIE CIVIL, université MOHAMED BOUDIAF-M'SILA (2017 / 2018) ,55p.
- [12].**MOUNIR BEN JDIDIA**, ''*Cours de Charpentes métallique*'', ECOLE NATIONALE D'INGENIEURS DE SFAX DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL, (2013/2014) ,114p.
- [13].**Koffi Aho VERCELLINO** (Ingénieur de l'École Centrale de Lyon et Ingénieur Civil du Génie Maritime), ''*Composants métalliques tendus et comprimés*'' ,26p.
- [14].**François-Xavier GOUDEZEUNE, Jonathan BRUHAMMER, Alexandre PASCUAL ET Rebecca DONGRAZI**, ''*Construction métallique*'', L'école d'ingénieurs du Ce si (centre de paris), 93p.
- [15].**Bitsch Quentin (TSIETA)**, ''*Architecture des réseaux de transport HT* '' , Janvier 2011, 21p.
- [16].**Gérard PHILIPPONNAT** (Ingénieur de l'École Spéciale des Travaux Publics et Directeur Technique de la société SOPENA), ''*Constructions métalliques - Fondations pour pylônes et mâts*'' , 14p.
- [17].**Arnaud Delaplace, Fabrice Gatuingt et Frédéric Ragueneau**, ''*Mécanique des structures - Résistance des matériaux*'' , Dunod , Paris, 2008, ISBN 978-2-10-053958-1, 214p.
- [18].**Philippe Mestat et Michale Prat**, ''*Ouvrage en interaction*'' , Sous-partie 2-Ouvrages soumis à des actions naturelles ou accidentelles, HERMES Science Publication, Paris, 1999, ISBN 2-7462-0048-1, 918p.
- [19].**HLIMANI Souad et EL HOUSNI Najoua**, ''*Construction métallique : Pylône*'' , Rapport projet fin d'année, Ecole Marocaine des sciences de L'Ingénieur, (2009/2010) ,70p.
- [20].**Zienkiwicz O.C.**, ''*La méthode des éléments finis*'' , Editions MC graw Hit, (1979).
- [21].**Krishnamoorthy**, ''*Méthode des Eléments Finis (MEF)*'' , (1987).
- [22].**Abdelghani SEGHIR** (Docteur en Science de L'université A. Mira, Béjaia, Algérie et Docteur en Génie Civil de l'université Paris-Est, France), ''*Cours Méthode des Éléments Finis*'' , (2005/2014) ,106p.
- [23].**Michel Cazenave**, ''*Méthode des éléments finis*'' 'Dunod, Paris, 2010, ISBN 978-2-10-055065-4, 280p.

[24].REGLEMENT NEIGE ET VENT "**R.N.V. 1999**", C.N.E.R.I.B. Cité Nouvelle El-Mokrani - SOUIDANIA - Gouvernorat du Grand Alger,ISBN : 9961-845-03-X ,134p.

[25].**RPA99/Version2003** : Règles parasismiques Algériennes.

[26].**Stewart, J. P., Fenves, G. L., and Seed, R. B.** (1999). "Seismic soil- structure interaction in building: analytical methods. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE", 125(1):26–37.

[27].**M.BELAZOUGUI**, "*Calculus des outrages en béton arme*", office des publications universities, place central de ben aknoun (Alger).

Les Annexes

ANNEXE -A-

Les figures et les tableaux

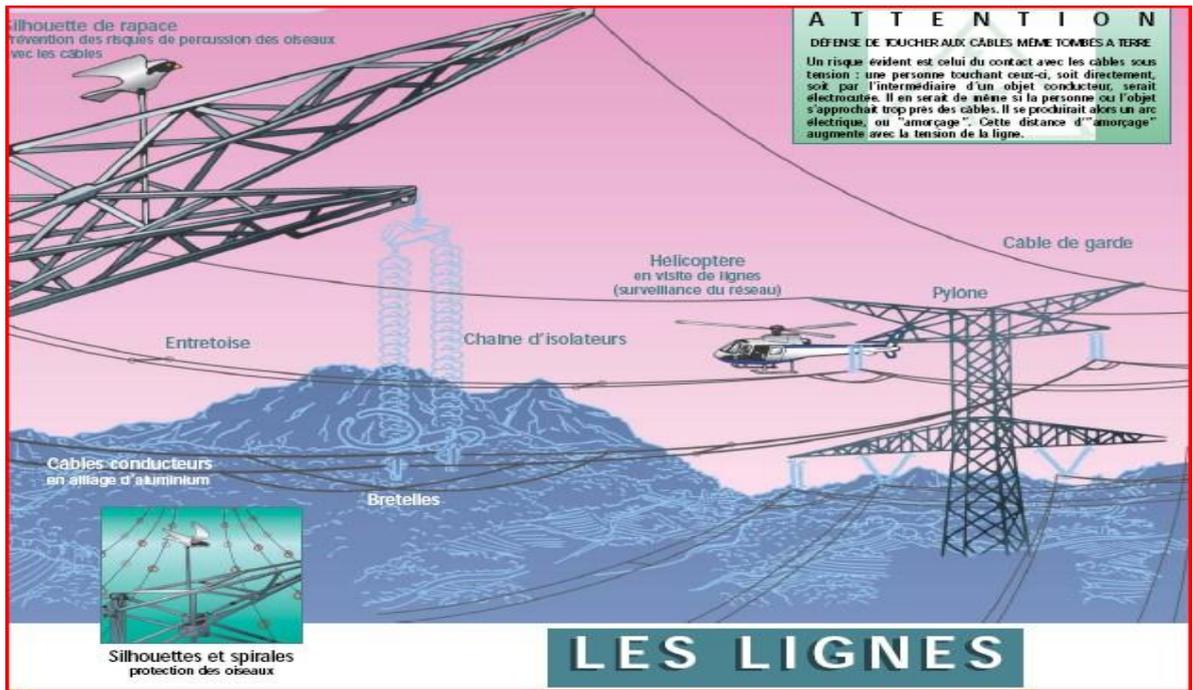


Fig.1 : Composants d'une ligne haute-tension aérienne.

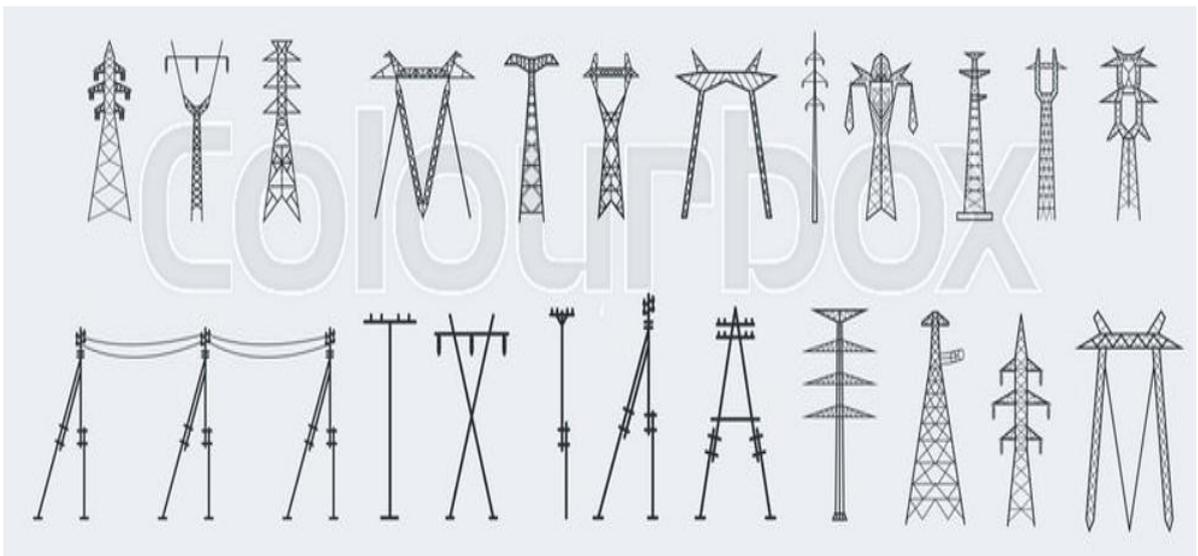


Fig.2 : les différentes formes de pylône.

Type de construction	z_{eq} (en m)
Verticale (bâtiment, tour, cheminée, etc.) (voir figure A4.1.a, R.N.V)	$z_{eq} = \text{Max. } [0.6 \times h ; z_{min}]$
Horizontale (voir figure A4.1.b, R.N.V)	$h \ll b ; d \ll b \text{ et } b/h_1 \geq 0.5$ $z_{eq} = \text{Max. } [h_1 + h/2 ; z_{min}]$
Ponctuelle (réservoirs surélevés, etc.) (voir figure A4.1.c, R.N.V)	$b/h_1 < 0,5 ; h/h_1 \geq 0.5$ $z_{eq} = \text{Max. } [h_1 + h/2 ; z_{min}]$

Tableau 1 : Mode de détermination de z_{eq} .

Catégories de terrain	K_T	z_0 (m)	z_{min} (m)	ϵ
I En bord de mer, au bord d'un plan d'eau offrant au moins 5 km de longueur au vent, régions lisses et sans obstacles.	0.17	0.01	2	0.11
II Régions de culture avec haies et avec quelques petites fermes, maisons ou arbres.	0.19	0.05	4	0.26
III Zones industrielles ou suburbaines, forêt, zones urbaines ne rentrant pas dans la catégorie de terrain IV	0.22	0.3	8	0.37
IV Zones urbaines dont au moins 15% de la surface est occupée par des bâtiments de hauteur moyenne supérieure à 15 m.	0.24	1	16	0.46

Tableau 2 : Définition des catégories de terrain.

Site	$C_t(z)$
site plat	1
site aux alentours des vallées et oueds sans effet d'entonnoir	1
site aux alentours des vallées et oueds avec effet d'entonnoir	1.3
site aux alentours des plateaux	1.15
site aux alentours des collines	1.15
site montagneux	1.5

Tableau 3 : Valeurs de $C_t(z)$.

Zone	$V_{réf}$ (m/s)
I	25
II	28
III	31

Tableau 4 : Valeurs de la vitesse de référence du vent.

Zone	$q_{réf}$ (N/m ²)	q_{temp} (N/m ²)
I	370	270
II	470	340
III	575	415

Tableau 5 : Valeurs de la pression dynamique de référence.

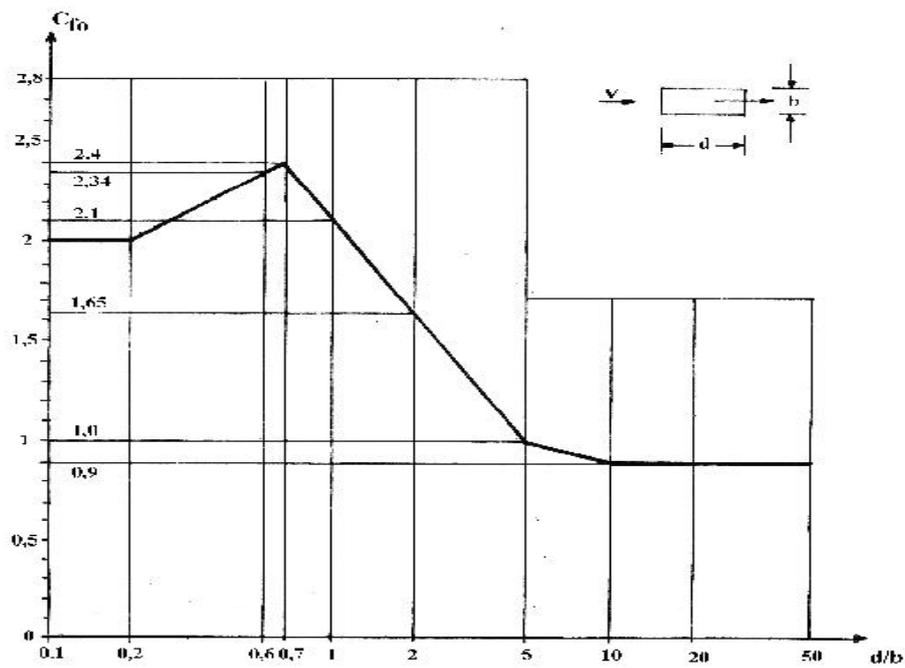


Fig.3 : Coefficient C_{f0} des constructions à base rectangulaire à angles vifs.

Type de construction	a_1	b_1	δ_{min}	
Bâtiments en béton armé	0.045	0.05	0.10	
Bâtiments en acier	0.045	0	0.05	
Structures composites béton + acier	0.08	0	0.08	
Tours en béton armé	0.050	0	0.025	
Cheminées en béton armé	0.075	0	0.03	
Cheminées en acier soudé non revêtues	0	0.015	0	
Cheminées en acier avec revêtement ou isolation thermique	0	0.025	0	
Cheminées avec deux revêtements ou plus	0	0.030	0	
Cheminées en acier avec revêtement en briques	0	0.070.05	0	

Tableau 6 : Coefficients a_1 , b_1 et δ_{min} .

