

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

BADJI MOKHTAR-ANNABA UNIVERSITY  
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA



جامعة باجي مختار - عنابة

ANNEE 2016

FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIORAT  
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de MASTER

***ANALYSE DE LA STABILITE DES PYLONES A TREILLIS***

Spécialité :

STRUCTURE

Présenté par : M<sup>elle</sup> HADI Samia

M<sup>elle</sup> MEZHOUD Na ma

DIRECTEUR DU MEMOIRE : DJEGHABA KAMEL Pr., GENIE CIVIL, UBM ANNABA

DEVANT LE JURY :

EXAMINATEURS : GOUASMIA ABDELHACINE

MEZIGHECHE NAWAL



# بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

إِنِّي تَوَكَّلْتُ عَلَى اللَّهِ رَبِّي وَرَبِّكُمْ مَا مِنْ دَابَّةٍ إِلَّا  
هُوَ أَخَذُ بِنَاصِيئِهَا إِنَّ رَبِّي عَلَى صِرَاطٍ مُسْتَقِيمٍ

---



# Remerciements



*Tout d'abord, nous tenons à remercier dieu clément et miséricordieux de nous avoir donné la force et le courage de mener à bien ce modeste travail.*

*Nous citons nommément :*

- Notre encadreur **PR.DJEGHABA KAMEL** 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*

*Nous remercions aussi tous particulièrement **M.ZAHOUI SALIMA** pour l'aide qu'elle 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.*



*Mezhoud naïma  
Hadi samia*



# TABLEAU DES MATIERES

INTRODUCTION .....	1
<b>CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES PYLONES.</b>	
I.1. Définition de pylône .....	3
I.2. Les type de pylônes .....	3
I 2.1. Pylône auto-stable (en treillis) .....	3
I 2.2.Pylône haubané .....	6
I 2.3. Les pylônes monomodes .....	7
I.3. Choix des matériaux .....	10
I.4. Type des câbles .....	11
I. 4.1.Nature et section des conducteurs de phase .....	11
I.4.2. Nature et section des câbles de garde .....	12
I.5.Les charges transmises aux pylônes .....	12
I.6.Les règlements .....	14
I.6.1. Normes utilisées pour le dimensionnement des pylônes. ....	14
I.6.2. EUROCODE 3 (EC3).....	14
I.6.3. Règles Neige et vent R.N.V 1999.....	14
<b>CHAPITRE II : ANALYSE DE L'INSTABILITE DES STRUCTURES.</b>	
II.1. Introduction .....	16
II.2. L'instabilité des pylônes .....	17
II.3. Exemples d'instabilité de pylônes.....	17
II.4. phénomènes d'instabilité.....	21
II.4.1. Flambement .....	21
II.4.2. Déversement.....	26

<b>II.4.3.Voilement.....</b>	<b>27</b>
------------------------------	-----------

## **CHAPITRE III : MODELE DE CALCUL.**

<b>III.1.Introduction .....</b>	<b>29</b>
<b>III.2. Description et justification de la solution.....</b>	<b>29</b>
<b>III.2. 1.Choix de la structure.....</b>	<b>29</b>
<b>III.2.2.Choix du type de profilé.....</b>	<b>30</b>
<b>III.2.3. Evaluation des charges .....</b>	<b>31</b>
<b>III.3.Méthode de calcul.....</b>	<b>31</b>
<b>III.3.1. Calcul de l'action du vent .....</b>	<b>31</b>
<b>III.3.2.Calcul de charge de câble .....</b>	<b>49</b>
<b>III.3.3 .L'effet P-delta .....</b>	<b>51</b>

## **CHAPITRE IV: TEST DE VALIDATION.**

<b>IV.1. Introduction.....</b>	<b>53</b>
<b>IV.2. Présentation du logiciel et de son environnement .....</b>	<b>53</b>
<b>IV.3. Présentation de la structure.....</b>	<b>55</b>
<b>IV.3.1. Pylône de type A.....</b>	<b>55</b>
<b>IV.3.2. Pylône de type C.....</b>	<b>57</b>
<b>IV.4.Les cas de charges élémentaires.....</b>	<b>59</b>
<b>IV.5.Calcul linéaire de vérification du dimensionnement.....</b>	<b>69</b>
<b>IV.6.Analyse de flambage.....</b>	<b>71</b>

## **LISTE DES TABLEAUX**

<b>Tableau 1 : II-4. 1: Longueurs du flambement selon le type d'appui.....</b>	<b>23</b>
<b>Tableau 2 : II-4.1 : Exemple des résultats de calcul du coefficient d'amplification des moments.....</b>	<b>24</b>
<b>Tableau 3:II-4.1 : Valeur du facteur d'imperfection.....</b>	<b>26</b>
<b>Tableau4:III- 2.2 : les valeurs de la limite à la rupture et de la limite d'élasticité des cornières.....</b>	<b>30</b>
<b>Tableau5 : III-3.1 : le coefficient de rugosité et l intensité de la turbulence Pylône (A).....</b>	<b>48</b>
<b>Tableau6 : III-3.1 : la pression due au vent Pylône (A).....</b>	<b>48</b>
<b>Tableau7 : III-3.1 : le coefficient de rugosité et l intensité de la turbulence Pylône (C).....</b>	<b>49</b>
<b>Tableau8 : III-3.1 : la pression due au vent Pylône (C).....</b>	<b>49</b>
<b>Tableau 9 : IV-3.1 : types des cornières du pylône (A).....</b>	<b>57</b>
<b>Tableau 10: IV-3.2 : types des cornières du pylône (C).....</b>	<b>59</b>
<b>Tableau 11 : IV-4 : la pression due au vent du Pylône (A).....</b>	<b>60</b>
<b>Tableau 12 : IV-4 : la pression due au vent du Pylône (C).....</b>	<b>60</b>
<b>Tableau 13 : IV-4 : La charge de vent du Pylône (A) dans plan( Z-Y).....</b>	<b>61</b>
<b>Tableau 14 : IV-4 : La charge de vent du Pylône (C) dans plan( Z-Y).....</b>	<b>61</b>
<b>Tableau 15 : IV-4 : La charge de vent du Pylône (A) dans plan( Z-X).....</b>	<b>64</b>
<b>Tableau 16 : IV-4 : La charge de vent du Pylône (C) dans plan( Z-X).....</b>	<b>64</b>

## LISTE DES FIGURES

<b>Figure 1: I-2.1: Pylône chat.....</b>	<b>4</b>
<b>Figure 2:I-2.1 : Pylône à trois triangles.....</b>	<b>4</b>
<b>Figure 3:I-2.1 : Pylône électrique de type Beaubourg.....</b>	<b>4</b>
<b>Figure 4:I-2.1 : Pylône électrique Trianon.....</b>	<b>5</b>
<b>Figure 5:I-2.1 : Pylône électrique portique.....</b>	<b>5</b>
<b>Figure 6:I-2.1 : Pylône électrique portique en bois.....</b>	<b>5</b>
<b>Figure 7:I-2.2 : Pylône électrique haubané en V.....</b>	<b>6</b>
<b>Figure 8:I-2.2 : Pylône électrique à chaînette.....</b>	<b>7</b>
<b>Figure 9:I-2.3 : pylônes monomodes.....</b>	<b>8</b>
<b>Figure 10:I-2.3 : Pylône électrique Muguet .....</b>	<b>9</b>
<b>Figure 11:I-2.3 : Pylône monomode Fougère .....</b>	<b>9</b>
<b>Figure 12:I-2.3: pylône monomode Roseau .....</b>	<b>9</b>
<b>Figure 13:I-5: Face Elévation, Face profil et Axe de la Ligne.....</b>	<b>13</b>
<b>Figure 14 : II-3 : Vue de la rupture de pylône.....</b>	<b>18</b>
<b>Figure 15:II-3 : Vue de la rupture et des barres flambées de pylône.....</b>	<b>18</b>
<b>Figure 16:II-3 : Un pylône électrique pour lignes à haute tension .....</b>	<b>19</b>
<b>Figure 17:II-3 : Pylônes t complètement tordus suite à la plastification totale de ses éléments causée par une tempête.....</b>	<b>19</b>
<b>Figure 18:II-3: Un pylône électrique endommagé par une grande Plastification /flambement a cause d'un tempête –ruine.....</b>	<b>20</b>
<b>Figure 19:II-3 : Ruine d'un pylône sous Le poids de la glace accumulé sur les ligne de transmission.....</b>	<b>20</b>
<b>Figure 20:II-4.1 : Poutre bi-articulée soumise a un effort normal.....</b>	<b>21</b>
<b>Figure 21:II-4.1 : Courbe contrainte critique-élancement maximal .....</b>	<b>22</b>
<b>Figure 22:II-4.1: Coefficient de réduction en fonction de l'élancement réduit ( ).....</b>	<b>26</b>

<b>Figure 23:II-4.2 : Phénomène du Déversement.....</b>	<b>27</b>
<b>Figure 24:II-4.3 : Phénomène du voilement .....</b>	<b>28</b>
<b>Figure 25:III-3.1: les hauteurs du pylône de Type A .....</b>	<b>33</b>
<b>Figure 26:III-3.1 : les hauteurs du pylône de Type C.....</b>	<b>34</b>
<b>Figure 27:III-3.1 : les Tronçon du pylône de Type A.....</b>	<b>36</b>
<b>Figure 28:III-3.1 : Figure 28:III-3.1:les Tronçon du pylône de Type C.....</b>	<b>37</b>
<b>Figure 29:III-3.1 : <i>Facteur d'élanement</i> .....</b>	<b>44</b>
<b>Figure 30:III-3.2 : schéma de charge de câble du pylône (A).....</b>	<b>50</b>
<b>Figure 31 : III-3.2 : schéma de charge de câble du pylône (C).....</b>	<b>50</b>
<b>Figure 32 : III-3.2 : vecteur de charge de câble pylône (A) .....</b>	<b>51</b>
<b>Figure 33 : III-3.2 : vecteur de charge de câble pylône (C).....</b>	<b>51</b>
<b>Figure 34: III-3.3 : schéma présent l'effet p-delta.....</b>	<b>52</b>
<b>Figure 35: IV-2: Environnement SAP 2000.....</b>	<b>54</b>
<b>Figure36 : IV-2 : Vue en 3D du pylône modélisé type (A).....</b>	<b>54</b>
<b>Figure37:IV-2 : Vue en 3D du pylône modélisé type (C).....</b>	<b>55</b>
<b>Figure38:IV-3.1 : Les sections est les appuis de pylône (A).....</b>	<b>56</b>
<b>Figure39:IV-3.2: Les sections est les appuis de pylône (C).....</b>	<b>57</b>
<b>Figure40:IV-3.2: les éléments de pylône (C).....</b>	<b>58</b>
<b>Figure41:IV-4: Charge de vent du <i>Pylône (A)</i> dans le plan Z-Y.....</b>	<b>62</b>
<b>Figure42:IV-4: Charge de vent du <i>Pylône (C)</i> dans le plan Z-X.....</b>	<b>63</b>
<b>Figure43:IV-4: Charge de vent du <i>Pylône (A)</i> dans le plan Z-X.....</b>	<b>65</b>
<b>Figure44:IV-4: Charge de vent du <i>Pylône (C)</i> dans le plan Z-X.....</b>	<b>66</b>
<b>Figure45:IV-4: la longueur réelle du câble.....</b>	<b>67</b>
<b>Figure46:IV-4: <i>Les charges des câbles pour pylône (A)</i>.....</b>	<b>68</b>

<b>Figure47:IV-4: Les charges des câbles pour pylône (C) .....</b>	<b>68</b>
<b>Figure 48: IV-5: vérification de toutes les barres du pylône (c).....</b>	<b>69</b>
<b>Figure 49: IV-5: vérification de toutes les barres du pylône (A).....</b>	<b>69</b>
<b>Figure50:IV-5:Déformation de pylône sous poids propre et charge de câble Pylône (C).....</b>	<b>70</b>
<b>Figure51:IV-5:Déformation de pylône sous l'action du vent 1et vent 2 pylône (C).....</b>	<b>70</b>
<b>Figure52:IV-5:Déformation de pylône sous l'action du vent1 et vent 2 pylône (A).....</b>	<b>71</b>
<b>Figure53:IV-6: la charge critique de mode 1 sous vent1 du pylône (A).....</b>	<b>72</b>
<b>Figure54:IV-6: la charge critique de mode 2 sous vent 1 du pylône (A).....</b>	<b>73</b>
<b>Figure55:IV-6: la charge critique de mode 3 sous vent 1 du pylône (A).....</b>	<b>73</b>
<b>Figure56:IV-6: la charge critique de mode 1 sous vent 1 du pylône (C).....</b>	<b>74</b>
<b>Figure58:IV-6: la charge critique de mode 3 sous vent 1du pylône (C).....</b>	<b>75</b>
<b>Figure57:IV-6: la charge critique de mode 2 sous vent 1du pylône (C).....</b>	<b>75</b>
<b>Figure59:IV-6: la charge critique de mode 1 sous vent 2du pylône (A).....</b>	<b>76</b>
<b>Figure60:IV-6: la charge critique de mode 2 sous vent 2du pylône (A).....</b>	<b>77</b>
<b>Figure61:IV-6: la charge critique de mode 3 sous vent 2du pylône (A).....</b>	<b>77</b>
<b>Figure62:IV-6: la charge critique de mode 1 sous vent 2du pylône (C).....</b>	<b>78</b>
<b>Figure63:IV-6: la charge critique de mode 2 sous vent 2du pylône (C).....</b>	<b>78</b>
<b>Figure64:IV-6: la charge critique de mode 3 sous vent 2du pylône (C).....</b>	<b>79</b>

## ***RESUME***

Le Présent travail concerne l'analyse de stabilité de structures de type pylône utilisée pour le transport de l'énergie électrique par câble aérien. Ces structures revêtent une importance capitale car leur ruine suite à des accident ou a des aléas climatique perturbe le transport et l'approvisionnement en énergie électrique essentielles dans la vie économique des villes.

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

Les pylônes que nous avons analysé dans notre travail sont deux modèles utilisés par la société SONELGAZ et sont actuellement en service sur nos routes. Notre travail a consisté à procéder en premier lieu à la vérification du dimensionnement de ces structures. Ensuite cette analyse a été complétée par une analyse plus poussée consistant en une analyse de flambement en utilisant le logiciel SAP2000.

L'idée étant d'évaluer le risque de flambement des éléments de ce genre de structures en évaluant les facteur multiplicateur des charges sollicitant le pylône pour arriver a la charge critique de flambement. Les tests menée sur SAP2000 ont montré que les deux pylônes telles que dimensionnés par la société SONELGAZ (choix des cornières) ont toutes leurs barres qui vérifient bien la résistance sous les sollicitations règlementaires.

Concernant l'analyse de flambement, le cas de charge critique le plus défavorable donne un facteur de charge critique élevé. Ce résultat montre que le pylône présente une bonne réserve de sécurité. Par ailleurs l'analyse montre aussi pour les cas de charges critiques, quelles sont les premières barres qui seront concernées par le flambement en cas d'actions extrêmes. Pour les modes supérieurs de flambement et donc des facteurs de charge plus élevée, nous constatons le risque de flambement qui touchent les barres supérieure situe en têtes.

Ces résultats peuvent expliquer certains accidents de pylônes suite à des actions climatiques extrêmes ou on voit pratiquement toutes les barres en ruine suite à un flambement local et ensuite au flambement de l'ensemble de la structure. Cette information peut être utile en cas de décision de renforcement de ces pylônes.

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 sensibles au phénomène d'instabilité.

# **INTRODUCTION**

### **Introduction :**

Les Structures Spatiales, au sens large, comprennent toutes ossatures capables de supporter les enveloppes de bâtiments. Plus précisément, ce terme comprend les structures généralement industrialisées et métalliques, comme les Structures pour le secteur énergétique professionnel, les Structures pour les télécommunications exemple les pylônes ,Les tabliers de ponts de grande portée, permettant la réalisation de constructions de toutes portées sans appuis intermédiaires, et utilisant leur forme, la répartition de leurs composants dans l'espace, leur mode d'assemblage, pour assurer leur stabilité sous l'effet de sollicitations extérieures, à commencer par la gravité. On peut donc considérer comme appartenant à la famille des Structures Spatiales, les Structures Tridimensionnelles, les systèmes de Poutres Croisées, les Structures Tendues.

Les Structures Tridimensionnelles, à l'exemple de structures créées par la nature pour assurer la rigidité des matériaux, sont constituées d'éléments capables de transmettre des efforts de traction ou compression, reliés entre eux et organisés selon des lois dépendant de leur finalité et des sollicitations de l'ouvrage Jusqu'aux années 1960, pratiquement tous les treillis étaient en plans.

Bien que les systèmes spatiaux fussent proposés au début du XXème siècle, leur utilisation pratique s'est accrue à partir des développements les plus récents dans le domaine des méthodes informatiques de calcul, à partir du besoin fonctionnel d'espace libre entre les poteaux et à partir d'exigences relatives à l'aspect architectural. Ces type de structure qui en générale en charpente métallique reconnu pour ses nombreux avantages :

- Leur rigidité minimise les flèches.
- Elles ont une très bonne résistance au feu
- Elles ont une très bonne résistance au feu
- Leur forme autorise une préfabrication en usine en éléments modulaire, faciles à transporter. La précision de la fabrication assure la facilité d'assemblage et de montage.
- Les structures tridimensionnelles peuvent recevoir des charges dans n'importe quelle direction.

- Leur installation est réalisée par boulonnage et peut être faite quelles que soient les conditions climatiques.
- Elles ont des qualités esthétiques indiscutables.
- Ainsi qu'un faible poids propre ce qui implique une utilisation économique des matériaux comme l'acier.

Ces structure en treillis est très utilise après de la révolution industrielle dans plusieurs applications en génie civil comme les pylônes qui jouent un rôle important dans le cas de structures qui doivent être construites en grande quantité comme c'est le cas pour les pylônes transportant l'électricité. En effet, les lieux de production d'électricité sont souvent éloignés des centres urbains qui la consomment et il est donc nécessaire de la transporter sur de longues distances. Qui nécessite un très grand nombre de ces structures pour parcourir de telles distances.

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 d'instabilité sur de structure de type pylône. Pour se rapprocher de cas réel, nous avons mené notre étude sur des pylônes utilisés par l'entreprise SONELGAZ qui est actuellement en services en Algérie. Le But étant d'anticiper les éventuelles instabilités d'éléments locaux composants le pylône (comme le flambement local barre par exemple). Cette analyse est menée au moyen d'une analyse numérique utilisant le logiciel SAP2000 dans un comportement d'analyse linéaire et d'analyse non linéaire incluant le flambement en en tenant compte de l'effet P-Delta.

Pour cela notre travail dans ce mémoire est organisé comme suit :

Chapitre **I** : dans le chapitre 1, nous présentons **généralités sur les pylônes**

Chapitre **II** : dans le chapitre 2, nous présentons **Analyse de l'instabilité des structures**

Chapitre **III** : dans le chapitre 3, nous présentons **modèle de calcul**

Chapitre **IV** : dans le chapitre 4, nous présentons **test de validation**

### **I.1.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.2.-Les types de pylônes :**

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 engendrées, 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 monomodes, autoportants et haubanés.**

#### **I.2.1.Pylône auto-stable (en treillis) :**

Les pylônes autoportants sont des structures métalliques constituées par un assemblage de membrures formant un treillis rigide fixées au sol par des fondations en béton et dotés d'une structure ouverte ou fermée. Ils sont destinés à la plupart des lignes de transport de l'électricité, sous forme de courant alternatif ou de courant continu et sont plus adaptés pour les grandes hauteurs. Ces structures sont légères non encombrantes, et ne présente pas une grande surface exposée au vent. . Il comporte un fût quadrangulaire et des consoles ou des traverses. Les fondations sont généralement à pieds séparés.. Les membrures du pylône sont réalisées en fer cornière laminé à chaud ou en sections de tube convenablement protégées par galvanisation à chaud. Ils 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. Ils résistent au renversement par le poids des fondations.

Il existe plusieurs modèles de pylônes à treillis

- **Pylône à un triangle**
- **Pylône à deux**



**Fig1 : I-2.1 : Pylône chat**



**Fig2 : I-2.1 : Pylône à trois triangles**

- **Pylône à quatre triangles**
- **Pylône à six triangles**
- **Pylône F4 ou Beaubourg :**



**Fig3 : I-2.1 : Pylône électrique de type Beaubourg**

- pylône F88
- pylône Trianon :
  - Le pylône Trianon peut mesurer de 25 mètres à 35 m et fait respectivement 12 tonnes en 220 kV. et 21 tonnes en 400 kV.



**Fig4 : I-2.1 : Pylône électrique Trianon**

- Pylône portique



**Fig5 : I-2.1: Pylône électrique portique**



**Fig6 : I-2.1 : Pylône électrique portique**

**en bois**

### **I.2.2.Pylône haubané :**

Les pylônes haubanés sont plus légers, Ces derniers doivent résister à des efforts obliques d'arrachement. C'est un mât soutenu par des haubans ou câbles en acier, ils sont en général de sections triangulaire constante tout au long de la structure. Les membrures et treillis sont en cornières à 90° ou 60°, ou en tube galvanisé. Les haubans sont en câble d'acier galvanisé. Ils sont fixés au pylône tous les 15 à 30m. L'ancrage des haubans peut être assuré par massif en béton enterré ou par remblai fixant la semelle du dispositif d'ancrage. 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.

L'installation des haubans nécessite l'acquisition d'un terrain de plus grande étendue que pour un pylône auto-stable, ce qui augmente évidemment le coût et peut entraîner des retards dans les procédures.

