

Etude comparative entre l'utilisation des pylônes à treillis par rapport à ceux en monopodes de forme polygone dans les infrastructures du réseau de transport à haute tension de SNEL SA

[Comparative study of the use of lattice towers versus polygonal monopods in SNEL SA's high-voltage transmission network infrastructure]

Léon MWANDA MIZENGI

Ecole Régionale de l'Eau « ERE », Université de Kinshasa, RD Congo

Copyright © 2025 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the *Creative Commons Attribution License*, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: The comparative study on the use of lattice towers versus conical monopods in SNEL SA's high-voltage transmission network is of paramount importance in determining the conditions for safety, reliability, operation and maintenance. The main aim is to overcome the growing phenomenon of vandalism, such as the theft of galvanized angles, bolts, copper conductors and earth counterweight wires from electrical infrastructures, which leads to the collapse of lattice towers and the unavailability of SNEL SA's power transmission lines. The use of polygonal monopole towers offers the following advantages: aesthetic, can be installed in urban areas, small footprint, one-day installation, reduced number of parts for assembly, low maintenance costs spread over several years, resistance to acts of vandalism, no natural aggression and environmental impact. The complete construction cost of one kilometer of line (ratio) is 1.25 k€/km for the conical monopod as opposed to 1 k€/km for the lattice tower, i.e. a 20% difference in investment.

KEYWORDS: Comparison, use, lattice tower, conical monopole, SNEL SA High Voltage transmission system or grid.

RESUME: L'étude comparative relative à l'utilisation des pylônes à treillis par rapport à ceux en monopodes de forme polygone dans le réseau de transport à haute tension de SNEL SA, est d'une importance capitale pour déterminer les conditions de sécurité, fiabilité, exploitation et maintenance. L'intérêt majeur est de vaincre le phénomène recrudescant des actes de vandalisme tels que de vol de cornières galvanisées, boulons, conducteurs en cuivre et fil de contreponds de terre sur les infrastructures électriques qui conduisent à l'écroulement des pylônes à treillis, et indisponibilité des lignes de transport d'énergie électrique de SNEL SA. L'usage des pylônes monopodes de forme conique offre les avantages suivants: Esthétiques, peut-être implanté en zone urbaine, faible emprise au sol, installation rapide, démontage et réutilisation possible, une journée d'installation, nombre de pièces réduit pour l'assemblage, coût de maintenance faible étalé sur plusieurs années, résistance aux actes de vandalisme, pas d'agression naturelle et impact environnemental. Le coût complet pour construire un kilomètre de ligne est de 1,25 k€/km avec un monopodes conique, contre 1 k€/km pour un pylône à treillis, engendrant ainsi une variation de coût de 20 %.

MOTS-CLEFS: Comparaison, viabilité technico-économique, pylône à treillis, pylône monopodes de forme conique, réseau de transport électrique HT de SNEL SA.

1 INTRODUCTION

La Société Nationale d'Electricité (SNEL SA) est confronté à des défis majeurs qui sont ceux de sécuriser, fiabiliser et garantir la desserte en énergie électrique de qualité vers ses clients. SNEL SA se trouve confronté au phénomène d'actes de vandalisme sur les infrastructures de transport d'énergie électrique en haute tension tels que le vol de cornières galvanisées, boulons, conducteur en cuivre et fil de contreponds de terre sur les infrastructures électrique qui conduisent de fois, à l'écroulement de pylônes à treillis et, indisponibilité prolongée de l'exploitation des lignes de transport d'énergie électrique.

Le réseau de transport d'énergie électrique de la SNEL SA compte dans son ensemble à ce jour 9.189,46 km de longueur des lignes à très haute tension à courant continu ± 500 kV INGA – KOLWEZI et à courant alternatif de différents niveaux de tension 400, 220, 132, 120, 70, 55 et 50 kV.

Les deux lignes à courant continue ± 500 kV INGA – KOLWEZI qui ont ensemble 8.523 pylônes à treillis, transitent à ce jour 560 MW venant du parc de production d'INGA, vers la Station de Conversion de Kolwezi (SCK) pour desservir en supplément au productible de 470 MW de 4 centrales hydroélectriques de SNEL SA reparti dans l'ex-province minière du Katanga.

La forte demande en énergie électrique à près de 2.000 MW des entreprises minières qui opèrent dans la zone Sud de la République Démocratique du Congo (RDC), l'ex-province du Grand Katanga, pousse certaines entreprises minières à utiliser les pylônes monopode afin de lutter contre les actes de vandalisme sur leurs lignes de transport électrique. Aucune ligne de transport ayant des pylônes à treillis n'est épargnée contre ce phénomène récurrent. Plusieurs stratégies sont implémentées pour éradiquer les actes de vandalisme, notamment les patrouilles croisées dans les couloirs des lignes à haute tension, le remplacement des conducteurs en cuivre par ceux en alliage d'aluminium, le remplacement des cornières volées, l'utilisation des drones, l'emploi des sociétés de gardiennage, etc.