Profils			Suite dimensions		Masse par mètre	Aire de la section	Surface de peinture		Caractéristiques de calcul			
									Axe yy - zz			
a	a	t	r	r ₁	P kg/m	A cm ²	m ² /m	m ² /t	d	I _y - I _z	W _{el,y} - W _{el,z}	I _y - I _z
mm	mm	mm	mm	mm					cm	cm ⁴	cm ³	cm
70	70	5	6	3	5,33	6,79	0,275	51,6	1,91	31,76	6,24	2,16
70	70	6	9	4,5	6,38	8,13	0,272	42,7	1,93	36,88	7,27	2,13
70	70	7	9	4,5	7,38	9,40	0,272	36,9	1,97	42,30	8,41	2,12
70	70	9	9	4,5	9,32	11,88	0,272	29,2	2,05	52,47	10,60	2,10
75	75	5	6	3	5,72	7,29	0,295	51,5	2,04	39,37	7,20	2,32
75	75	6	9	4,5	6,85	8,73	0,292	42,7	2,05	45,83	8,41	2,29
75	75	7	9	4,5	7,93	10,10	0,292	36,9	2,10	52,61	9,74	2,28
75	75	8	9	4,5	8,99	11,45	0,292	32,5	2,14	59,13	11,03	2,27
75	75	10	10	5	11,07	14,11	0,291	26,3	2,21	71,17	13,46	2,25
80	80	5	6	3	6,11	7,79	0,315	51,5	2,16	48,11	8,24	2,49
80	80	5,5	10	5	6,75	8,60	0,311	46,1	2,14	51,52	8,80	2,45
80	80	6	10	5	7,34	9,35	0,311	42,4	2,17	55,82	9,57	2,44
80	80	6,5	10	5	7,92	10,08	0,311	39,3	2,19	60,04	10,34	2,44
80	80	8	10	5	9,63	12,27	0,311	32,3	2,26	72,25	12,58	2,43
80	80	10	10	5	11,86	15,11	0,311	26,3	2,34	87,50	15,45	2,41
90	90	6	11	5,5	8,30	10,57	0,351	42,2	2,41	80,31	12,18	2,76
90	90	7	11	5,5	9,61	12,24	0,351	36,5	2,45	92,55	14,13	2,75
90	90	8	11	5,5	10,90	13,89	0,351	32,1	2,50	104,38	16,06	2,74
90	90	9	11	5,5	12,18	15,52	0,351	28,8	2,54	115,83	17,93	2,73
90	90	10	11	5,5	13,45	17,13	0,351	26,1	2,58	126,91	19,77	2,72
90	90	11	11	5,5	14,70	18,72	0,351	23,9	2,62	137,64	21,57	2,71
90	90	12	11	5,5	15,93	20,29	0,351	22,0	2,66	148,03	23,34	2,70
100	100	7	12	6	10,73	13,66	0,390	36,3	2,69	128,20	17,54	3,06
100	100	8	12	6	12,18	15,51	0,390	32,0	2,74	144,84	19,94	3,06
100	100	9	12	6	13,62	17,34	0,390	28,6	2,78	161,00	22,30	3,05
100	100	10	12	6	15,04	19,15	0,390	25,9	2,82	176,68	24,62	3,04
100	100	11	12	6	16,44	20,94	0,390	23,7	2,86	191,90	26,89	3,03
100	100	12	12	6	17,83	22,71	0,390	21,9	2,90	206,69	29,12	3,02
110	110	10	13	6,5	16,63	21,18	0,429	25,8	3,06	237,98	29,99	3,35
110	110	12	13	6,5	19,74	25,14	0,429	21,7	3,15	279,11	35,54	3,33
120	120	8	13	6,5	14,71	18,74	0,469	31,9	3,23	255,43	29,11	3,69
120	120	9	13	6,5	16,46	20,97	0,469	28,5	3,27	284,54	32,59	3,68
120	120	10	13	6,5	18,20	23,18	0,469	25,8	3,31	312,94	36,03	3,67
120	120	11	13	6,5	19,92	25,37	0,469	23,5	3,36	340,64	39,41	3,66
120	120	12	13	6,5	21,62	27,54	0,469	21,7	3,40	367,67	42,73	3,65
120	120	13	13	6,5	23,31	29,69	0,469	20,1	3,44	394,04	46,01	3,64
120	120	14	13	6,5	24,98	31,82	0,469	18,8	3,48	419,77	49,25	3,63
120	120	15	13	6,5	26,64	33,93	0,469	17,6	3,51	444,89	52,43	3,62
130	130	12	14	7	23,53	29,97	0,508	21,6	3,64	472,17	50,44	3,97
140	140	13	15	7,5	27,44	34,95	0,547	19,9	3,92	638,54	63,37	4,27
150	150	10	16	8	22,98	29,27	0,586	25,5	4,03	624,04	56,91	4,82
150	150	12	16	8	27,35	34,83	0,586	21,4	4,12	736,91	67,75	4,60
150	150	14	16	8	31,65	40,31	0,586	18,5	4,21	845,40	78,33	4,58
150	150	15	16	8	33,77	43,02	0,586	17,4	4,25	898,05	83,52	4,57
150	150	16	16	8	35,89	45,71	0,586	16,3	4,29	949,68	88,65	4,56
150	150	18	16	8	40,06	51,03	0,586	14,6	4,37	1049,97	98,74	4,54
160	160	15	17	8,5	36,16	46,06	0,625	17,3	4,49	1098,83	95,47	4,88
160	160	17	17	8,5	40,68	51,82	0,625	15,4	4,57	1225,40	107,22	4,86
180	180	16	18	9	43,48	55,39	0,705	16,2	5,02	1682,43	129,65	5,51
180	180	18	18	9	48,60	61,91	0,705	14,5	5,10	1865,60	144,67	5,49
180	180	20	18	9	53,65	68,35	0,705	13,1	5,18	2042,88	159,39	5,47
200	200	16	18	9	48,50	61,79	0,785	16,2	5,52	2341,36	161,73	6,16
200	200	18	18	9	54,25	69,11	0,785	14,5	5,60	2599,74	180,59	6,13
200	200	20	18	9	59,93	76,35	0,785	13,1	5,68	2850,58	199,11	6,11
200	200	24	18	9	71,11	90,59	0,785	11,0	5,84	3330,66	235,18	6,06

Tableaux 7 : Les Caractéristiques géométriques des cornières à ailes égales.

ANNEXE-B-

***Note de calcul
d'assemblage***

❖ Exemple détaillé d'assemblage d'un nœud 1 d'un pylône A :

Les donné :

Pour pylône A on a : M20 $\left\{ \begin{array}{l} d=20\text{mm} \\ d_0=22\text{mm} \\ A_s=245\text{mm}^2 \end{array} \right.$; Boulon ordinaire classe 6.8 : $\left\{ \begin{array}{l} f_{bu}=600\text{ Mpa.} \\ f_y=480\text{ Mpa.} \end{array} \right.$

$F_{\max}= 6548.79\text{ daN.}$ \longrightarrow Barre(120 × 120 × 10).

1-Vérification au cisaillement :

$$\frac{F_{V.sd}}{n.b} \leq F_{V.Rd} = \frac{0.5f_{ub}A_s}{\gamma_{Mb1}} n.p ; \text{ Avec : } n_b : \text{ Nombre des boulons, } n_p : \text{ Nombre des plans de cisaillement.}$$

$$\frac{6548.79}{6} \leq \frac{0.5 \times 600 \times 245 \times 10^{-1}}{1.25} \rightarrow 1091.465\text{ daN} \leq 58880\text{ daN} \dots \dots \dots \text{ C.V.}$$

(c.v : condition vérifier).

2- Vérification à la traction :

$$\frac{F_{t.sd}}{n.b} \leq F_{t.Rd} = \frac{0.9f_{ub}A_s}{\gamma_{Mb2}} n.p ; 1091.465\text{daN} \leq \frac{0.9 \times 600 \times 245 \times 10^{-1}}{1.5} = 8820\text{ daN.}$$

$$1091.465\text{daN} \leq 8820\text{daN} \dots \dots \dots \text{ C.V}$$

3- Vérification à la pression diamétrale :

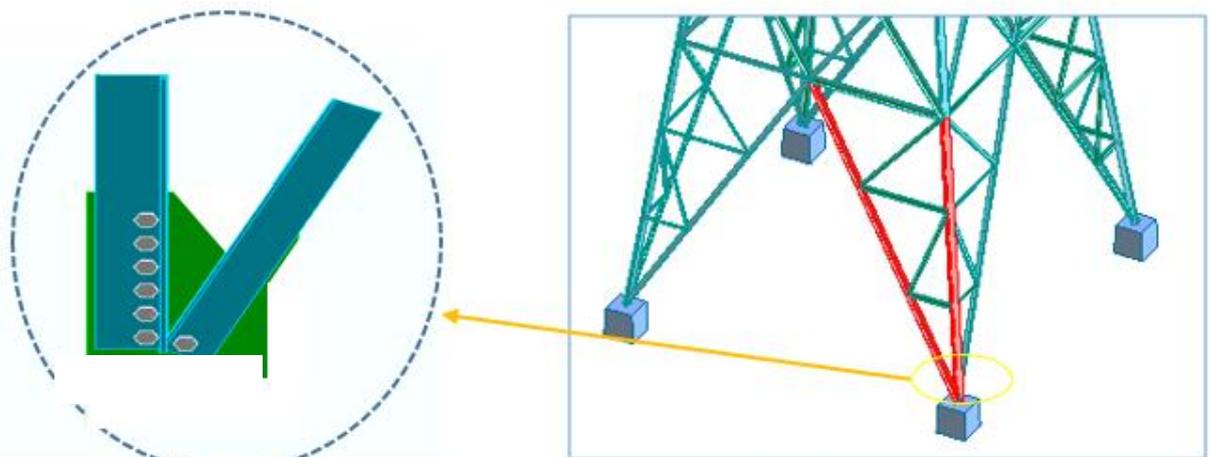
$$\frac{F_{b.sd}}{n.b} \leq F_{b.Rd} = \frac{2.5\alpha f_u d t}{\gamma_{Mb1}} n.p ; \text{ Avec } \alpha = \min \left\{ \frac{e_1}{3d_0} ; \frac{p_1}{3d_0} - \frac{1}{4} ; \frac{f_{ub}}{f_u} \text{ ou } 1 \right\}$$

$$\left. \begin{array}{l} e_1 \geq 1.2 d_0 \longrightarrow e_1 \geq 26.4\text{mm} \\ p_1 \geq 2.2 d_0 \longrightarrow p_1 \geq 48.40\text{mm} \end{array} \right\} \alpha = \min\{0.4; 0.48; 1.67 \text{ ou } 1\} \text{ Donc : } \alpha = 0.4$$

$$1091.465\text{ daN} \leq \frac{2.5 \times 0.4 \times 600 \times 22 \times 10 \times 10^{-1}}{1.25} = 10560\text{ daN} ; 1091.465\text{ daN} \leq 10560\text{ daN} \dots \dots \dots \text{ C.V}$$

❖ Calcul l'assemblage pare logicielle :

Pour pylône A : nœud 1



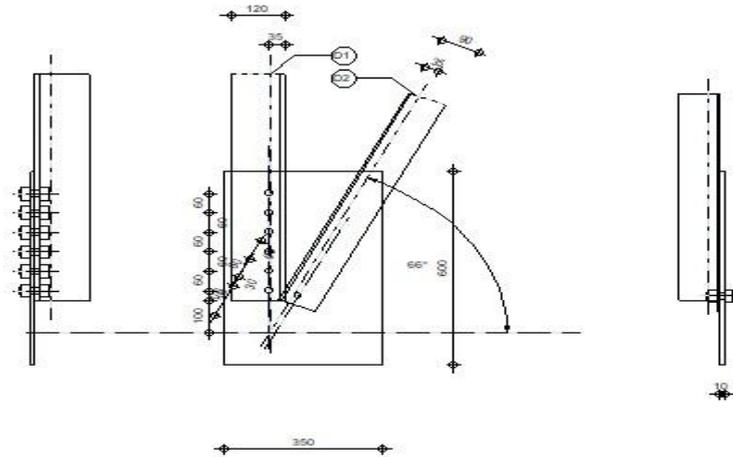
La position de nœud 1 pylône A.



Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2014

Calcul de l'assemblage au gousset

EN 1993-1-8:2005/AC:2009

Ratio
0,67D1 - CAEP 120x10
D2 - CAEP 90x6**GENERAL**

Assemblage N°: 1

Nom de l'assemblage : Gousset - contreventement

Nœud de la structure: 1

Barres de la structure: 1701, 1323,

GEOMETRIE**Barres**

		Barre 1	Barre 2			
Barre N° :		1701	1323			
Profilé :		CAEP 120x10	CAEP 90x6			
	h	120	90			mm
	b_f	120	90			mm
	t_w	10	6			mm
	t_f	10	6			mm
	r	13	11			mm
	A	23,18	10,57			cm ²
Matériau :		ACIER E24	ACIER E24			
	f_y	235,00	235,00			MPa
	f_u	365,00	365,00			MPa
Angle	α	90,0	65,8			Deg
Longueur	l	0,00	0,00			m

Boulons

Barre 1

Le plan de cisaillement passe par la partie NON FILETÉE du boulon

Classe =	6.8	Classe du boulon
d =	20 [mm]	Diamètre du boulon
d ₀ =	22 [mm]	Diamètre du trou de boulon
A _s =	2,45 [cm ²]	Aire de la section efficace du boulon
A _v =	3,14 [cm ²]	Aire de la section du boulon
f _{yb} =	410,00 [MPa]	Limite de plasticité
f _{ub} =	600,00 [MPa]	Résistance du boulon à la traction
n =	6	Nombre de colonnes des boulons
Espacement des boulons	60;60;60;60;60 [mm]	
e ₁ =	30 [mm]	Distance du centre de gravité du premier boulon de l'extrémité de la barre
e ₂ =	35 [mm]	Distance de l'axe des boulons du bord de la barre
e _c =	100 [mm]	Distance de l'extrémité de la barre du point d'intersection des axes des barres

Barre 2

Le plan de cisaillement passe par la partie NON FILETÉE du boulon

Classe =	6.8	Classe du boulon
d =	20 [mm]	Diamètre du boulon
d ₀ =	22 [mm]	Diamètre du trou de boulon
A _s =	2,45 [cm ²]	Aire de la section efficace du boulon
A _v =	3,14 [cm ²]	Aire de la section du boulon
f _{yb} =	410,00 [MPa]	Limite de plasticité
f _{ub} =	600,00 [MPa]	Résistance du boulon à la traction
n =	1	Nombre de colonnes des boulons
Espacement des boulons	[mm]	
e ₁ =	30 [mm]	Distance du centre de gravité du premier boulon de l'extrémité de la barre
e ₂ =	35 [mm]	Distance de l'axe des boulons du bord de la barre
e _c =	100 [mm]	Distance de l'extrémité de la barre du point d'intersection des axes des barres

GOUSSET

l _p =	350 [mm]	Longueur de la platine
h _p =	600 [mm]	Hauteur de la platine
t _p =	10 [mm]	Epaisseur de la platine

Paramètres

h ₁ =	0 [mm]	Grugeage
v ₁ =	0 [mm]	Grugeage
h ₂ =	0 [mm]	Grugeage
v ₂ =	0 [mm]	Grugeage
h ₃ =	0 [mm]	Grugeage
v ₃ =	0 [mm]	Grugeage
h ₄ =	0 [mm]	Grugeage
v ₄ =	0 [mm]	Grugeage

Centre de gravité de la tôle par rapport au centre de gravité des barres (75;200)

e _v =	100 [mm]	Distance verticale de l'extrémité du gousset du point d'intersection des axes des barres
e _H =	100 [mm]	Distance horizontale de l'extrémité du gousset du point d'intersection des axes des barres
Matériau:	ACIER	
f _y =	235,00 [MPa]	Résistance

COEFFICIENTS DE MATERIAU

$\gamma_{M0} =$	1,00	Coefficient de sécurité partiel	[2.2]
$\gamma_{M2} =$	1,25	Coefficient de sécurité partiel	[2.2]

EFFORTS

Cas: 10: 1.35G+1.5W1 (1+2+3)*1.35+5*1.50

$N_{b1,Ed} =$	6548,79	[daN]	Effort axial
$N_{b2,Ed} =$	2685,74	[daN]	Effort axial

RESULTATS

BARRE 1

RESISTANCE DES BOULONS

$F_{v,Rd} = 9047,79$ [daN] Résistance de la tige d'un boulon au cisaillement $F_{v,Rd} = 0.6 \cdot f_{ub} \cdot A_v \cdot m / \gamma_{M2}$

Pression du boulon sur la barre

Direction x

$k_{1x} =$	2,50	Coefficient pour le calcul de $F_{b,Rd}$	$k_{1x} = \min[2.8 \cdot (e_2/d_0) - 1.7, 2.5]$
$k_{1x} > 0.0$		2,50 > 0,00	vérifié
$\alpha_{bx} =$	0,45	Coefficient dépendant de l'espacement des boulons	$\alpha_{bx} = \min[e_1/(3 \cdot d_0), p_1/(3 \cdot d_0) - 0.25, f_{ub}/f_u, 1]$
$\alpha_{bx} > 0.0$		0,45 > 0,00	vérifié
$F_{b,Rd1x} =$	6636,3	[daN] Résistance de calcul à l'état limite de plastification de la paroi du trou	$F_{b,Rd1x} = k_{1x} \cdot \alpha_{bx} \cdot f_u \cdot d \cdot t / \gamma_{M2}$

Direction z

$k_{1z} =$	2,12	Coefficient pour le calcul de $F_{b,Rd}$	$k_{1z} = \min[2.8 \cdot (e_1/d_0) - 1.7, 1.4 \cdot (p_1/d_0) - 1.7, 2.5]$
$k_{1z} > 0.0$		2,12 > 0,00	vérifié
$\alpha_{bz} =$	0,53	Coefficient pour le calcul de $F_{b,Rd}$	$\alpha_{bz} = \min[e_2/(3 \cdot d_0), f_{ub}/f_u, 1]$
$\alpha_{bz} > 0.0$		0,53 > 0,00	vérifié
$F_{b,Rd1z} =$	6559,94	[daN] Résistance d'un boulon en pression diamétrale	$F_{b,Rd1z} = k_{1z} \cdot \alpha_{bz} \cdot f_u \cdot d \cdot t / \gamma_{M2}$

Pression du boulon sur la platine

Direction x

$k_1 =$	2,50	Coefficient pour le calcul de $F_{b,Rd}$	$k_1 = \min[2.8 \cdot (e_2/d_0) - 1.7, 2.5]$
$k_1 > 0.0$		2,50 > 0,00	vérifié
$\alpha_{bx} =$	0,66	Coefficient dépendant de l'espacement des boulons	$\alpha_{bx} = \min[e_1/(3 \cdot d_0), p_1/(3 \cdot d_0) - 0.25, f_{ub}/f_u, 1]$
$\alpha_{bx} > 0.0$		0,66 > 0,00	vérifié
$F_{b,Rd2x} =$	9622,73	[daN] Résistance de calcul à l'état limite de plastification de la paroi du trou	$F_{b,Rd2x} = k_1 \cdot \alpha_{bx} \cdot f_u \cdot d \cdot t / \gamma_{M2}$

Direction z

$k_{1z} =$	2,12	Coefficient pour le calcul de $F_{b,Rd}$	$k_{1z} = \min[2.8 \cdot (e_1/d_0) - 1.7, 1.4 \cdot (p_1/d_0) - 1.7, 2.5]$
$k_{1z} > 0.0$		2,12 > 0,00	vérifié
$\alpha_{bz} =$	1,00	Coefficient pour le calcul de $F_{b,Rd}$	$\alpha_{bz} = \min[e_2/(3 \cdot d_0), f_{ub}/f_u, 1]$
$\alpha_{bz} > 0.0$		1,00 > 0,00	vérifié
$F_{b,Rd2z} =$	12370,18	[daN] Résistance d'un boulon en pression diamétrale	$F_{b,Rd2z} = k_{1z} \cdot \alpha_{bz} \cdot f_u \cdot d \cdot t / \gamma_{M2}$

VERIFICATION DE L'ASSEMBLAGE POUR LES EFFORTS AGISSANT SUR LES BOULONS

cisaillement des boulons

$e =$	2 [mm]	Excentricité de l'effort axial par rapport à l'axe des boulons	
$M_0 =$	12,20 [daN*m]	Moment fléchissant réel	$M_0 = N_{b1,Ed} * e$
$F_{NSd} =$	1091,47 [daN]	Force résultante dans le boulon due à l'influence de l'effort axial	$F_{NSd} = N_{b1,Ed}/n$
$F_{MSd} =$	29,05 [daN]	Effort composant dans le boulon dû à l'influence du moment	$F_{MSd} = M_0 * x_{max} / \sum x^2$
$F_{x,Ed} =$	1091,47 [daN]	Effort de calcul total dans le boulon sur la direction x	$F_{x,Ed} = F_{NSd}$
$F_{z,Ed} =$	29,05 [daN]	Effort de calcul total dans le boulon sur la direction z	$F_{z,Ed} = F_{MSd}$
$F_{Rdx} =$	6636,36 [daN]	Résistance résultante de calcul du boulon sur la direction x	$F_{Rdx} = \min(F_{vRd}, F_{bRd1x}, F_{bRd2x})$
$F_{Rdz} =$	6559,94 [daN]	Résistance résultante de calcul du boulon sur la direction z	$F_{Rdz} = \min(F_{vRd}, F_{bRd1z}, F_{bRd2z})$
$ F_{x,Ed} \leq F_{Rdx}$	1091,47 < 6636,36	vérifié	(0,16)
$ F_{z,Ed} \leq F_{Rdz}$	29,05 < 6559,94	vérifié	(0,00)

VERIFICATION DE LA SECTION DE LA POUTRE AFFAIBLIE PAR LES TROUS

$\beta_3 =$	0,52	Coefficient de réduction	[Tableau 3.8]
$A_{net} =$	20,98 [cm ²]	Aire de la section nette	$A_{net} = A - d_0 * t_{f1}$
$N_{u,Rd} =$	31744,65 [daN]	Résistance de calcul de la section nette	$N_{u,Rd} = (\beta_3 * A_{net} * f_{u1}) / \gamma_{M2}$
$N_{pl,Rd} =$	49025,70 [daN]	Résistance de calcul plastique de la section brute	$N_{pl,Rd} = (0.9 * A * f_{y1}) / \gamma_{M0}$
$ N_{b1,Ed} \leq N_{u,Rd}$	6548,79 < 31744,65	vérifié	(0,21)
$ N_{b1,Ed} \leq N_{pl,Rd}$	6548,79 < 49025,70	vérifié	(0,13)

VERIFICATION DE LA BARRE POUR LE CISAILLEMENT DE BLOC

$A_{nt} =$	7,40 [cm ²]	Aire nette de la zone de la section en traction	
$A_{nv} =$	20,90 [cm ²]	Aire de la zone de la section en traction	
$V_{effRd} =$	39160,56 [daN]	Résistance de calcul de la section affaiblie par les trous	$V_{effRd} = 0.5 * f_u * A_{nt} / \gamma_{M2} + (1/\sqrt{3}) * f_y * A_{nv} / \gamma_{M0}$
$ N_{b1,Ed} \leq V_{effRd}$	6548,79 < 39160,56	vérifié	(0,17)

BARRE 2

RESISTANCE DES BOULONS

$F_{v,Rd} =$	9047,79 [daN]	Résistance de la tige d'un boulon au cisaillement	$F_{v,Rd} = 0.6 * f_{ub} * A_v * m / \gamma_{M2}$
--------------	---------------	---	---

Pression du boulon sur la barre

Direction x			
$k_{1x} =$	2,50	Coefficient pour le calcul de $F_{b,Rd}$	$k_{1x} = \min[2.8 * (e_2/d_0) - 1.7, 2.5]$
$k_{1x} > 0.0$	2,50 > 0,00	vérifié	
$\alpha_{bx} =$	0,45	Coefficient dépendant de l'espacement des boulons	$\alpha_{bx} = \min[e_1 / (3 * d_0), f_{ub} / f_u, 1]$
$\alpha_{bx} > 0.0$	0,45 > 0,00	vérifié	
$F_{b,Rd1x} =$	3981,82 [daN]	Résistance de calcul à l'état limite de plastification de la paroi du trou	$F_{b,Rd1x} = k_{1x} * \alpha_{bx} * f_u * d * t_f / \gamma_{M2}$
Direction z			
$k_{1z} =$	2,12	Coefficient pour le calcul de $F_{b,Rd}$	$k_{1z} = \min[2.8 * (e_1/d_0) - 1.7, 2.5]$
$k_{1z} > 0.0$	2,12 > 0,00	vérifié	
$\alpha_{bz} =$	0,53	Coefficient pour le calcul de $F_{b,Rd}$	$\alpha_{bz} = \min[e_2 / (3 * d_0), f_{ub} / f_u, 1]$
$\alpha_{bz} > 0.0$	0,53 > 0,00	vérifié	

$F_{b,Rd1z} = 3935,97$ [daN] Résistance d'un boulon en pression diamétrale

$$F_{b,Rd1z} = k_{1z} \cdot \alpha_{bz} \cdot f_u \cdot d \cdot t_i / \gamma_{M2}$$

Pression du boulon sur la platine

Direction x

$k_{1x} = 2,50$ Coefficient pour le calcul de $F_{b,Rd}$ $k_{1z} = \min[2.8 \cdot (e_2/d_0) - 1.7, 2.5]$

$k_{1x} > 0.0$ $2,50 > 0,00$ **vérifié**

$\alpha_{bx} = 1,00$ Coefficient dépendant de l'espacement des boulons $\alpha_{bx} = \min[e_1/(3 \cdot d_0), f_{ub}/f_u, 1]$

$\alpha_{bx} > 0.0$ $1,00 > 0,00$ **vérifié**

$F_{b,Rd2x} = 14600,0$ [daN] Résistance de calcul à l'état limite de plastification de la paroi du trou $F_{b,Rd2x} = k_{1x} \cdot \alpha_{bx} \cdot f_u \cdot d \cdot t_i / \gamma_{M2}$

Direction z

$k_{1z} = 2,50$ Coefficient pour le calcul de $F_{b,Rd}$ $k_{1z} = \min[2.8 \cdot (e_1/d_0) - 1.7, 2.5]$

$k_{1z} > 0.0$ $2,50 > 0,00$ **vérifié**

$\alpha_{bz} = 1,00$ Coefficient pour le calcul de $F_{b,Rd}$ $\alpha_{bz} = \min[e_2/(3 \cdot d_0), f_{ub}/f_u, 1]$

$\alpha_{bz} > 0.0$ $1,00 > 0,00$ **vérifié**

$F_{b,Rd2z} = 14600,00$ [daN] Résistance d'un boulon en pression diamétrale $F_{b,Rd2z} = k_{1z} \cdot \alpha_{bz} \cdot f_u \cdot d \cdot t_i / \gamma_{M2}$

VERIFICATION DE L'ASSEMBLAGE POUR LES EFFORTS AGISSANT SUR LES BOULONS

cisaillement des boulons

$e = 11$ [mm] Excentricité de l'effort axial par rapport à l'axe des boulons

$M_0 = 29,40$ [daN*m] Moment fléchissant réel $M_0 = N_{b2,Ed} \cdot e$

$F_{NSd} = 2685,74$ [daN] Force résultante dans le boulon due à l'influence de l'effort axial $F_{NSd} = N_{b2,Ed}/n$

