

Calcul Mécanique des lignes Électriques Aériennes

PLAN

PARTIE I – CALCUL MECANIQUE DES CABLES

- > LES CABLES**
- > CONDITIONS CLIMATIQUES DE REFERENCE**
- > FORME DE LA COURBE D'EQUILIBRE DU CABLE**
- > CALCUL DES EFFORTS APPLIQUES**

PARTIE II – LES SUPPORTS ET LEURS FONDATIONS

- > DISPOSITIONS COMMUNES AUX SUPPORTS**
- > CLASSIFICATION DES SUPPORTS**
- > VERIFICATION DE LA TENU DES SUPPORTS**

PARTIE III - LES ISOLATEURS ET LEURS ACCESSOIRES

- > LES ISOLATEURS**
- > LES ACCESSOIRES DE LIGNES**

PARTIE IV – ETUDE ET REALISATION D'UN PROJET DE CONSTRUCTION DE LIGNES

- > ETUDE D'UN PROJET DE LIGNE**
- > EXECUTION, SUIVI ET CONTROLE DES TRAVAUX**

***PARTIE I – CALCUL MECANIQUE DES
CABLES***

LES CABLES

 ***CABLES CONDUCTEURS***

 ***CABLES DE GARDE***

LES CABLES CONDUCTEURS(1)

les câbles conducteurs sont choisis en fonction de 3 critères :

- ☞ Critère économique : coût d'établissement augmenté du coût de perte à minimiser.**
- ☞ Critères électriques : capacité maximale de transit de courant de charge et d'éventuel report de charge.**
- ☞ Critère mécanique : tenue mécanique des câbles adaptée au différentes hypothèses de calcul.**

LES CABLES CONDUCTEURS(2)

☞ Acier :

- très mauvaise résistivité
- bonne tenue mécanique
- bon prix

☞ Cuivre :

- bonne résistivité
- bonne tenue mécanique
- prix élevé

☞ Aluminium :

- résistivité relativement bonne
- mauvaise tenue mécanique
- prix acceptable

D'où l'idée de l'utilisation des câbles hétérogènes ou des alliages afin d'optimiser les critères précités.

CONSTITUTION DES CABLES

Deux types de câbles sont à distinguer :

👉 Câbles homogènes

👉 Câbles hétérogènes

❖ Câble à 1 fil + 6 = 7 fils diamètre extérieur $3d = D$

❖ Câble à 7 fils + 12 = 19 fils diamètre extérieur $5d = D$

❖ Câble à 19 fils + 18 = 37 fils diamètre extérieur $7d = D$

❖ Câble à 37 fils + 24 = 61 fils diamètre extérieur $9d = D$

❖ Câble à 61 fils + 30 = 91 fils diamètre extérieur

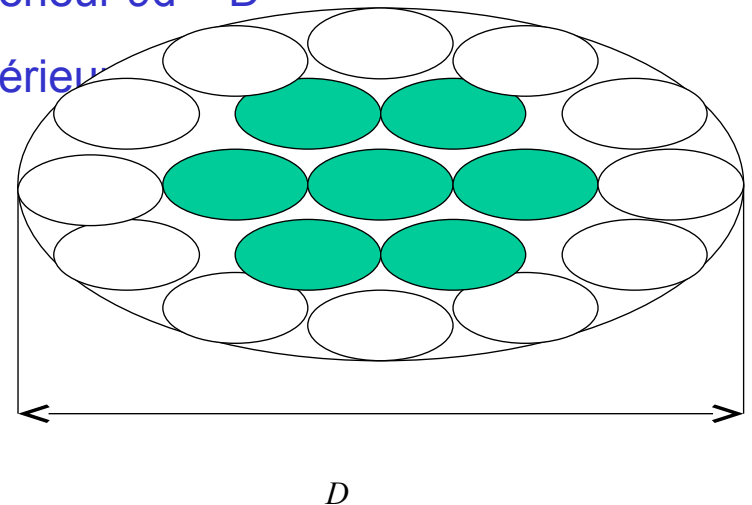
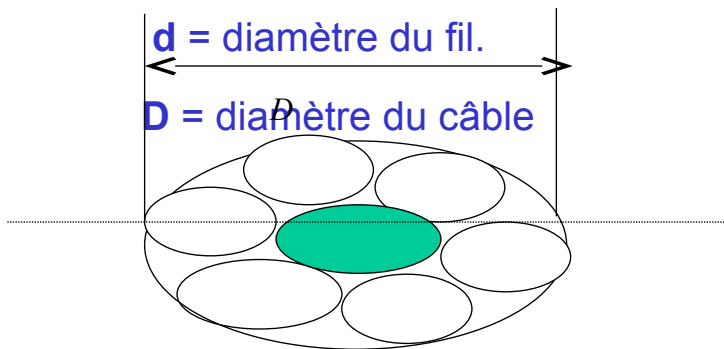


Tableau A - Caractéristiques des câbles équilibrés en alliage d'aluminium-acier

DESIGNATION DU CABLE	SECTIONS NOMINALES (mm ²)		COMPOSITION		DIAMETRE EXTERIEUR DU CABLE (mm)	CONTRAINTE A LA RUPTURE (hbar)	CONTRAINTE A LA RUPTURE (hbar)	CHARGE DE RUPTURE NOMINALE DU CABLE (daN)	RESISTANCE ELECTRIQUE A 20°C PAR km (Ω)	MASSE PAR km (kg)	MASSE DE GRAISSAGE (g/m)		MODULE D'ELASTICITE DES CABLES * (hbar)	COEFFICIENT DE DILATATION DES CABLES**	
	Des fils alliage d'aluminium	Des fils acier	Nombre de fils	Diamètre nominal des fils (mm)							Avec couche extérieure	Sans couche extérieure			
PHLOX 37,7	28,27	9,42	9	3	2	8,3	32,4	156,8	2360	1,17	155	6	2	9300	17.0.10 ⁻⁶
PHLOX 59,7	37,70	21,99	12	7	2	10	32,4	156,8	4560	0,880	276	7	3	10800	15.3.10 ⁻⁶
PHLOX 75,5	47,71	27,83	12	7	2,25	11,25	32,4	156,8	5770	0,695	348	10	3,5	10800	15.3.10 ⁻⁶
PHLOX 116,2	56,55	59,69	18	19	2	14	32,4	156,8	10815	0,580	636	13	7	12400	14.2.10 ⁻⁶
PHLOX 147,1	71,57	75,54	18	19	2,25	15,75	32,4	156,8	13685	0,466	802	18	10	12400	14.2.10 ⁻⁶
PASTEL 147,1	119,28	27,83	30	7	2,25	15,75	32,4	156,8	8185	0,279	547	18	10	8400	18.1.10 ⁻⁶
PHLOX 181,6	88,36	93,27	18	19	2,5	17,5	32,4	156,8	16895	0,378	990	22	12	12400	14.2.10 ⁻⁶
PASTEL 181,6-	147,26	34,36	30	7	2,5	17,5	32,4	156,8	10120	0,227	675	22	12	8400	18.1.10 ⁻⁶
PHLOX 228	110,83	116,99	18	19	2,8	19,6	32,4	156,8	21200	0,300	1244	26	15	12400	14.2.10 ⁻⁶
PASTEL 228-	184,72	43,10	30	7	2,8	19,6	32,4	156,8	12680	0,180	848	26	15	8400	18.1.10 ⁻⁶
PHLOX 228	140,28	148,07	18	19	3,15	22,05	32,4	156,8	26800	0,237	1570	33	158	12400	14.2.10 ⁻⁶
PASTEL 228-	233,80	54,55	30	7	3,15	22,05	32,4	156,8	16050	0,142	1074	33	18	8400	18.0.10 ⁻⁶
PASTEL 229	206,17	93,27	42	19	2,5	22,5	32,4	156,8	20875	0,162	1320	35	22	9650	16.3.10 ⁻⁶
PHLOX 376	147,78	227,83	24	37	2,8	25,2	32,4	156,8	38960	0,225	2211	45	26	13000	13.5.10 ⁻⁶

* Ces valeurs ont été déterminées selon le mode de calcul indiqué à l'annexe VI. Elles sont données à titre d'information et ne doivent pas être considérées comme des exigences d'essai

** Ces valeurs ne sont données qu'à titre indicatif

Tab

GRAISSAGE DES CABLES

Les câbles sont graissés intérieurement avec une graisse neutre vis-à-vis de l'Aluminium et du Zinc. Ce graissage a pour objet de :

- ☞ protéger l'acier contre l'oxydation .IL peut s'étendre à toutes les couches d'aluminium**
- ☞ d'améliorer la souplesse des câbles en facilitant les glissements entre aluminium et l'acier et entre les différentes couches .**
- ☞ de jouer un rôle très favorable à la bonne tenue sous l'effet des vibrations éoliennes**
- ☞ Le graissage des câbles en ALMELEC est également recommandé dans les mêmes conditions que les câbles mixtes**

PROPRIETES DES CABLES MIXTES

les câbles mixtes (Aluminium – Acier et Almelec – Acier) sont fonction des caractéristiques des sous câbles constitutifs .

Module d'élasticité "E »

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{T_i}{E_i S_i}$$

Soit un câble mixte (Alu-Acier) de section totale S et dont la tension mécanique totale est T.

Le module d'élasticité ou module d'Young E d 'un câble mixte :

$$E = (E_1 S_1 + E_2 S_2)/S$$

T : Tension totale du câble de section totale S

S1 : Section de l'ensemble des brins d'Aluminium

S2 : Section de l'ensemble des brins d 'Acier

E₁ : Module d'élasticité de la partie Aluminium

E₂ : Module d'élasticité de la partie Acier

Coefficient de dilatation du câble

α : le coefficient de dilatation de l'ensemble du câble;

$$\frac{\Delta l}{l} = \alpha \Delta \theta$$

$$\alpha = (E_1 S_1 \alpha_1 + E_2 S_2 \alpha_2) / ES$$

α_1 : le coefficient de dilatation de l'aluminium;

α_2 : le coefficient de dilatation de l'acier;

$\Delta \theta$: une variation de température par rapport à un état initial quelconque;

Effet de couronne

- ↳ Lorsqu'on soumet un conducteur à une tension électrique croissante, le champ électrique à la surface du conducteur croît. Il arrive ainsi à dépasser une certaine valeur qui correspond au champ disruptif de l'air. A partir de ce moment, il se produit une **ionisation de l'air, avec apparition de pertes d'énergie** qui croissent avec la tension électrique.
- ↳ Le champ disruptif de l'air correspond à **environ 30 kV/cm**, dépendant du degré d'humidité et de pression.
- ↳ L'air ionisé se traduit par un arrachement d'électron qui heurtent d'autres molécules. Si l'énergie < à l'énergie d'extraction, la molécule dégage un rayonnement visible. Dans le cas contraire, on entend des crépitements. Les pertes d'énergie sont de l'ordre de 1% de l'énergie appelée.
- ↳ Ce phénomène a les conséquences suivantes :
 - perte par effet couronne (10% des pertes joules)
 - perturbation radio (fréquence de l'ordre de 1 MHz)
 - gêne acoustique

Vibrations des conducteurs

Vibrations des conducteurs, dites vibrations éoliennes:

- ☞ vibrations de faible amplitude (au maximum de l'ordre du diamètre du câble) dans un plan vertical;
- ☞ à fréquence comprise entre quelques périodes et quelques dizaines de périodes par seconde;
- ☞ se produisent pour des faibles valeurs de la vitesse du courant d'air;
- ☞ ont pour conséquence principale une fatigue du conducteur avec risque de rupture des brins du conducteur à l'intérieur des pinces.
- ☞ En pleine portée ces vibrations ne présentent aucun danger pour les câbles.