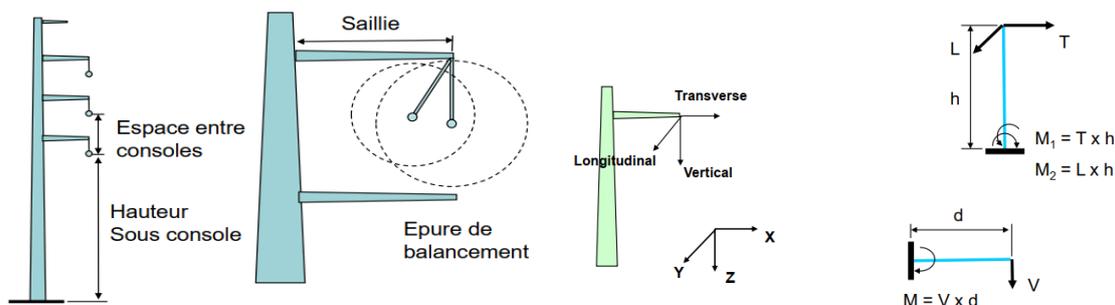
Cette étude vise ainsi, à montrer la viabilité ou la non-viabilité économique et technique du projet d'investissement dans l'usage des pylônes monopode par rapport aux pylônes à treillis sur les lignes de transport d'énergie électrique.

2 METHODES ET MATERIELS

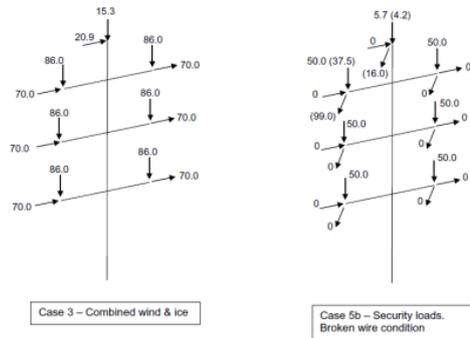
La démarche méthodologique consiste à la récolte et l'analyse de données par rapport aux actes de vandalisme perpétrés sur les infrastructures de transport d'énergie électrique, par les cas de vol des conducteurs en cuivre sur les lignes à courant alternatif sur une période allant de 2016 à 2024, 630 km de conducteurs en cuivre volées, le manque à gagner s'élève à 27.826.948,40 \$, le coût de travaux de remplacement des conducteurs en cuivre volées, exécuté en régie, a déjà atteint 10.240.943,26 \$ y compris, l'écroulement de 125 pylônes à treillis. Ces deux moyens nous ont conduits à une demande de recherche approfondis au Département du Transport de la Société Nationale d'Electricité (SNEL SA). L'échange avec les experts de la Société Nationale d'Electricité, nous a permis de murir la nos connaissances scientifiques sur la revue de la littérature. Pour une partie expérimentale, nous avons exploité les statistiques annuels.

2.1 MATERIELS

Nous allons évoquer les différents problèmes relatifs au calcul de la viabilité économique-technique de l'usage des pylônes monopode par rapport à ceux à treillis. La géométrie des pylônes monopodes est basée sur les distances électriques: distance par rapport au sol, épure de balancement des conducteurs actifs et la distance entre phase. Les forces induites génèrent sur les supports des Forces et Moments internes très simplement calculés.

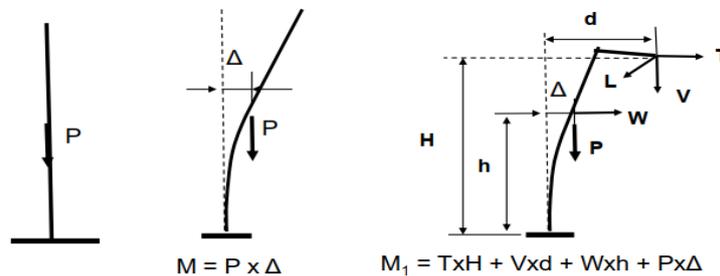


Les efforts sur les supports monopode proviennent du choix des conducteurs actifs et sont généralement donnés par les clients et calculés suivants les normes nationales. Ils peuvent aussi être donnés de deux façons: par l'édition d'un arbre des charges mécaniques (efforts Vertical, Horizontal et Transversal) directement rentrés dans un logiciel de calculs.



