

CHAPITRE 1: REGLES DE CALCUL MECANIQUE

Sommaire

1.1	GENERALITES	13
1.2	HYPOTHESES DE CALCUL DES OUVRAGES	13
1.2.1	HYPOTHESES ADMINISTRATIVES	15
1.2.1.1	HYPOTHESES METEOROLOGIQUES	15
1.2.1.1.1	Hypothèse de vent (Hypothèse A)	15
1.2.1.1.2	Hypothèse de froid (Hypothèse B)	17
1.2.1.1.3	Hypothèses de givre	17
1.2.1.2	HYPOTHESE CONCERNANT LES SUPPORTS DE TRAVERSEE DE VOIE FERREE	17
1.2.2	HYPOTHESES PROPRES A L'ONE	19
1.2.2.1	HYPOTHESES METEOROLOGIQUES	19
1.2.2.1.1	Hypothèse de haute pression de vent (HPV)	19
1.2.2.1.2	Hypothèse E.D.S (vibrations)	21
1.2.2.1.3	Hypothèses de givre	21
1.2.2.2	HYPOTHESES DE CONCEPTION	23
1.2.2.2.1	Hypothèse de torsion (rupture)	23
1.2.2.2.2	Hypothèse anti-cascade	23
1.2.2.2.3	Hypothèses de construction et d'entretien des ouvrages	25
1.2.2.2.4	Hypothèse de court-circuit	31
1.2.3	RECAPITULATIF DES HYPOTHESES	33
1.3	CONDITIONS DE RESISTANCE MECANIQUE A RESPECTER DANS LES PROJETS	35
1.3.1	CONDITIONS D'EFFORT MAXIMAL ADMISSIBLE	35
1.3.2	CONDITIONS DE CONTRAINTE MAXIMALE ADMISSIBLE	35
1.3.3	CONDITIONS DE STABILITE DES MASSIFS DE FONDATION	37
1.3.3.1	STABILITE DES MASSIFS	37
1.3.3.2	PRESSION MAXIMALE ADMISSIBLE	37
1.3.4	CONDITIONS D'UTILISATION DES POTEAUX EN BETON ARME	37
1.3.5	RECAPITULATIF DES CONDITIONS A RESPECTER	41
1.4	PARAMETRES	43
1.4.1	DEFINITIONS	43
1.4.2	PARAMETRE DE REPARTITION	43
1.4.3	PARAMETRE DE REGLAGE DES CABLES	43

1.4.4	PARAMETRE DE REFERENCE	45
1.4.4.1	PARAMETRE DE REFERENCE DES CABLES CONDUCTEURS	45
1.4.4.2	PARAMETRE DE REFERENCE DES CABLES DE GARDE	45
1.5	METHODE DE CALCUL ET DE VERIFICATION	47
1.5.1	CHOIX ET JUSTIFICATION DES CABLES	47
1.5.1.1	CHOIX DES CABLES	47
1.5.1.2	JUSTIFICATION DE LA RESISTANCE MECANIQUE DES CABLES	47
1.5.2	VERIFICATION DE LA RESISTANCE MECANIQUE DU MATERIEL .	47
1.5.3	VERIFICATION DES SUPPORTS	49
1.5.4	DETERMINATION A PRIORI DES MASSIFS DE FONDATION	51

1.1 GENERALITES

La résistance mécanique d'un ouvrage et, par conséquent, sa sécurité en service, est définie par le coefficient de sécurité qui est égal au rapport des efforts entraînant la ruine de cet ouvrage aux efforts de service.

Les efforts entraînant la ruine de l'ouvrage ou l'un quelconque de ces éléments sont des efforts qui produisent une dégradation irréversible des matériaux ou matériels concernés (déformation, rupture, perte de caractéristiques).

Les efforts de services résultent des charges suivantes :

- charges permanentes,
- charges dues au vent, à la température, au givre,
- charges apparaissant lors de la construction, l'entretien et l'exploitation de la ligne.

La valeur adoptée pour le coefficient de sécurité dépend :

- des hypothèses climatiques et de charge, en tenant compte de la probabilité d'apparition de ces hypothèses,
- des matériaux et matériels employés pour lesquels les critères de ruine peuvent avoir des définitions différentes.

Les valeurs minimales de ce coefficient sont définies par l'Arrêté Technique du 15 mars 1963 et par les présentes Directives L.H.T.

Les caractéristiques des hypothèses de calcul retenues pour le calcul mécanique des Lignes Aériennes, les coefficients de sécurité associés, ainsi que les conditions de résistance mécanique à respecter dans les projets sont définies dans les paragraphes "HYPOTHESES DE CALCUL DES OUVRAGES" et "CONDITIONS DE RESISTANCE MECANIQUE A RESPECTER DANS LES PROJETS" du présent chapitre .

1.2 HYPOTHESES DE CALCUL DES OUVRAGES

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

- les 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

- Les hypothèses propre à L'OFFICE NATIONAL DE L'ELECTRICITE 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.

Paragraphe 1.2.1.1 : HYPOTHESES METEOROLOGIQUES

La direction du vent est prise transversale (perpendiculaire) à la ligne pour dimensionner l'ouvrage dans le cas le plus défavorable.