Oscillations de grande amplitude

- ➡ Certaines oscillations (galop ou danse des conducteurs) sont dues apparemment à la formation d'une légère couche de givre non uniformément répartie sur la portée et qui donne au conducteur, par endroits, une portance positive.
- ➡ Les efforts correspondant à ces oscillations peuvent être particulièrement dangereux si, par hasard, leur fréquence coïncide avec une fréquence propre d'oscillation des supports.
- ➡ Il est possible de voir apparaître des amplitudes d'oscillations de plusieurs mètres, qui créent des risques importants d'amorçage entre phase, en particulier lorsque la disposition des conducteurs est verticale ou quasi verticale.
- ➡ Il est conseillé de disposer les conducteurs en nappe horizontale dans les sites où ce phénomène risque d'apparaître

Vibrations de sous-portées

- **Le phénomène de vibrations de sous-portées (longueur de conducteur comprise entre deux entretoises successives) se produit sur des conducteurs en faisceau.**
- **Il est dû aux effets de masque créés par les sous-conducteurs au vent sur les sous-conducteurs sous le vent.**
- **Il se produit généralement pour des vitesses de vent d'environ 10 m/s.**
- **Il se manifeste principalement par des oscillations des sous-conducteurs à des fréquences de l'ordre de 1 Hz dans les plans quasi horizontaux.**
- **Crée des contacts répétés entre sous-conducteurs.**
- **Crée également une fatigue des entretoises et des dispositifs de suspension sur les supports.**

Dispositifs antivibratoires

☞ Pour atténuer ces vibrations, les dispositifs antivibratoires suivants sont utilisés :

- Pinces AGS
- Bretelles simples
- Bretelles doubles
- Amortisseurs type stockbridges

Dispositifs antivibratoires (2)

👉 Bretelle antivibratoire :

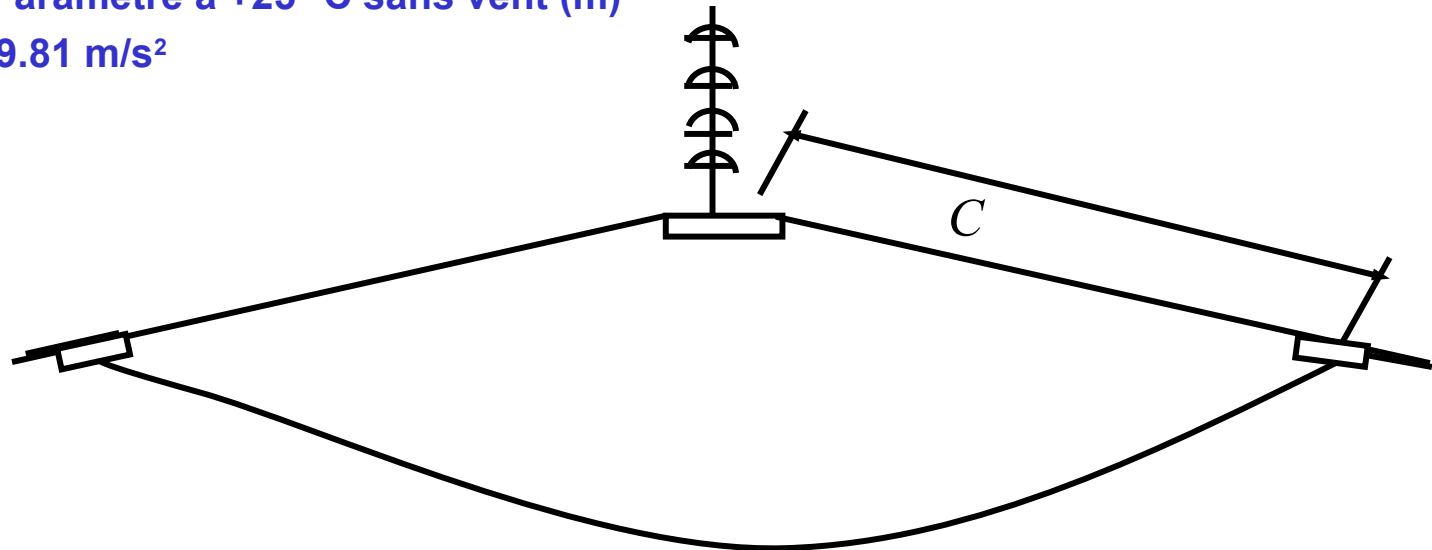
👉 Cette bretelle est constituée d'un câble de même nature que le conducteur. Elle est accrochée de part et d'autre de la pince par des blocs antivibratoires.

👉 La Distance C entre la pince et le bloc est donnée par la formule suivante

$$\bullet C = (\phi/2) * (\sqrt{P * g})$$

– Avec :

- ∇ ϕ : diamètre du conducteur en (m)
- P : Paramètre à +25 °C sans vent (m)
- $g = 9.81 \text{ m/s}^2$



Câbles de garde (1)

Les câbles de garde sur une ligne aérienne ont un rôle multiple :

- ils protègent contre les coups de foudre directs,
- ils diminuent l'induction dans les circuits de télécommunications ou les conduits enterrés,
- ils réalisent l'interconnexion des mises à la terre des supports,
- ils peuvent servir de support pour les câbles de télécommunication.

Câbles de garde (2)

PROTECTION CONTRE LES COUPS DE Foudre DIRECTS

- ☞ Le modèle électrostatique permet de déterminer la position à donner aux câbles de garde pour que leur efficacité vis-à-vis de la foudre soit optimale.
- ☞ Le courant de décharge peut atteindre 40 KA. Les pylônes métalliques devront être équipés de prises de terre dont la résistance ne dépassera pas
 - 30 ohms pour les alignements
 - 10 ohms pour les ancrages
- ☞ On admet généralement que le nombre de déclenchements provoqués par la foudre, en 400 KV par exemple, est divisé par six lorsque la ligne est équipée de câbles de garde ;
il en résulte une amélioration de la qualité de service et une diminution des contraintes supportées par le matériel.

Câbles de garde (3)

DIMINUTION DE L'INDUCTION DANS LES CIRCUITS DE TELECOMUNICATION OU LES CIRCUITS ENTERRES

- ☞ Les câbles de garde constituent un écran et réduisent les phénomènes d'induction dans les circuits ou conduits voisins, parallèles de la ligne.
- ☞ Les valeurs des facteurs réducteurs à prendre en compte dans les calculs des tensions induites varient suivant la nature et le nombre des câbles de garde de 0,6 à 0,8 pour un câble de garde et de 0,6 à 0,75 pour deux câbles de garde

Câbles de garde (4)

INTERCONNEXION DES MISES A LA TERRE DES SUPPORTS

Avantages :

- ☞ Dans les zones où les résistances des mises à la terre de certains supports sont élevées, la résistance d'un défaut monophasé se produisant sur la ligne est réduite par la mise en parallèle des mises à la terre. **Il en résulte une amélioration du fonctionnement des protections.**
- ☞ De même la présence de câbles de garde, dans les zones où les courants de court-circuit sont importants, diminue l'élévation de potentiel du support au moment du défaut et, **par conséquent, les tensions de pas et les risques d'amorçage aux objets proches du défaut (clôtures, par exemple).**

Inconvénients:

- ☞ le coût d'installation (environ 12% d'augmentation pour le coût d'une ligne à 225 kV en zone à givre léger).
- ☞ dans les zones à givre lourd, ils sont fréquemment la cause d'avaries (télécourages entre fils de garde et conducteurs de phases)

Câbles de garde (5)

UTILISATION EN TELECOMMUNICATION

☞ Certains câbles de garde comportent des circuits de télécommunications permettant la transmission d'ordres et de données entre deux postes reliés par une ligne à haute tension.

☞ les câbles de garde de la famille Thym ont la constitution suivante :

- Une partie externe remplissant le rôle classique de câble de garde constituée d'une ou deux couches en fils d'acier assurant la tenue mécanique du câble et d'une couche extérieure conductrice en fils d'Almélec destinée à améliorer les caractéristiques électriques du câble.
- Une partie télécommunications incluse dans un tube central en aluminium, ce tube assure la protection électromagnétique et l'étanchéité du circuit de télécommunication.

CONDITIONS CLIMATIQUES DE REFERENCE

- ☞ Dans l'établissement d'un projet de ligne, il faut en premier lieu, définir les conditions climatiques suivantes :
 - Les températures,
 - L'action du vent,
 - Les surcharges éventuelles de givre.

- ☞ Pour la pose d'un conducteur, ces conditions sont nécessaires à prendre en compte pour déterminer les contraintes suivantes :
 - La garde au sole et distance réglementaire
 - la tension de rupture
 - la portée maximale

- ☞ l'Arrêté Technique définit les conditions auxquelles doivent satisfaire les lignes d'énergie. Ces prescriptions constituent un minimum qu'il faut rigoureusement respecter.

HYPOTHESES DE CALCUL DES OUVRAGES

Les hypothèses à retenir par le Maître d'œuvre pour le calcul et la vérification des ouvrages sont :

- **Hypothèses Administratives définies par l'Arrêté Technique du 15 Mars 1963 et comprenant**
 - ☞ Les hypothèses météorologiques A,B et de givre,
 - ☞ L'hypothèse de traversée de voie ferrée

- **Hypothèses PROPRES à LONE et comprenant:**
 - ☞ Les hypothèses météorologiques de haute pression de vent (HPV), de vibration (EDS)et de givre,
 - ☞ Les hypothèses particulières nécessaires à la conception des familles de pylônes : torsion (rupture) , anti-cascade, montage et entretien.

HYPOTHESES DE VENT OU D 'ETE « A »

- Les caractéristiques de l'hypothèse A sont les suivantes:

	A
Température des câbles (°C)	+25
Pression du vent (Pa) sur :	
❖ Les éléments plans des supports	1200
❖ Les câbles conducteurs et de garde	480
❖ Les supports ou éléments de supports à section circulaire de :	
• Diamètre > 20.83 cm	480
• Diamètre ≤ 20.83 cm	720

NOTA : Pour le calcul des efforts du vent sur les chaînes d'isolateurs, celles-ci seront considérées comme un cylindre de diamètre égal au diamètre de l'isolateur.

Les pressions de l'hypothèse A sont produites par un vent de 125 km/h (35 m/s) environ.

HYPOTHESES DE FROID OU D'HIVER “B”

	B
Température des câbles (°C)	-5
Pression du vent (Pa) sur :	
❖ Les éléments plans des supports	300
❖ Les câbles conducteurs et de garde	180
❖ Les supports ou éléments de supports à section circulaire (quelque soit le diamètre) :	180

NOTA : Pour le calcul des efforts du vent sur les chaînes d'isolateurs, celles-ci seront considérées comme un cylindre de diamètre égal au diamètre de l'isolateur.

Les pressions de l'hypothèse B sont produites par un vent de 63 km/h (17.5 m/s) environ.

HYPOTHESE DE HAUTE PRESSION DE VENT (HPV)

- Les caractéristiques de l'hypothèse HPV sont les suivantes:

	HPV
Température des câbles (°C)	+25
❖ Les éléments plans des supports	2400
❖ Les câbles conducteurs et de garde	720
Les supports ou éléments de supports à section circulaire de :	
• Diamètre > 20.83 cm	720
• Diamètre ≤ 20.83 cm	960

NOTA : Pour le calcul des efforts du vent sur les chaînes d'isolateurs, celles-ci seront considérées comme un cylindre de diamètre égal au diamètre de l'isolateur.

Ces pressions sont produites par un vent de 180 km/h (50 m/s).

HYPOTHESE (EDS)

HYPOTHESE (EDS)

L'hypothèse EDS (EVERY DAY STRESS) doit être respectée dans le choix du paramètre des câbles pour diminuer les risques de dégradation des câbles et du matériel de la ligne sous l'effet des vibrations éoliennes.

- Les caractéristiques de l'hypothèse EDS sont les suivantes:

	EDS
Température des câbles (°C)	+25
Pression du vent (Pa)	0

HYPOTHESE DE GIVRE

La surcharge de givre supportée par les câbles est définie conventionnellement par l'épaisseur du manchon de givre uniformément réparti le long de la portée et de densité prise à **0,6**.

Les caractéristiques de ces hypothèses, en fonction de la zone de givre considérée, sont les suivantes.

Altitude (m) (1)	> 1100	> 1300	> 1500
Nature du givre	Léger	Moyen	Lourd (2)
Epaisseur du manchon (cm)	2	4	6
Température des câbles (°C)	- 5		
Pression du vent (Pa) sur :			
Les éléments plans	300		
Les éléments cylindriques	180		
Le manchon recouvrant les câbles d'une portée	180		

(1) Pour le versant, Sud du haut Atlas les altitudes limites sont augmentées de 200 m.

(2) Exceptionnellement, il est possible d'envisager une épaisseur du manchon supérieur à 6 cm

HYPOTHESE DE GIVRE(2)

☞ Hypothèse de givre symétrique

Dans cette hypothèse, on vérifie la tenue mécanique de l'ouvrage dans le cas de givre choisi en considérant les câbles de l'ensemble des portées de l'ouvrage uniformément recouverts du manchon de givre.

☞ Hypothèse de givre dissymétrique

Par convention on considère une différence d'épaisseur de givre égale à 2 cm sur les câbles des portées du canton situées de part et d'autre du support à calculer, c'est-à-dire.

- ❖ 2 et 0 cm pour les zones à givre léger,
- ❖ 4 et 2 cm pour les zones à givre moyen,
- ❖ 6 et 4 cm pour les zones à givre lourd.