- **Pylône haubané en V**

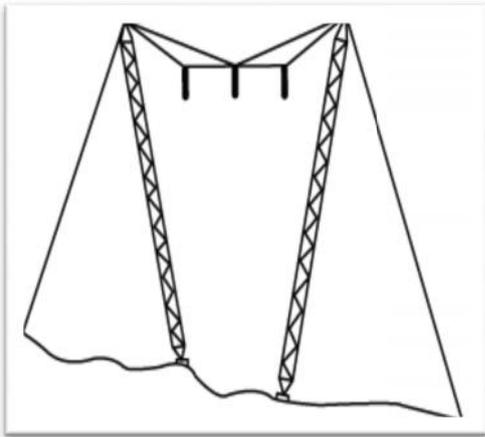
Le pylône en V haubané est un pylône métallique en treillis. À la différence du pylône traditionnel, son fût forme un V fermé par la console. Il est fixé au sol par sa base et par quatre haubans en acier d'un diamètre de 12,7 mm tendus à un angle de 35°. Il a l'avantage d'être beaucoup plus léger que le pylône en treillis traditionnel. Un pylône en V pèse 11,8 t plutôt que 21 pour celui en treillis. et permet d'allonger les portées à 460 m en moyenne.



**Fig7 : I-2.2 : Pylône électrique haubané en V**

- **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.



**Fig8 : I-2.2 : Pylône électrique à chaînette**

### **I.2.3. Les pylônes monomodes :**

**Les pylônes monomodes** qui appliquent des efforts horizontaux et des moments de renversement sur la fondation, sont généralement de forme cylindrique en béton, ce qui permet de les construire selon le procédé des coffrages glissants. Ils présentent de nombreux avantages :

- Ils nécessitent un entretien beaucoup moins important que les pylônes métalliques
- Malheureusement ces tours en béton sont onéreuses, environ 3 fois plus que le prix du **pylône autoporteur**.



**Fig9 : I-2.3 : pylônes monomodes**

Il ya aussi un autre type qui est 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 mono-tubulaires sont principalement utilisés dans les zones urbaines car ils offrent un encombrement réduit au niveau de leur base

- **Le pylône monomode Muguet :**

- Le pylône Muguet mesure 42 mètres et fait 15 tonnes en 220 kV.
- Le pylône Muguet mesure 54 mètres et fait 33 tonnes en 400 kV.

À partir de 1970, des recherches sont menées avec des designers pour rechercher des formes nouvelles s'intégrant mieux dans les paysages. Dès 1970, les premiers monomodes **Muguet**, en tôle pliée et soudée, sont construits en France à partir d'un modèle répandu aux États-Unis. C'est un pylône d'une structure épurée.

Après cinq ans d'études, d'essais et quelques installations ponctuelles, en 1977 ils sont utilisés sur une ligne de 225 kV et en 1983 sur une ligne de 400 kV.



**Fig10 : I-2.3 : Pylône électrique Muguet**



**Fig11 : I-2.3 : Pylône monomode Fougère**



**Fig12 : I-2.3 : pylône monomode Roseau**

### I.3.Choix des matériaux :

#### ❖ Finalités de la construction :

- La majorité des pylônes doit être :
- **Résistant et stable** : On doit pour cela avoir une sécurité suffisante avec l'impératif de l'économie.
- **Durable** : Pour éviter des entretiens trop fréquents.
- **Economique** : 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...

Une conception ne peut être jugée bonne que si elle passe principalement par un point primordial qui est le choix des matériaux adéquats à la structure.

#### ❖ Matériaux structuraux :

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

- ✓ **le bois** : Ne convient pas parce que Il n'est pas assez résistant pour des hauteurs importantes et représente par ailleurs des difficultés de point de vue réalisation donc non économique (
- ✓ **béton armé** : 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.
- ✓ **Métallique (et plus spécialement l'acier)** : le plus lus utilisé

C'est la meilleure solution vu les avantages suivants :

- -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 et d'ailleurs moins corrodants. D'où on utilisera la nuance Fe E24 disponible sur le marché algérien

### **I.4. Type des câbles :**

#### **I.4.1.Nature et section des conducteurs de phase :**

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 de ACSR (Aluminium Conductor Steel Reinforced), les conducteurs homogènes en alliage d'aluminium connus sous le diminutif de AAAC (All Aluminium Alloy Conductor) et, dans une moindre mesure les conducteurs en alliage d'aluminium avec âme en fils d'acier connus sous le diminutif de ACAR (Aluminium Conductor Alloy Reinforced).

Les conducteurs AAAC sont de plus en plus utilisés car ils offrent de nombreux avantages techniques sur les conducteurs ACSR

Ils sont environ 25% plus légers, ce qui entraîne des efforts de traction plus faibles à flèche identique et une manipulation plus facile des tourets de câble,

- d'une manière générale à caractéristiques électriques équivalentes ils conduisent à des pylônes plus légers ou des portées plus longues, donc moins de pylônes,

Leurs autres caractéristiques comme le comportement au fluage et la résistance à la fatigue sont identiques à celles du conducteur ACSR. Le seul inconvénient provient de leur légèreté qui leur donne une tendance plus marquée au balancement dont il faut tenir compte dans le dimensionnement de la tête de pylône.

### **I.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,
- étant 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). Compte tenu du faible niveau de court-circuit, un câble de garde en acier galvanisé convient le mieux pour de grandes portées sans poser de problème de flèche.

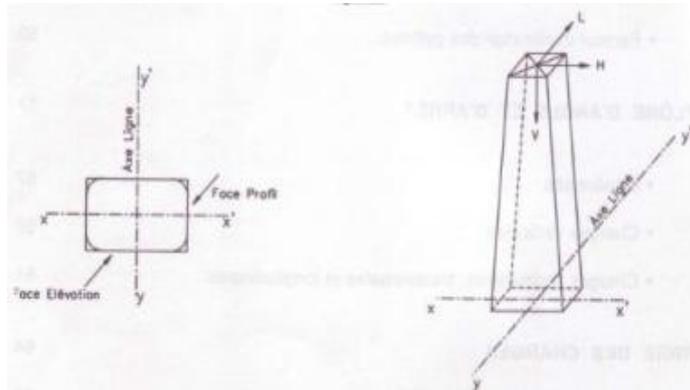
### **I.5.Les charges transmises aux pylônes :**

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.

## PYLONE D'ALIGNEMENT



**Fig13 : I-5 : Face Elévation, Face profil et Axe de la Ligne**

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

**✚ Les charges verticales (V) dues :**

- ✓ 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).

**✚ Les charges horizontales transversales (H),** perpendiculaires à la ligne dues à 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),** qui agissent dans le sens de la ligne.

**✚ Charges verticales (V) dues aux conducteurs et aux câbles de garde.**

**✚ 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.

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

### **I.6. Les règlements :**

#### **I.6.1. 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. basée sur les normes européenne pour le calcul des structures métalliques ; EUROCODE 3(EC3) parties 3-1 **applicables aux pylônes et mats haubanés**, R.N.V1999 pour le calcul des effets du vent et RPA99 pour l'impact du séisme.

#### **I.6.2. 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 des charges aux états limites», apporte cependant plus de rigueur et de cohérence et surtout une approche «semi-probabiliste» identique pour tous les matériaux.

#### **I.6.3. 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.

### **Conclusion :**

Dans ce chapitre on a mis la lumière sur les structures spatiales en général et en particulier les pylônes et leurs différents types qui existent ainsi que sur les normes qui permettent leur dimensionnement.

### **II.1.Introduction :**

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

- ❖ tant globalement, au niveau de la structure
- ❖ qu'individuellement au niveau chaque élément.

Les actions développent diverses sollicitations, qui génèrent des contraintes au sein du matériau et des déformations des éléments.

Il s agit donc, afin de garantir le degré de sécurité souhaité ou souhaitable, de vérifier que les contraintes et les déformations restent en deçà des limites admissibles.

Deux cas de figure se présentent :

 le cas des petites déformations :

Tant que l'on reste dans le domaine des petite déformations .on admet que les sollicitations ne varient pas (ou peu) sous les effets des déformations, ce qui conduit simplement à vérifier que les contraintes restent inférieures à la contrainte de ruine.

 le cas des grandes déformations :

Dans ce cas, les déformations modifient considérablement les sollicitations qui les ont initiées et nécessitent des calculs spécifiques.

L'apparition de déformations importantes dans certaines pièces peut survenir :

- ❖ dans le domaine élastique, lorsque la corrélation linéaire efforts/déformations n'est plus vérifiée, les déformations augmentant plus vite que les efforts appliqués ;
- ❖ dans le domaine élasto-plastique, lorsqu'il y a écoulement plastique

### **II.2. L'instabilité des pylônes :**

Le bon dimensionnement des pylônes nous renvoie à bien étudier leurs comportements vis-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.

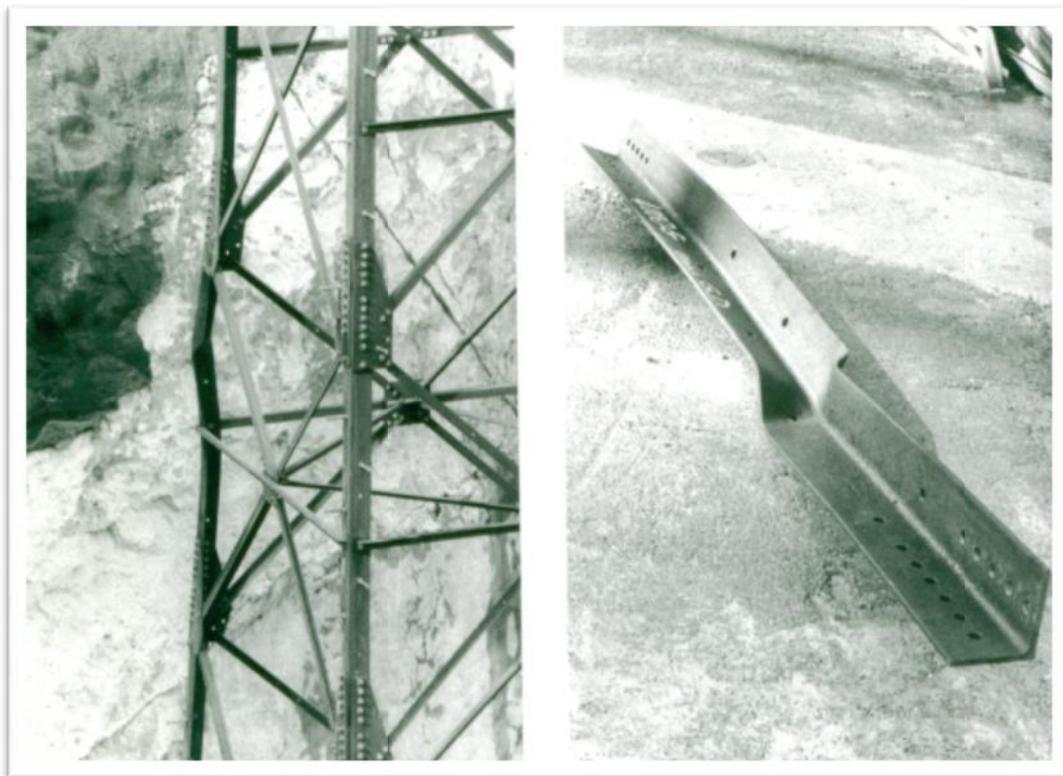
Le flambement est donc le phénomène le plus rencontré dans le cas des pylônes, sous ses deux aspects théoriques et réglementaires.

### **II.3.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 a un flambement par bifurcation amenant dans la plupart des cas à la ruine du pylône.



**Fig. 14 :II-3 : Vue de la rupture de pylône**



**Fig. 15 : II-3 : Vue de la rupture et des barres flambées de pylône**



**Fig16 : II-3 : Un pylône électrique pour lignes à haute tension**



**Fig17 : II-3 : Pylônes t complètement tordus suite à la plastification totale de ses éléments causée par une tempête**



**Fig18 : II-3 : Un pylône électrique endommagé par une grande plastification /flambement a cause d'un tempête –ruine**



**Fig19 : II-3 : Ruine d'un pylône sous Le poids de la glace accumulé sur les lignes de transmission**

## II.4. phénomènes d'instabilité :

### II.4.1.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 :

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

En posant  $\alpha = \sqrt{\frac{N}{EI}}$  on obtient l'équation de l'élasticité

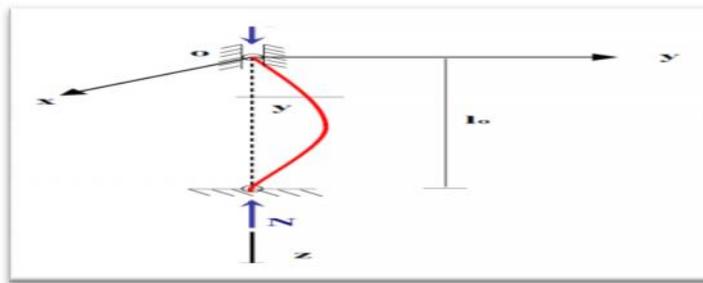
$$\frac{d^2y}{dz^2} + \alpha^2 y = 0$$

La solution générale de cette équation est de la forme :  $y = A \sin \alpha z + B \cos \alpha z$

Pour le cas d'une poutre bi-articulée, par exemple, les conditions aux limites se traduisent ainsi :

-Pour  $z = 0$ ,  $y(0) = 0$  donc  $B = 0$ .

- Pour  $z = l_0$ ,  $y(l_0) = 0$  d'où  $A \sin(\alpha l_0) = 0$ .



**Fig20 : II-4.1 : Poutre bi-articulée soumise a un effort normal**

On a donc deux cas :

-Si :  $\sin(\alpha l_0) = 0$ ,  $A = 0$  et  $y(z) = 0$  quel que soit  $z$ . dans ce cas seul l'équilibre rectiligne est possible.

Si :  $\sin(\alpha l_0) = 0$ ,  $\alpha = k$  ,

Soit :

$$\alpha = \frac{k\pi}{l_0} = \sqrt{\frac{N}{EI}} \text{ d'où } N = \frac{k^2\pi^2}{l_0^2} E$$

Pour que la poutre reste fléchie, il faut que  $K$  soit au moins égale à 1, ce qui conduit à la valeur minimale de  $N$  qui vaut :

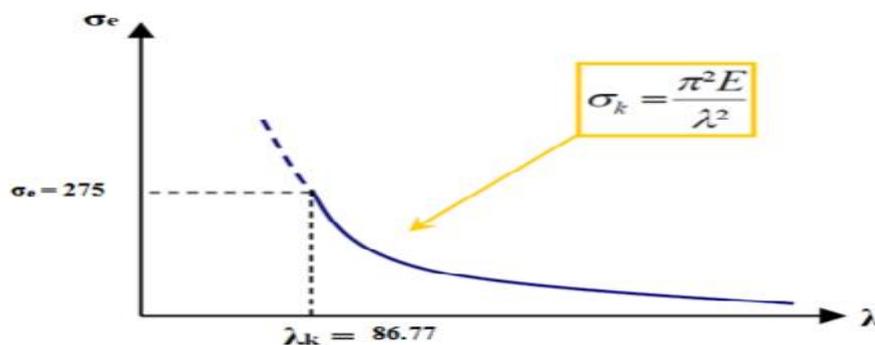
**La force critique d'EULER**  $N_k = \frac{\pi^2}{L^2} EI$

Soit  $\sigma_k$  une contrainte critique correspondant à la force critique d'EULER  $N_k$   $A$  étant la section droite de la poutre, on aurait :

$$\sigma_k = \frac{\pi^2}{l_0^2} E \times \frac{I}{A} = \frac{\pi^2}{l_0^2} E \times i^2$$

Avec :  $i = \sqrt{\frac{I}{A}}$ , rayon de giration minimale correspondant à l'élanement maximal  $\lambda = \frac{L_0}{i}$

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



**Fig21 : II-4.1 : Courbe contrainte critique-élanement maximal**

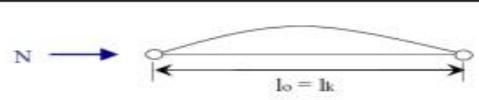
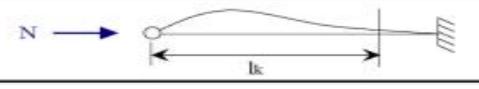
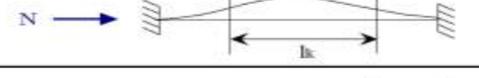
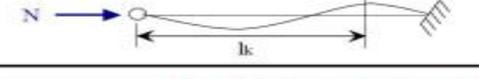
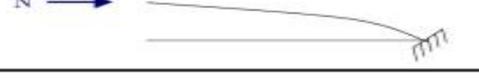
- -Lorsque  $k < e$ , aucun risque de flambement n'est à craindre et la ruine survient pour  $= e$ .
- -Lorsque  $k > e$ , il y a ruine par flambement dès lors  $k =$ . D'une manière générale, selon les conditions aux appuis, la force critique d'EULER vaut :

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

$l_0$  étant la longueur réelle de la barre.

En introduisant la longueur de flambement  $l_k$ , elle s'écrit  $N_k = \frac{EI \pi^2}{l_k^2}$  avec  $L_k = \frac{l_0}{m}$

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 e tableaux ci-dessous :

Conditions d'appuis	m	l <sub>k</sub>
Sans déplacement des extrémités		
	1	l <sub>0</sub>
	2	0,7l <sub>0</sub>
	4	0,5l <sub>0</sub>
	$1 < m < 2$	$> 0,7l_0$
Avec liberté de déplacement des extrémités		
	0,25	2l <sub>0</sub>
	1	l <sub>0</sub>
	$m < 1/4$	$> 2l_0$

**Tableau 1 : II-4. 1: 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 Mo. 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 Mo (z) est le moment fléchissant initial, le moment fléchissant total dans la poutre, comprimée et fléchie, vaut :  $M(z) = M_0(z) + N y$

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

Pour des flexions simples de Mo (z), l'intégration est possible. Les résultats obtenus sont

rassemblés dans le tableau ci-après, dans lequel :  $t = \frac{\alpha l}{2}$

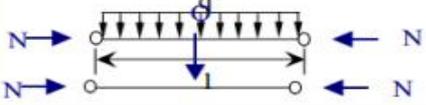
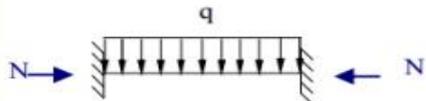
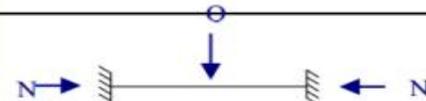
Conditions aux appuis	Cas de charges	Mo Max pour z = l/2	M Max pour z = l/2	Coeff. D'amplification des moments $r = M_{max}/M_{0max}$
Bi-articulées		$q \frac{l^2}{8}$	$q \frac{l^2}{8} r$	$\frac{2}{t^2} (\frac{1}{\cos t} - 1)$
		$Q \frac{l}{4}$	$Q \frac{l}{4} r$	$\frac{1}{t} \tan t$
Bi-encastées		$q \frac{l^2}{24}$	$q \frac{l^2}{24} r$	$\frac{3}{t \sin 2t} - \frac{3}{2t^2}$
		$Q \frac{l}{8}$	$Q \frac{l}{8} r$	$\frac{1}{t} \tan t$

Tableau 2 : II-4.1 : 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 :

$$N \leq \chi_{A} \beta_{A} \frac{f_y}{\gamma_{M1}}$$

D'où  $\chi_A = 1$  : pour les sections transversales de Classe 1,2 ou 3.

$\beta_A = \frac{A_{eff}}{A}$  : Pour les sections transversales de classe 4

: 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  $\chi$  pour l'élanement réduit  $\bar{\lambda}$ , peut être déterminée par la formule suivante :

$$\chi = 1 / (\phi + [\phi^2 - \bar{\lambda}^2]^{0.5}) \text{ mais } \chi \leq 1$$

D ou :  $\phi = 0.5 [1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda} - 0.2) + \bar{\lambda}^2]$  , : Facteur d'imperfection

Et :  $\bar{\lambda} = [\beta_A \cdot A \cdot \frac{f_y}{N_{cr}}]^{0.5} = (\frac{\lambda}{\lambda_1}) \cdot \beta_A^{0.5}$  (fy : limite élastique en N/mm<sup>2</sup>)

Avec :

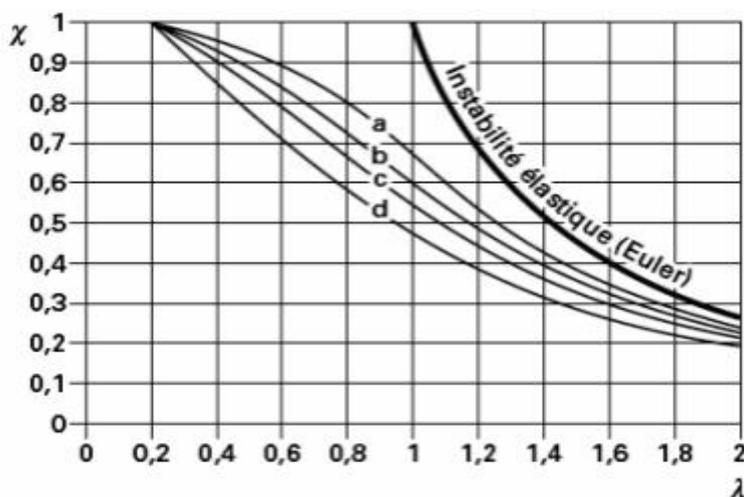
$N_{cr}$  est l'effort axial critique élastique pour le mode de flambement approprié

: L'élanement pour le mode de flambement à considérer  $\lambda_1 = \pi \cdot (\frac{E}{f_y})^{0.5}$

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

Courbe de flambement	a	b	c	d
Facteur d'imperfection $\alpha$	0.21	0.34	0.49	0.76

**Tableau 3:II-4.1 : Valeur du facteur d'imperfection**



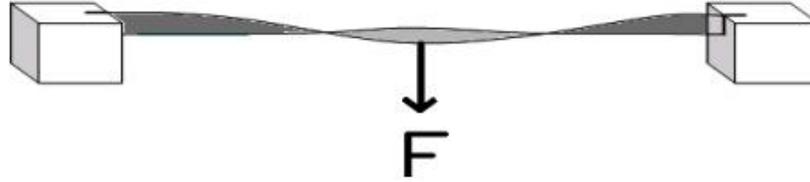
**Fig22 : II-4.1 : Coefficient de réduction en fonction de l'élancement réduit ( )**

Le dimensionnement de notre pylône se fera seulement dans le domaine élastique. Pour laisser une marge de sécurité et élargir la durée de vie de notre structure

### **II.4.2. 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).



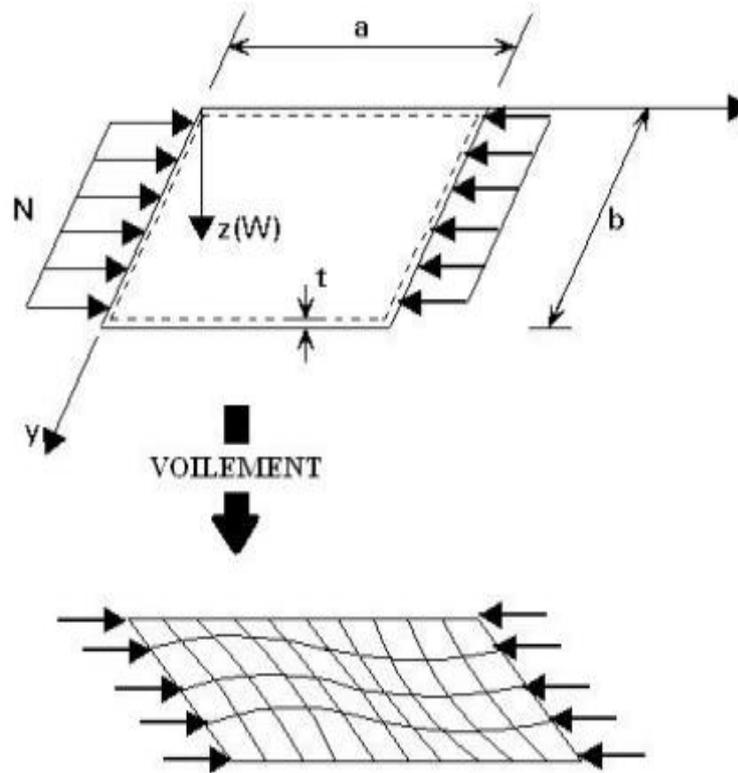
**Fig23 : II-4.2 : Phénomène du Déversement**

D'après le calcul effectué dans la partie précédente « vérification au flambement » et qui montre que dans le cas d'une membrure comprimée, supposée isolée du reste de la pièce, résiste au flambement latéral provoqué par une contrainte de compression simple. Dans ce cas, selon les deux normes, aucune vérification de la stabilité au déversement n'est nécessaire.