Paragraphe 1.2.1.1.1 : HYPOTHESE DE VENT (HYPOTHESE A)

- Diamètre des supports ou éléments de support à section circulaire :

Le diamètre limite de 20,83 cm considéré pour les supports ou éléments de support à section circulaire se déduit des dispositions de l'article 6 de l'Arrêté Technique du 15 mars 1963, soit :

$$48 \times d \leq 10 \text{ d'où } d \leq 0,2083 \text{ m}$$

$$\text{soit: } d \leq 20,83 \text{ cm}$$

Relation vitesse - pression du vent :

La relation entre la vitesse et la pression du vent dépend de plusieurs facteurs (rugosité du terrain, altitude, site, forme) et est déterminée à partir de la publication C.E.I. 826.

A titre indicatif, on peut envisager la relation vitesse - pression, à partir de la formule approchée suivante :

$$P = C_x \frac{V^2}{1,63}$$

P : pression du vent en Pa

V : vitesse du vent en m/s

C_x : coefficient de trainée

1,63: coefficient tenant compte des unités utilisées (cf. Neige et Vents 65, édition EYROLLES).

Pour les éléments plans : $C_x = 1,6$

Pour les câbles : $C_x = 1,6 \times 0,6 \times 2/3$ (vent considéré sur les 2/3 de la portée)

1.2.1 HYPOTHESES ADMINISTRATIVES

1.2.1.1 HYPOTHESES METEOROLOGIQUES

Les hypothèses météorologiques utilisées pour évaluer les efforts appliqués aux éléments de la ligne pour en vérifier la tenue mécanique sont :

- l'hypothèse de vent,
- l'hypothèse de froid,
- les hypothèses de givre.

D'une manière générale, les efforts exercés par le vent transversal à la ligne dans chacune de ces hypothèses sont déterminés en multipliant les pressions indiquées par la surface offerte au vent :

- des cornières ou des éléments plans,
- des surfaces diamétrales pour les câbles chargés ou non de givre (manchon) et pour les éléments à section circulaire ou de révolution.

NOTA: Pour les lignes en faisceau, la pression du vent doit être appliquée intégralement sur chacun des câbles de la phase.

1.2.1.1.1 HYPOTHÈSE DE VENT (HYPOTHÈSE A)

La vérification de la résistance mécanique de l'ouvrage dans cette hypothèse est imposée par l'article 6 de l'Arrêté Technique du 15 Mars 1963.

Les caractéristiques de l'hypothèse A sont les suivantes :

	A
TEMPERATURE DES CABLES (°C)	+ 25
<u>Pression du vent</u> (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.

1.2.1.1.2 HYPOTHÈSE DE FROID (HYPOTHÈSE B)

La vérification de la résistance mécanique de l'ouvrage dans cette hypothèse est imposée par l'article 6 de l'Arrêté Technique du 15 mars 1963 .

Les caractéristiques de l'hypothèse B sont les suivantes :

	B
TEMPERATURE DES CABLES (°C)	-5
<u>Pression du vent (Pa) sur :</u>	
- Les éléments plans des supports	300
- Les câbles conducteurs et de garde	180
- Les supports ou éléments de supports à section circulaire (quel que soit leur 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.

1.2.1.1.3 HYPOTHÈSES DE GIVRE

Ces hypothèses de vérification, recommandées par l'Arrêté Technique du 15 Mars 1963 (article 6) sont propres à l'O.N.E. et sont définies dans le FASCICULE GIVRE joint en annexe aux présentes Directives L.H.T.

1.2.1.2 HYPOTHESE CONCERNANT LES SUPPORTS DE TRAVERSEE DE VOIE FERREE

La vérification de la résistance mécanique de l'ouvrage aux traversées de voies ferrées est imposée par les articles 21 et 22 de l'Arrêté Technique du 15 mars 1963.

"Les supports de la ligne placés de part et d'autre de la traversée doivent être implantés à une distance de la voie ferrée telle qu'en cas de chute d'un support dans une direction quelconque, celui-ci ne risque pas d'engager le gabarit de circulation".

Dans cette situation, la résistance mécanique de l'ouvrage à la traversée, doit être vérifiée dans les hypothèses considérées pour l'ensemble de l'ouvrage.

Dans le cas où les supports sont susceptibles d'engager le gabarit cinématique de la voie en cas de chute, un calcul supplémentaire doit être effectué dans l'hypothèse de rupture de tous les conducteurs placés d'un même côté de la portée de traversée (portée contigue).

Les conditions climatiques les plus défavorable pour cette hypothèse de rupture correspondent à l'hypothèse A dont les caractéristiques sont les suivantes. :

	A
TEMPERATURE DES CABLES (°C)	+ 25
<u>Pression du vent</u> (Pa) sur :	
- Les éléments plans des supports	1200
- Les câbles conducteurs et de garde	480
- Les supports ou éléments de support à section circulaire de :	
.diamètre > 20,83 cm	480
.diamètre ≤ 20,83 cm	720

1.2.2 HYPOTHESES PROPRES A L'ONE

Ces hypothèses ont pour buts de :

- préciser les conditions énoncées par l'Arrêté Technique du 15 mars 1963 (vent) ,
- compléter les recommandations de cet Arrêté (givre) ,
- préciser les conditions de conception des éléments de l'ouvrage (conception pylônes,entretien,fondations) .