$F_{MSd} = 0,00$ [daN] Effort composant dans le boulon dû à l'influence du moment $F_{MSd} = M_0 \cdot x_{max} / \sum x^2$

$F_{x,Ed} = 2685,74$ [daN] Effort de calcul total dans le boulon sur la direction x $F_{x,Ed} = F_{NSd}$

$F_{z,Ed} = 0,00$ [daN] Effort de calcul total dans le boulon sur la direction z $F_{z,Ed} = F_{MSd}$

$F_{Rdx} = 3981,82$ [daN] Résistance résultante de calcul du boulon sur la direction x $F_{Rdx} = \min(F_{vRd}, F_{bRd1x}, F_{bRd2x})$

$F_{Rdz} = 3935,97$ [daN] Résistance résultante de calcul du boulon sur la direction z $F_{Rdz} = \min(F_{vRd}, F_{bRd1z}, F_{bRd2z})$

$|F_{x,Ed}| \leq F_{Rdx}$ $|2685,74| < 3981,82$ **vérifié** (0, 67)

$|F_{z,Ed}| \leq F_{Rdz}$ $|0,00| < 3935,97$ **vérifié** (0, 00)

VERIFICATION DE LA SECTION DE LA POUTRE AFFAIBLIE PAR LES TROUS

$N_{u,Rd} = 8409,60$ [daN] Résistance de calcul de la section nette $N_{u,Rd} = [2 \cdot (e_2 - 0.5 \cdot d_0) \cdot t_{r2} \cdot f_{u2}] / \gamma_{M2}$

$N_{pl,Rd} = 22355,55$ [daN] Résistance de calcul plastique de la section brute $N_{pl,Rd} = (0.9 \cdot A \cdot f_{y2}) / \gamma_{M2}$

$|N_{b2,Ed}| \leq N_{u,Rd}$ $|2685,74| < 8409,60$ **vérifié** (0, 32)

$|N_{b2,Ed}| \leq N_{pl,Rd}$ $|2685,74| < 22355,55$ **vérifié** (0, 12)

VERIFICATION DE LA BARRE POUR LE CISAILLEMENT DE BLOC

$A_{nt} = 2,64$ [cm²] Aire nette de la zone de la section en traction

$A_{nv} = 1,14$ [cm²] Aire de la zone de la section en traction

$V_{effRd} = 5401,12$ [daN] Résistance de calcul de la section affaiblie par les trous $V_{effRd} = 0.5 \cdot f_u \cdot A_{nt} / \gamma_{M2} + (1/\sqrt{3}) \cdot f_y \cdot A_{nv} / \gamma_{M0}$

$|N_{b2,Ed}| \leq V_{effRd}$ $|2685,74| < 5401,12$ **vérifié** (0, 50)

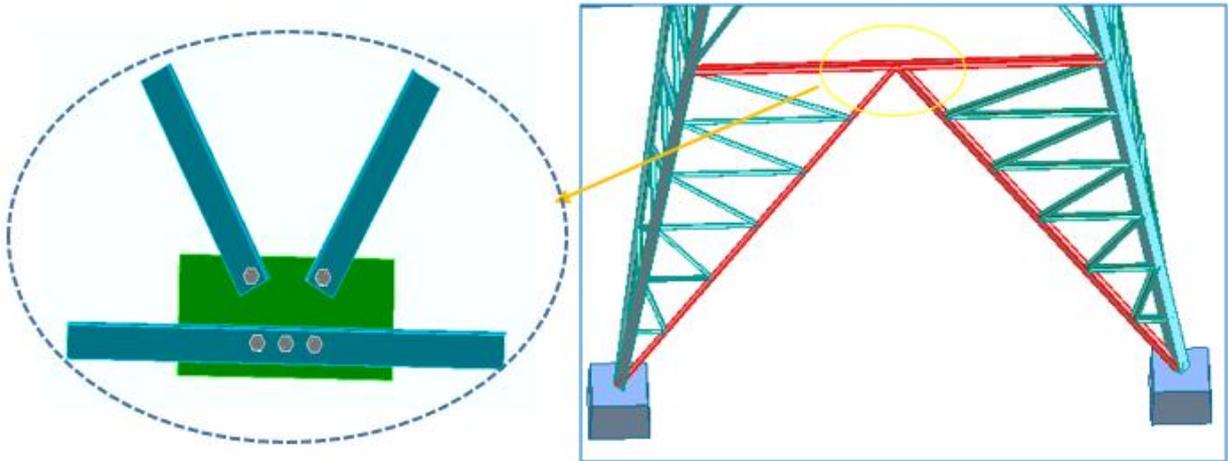
REMARQUES

Entraxe des boulons sur la barre 2 trop faible 0 [mm] < 48 [mm]

Assemblage satisfaisant vis à vis de la Norme

Ratio 0,67

Pure pylône B : nœud 3



La position de nœud 3 pylône B.



Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2014

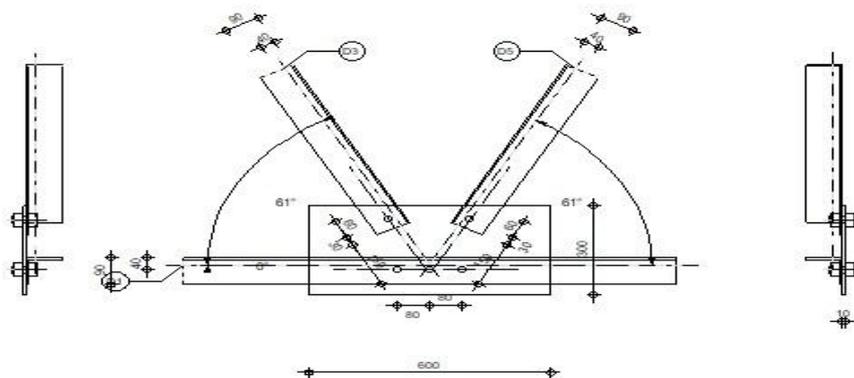
Calcul de l'assemblage au gousset

EN 1993-1-8:2005/AC:2009



Ratio
0,64

D1 - CAEP 90x6
D3 - CAEP 90x6
D5 - CAEP 90x6



GENERAL

Assemblage N°: 1

Nom de l'assemblage : Gousset - nœud membrure de treillis

Nœud de la structure: 757

Barres de la structure: 650, 650, 589, 588,

GEOMETRIE

Barres

		Barre 1-2		Barre 3	Barre 5		
Barre N°:		650		589	588		
Profilé:		CAEP 90x6		CAEP 90x6	CAEP 90x6		
	h	90		90	90		mm
	b _f	90		90	90		mm
	t _w	6		6	6		mm
	t _f	6		6	6		mm
	r	11		11	11		mm
	A	10,57		10,57	10,57		cm ²
Matériau:		ACIER E24		ACIER E24	ACIER E24		
	f _y	235,00		235,00	235,00		MPa
	f _u	365,00		365,00	365,00		MPa
Angle	α	0,0		61,3	61,3		Deg
Longueur	l	4,82		6,77	4,82		m

BOULONS

Barre 1-2

Le plan de cisaillement passe par la partie NON FILETÉE du boulon

Classe = 6.8 Classe du boulon
d = 22 [mm] Diamètre du boulon
d₀ = 24 [mm] Diamètre du trou de boulon
A_s = 3,03 [cm²] Aire de la section efficace du boulon
A_v = 3,80 [cm²] Aire de la section du boulon
f_{yb} = 410,00 [MPa] Limite de plasticité
f_{ub} = 600,00 [MPa] Résistance du boulon à la traction
n = 3 Nombre de colonnes des boulons
Espacement des boulons 80;80 [mm]
e₂ = 40 [mm] Distance de l'axe des boulons du bord de la barre

Barre 3

Le plan de cisaillement passe par la partie NON FILETÉE du boulon

Classe = 6.8 Classe du boulon
d = 22 [mm] Diamètre du boulon
d₀ = 24 [mm] Diamètre du trou de boulon
A_s = 3,03 [cm²] Aire de la section efficace du boulon
A_v = 3,80 [cm²] Aire de la section du boulon
f_{yb} = 410,00 [MPa] Limite de plasticité
f_{ub} = 600,00 [MPa] Résistance du boulon à la traction
n = 1 Nombre de colonnes des boulons
Espacement des boulons [mm]
e₁ = 30 [mm] Distance du centre de gravité du premier boulon de l'extrémité de la barre
e₂ = 40 [mm] Distance de l'axe des boulons du bord de la barre
e_c = 150 [mm] Distance de l'extrémité de la barre du point d'intersection des axes des barres

Barre 5

Le plan de cisaillement passe par la partie NON FILETÉE du boulon

Classe =	6.8	Classe du boulon
d =	22 [mm]	Diamètre du boulon
d ₀ =	24 [mm]	Diamètre du trou de boulon
A _s =	3,03 [cm ²]	Aire de la section efficace du boulon
A _v =	3,80 [cm ²]	Aire de la section du boulon
f _{yb} =	410,00 [MPa]	Limite de plasticité
f _{ub} =	600,00 [MPa]	Résistance du boulon à la traction
n =	1	Nombre de colonnes des boulons
Espacement des boulons [mm]		
e ₁ =	30 [mm]	Distance du centre de gravité du premier boulon de l'extrémité de la barre
e ₂ =	40 [mm]	Distance de l'axe des boulons du bord de la barre
e _c =	150 [mm]	Distance de l'extrémité de la barre du point d'intersection des axes des barres

GOUSSET

l _p =	600 [mm]	Longueur de la platine
h _p =	300 [mm]	Hauteur de la platine
t _p =	10 [mm]	Epaisseur de la platine

Paramètres

h ₁ =	0 [mm]	Grugeage
v ₁ =	0 [mm]	Grugeage
h ₂ =	0 [mm]	Grugeage
v ₂ =	0 [mm]	Grugeage
h ₃ =	0 [mm]	Grugeage
v ₃ =	0 [mm]	Grugeage
h ₄ =	0 [mm]	Grugeage
v ₄ =	0 [mm]	Grugeage

Centre de gravité de la tôle par rapport au centre de gravité des barres (0;50)

e _v =	100 [mm]	Distance verticale de l'extrémité du gousset du point d'intersection des axes des barres
e _H =	300 [mm]	Distance horizontale de l'extrémité du gousset du point d'intersection des axes des barres
e ₀ =	0 [mm]	Distance axe membrure hor.
Matériau: ACIER		
f _y =	235,00 [MPa]	Résistance

COEFFICIENTS DE MATERIAU

γ _{M0} =	1,00	Coefficient de sécurité partiel	[2.2]
γ _{M2} =	1,25	Coefficient de sécurité partiel	[2.2]

EFFORTS

Cas: 10: 1.35Q+1.5W1 (1+2+3)*1.35+5*1.50

N _{b1,Ed} =	-2261,61 [daN]	Effort axial
N _{b2,Ed} =	184,28 [daN]	Effort axial
N _{b3,Ed} =	2561,34 [daN]	Effort axial
N _{b5,Ed} =	-2567,72 [daN]	Effort axial

RESULTATS

BARRE 1-2

RESISTANCE DES BOULONS

$F_{v,Rd} = 10947,82$ [daN] Résistance de la tige d'un boulon au cisaillement $F_{v,Rd} = 0.6 \cdot f_{ub} \cdot A_v \cdot m / \gamma_{M2}$

Pression du boulon sur la barre

Direction x

$k_{1x} = 2,50$ Coefficient pour le calcul de $F_{b,Rd}$ $k_{1x} = \min[2.8 \cdot (e_2/d_0) - 1.7, 2.5]$

$k_{1x} > 0.0$ $2,50 > 0,00$ **vérifié**

$\alpha_{bx} = 0,56$ Coefficient dépendant de l'espacement des boulons $\alpha_{bx} = \min[e_1/(3 \cdot d_0), p_1/(3 \cdot d_0) - 0.25, f_{ub}/f_u, 1]$

$\alpha_{bx} > 0.0$ $0,56 > 0,00$ **vérifié**

$F_{b,Rd1x} = 5353,3$ [daN] Résistance de calcul à l'état limite de plastification de la paroi du trou $F_{b,Rd1x} = k_{1x} \cdot \alpha_{bx} \cdot f_u \cdot d \cdot t_i / \gamma_{M2}$

Direction z

$k_{1z} = 2,50$ Coefficient pour le calcul de $F_{b,Rd}$ $k_{1z} = \min[2.8 \cdot (e_1/d_0) - 1.7, 1.4 \cdot (p_1/d_0) - 1.7, 2.5]$

$k_{1z} > 0.0$ $2,50 > 0,00$ **vérifié**

$\alpha_{bz} = 0,56$ Coefficient pour le calcul de $F_{b,Rd}$ $\alpha_{bz} = \min[e_2/(3 \cdot d_0), f_{ub}/f_u, 1]$

$\alpha_{bz} > 0.0$ $0,56 > 0,00$ **vérifié**

$F_{b,Rd1z} = 5353,33$ [daN] Résistance d'un boulon en pression diamétrale $F_{b,Rd1z} = k_{1z} \cdot \alpha_{bz} \cdot f_u \cdot d \cdot t_i / \gamma_{M2}$

Pression du boulon sur la platine

Direction x

$k_{1x} = 2,50$ Coefficient pour le calcul de $F_{b,Rd}$ $k_{1x} = \min[2.8 \cdot (e_2/d_0) - 1.7, 2.5]$

$k_{1x} > 0.0$ $2,50 > 0,00$ **vérifié**

$\alpha_{bx} = 0,86$ Coefficient dépendant de l'espacement des boulons $\alpha_{bx} = \min[e_1/(3 \cdot d_0), p_1/(3 \cdot d_0) - 0.25, f_{ub}/f_u, 1]$