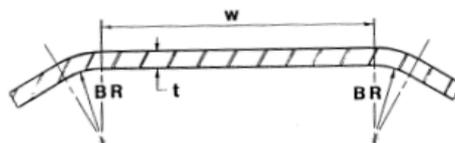
- Portées de la part et d'autre de la ligne ;
- Diamètre des conducteurs ;
- Pressions et directions de vent pour les différents cas de charge ;
- Angle de la ligne ;
- Conditions de rupture de conducteurs ;
- Conditions d'installation de la ligne ;
- Tension dans les câbles pour tous les cas de charge.

Comme les pylônes monopodes subissent de grandes déformations, en accord avec toutes les normes de calcul, il est obligatoire de considérer l'« effet P- Δ » qui prend en compte l'instabilité de la structure.

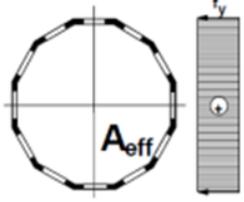
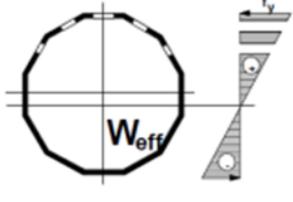


Les sections polygonales sont sujettes au voilement local quand elles sont considérées comme non-compactes. Il y a deux façons de prendre en compte ce phénomène:

1. La méthode ASCE: Des tests ont été effectués sur différentes sections polygonales qui ont permis d'établir des relations entre contrainte permise et ration W/t , W étant la largeur d'un côté de section et t l'épaisseur de la paroi;



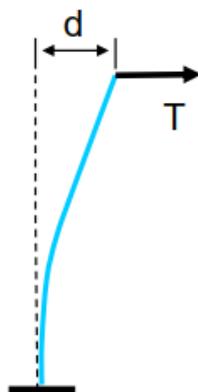
2. La seconde méthode suivant la norme EN 50341: celle-ci est basée sur l'Eurocode 3 partie 1.1 chapitre 5 pour les sections non-compactes dite de « classe 4 » ou on calcule des caractéristiques de sections efficaces A_{eff} & W_{eff} .

<i>A_{eff}</i> sous la force axiale	<i>W_{eff}</i> sous le moment de flexion
	

$$\frac{N_{Sd}}{A_{eff}} + \frac{M_{Sd}}{W_{eff}} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M1}}$$

2.2 PRINCIPES GENERAUX

Les pylônes monopodes sont beaucoup plus soumis à la déformation que les pylônes à treillis:



Problématiques :

Essentiellement esthétique (Forme de banane)

Les gens sont surpris par cette forme même si le pylône a été correctement dimensionné.

Visible quand Déformation >> Diamètre Top

Déformation (Flèche) doit être considéré uniquement pour les cas de charge quotidien : peu (ou pas) de vent, température normale, sans de coefficient de pondération

- Déformation

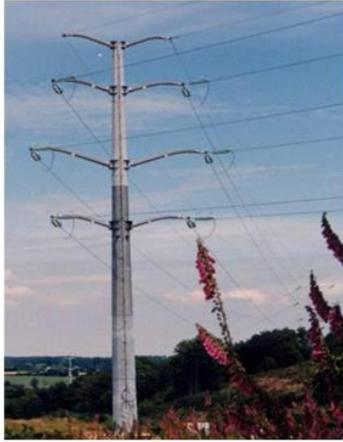
Valeurs admissibles:

Qu'est ce qui est communément admis en termes de flèche ?

La SNEL SA limite la déformation à 6% de la hauteur des pylônes monopodes pour les pylônes d'alignement, et à 4,5% pour les pylônes d'angles fort ELU (Etats Limites Ultime).

Selon la norme EN 50341-1: 7.4.4 Serviability limit states (chapter 4) (refer also to NNAs)

- 1) Appropriate limiting values of deformations and deflections shall be agreed between the client and the designer.
- 2) It is recommended that the deflection under a second order analysis at the ultime limit state does not exceed 8 % of the height of the pole above ground level.



Max 8% ELU

Ce pylône 2 x 220 kV

Hauteur : 40 mètres

Nombre de sections : 7

Poids : 42 tonnes

A été calculé avec une limite de flèche à **4,5% ELU**

- Comparaison de différentes limites de flèches:

Calculs d'un pylône de type ON1H-40 Hauteur 56,7 mètres

Item	Version 1	Version 2	Version 3	Version 4
Limite de flèche	2% Pire Cas de Charge	4% Pire Cas de Charge	2% Every Day Stress	4% Pire Cas de Charge
Déformation au sommet	1125 mm = 2%	2257 mm = 4%	995 mm = 1,8%	2029 mm = 3,6%
Type d'acier du pylône	ASTM gr 65 448 Mpa	ASTM gr 65 448 Mpa	ASTM gr 65 448 Mpa	EN S355
Diamètre	2257 mm	2100 mm	2050 mm	2200 mm
Nombre d'éléments	7	6	6	6
Epaisseur	22 mm to 10 mm	15 mm ro 8 mm	15 mm to 8 mm	16 mm to 8 mm
Pire ratio de contrainte	1,94 (steel S235 would be OK)	1,02	1,00	1,01
Design gouverné par	Deformation	Déformat.et contrainte	Deformation	Deformation
Poids du pylône	68,7 Tonnes	41 Tonnes	40,5 Tonnes	45,8 Tonnes

Pour ce pylône, la limite de flèche 4% du pire des cas de charge, et 2% EDS mène au dimensionnement très proche (V2 et V3).