### **II.4.3. 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 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. Il est dans ce cas attaché à la diagonale comprimée. 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.



**Fig24 : II-4.3 : Phénomène du voilement**

Conclusion :

Dans ce chapitre on a présenté les différents phénomènes d'instabilités et le flambage des structures en treillis telle que les pylônes et le risque qui résultent de cette instabilité.

### **III.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 antennes ou 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.

### **III.2. Description et justification de la solution:**

#### **III.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 a les avantages d'avoir une grande résistance, un poids léger et une faible résistance au vent comme son treillis ouvert évite de présenter la largeur totale de la structure face au vent.

Les pylônes à treillis sont constitués de deux ensembles principaux qui sont :

- La tête ;
  - Le fût.
- La tête d'un pylône à treillis est une structure métallique qui supporte les câbles de garde et les conducteurs de la ligne électrique. Elle est développée et calculée pour répondre à la fois :
- à des conditions de résistance basée sur les hypothèses de calcul de l'ouvrage.
  - à des contraintes électriques dues à la tension de la ligne et aux distances minimales à respecter entre les câbles.

- à des contraintes géométriques dues à la configuration des câbles de garde et des conducteurs et aux distances à la masse à respecter dans les différentes hypothèses.
- Le fût du pylône a pour but essentiel de maintenir la tête et les câbles à une certaine distance du sol pour respecter les hauteurs réglementaires et à transmettre au sol, par l'intermédiaire des fondations, les efforts dus aux charges horizontales et verticales appliquées sur les câbles et le pylône.

Dans le cadre de notre travail, nous nous proposons d'analyser deux pylônes qui sont exploités en Algérie par la société SONELGAZ. Il s'agit selon la dénomination de SONELGAZ, de **Pylône d'alignement de type A et de type C** équipé de chaînes d'isolateurs de suspension et pouvant aussi être utilisé, si nécessaire, comme support d'angle faible (0 à 2 degrés maximum) sous réserve de portée vent inférieure à 300 m.

### **III.2.2.Choix du type de profilé :**

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 1 suivant :

Description de l'acier	S235JR
$f_{bu}$ - Limite à la rupture minimale en traction	360 N/mm <sup>2</sup>
$f_y$ - Limite d'élasticité minimale garantie	235N/mm <sup>2</sup>

**Tableau4:III- 2.2 : les valeurs de la limite à la rupture et de la limite d'élasticité des cornières**

Ce type de barre présente l'avantage d'avoir une bonne résistance pour un poids faible en plus de sa facilité d'assemblage.

- Choix du type des cornière est donnée selon le model de **SONELGAZ**

### **III.2.3. Évaluation 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.

### **III.3. 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).

#### **III.3.1. Calcul de l'action du vent:**

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

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 :

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

$$C_d = \frac{1 + 2 \cdot I_V z_{eq} \cdot \sqrt{Q_0^2 + R_x^2}}{1 + 2 \cdot g \cdot I_V z_{eq}}$$

- $z_{eq}$  : (en m) est la hauteur équivalente de la construction,
- $I_V z_{eq}$  : 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 équivalent :

$$z_{eq} = \text{MAX} [0,6 \cdot h ; Z_{\min}]$$

La hauteur équivalente  $z_{eq}$  est donné en fonction de :

- $Z_{\min}$  (en m) définie au chapitre 2,
- $b$  (en m) la dimension de la construction perpendiculairement au vent,
- $d$  (en m) la dimension de la construction parallèle au vent,
- $h$  (en m) la hauteur de la construction,
- $h_1$  (en m),

## ❖ pylône de Type A:

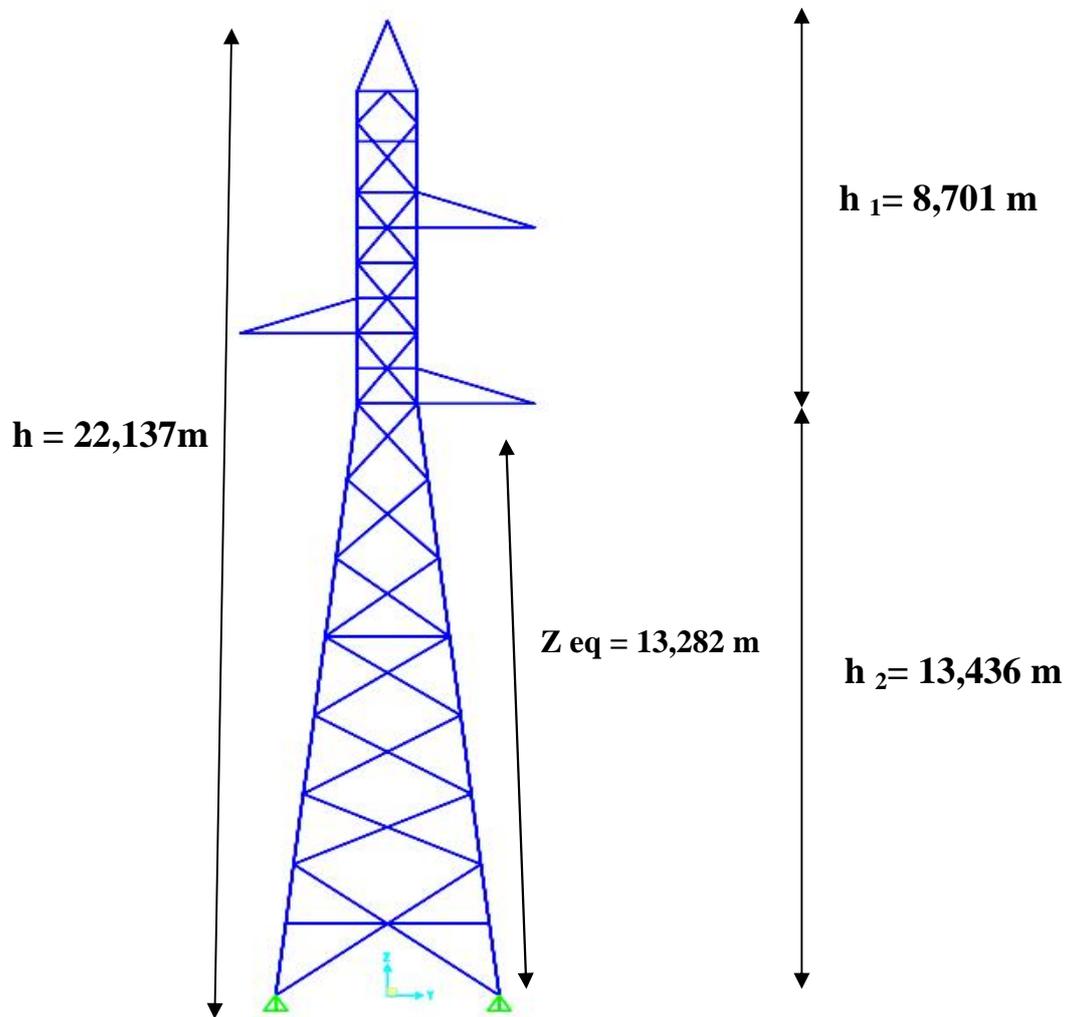


Figure 25:III-3.1: les hauteurs du pylône de Type A

❖ pylône de Type C:

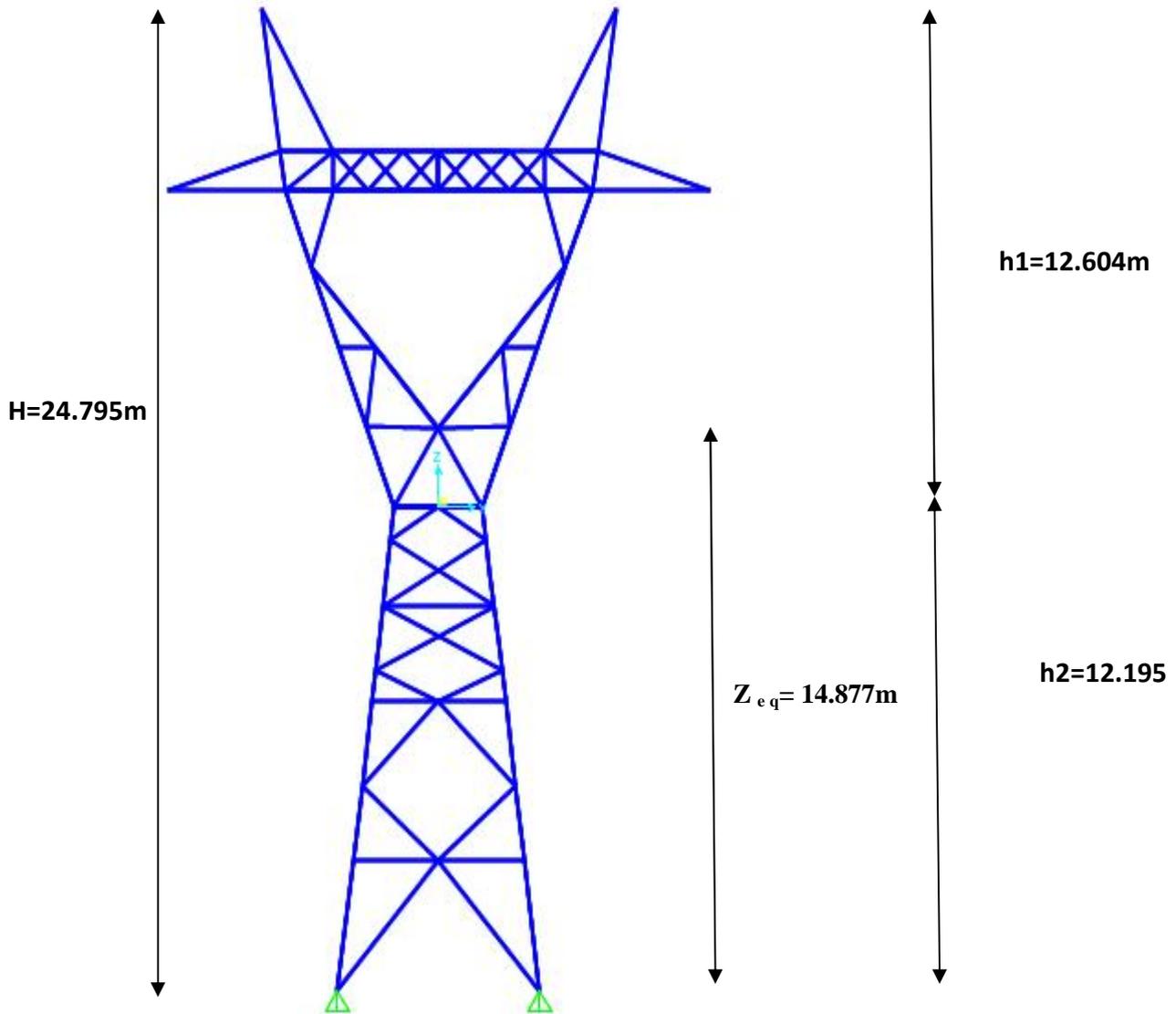


Figure 26:III-3.1:les hauteurs du pylône de Type C

ZONE III:

Z min	8 m
-------	-----

➔  $z_{eq} = 13,282$  m pylône (A)

➔  $z_{eq} = 14.877$ m pylône (C)

a. Intensité de la turbulence :

$$I_V z_{eq} = \frac{1}{C_t Z \cdot LN\left(\frac{z_{eq}}{Z_0}\right)}$$

- $C_t Z$  :est le coefficient de topographie,
- $Z_0$  : (en m) est le paramètre de rugosité,

$C_t Z$	1
---------	---

$Z_0$	0,3 m
-------	-------

➔  $I_V z_{eq} = 0,263$  pylône (A)

➔  $I_V z_{eq} = 0.256$  pylône(C)

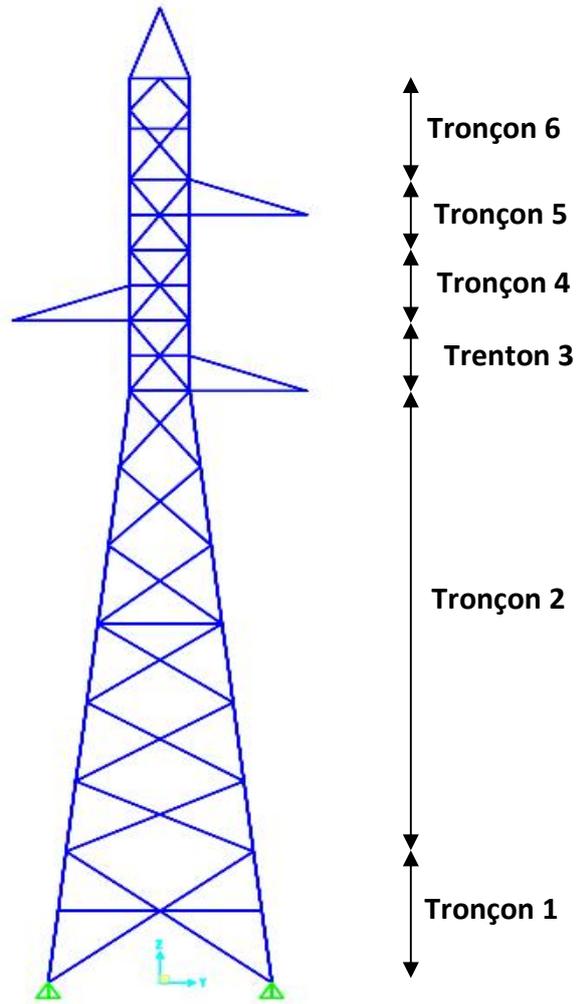


Figure 27:III-3.1:les Tronçon du pylône de Type A

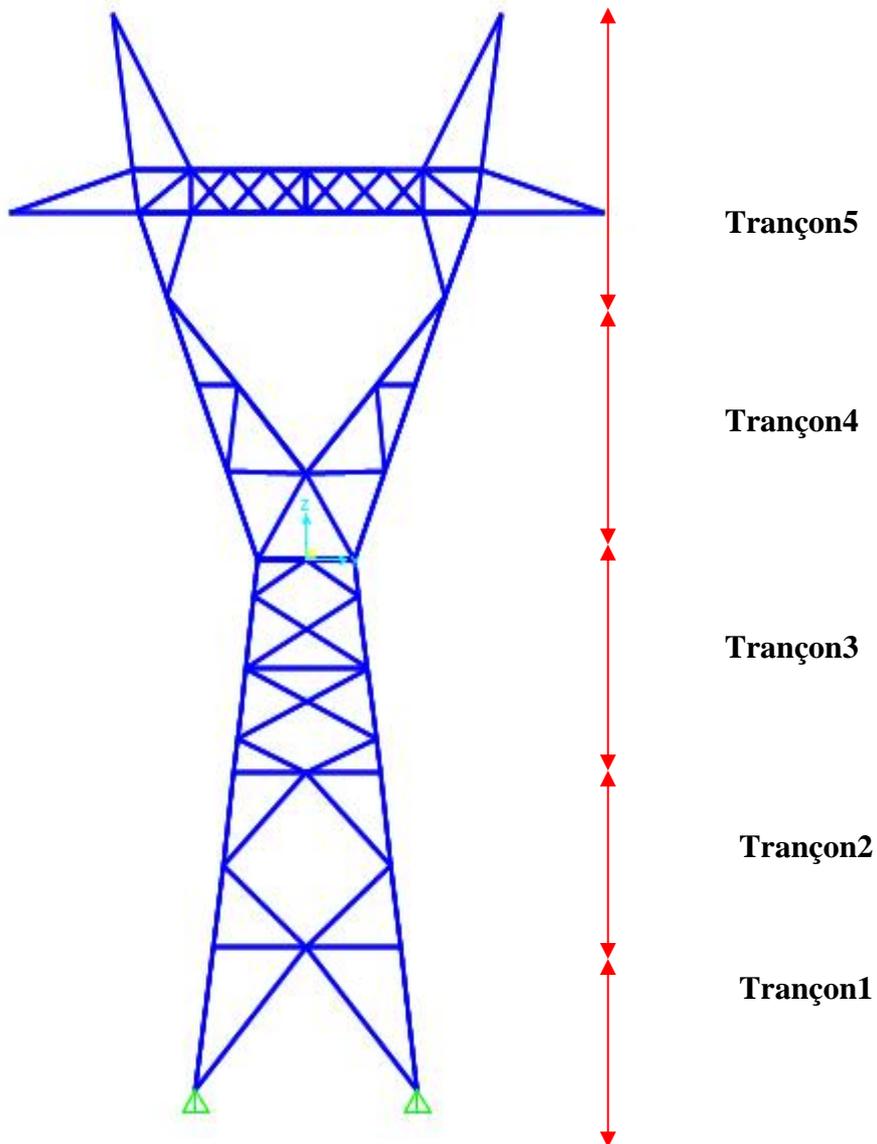


Figure 28:III-3.1:les Tronçon du pylône de Type C

**b-Partie quasi-statique:**

$$Q_0^2 = \frac{1}{1+0,9 \cdot \left(\frac{b \cdot h}{L_i(Z_{eq})}\right)^{0,63}}$$

- **b** et **h** (en m) sont la largeur et la hauteur de la construction,
- $L_i Z_{eq}$  est l'échelle intégrale de turbulence pour  $Z = Z_{eq}$ ,

$$L_i(Z_{eq}) = 300 \cdot \left(\frac{Z_{eq}}{300}\right)^{0,37}$$

	0,37
--	------

➔  $L_i(Z_{eq}) = 94,666$  pylône (a)

➔  $L_i(Z_{eq}) = 98,723$  pylône(c)

h 1=	22,137 m
------	----------

b1=	1,182 m
-----	---------

h 2=	24,795m
------	---------

b2=	7,981m
-----	--------

➔  $Q_0^2 = 0,728$  pylône (A)

➔  $Q_0^2 = 0,690$  pylône(C)

**b. Partie résonnante :**

$$R_x^2 = \frac{\pi^2}{2 \cdot \delta} \cdot R_N \cdot R_h \cdot R_b$$

- $R_N$  est la fonction adimensionnelle de la densité spectrale de puissance ,
- $\delta$  est le décrétement logarithmique d'amortissement des vibrations dans la direction du vent,
- $R_h$  et  $R_b$  sont des fonctions d'admittance aérodynamique,

$$\mathbf{R}_N = \frac{6,8.N_x}{(1+(10,2.N_x))^{\frac{5}{3}}}$$

$-N_x$  est la fréquence adimensionnelle dans la direction x du vent.

$$N_x = \frac{n_{1x} \cdot L_i(Z_{eq})}{V_m(Z_{eq})}$$

- $n_{1x}$  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  $Z = Z_{eq}$ ,
- $V_m(Z_{eq})$  (en m/s) est la vitesse moyenne du vent pour  $Z = Z_{eq}$ ,

$$n_{1x} = \frac{f_{m,b}}{h_{eff}^2} \cdot \frac{\overline{M_S}}{M_T} \quad [\text{HZ}]$$

- $h_{eff}$  (en m) est donnée par  $h_{eff} = h_1 + h_2/3$  (voir figure A4.2),
- $b$  (en m) est le diamètre en tête de la cheminée,
- $M_S$  (en kg) est la masse des éléments structuraux contribuant à la rigidité de la cheminée,
- $M_t$  (en kg) est la masse totale de la cheminée,
- $f_m$  est un coefficient ; il est égal à 1000 pour les cheminées en acier, et 700 pour les cheminées en béton ou en maçonnerie.

$$h_{eff} = h_1 + h_2/3$$

  $h_{eff} = 13,180 \text{ m}$  pylône (A)