$\alpha_{bx} > 0.0$ $0,86 > 0,00$ **vérifié**

$F_{b,Rd2x} = 13829,4$ [daN] Résistance de calcul à l'état limite de plastification de la paroi du trou $F_{b,Rd2x} = k_{1x} \cdot \alpha_{bx} \cdot f_u \cdot d \cdot t_i / \gamma_{M2}$

Direction z

$k_{1z} = 2,50$ Coefficient pour le calcul de $F_{b,Rd}$ $k_{1z} = \min[2.8 \cdot (e_1/d_0) - 1.7, 1.4 \cdot (p_1/d_0) - 1.7, 2.5]$

$k_{1z} > 0.0$ $2,50 > 0,00$ **vérifié**

$\alpha_{bz} = 1,00$ Coefficient pour le calcul de $F_{b,Rd}$ $\alpha_{bz} = \min[e_2/(3 \cdot d_0), f_{ub}/f_u, 1]$

$\alpha_{bz} > 0.0$ $1,00 > 0,00$ **vérifié**

$F_{b,Rd2z} = 16060,00$ [daN] Résistance d'un boulon en pression diamétrale $F_{b,Rd2z} = k_{1z} \cdot \alpha_{bz} \cdot f_u \cdot d \cdot t_i / \gamma_{M2}$

VERIFICATION DE L'ASSEMBLAGE POUR LES EFFORTS AGISSANT SUR LES BOULONS

cisaillement des boulons

$e = 16$ [mm] Excentricité de l'effort axial par rapport à l'axe des boulons

$M_0 = -39,00$ [daN*m] Moment fléchissant réel $M_0 = N_{b1,Ed} \cdot e$

$F_{NSd} = 815,30$ [daN] Force résultante dans le boulon due à l'influence de l'effort axial $F_{NSd} = N_{b1,Ed} / n$

$F_{MSd} = 243,77$ [daN] Effort composant dans le boulon dû à l'influence du moment $F_{MSd} = M_0 \cdot X_{max} / \sum X_i^2$

$F_{x,Ed} = 815,30$ [daN] Effort de calcul total dans le boulon sur la direction x $F_{x,Ed} = F_{NSd}$

$e =$	16 [mm]	Excentricité de l'effort axial par rapport à l'axe des boulons	
$F_{z,Ed} =$	243,77 [daN]	Effort de calcul total dans le boulon sur la direction z	$F_{z,Ed} = F_{MSd}$
$F_{Rdx} =$	5353,3 [daN]	Résistance résultante de calcul du boulon sur la direction x	$F_{Rdx} = \min(F_{vRd}, F_{bRd1x}, F_{bRd2x})$
$F_{Rdz} =$	5353,3 [daN]	Résistance résultante de calcul du boulon sur la direction z	$F_{Rdz} = \min(F_{vRd}, F_{bRd1z}, F_{bRd2z})$
$ F_{x,Ed} \leq F_{Rdx}$		$ -815,30 < 5353,33$	vérifié (0,15)
$ F_{z,Ed} \leq F_{Rdz}$		$ -243,77 < 5353,33$	vérifié (0,05)

VERIFICATION DE LA SECTION DE LA POUTRE AFFAIBLIE PAR LES TROUS

$\beta_3 =$	0,57	Coefficient de réduction	[Tableau 3.8]
$A_{net} =$	9,13 [cm ²]	Aire de la section nette	$A_{net} = A - d_0 \cdot t_1$
$N_{u,Rd} =$	15107,11 [daN]	Résistance de calcul de la section nette	$N_{u,Rd} = (\beta_3 \cdot A_{net} \cdot f_{u1}) / \gamma_{M2}$
$N_{pl,Rd} =$	22355,55 [daN]	Résistance de calcul plastique de la section brute	$N_{pl,Rd} = (0.9 \cdot A \cdot f_{y1}) / \gamma_{M2}$
$ N_{b1,Ed} \leq N_{u,Rd}$		$ -2445,89 < 15107,11$	vérifié (0,16)
$ N_{b1,Ed} \leq N_{pl,Rd}$		$ -2445,89 < 22355,55$	vérifié (0,11)

VERIFICATION DE LA BARRE POUR LE CISAILLEMENT DE BLOC

$A_{nt} =$	2,28 [cm ²]	Aire nette de la zone de la section en traction	
$A_{nv} =$	8,40 [cm ²]	Aire de la zone de la section en traction	
$V_{effRd} =$	14725,6 [daN]	Résistance de calcul de la section affaiblie par les trous	$V_{effRd} = 0.5 \cdot f_u \cdot A_{nt} / \gamma_{M2} + (1/\sqrt{3}) \cdot f_y \cdot A_{nv} / \gamma_{M0}$
$ N_{b1,Ed} \leq V_{effRd}$		$ -2445,89 < 14725,69$	vérifié (0,17)

BARRE 3

RESISTANCE DES BOULONS

$F_{v,Rd} =$	10947,82 [daN]	Résistance de la tige d'un boulon au cisaillement	$F_{v,Rd} = 0.6 \cdot f_{ub} \cdot A_v \cdot m / \gamma_{M2}$
--------------	----------------	---	---

Pression du boulon sur la barre

Direction x			
$k_{1x} =$	2,50	Coefficient pour le calcul de $F_{b,Rd}$	$k_{1x} = \min[2.8 \cdot (e_2/d_0) - 1.7, 2.5]$
$k_{1x} > 0.0$		$2,50 > 0,00$	vérifié
$\alpha_{bx} =$	0,42	Coefficient dépendant de l'espacement des boulons	$\alpha_{bx} = \min[e_1/(3 \cdot d_0), f_{ub}/f_u, 1]$
$\alpha_{bx} > 0.0$		$0,42 > 0,00$	vérifié
$F_{b,Rd1x} =$	4015,0 [daN]	Résistance de calcul à l'état limite de plastification de la paroi du trou	$F_{b,Rd1x} = k_{1x} \cdot \alpha_{bx} \cdot f_u \cdot d \cdot t / \gamma_{M2}$

Direction z			
$k_{1z} =$	1,80	Coefficient pour le calcul de $F_{b,Rd}$	$k_{1z} = \min[2.8 \cdot (e_1/d_0) - 1.7, 2.5]$
$k_{1z} > 0.0$		$1,80 > 0,00$	vérifié
$\alpha_{bz} =$	0,56	Coefficient pour le calcul de $F_{b,Rd}$	$\alpha_{bz} = \min[e_2/(3 \cdot d_0), f_{ub}/f_u, 1]$
$\alpha_{bz} > 0.0$		$0,56 > 0,00$	vérifié
$F_{b,Rd1z} =$	3854,40 [daN]	Résistance d'un boulon en pression diamétrale	$F_{b,Rd1z} = k_{1z} \cdot \alpha_{bz} \cdot f_u \cdot d \cdot t / \gamma_{M2}$

Pression du boulon sur la platine

Direction x			
$k_{1x} =$	2,50	Coefficient pour le calcul de $F_{b,Rd}$	$k_{1x} = \min[2.8 \cdot (e_2/d_0) - 1.7, 2.5]$
$k_{1x} > 0.0$		$2,50 > 0,00$	vérifié
$\alpha_{bx} =$	0,79	Coefficient dépendant de l'espacement des boulons	$\alpha_{bx} = \min[e_1/(3 \cdot d_0), f_{ub}/f_u, 1]$
$\alpha_{bx} > 0.0$		$0,79 > 0,00$	vérifié

$$F_{b,Rd2x} = 12646,1 \text{ [daN]} \text{ Résistance de calcul à l'état limite de plastification de la paroi du trou} \quad F_{b,Rd2x} = k_{1z} \cdot \alpha_{bz} \cdot f_u \cdot d \cdot t_i / \gamma_M$$

Direction z

$$k_{1z} = 2,50 \quad \text{Coefficient pour le calcul de } F_{b,Rd} \quad k_{1z} = \min[2.8 \cdot (e_1/d_0) - 1.7, 2.5]$$

$$k_{1z} > 0.0 \quad 2,50 > 0,00 \quad \text{vérifié}$$

$$\alpha_{bz} = 1,00 \quad \text{Coefficient pour le calcul de } F_{b,Rd} \quad \alpha_{bz} = \min[e_2/(3 \cdot d_0), f_{ub}/f_u, 1]$$

$$\alpha_{bz} > 0.0 \quad 1,00 > 0,00 \quad \text{vérifié}$$

$$F_{b,Rd2z} = 16060,00 \text{ [daN]} \quad \text{Résistance d'un boulon en pression diamétrale} \quad F_{b,Rd2z} = k_{1z} \cdot \alpha_{bz} \cdot f_u \cdot d \cdot t_i / \gamma_M$$

VERIFICATION DE L'ASSEMBLAGE POUR LES EFFORTS AGISSANT SUR LES BOULONS

cisaillement des boulons

$$e = 16 \text{ [mm]} \quad \text{Excentricité de l'effort axial par rapport à l'axe des boulons}$$

$$M_0 = 40,84 \text{ [daN} \cdot \text{m]} \quad \text{Moment fléchissant réel} \quad M_0 = N_{b3,Ed} \cdot e$$

$$F_{NSd} = 2561,34 \text{ [daN]} \quad \text{Force résultante dans le boulon due à l'influence de l'effort axial} \quad F_{NSd} = N_{b3,Ed}/n$$

$$F_{MSd} = 0,00 \text{ [daN]} \quad \text{Effort composant dans le boulon dû à l'influence du moment} \quad F_{MSd} = M_0 \cdot X_{max} / \Sigma X_i^2$$

$$F_{x,Ed} = 2561,34 \text{ [daN]} \quad \text{Effort de calcul total dans le boulon sur la direction x} \quad F_{x,Ed} = F_{NSd}$$

$$F_{z,Ed} = 0,00 \text{ [daN]} \quad \text{Effort de calcul total dans le boulon sur la direction z} \quad F_{z,Ed} = F_{MSd}$$

$$F_{Rdx} = 4015,00 \text{ [daN]} \quad \text{Résistance résultante de calcul du boulon sur la direction x} \quad F_{Rdx} = \min(F_{vRd}, F_{bRd1x}, F_{bRd2x})$$

$$F_{Rdz} = 3854,40 \text{ [daN]} \quad \text{Résistance résultante de calcul du boulon sur la direction z} \quad F_{Rdz} = \min(F_{vRd}, F_{bRd1z}, F_{bRd2z})$$

$$|F_{x,Ed}| \leq F_{Rdx} \quad |2561,34| < 4015,00 \quad \text{vérifié} \quad (0,64)$$

$$|F_{z,Ed}| \leq F_{Rdz} \quad |0,00| < 3854,40 \quad \text{vérifié} \quad (0,00)$$

VERIFICATION DE LA SECTION DE LA POUTRE AFFAIBLIE PAR LES TROUS

$$N_{u,Rd} = 9811,20 \text{ [daN]} \quad \text{Résistance de calcul de la section nette} \quad N_{u,Rd} = [2 \cdot (e_2 - 0.5 \cdot d_0) \cdot t_{f3} \cdot f_{u3}] / \gamma_{M2}$$

$$N_{pl,Rd} = 22355,55 \text{ [daN]} \quad \text{Résistance de calcul plastique de la section brute} \quad N_{pl,Rd} = (0.9 \cdot A \cdot f_{y3}) / \gamma_{M0}$$

$$|N_{b3,Ed}| \leq N_{u,Rd} \quad |2561,34| < 9811,20 \quad \text{vérifié} \quad (0,26)$$

$$|N_{b3,Ed}| \leq N_{pl,Rd} \quad |2561,34| < 22355,55 \quad \text{vérifié} \quad (0,11)$$

VERIFICATION DE LA BARRE POUR LE CISAILLEMENT DE BLOC

$$A_{nt} = 2,28 \text{ [cm}^2\text{]} \quad \text{Aire nette de la zone de la section en traction}$$

$$A_{nv} = 1,08 \text{ [cm}^2\text{]} \quad \text{Aire de la zone de la section en traction}$$

$$V_{effRd} = 4794,11 \text{ [daN]} \quad \text{Résistance de calcul de la section affaiblie par les trous} \quad V_{effRd} = 0.5 \cdot f_u \cdot A_{nt} / \gamma_{M2} + (1/\sqrt{3}) \cdot f_y \cdot A_{nv} / \gamma_{M0}$$

$$|N_{b3,Ed}| \leq V_{effRd} \quad |2561,34| < 4794,11 \quad \text{vérifié} \quad (0,53)$$

BARRE 5

RESISTANCE DES BOULONS

$$F_{v,Rd} = 10947,82 \text{ [daN]} \quad \text{Résistance de la tige d'un boulon au cisaillement} \quad F_{v,Rd} = 0.6 \cdot f_{ub} \cdot A_v \cdot m / \gamma_{M2}$$

Pression du boulon sur la barre

Direction x

$$k_{1x} = 2,50 \quad \text{Coefficient pour le calcul de } F_{b,Rd} \quad k_{1x} = \min[2.8 \cdot (e_2/d_0) - 1.7, 2.5]$$

$$k_{1x} > 0.0 \quad 2,50 > 0,00 \quad \text{vérifié}$$

$$\alpha_{bx} = 0,42 \quad \text{Coefficient dépendant de l'espacement des boulons} \quad \alpha_{bx} = \min[e_1/(3 \cdot d_0), f_{ub}/f_u, 1]$$

$$\alpha_{bx} > 0.0 \quad 0,42 > 0,00 \quad \text{vérifié}$$

$$F_{b,Rd1x} = 4015,0 \text{ [daN]} \text{ Résistance de calcul à l'état limite de plastification de la paroi du trou} \quad F_{b,Rd1x} = k_{1x} \cdot \alpha_{bx} \cdot f_u \cdot d \cdot t_i / \gamma_M$$