1.2.2.1 HYPOTHESES METEOROLOGIQUES

1.2.2.1.1 HYPOTHÈSE DE HAUTE PRESSION DE VENT (HPV)

Cette hypothèse de calcul, propre à l'O.N.E., doit être utilisée lorsque les efforts appliqués aux matériels peuvent être supérieurs à ceux dus aux pressions de vent de l'hypothèse A .

Elle doit être prise en compte pour le calcul des lignes se trouvant dans les situations exceptionnelles suivantes :

- Dans certaines zones soumises couramment à des vents violents supérieurs à celui de l'hypothèse A ,
- Dans certains sites particulièrement exposés , tels que les arêtes montagneuses séparant deux vallées importantes.

COMMENTAIRES

paragraphe 1.2.2.1.1 : HYPOTHESE DE HAUTE PRESSION DU VENT (HPV)

Les caractéristiques adoptées provisoirement pour cette hypothèse sont celles d'E.D.F (janvier 1988) .

Une note technique sera établie à partir des statistiques reçues des Services de la Météorologie Nationale et qui semblent, a priori, corroborer celles présentées par E.D.F.

Les caractéristiques de l'hypothèse HPV sont les suivantes :

	HPV
TEMPERATURE DES CABLES (°C)	+ 25
Pression du vent (Pa) sur :	
- Les éléments plans des supports	2400
- Les câbles conducteurs et de garde	720
- Les supports ou éléments de support à section circulaire :	
.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 approximativement par un vent de 180 km/h (50 m/s) environ .

1.2.2.1.2 HYPOTHÈSE E.D.S (VIBRATIONS)

l'hypothèse EDS (Every Day Stress) doit être respectée dans le choix du paramètre des câbles (cf chapitre Câbles 2ème partie des Directives LHT) 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
TEMPERATURE DES CABLES (°C)	+ 25
PRESSION DU VENT (Pa)	0

1.2.2.1.3 HYPOTHÈSES DE GIVRE

Les hypothèses de givre sont définies dans le FASCICULE GIVRE joint en annexe 1 aux présentes Directives LHT

1.2.2.2 HYPOTHESES DE CONCEPTION

Ces hypothèses sont imposées par l'ONE pour le calcul de conception des familles de pylônes.

Sauf cas particuliers, le Maître d'Oeuvre n'a pas à en tenir compte dans l'étude d'une ligne .

1.2.2.2.1 HYPOTHÈSE DE TORSION (RUPTURE)

Cette hypothèse définit pour les supports une résistance minimale à la torsion pour :

- limiter la propagation des avaries de supports en cas de rupture d'un câble ou d'un manchon de jonction ou d'ancrage,
- supporter la dissymétrie dans le sens de la ligne provoquée par des charges inégales de givre ou de neige sur les câbles de l'ouvrage. (cf. FASCICULE GIVRE) .

Elle consiste à appliquer successivement, à chaque point d'accrochage, l'effort statique qui y apparaîtrait en hypothèse A dans le cas de la rupture, dans la portée contigue, du câble qui y est fixé. Cette application est faite à chaque point d'accrochage , le cas le plus défavorable étant seul retenu .

Dans le cas d'un faisceau , on n'envisage la rupture que d'un seul câble.

L'effort est déterminé en tenant compte de la détente résultant de l'inclinaison de la chaîne .Toutefois la valeur maximale de cet effort est limitée à la tenue maximale de l'élément fusible s'il existe (pince à glissement , consoles rabattables) .

On tient compte de cette hypothèse au moment de l'établissement d'un nouveau type de support pour l'utilisation la plus courante , c'est à dire :

- conditions météorologiques de l'hypothèse A,
- câbles et paramètres usuels, pour la famille de pylônes considérée ,
- portée courante ,
- dénivellation courante ,
- angle usuel pour le type de pylône.

Il en résulte que l'hypothèse de torsion est approximativement respectée pour les différentes utilisations du support et que le Maître d'Oeuvre est dispensé de toute vérification lors de l'établissement d'un projet de ligne .

En ce qui concerne les fondations, l'hypothèse de torsion conduit à un dimensionnement minimal des massifs.