Il n'y a aucun intérêt à utiliser un acier à haute limite élastique dans le cas d'une limite de flèche très serrée... (V1)

Si la limite de flèche est raisonnable, un acier à haute limite élastique limite le poids (V2/V4).

Une limite de flèche raisonnable devrait être donnée en Every Day Stress (V3)

- Contraintes

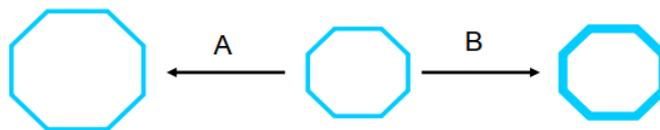
Différents types d'aciers: la contrainte est calculée en tenant compte des coefficients de pondération et ensuite comparée à la limite élastique ou bien à la contrainte admissible de voilement.

Même sous chargement extrême, la contrainte reste dans le domaine élastique.

- Les aciers à haute limite élastiques le poids et les coûts des pylônes;
- Aux USA, la société Valmont Structures International utilise des aciers 65 ksi pour ses pylônes (ASTM A572 GR65);
- En Chine, la société Valmont Structures International utilise des aciers 65 ksi (448 MPa) et 50 ksi (A572 & Q345);
- En Europe, la société Valmont Structures International utilise des aciers 355 Mpa, 460 MPa, et 500 MPa.

On trouve facilement en Europe des aciers fabriqués suivant la norme EN10025 S355J0 et J2.

Optimisation



Augmenter Diamètre (Diam) ou Epaisseur (Ep) ?

- Augmenter Diam est plus efficace
- Contrainte proportionnelle à $Diam^2 \times Ep \times Re$
- Rigidité proportionnelle à $Diam^3 \times Ep \times E$
- Poids proportionnelle à $Diam \times Ep$
- Garder Diam/Ep raisonnable
- Trop grand Diam/Ep introduit du voilement local
- Réduire la contrainte de la section (Re réduit / Fb)

Principes généraux:

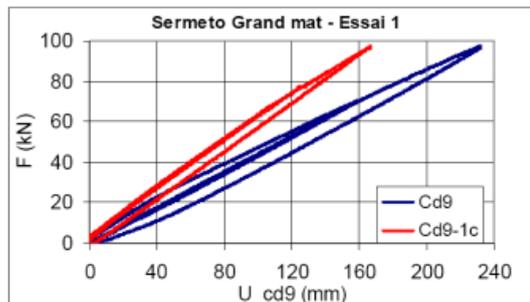
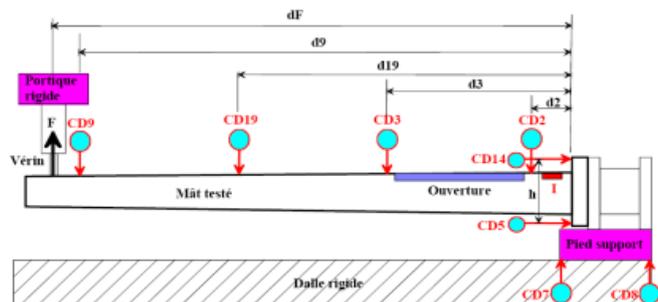
Le but d'un essai grandeur nature est de valider:

- Les méthodes de calcul;
- Les techniques de fabrication.

Les essais sont conduits suivant la norme IEC 60652. Généralement le pylône est chargé jusqu'à son chargement de calcul en incluant les coefficients de pondération.

Les déformations sont mesurées et comparées aux valeurs théoriques. L'intégrité élastique du pylône est vérifiée (Pas ou peu de flèche résiduelle).

L'essai grandeur peut-être effectué horizontalement ou verticalement.



- Logiciel de calcul

Impax est un logiciel Valmont dédié au calcul des pylônes de transport d'énergie électrique

- Impax est un logiciel de calcul Eléments Finis;
- Impax peut calculer des structures Isostatiques et Hyperstatiques;
- Impax inclue toutes les sections polygonales et circulaires;
- Impax inclue tous les aciers utilisés dans le monde.

Le calcul des semelles de fixation dans Impax est basé sur le résultat d'une multitude d'essais grandeur nature. La forme en diamant dans la semelle permet d'optimiser la contrainte dans cet important élément structurel.