Direction z

$k_{1z} = 1,80$	Coefficient pour le calcul de $F_{b,Rd}$	$k_{1z} = \min[2.8 \cdot (e_1/d_0) - 1.7, 2.5]$
$k_{1z} > 0.0$	$1,80 > 0,00$	vérifié
$\alpha_{bz} = 0,56$	Coefficient pour le calcul de $F_{b,Rd}$	$\alpha_{bz} = \min[e_2/(3 \cdot d_0), f_{ub}/f_u, 1]$
$\alpha_{bz} > 0.0$	$0,56 > 0,00$	vérifié
$F_{b,Rd1z} = 3854,40 \text{ [daN]}$	Résistance d'un boulon en pression diamétrale	$F_{b,Rd1z} = k_{1z} \cdot \alpha_{bz} \cdot f_u \cdot d \cdot t_i / \gamma_M$

Pression du boulon sur la platine

Direction x

$k_{1x} = 2,50$	Coefficient pour le calcul de $F_{b,Rd}$	$k_{1x} = \min[2.8 \cdot (e_2/d_0) - 1.7, 2.5]$
$k_{1x} > 0.0$	$2,50 > 0,00$	vérifié
$\alpha_{bx} = 0,79$	Coefficient dépendant de l'espacement des boulons	$\alpha_{bx} = \min[e_1/(3 \cdot d_0), f_{ub}/f_u, 1]$
$\alpha_{bx} > 0.0$	$0,79 > 0,00$	vérifié
$F_{b,Rd2x} = 12646,01 \text{ [daN]}$	Résistance de calcul à l'état limite de plastification de la paroi du trou	$F_{b,Rd2x} = k_{1x} \cdot \alpha_{bx} \cdot f_u \cdot d \cdot t_i / \gamma_M$

Direction z

$k_{1z} = 2,50$	Coefficient pour le calcul de $F_{b,Rd}$	$k_{1z} = \min[2.8 \cdot (e_1/d_0) - 1.7, 2.5]$
$k_{1z} > 0.0$	$2,50 > 0,00$	vérifié
$\alpha_{bz} = 1,00$	Coefficient pour le calcul de $F_{b,Rd}$	$\alpha_{bz} = \min[e_2/(3 \cdot d_0), f_{ub}/f_u, 1]$
$\alpha_{bz} > 0.0$	$1,00 > 0,00$	vérifié
$F_{b,Rd2z} = 16060,00 \text{ [daN]}$	Résistance d'un boulon en pression diamétrale	$F_{b,Rd2z} = k_{1z} \cdot \alpha_{bz} \cdot f_u \cdot d \cdot t_i / \gamma_M$

VERIFICATION DE L'ASSEMBLAGE POUR LES EFFORTS AGISSANT SUR LES BOULONS

cisaillement des boulons

$e = 16 \text{ [mm]}$	Excentricité de l'effort axial par rapport à l'axe des boulons	
$M_0 = -40,95 \text{ [daN} \cdot \text{m]}$	Moment fléchissant réel	$M_0 = N_{b5,Ed} \cdot e$
$F_{NSd} = 2567,72 \text{ [daN]}$	Force résultante dans le boulon due à l'influence de l'effort axial	$F_{NSd} = N_{b5,Ed}/n$
$F_{MSd} = 0,00 \text{ [daN]}$	Effort composant dans le boulon dû à l'influence du moment	$F_{MSd} = M_0 \cdot X_{max} / \sum X_i^2$
$F_{x,Ed} = 2567,72 \text{ [daN]}$	Effort de calcul total dans le boulon sur la direction x	$F_{x,Ed} = F_{NSd}$
$F_{z,Ed} = 0,00 \text{ [daN]}$	Effort de calcul total dans le boulon sur la direction z	$F_{z,Ed} = F_{MSd}$
$F_{Rdx} = 4015,00 \text{ [daN]}$	Résistance résultante de calcul du boulon sur la direction x	$F_{Rdx} = \min(F_{vRd}, F_{bRd1x}, F_{bRd2x})$
$F_{Rdz} = 3854,40 \text{ [daN]}$	Résistance résultante de calcul du boulon sur la direction z	$F_{Rdz} = \min(F_{vRd}, F_{bRd1z}, F_{bRd2z})$
$ F_{x,Ed} \leq F_{Rdx}$	$ -2567,72 < 4015,00$	vérifié (0,64)
$ F_{z,Ed} \leq F_{Rdz}$	$ 0,00 < 3854,40$	vérifié (0,00)

VERIFICATION DE LA SECTION DE LA POUTRE AFFAIBLIE PAR LES TROUS

$N_{u,Rd} = 9811,20 \text{ [daN]}$	Résistance de calcul de la section nette	$N_{u,Rd} = [2 \cdot (e_2 - 0.5 \cdot d_0) \cdot t_5 \cdot f_{u5}] / \gamma_{M2}$
$N_{pl,Rd} = 22355,55 \text{ [daN]}$	Résistance de calcul plastique de la section brute	$N_{pl,Rd} = (0.9 \cdot A \cdot f_{y5}) / \gamma_{M2}$
$ N_{b5,Ed} \leq N_{u,Rd}$	$ -2567,72 < 9811,20$	vérifié (0,26)
$ N_{b5,Ed} \leq N_{pl,Rd}$	$ -2567,72 < 22355,55$	vérifié (0,11)

VERIFICATION DE LA BARRE POUR LE CISAILLEMENT DE BLOC

$A_{nt} = 2,28 \text{ [cm}^2\text{]}$	Aire nette de la zone de la section en traction
$A_{nv} = 1,08 \text{ [cm}^2\text{]}$	Aire de la zone de la section en traction

$A_{nt} = 2,28$ [cm²] Aire nette de la zone de la section en traction
 $V_{effRd} = 4794,11$ [daN] Résistance de calcul de la section affaiblie par les trous $V_{effRd}=0.5*f_u*A_{nt}/\gamma_{M2} + (1/\sqrt{3})*f_y*A_{nv}/\gamma_{M0}$
 $|N_{b5,Ed}| \leq V_{effRd}$ $|-2567,72| < 4794,11$ **vérifié** (0,54)

REMARQUES

Entraxe des boulons sur la barre 3 trop faible 0 [mm] < 53 [mm]
Entraxe des boulons sur la barre 5 trop faible 0 [mm] < 53 [mm]

Assemblage satisfaisant vis à vis de la Norme

Ratio 0,64

ANNEXE-C-

Logiciel ROBOT

Description générale du logiciel ROBOT :

Le logiciel Autodesk Robot Structural Analysis (nommé *ROBOT* dans le fichier d'aide entier) est un progiciel destiné à modéliser, analyser et dimensionner les différents types de structures.

ROBOT permet de créer les structures, les calculer, vérifier les résultats obtenus, dimensionner les éléments spécifiques de la structure ; la dernière étape gérée par *ROBOT* est la création de la documentation pour la structure calculée et dimensionnée.

Le mode opératoire : Le mode opératoire du *ROBOT* peut se diviser en trois grandes étapes

Les étapes de notre travail :

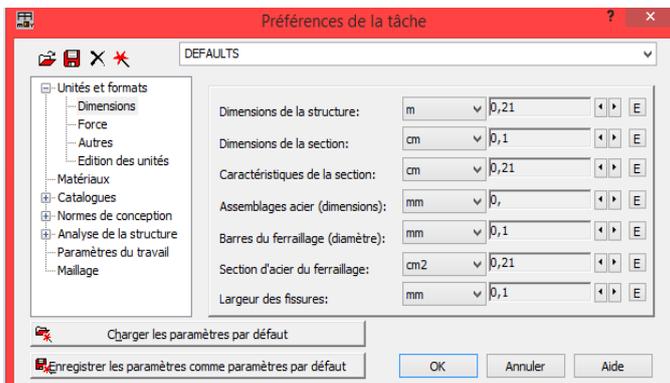
Définition du modèle de la structure :



Pour notre cas, on étudiera une structure en portique spatial en sélectionnant :

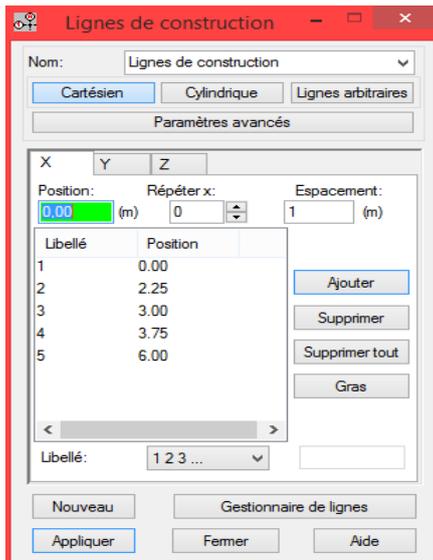


1. a-Choix de la structure à étudiée.



Pour définir les différents paramètres tels que les matériaux, unités et normes de l'affaire on accède à la commande « *préférence de l'affaire* », en cliquant sur l'icône « *outil* ».

1. b- Préférence de l'affaire.



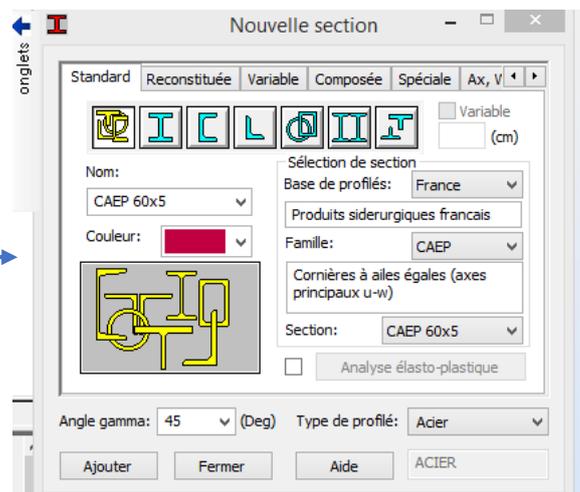
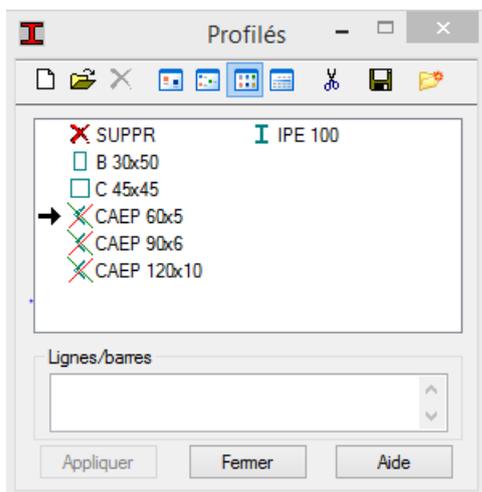
Dans le menu « *Structure* », on clique sur l'icône



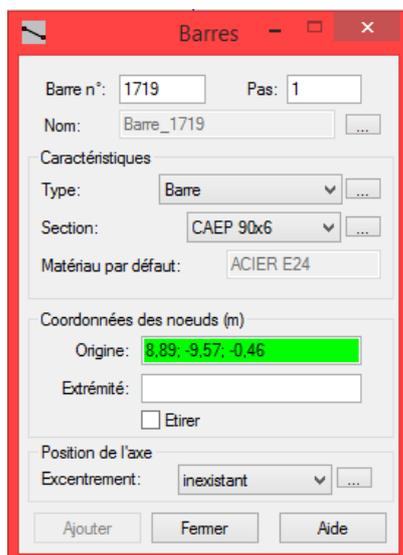
Lignes de construction.

1. c- Lignes de construction

Choix des profilés de barres : Dans le menu « *structure* » « *caractéristiques* » « *profilés de barres* », Il apparait la boîte de dialogue ci-après, et on définit un nouveau profilé on clique sur

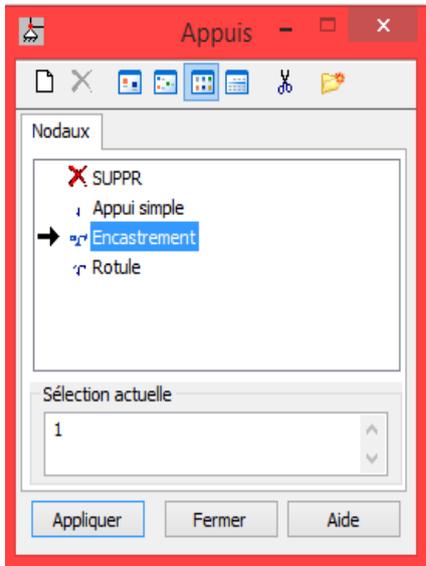


1. d- Choix des profilés de barres.



Création des barres : Dans le menu « *structure* », on clique sur l'icône « *barre* » pour choisir l'élément (barre) et sa section, puis on les affecte suivant les lignes de construction.

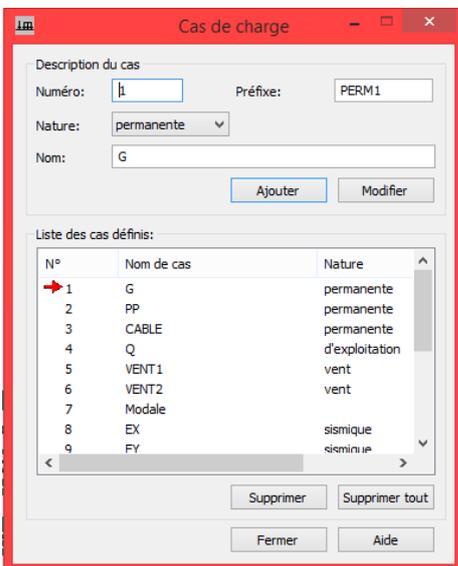
1. e- Modélisation des barres.