Récapitulatif des conditions a respecter

CAS DE VERIFICATION		CONDITIONS A RESPECTER												
NATURE DES HYPOTHESES	Hypothèses Météo	Câbles haubans		Armements		Eléments métal		Supports en béton		Fondations des supports				
		Effort maximal admissible		Effort maximal admissible		Contrainte Maximale Admissible		Effort maximal admissible		Coefficient de stabilité minimal		Pression maximale admissible		
Arrêté Technique	A	CRN/3	X	R/3	X	R/3	X	R/3	X	1.2	X	<Pmax	X	
	B	CRN/3	X	R/3	X	R/3	X	R/3	X	1.2	X	<Pmax	X	
	TVF	(1)	CRN/1.75	X	R/1.75	X	R/1.75	X	R/1.75	X	1	X	<Pmax	X
		(2)	CRN/3	X	R/3	X	R/3	X	R/3	X	1.5	X	<Pmax	X
Météorologique	HPV	CRN/3	X	R/3	X	R/3	X	R/3	X	1.2	X	<Pmax	X	
	E.D.S	0.2 CRN	X	Pour le choix du paramètre										
	Givre	Voir Chapitre III.2.5												
Torsion (rupture)	A	-		-		Rem/1	*	R/1.27	*	1	*	Pmax	*	
Anti-cascade	A	-		-		Rem/1	*	R/1.27	*	1	*	Pmax	*	

X : Vérification à effectuer dans chaque projet

* : Vérification à effectuer lors de l'étude d'un nouveau.

(1) : gabarit cinématique de la voie engagée

(2) : sans engagement de gabarit

CRN.....: charge de Rupture Nominale garantie

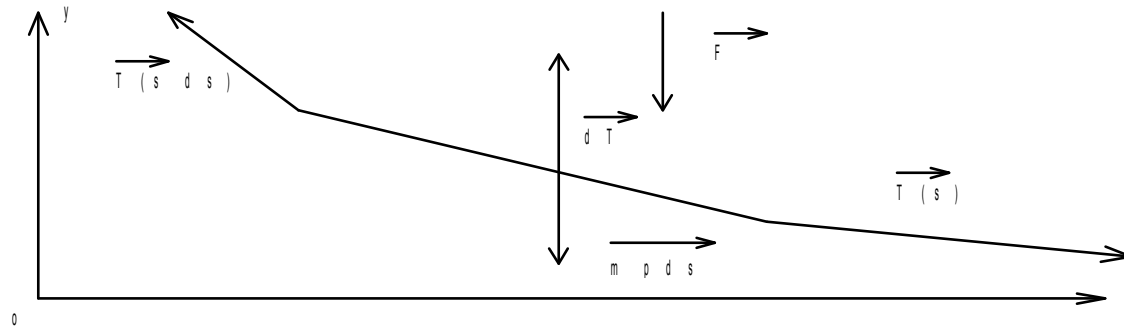
R : Effort (ou contrainte) de rupture

Rem : Contrainte de limite élastique minimale garantie

Pmax : Pression maximale admissible en fond de fouille

COURBE D'UN CÂBLE

On se place dans le champ de force F ($|F| = m p$ poids apparent)



On écrit l'équilibre des forces $dT + F = 0$

On projette sur les axes $\begin{cases} dT_x = 0 \\ dT_y = m p ds \end{cases}$

d'où $\begin{cases} T_x = T_0 = cte \\ T_y = m p s \end{cases}$

On définit le paramètre P par $P = T_0 / m p$

$$S = \int \sqrt{1 + Y'^2} dx$$

La tension est tangente au câble donc $y' = T_y / T_x$

d'où

$$Y' = \frac{T_y}{T_x} = \frac{m p S}{T_0} = \frac{m p}{m p P} \int \sqrt{1 + Y'^2} dx$$

$$y' = \frac{1}{P} \int \sqrt{1 + Y'^2} dx$$

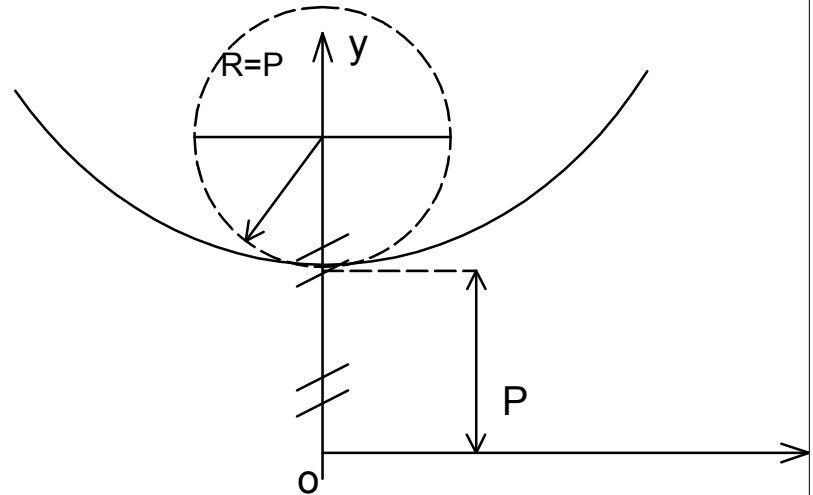
COURBE D'UN CABLE

d'où l'équation différentielle

$$y'' = \frac{\sqrt{1 + y'^2}}{P}$$

Equation dont une solution est

$$y = P \operatorname{ch} (x/P)$$



COURBE D'UN CABLE

APPROXIMATION DE LA CHAINETTE

On fait un développement de $\text{ch } x/P$
 $y = P \text{ ch } (x/P) = P \left[1 + \frac{x^2}{2P^2} + \frac{x^4}{24P^4} + \dots \right]$

Si on se limite au 2^{ème} ordre, on obtient une parabole dont l'équation est :

$$y = P + \frac{x^2}{2P}$$

Rayon de courbure ρ :

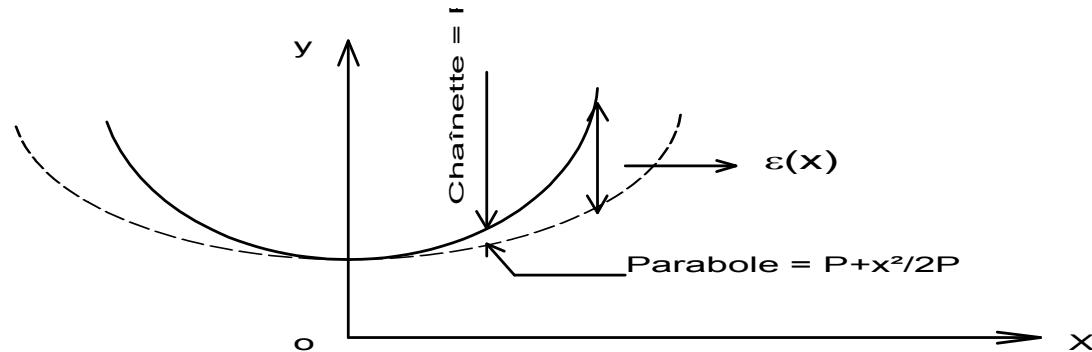
$$\rho = 1/y''$$

$$\rho \text{ (chaînette)} = 1/y'' = P/\text{ch } (x/P)$$

Comparaison des deux courbes :

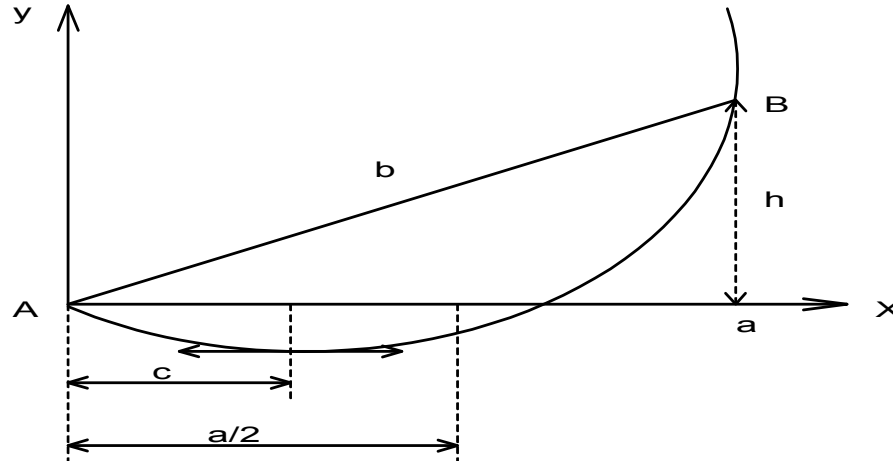
ρ (parabole) = P quelque soit l'abscisse x

ρ (parabole) est constant, ρ (chaînette) diminue avec l'abscisse donc la chaînette est à l'intérieur de la parabole.



COURBE D'UN CABLE

PORTEE DENIVELEE



Notations

a = portée

b = portée dénivelée = $\sqrt{a^2 + h^2}$ ou corde

h = dénivelée

c = abscisse du point bas pour l'hypothèse considérée et compte tenu des points d'accrochage.

$$y = P \left[\operatorname{ch} \frac{(x-c)}{P} - \operatorname{ch} \frac{c}{P} \right]$$

$$\text{avec } c = \frac{a}{2} - P \operatorname{arg} \operatorname{sh} \left(\frac{h}{2P} \right) \operatorname{sh} \left(\frac{a}{2P} \right)$$

Approximation en développant au 2^{ème} ordre, on obtient l'équation parabolique.

$$y = (x/2P) [x-2c] \quad \text{avec } c = a/2 - Ph/a$$

cette formule n'est valable que pour $h/a < 0,5$

LONGUEUR DE L'ARC

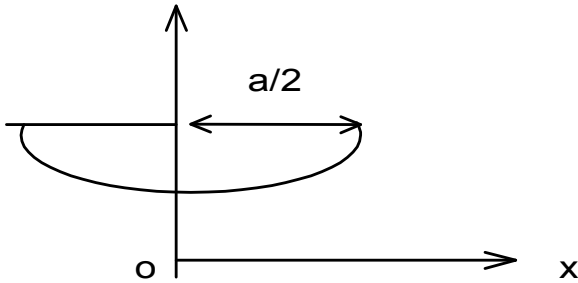
Portée de niveau

$$ds = \sqrt{1 + y'^2} dx$$

avec $y = P \operatorname{ch}(x/P)$

$$ds = \sqrt{1 + \operatorname{sh}^2(x/P)} dx = \sqrt{\operatorname{ch}^2(x/P)} dx = \operatorname{ch}(x/P) dx$$

$$s = 2 \int_0^{a/2} \operatorname{ch}(x/P) dx$$



$$s = 2P \operatorname{sh}(a/2P)$$

Approximation

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

au 1^{er} ordre

$$s = a$$

au 3^{ème} ordre

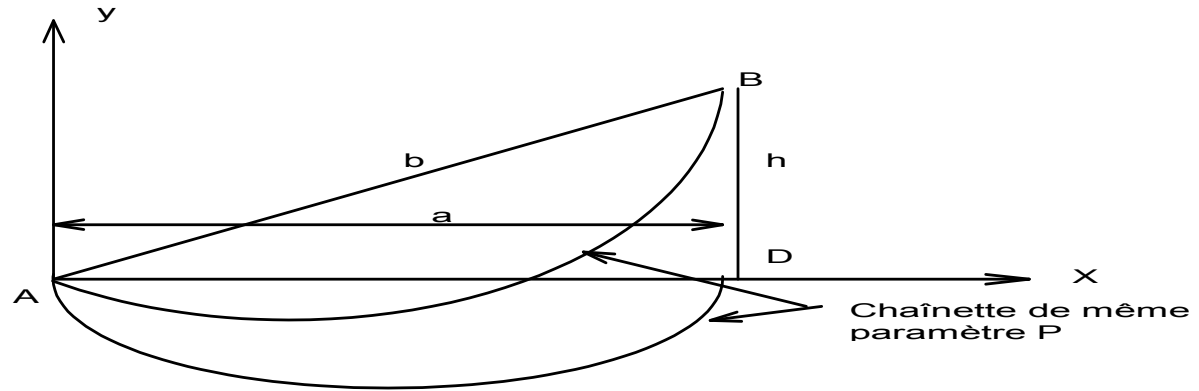
$$s = a + \frac{a^3}{24P^2}$$

exemple : $a = 500 \text{ m}$

$P = 2200 \text{ m}$

$$\frac{a^3}{24P^2} = 1 \text{ m}$$

Portée dénivelée



Théorème de Pythagore

On démontre que : $s_{AB}^2 = s_{AD}^2 + h^2$

Ce qui concerne $s_{AB}^2 = (2P \operatorname{sh}(a/2P))^2 + h^2$

$$s_{AB} = 2P \operatorname{sh}(a/2P) \sqrt{1 + \frac{h^2}{4P^2 \operatorname{sh}^2(a/2P)}}$$