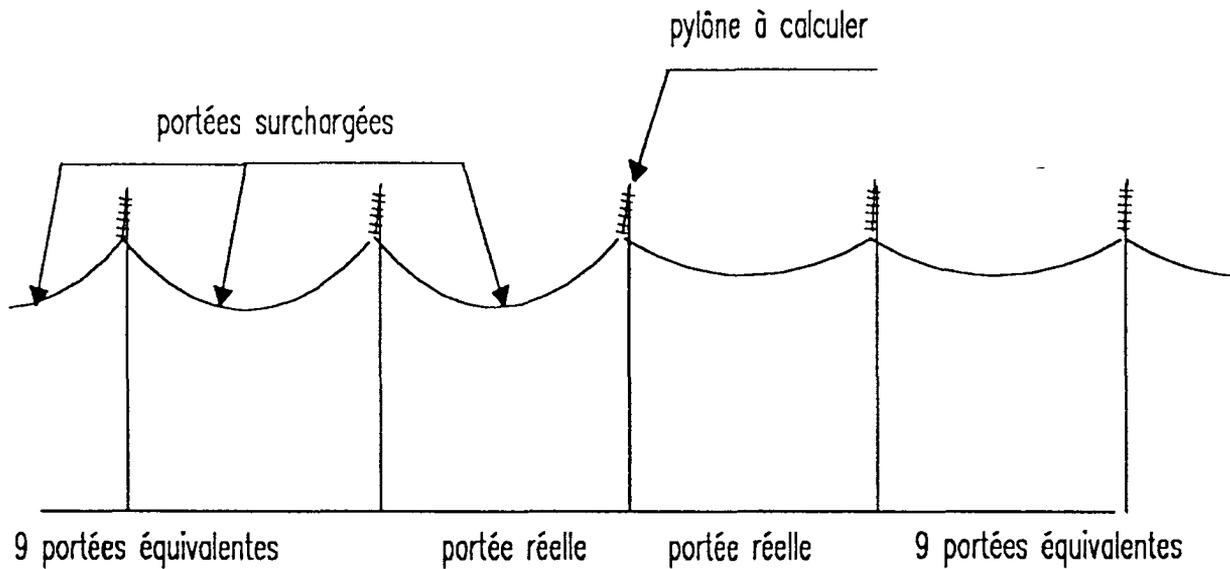
1.2.2.2.2 HYPOTHÈSE ANTI-CASCADE

Cette hypothèse permet de calculer pour les supports une résistance minimale à la ruine et doit être prise en compte lors de la conception des familles de supports qui ne sont pas vérifiés en hypothèses de givre dissymétrique (cf FASCICULE GIVRE) .

COMMENTAIRES

paragraphe 1.2.2.2 : HYPOTHESE ANTI-CASCADE

Comme pour le givre dissymétrique (cf FASCICULE GIVRE) , le calcul utilise le système suivant:



paragraphe 1.2.2.3 : HYPOTHESES DE CONSTRUCTION ET D'ENTRETIEN DES OUVRAGES

Les cas de figure envisagés sont les plus défavorables pour les supports. Le ou les autres cas de figure possible sont moins contraignants.

L'hypothèse anti-cascade est définie dans la publication CEI 826. Elle consiste à appliquer d'un côté du support une surcharge fictive égale au poids propre des conducteurs dans toutes les portées situées du même côté .

L'effort est déterminé en tenant compte de la détente résultant de l'inclinaison des chaînes .Toutefois la valeur maximale de cet effort est limitée à la tenue maximale de l'élément fusible s'il existe (pince à glissement , consoles rabattables).

On tient compte de cette hypothèse au moment de l'établissement d'un nouveau type de support pour l'utilisation la plus courante , c'est à dire :

- Condition météorologique de l'hypothèse A,
- Câbles et paramètres usuels, pour la famille de pylônes considérée ,
- Portée courante ,
- Angle usuel pour le type de pylône.

Il en résulte que l'hypothèse anti-cascade est approximativement respectée pour les différentes utilisations du support et que le projeteur est dispensé de toute vérification lors de l'établissement d'un projet de ligne .

Par contre , les fondations qui peuvent être dimensionnées par cette hypothèse sont indiquées pour chaque type de support et constituent un dimensionnement minimal . Le Maître d'Oeuvre doit, par conséquent, vérifier lors de l'établissement du projet de ligne que les massifs de fondation sont au moins égaux ou supérieurs à ceux donnés par l'hypothèse anti-cascade .

1.2.2.2.3 HYPOTHÈSES DE CONSTRUCTION ET D'ENTRETIEN DES OUVRAGES

Au cours des travaux de construction ou d'entretien, les pylônes doivent supporter des efforts exceptionnels, variables suivant les modes opératoires utilisés. Il est nécessaire de définir, par des hypothèses appropriées, les efforts qui doivent être pris en compte au moment de l'étude d'un nouveau type de support. Les modes opératoires à mettre en oeuvre sur les chantiers doivent être établis de façon à ce que ces efforts ne soient pas dépassés.

Les conditions météorologiques à retenir dans ces hypothèses sont les suivantes (conditions normales de travail) :

- température des câbles : + 25°C,
- absence de vent.

Les cas de charge à retenir pour le calcul des supports sont les suivants :

- décrochage d'un ou plusieurs conducteurs (en faisceau ou non), sur un support en suspension ,
- haubanage d'un ou plusieurs câbles (câbles de garde ou conducteurs).

a - décrochage d'une ou de deux phases (en faisceau ou non) sur un support de suspension (fig. 1 et 2).

Pour les pylônes nappe horizontale ou chat , on suppose qu'un ou deux conducteurs (ou faisceaux de conducteurs) n'ont pas été mis en place ou sont décrochés .