Définition des degrés de liberté des nœuds de la base :

Afin d'effectuer les appuis dans notre structure on clique sur l'icône  «appuis», on choisit les encastrements nodaux.

1. f- Définition des appuis.

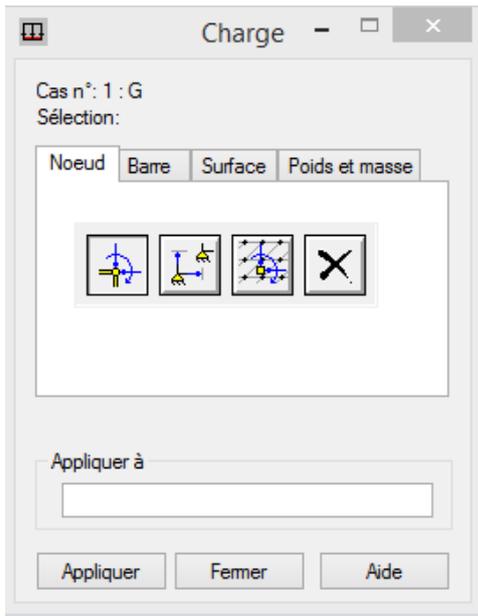


Définition des cas de charges :

Pour définir les charges statiques (permanentes et d'exploitation) de la structure, on clique sur l'icône  « Cas de charges », on choisit le nom et la nature de la charge puis on clique sur

« Nouveau ».

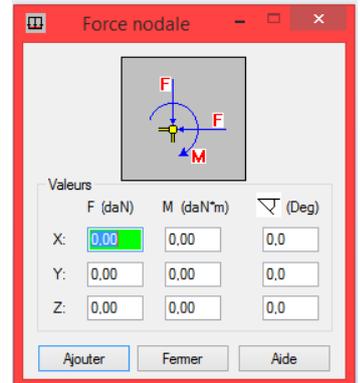
1. g- Définition des charges.



Chargement de la structure :

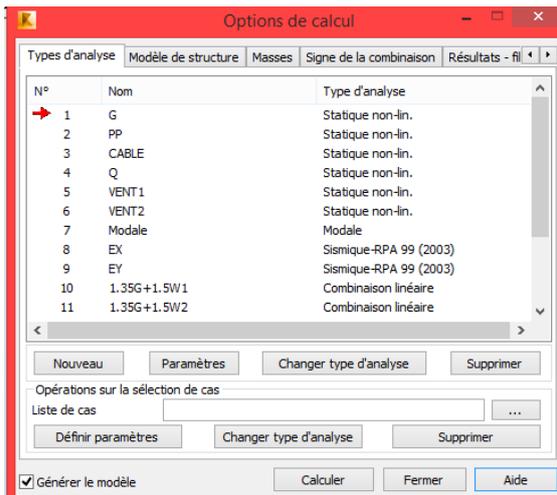
Pour charger la structure on choisit le type de charge, puis on sélectionne dans le menu

« *Charge* », « *autres charges* »,
« **Charge nodale** », on introduit la valeur de G ou Q dans la zone « **charge** »



1. h- Application des charges nodales.

Définition des options de calcul :

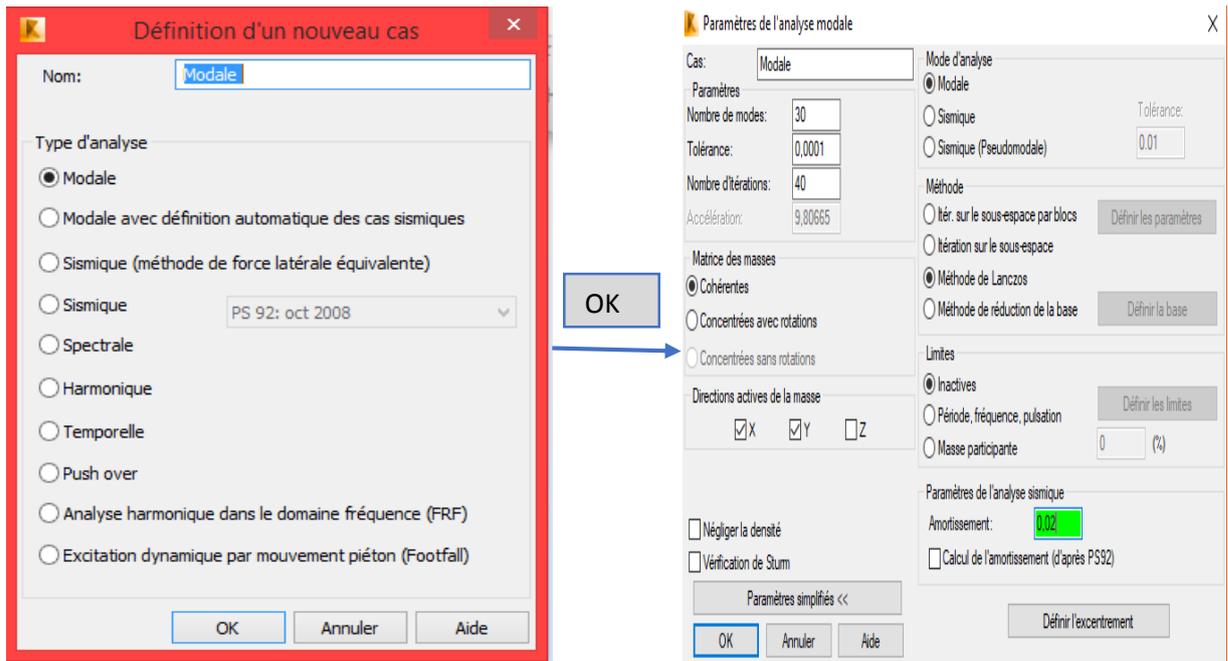


On clique sur le menu « *Analyse* », « *Type d'analyse* » une boîte de dialogue apparaît.

Où on peut choisir les options de calcul à savoir le type d'analyse (modale et sismique).

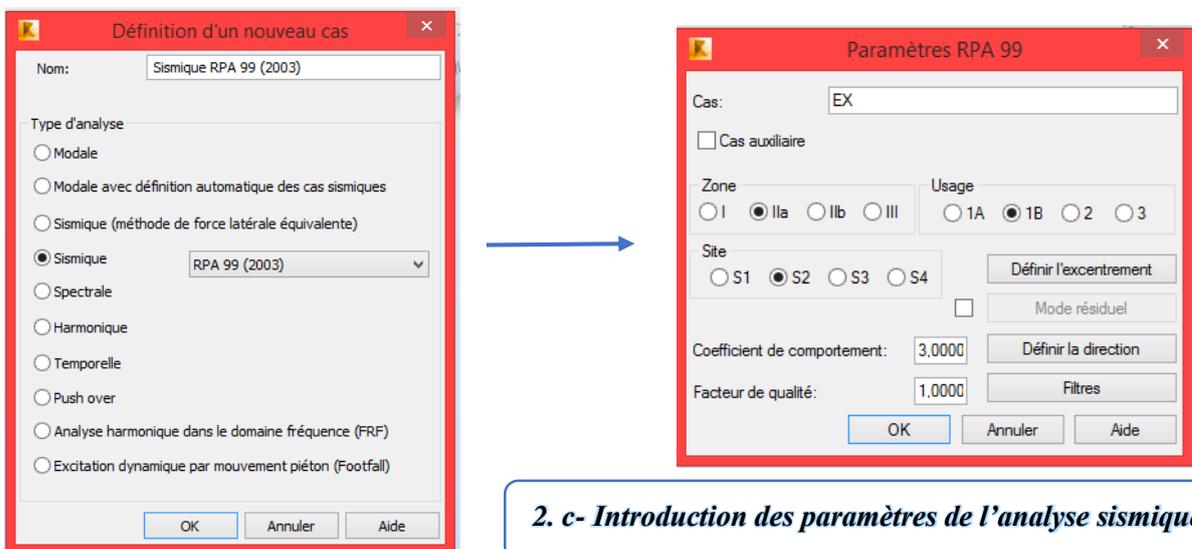
2. a- Définition des charges dynamiques.

On clique sur « *nouveau* » et sélectionne le champ « *modale* », on introduit les paramètres de l'analyse modale dans la boîte de dialogue qui s'affiche après la validation de la précédente.



2. b- Introduction des paramètres de l'analyse modale.

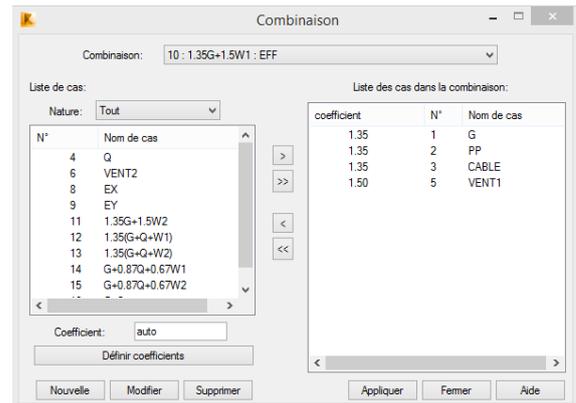
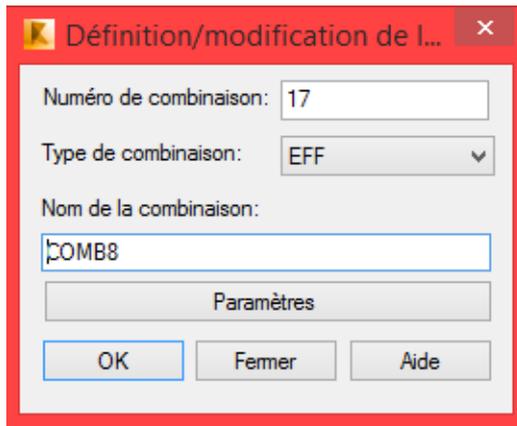
On clique une autre fois sur « *nouveau* », on coche la case sismique, on choisit le RPA 99 version 2003 et on valide.



2. c- Introduction des paramètres de l'analyse sismique.

Les combinaisons d'actions :

Dans le menu « *charges* », « *combinaison manuelle* », on choisit le type de la combinaison et sa nature. Pour faire une autre combinaison on clique sur « *nouvelle* » et en refait les même opérations pour les autres combinaisons.



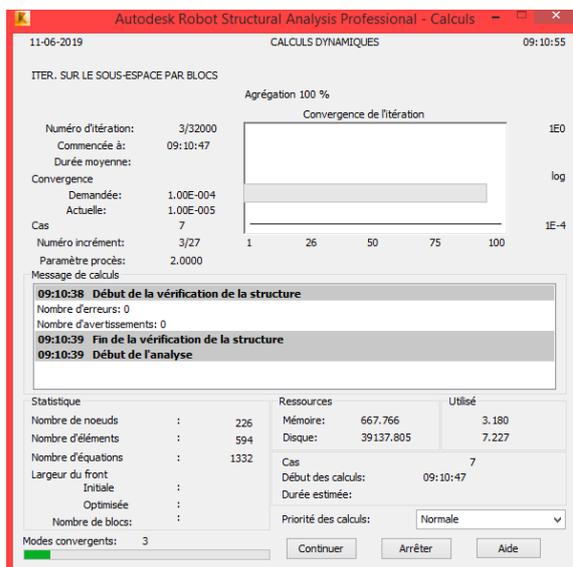
2. d- Définition des combinaisons d'actions.

Vérification de la structure :



Dans le menu « *Analyse* » on clique sur « *Vérifier la structure* » et s'il y a des erreurs dans la modélisation de la structure ROBOT nous affiche le nombre et la natures de ces erreurs.

2. e- Vérification de la structure.

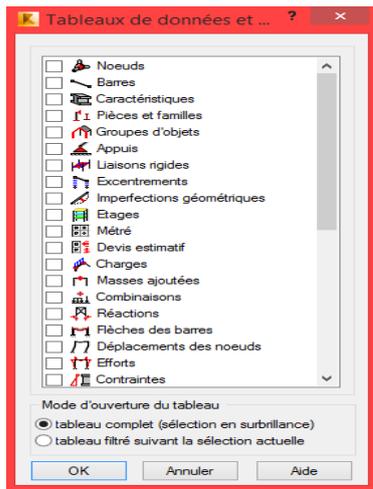


Analyse de la structure : Dans le menu « *analyse* »,

« *Calculer* », on lance le calcul de la structure.

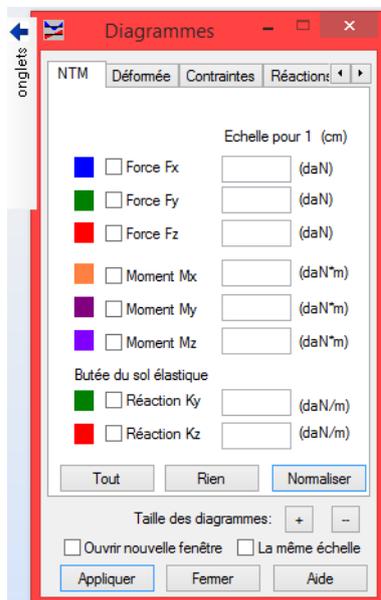
2. f- Calcul de la structure.