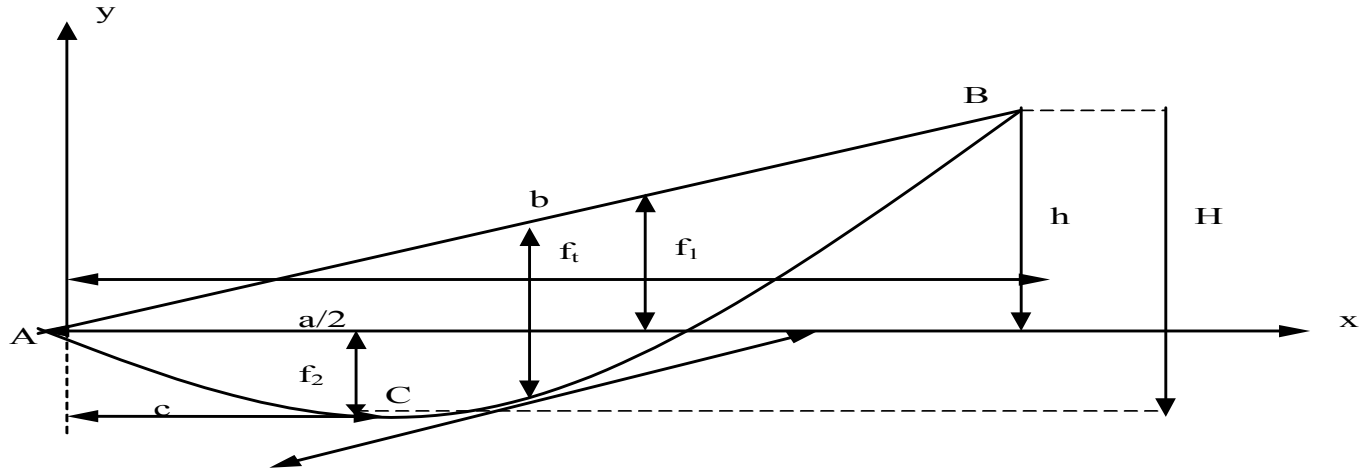
Approximation au 1^{er} ordre :

$$S = b$$

Approximation au 3^{ème} ordre on trouve :

$$S = b + \frac{a^3}{24P^2} \times \frac{b}{a}$$

FLECHES



Définition des flèches

1. Flèche médiane (f_1) c'est à dire au point milieu
2. Flèche tangente (f_t) c'est à dire au point de tangence parallèle à AB
3. Flèche au point bas (f_2)
4. creux $H = f_2 + h$

Définition des flèches

On calcule $y(a/2)$ $f_1 = y(a/2) + h/2$ ce qui donne

$$f_1 = P * \frac{\sqrt{1 + h^2 / ((4P^2 sh^2(a/2P)))} * [ch(a/2P) - 1]}$$

Approximation:

$$f_1 = ab/8P \text{ et pour } h = 0 \quad f_1 = a^2/8P$$

Flèche tangente

Dans le cas d'une portée de niveau (les supports ont même niveau).

En parabolique la tangente au point $a/2$ est parallèle à la droite (AB) donc la flèche tangente est égale à la flèche médiane.

$$f_1 = f_t = f_c$$

Flèche basse et creux

On calcule $y(c)$, on obtient :

$$Y(c) = P \cdot \left\{ \operatorname{ch} \left(\frac{a}{2P} \right) \left[\sqrt{1 + \frac{h^2}{(4P^2 \operatorname{sh}^2(a/2P))}} \right] - 1 \right\} - h/2$$

$$f_2 = y(c) \text{ et } h = y(c) + h$$

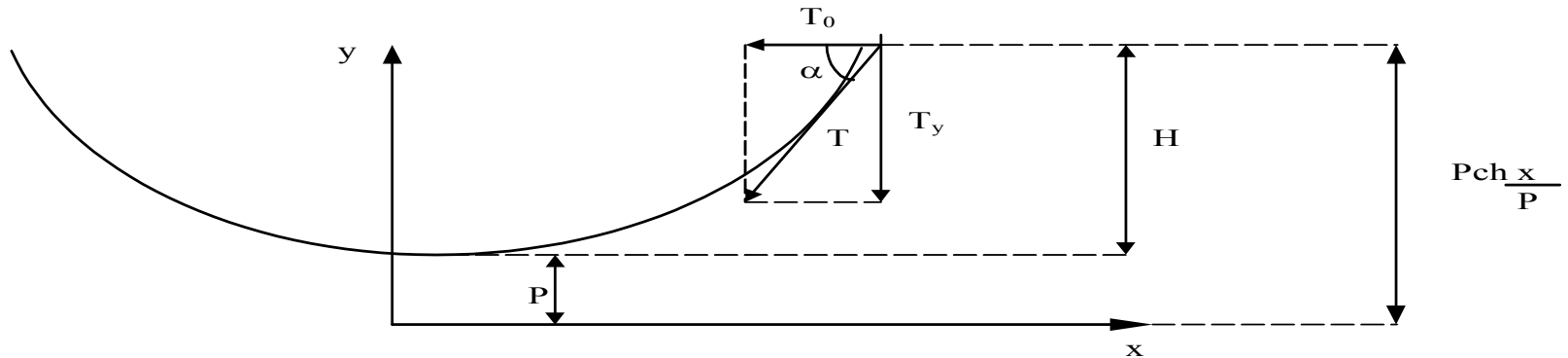
Approximation : en développant au 2^o ordre on trouve.

$$f_2 = \frac{-h}{2} + \frac{ab}{8P} + P \times \frac{(b-a)}{a}$$

et

$$H = \frac{h}{2} + \frac{ab}{8P} + P \times \frac{(b-a)}{a}$$

TENSION AUX POINTS D'ACCROCHAGE



On se place dans le plan du champ de force F

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

$$\text{Où } y = P \operatorname{ch}(x/P) \quad y' = \operatorname{sh}(x/P) \quad \cos \alpha = \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{sh}^2(x/P)}}$$

$$T = T_0 / \cos \alpha = T_0 \operatorname{ch}(x/P) = m_p P \operatorname{ch}(x/P)$$

$$T = m_p P + m_p [P \operatorname{ch} x/P - P]$$

$$\mathbf{T = T_0 + m_p H}$$

Cette formule est valable dans le plan d'équilibre de la chaînette

EFFORTS APPLIQUES AUX CABLES

Coefficient de surcharge

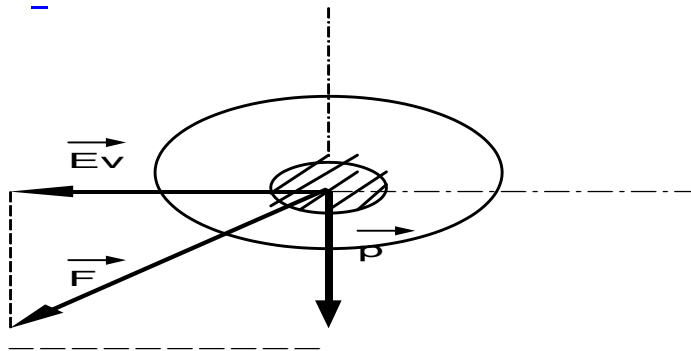
Le câble est soumis aux efforts suivants :

- Le poids propre du câble par mètre linéaire : p (daN/ m)
- Le poids du givre sur le câble par mètre linéaire : y (daN/m)
- Le vent sur le câble éventuellement givré par mètre linéaire E_v (daN/m)

Toute surcharge appliquée au câble provoque :

- une rotation du plan de la chaînette
- une modification du < poids apparent > du câble

VENT



$$F = \sqrt{(p^2 + E_v^2)}$$

m = Coefficient de surcharge

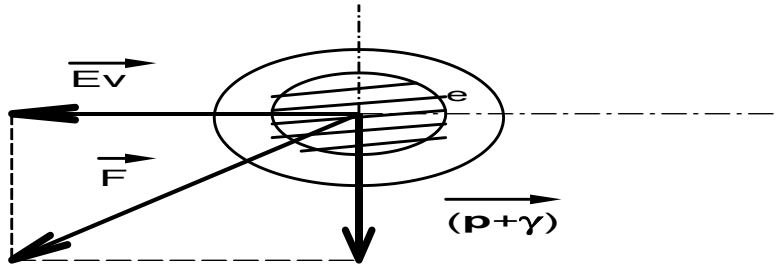
β = Angle de rotation du plan de la chaînette.

$$m = \frac{\sqrt{(p^2 + E_v^2)}}{p}$$

$$\beta = \arctg (E_v/p)$$

Coefficient de surcharge

ACTION GIVRE + VENT



$$F = \sqrt{(p + \gamma)^2 + E_v^2} = m p = \text{« poids apparent »}$$

$$m = \frac{\sqrt{(p + \gamma)^2 + E_v^2}}{p}$$

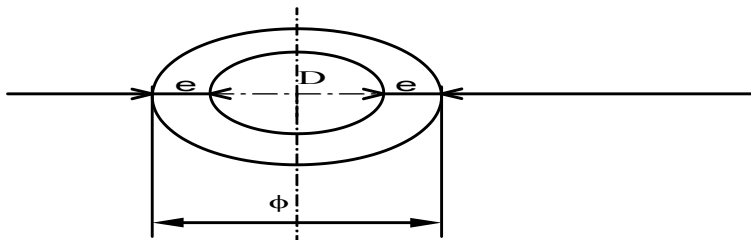
$$\beta = \arctg [E_v / (p + \gamma)]$$

Pour un câble donné on a :

D = diamètre du câble

e = épaisseur du givre

ϕ = diamètre apparent du câble givre = $D + 2e$



$$\phi = D + 2e$$

Coefficient de surcharge

Le poids linéaire du givre sur le câble est :

$$\gamma = \Gamma \Pi [(D+2e) - D^2]/4 = \Pi e(D + e) \Gamma$$

Γ : Le poids volumique du givre sur le câble est : $\Gamma = M_v * g$

La masse volumique du givre est $M_v = 600 \text{ kg/m}^3$

L'effort du vent E_v : $E_v = P_v (D+2e)$

P_v étant la pression du vent sur le câble en daN/m^2

D'où le calcul de “ m ” :

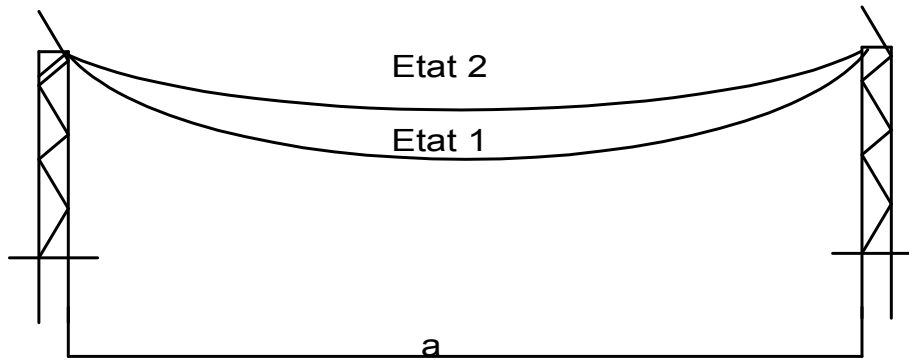
$$m^2 = [((p + \Pi e (D + e) \Gamma)^2 + (P_v (D + 2e))^2] / p^2$$

$$\beta = \text{arctg} \quad [P_v (D + 2e)] / (p + \Pi e (D + e) \Gamma)$$

EQUATION DE CHANGEMENT D'ETAT

EQUATION DE CHANGEMENT D' ETAT D'UNE PORTEE

La longueur du conducteur peut varier sous l'influence d'un écart de température, ou d'une variation de tension mécanique.



Chaque état est caractérisé par :

- la température θ
- le coefficient de surcharge m
- la tension T_0 (ou P le paramètre)

Connaissant θ_1 , m_1 et T_1 (ou P_1), θ_2 , et m_2 on désire connaître T_2 (ou P_2)

Pour cela on écrit que la variation de longueur de câble est due à la dilatation mécanique et à la dilatation thermique.