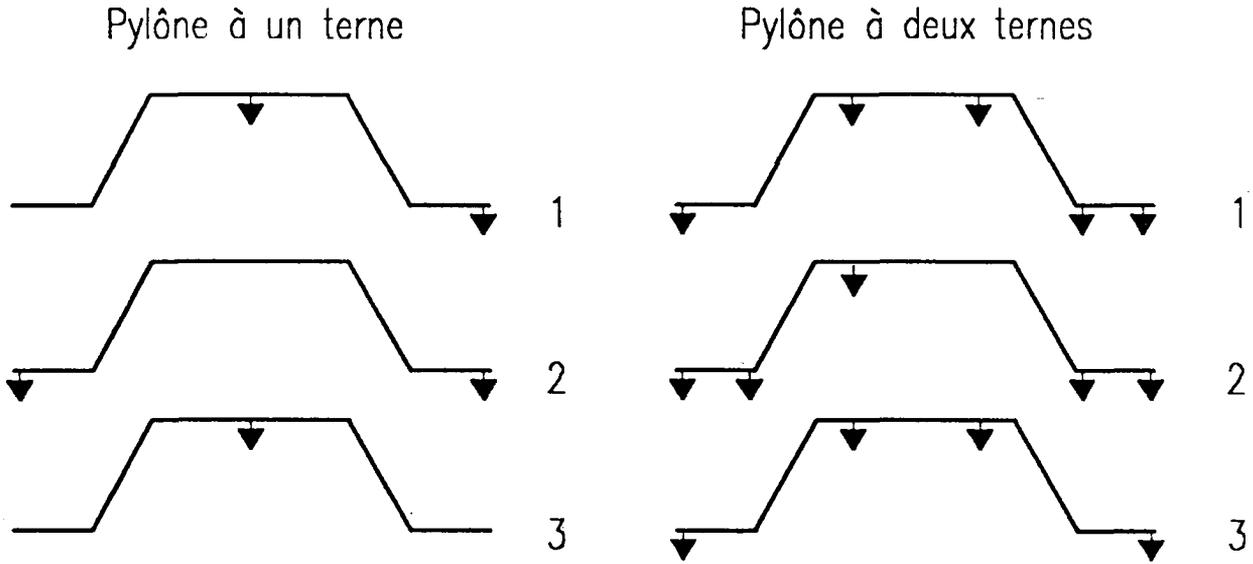


Fig 1 : Cas de support en nappe horizontale .

Pour les pylônes armés en triangle ,ou double drapeau , on suppose qu'une seule phase n'a pas été mise en place .

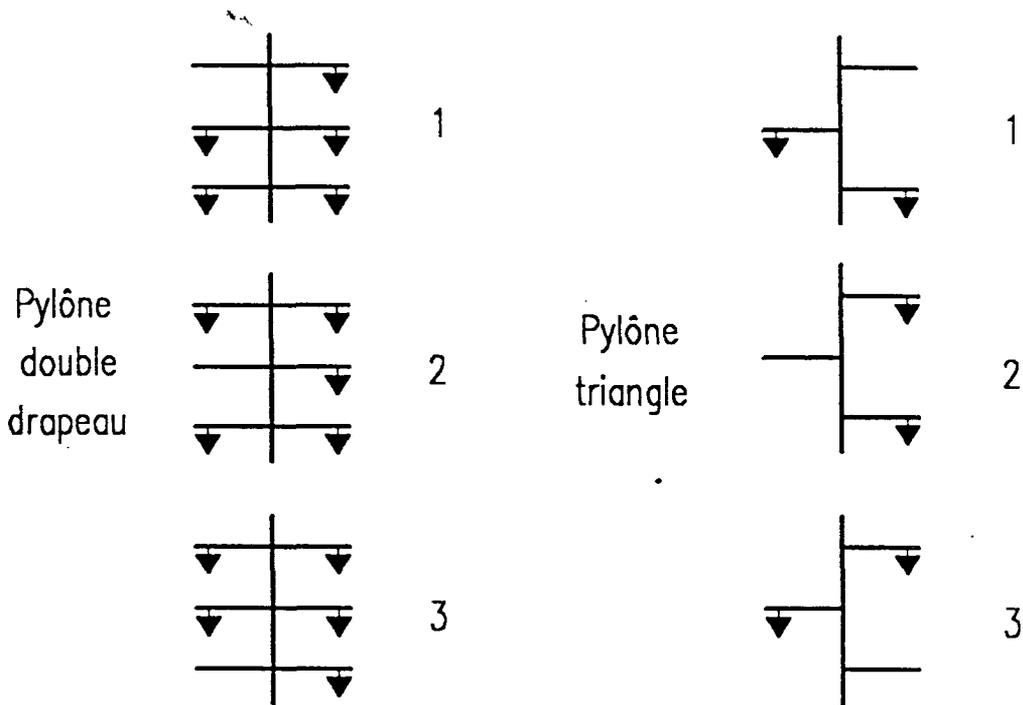


Fig 2 : Cas de support en triangle ou double drapeau .

Le cas le plus défavorable est retenu .

b - Haubanage d'un câble conducteur ou de garde (Fig 3 et 4)

On suppose qu'un câble conducteur ou de garde est retenu par un hauban ancré au sol .

Les conditions particulières du haubanage sont les suivantes :

- La détente admise correspond à une inclinaison longitudinale de 10° de la chaîne de suspension d'un conducteur ; elle est supposée nulle pour un câble de garde ,

- La pente du hauban tangente β est égale à :

1/3 pour le type le plus léger de la famille de pylônes .

1/2 pour les autres types de pylônes .