  $h_{eff} = 16.669 \text{ m}$  pylône (C)

fm	1000	b 1	1,182 m	b 2	7.981m
----	------	-----	---------	-----	--------

$$\frac{M_S}{M_T} = 1 \quad \longrightarrow \quad n_{1x} = 6,805 \text{ pylône (A)}$$

$$\longrightarrow \quad n_{1x} = 28.724 \text{ pylône (C)}$$

$$\Rightarrow V_m(Z_{eq}) = C_r(Z_{eq}) \cdot C_t(Z_{eq}) \cdot V_{r\grave{e}f} \quad [\text{m/s}]$$

$$\Rightarrow C_r(Z_{eq}) = K_T \cdot LN\left(\frac{z_{eq}}{Z_0}\right)$$

$Z_{eq}$	
pylône (a)	13,282 m

$Z_{eq}$	
pylône (c)	14.877m

$K_t$	0,22
-------	------

$Z_0$	0,3 m
-------	-------

$$\longrightarrow C_r(Z_{eq}) = 0,834 \text{ pylône (A)}$$

$$\longrightarrow C_r(Z_{eq}) = 0.859 \text{ pylône (C)}$$

$C_t(Z_{eq})$	1
---------------	---

$V_{r\grave{e}f}$	25( m/s)
-------------------	----------

Li(Z eq)	94,666
Pylône (a)	

Li(Z eq)	98.723
Pylône( c)	

→  $V_m(Z_{eq}) = 20,847 \text{ m/s pylône (A)}$

→  $V_m(Z_{eq}) = 21.471 \text{ m/s pylône (C)}$

→  $N_x = 30.90 \text{ pylône (A)}$

→  $N_x = 132.071 \text{ pylône (C)}$

→  $R_N = 0.014$

→  $R_N = 0.0055$

→  $\delta = \delta_s + \delta_a$

- $\delta_s$  est le décrement logarithmique d'amortissement structural,
- $\delta_a$  est le décrement logarithmique d'amortissement aérodynamique,

→  $\delta_s = (a_1 \cdot n_{1,x}) + b_1$

- $a_1$ ,  $b$  et  $\delta_{min}$  sont des paramètres donnés dans le tableau A4.3 pour différents types de construction.

min	0,05
pylône ( a )	

$n_{1,x}$	6,805
pylône ( a )	

min	0,05
pylône ( c )	

$n_{1,x}$	6,805
pylône ( c )	

$$\rightarrow \delta_s = 0.306$$

$$\rightarrow \delta_s = 1.292$$

$$\delta_a = \frac{\rho \cdot b \cdot C_f}{2 \cdot n_{1x} \cdot m_{1x}} \cdot V_m(Z_{eq})$$

- $\rho$  (en kg/m<sup>3</sup>) est la masse volumique de l'air,
- $b$  (en m) est la dimension de la construction perpendiculaire au vent,
- $C_f$  est le coefficient de force,
- $n_{1,x}$  (en Hz) est la fréquence propre du mode fondamental dans la direction x du vent,
- $m_{1,x}$  (en kg/m) est la masse équivalente pour le mode fondamental et dans la direction x du vent,
- $V_m(Z_{eq})$  (en m/s) est la vitesse moyenne du vent pour  $Z = Z_{eq}$ .

$$m_{1x} = \frac{\int_0^h m \cdot \phi_1^2 \cdot Z \cdot dZ}{\int_0^h \phi_1^2 \cdot Z \cdot dZ} \quad [\text{Kg/m}]$$

- $m$  (en kg/m) est la masse par unité de longueur ;
- $h$  (en m) est soit la hauteur totale de la construction ;
- $\phi_1$  est la déformée pour le mode fondamental.

$$\phi_1(Z) = \left(\frac{Z}{h}\right)^\xi$$

- **h** (en m) est la hauteur totale de la structure par rapport au sol ;
- **Z** (en m) est la hauteur par rapport au sol du point considéré ;
- $\xi = 2,5$  pour les structures en treillis.

<b>Z<sub>1</sub></b>	<b>13,180 m</b>	<b>H<sub>1</sub></b>	<b>22,137 m</b>
----------------------	-----------------	----------------------	-----------------

<b>Z<sub>2</sub></b>	<b>14.877m</b>	<b>H<sub>2</sub></b>	<b>24.799m</b>
----------------------	----------------	----------------------	----------------

⇒  $\phi_1 Z = 0,274$

⇒  $\phi_1 Z = 0.279$

⇒  $m_{1x} = 356,646 \text{ Kg/m pylône (A)}$

⇒  $m_{1x} = 2263.754 \text{ Kg/m pylône (C)}$

$$C_f = C_{f0} \cdot \psi_r$$

- **C<sub>f0</sub>** est le coefficient de force des constructions en considérant un élancement effectif infini,
- $\psi_r$  est le facteur d'élancement,
- **ψ<sub>r</sub>** est un facteur de correction du coefficient de force, est égal à 1 pour l'ensemble des constructions,

Le facteur d'élanement est donné par la figure 4.1 en fonction de l'élanement effectif  $\lambda_e$ .

et pour différents coefficients d'opacité  $\psi$ .

$$\lambda_e = \lambda \sqrt{\psi} = \lambda / A_c$$

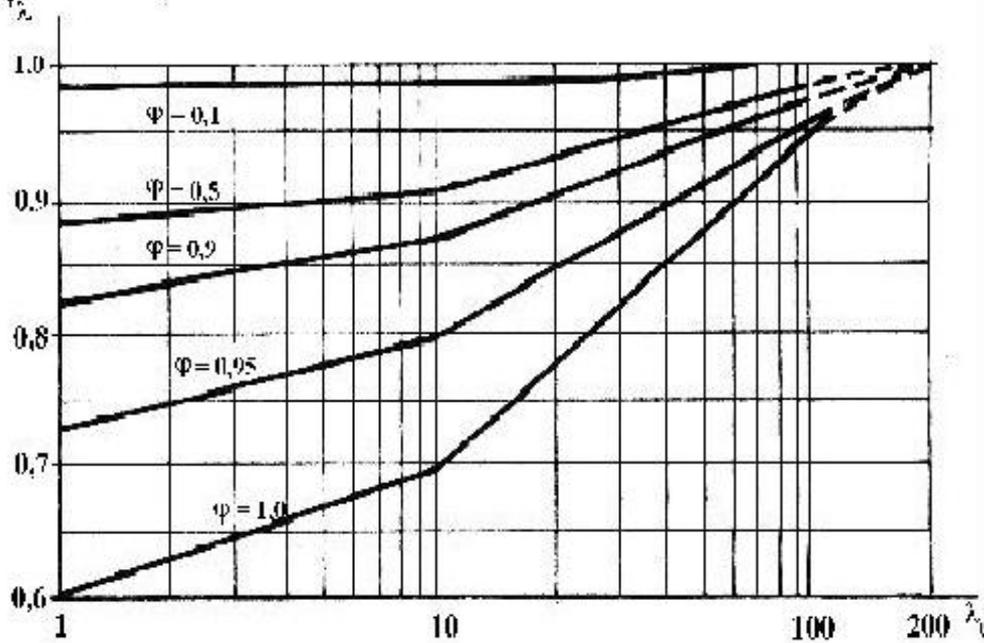


Figure 29:III-3.1: Facteur d'élanement

$$\lambda_e = \lambda \sqrt{\psi} = 100 \sqrt{0,98} = 99,01$$

$C_{f0}$	2
----------	---

$V_m(Z_{eq})$	20,847 m/s
---------------	------------

$C_f$	1,96
-------	------

	1,2 kg/m <sup>3</sup>
--	-----------------------

$$\delta_a = 0,012 \quad \text{pylône (A)}$$

$$\delta = 0,318 \quad \text{pylône (A)}$$

$\Rightarrow \delta_a = 0.00309$  pylône (C)

$\Rightarrow \delta = 1.296$  pylône (C)

$$\eta = \frac{4,6.N_x.d}{L_i(Z_{eq})}$$

- $N_x$  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 de  $R_b$ ,

$N_x$	30,90	$L_i (Z_{eq})$	94,666
pylône ( a)		pylône (a)	

$N_x$	132.071	$L_i (Z_{eq})$	98.722
pylône ( a)		pylône (c)	

$\eta_h = 33,238 \text{ m}$

$\eta_b = 1,775 \text{ m}$

Pyllône (a)

$\eta_h = 152.585 \text{ m}$

$\eta_b = 49.114 \text{ m}$

Pyllône (c)

$$R_h = \left(\frac{1}{\eta_h}\right) - \left(\frac{1}{2.\eta_h^2}\right). (1 - e^{-2.\eta_h})$$

$R_h = 0,03$  pylône (A)

$R_h = 0.0065$  pylône (C)

$$R_b = \left(\frac{1}{\eta_b}\right) - \left(\frac{1}{2.\eta_b^2}\right). (1 - e^{-2.\eta_b})$$

$$\left. \begin{array}{l} R_b = 0,409 \\ R_x^2 = 0,003 \end{array} \right\} \text{Pylône (a)}$$

$$\left. \begin{array}{l} R_b = 0.020 \\ R_x^2 = 2.73.10^{-6} \end{array} \right\} \text{Pylône (c)}$$

**c. Facteur de point :**

$$g = \frac{2 \cdot \overline{\text{Ln}(V \cdot t)}}{2 \cdot \text{Ln}(V \cdot t)} + \frac{0,6}{2 \cdot \text{Ln}(V \cdot t)}$$

- t (en s) est la durée sur laquelle est établie la vitesse de référence ; dans le cadre de ce DTR t = 600 s,
- 1f (en Hz) est la fréquence moyenne;

$$V = \frac{V_0^2 \cdot Q_0^2 + n_{1x}^2 \cdot R_x^2}{Q_0^2 + R_x^2} \quad [\text{HZ}]$$

$$V_0 = \frac{V_m(Z_{eq})}{L_i(Z_{eq})} \cdot \frac{1}{1,11 \cdot S^{0,615}} \quad [\text{HZ}]$$

$$S = 0,46 \cdot \left( \frac{b+h}{L_i(Z_{eq})} \right) + 10,58 \cdot \left( \frac{\sqrt{b \cdot h}}{L_i(Z_{eq})} \right)$$

$$\left. \begin{array}{l} S = 0,685 \\ V_0 = 0,250 \text{ [HZ]} \end{array} \right\} \text{Pylône(a)}$$

$$\left. \begin{array}{l} S = 1.660 \\ V_0 = 0.143 \text{ [HZ]} \end{array} \right\} \text{Pylône (c)}$$

$V_0^2$	0,063 [HZ]
pylone ( a )	

$V_0^2$	0.0205 [HZ]
pylone ( c )	

$$\left. \begin{array}{l} V = 0,483 \text{ [HZ]} \\ g = 3,367 \end{array} \right\} \text{Pylône (a)}$$

$$\left. \begin{array}{l} V = 0.154 \text{ [HZ]} \\ g = 3.010 \end{array} \right\} \text{Pylône (c)}$$

$$C_d = 0,523 < 1, 2 \text{ pylône (A)}$$

$$C_d = 0.561 < 1, 2 \text{ pylône (C)}$$

La structure sera donc considérée peu sensible aux excitations dynamiques.

$$W(Z_j) = q_{\text{dyn}}(Z_j) \cdot C_{fj} \quad [\text{N/m}^2]$$

- $W$  (en  $\text{N/m}^2$ ) est la pression exercée sur l'élément de surface  $j$ .
- $q_{\text{dyn}}(Z_j)$  (en  $\text{N/m}^2$ ) est la pression dynamique du vent calculée à la hauteur  $Z_j$  relative à l'élément de surface  $j$ .
- $C_{fj}$  est le coefficient de force correspondant à la section transversale de la construction au niveau de l'élément de surface  $j$  considéré.

$$q_{\text{dyn}}(Z_j) = q_{\text{réf}} \cdot C_e(Z_j) \quad [\text{N/m}^2]$$

- $q_{\text{réf}}$  (en  $\text{N/m}^2$ ) est la pression dynamique de référence pour les constructions permanentes ;  $q_{\text{réf}}$  est donné par le tableau 2.3 en fonction de la zone de vent,
- $C_e$  est le coefficient d'exposition au vent ;

$$C_e(Z) = C_t(Z)^2 \cdot C_r(Z)^2 \cdot \left[ 1 + \frac{7 \cdot K_T}{C_r(Z) \cdot C_t(Z)} \right]$$

$$\text{Annaba: zone I} \implies q_{\text{réf}} = 375 \text{ [N/m}^2\text{]}$$

<b>Z (m)</b>	<b>ln (z/z0)</b>	<b>Cr</b>	<b>Iv</b>
<b>2,982</b>	2,297	0,505	0,435
<b>13,436</b>	3,802	0,836	0,263
<b>15,034</b>	3,914	0,861	0,255
<b>16,634</b>	4,015	0,883	0,249
<b>18,235</b>	4,107	0,904	0,243
<b>20,537</b>	4,226	0,930	0,237

**Tableau5 : III-3.1 : le coefficient de rugosité et l'intensité**

*de la turbulence Pylône (A)*

<b>Z (m)</b>	<b>Ce(Z)</b>	<b>q<sub>dyn</sub>(Z<sub>j</sub>) [N/m<sup>2</sup>]</b>	<b>W(Z<sub>j</sub>) [N/m<sup>2</sup>]</b>	<b>q<sub>j</sub> [N/m<sup>2</sup>]</b>
<b>2,982</b>	1,033	387,506	759,512	396,980
<b>13,436</b>	1,988	745,382	1460,949	763,606
<b>15,034</b>	2,068	775,398	1519,780	794,356
<b>16,634</b>	2,141	802,803	1573,494	822,431
<b>18,235</b>	2,208	828,026	1622,930	848,270
<b>20,537</b>	<b>2,296</b>	<b>861,112</b>	<b>1687,779</b>	<b>882,166</b>

**Tableau6 : III-3.1 : la pression due au vent Pylône (A)**

<b>Z (m)</b>	<b>ln(z/z0)</b>	<b>Cr</b>	<b>Iv</b>
<b>7.286</b>	3.190	0.702	0.318
<b>12.195</b>	3.705	0.815	0.270
<b>18.268</b>	4.109	0.904	0.243
<b>24.799</b>	4.415	0.971	0.227

**Tableau7 : III-3.1 : le coefficient de rugosité et l'intensité  
de la turbulence Pylône (C)**

<b>Z (m)</b>	<b>Ce(Z)</b>	<b>q<sub>dyn</sub>(Z<sub>j</sub>) [N/m<sup>2</sup>]</b>	<b>W(Z<sub>j</sub>) [N/m<sup>2</sup>]</b>	<b>q<sub>j</sub> [N/m<sup>2</sup>]</b>
<b>7.286</b>	1.57324829	589.968109	1156.33749	648.504911
<b>12.195</b>	1.9196412	719.865449	1410.93628	791.290701
<b>18.268</b>	2.20940015	828.525057	1623.90911	910.731546
<b>24.799</b>	2.43905417	914.645315	1792.70482	1005.39668

**Tableau8 : III-3.1 : la pression due au vent Pylône (C)**

### **III.3.2.calcul de charge de câble :**

Le câble pour ce type de pylône est en aluminium sa section  $S = 288 \text{ mm}^2$  pour le pylône (a) et  $411 \text{ mm}^2$  pour le pylône (c), le poids propre de ce câble est de  $1083 \text{ Kg/Km}$  (a) et  $1593 \text{ kg/Km}$  (c). (Donnée fournies par l'entreprise **SONELGAZ**), la distance entre pylônes est de  $200 \text{ m}$ .

Chaque câble prend demi-longueur ( $100 \text{ m}$ ).

108,3kg/100m

108,3 Kg = 1083 N pylône (A)

159.5kg=1593N pylône (C)

En tenant compte de la longueur réelle du câble. (Fléchié)

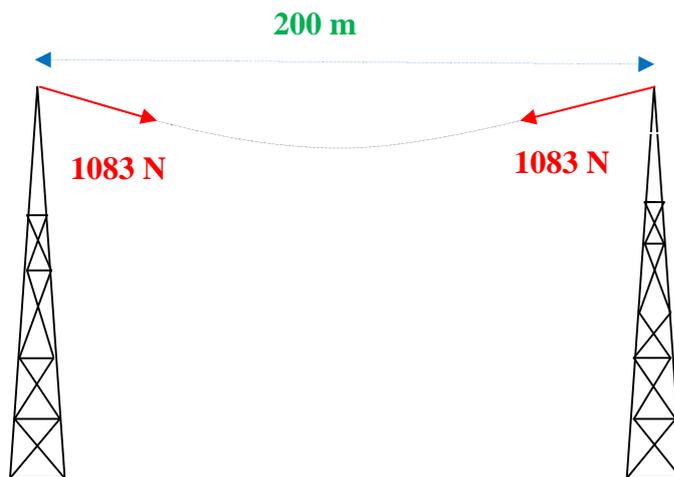


Figure 30 : III-3.2 : schéma de charge de câble du pylône (A)

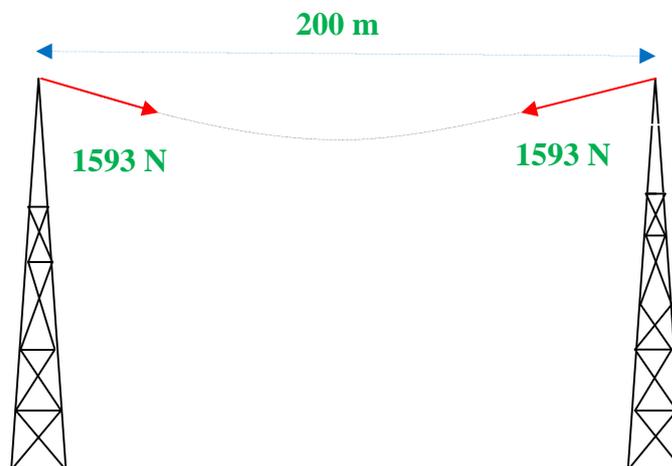
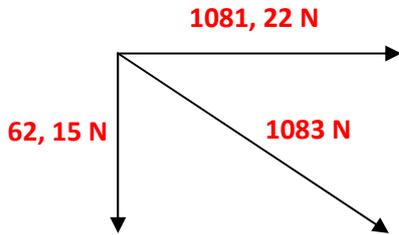
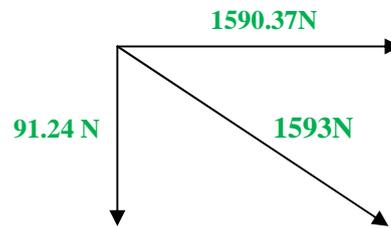


Figure 31 : III-3.2 : schéma de charge de câble du pylône (C)

Cette flèche crée un angle petite de  $3,29^0$  ; en remplace le vecteur de charge incliné par deux vecteurs, suivent deux direction (X et Z).



**Figure 32 : III-3.2 : vecteur de charge de câble pylône (A)**



**Figure 33 : III-3.2 : vecteur de charge de câble pylône (C)**

**Remarque :**

Dans notre cas le pylône sera calculé en l'isolant seul avec ce cas de charge.

Un autre calcul plus réaliste aurait été possible en modélisant deux pylônes ou plusieurs successifs et le câble qui les relit. Dans ce cas un calcul non linéaire du au comportement du câble aurait été plus proche de la réalité. De plus cela permettrait de prendre en compte réellement l'action dynamique éventuelle que le câble pourrait engendrer sur le pylône sous l'action du vent. Mais pour une première analyse nous nous limiterons au calcul statique linéaire dans la suite de ce travail.

**III.3.3 .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.

Pour illustrer l'effet, prenons l'exemple d'un type statique cas: dans un parfait corps rigide soumis uniquement aux petits déplacements, l'effet d'une charge verticale gravitationnelle ou concentrée au sommet de la structure est généralement négligée dans le calcul du sol réactions . Cependant, les structures dans la vie réelle sont flexibles et peuvent présenter de grands déplacements latéraux dans des circonstances inhabituelles. Les déplacements latéraux peuvent être causés par le vent ou sismiquement induites forces d' inertie .

Compte tenu du déplacement latéral, les charges verticales présentes dans la structure peut perturber défavorablement les réactions du sol. Ceci est connu comme l'effet P- $\Delta$ .

Dans un certain sens, l'effet P-Delta est similaire à la charge de flambement d'une petite échelle colonne solide élastique étant donné les conditions aux limites d'une extrémité libre sur le dessus et une extrémité complètement retenue au fond, à l'exception qu'il peut exister une charge verticale invariable au sommet de la colonne. Une tige plantée fermement dans le sol, étant donné une section constante, ne peut étendre jusqu'à présent avant qu'il boucle sous son propre poids; dans ce cas, le déplacement latéral pour le solide est une quantité infinitésimale régie par Euler flambage. Si le déplacement latéral et / ou des charges axiales verticales à travers la structure sont importantes alors un delta P analyse doit être effectuée pour tenir compte des non-linéarités.

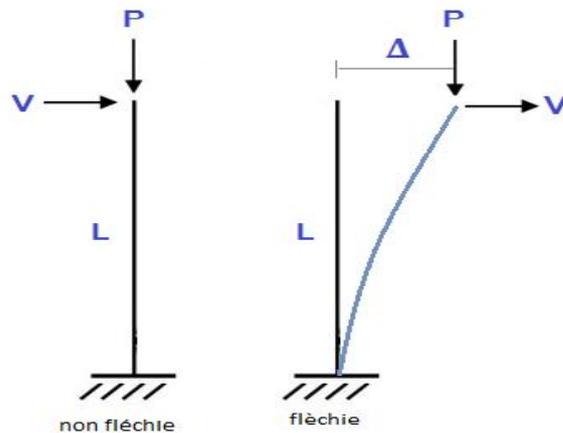


Figure 34: III-3.3 : schéma présent l'effet p-delta

**Remarque :**

Pour une analyse plus réaliste, dans l'analyse de flambement pour la suite il sera pris en compte de l'effet P-Delta.

### **IV.1. Introduction :**

Les calculs que nous allons mener dans cette partie concerne l'analyse de la stabilité des pylônes type q utilise par SONELGAZ.

La procédure concernera les étapes suivantes :

- Une analyse de dimensionnement du pylône (analyse linéaire avec les cas de charge des combinaisons réglementaires) pour définir la section et vérifier la structure en résistance et en service.
- Une analyse de flambage afin pour trouver la charge critique pouvant rendre instable cette structure.

### **IV.2 PRESENTATION DU LOGICIEL ET DE SON ENVIRONNEMENT**

Le logiciel de calcul utilisé est SAP 2000.