Exploitation des résultats :



Pour afficher les différents résultats qu'on veut (diagrammes, réactions, flèches, contraintes, déplacements, ...) on clique sur le menu « **Affichage** », et si on veut un affichage sous forme des tableaux il suffit de cliquer sur le bouton droit de la souris et on choisit « **tableaux** ».

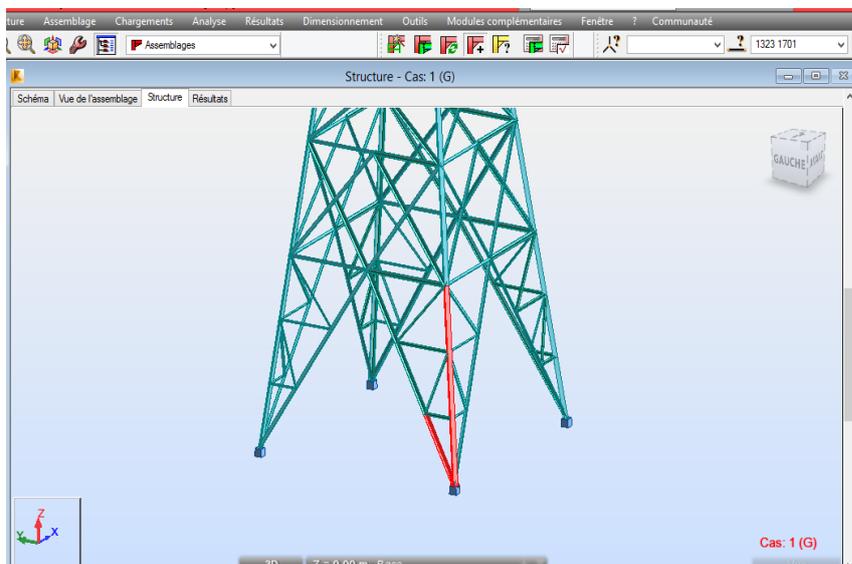
3. a- Affichage des résultats sous forme des tableaux.



Dans le menu « **résultat** » on sélectionne « **Diagramme** » et on clique sur la case « **paramètre** » pour régler l'affichage des diagrammes, puis on fait notre choix sur les différents onglets (NTM, déformée, contraintes, réactions,).

3. b- Affichage des diagrammes des efforts dans les barres.

Assemblage :



Vérification assemblage

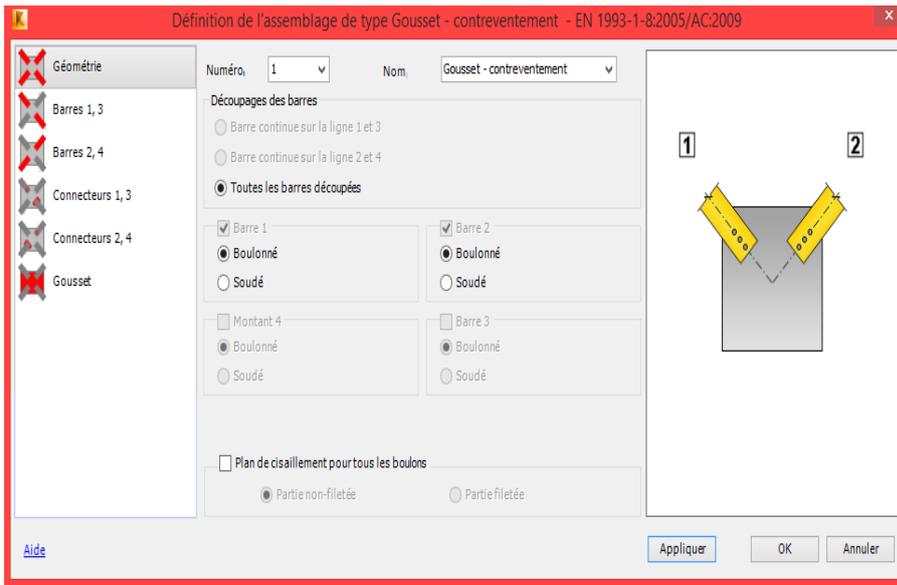
acier : Dans le menu « **structure** », on clique sur

l'icône

Sélectionnée le nœud et les barres et on clique sur l'icône



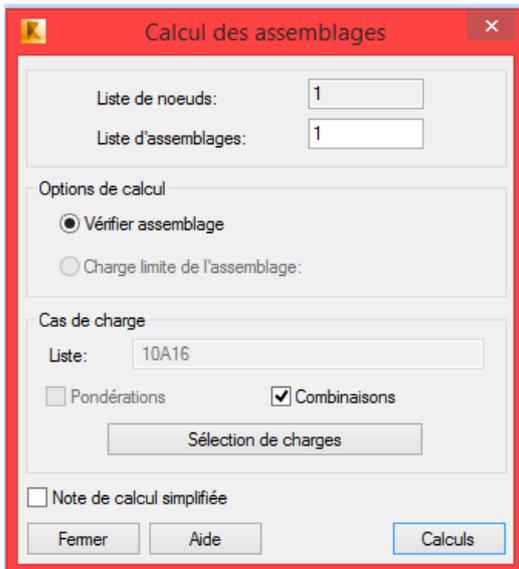
3. c- Vérification assemblage acier.



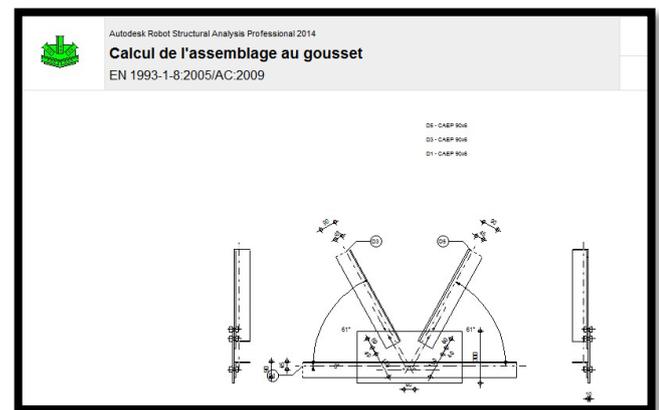
Dans cette fenêtre on choisit les caractéristiques des boulons et gousset (classe et diamètre des boulons et les dimensions du gousset).

3. d- Créer un nouvel assemblage de la structure.

Pour lancer le calcul on clique sur l'icône



Calculs



3. d- Créer un nouvel assemblage de la structure.

ANNEXE -D-

Rapport de sol

INTRODUCTION :

La présente étude de sol concerne un projet de logement est considérée comme un plan de travail à suivre pour notre projet (pylône métallique).

A cet effet, le Laboratoire a entrepris une étude géotechnique du sol préalable à l'exécution d'un projet de réalisation d'un pylône à Bordj Bou Arreridj, dont il fournit dans le présent rapport les résultats de ses reconnaissances.

BUT ET DEROULEMENT DE L'ETUDE

Le but de la présente étude est de fournir des éléments d'appréciation sur l'aptitude du sol du site à l'implantation et à la constructibilité, à même de recevoir l'implantation des futurs pylônes et des risques éventuels qui y sont liés.

Nos travaux d'investigation se sont déroulés en deux phases :

- ✓ Reconnaissance in situ ;
- ✓ Caractérisation géotechnique des échantillons de sol en laboratoire.

RECONNAISSANCE DU SITE

Situation -description du site

Le projet en question est implanté au périphérique nord de la ville de Bordj Bou Arreridj, près de la route menant à BIR SNAB ;

La configuration du terrain est illustrée par la photo suivante :



Ainsi, en proposant comme type de fondation les semelles superficielles, et sur la base des caractéristiques physiques et mécaniques de la couche considérée. Nous allons calculer la contrainte admissible du sol par la relation de Terzaghi suivante :

$$Q_{adm} = \gamma D + 1/3 [0.5BN_{\gamma} + \gamma D(N_q - 1) + cNc]$$

En substituant les valeurs à la relation suivante, le calcul a abouti aux résultats ci-après :

**RESULTATS DE CALCUL D'UNE FONDATION SUPERFICIELLEA PARTIR DES
RESULTATS DES ESSAIS DE LABORATOIRE**

Profondeur d'ancrage : 1.5 mètres

Type de semelle : Semelle isolées.

Couche N°	Profondeur (m)	$\varphi(^{\circ})$	Cu (bars)	Densité (t/m ³)
1	1.55	10	0.52	2.5

**TABLEAU
RECAPITULATIF DU CALCUL DE PORTANCE**

Couche N°	B(m)	L(m)	N _γ	N _q	N _c	Qadm/bars
1	1.5	1.5	1.43	2.97	9.28	3.01

CONTRAINTES RETENUES : =3.01 BARS

Évaluations des tassements.

Tant il n'y a aucune couche molle en profondeur pouvant constituer un siège de tassements, ces derniers ne sont pas à craindre sous la fondation dans la mesure où le sol support est composé essentiellement d'un substratum marneux. Ce qui ne donnera lieu à aucun tassement nuisible.

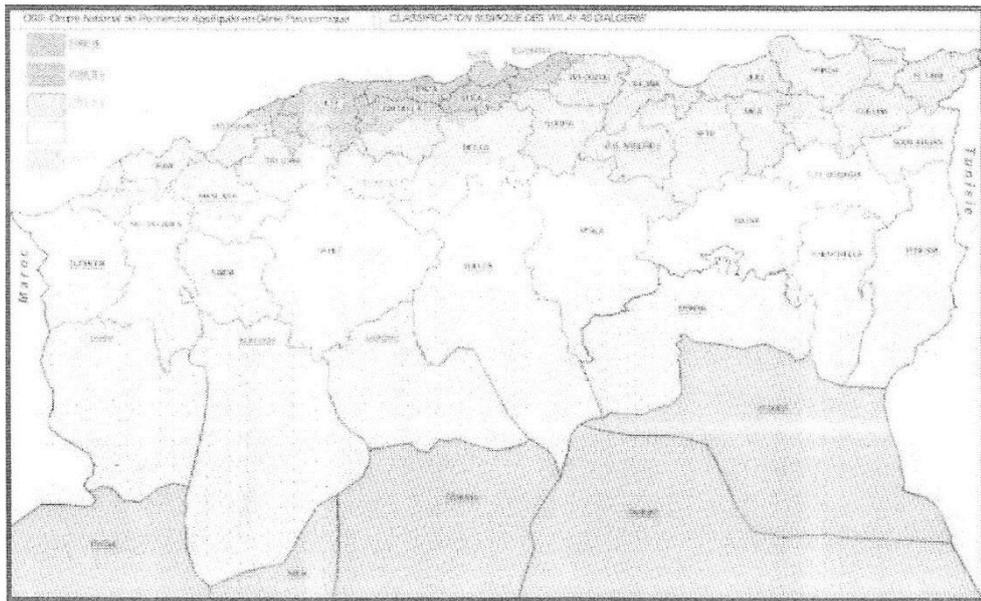
Dans ce cas les tassements induits par les structures au sol qui travaillera à la contrainte de service ci-dessus sont pratiquement négligeables.

STABILITE DU SITE ET RISQUE :

Le projet étant implanté sur un terrain en pente douce dans sa globalité de point de vue topographique ce site est stable et ne présente aucun risque particulier.

La nature géologique du terrain qui plus au moins compacte nous a conduits à classer ce site dans la catégorie **S2** selon le **RPA99/ version 2003**.

En ce qui concerne la sismicité de la région dont l'intensité est moyenne, il convient de rappeler dans ce sens l'impérative application des règles parasismiques dans la conception des ouvrages.



FONDATION

Mode de fondation

Compte tenu de ce que nous sommes en présence d'un milieu homogène : marne très compact, nous proposons de fonder le pylône sur des **semelles isolées** ancrées dans la marne schisteuse à une profondeur de **1.5m** à partir du niveau aménagé.

Calcul de capacité portante :

La reconnaissance in situ menée aux sondages et complétée par les essais de pénétration dynamique a mis en évidence un terrain qui est constituée essentiellement par un substratum marneux, ce dernier présente une aptitude favorable dans l'optique de sa constructibilité.

CONCLUSION

L'étude géotechnique préalable à la réalisation d'un pylône métallique à BBA nous amène à

conclure
ainsi :

Le site étudié est localisé au périphérique nord de la ville de Bordj Bou Arreridj près de la route menant à Bir Snab. Il s'agit d'une plateforme en pente douce couverte-par endroit- par des remblais hétérogène en tas.

La reconnaissance géotechnique au moyen des sondages carottés, complétés par des sondages mécaniques au pénétromètre dynamique, a mis en évidence une succession lithologique homogène, tant dans l'espace qu'en profondeur, constituée essentiellement, par un substratum marneux en profondeur supérieur à 1.5m de profondeur, ce dernier est couvert par une couche d'argile et des remblais en tas.

En laboratoire, les résultats d'essais physiques et mécaniques indiquent que la marne possède des très bonnes caractéristiques géotechniques.

Les essais de pénétration ont révélé une résistance forte au sommet et très forte à la côte du refus, qui se situe à une profondeur de 2.0m, indiquant la bonne compacité du terrain.

Sur la base des informations issues de notre investigation, nous préconisons des dispositions constructives suivantes :

- La configuration actuelle du site, caractérisée par un terrain en pente douce couvert par des tas en remblais laissant prévoir des travaux d'aménagement pour aménager une plateforme.
- Fonder le pylône sur des semelles isolées ancrées à une profondeur (**D**) de **1.5m**, à partir du niveau aménagé.
- Retenir une contrainte admissible **Q_{ad}=3.0** bars à ce niveau.
- Enfin, le sol est indemne de sulfates, d'où absence d'agressivité. L'utilisation d'un ciment normal peut convenir pour la confection du béton de fondation.

Fin.