EQUATION DE CHANGEMENT D'ETAT

La dilatation mécanique

$$\Delta s/s = \Delta T/ES = (T_2 - T_1)/ES$$

La dilatation thermique

$$\Delta s/s = \alpha \Delta \theta$$

$$\Delta s/s = \alpha(\theta_2 - \theta_1)$$

$$s = a + a^3 / 24 P^2$$

$$P = mpT$$

L'équation de Changement d'état:

$$T_2^3 + T_2 \left[\frac{a^2 m^2 p^2 ES}{24 T_1^2} - T_1 + ES \alpha (\theta_2 - \theta_1) \right] = a^2 m^2 p^2 \frac{ES}{24}$$

EQUATION DE CHANGEMENT D'ETAT

Expression qui est de la forme :

$$T_2^2 [T_2 + A] = B \quad \text{ou} \quad T_2 = \sqrt{\frac{B}{A + T_2}}$$

Où :

$$A = \frac{a^2 m_1^2 p^2 E S}{24 T_1^2} - T_1 + E S \alpha (\theta_2 - \theta_1)$$

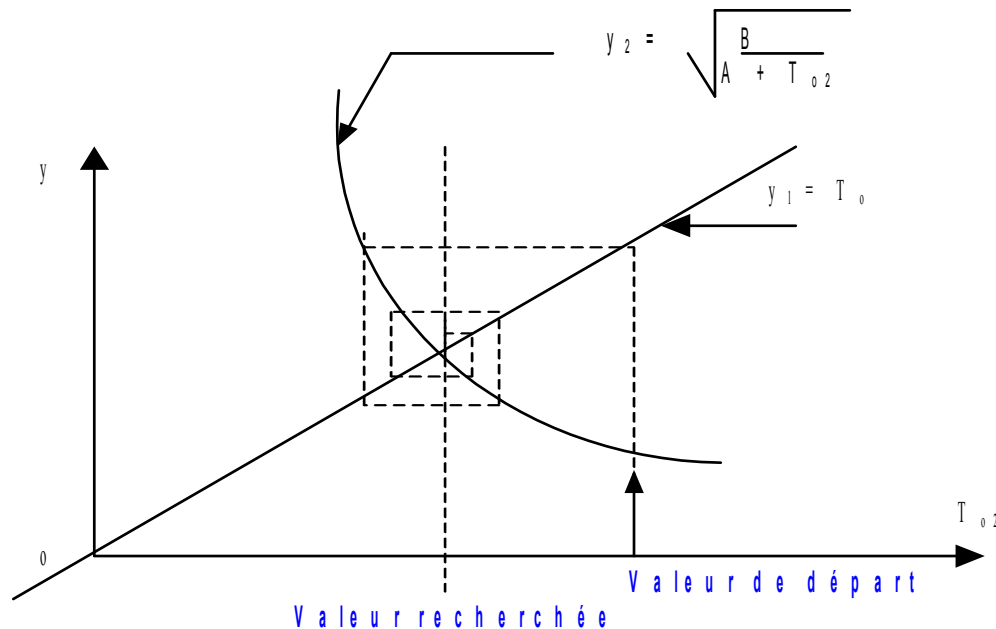
$$B = \frac{a^2 m_2^2 p^2 E S}{24}$$

Calcul par itération

$$\begin{cases} y_1 = T_2 \\ y_2 = + \sqrt{\frac{B}{A + T_2}} \end{cases}$$

On calcule A et C et On pose l'équation sous la forme :

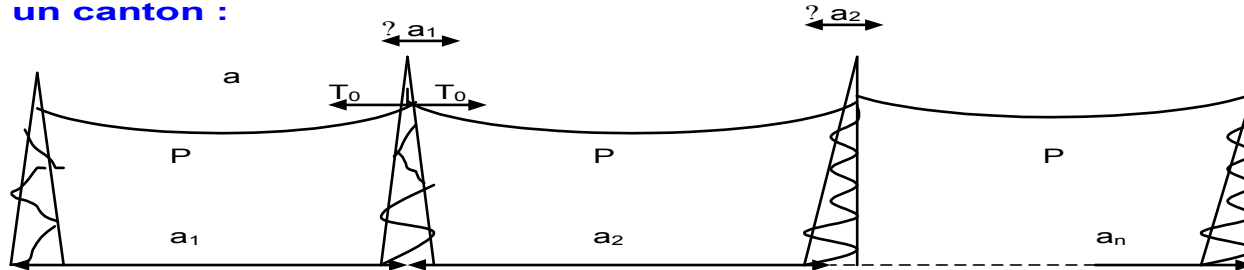
$$f(t) = t - A - \frac{C}{t^2}$$



EQUATION DE CHANGEMENT D'ETAT

GENERALISATION DE L'EQUATION DE CHANGEMENT D'ETAT

On considère un canton :



On admet qu'il n'y a pas de différence de tension au niveau des pinces des chaînes de suspension donc la tension horizontale reste la même sur le canton.

On écrit que la longueur du câble du canton reste constante.

$$\frac{\sum a_i^3}{24} \frac{1}{P_2^2} - \frac{1}{P_1^2} = \sum a_i \left[\frac{T_2 - T_1}{ES} + \alpha(\theta_2 - \theta_1) \right]$$

On retrouve l'équation classique en remplaçant :

a^2 par $\sum a_i^3$ d'où la notion de la portée équivalente

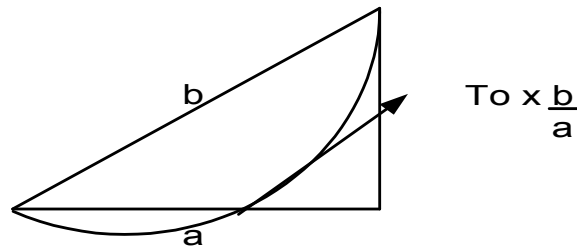
$$a_e = \sqrt{\frac{\sum a_i^3}{\sum a_i}}$$

EQUATION DE CHANGEMENT D'ETAT

EQUATION DE CHANGEMENT D'ETAT EN PORTEE SECHE DENIVELEE

On refait le même raisonnement mais dans ce cas $s = b + \frac{a^3}{24 P^2} \times \frac{a}{b}$

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



d'où l'équation :

$$\frac{a^3}{24 P_2^2 b} - \frac{a^3}{24 P_1^2 b} = \frac{b(T_2 \times b/a - T_1 \times b/a)}{ES} + b\alpha(\theta_2 - \theta_1)$$

ce qui donne : $\frac{a^2}{24} \frac{a^2}{b} \left[\frac{1}{P_2^2} - \frac{1}{P_1^2} \right] = \frac{T_2 - T_1}{Esx a/b} + \alpha(\theta_2 - \theta_1)$

On reconnaît l'équation classique où on remplace :

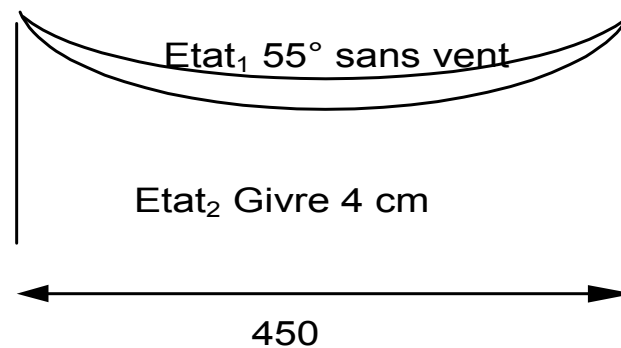
a par $a \times \frac{a}{b}$ et E par $E \times \frac{a}{b}$

Une généralisation de l'équation de changement d'état à un canton de portées dénivelées serait douteuse car la tension est loin d'être constante dans tout le canton.

EQUATION DE CHANGEMENT D'ETAT

EXEMPLE DE RESOLUTION D'EQUATION DE CHANGEMENT D'ETAT

Etat 2 $\left\{ \begin{array}{l} P_2 \text{ inconnue} \\ \text{Température } \theta = - 5^{\circ}\text{c} \\ \text{Vent } 18 \text{ daN/m}^2 \\ \text{4 cm d'épaisseur de givre} \end{array} \right\} \quad m_2 = 4,59$



Calcul de T_1 :

$$T_1 = m_p P = 1500 \times 1,5 \times 0,98 = 2314 \text{ daN}$$

EQUATION DE CHANGEMENT D'ETAT

Calcul de T_2 :

$$T_2^3 + T_2^2 \left[\frac{450^2 \times 1^2 \times 1,543^2 \times 5400 \times 570}{24 \times 2314^2} - 2314 + 5400 \times 570 \times 23 \cdot 10^{-6} (-60) \right]$$

$$= \frac{550^2 \times 459^2 \times 1543^2 \times 5400 \times 570}{24}$$

$$T_2^3 + T_2^2 [4986] = 1,322 \times 10^{12}$$

$$T_2^2 [T_2 + 4986] = 1,302 \times 10^{12}$$

$$T_2 = \sqrt{\frac{1,302 \times 10^{12}}{T_2 + 4986}}$$

$$1^\circ \text{ Itération } (T_2)^1 = \sqrt{\frac{1,302 \times 10^{12}}{9500 + 4986}} = 9480 \text{ daN}$$

$$2^\circ \text{ Itération } (T_2)^2 = \sqrt{\frac{1,302 \times 10^{12}}{9480 + 4986}} = 9497 \text{ daN}$$

$$3^\circ \text{ Itération } (T_2)^3 = \sqrt{\frac{1,302 \times 10^{12}}{9487 + 4986}} = 9484 \text{ daN}$$

$$4^\circ \text{ Itération } (T_2)^4 = \sqrt{\frac{1,302 \times 10^{12}}{9484 + 4986}} = 9485 \text{ daN}$$

$T_2 = 9485$ daN

EQUATION DE CHANGEMENT D'ETAT

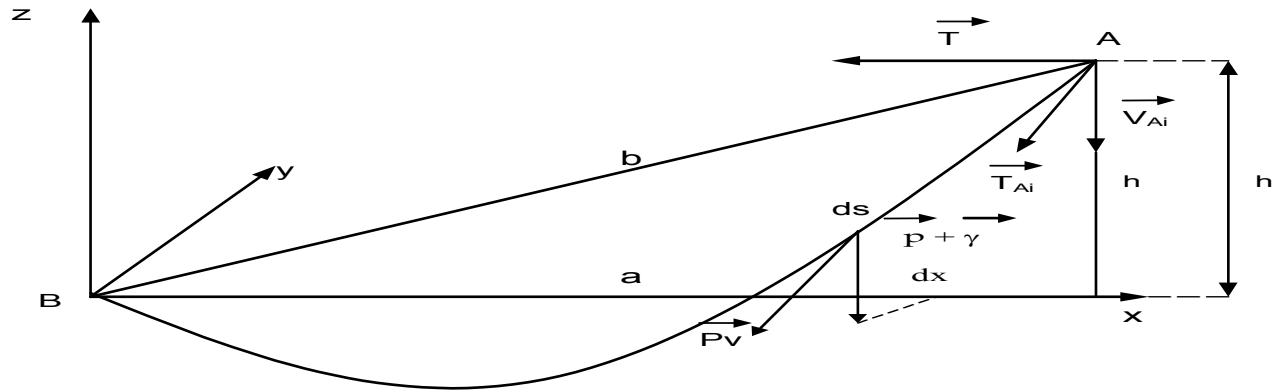
Portée Critique :

C'est la portée pour la quelle la tension dans les deux hypothèses d "été et d'hiver sont égales : $t_A = t_B$

$$a_c = \frac{t}{p} \sqrt{\frac{24\alpha(\theta_A - \theta_B)}{m_A^2 - m_B^2}}$$

CALCUL DES EFFORTS

CALCUL DES EFFORTS DUS A UNE PORTEE (V_{Ai} , H_{Ai} , L_{Ai})



Calcul de l'effort vertical V_{Ai}

Moment par rapport à l'axe y

$$\int_0^a (p + \gamma) x ds - V_{Ai} a = Th$$

Si on fait l'approximation suivante $ds/s = dx/a$

$$\int_0^a (p + \gamma) \frac{s}{a} x dx - V_{Ai} a = -Th$$

$$(p + \gamma) \frac{s}{a} x \frac{a^2}{2} + Th = V_{Ai} a$$

$$V_{Ai} = (p + \gamma) s/2 + Th/a$$

Or s très voisin de b d'où :

$$V_{Ai} = (p + \gamma) b/2 + Th/a$$

CALCUL DES EFFORTS

Calcul de l'effort transversal T_{Ai}

Moment par rapport à l'axe Z

$$\int_0^a p v \phi x ds - T_{Ai} a = 0$$

Avec la même approximation : $\frac{ds}{S} = \frac{dx}{a}$

$$\int_0^a p v \phi \frac{s}{a} dx = - T_{Ai} a = p v \phi \frac{s}{a} \frac{a^2}{2}$$

$$T_{Ai} = \frac{(p v \phi s)}{2}$$

Or s très voisin de b.