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 via le règlement Eurocode3 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.

C'est ce module « Etude d'un portique spatial » que nous avons utilisé pour le calcul des éléments de la structure de notre pylône.

Il permet de faire les analyses suivantes :

- Analyse linéaire sous les cas de charge élémentaire (poids propre, surcharge due au câbles, et vent) et intègre automatiquement les combinaisons réglementaire.
- Vérification et dimensionnement des barres (selon Eurocode3) pour vérifier que les barres passent en résistance.

- Analyse en flambement avec prise en compte de l'effet non linéaire P-Delta. Pour évaluer le facteur de charge critique. Cela permet d'évaluer les différents modes de flambement et le différent facteur de charge critique avec présentation des barres qui entre en instabilité  
 Les figures 1et 2 montrent l'environnement SAP 2000.

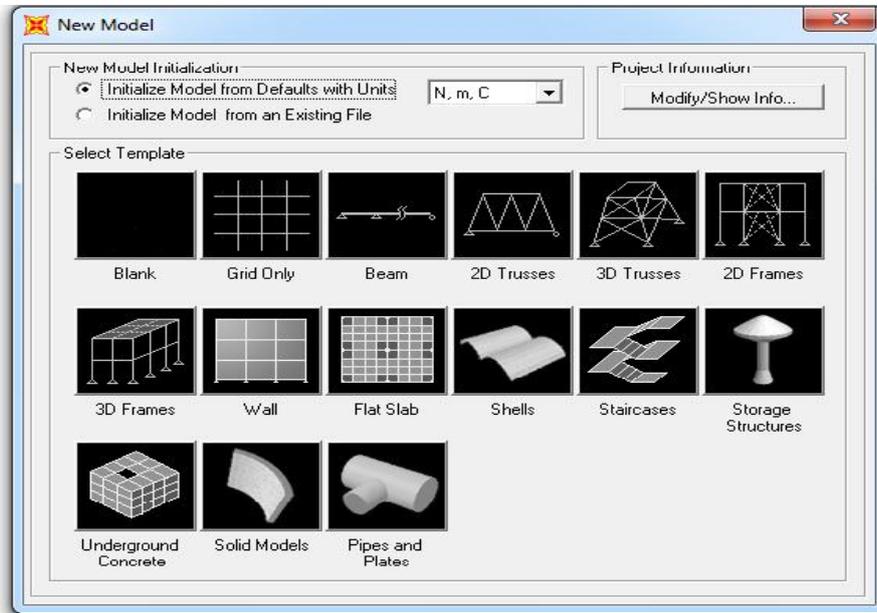


Figure 35:IV-2 : Environnement SAP 2000

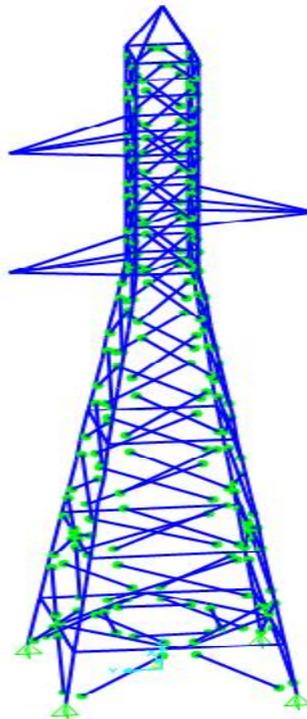


Figure36 : IV-2 : Vue en 3D du pylône modélisé type (A)

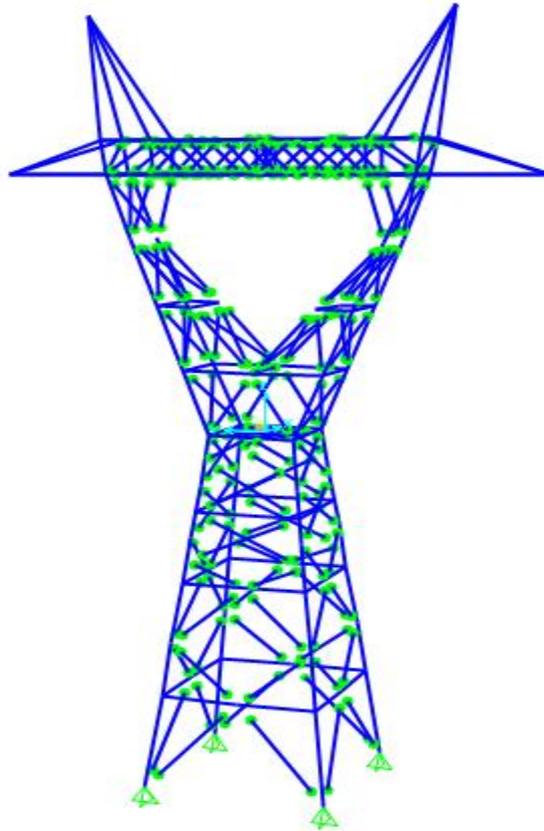


Figure37:IV-2 : Vue en 3D du pylône modélisé type (C)

### IV.3. présentation de la structure :

#### IV.3.1 pylône de Type A

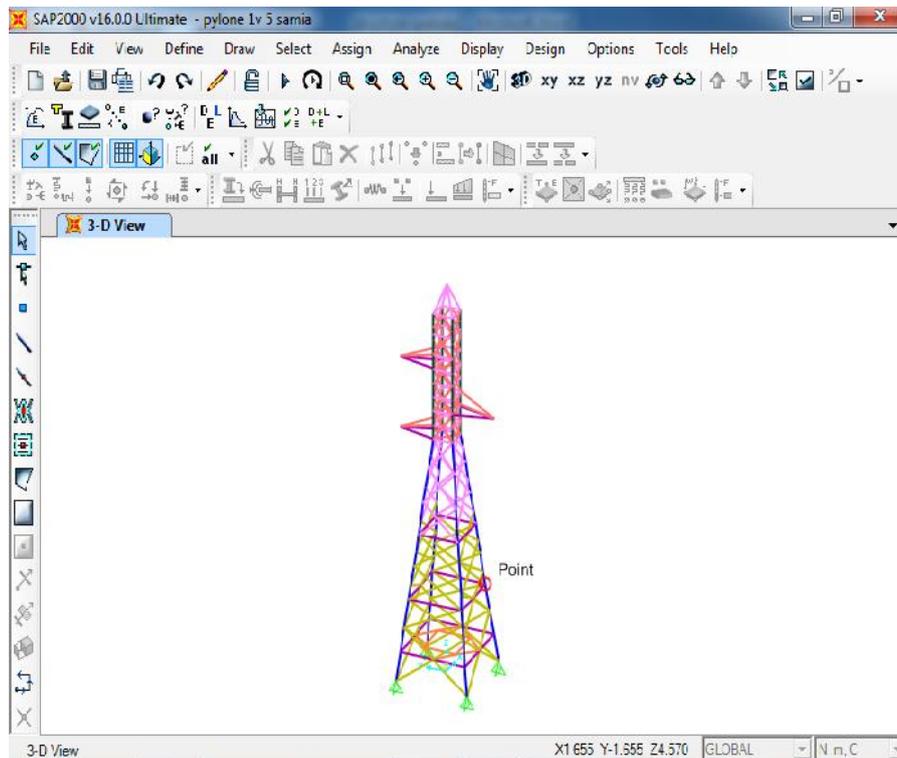
C'est un type Pylône réel (en service) donné par **SONELGAZ**, il a une forme carrée de **4,408 m** de coté, une hauteur sous console de **22,137 m**.

Le pylône étudié est un treillis spatial articulé dans sa base de section transversale rectangulaire variable selon la hauteur de section variable.

Pour sa modélisation, il a fallu d'abord se familiariser avec l'environnement du logiciel **SAP2000** et maîtriser la procédure de la modélisation, cela a pris plusieurs séances notamment pour comprendre l'analyse de flambement et l'analyse en tenant de l'effet P-Delta.

Une fois cela maîtrisé nous avons entamé la modélisation de notre structure et cela à consisté en:

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



**Figure38:IV-3.1 : Les sections est les appuis de pylône (A)**

Tous les éléments constituant notre pylône seront des cornières à ailes égales, le matériau utilisé étant l'acier **E24 (S235)**.

Selon le modèle de **SONELGAZ**, il est composé des sections de cornières suivantes (repéré par leur couleur sur le modèle de la **figure38:IV-2**

Section	Matériau	Surface m <sup>2</sup>
L45X5	S235	0.00043
L50X5	S235	0.00048
L55X5	S235	0.000532
L60X6	S235	0.000691
L80X8	S235	0.001227
L90X9	S235	0.001552

Tableau 9 : IV-3.1 : types des cornières du pylône (A)

### IV.3.2. Le pylône de type C :

C'est un plan d'un Pylône réel donné par **SONELGAZ**, il a une forme carrée de **5.732m** d'empattement (la base), une hauteur sous console de **24.799m**

Selon le modèle de **SONELGAZ**, le type (c) il est composé des sections de cornières suivantes (repéré par leur couleur sur le modèle de la **Figure39**).

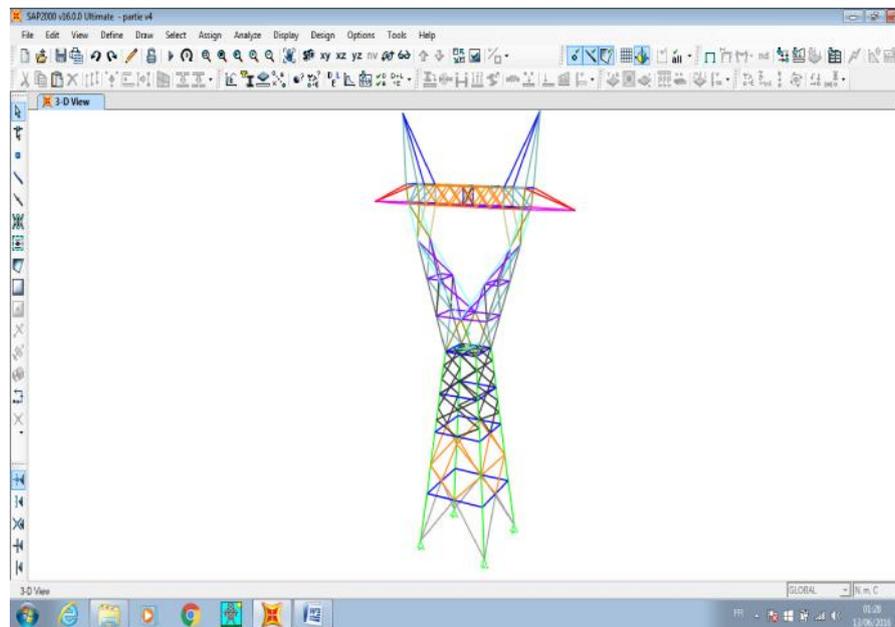
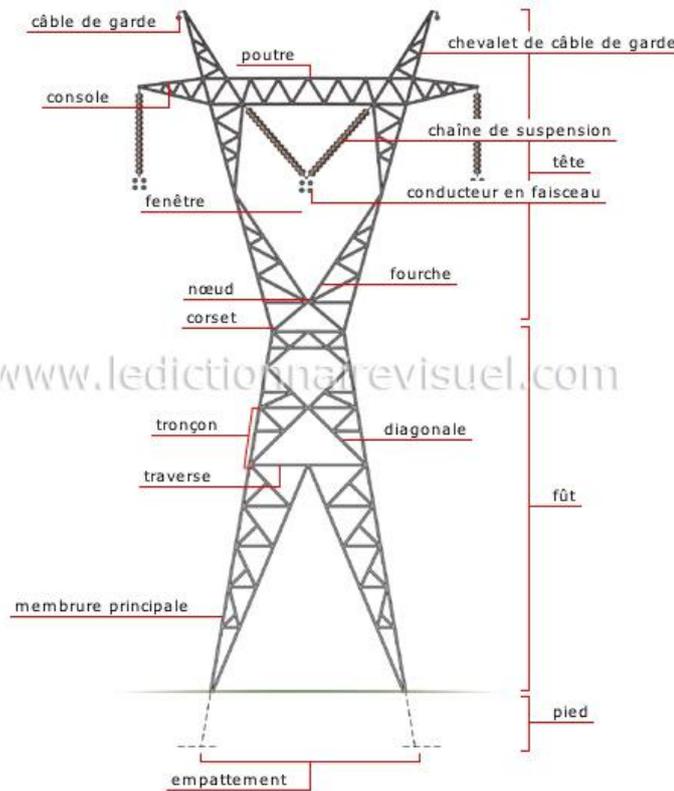


Figure39:IV-3.2: Les sections est les appuis de pylône (C)

Selon le modèle de **SONELGAZ**, le type ( C ) il est composé des sections de cornières suivantes (repéré par leur couleur sur le modèle de la figure ) :



**Figure40:IV-3.2: les éléments de pylône (C)**

	Cornière à ailes égale	Matériau	Surface [m <sup>2</sup> ]
Membrure principale	L150*18	S235	0.0051
	L150*15		0.0043
	L110*10		0.00212
Traverse	L60*6	S235	0.000691
	L50*5		0.00048
Diagonale	L55*5	S235	0.000532
	L50*6		0.000569
	L45*5		0.00043
	L70*7		0.00094
fourche	L110*10	S235	0.00212
console	L70*6	S235	0.000813
	L100*10		0.00192
poutre	L90*9	S235	0.001552
	L70*7		0.00094
Chevalet de câble de garde	L60*6	S235	0.000691
	L70*7		0.00094

Tableau 10: IV-3.2 : types des cornières du pylône (C)

#### IV.4. Les cas de charges élémentaires :

-  **le poids propre** : calculé automatique par le logiciel **SAP-2000**.
-  **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 6 tronçons. Pour pylône (A) et 5 tançons pour pylône (C)

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 **NV99** il ya deux directions.

Les charges appliquées calculé dans le chapitre(3) nous donnent l'action du vent selon la hauteur (Z) et les deux directions.

<b>Z (m)</b>	<b>Ce(Z)</b>	<b>q<sub>dyn</sub>(Z<sub>j</sub>) (N/m<sup>2</sup>)</b>	<b>W(Z<sub>j</sub>) (N/m<sup>2</sup>)</b>	<b>q<sub>j</sub> (N/m<sup>2</sup>)</b>
2,982	1,033	387,506	759,512	396,980
13,436	1,988	745,382	1460,949	763,606
15,034	2,068	775,398	1519,780	794,356
16,634	2,141	802,803	1573,494	822,431
18,235	2,208	828,026	1622,930	848,270
20,537	2,296	861,112	1687,779	882,166

**Tableau 11 : IV-4 : la pression due au vent du Pylône (A)**

<b>Z (m)</b>	<b>Ce(Z)</b>	<b>q<sub>dyn</sub>(Z<sub>j</sub>) (N/m<sup>2</sup>)</b>	<b>W(Z<sub>j</sub>) (N/m<sup>2</sup>)</b>	<b>q<sub>j</sub> (N/m<sup>2</sup>)</b>
7.286	1.573	589.968	1156.337	1395.647
12.195	1.919	589.968	1410.936	2298.6995
15.232	2.209	828.525057	1623.909	3495.388
18.268	2.209	828.525	1623.909	3495.388
24.799	2.439	914.645	1792.705	5870.511

**Tableau 12 : IV-4 : la pression due au vent du Pylône (C)**

Cette charge par niveau est répartie sur les surface qu'offres les elements (cornieres) au vent. En divisant notre pylone en zone et en repartissant le chargement selon les surfaces de chaque zone , nous obtenons les charges ponctuelles appliquées aux deux nœuds de chaque niveau choisi ( voir Figure41et Figure42).

**Charge ponctuelle appliquées plan( Z-Y) :**

<b>Cote Z (m)</b>	<b>Charge Vent 1 (plan Z-Y)</b> (à répartir sur les deux Nœuds du niveau)
1,622	<b>242,00</b>
4,570	<b>492,60</b>
8,146	<b>985,20</b>
13,436	<b>117,07</b>
14,235	<b>117,07</b>
15,034	<b>117,07</b>
15,835	<b>117,07</b>
16,634	<b>111,95</b>
17,436	<b>111,95</b>
18,235	<b>111,95</b>
19,39	<b>111,95</b>
20,537	<b>111,95</b>

<b>Cote Z (m)</b>	<b>Charge Vent 1 (plan Z-X)</b> (à répartir sur les deux Nœuds du niveau)
7.286	<b>697.824</b>
12.195	<b>1149.350</b>
15.232	<b>1747.693</b>
18.268	<b>1747.693</b>
24.799	<b>2935.256</b>

**Tableau 14 : IV-4 : La charge de vent  
du Pylône (C) dans plan( Z-Y)**

**Tableau 13 : IV-4 : La charge de vent  
du Pylône (A) dans plan( Z-Y)**

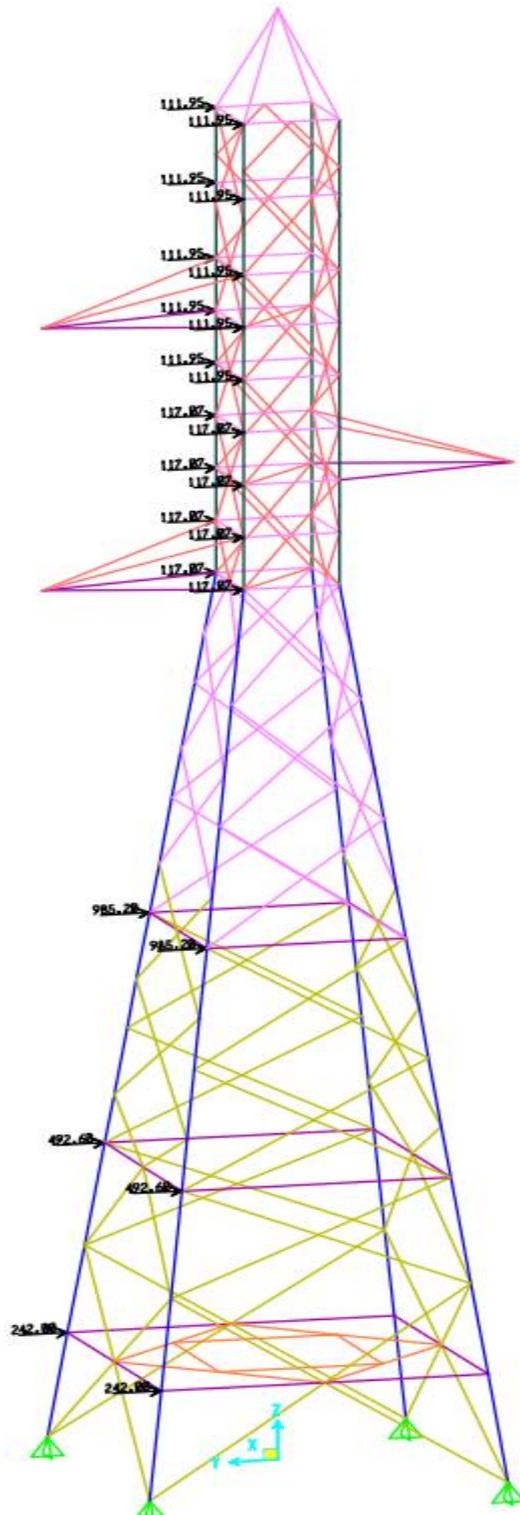


Figure41:IV-4: Charge de vent du *Pylône (A)* dans le plan Z-Y

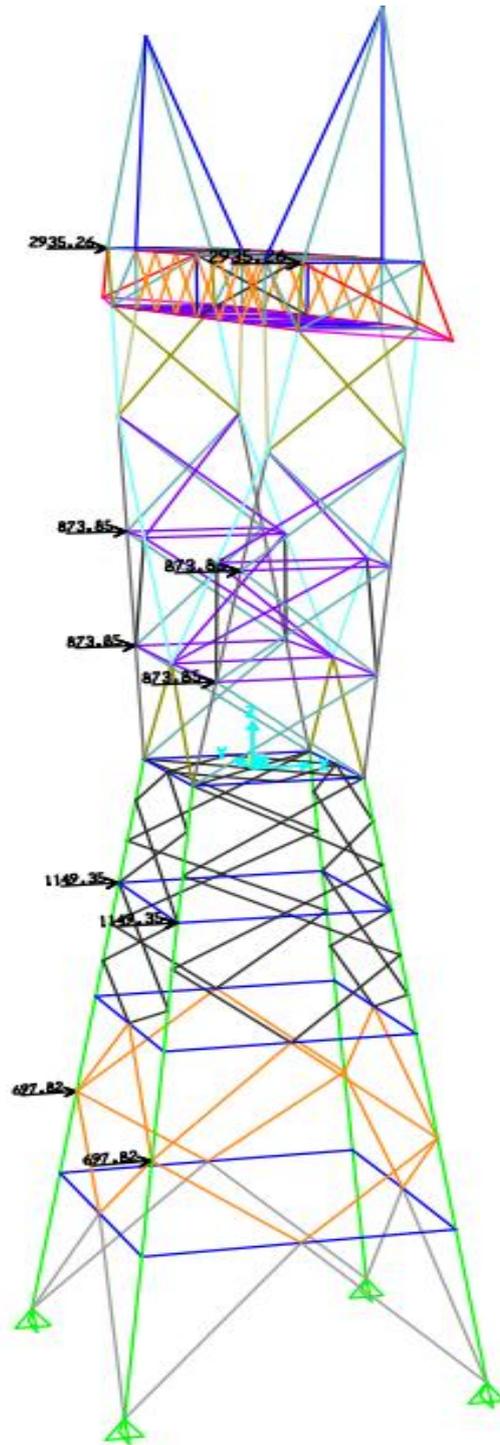


Figure42:IV-4: Charge de vent du *Pylône (C)* dans le plan Z-X

**Charge ponctuelle appliquées Plan Z-X**

<b>Cote Z (m)</b>	<b>Charge Vent 2(plan Z-X) (à répartir sur les deux Nœuds du niveau)</b>
1,622	312,08
4,570	585,38
8,146	1170,76
13,436	115,84
14,235	115,84
15,034	115,84
15,835	115,84
16,634	111,96
17,436	111,96
18,235	111,96
19,39	111,96
20,537	111,96