Le calcul de la connexion des bras (consoles) avec les isolateurs composites ou en chaînes d'isolateurs en verre trempé de forme voûte, est aussi basé sur les résultats d'essais.

Suède 132 kV, V-string :

The screenshot displays the IMPAX software interface for a 132 kV V-string tower design. The main window shows the 'View Structure' view, which includes a 3D model of the tower structure with various components labeled (e.g., 1-19). The interface also features a table of section data and a base plate diagram.

Section Number	Height of Top Above Pole Base (mm)	Wall Thickness (mm)	Type of Joint at Top of Section	Results
1	11.90	10.0	Slip Joint	1.52
2	22.10	10.0	Slip Joint	1.78
3	32.70	6.0		1.50
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				
11				
12				
13				
14				
15				
16				
17				
18				
19				
20				

The 'View Structure' window also displays the following data:

- Material Specification: S22 - 450 MPa
- Thickness (active cell): [Value]
- Base Plate Data:

Sec #	Base Dia (mm)	Top Dia (mm)	Long. Seams

Document de sortie – Résumé géométrie :

*** SUMMARY ***

----- DESIGN SUMMARY -----

Above Ground Height (m)	36.35	Ground Line Diameter (mm)	1 735.00	Pole Shaft Weight (kg)	15 978
		Top Diameter (mm)	1 084.18		
		Pole Taper (mm/m)	19.5000	Shape:	12 Sides
Connections Between Sections	/First/	/Second/	/Third/		
Height Above Ground (m)	11.80	21.10	26.70		
Type	Slip Joint	Slip Joint	Slip Joint		
Overlap Length (mm)	2529	2282	2145		
Section Characteristics	/First/	/Second/	/Third/	/Fourth/	
Base Diameter (mm)	1735.00	1576.22	1410.05	1314.18	
Top Diameter (mm)	1504.90	1345.55	1256.35	1084.18	
Thickness (mm)	12.0000	11.0000	10.0000	8.0000	
Length (m)	11.800	11.829	7.882	11.795	
Weight (kg)	5747	4762	2632	2837	

Pour chaque section, Diam base and Diam top, Epaisseur, Longueur et poids



Document de sortie – Résumé calculs:

----- ANALYSIS SUMMARY -----

	Pt. of Fixity	Governing Level Sec.1	Governing Level Sec.2	Governing Level Sec.3	Governing Level Sec.4	Pole Top
Governing Load Case	cs20	cs20	cs20	cs20	cs20	cs20
Height (m)	0.00	0.00	11.80	21.10	26.70	36.35
Resultant Moment (N-m)	9 324 067	9 324 067	5 202 455	1 913 098	660 136	0
Shear Force (N)	345 654	345 654	352 458	354 849	146 439	0
Axial Force (N)	405 575	405 575	324 654	272 015	106 546	0
Combined Stress (MPa)	336.67	336.67	266.31	138.41	69.51	0.00
Allowable Stress (MPa)	406.01	406.01	416.46	420.54	379.84	422.41
Allowable/Combined Stress	1.21	1.21	1.56	3.04	5.46	99.90
Total Deflection (mm)	0.00	0.00	125.12	380.36	576.35	941.19

Note: Diameters are outside, measured across the flats
Forces and moments are reported in the local element coordinate system

Pour chaque section: le pire cas de charge, les forces et moments, contrainte correspondante, et ratio de contrainte

Document de sortie – Forces / cas de charge:

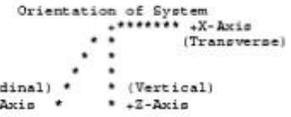
ENERGO KRAKOW, 36.3 M AGH, 1 CIRCUIT TYPE M3, 08252

DATE 06-05-08
Fuse 1.7.0.232

*** INPUT LOADS ***

Loading Case cs20

No Wind
Structure Weight Overload Factor is 1.100
Orientations are Measured Clockwise From -X- Axis
Positive -Y- Axis is 90 Degree Clockwise From -X- Axis
Foundation Rotation of 0.00 Degrees
Deflection Limitation: 945.1 mm, 2.6% of Pole Height



Load Point Number	Mounting Height (m)	Load Height (m)	Load Eccentricity (m)	Orientation in XY Plane (Degrees)	Force-X (N)	Force-Y (N)	Force-Z (N)
1	36.00	36.10	3.40	0.00	3 550	20 120	9 090
2	36.00	36.10	3.40	180.00	3 550	20 120	9 090
3	33.00	33.20	6.20	0.00	0	0	3 500
4	29.00	29.00	0.00	0.00	17 640	100 010	62 100
5	23.00	23.20	7.70	180.00	17 640	100 010	62 100
6	23.00	23.20	7.70	0.00	17 640	100 010	62 100