$$T_{Ai} = \frac{(p v \phi s)}{2}$$

– Calcul de l'effort longitudinal L_{Ai} ,

C'est la tension horizontale

$$L_{Ai} = T$$

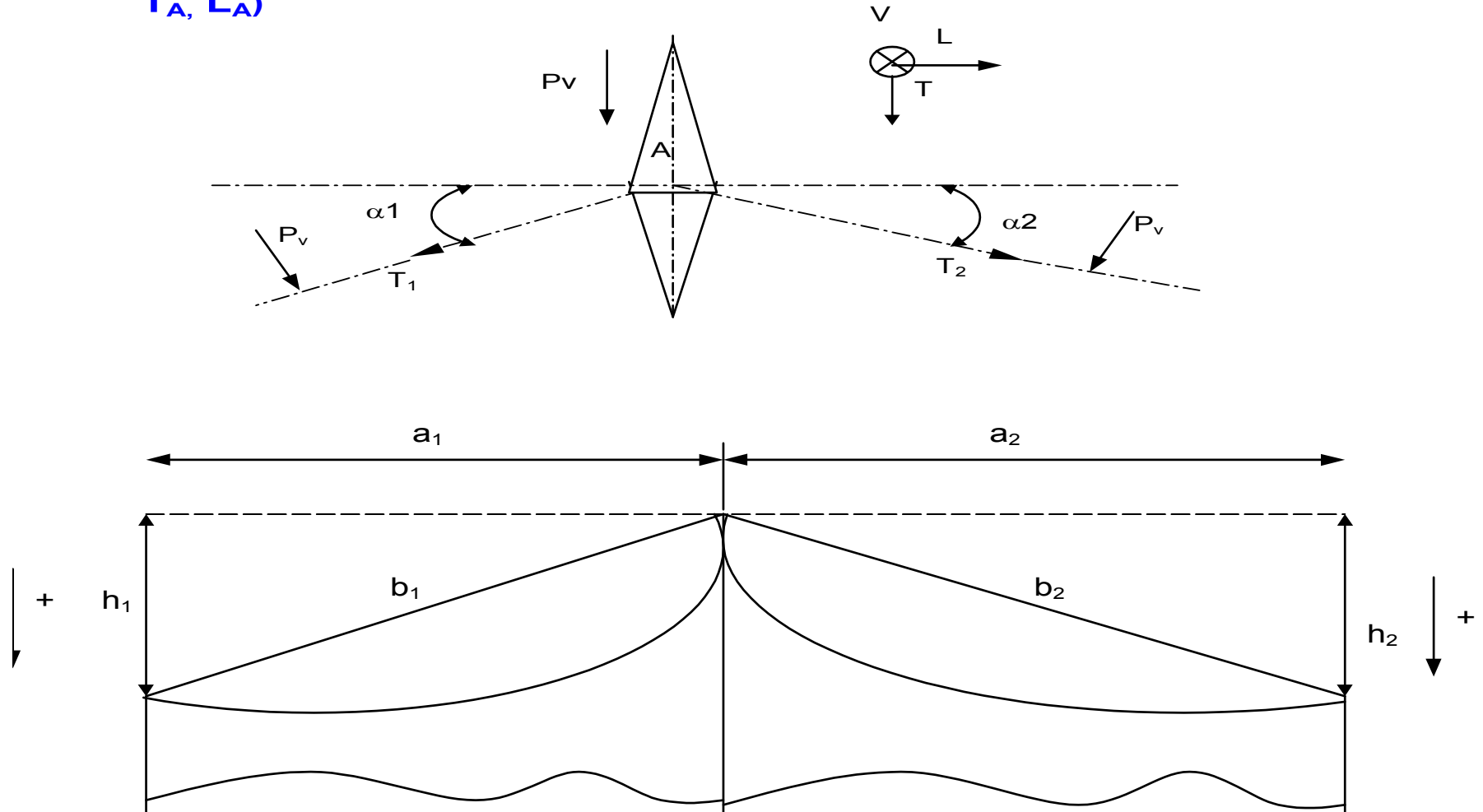
– Calcul de la tension au point d'accrochage

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

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

CALCUL DES EFFORTS

- Efforts par câble pour 2 portées adjacentes et ramenés aux axes du pylône (V_A , T_A , L_A)



Les hauteurs h doivent être comptées algébriquement à partir du support considéré, ici elles sont toutes les deux positives

CALCUL DES EFFORTS

Pylône de suspension en alignement $\alpha_1 = \alpha_2 = 0$

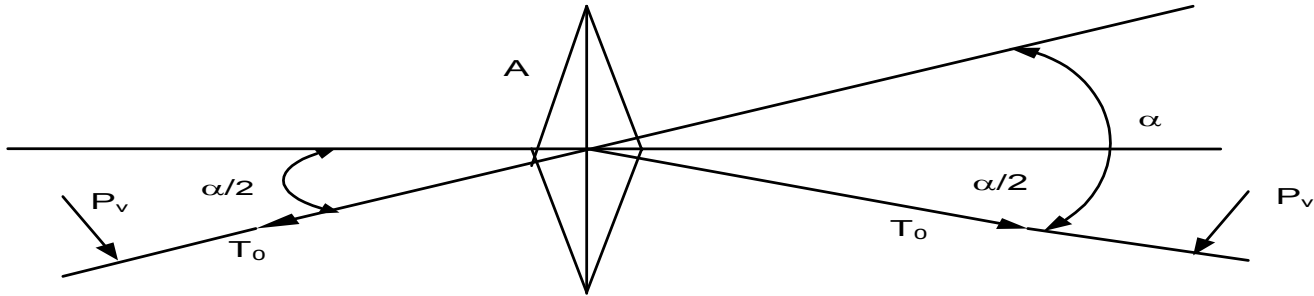
$$V_A = (p + \gamma) \frac{b_1}{2} + T \frac{h_1}{a_1} + (p + \gamma) \frac{b_2}{2} + T \frac{h_2}{a_2}$$

$$T_A = Pv \phi \frac{b_1}{2} + Pv \phi \frac{b_2}{2}$$

$$L_A = T - T = 0$$

$$\left\{ \begin{array}{l} V_A = (p + \gamma) \frac{(b_1 + b_2)}{2} + T \left(\frac{h_1}{a_1} + \frac{h_2}{a_2} \right) \\ T_A = Pv \phi \frac{(b_1 + b_2)}{2} \\ L_A = 0 \end{array} \right.$$

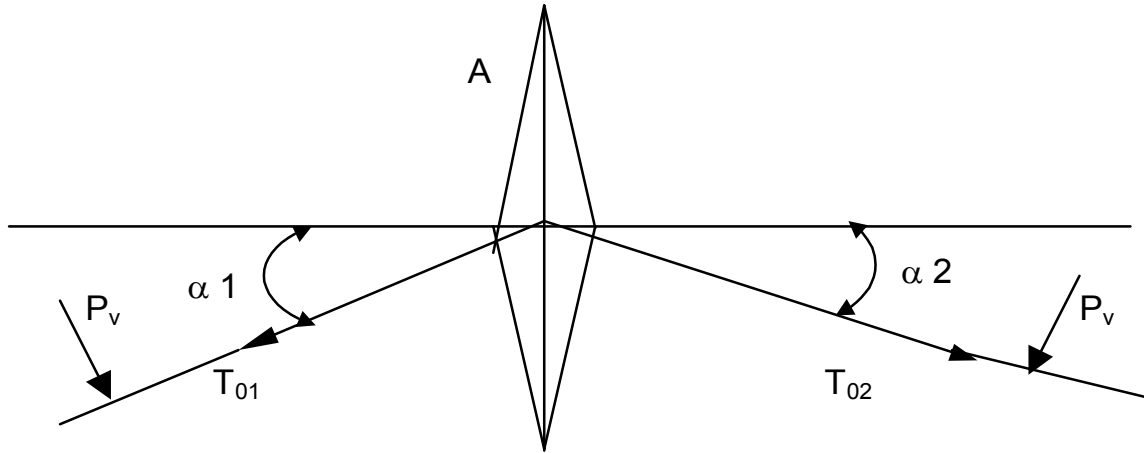
– **Pylône de suspension en angle souple (dans la bissectrice)**



$$\left\{ \begin{array}{l} V_A = (p + \gamma) \frac{(b_1 + b_2)}{2} + T \left(\frac{h_1}{a_1} + \frac{h_2}{a_2} \right) \\ T_A = Pv \phi \cos \frac{\alpha}{2} \frac{(b_1 + b_2)}{2} + 2T \sin \frac{\alpha}{2} \\ L_A = 0 \end{array} \right.$$

CALCUL DES EFFORTS

Pylône d'ancrage



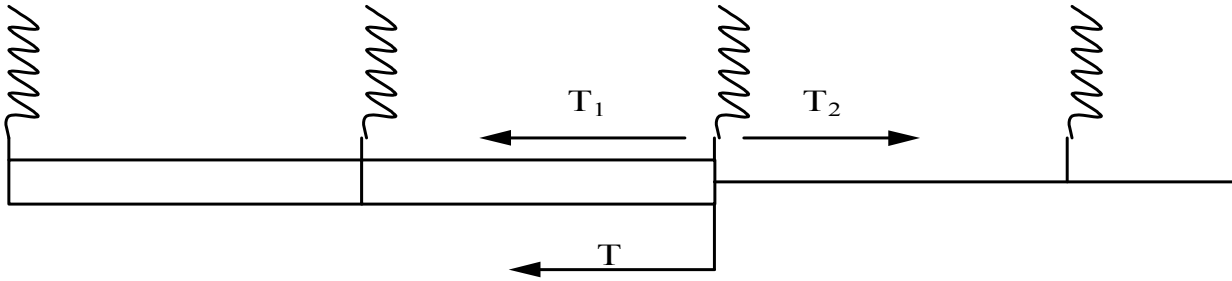
$$V_A = (p + \gamma) \frac{(b_1 + b_2)}{2} + T \left(\frac{h_1}{a_1} + \frac{h_2}{a_2} \right)$$

$$T_A = P_v \phi \left[\frac{b_1}{2} \cos \alpha_1 + \frac{b_2}{2} \cos \alpha_2 \right] + [T_1 \sin \alpha_1 + T_2 \sin \alpha_2]$$

$$L_A = (T_1 \cos \alpha_1 + T_2 \cos \alpha_2) + P_v \phi (b_1/2 \sin \alpha_1 - b_2/2 \sin \alpha_2)$$

CALCUL DES EFFORTS

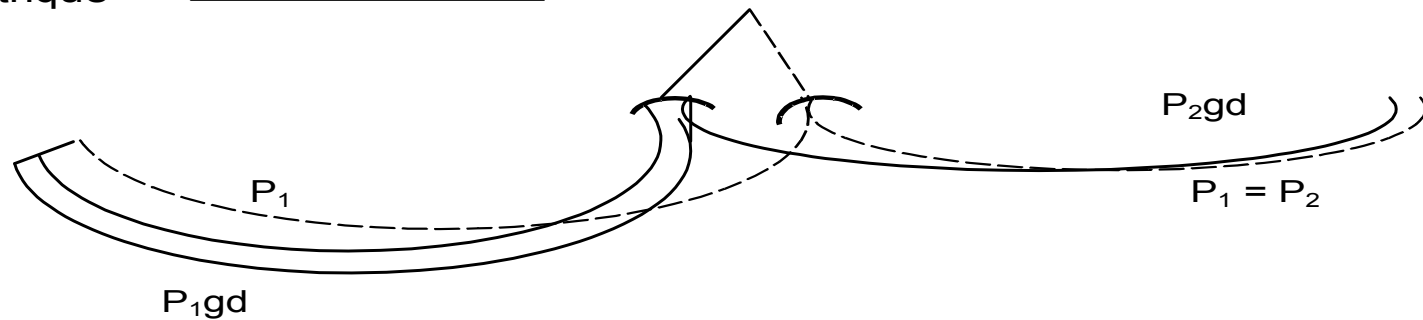
Cas du givre dissymétrique pour un pylône de suspension



Calcul de l'écart de la tension résiduelle compte tenu de la détente de la chaîne
On suppose le câble givré à gauche du pylône n et non givré à droite la chaîne s'incline jusqu'à une position d'équilibre.

Etat initial : non givré

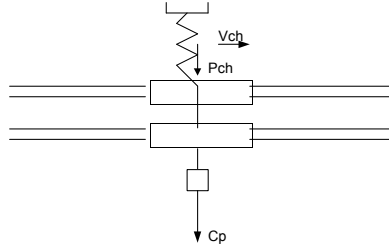
Etat final : givre dissymétrique



Le calcul se fait par itération sur n pylônes de suspension.