**Tableau 15 : IV-4 : La charge de vent  
du Pylône (A) dans plan (Z-X)**

<b>Cote Z (m)</b>	<b>Charge Vent 1 (plan Z-X) (à répartir sur les deux Nœuds du niveau)</b>
7.286	758.751
12.195	925.810
15.232	1569.190
18.268	1569.190
24.799	630.887

**Tableau 16 : IV-4 : La charge de vent  
du Pylône (C) dans plan( Z-X)**

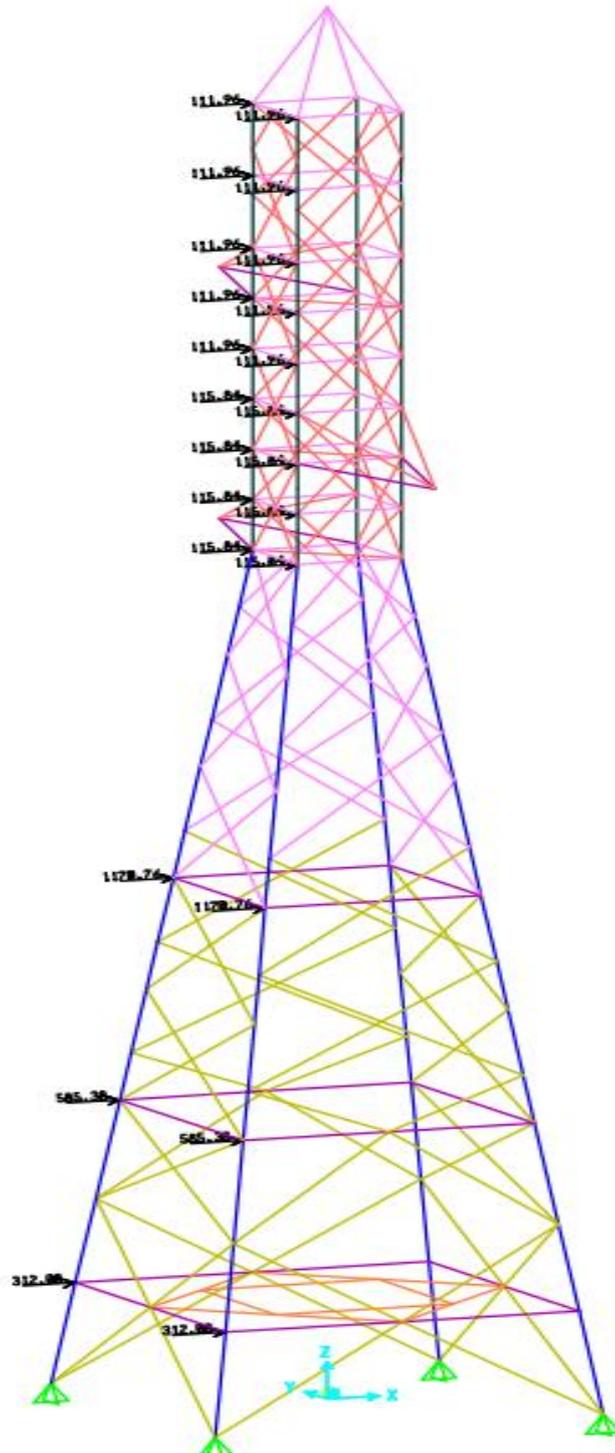
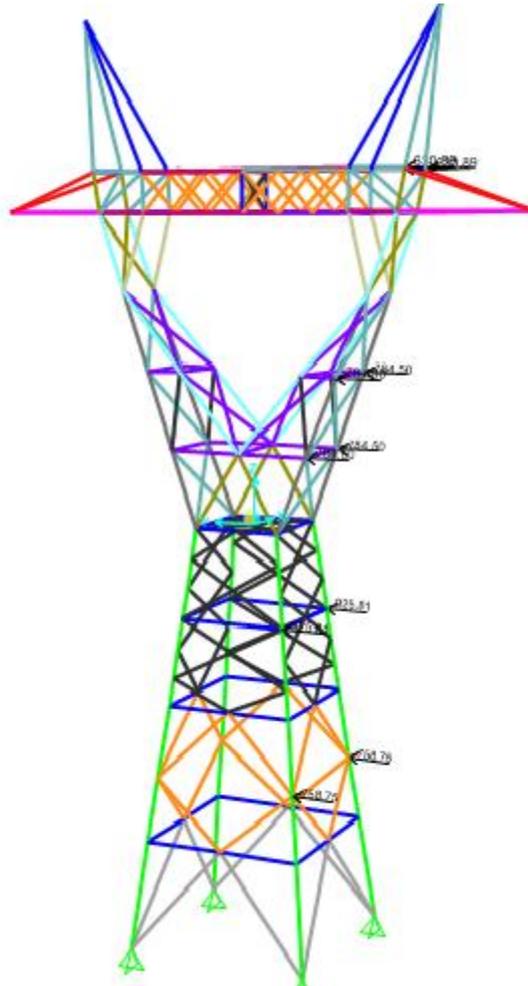


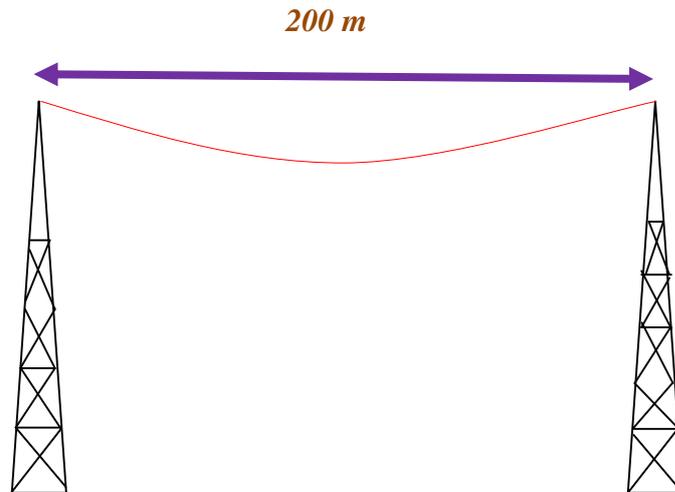
Figure43:IV-4: Charge de vent du *Pylône (A)* dans le plan Z-X



**Figure44:IV-4: Charge de vent du Pylône (C) dans le plan Z-X**

**🚧 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 coté. Les distance entres pylônes diffèrent selon leur capacité et le nombre de câbles qu'ils soutiennent. Dans notre cas la distance entre pylônes est de 200m. 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).



**Figure45:IV-4: la longueur réelle du câble**

Charge statique des câbles appliqués (dans notre test l'effet dynamique du vent sur les câbles n'est pas pris en compte).

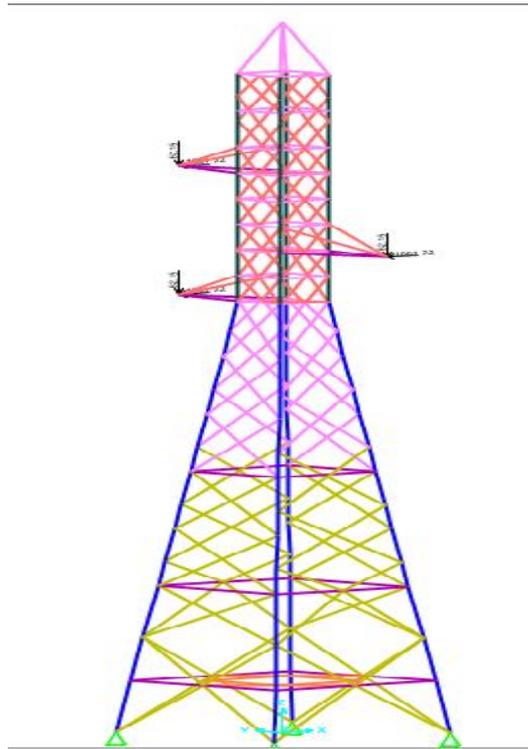


Figure46:IV-4: *Les charges des câbles pour pylône (A)*

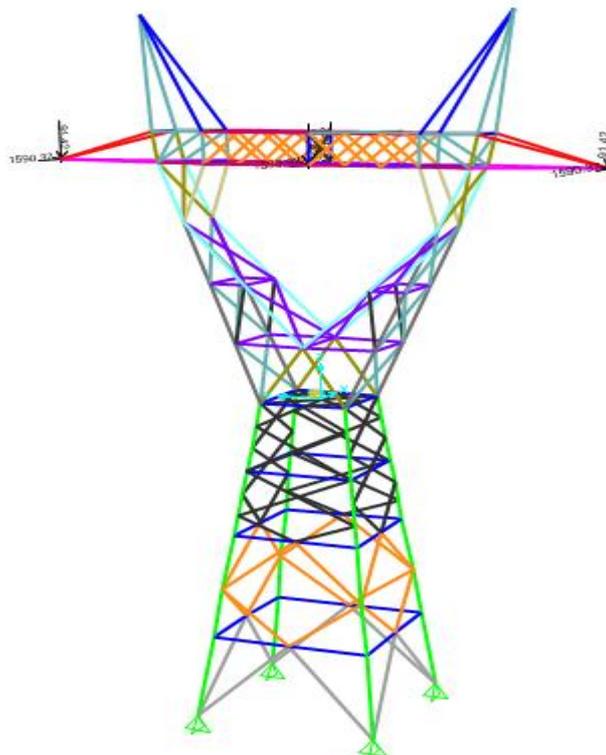
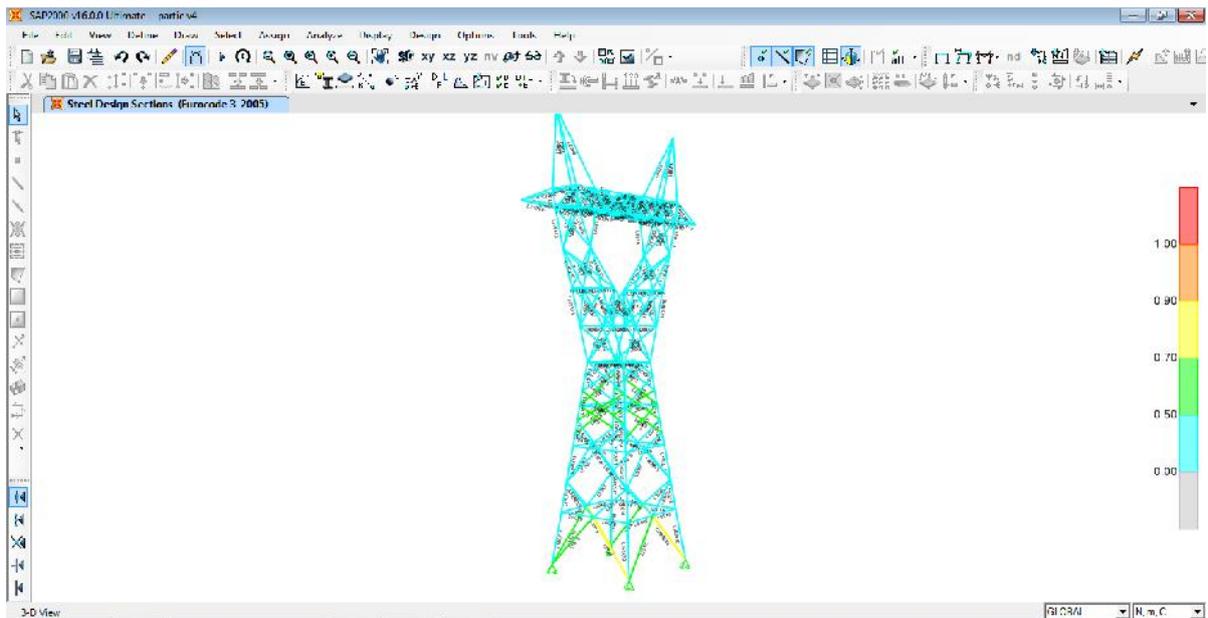


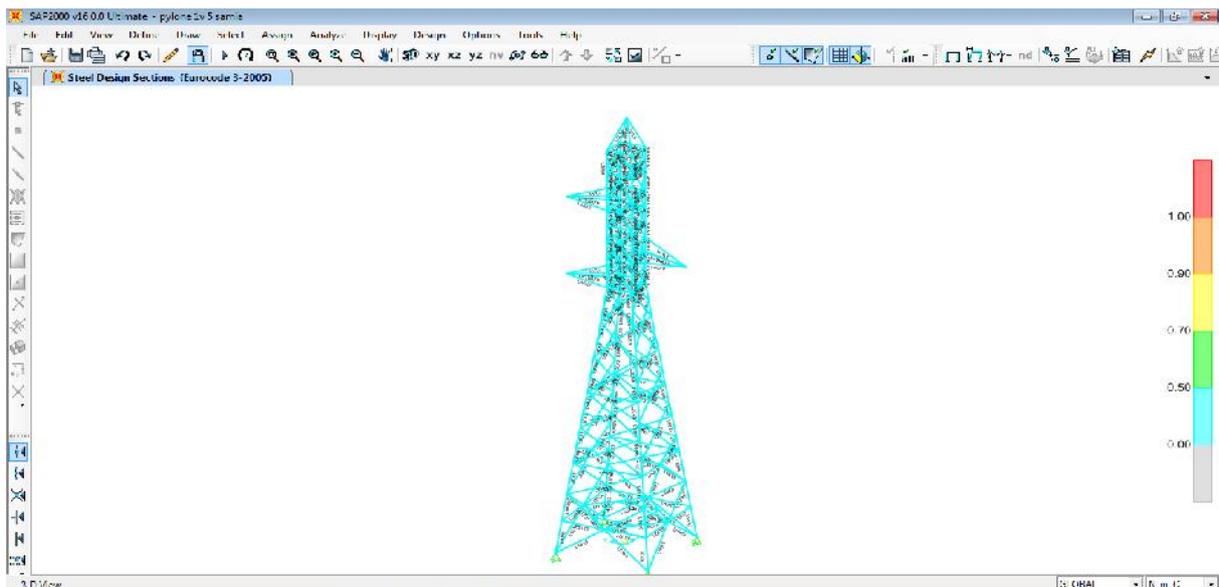
Figure47:IV-4: *Les charges des câbles pour pylône (C)*

### IV.5. Calcul linéaire de vérification du dimensionnement :

Un premier calcul en analyse linéaire est exécuté en vue de vérifier la résistance et le service. L'analyse linéaire et la vérification du dimensionnement des barres est effectué par le logiciel SAP2000 selon Eurocode3 et avec toutes les combinaisons réglementaires, vérifiées dans les cas les plus défavorables. Le choix des sections des cornières proposées dans le modèle **Figure 48: IV-5: , Figure 49: IV-5:** (ceci est normale puisque ces pylônes sont en service, et nous avons juste fait une vérification)



**Figure 48: IV-5: vérification de toutes les barres du pylône (c)**



**Figure 49: IV-5: vérification de toutes les barres du pylône (A)**

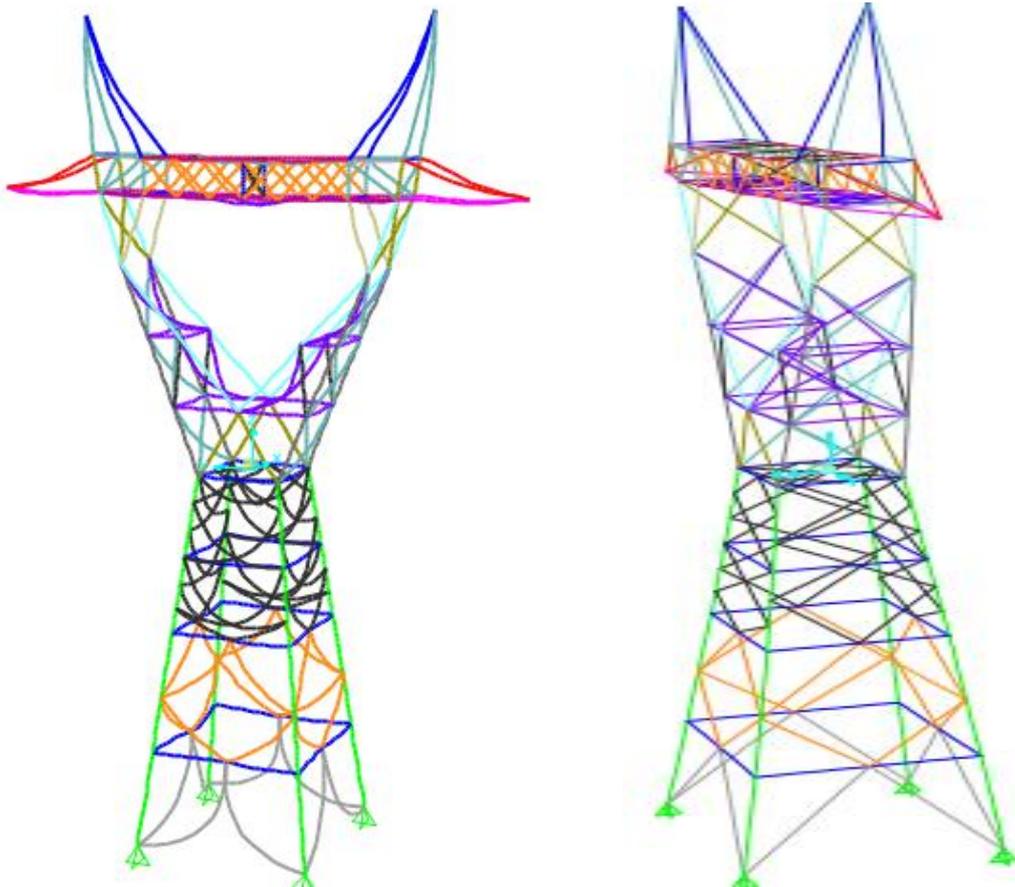


Figure50:IV-5:Déformation de pylône sous poids propre et charge de câble Pylône (C)

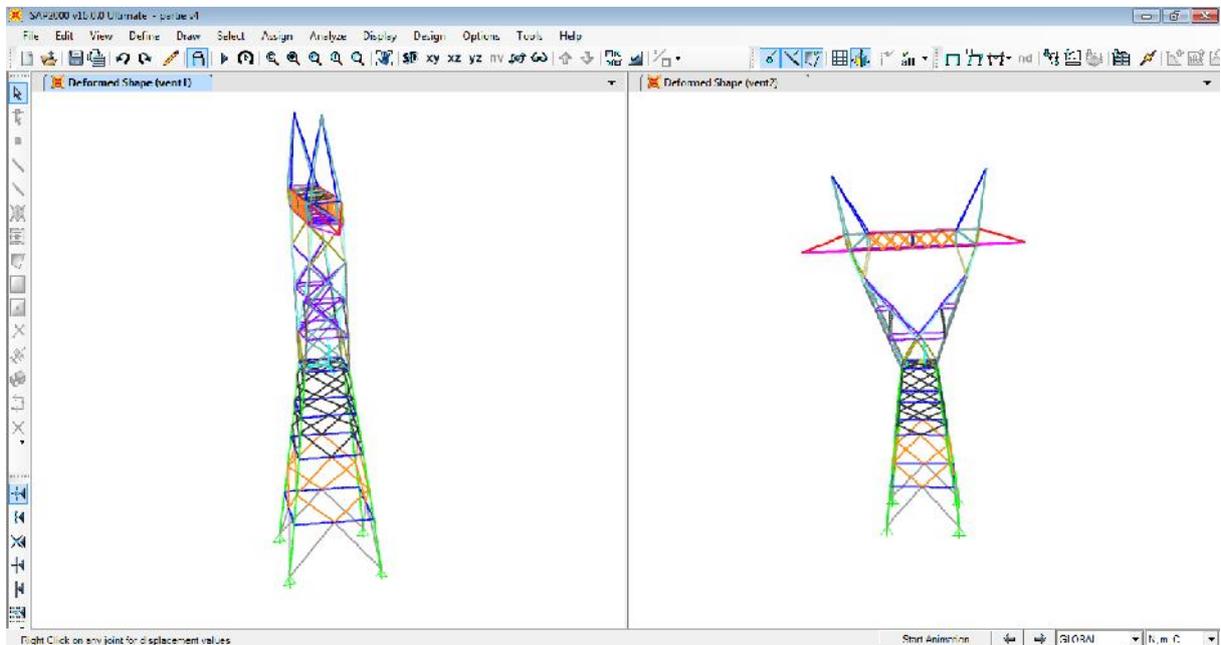
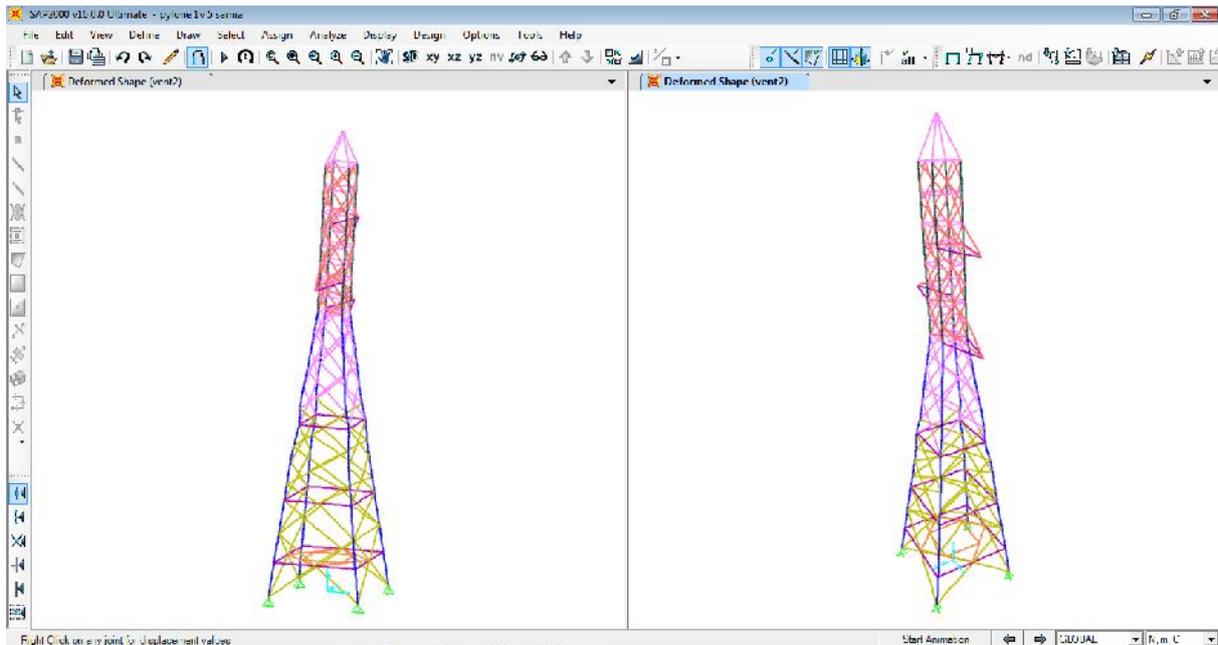


Figure51:IV-5:Déformation de pylône sous l'action du vent 1et vent 2 pylône (C)



**Figure52:IV-5:Déformation de pylône sous l'action du vent1 et vent 2 pylône (A)**

Par ailleurs et sous des Actions extrêmes, le pylône étant une structures légère peut être le siège de sollicitation entrainant un flambement local d'un ou de plusieurs de ses éléments.