- La dénivellation de la portée précédant le haubanage est égale à :

$$\frac{h_1}{a_1} = + 0,05 \text{ pour le type le plus léger de la série .}$$

$$\frac{h_1}{a_1} = + 0,10 \text{ pour les autres types de la série .}$$

- La dénivellation de la portée succédant au haubanage est considérée nulle

$$\frac{h_2}{a_2} = 0$$

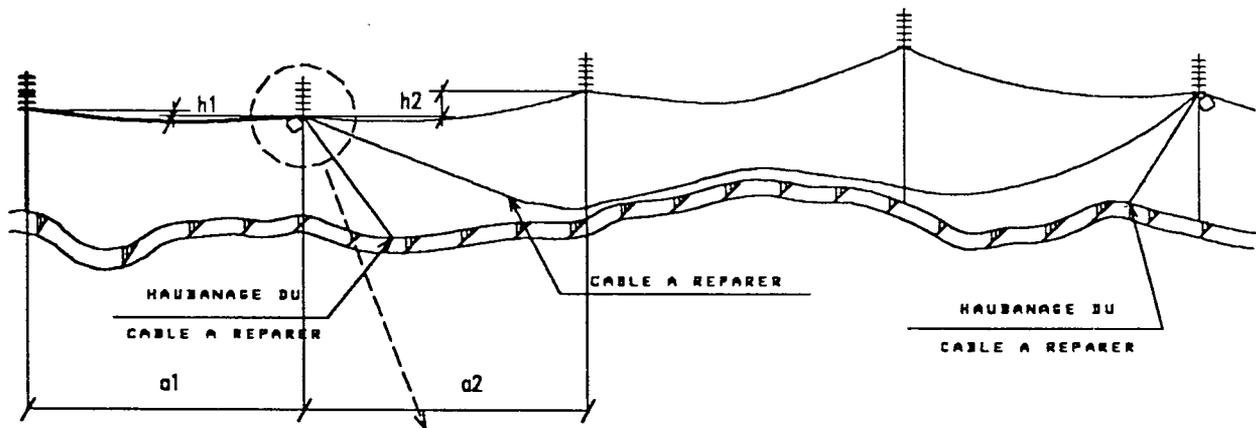


fig 3 : Haubanage du câble .

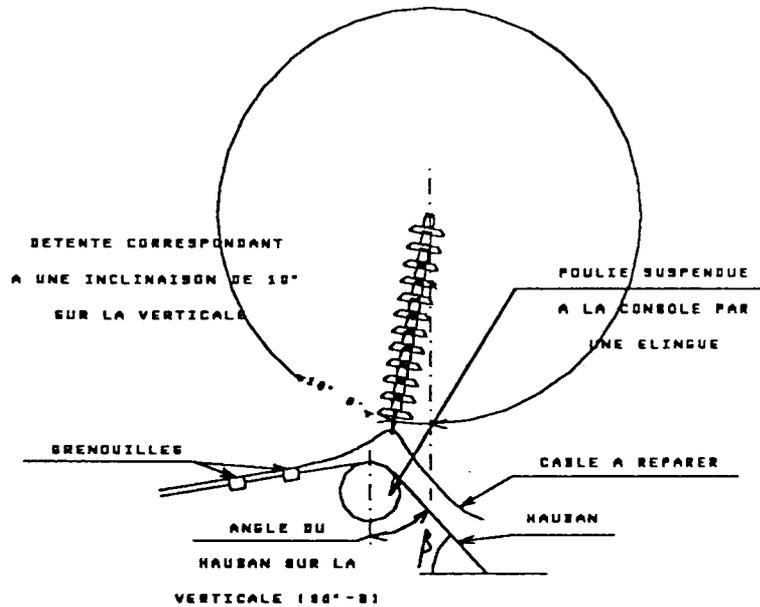


fig 4 : Haubanage du câble (détail) .

c-Haubanage de la totalité des câbles

On suppose que tous les câbles supportés par le pylône sont retenus par des haubans ancrés au sol .

Les conditions sont les mêmes que précédemment . Cependant , la pente du hauban est égale à 1/3 dans tous les cas .

d-Montage des supports (escalade)

On applique au milieu de toutes les barres , autres que les membrures , une force verticale de 100 daN correspondant au poids d'un monteur et de son outillage . Cette force s'ajoute aux efforts normaux supportés par le pylône dans les conditions météorologiques de l'hypothèse considérée .

1.2.2.2.4 HYPOTHÈSE DE COURT-CIRCUIT

Compte tenu du niveau du courant de court-circuit dans le réseau de l'ONE (moins de 40kA),l'hypothèse de court-circuit n'est pas prise en compte dans le dimensionnement des support.

1.2.3 RECAPITULATIF DES HYPOTHESES

		Pression du vent en Pa					
		Température en degré celsius	Surfaces planes	Sections cylindriques		Câbles	
				$\phi \leq 20,83\text{cm}$	$\phi > 20,83\text{cm}$		
HYPOTHESES ADMINISTRATIVES	météorologiques	A	+ 25	1200	720	480	480
		B	-5	300	300	180	180
	Givre	Recommandées (cf FASCICULE GIVRE)					
Arrêté Technique du 15-3-63	Traversée voie ferrée	TVF	+ 25	1200	720	480	480
HYPOTHESES PROPRES	météorologiques	HPV	+ 25	2400	960	720	180
		EDS	+ 25	0	B	B	0
	Givre	Voir FASCICULE GIVRE joint en annexe 1					
A L'O.N.E	Conception	Torsion (rupture)	+ 25	1200	720	480	480
		Anti-cascade	+ 25	1200	720	480	480
		Montage (Esaclade)	+ 25	0	0	0	0
		Construction et entretien	+ 25	0	0	0	0
		court- circuit	Pour mémoire (applicable pour ICC > 40kA)				

Paragraphe 1.3.1 : CONDITIONS D'EFFORT MAXIMAL ADMISSIBLE

L'effort maximal admissible est obtenu à partir de la charge de rupture nominale (CRN) garantie par le fournisseur.