CALCUL DES EFFORTS

Calcul des efforts à différents niveaux



Efforts au niveau de la pince (V_p , T_p , C_p)

Pour calculer l'effort au niveau de la pince il faut tenir compte des V , L , du nombre de conducteurs par pince et du nombre de pinces chaînes par ex : cas les plus courants :

Câble unique $V_p = V_A + C_p T_p = T_A$

Faisceau double $V_p = V_A + \frac{C_p}{2} T_p = T_A$

Faisceau triple $V_p = V_A + \frac{C_p}{3} T_p = T_A$

CALCUL DES EFFORTS

Efforts au niveau de la pince (V_p , T_p , C_p)

Pour calculer l'effort au niveau de la pince il faut tenir compte des V , L , du nombre de conducteurs par pince et du nombre de pinces chaînes par ex : cas les plus courants :

Câble unique $V_p = V_A + C_p T_p = T_A$

Faisceau double $V_p = V_A + \frac{C_p}{2} T_p = T_A$

Faisceau triple $V_p = V_A + \frac{C_p}{3} T_p = T_A$

Faisceau quadruple $V_p = 2V_A + \frac{C_p}{2} T_p = 2T_A$

D'où $R_p = \sqrt{V_p^2 + T_p^2} < \underline{\text{charge admissible pour l'hypothèse}}$

CALCUL DES EFFORTS

Effort au niveau de la chaîne (Vc, Tc , Lc)

Soit n le nombre de conducteurs par phase

Chaînes de suspension :

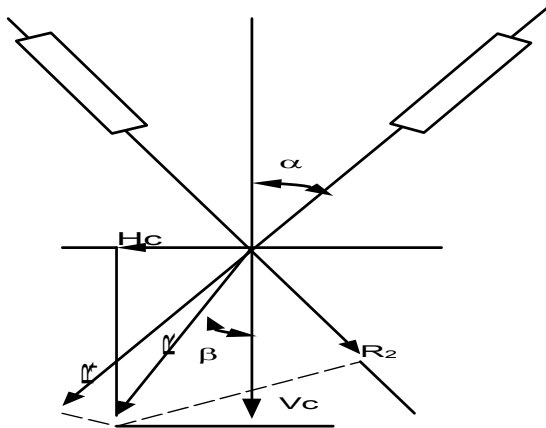
$$V_c = nV_A + P_{ch} + C_p$$

$$T_c = nT_A + V_{ch}$$

$$L_c = 0 \text{ (hyp. A, B, Givre sym)}$$

$$R = \sqrt{V_c^2 + T_c^2} \leq \text{charge admissible pour l'hypothèse}$$

Pour le cas des chaînes en V :



Si $\beta < \alpha$ les efforts se répartissent sur les 2 files d'isolateurs

$$(R_1 + R_2) \cos \alpha = V_c$$

$$(R_1 - R_2) \sin \alpha = T_c$$

$$R_1 = \frac{1}{2} \left[\frac{V_c + T_c}{\cos \alpha} \right]$$

$$R_2 = \frac{1}{2} \left[\frac{V_c - T_c}{\cos \alpha} \right]$$

Si $\beta > \alpha$ 1 seule file reprend l'effort.

$$R = \sqrt{V_c^2 + T_c^2}$$

Chaîne d'ancrage : On vérifie les efforts se rapportant à chaque côté

$$V_{ci} = nV_{Ai} + P_{ch1}$$

$$T_{ci} = nT_{Ai} + V_{ch1}$$

$$L_{ci} = nL_{Ai} \quad R = \sqrt{V_{ci}^2 + T_{ci}^2 + L_{ci}^2} < \text{charge admissible pour l'hypothèse}$$

CALCUL DES EFFORTS

- Efforts appliques aux supports (V, T, L)

- conducteurs

Suspension :

$$V = nV_A + Pch + C_p$$

$$T = nT_A + Vch$$

$$L = nL_A$$

Ancrage

$$V = nV_A + Pch_1 + Pch_2$$

$$T = nT_A + Vch_1 + Vch_2$$

$$L = nL_A$$

- câbles de garde

Même formules que pour les conducteurs avec C_p , Pch et $Vch = 0$

***PARTIE II – LES SUPPORTS ET LEURS
FONDATIONS***

DISPOSITIONS COMMUNES AUX SUPPORTS

DISPOSITIONS DE L'ARRETE TECHNIQUE

L'Arrêté Technique fixe les distances suivantes au dessus du sol et des obstacles :

- Terrains agricoles : hauteurs au dessus du sol ≥ 6 m
- Distances aux maisons et immeubles ≥ 4 m
- Hauteurs au dessus des voies de circulation ≥ 8 m
- Traversées des voies ferrées :

$$g = 2 + 0,015 U + \frac{(L-300)}{15} \times 0,10$$

Avec g = Distance de garde en mètre,
 U = Tension entre phases de la ligne traversante en kV,
 L = Portée en mètre,
 X = Distance par rapport en support le plus proche.

DISPOSITIONS COMMUNES AUX SUPPORTS

- Cours d'eau et plans d'eau :

- ◆ Non navigable : hauteur ≥ 3 m,
- ◆ Non flottable : hauteur ≥ 6 m,
- ◆ Navigable ou flottable : hauteur ≥ 8 m.

- Traversées de lignes d'énergie :

$$h = 1 + 0,001 U + \frac{(a-300) \times 0,01}{15}$$

- » U = Tension entre phases de la ligne à la plus haute tension en kV,
- » h = Distance de croisement (m) ≥ 2 m,
- » g = Distance de garde en mètre,
- » X = Distance entre le point de croisement et le support le plus proche (en mètre).

DISPOSITIONS COMMUNES AUX SUPPORTS

- Distance de sécurité

Les Directives LHT ont introduit la notion de distance de sécurité.

La distance de sécurité ou distance de tension est définie en fonction de la probabilité d'apparition d'une surtension et de la présence simultanée d'une personne ou d'un objet au voisinage de la ligne.

Elle est calculée à partir de la distance de tenue diélectrique de l'air soit :

$$d = 0,0015 U$$

on définit trois valeurs pour les distances de sécurité :

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

t_1 , t_2 et t_3 sont exprimés en mètres.

U est la tension entre phases exprimée en kV

U	60 kV	90 kV	150 kV	225 kV	400 kV
t_1	0,20	0,25	0,40	0,60	1,00
t_2	0,35	0,50	0,75	1,10	2,00
t_3	0,50	0,70	1,15	1,70	3,00

DISPOSITIONS COMMUNES AUX SUPPORTS

on définit trois valeurs pour les distances de sécurité :

$t_1 = 0,0025 U$ pour une probabilité de voisinage faible,

$t_2 = 0,0050 U$ pour une probabilité de voisinage moyenne,

$t_3 = 0,0075 U$ pour une probabilité de voisinage forte,

t_1 , t_2 et t_3 sont exprimés en mètres.

U est la tension entre phases exprimée en kV

U	60 kV	90 kV	150 kV	225 kV	400 kV
t_1	0,20	0,25	0,40	0,60	1,00
t_2	0,35	0,50	0,75	1,10	2,00
t_3	0,50	0,70	1,15	1,70	3,00

DISPOSITIONS COMMUNES AUX SUPPORTS

les distances de garde prennent les valeurs suivantes :

➤ Terrains agricoles :

En 60 kV : hauteur = 7 m

En 225 kV : hauteur = 7,50 m

En 400 kV : hauteur = 8,50 m

➤ Distances aux maisons et immeubles

En 60 kV : hauteur = 5 m

En 225 kV : hauteur = 6,50 m

En 400 kV : hauteur = 7,50 m

➤ Hauteur au dessus des voies de circulation

En 60 kV : hauteur = 8 m

En 225 kV : hauteur = 8,50 m

En 400 kV : hauteur = 9,50 m

➤ Autoroutes

Conformément au CSTG de l'ONE $d \geq 12$ m

DISPOSITIONS COMMUNES AUX SUPPORTS

➤ Traversées de voies ferrées :

– Si la portée $a < 300$ m

Distance de garde

$$g = 2 + 0,015 U \text{ en m}$$

– Si la portée $a > 300$ m

$$g = 2 + 0,015 U + 0,20 x/a * (a - 300)/15$$

Avec x : distance par rapport au support le plus proche en mètre, _____

a : Portée de la ligne traversante (m).

➤ Cours d'eau et plans d'eau :

– Non navigable :

» en 60 kV : hauteur = 3.50 m

» en 225 kV : hauteur = 4 m

» en 400 kV : hauteur = 4.50 m

- Non flottable :

» en 60 kV : hauteur = 6.50 m

» en 225 kV : hauteur = 7 m

» en 400 kV : hauteur = 7.50 m

- navigable ou flottable :

» en 60 kV : hauteur = 9 m

» en 225 kV : hauteur = 9.50 m

» en 400 kV : hauteur = 10.50 m

DISPOSITIONS COMMUNES AUX SUPPORTS

➤ Traversées de lignes d'énergie :

» Croisement au voisinage immédiat d'un support $a \leq 300$ m

$$h = 1 + 0,015 U \quad \text{Avec } h \geq 2 \text{ m}$$

» Croisement en un point quelconque d'une portée

$$h = 1 + 0,015 U + 0,20 x/a * (a - 300)/15 \text{ en m}$$

• Avec x : distance entre le point de croisement et le support le plus proche (m)

➤ Distances entre câbles :

» Distance minimale :

$$D_{mi} = t_1 \sqrt{3 + df}$$

» Avec df : écartement des sous conducteurs

» t_1 : distance de tension ($t_1 = 0,0025 U$)

DISPOSITIONS COMMUNES AUX SUPPORTS

Rapprochement des conducteurs sous vent réduit :

- Les conducteurs prennent une position d'équilibre caractérisé par un angle et sous l'effet du vent .

$$Tg \alpha = \text{Effort transversal (H) / Effort vertical (V)}$$

Autour de ce point d'équilibre, les câbles sont le siège d'oscillation asynchrones dont l'amplitude a pour valeur :

$$e = 0.6\sqrt{f + l}$$

- avec : f = flèche médiane de la portée (m) pour la température de répartition ,
- l = longueur de la chaîne (m),
- m = coefficient de surcharge du câble en hypothèse de vent réduit,

La distance réalisée d , entre les câbles doit respecter la condition :

$$d = (d - e) \geq t_1 \sqrt{3 + df}$$

DISPOSITIONS COMMUNES AUX SUPPORTS

➤ Distances à la masse :

Tension en kV	63	90	150	225	400
Hypothèse sans vent	0,50	0,70	1,15	1,70	3,00
Hypothèse sans vent	0,35	0,50	0,75	1,10	2,00

Ces valeurs (m) sont respectivement égales aux distances de sécurité t_3 et t_2

DISPOSITIONS COMMUNES AUX SUPPORTS

AUTRES FORMULES

- Ecartement minimal entre conducteurs :

$$e = 0.8 \left[K \sqrt{f + l} + \frac{U}{150} \right]$$

f : flèche à 55 ° sans vent

U : tension de service

l : longueur de la chaîne

K : 0.75 pour le Cu, 0.80 pour l'Alu - Acier et 0.9 pour l'alimélec

- Portée maximale :

$$a = \sqrt{\frac{8 P}{K_2} \left[\frac{e}{k_1} - \frac{U}{150} \right]^2 - l}$$

K1 = 0.8 pour armement nappe horizontale, 1 pour drapeau, quinconce et mixte

K2 = 0.9 pour la zone 1 (littoral), 1 pour la zone 2

LES SUPPORTS ET LEURS FONDATIONS

Diverses classifications

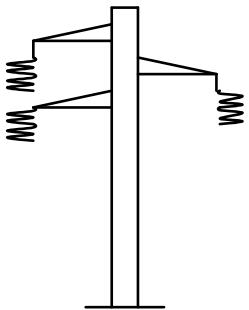
On classe les supports d'après :

- la disposition de leur armement
- le type de fondation utilisée
- leur aptitude à résister à des efforts longitudinaux

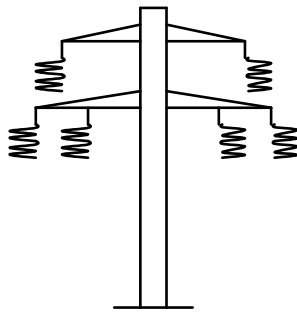
II 1 .2.1 – Classifications des supports d'après la disposition de leur armement

Parmi les types d'armement utilisés, on distingue deux grandes classes.

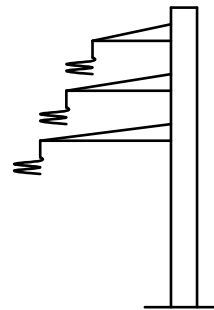
- L'une dans laquelle les conducteurs sont disposés à des étages différents .
C'est le système à phases étagées.
On trouve les pylônes triangle, drapeau, double drapeau et double triangle



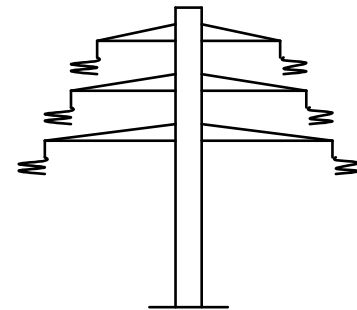
Triangle



Double Triangle



Drapeau

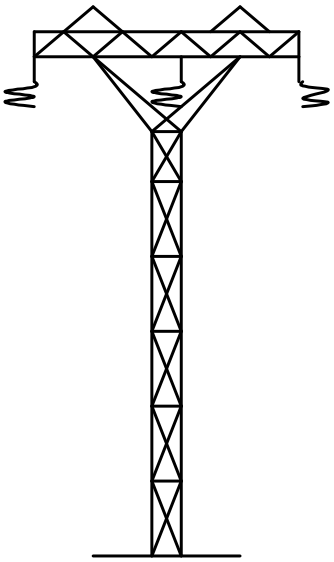


Double Drapeau

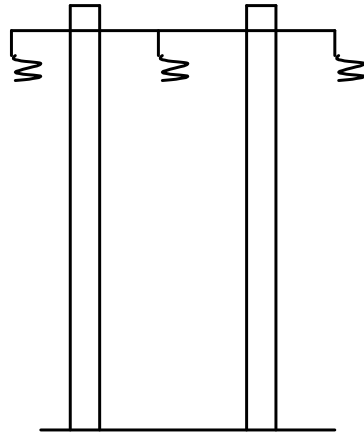
- l'autre dans laquelle les conducteurs sont disposés au même niveau ou à des niveau peu différents :

- Pylônes ou portiques à nappe horizontale,
- Poteaux à armement nappe-voûte,
- Pylônes du type chat.