Orientation des axes X, Y, Z

Points de chargement: Hauteur et excentricité (Généralement la longueur des bras)

Forces appliquées aux points: X, Y, Z

Document de sortie – Forces et Moments:

Nom cas de charge

Loading Case cs20
Dist. From Base (m)

Base (m)	Mx (N-m)	My (N-m)	Resultant Mx & My (N-m)	Torsion (N-m)	Shear X-Dir. (N)	Shear Y-Dir. (N)	Resultant Shear (N)	Axial (N)
36.25	0	0	0	0	0	0	0	0
36.00	5	-1	5	0	7	31	32	82
36.00	4097	-603	4142	-305	7332	40994	41644	19610
34.35	71860	-12727	72978	-306	7363	41140	41793	23562
33.00	127482	-22685	129855	-306	7388	41264	41920	26877
33.00	127613	-50977	137226	752	7426	41440	42100	31679
32.25	154468	-55808	164241	751	7437	41493	42154	33313
30.25	237643	-70721	247943	752	7472	41669	42334	38437
29.00	293995	-80828	304994	752	7500	41900	42467	41982
29.00	293986	-152342	331132	126180	25763	143957	146254	100264
29.25	287588	-169090	422867	126173	25738	143982	146274	102063
26.70	625309	-311586	660126	126173	25772	144154	146439	106546
26.70	625315	-311563	660128	126181	25760	144115	146395	106607
26.25	675721	-220570	710857	126174	25724	144140	146417	108039
24.56	924854	-166792	972187	126181	25774	144480	146761	120154
24.25	964487	-372069	1002326	126177	25765	144463	146731	126682
23.00	1159610	-308860	1199524	126177	25788	144617	146898	125737
23.00	1200486	-311667	1240298	122168	62311	349221	354818	264823
22.25	1427694	-352134	1470268	122163	62154	349207	354495	267444
21.10	1864187	-428826	1913098	122163	62184	349358	354849	272015
21.10	1864194	-428795	1913098	122167	62103	349129	354410	272277
20.25	1926116	-476263	2178828	122161	62043	349002	354474	278534
19.82	2461091	-571426	2721742	122169	62026	349069	354537	290951
19.25	2924465	-600433	3043661	122155	61988	348955	354140	293441
16.25	3522090	-724237	3595781	122157	61759	348125	353560	302823
14.25	4218590	-847710	4302909	122158	61590	347434	352849	312558
12.25	4912654	-970835	5088554	122169	61470	347003	352406	322166
11.80	5104530	-1004646	5202455	122169	61480	347055	352458	324654
11.80	5104537	-1004607	5202455	122164	61363	346541	351932	325224
10.25	5607226	-1093557	5712867	122167	61260	346120	351500	339733
9.27	5980795	-1159625	6092178	122168	61167	345724	351092	350745
8.25	6299252	-1215905	6415528	122161	60992	344920	350271	356295
6.25	6985246	-1337813	7116130	122161	60748	343790	349116	367847
4.25	7476946	-1459226	7914399	122162	60489	342557	347956	379577
2.25	8362144	-1580132	8510124	122162	60214	341224	346495	381795
0.25	9044631	-1700474	9203095	122169	60046	340098	345061	403409
0.00	9142771	-1721490	924047	122169	60046	340398	345554	405775

A tous les points:
- Moments de flexion Mx & My
- Moment résultant
- Moment de torsion
- Force axiale et cisaillement

IMPAX

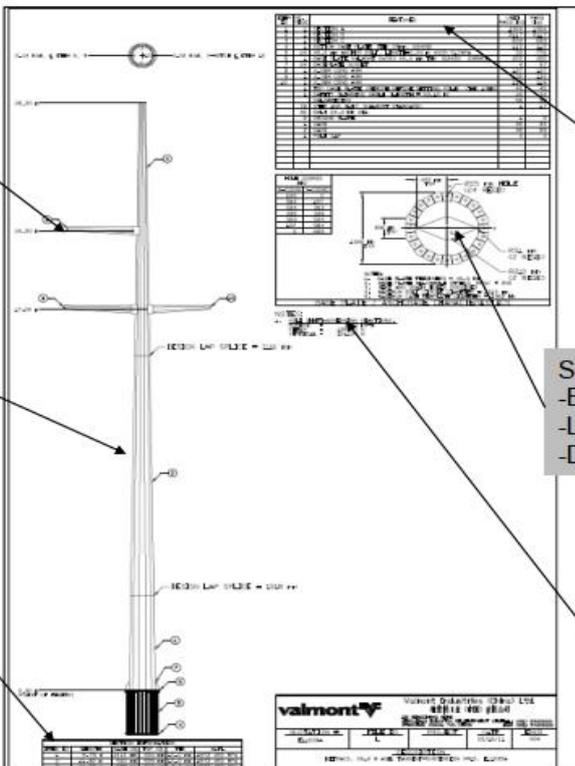


Dessins automatiques :

Position des points d'application des efforts

Vue d'ensemble a l'échelle du mat

Sections
Diamètres
Epaisseur
Type d'acier



Nomenclature :
-Poids unitaires
-Poids total
-Poids Galva.