Pour les câbles, en hypothèse de givre, la CRN divisée par le coefficient de sécurité pourrait être remplacée par la charge maximale admissible (CMA).

Bien que non garantie par le fournisseur, la CMA qui est obtenue par essais, correspond à la limite élastique dont l'utilisation est plus significative.

Elle pourrait être utilisée ultérieurement dans les calculs des câbles par l'ONE.

paragraphe 1.3.2 : CONDITIONS DE CONTRAINTE MAXIMALE ADMISSIBLE

Pour les aciers, contrairement aux autres matériaux intervenant dans la construction des éléments de la ligne, la distinction doit être faite entre les domaines de déformation suivant l'hypothèse considérée.

- Hypothèses normales : l'acier travaille dans le domaine élastique et la CMA correspond à la contrainte de rupture minimale divisée par le coefficient 3.

Cette contrainte de rupture minimale n'est pas garantie par le fournisseur.

- Hypothèses exceptionnelles : l'acier travaille à la limite élastique et la CMA correspond à la contrainte de limite élastique minimale (Rem).

Cette Rem est garantie par le fournisseur.

1.3 CONDITIONS DE RESISTANCE MECANIQUE A RESPECTER DANS LES PROJETS

Les conditions à respecter pour assurer la tenue mécanique des ouvrages résultent des prescriptions de l'Arrêté Technique du 15 mars 1963 et des spécifications propres à l'O.N.E.

Ces conditions concernent les matériaux et les matériels constituant les ouvrages, et sont définies pour des cas de vérification caractérisés par les états de chargement des structures, la nature des charges appliquées et les conditions climatiques.

Les conditions à respecter sont de trois types, selon les matériaux et matériels considérés :

- les conditions d'effort maximal admissible
- les conditions de contrainte maximale admissible
- les conditions de stabilité des massifs de fondation et de pression admissible en fond de fouille.

1.3.1 CONDITIONS D'EFFORT MAXIMAL ADMISSIBLE

L'effort maximal admissible dans une hypothèse donnée est défini par l'effort entraînant la ruine d'une structure (charge de rupture nominale) divisé par le coefficient de sécurité propre à cette hypothèse.

Dans ce cas, les calculs justificatifs doivent montrer que les charges de service restent inférieures à cet effort maximal admissible.

Ces conditions concernent :

- les câbles,
- les manchons de jonction
- les manchons d'ancrage
- le matériel d'équipement
- les supports en béton.

1.3.2 CONDITIONS DE CONTRAINTE MAXIMALE ADMISSIBLE

La contrainte maximale admissible (CMA) est définie par la limite élastique minimale garantie ou la rupture, du matériau divisée par le coefficient de sécurité dans l'hypothèse de vérification considérée.

Dans ce cas, les calculs justificatifs doivent montrer que les contraintes dues aux charges de service restent inférieures à cette contrainte maximale admissible.

Ces conditions concernent les structures métalliques réalisées en "matériaux à limite d'élasticité minimale garantie" :

- les supports métalliques,
- les éléments métalliques des fondations (embases, ferrailage).

1.3.3 CONDITIONS DE STABILITE DES MASSIFS DE FONDATION ET DE PRESSION MAXIMALE ADMISSIBLE EN FOND DE FOUILLES

Les massifs de fondation doivent respecter simultanément :

- une condition de stabilité,
- une condition de pression admissible en fond de fouille.

1.3.3.1 STABILITE DES MASSIFS

La stabilité des massifs sous les efforts d'arrachement, ou de renversement, est définie par le coefficient de stabilité de l'hypothèse de vérification considérée.

Le coefficient de stabilité est le rapport des efforts d'arrachement (ou de renversement) exercés sur le massif aux efforts stabilisants dus aux dimensions de ce massif et aux caractéristiques du sol.

Les calculs justificatifs doivent montrer que les charges de service conduisent à une stabilité supérieure à celle du coefficient de stabilité minimal de l'hypothèse de vérification considérée.

1.3.3.2 PRESSION MAXIMALE ADMISSIBLE

La contrainte de compression maximale en fond de fouille doit être inférieure à la pression maximale admissible du sol considéré.

Les calculs justificatifs doivent montrer que la contrainte due aux charges de service reste inférieure à cette pression maximale admissible.

1.3.4 CONDITIONS D'UTILISATION DES POTEAUX EN BETON ARME

Pour les lignes de deuxième et troisième catégories, le coefficient de sécurité doit être au moins égal à 3 conformément aux articles 41 et 48 de l'Arrêté Technique.

Ce coefficient représente le rapport de l'effort de rupture d'un élément, à l'effort qu'il subit dans les différentes hypothèses de charge.

Pour les supports en béton armé, on considère séparément, la résistance mécanique de l'acier et du béton (cf article 6 de l'Arrêté Technique).

Par ailleurs, la norme Marocaine NM n° 7-67-200 relative aux poteaux en béton armé, précise que le coefficient global de sécurité de ces supports doit être au moins égal à 2,1.