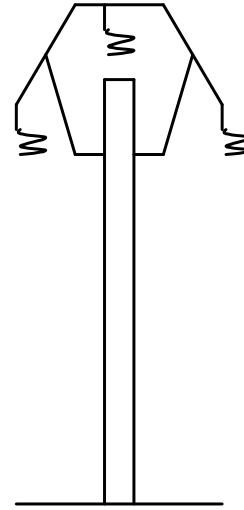
LES SUPPORTS ET LEURS FONDATIONS



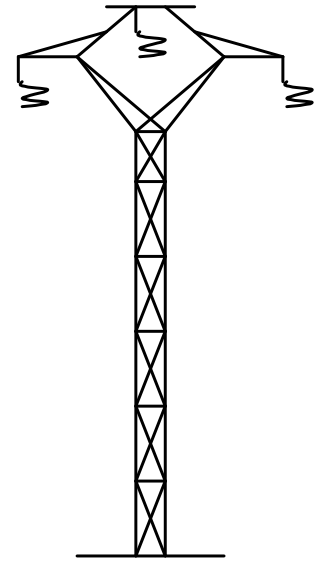
Pylône à nappe
Horizontale



Portique à nappe
Horizontale



Portique
à armement N.V



Pylône type
Chat

La première classe comporte essentiellement des pylônes et poteaux à fût unique vertical qui permettent l'utilisation d'un seul câble de terre disposé à la partie supérieure de l'ouvrage.

Ce câble de terre est à même de réaliser, contre les coups de foudre, une bonne protection de l'ensemble des phases du pylône. Il peut, en effet, couvrir, sous un angle de 30° l'ensemble des phases de chaque côté de l'axe de la ligne.

LES SUPPORTS ET LEURS FONDATIONS

👉 le système à phases étagées présente les inconvénient suivants :

- sensibilité à la foudre pour des lignes à grandes portées
- mal adapté aux zones givrable

👉 La deuxième classe de supports comporte à la fois des pylônes à fût unique et des portiques.

- **Avantage** : évite les rapprochements entre phases ou entre phase et câble de terre sous l'effet des déplacements verticaux des conducteurs (différence de flèche sous l'effet du givre, vibrations des conducteurs) et limite considérablement les risques d'amorçage.
- **Inconvénient** :nécessite l'utilisation de deux câbles de terre disposés de part et d'autre de l'axe de la poutre

LES SUPPORTS ET LEURS FONDATIONS

Classifications des supports d'après le type de fondation utilisée :

- **trois types :**

- ☞ Les supports à fondation simple ou unique (fondation monopode ou monobloc)**

- ☞ Les supports à fondation double (fondation bipôde)**

- ☞ Les supports à fondation séparée ou indépendante (fondation tétrapode)**

LES SUPPORTS ET LEURS FONDATIONS

- ☞ **La forme des pylônes est influencée par le système de fondation utilisée.**
- ☞ **Les supports à fondation simple, sont en général des poteaux (poteaux béton) ou des pylônes métalliques à base étroite.**
- ☞ **Les supports à fondation double sont en général des pylônes à base rectangulaire de dimensions relativement faibles.**
- ☞ **Les supports à fondations séparées représentent actuellement la quasi-totalité des pylônes de grandes lignes dont les dimensions à la base sont importantes**

Vérification de la tenue des supports

•

Vérification de la tenue des supports

Tenue des supports Moyenne Tension

Effort en tête :

Pour qu'un support travaille toujours dans les mêmes conditions, il faut que quelle que soit une nouvelle force exercée et où que se situe son point d'application, son moment par rapport au point d'application demeure le même. Ce moment ne doit pas excéder celui prévu par le fabricant et qui est donné à 0,25 m sous le sommet du poteau.

$$\text{Moment} = F (h - 0,25)$$

F : effort nominale en daN

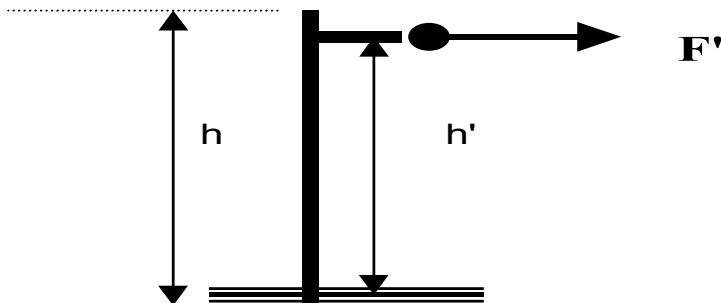
h : hauteur hors sol du support en m

l'effort nominale à adopter est :

$$F \geq \frac{F' \times h'}{h - 0,25}$$

avec F' : résultat des forces

h' : hauteur hors sol à partir du point d'application



De façon général $F \geq \frac{f_1 h'_1 + f_2 h'_2 + \dots}{h - 0,25}$

- Pour les armements nappe voûte

Vérification de la tenue des supports

Choix de l'armement

☞ **En alignement suspension**

Les armement utilises sont

▣ **Nappe voûte** : NV 170 ou NV 2,25

Drapeau ou quinconce D ou **Q** 1 ou 1,30 en urbain et à proximité des constructions

▣ **Poutre d'alignement** pour les grands portées 2m, 2,50m, 3m, 4m,

☞ ▣ **En alignement ancrage ou en angle**

- Art horizontale AH 170
- Drapeau ou quinconce 1 ou 1,30m
- Art /Fût 1m ou 1,30m
- Poutre d'ancrage 2m ou 2,50m,...
- Poutre en tête
- Herse ou chaise d'IACM

Vérification de la tenue des supports

Profondeur des fouilles :

SUPPORTS		COEFFICIENT DE STABILITE DE LA FONDATION	
		k = 1,2	k = 1,75
Fonction du support		Double ancrage Simple fixation Tous les cas de ligne BT	Arrêt simple Arrêt double
Bois ou assemblage en bois		(H/10) + 0,50	(H/10) + 0,70
Béton	F = 500daN		
Métal	F >500daN	(H/20 + 1,30	(H/20) + 1,50

Vérification de la tenue des supports

Dimensions des massifs :

Hauteur (m) Effort (daN)	8	9	10,50	12	13	14
	Dimensions (a*b)					
150	0,60*0,60	0,60*0,60				
300	0,60*0,60	0,60*0,60	0,60*0,60	0,60*0,60	0,70*0,70	0,70*0,70
500	0,75*0,75	0,75*0,75	0,70*0,70	0,70*0,70	0,70*0,70	0,70*0,70
700	0,95*0,95	0,95*0,95	0,90*0,90			
800				0,90*0,90	0,90*0,90	0,90*0,90
1000			1,10*1,10	1,10*1,10	1,10*1,10	1,10*1,10
1500			1,40*1,40	1,40*1,40	1,40*1,40	1,40*1,40

Volume des massifs :

Hauteur (m) Effort (daN)	8	9	10,50	12	13	14
	Volume des massifs					
150	(*)	(*)				
300	0,49	0,52	,058	,060	,089	0,93
500	0,8	0,86	0,83	0,87	0,89	0,93
700	1,33	1,42	1,86			
800				2,01	2,11	2,21
1000			2,16	2,31	2,41	2,51
1500			3,57	3,83	3,99	4,18

(*) Calé à la pierre sèche :

Vérification de la tenue des supports

**Effort vertical dû à un conducteur
portées de niveau :**

$$P = P \frac{[a_1 + a_2]}{2} \quad P : \text{poids d'un mètre de câble}$$

- Avec portées dénivelées $d/a < 1/4$

$$P = p \frac{[a_1 + a_2]}{2} + T \left[\pm \frac{h_1}{a_1} \pm \frac{h_2}{a_2} \right]$$

T = Tension mécanique en daN pour un conducteur dans l'hypothèse considérée.

h_1 et d_2 = dénivellations, en m, dans les portées a_1 et a_2 .

Vérification de la tenue des supports

Retournement des chaînes :

☞ Il y'a risque de retournement des chaînes lorsque dans le cas le plus défavorable : -5°C avec vent de 120 Pa dans la zone 1 ou -15°C avec vent de 180 Pa dans la zone 2, la chaînette correspondant à cette hypothèse appuyée sur les sommets des supports encadrant le support étudié passe en dessus du sommet de ce dernier.

☞ Dans ce cas divers dispositions peuvent être adoptées pour éviter le retournement des chaînes :

- Soit en envisageant un autre lieu d'implantation du support.
- Soit en surélevant le support.
- Soit en ancrant la ligne sur le support considéré
- Soit enfin lorsqu'il n'existe pas d'autre solution satisfaisante, en utilisant des contrepoids.

Vérification de la tenue des supports

Distances à la masse :

Les distances à la masse des pièces sous tension à respecter sont les suivant :

* 25 cm à 25°C sans vent pour la zone 1

à 20°C sans vent pour la zone 2

* 15 cm avec les hypothèses de retournement et d'inclinaison des

chaînes.

- Calcul du contrepoids :

Avant d'opter pour l'utilisation des contrepoids on compare l'inclinaison des chaînes par rapport à l'angle d'inclinaison maximum toléré pour type d'armement adopté :

$$\text{tg } \alpha < h/q$$

avec h = Effort transversal sur une phase en daN

q = Effort vertical sur une phase en daN

C_p = Poids du contrepoids en daN

$$C_p \geq (h / \text{tg} \alpha) - q$$

N.B : L'inclinaison des chaînes doit être vérifiée à :

25°C et vent de 240 Pa pour la zone 1

20°C et vent de 240 Pa pour la zone 2

Vérification de la tenue des supports

Stabilité des supports :

Le moment stabilisant du support est calculé par la formule d'ANDREE et NORSA suivante :

$$M_s = \frac{Pa}{2} - \frac{2p}{3bq} + \frac{b^2q^2h_o^3}{82P}$$

M_s : Moment de stabilité en m.daN

P : est la charge verticale en daN : poids du support plus massif (2200 kg/m³)

a : côte du massif parallèle au sens de l'effort appliqué

b : côte du massif perpendiculaire au sens de l'effort appliqué

q : coefficient dépendant de la nature du sol

h_o : profondeur de la fouille

Le moment de renversement d'un support est défini par :

$$M_r = N(H-0,25)$$

Avec N : Effort nominal du support + vent
 H : Hauteur total du support

Le coefficient de stabilité est :

$$K = \frac{M_s}{M_r}$$

K doit être supérieur à 1

N.B $k=1,2$ pour les poteaux simples

$k= 1,75$ pour les poteaux importants des lignes et pour les supports de traversée

Vérification de la tenue des supports

Stabilité des supports :

Le moment stabilisant du support est calculé par la formule d'ANDREE et NORSA suivante :

$$M_s = \frac{Pa}{2} - \frac{2p}{3bq} + \frac{b^2q^2h_o^3}{82P}$$

M_s : Moment de stabilité en m.daN

P : est la charge verticale en daN : poids du support plus massif (2200 kg/m³)

a : côte du massif parallèle au sens de l'effort appliqué

b : côte du massif perpendiculaire au sens de l'effort appliqué

q : coefficient dépendant de la nature du sol

h_o : profondeur de la fouille

Le moment de renversement d'un support est défini par :

$$M_r = N(H-0,25)$$

Avec N : Effort nominal du support + vent
 H : Hauteur total du support

Le coefficient de stabilité est :

$$K = \frac{M_s}{M_r}$$

K doit être supérieur à 1

N.B $k=1,2$ pour les poteaux simples

$k= 1,75$ pour les poteaux importants des lignes et pour les supports de traversée

Choix des supports en BT :

Effort des supports :

Dans le cadre de l'optimisation des coûts, notre Direction a opté pour la généralisation de l'utilisation des poteaux de 8m et 9m avec l'inclusion des supports en Béton Armé d 150 daN calés à la pierre sèche, tout en utilisant les différent supports dans leurs limites d'élasticités :

	BA 150daN	BA 300daN	BA 500daN	BA 700daN
Angle en Grades	$a = 25$	$25 < a = 45$	$45 < a = 75$	$75 < a = 100$

Pour les supports d'arrêts ou de dérivation prévoir des supports en BA de 500 daN ou X/C pour les poteaux bois.

Vérification de la tenue des supports

Choix du type :

- > En terrain normal on utilise les poteaux en Béton Armé
- > Pour les terrains montagneux, accidentés, ou non accessibles l'utilisation des poteaux bois est conseillée :
 - Poteau bois simple S/C en alignement et angle souple
 - Poteau bois contrefiché ou jumelé en angle, en arrêt ou en dérivation.

Choix de la hauteur :

- 8m en terrain normal
- 9m en traversée

Tenue des pylônes THT

- Le Calcul des efforts résultants sur les barres les plus sollicitées sont déterminés par l'utilisation de la matrice unitaire des pylônes.
- L'effort résultant déterminé sera comparé à l'effort admissible de chaque barre.
- Le taux de travail = Effort résultant/ effort admissible doit être inférieur à 1 pour l'hypothèse la plus contraignante.

***PARTIE III - LES ISOLATEURS ET LEURS
ACCESSOIRES***

***PARTIE IV – ETUDE ET REALISATION D’UN
PROJET DE CONSTRUCTION DE LIGNES***