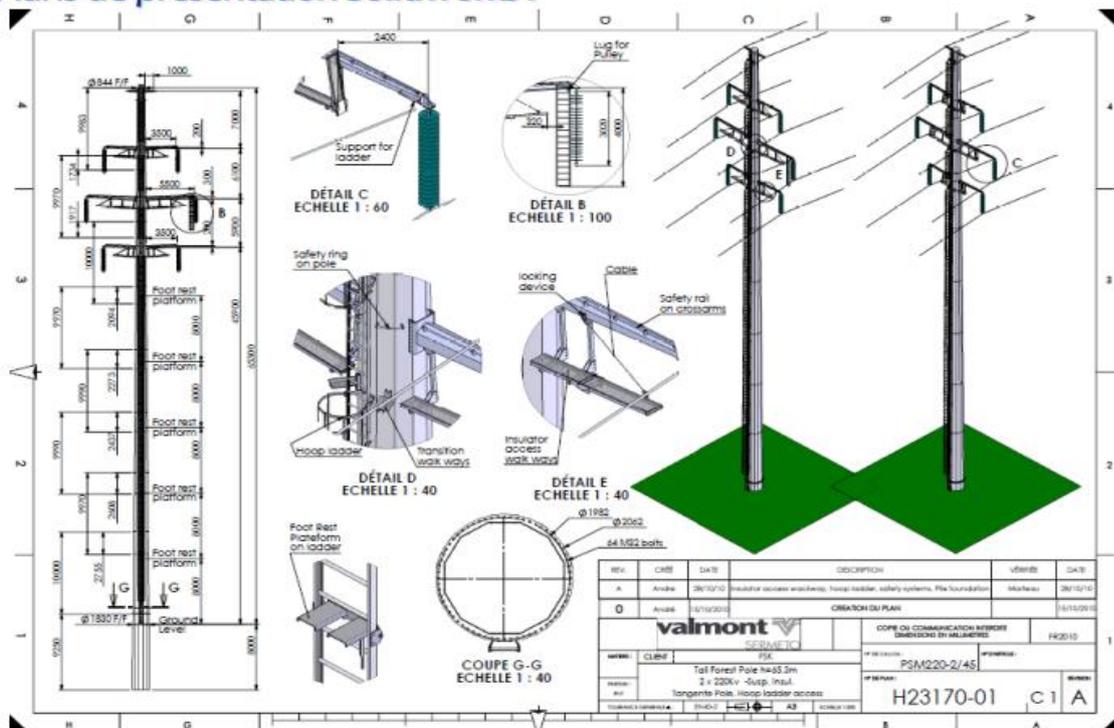
Semelle de fixation:
-Epaisseur
-Largeur
-Diam. implantation tiges

Descente de charge maxi.

Autres documents techniques



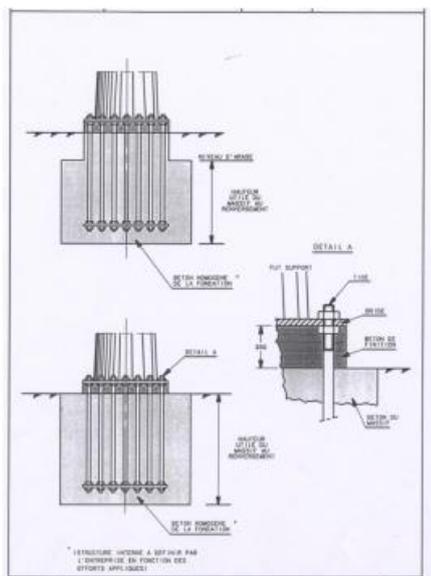
Plans de présentation Solidworks :



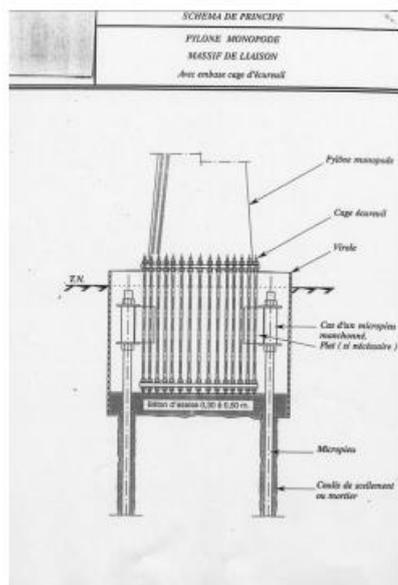
Fondations

Semelle et tiges d'ancrage :