Cette situation peut même entrainer une ruine complète de la structure. Nous nous proposons dans ce qui suit de mener une analyse de flambage pour estimer le facteur de charge critique conduisant à évaluer la 1er charge critique (selon le premier mode) et situer les barres qui peuvent être sollicitées au delà de leur capacité de résistance au flambement

#### **IV.6.Analyse de flambage :**

Dans cette partie une analyse de flambage (buckling) mené sur le logiciel sap2000 nous permet d'évaluer la charge critique amenant au flambage et les éléments de structure (cornière susceptible de flamber sous des actions extrêmes.

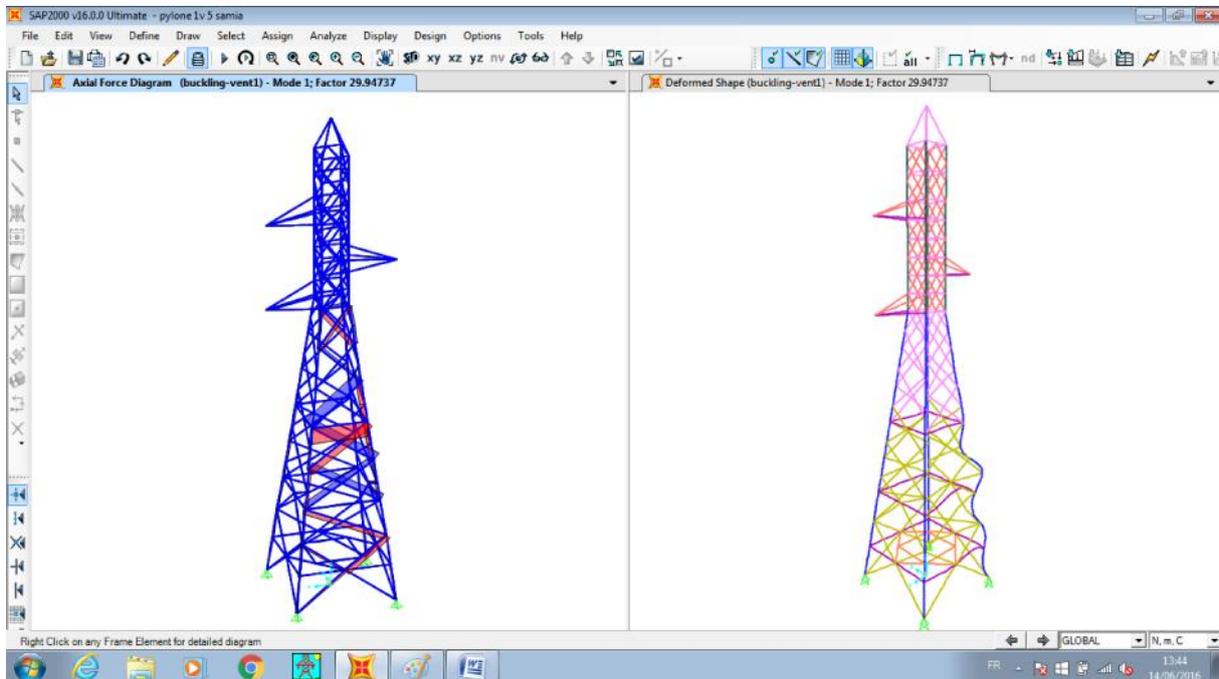
Nous remarquons que l'analyse du flambage sous l'action une fois du poids propre associé à l'action des câbles et une autre fois, sous l'action du poids propre, des câbles et du vent, conduit à une réduction du facteur d'intensité de charge critique. Cela montre bien que l'analyse mené est correcte.

Par ailleurs en lançant l'analyse sous l'action de poids propre, des câbles et du vent (avec les deux possibilités d'action du vent dans les deux directions) nous obtenons les résultats suivant :

### A-Résultats de l'analyse de flambage du pylône de type A sous VENT1 (pour les modes 1, 2,3) :

L'analyse de flambage pour le cas du pylône de type A nous donne le premier facteur de charge critique (mode 1) de 29.94. **Figure53:IV-6** Dans ce cas les premières barres qui vont initier la ruine de la structure sont quelques barres inférieures (au niveau du fut) qui vont entrer en flambement (sollicité par un effort axiale important)

Pour les modes supérieures ( mode 2 et 3) évidemment les facteurs de charge sont plus élevés et on remarque que dans ce cas des barre supérieure vont êtres touchées par la flambement (**Figure54:IV-6, Figure55:IV-6**) aussi ce qui engendrera inévitablement la ruine de la structure



**Figure53:IV-6: la charge critique de mode 1 sous vent1 du pylône (A)**

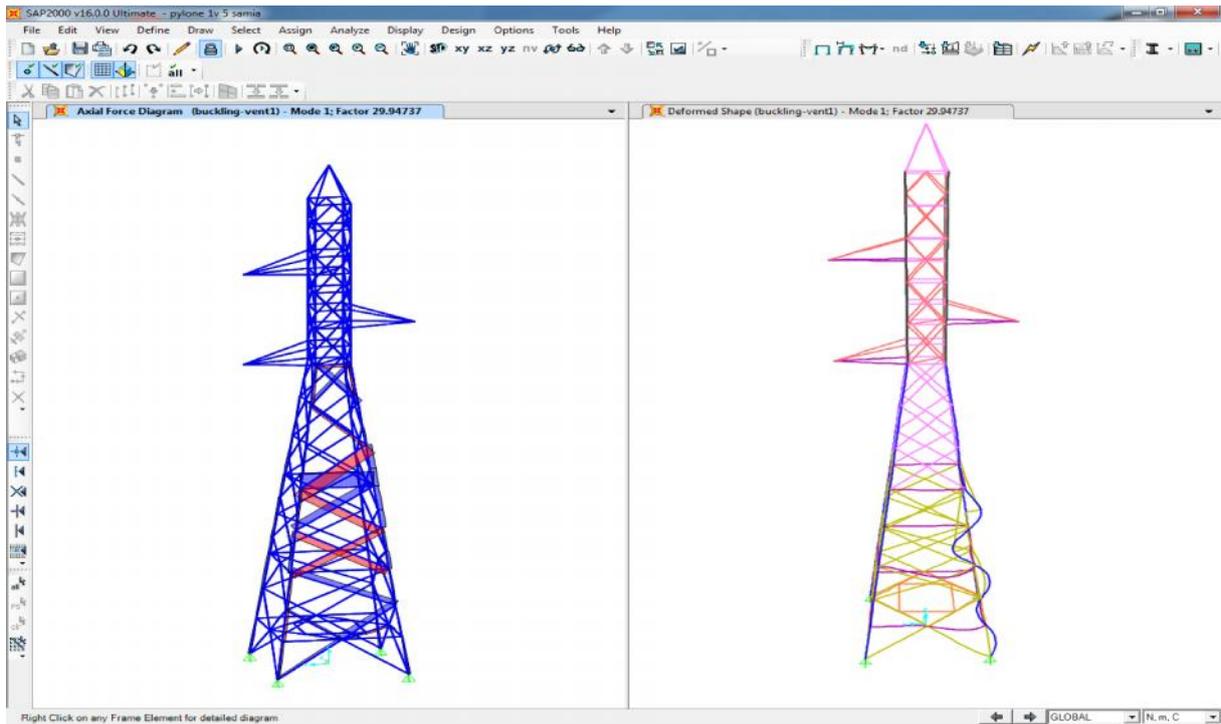


Figure54:IV-6: la charge critique de mode 2 sous vent 1 du pylône (A)

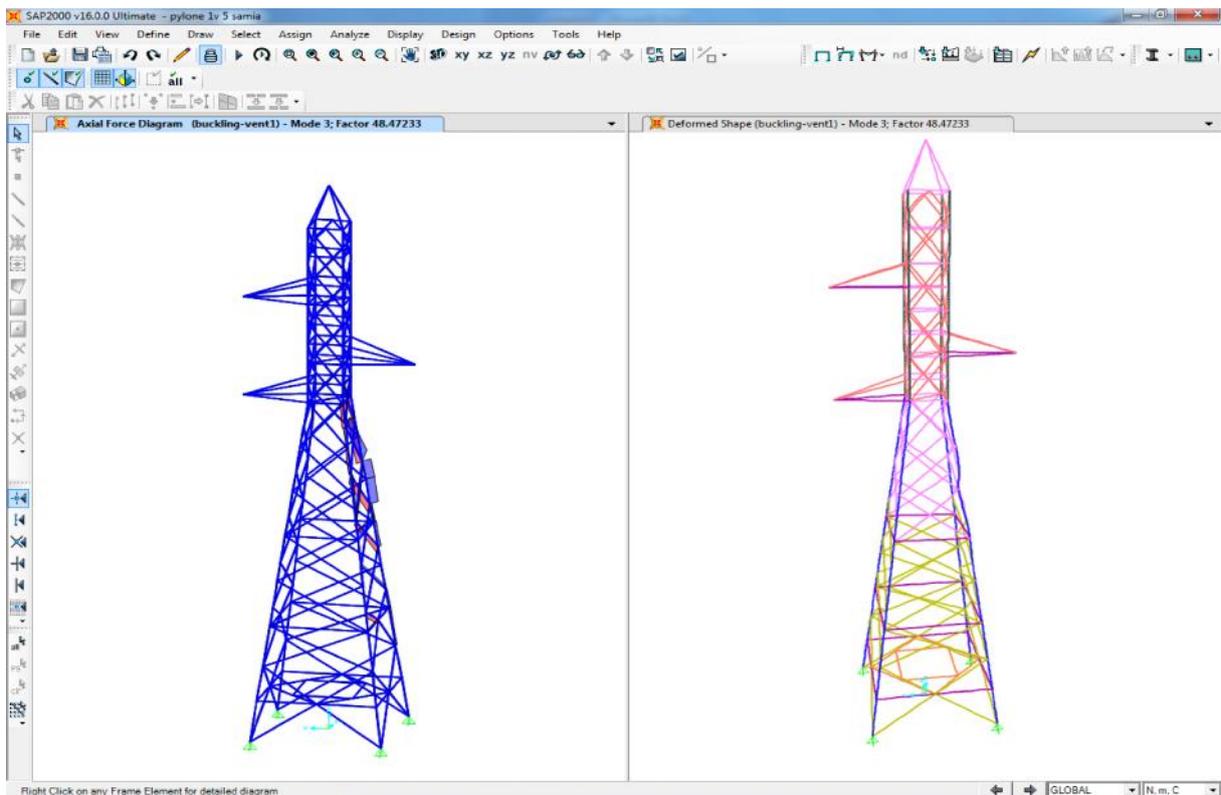


Figure55:IV-6: la charge critique de mode 3 sous vent 1 du pylône (A)

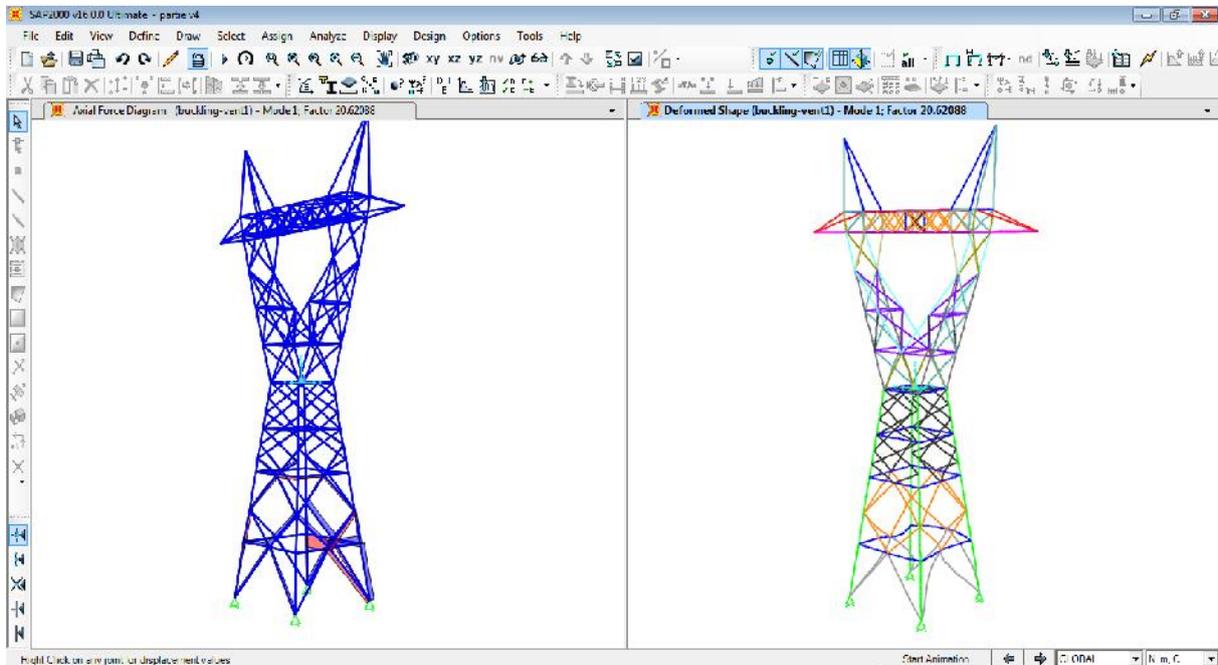
**B-Résultats de l'analyse de flambage du pylône de type C sous VENT1 (pour les modes 1, 2,3) :**

Les même remarque peuvent êtres faites pour le pylône de type C. L'analyse de flambage nous nous donne le premier facteur de charge critique (mode 1) de 20.62. **Figure56: IV-6** de manière similaire, les premières barres qui vont initier la ruine de la structure sont quelques barres inferieures (au niveau du fut) ou un effort axial important se développe ce qui va faire entrer en flambement ces barres

En allant dans les modes supérieures (mode 2 et 3) seule les barres de base inferieur continue a développé des efforts axiaux élevés et ou le risque de flambement augmente.

**(Figure57:IV-6, Figure58:IV-6)**

On remarque que dans ce type de pylône, les barres inferieur doivent êtres correctement dimensionné car elles représentent un point faible d'instabilité en cas d'actions extrêmes.



**Figure56:IV-6: la charge critique de mode 1 sous vent 1 du pylône (C)**

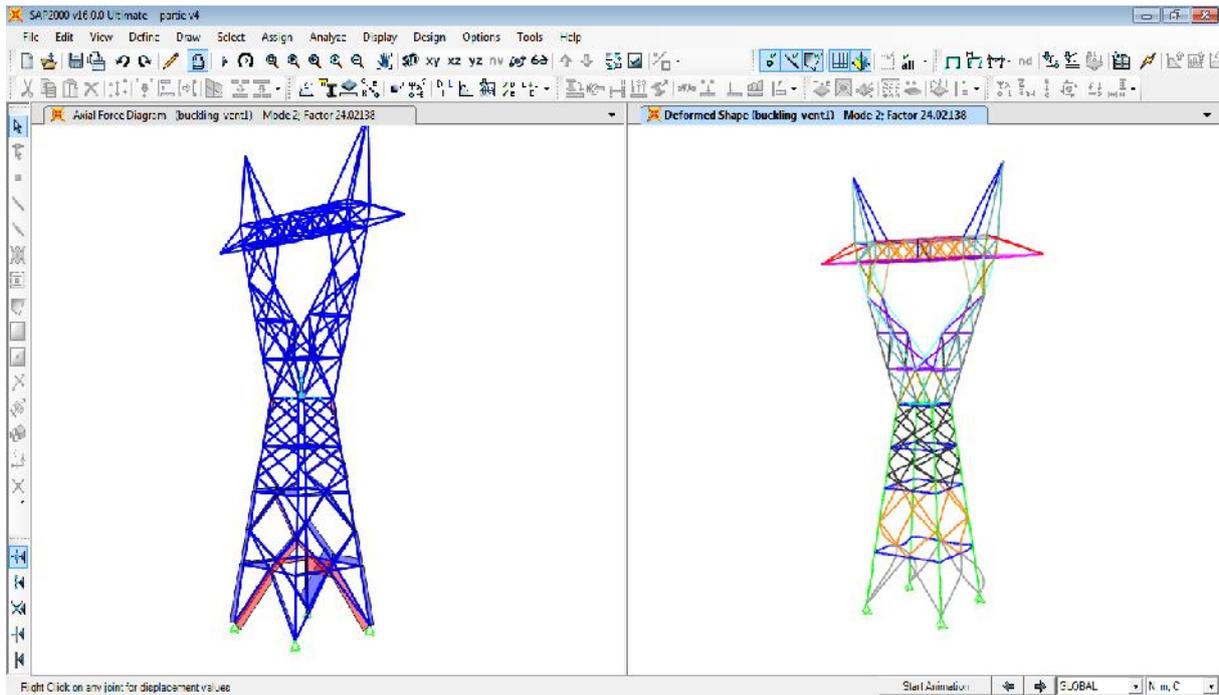


Figure57:IV-6: la charge critique de mode 2 sous vent 1du pylône (C)

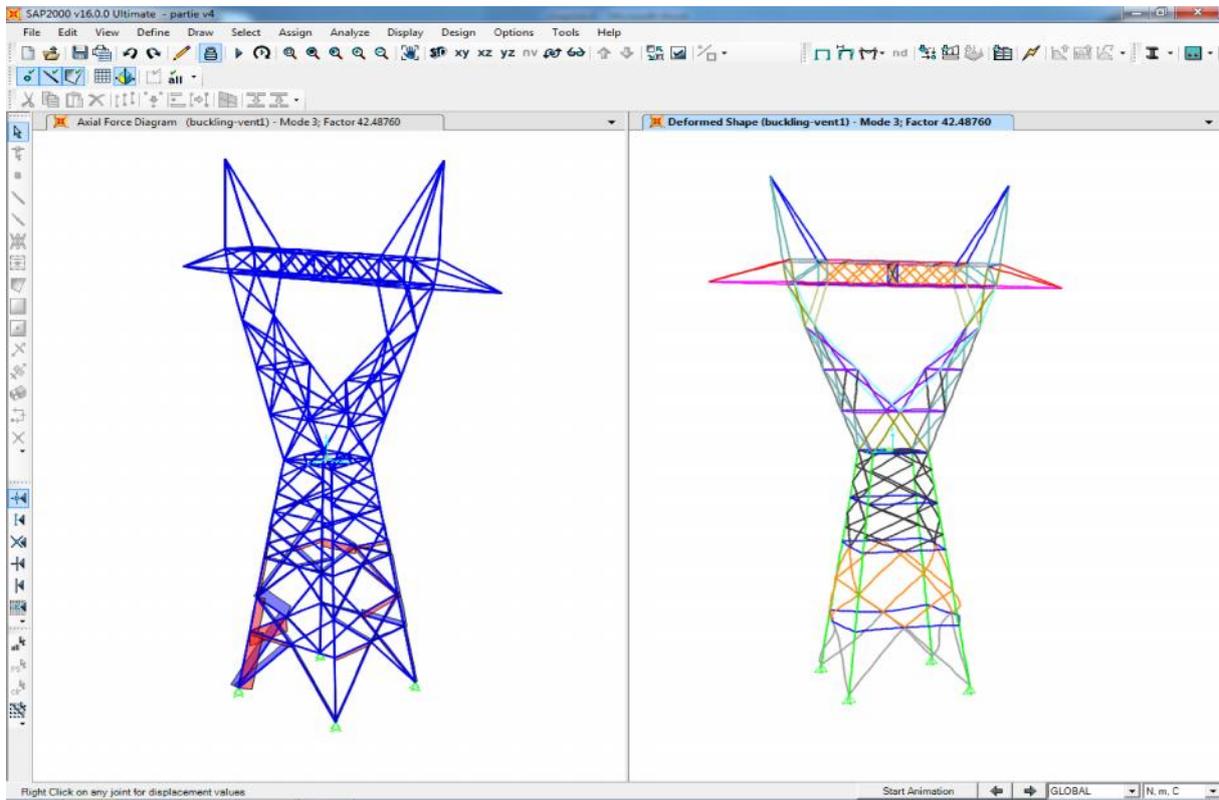


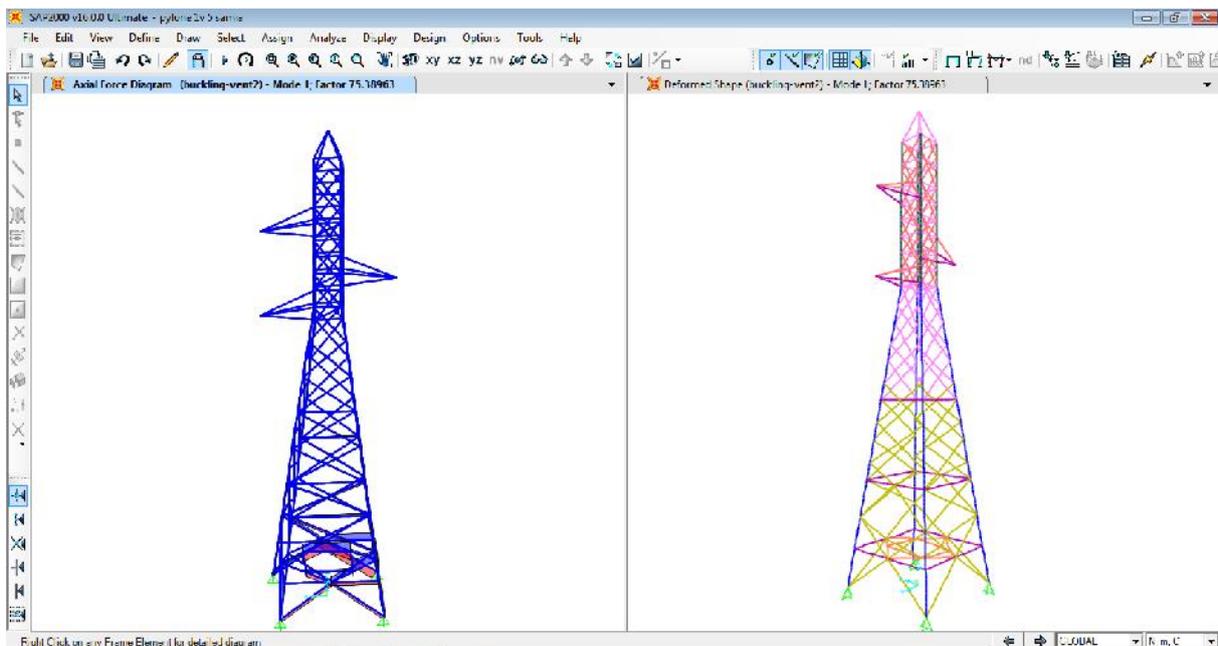
Figure58:IV-6: la charge critique de mode 3 sous vent 1du pylône (C)

### **C-Résultats de l'analyse de flambage du pylône de type A et C sous VENT2 (pour les modes 1, 2,3) :**

Les mêmes remarque sont faites pour le cas du vent 2 avec en remarque que le facteur de charge critique dans ce cas est plus élevé **Figure59:IV-6**; Ce qui nous montre que le vent est moins préjudiciable que le vent 1 ; Concernant l'évolution du flambage pour les modes supérieure (**Figure60:IV-6, Figure61:IV-6**), il répond au même remarques que pour le vent1. La ruine si elle survient arrivera par les barres de la base inferieur et montera progressivement vers les barres supérieures.