Massif de fondation:

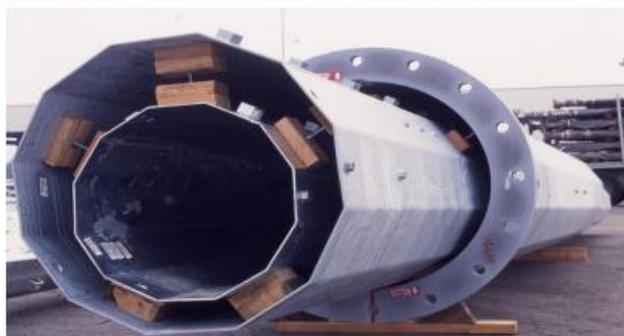


Fondations profonde: Micropieux



Colisage - chargement

Exemples en image:



Emboitement - Vérinage

Exemples en image :



Emboitement - Vérinage

Valeurs d'effort :

Les valeurs prescrites sont sur les plans du constructeur



- Surface au sol:

220 kV Double Circuit								
		Pylône à treillis			Pylône monopode			Monopode contre Treillis en (%)
Hauteur sous la console	Utilisation	Réf. Pylône	Dimension à GL	Surface d'occupation au sol (m ²)	Monopode	Dimension à GL	Surface d'occupation au sol (m ²)	Surface d'occupation au sol
30 m	Alignement avec angle faible	G4 NT B3x	6,63m x 6,63m	48,40	S2 KNT H6 Y	Diam 1,95	3,80	8%
	Ancrage avec angle moyen	G4 AS B3x	7,13m x 7,13m	55,921	S2 AS H6 Y	Diam 2,98	8,90	16%
	Ancrage avec angle fort	G4 SOS1 B3x	7,13m x 7,13m	55,921	S2 AS H6 Y	Diam 3,66	13,4	24%
		160,24			26,10			16%

- Comparaison:

Tableau 1.

	Pylône monopodes (tubulaires)	Pylônes treillis
	Esthétiques	Utilitaires
Localisation	Zones suburbaines	Campagne
Surface au sol	Diamètre 1 m à 2 m	Carré 10 m x 10 m
Installation	½ à 1 journée	1 semaine
Nombre de pièces	50	> 1000 (avec les boulons)
Poids typique	14 tonnes (3T à 30 T 90 kV)	10 tonnes
	Résiste au Terrorisme	Non monopodes
	Résiste au vandalisme (Afrique du Sud)	Non
	Résiste aux Avalanches (Norvège, Iceland)	Non
Coût de la ligne complète au km (ratio)	1.25 k€/km	1 k€/km

En quelques chiffres:

- Poids: 7 à 10 fois plus lourds;
- Transport spécial: longueur 20 m et charge lourde;
- Levage:
 - ✓ grosses grues télescopiques;
 - ✓ endommagés par les chocs;
 - ✓ pas possible pour les endroits reculés.

REFERENCES

- [1] Smith, J., & Brown, A. (2020). Structural analysis of lattice and monopole transmission towers: A comparative approach. *Journal of Structural Engineering*, 145(4), 123-134. <https://doi.org/10.1016/j.jse.2020.04.007>
- [2] Lee, K. H., & Kim, J. T. (2018). Cost-efficiency analysis of high-voltage transmission structures: Lattice towers versus monopole towers. *International Journal of Energy Infrastructure*, 32(3), 456-470. <https://doi.org/10.1109/IJEI.2018.4561207>.
- [3] Chatterjee, P., & Roy, S. (2019). Environmental impact and aesthetic considerations in the use of monopoles for transmission lines. *Journal of Environmental Engineering and Management*, 54(6), 789-798. <https://doi.org/10.1002/jeem.2019.054012>.
- [4] Wang, L., & Chen, X. (2021). Space optimization in transmission tower design: A focus on monopods. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 36(2), 987-995. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2021.030921>.
- [5] Oliveira, R., & Da Silva, F. (2020). Durability and maintenance challenges in lattice and monopole tower systems. *Materials and Structures*, 53(8), 1112-1125. <https://doi.org/10.1617/ms.2020.09008>.
- [6] Ahmed, S., & Gupta, M. (2017). Right-of-way requirements in high-voltage networks: Lattice vs. monopole designs. *Energy Systems Research Journal*, 29(5), 321-335. <https://doi.org/10.1016/j.esrj.2017.05.004>
- [7] Kumar, R., & Singh, D. (2019). Foundation design implications for lattice and monopole towers in varying terrains. *Advances in Civil Engineering*, 62(1), 201-215. <https://doi.org/10.1155/2019/062120>.