Les même remarque sont faites au pylône de type C (**Figure62:IV-6, Figure63:IV-6, Figure64:IV-6**,

### **Résultats de l'analyse du pylône de type A sous VENT2**



**Figure59:IV-6: la charge critique de mode 1 sous vent 2du pylône (A)**

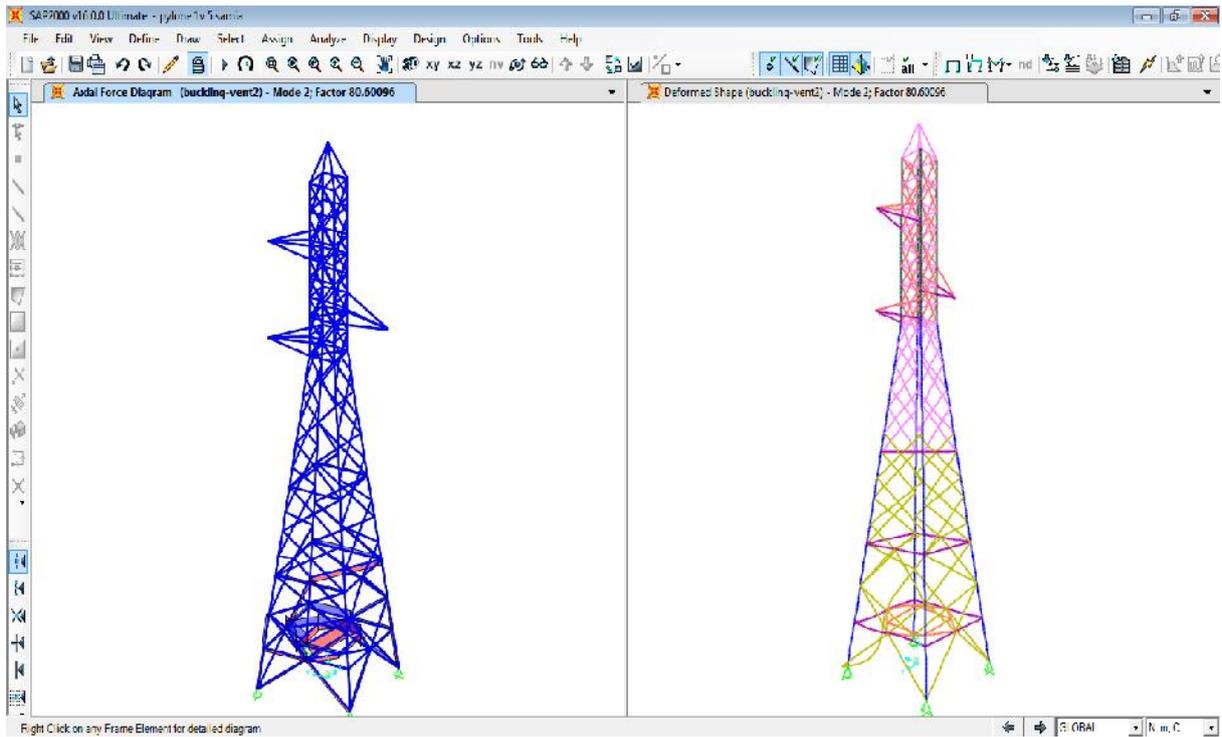


Figure60:IV-6: la charge critique de mode 2 sous vent 2du pylône (A)

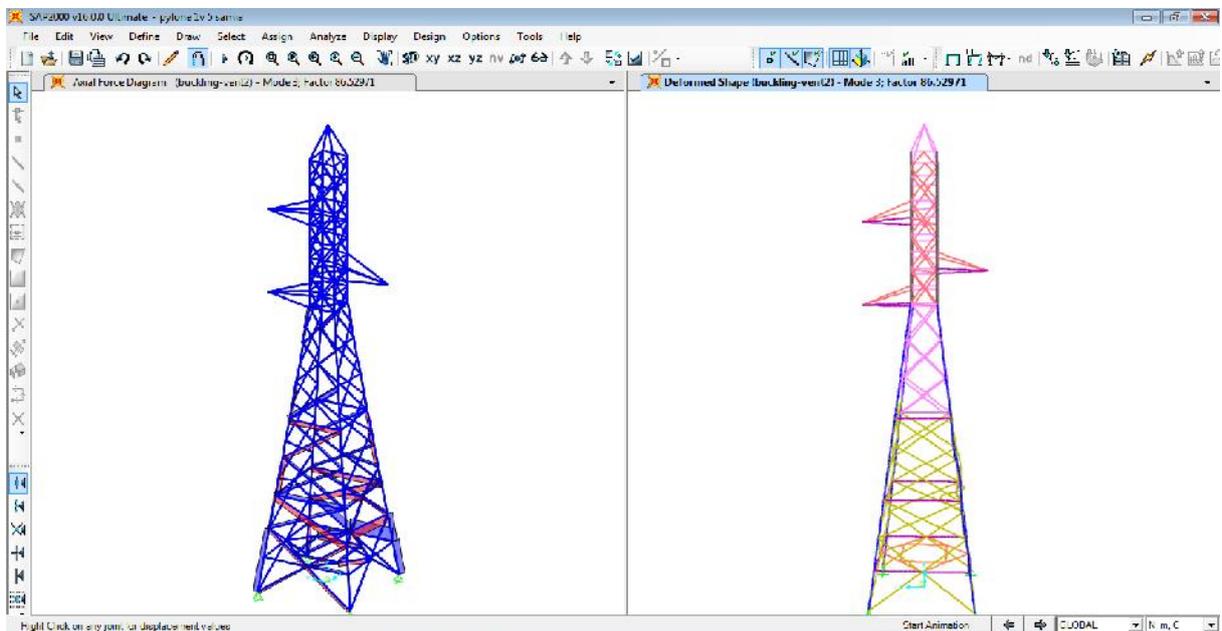
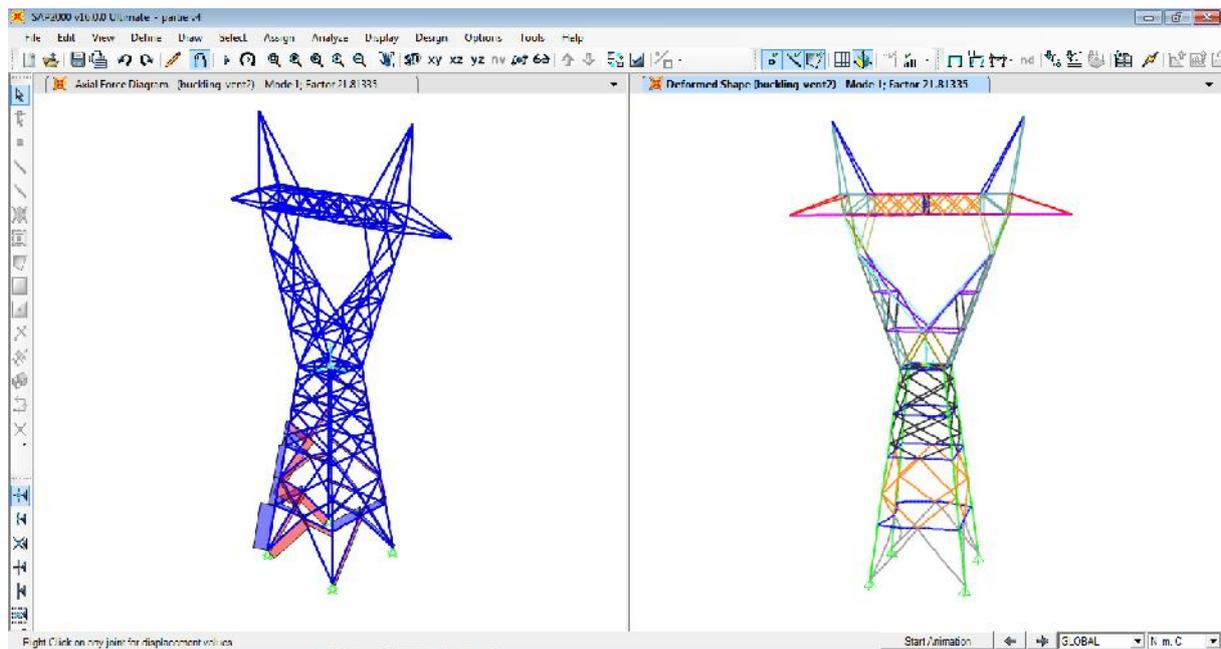
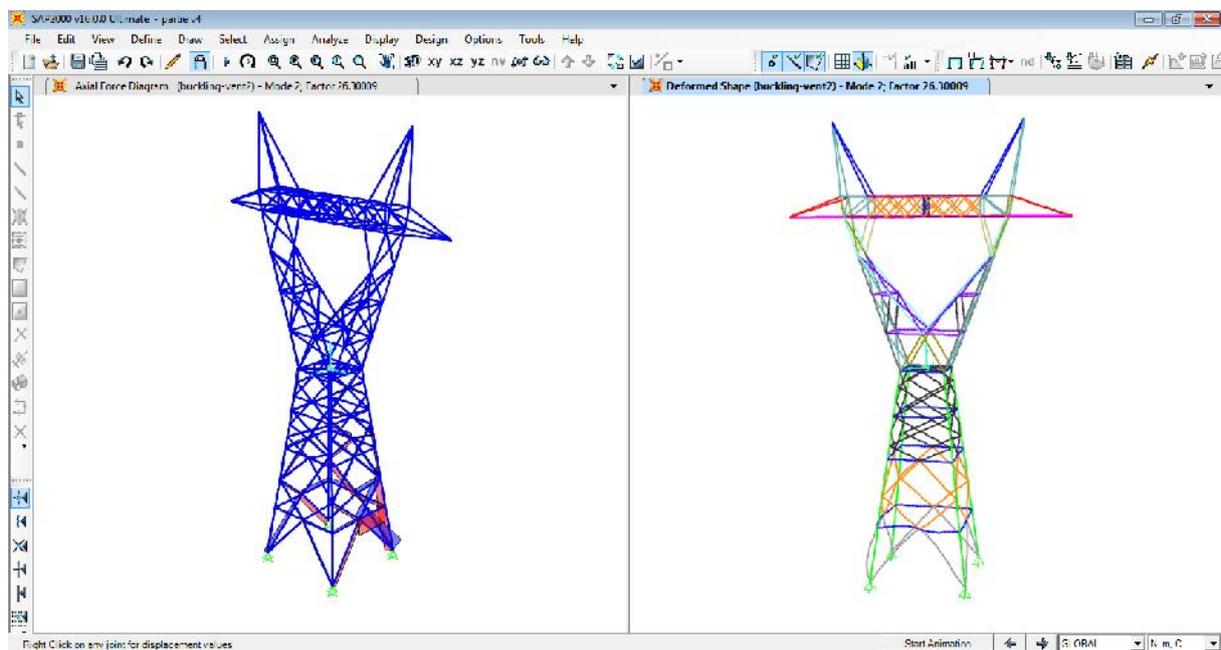


Figure61:IV-6: la charge critique de mode 3 sous vent 2du pylône (A)

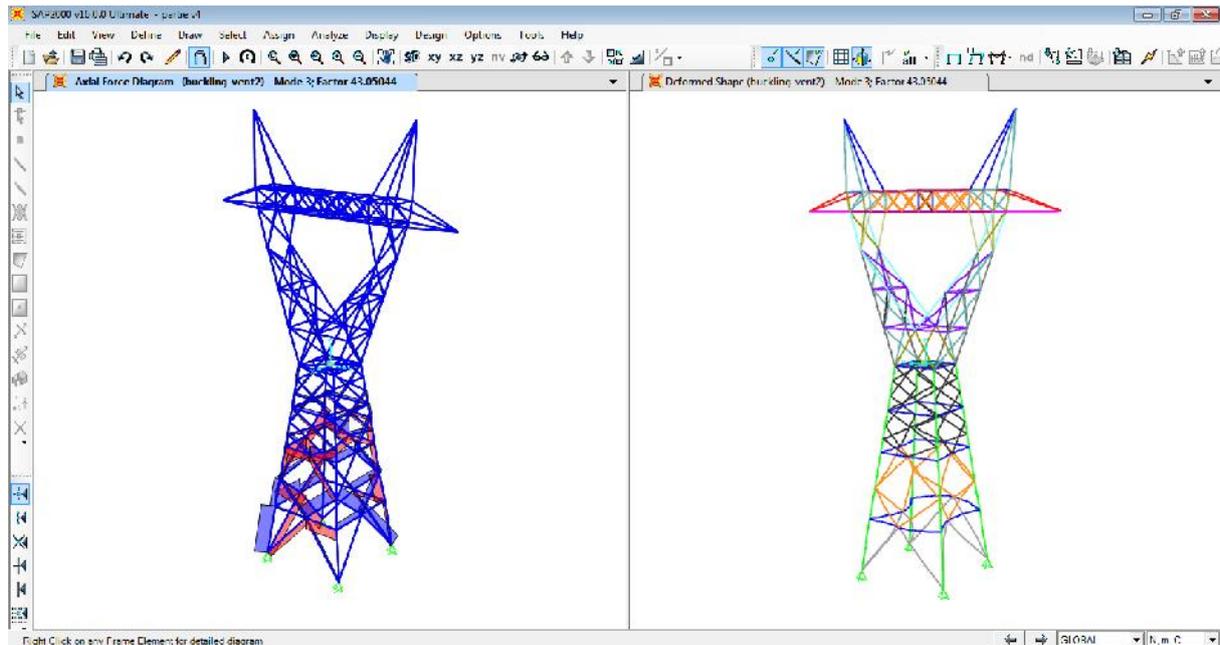
**Résultats de l'analyse du pylône de type C sous VENT2**



**Figure62:IV-6: la charge critique de mode 1 sous vent 2du pylône (C)**



**Figure63:IV-6: la charge critique de mode 2 sous vent 2du pylône (C)**



**Figure64:IV-6: la charge critique de mode 3 sous vent 2du pylône (C)**

### Conclusion :

Nous remarquons que sous ces actions le facteur de charge critique est plus important dans le sens du vent 2. (Sens favorable à cause de l'action de tension des câbles qui peut être favorable quand le vent est dans le même sens).

Le facteur de charge est plus faible dans le sens du vent 1 car les câbles ne joués pas le rôle de stabilisateur puisque leur action est nulle dans ce sens.

Par ailleurs nous pouvons remarquer que pour la première charge critique, ce sont les barres inférieure qui flambent en premier. Pour les charges critique des modes supérieurs, l'instabilité se propage dans les barres supérieures (voir figure) et on remarque dans cette situation quelles sont les barres qui perdent en 1<sup>er</sup> leur stabilité (flambage). Celle permet de comprendre quelles barres sont à surveiller.

Ces remarques peuvent êtres appliquées au deux type de pylônes. Cependant les fortes sollicitations que subit les pylônes de type C en raison d'abord de son envergure et des charges de câbles plus importantes qu'ils supportent dans en analyse de flambage une 1<sup>er</sup> charge critique plus faible. Ce résultat nous indique qu'en cas d'actions extrêmes, ce pylône est plus sensible à une instabilité.

### **Conclusion :**

Ce travail concerne l'analyse de stabilité de structures de type pylône utilisée pour le transport de l'énergie électrique par câble aérien. Ces structures revêtent une importance capitale car leur ruine suite à des sollicitations diverses (actions climatiques extrêmes, accidents, mauvaise conception ou dimensionnement etc.) prive en générale des zones importantes voire des villes entières de l'approvisionnement en énergie électrique pouvant être très préjudiciable pour les populations et même à la vie économique d'une cité.

C'est dans ce contexte qu'on s'est intéressé à l'étude de leur stabilité. Les pylônes auxquels nous nous sommes intéressés sont de type treillis utilisés le plus spécifiquement dans le transport électrique par des lignes de haute tension reliant en général à partir de centrales électriques plusieurs villes environnantes. Cela suppose donc le transport sur des dizaines de kilomètres et donc nécessitant un certain nombre de pylônes). Pour mener notre analyse nous avons pris des modèles de pylônes utilisés réellement par l'entreprise d'électricité algérienne " SONELGAZ. Cette société utilise plusieurs types selon la puissance d'énergie à transporter.

Nous avons pris le cas de 2 types de pylône auxquels nous avons appliqué toute l'étude de dimensionnement et que nous avons testé ensuite en analyse de Flambement. Il s'agissait d'évaluer le risque de flambement des éléments de ce genre de structures en évaluant les facteurs multiplicateurs des charges sollicitant le pylône pour arriver à la charge critique de flambement. Cette analyse dévoilera donc si la structure est sécuritaire ou non selon la valeur de la charge critique calculée et aussi l'évolution des sollicitations axiales des barres amenant à des risques de flambement.

Ainsi sur les deux pylônes analysés nous pouvons présenter les conclusions suivantes :

les deux pylônes tels que dimensionnés par la société SONELGAZ (choix des cornières) ont toutes leurs barres qui vérifient bien la résistance sous les sollicitations réglementaires.

Concernant l'analyse de flambement, le cas de charge critique le plus défavorable est obtenu pour le cas de charge du vent 2 (agissant selon la direction de l'action du câble) qui donne un facteur de charge critique de 30. (Coefficient par lequel il faut multiplier les charges sur le pylône pour atteindre la première charge critique). Ce résultat montre que le pylône présente une bonne réserve de sécurité. Ceci est normal puisque ce genre de pylône qui est actuellement en service n'a pas eu à notre connaissance d'accident important lié au flambement.

Par ailleurs l'analyse montre aussi pour les cas de charge critique, quelles sont les première barre qui seront concerné par le flambement en cas d actions extrêmes.

Pour les modes supérieur de flambement et donc des facteurs de charge plus élevé, nous constatons le risque de flambement qui touchent les barres supérieures situe en têtes. Ces résultats peuvent expliquer certains accident de pylônes suite à des actions climatique extrêmes ou on voit pratiquement toutes les barres en ruine suite à à flambent locale et ensuite à a flambement de l'ensemble de la structure.

Par ce travail nous avons essayé de comprendre le comportement de structure spécifique que sont les pylônes en treillis.

Si d'apparence leur calcul simple, ils restent en raison de leur élancement de leur légèreté et de la faiblesse de section des barres utilisées, très sensible au phénomène d'instabilité. Ainsi une analyse minutieuse doit être menée pour bien tenir comptes des comportements sensibles de ce genre de structure. L'analyse du flambement de ce genre de structure en tenant compte de l'effet P-Delta nous donne des informations intéressantes quand au risque de flamber et surtout au des barres susceptible de flamber. Celle a permet d'anticiper une actions extrêmes pour renforcer les barre qui Pourrat être le départ a partir d'un flambement locale au la ruine de toutes la structure.

# Références bibliographiques

- <http://www.ingenieurs.com/documents/exposes/les-pylones-354.php>.
- Michel BOUGUE : Lignes électriques aériennes à très haute tension ; Tomes 1, 2, 3 et 4-
- Mémoire pour l'obtention du master en ingénierie de l'eau et de l'environnement, WADE D. YACOUBOU
- Calcul des structures métalliques selon l'eurocode 3 Jean Morel.
- Calcul de la capacité de pylônes à treillis avec une approche stabilité, Mémoire de maîtrise, Pierre-Luc BOUCHARD.
- D.T.R. C 2-4.7) R. neige et vent.
- <http://www.memoireonline.com/02/13/7010/Conception-d-une-application-pour-le-calcul-et-la-simulation-des-efforts-sur-les-pylnes.html>
- [https://fr.wikipedia.org/wiki/Pylone\\_électrique](https://fr.wikipedia.org/wiki/Pylone_électrique)
- pylônes et supports de lignes Juan-Jose BERLANGA-GOMEZ .