Elle précise également que l'effort T tenant compte de l'effort nominal F et l'effort du vent sur le poteau (hypothèse A), appliqué à celui-ci, doit mettre en évidence les coefficients de sécurité suivants, lors des essais des poteaux en béton armé:

$$1) \frac{E}{T} = 1,65$$

E : charge correspondant à la limite élastique du poteau en béton (limite élastique des aciers) telle que définie dans le paragraphe 4.4.1 de la NM 7-67-200

$$2) \frac{R}{T} = 2,10$$

R : Charge de rupture du poteau en béton (désagrégation)

Par conséquent, les efforts nominaux (F) des poteaux en béton de classe B, normalisés sur les ouvrages 60kV, sont donc déterminés avec les coefficients de sécurité indiqués ci-avant .

- Dans les hypothèses de charge normales (A,B,montage,construction,entretien et TVF n'engageant pas le gabarit cinématique de la voie), l'effort T ne doit pas dépasser R/2,1 .

$$R = 2,1T$$

- Dans les hypothèses exceptionnelles (givre,torsion,anti-cascade), la vérification de la résistance mécanique du poteau sera faite à la limite élastique de celui-ci est l'effort E ne doit pas dépasser : $E = 1,65 T$ soit:

$$R = 1,27E$$

- Dans l'hypothèse HPV , l'effort nominal F (efforts disponibles en tête), doit être recalculé pour tenir compte des pressions de vent de cette hypothèse et pour respecter l'effort maximal T qui ne doit pas dépasser R/2,1 .

NOTA: Dans l'hypothèse TVF avec engagement du gabarit cinématique de la voie, les poteaux en béton de classe B ne sont pas utilisés .

COMMENTAIRES

Paragraphe 1.3.5 : TABLEAU RECAPITULATIF DES CONDITIONS A RESPECTER

Pour l'hypothèse TVF dans le cas d'une traversée de voie ferrée avec support engageant le gabarit cinématique, l'Arrêté Technique du 15 mars 1963 prescrit un coefficient de sécurité de 1,75 par rapport à la charge de rupture des câbles et du support "dans une hypothèse de rupture de tous les conducteurs placés d'un même côté".

Pour les massifs de fondations, l'Arrêté Technique du 15 mars 1963 prescrit des coefficients de stabilité de 1 et 1,5 dans l'hypothèse de traversée de voie ferrée suivant que le support engage le gabarit cinématique ou pas.

Pour les autres hypothèses, la stabilité des massifs est exigée, mais le coefficient correspondant n'est pas fixé. L'adoption d'un coefficient de 1,2 tient compte de l'expérience de l'ONE et des aléas inhérents à la détermination de la nature des sols et à la réalisation des fondations.

Pour les hypothèses de conception des supports, il est plus intéressant de faire référence à la contrainte de limite élastique minimale, cette valeur étant garantie par le fournisseur (cf. commentaires des paragraphes 1.3.1 et 1.3.2).

1.3.5 RECAPITULATIF DES CONDITIONS A RESPECTER

Pour les matériaux et les matériels constituant les Lignes Aériennes, les conditions à respecter sont résumées dans le tableau suivant, en fonction des hypothèses de calcul.

CAS DE VERIFICATION		CONDITIONS A RESPECTER											
NATURE DES HYPOTHESES	Hypothèses Météorologiques	Câbles haubans		Armements		Eléments métalliques		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	A	CRN/3	x	R/3	x	R/3	x	R/2.1	x	1.2	x	< Pmax	x
	A	CRN/3	x	R/3	x	R/3	x	R/2.1	x	1.2	x	< Pmax	x
Technique	(1) TVF	CRN/1.75	x	R/1.75	x	R/1.75	x	R/1.27(3)	x	1	x	< Pmax	x
	(2)	CRN/3	x	R/3	x	R/3	x	R/2.1	x	1.5	x	< Pmax	x
Météorologique	HPV	CRN/3	x	R/3	x	R/3	x	R/2.1	x	1.2	x	< Pmax	x
	E.D.S	0.2CRN	x	Pour le choix du paramètre									
	Givre	Voir FASCICULE GIVRE joint en annexe 1											
Torsion (rupture)	A	-		-		Rem/1	*	R/1.27	*	1	*	Pmax	*
Anti-cascade	A	-		-		Rem/1	*	R/1.27	*	1	*	Pmax	*
Montage (Escalade)	+ 25° vent nul	-		-		Rem/1.2	*	R/2.1	*	1		-	
Construction et entretien	+ 25° vent nul	-		-		Rem/1.8	*	R/2.1	*	-		-	
Court-circuit	Pour mémoire (Applicable pour ICC > 40kA)												

x : Vérification à effectuer dans chaque projet

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

(1) gabarit cinématique de la voie engagé

(2) sans engagement de gabarit

(3) Voir paragraphe 1.3.4 du présent chapitre : "Conditions d'utilisation des poteaux en béton armé" des présentes Directives .

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

1.4 PARAMETRES

1.4.1 DEFINITIONS

Un câble tendu entre deux points décrit une courbe, dite chaînette d'équation $y = P \operatorname{ch} \left(\frac{x}{P} \right)$ dans le repère orthonormé (x, y) . P est appelé paramètre.

C'est le rayon de courbure de la courbe au point de coordonnées $(x = 0, y = P)$.

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

Chaque état du câble est caractérisé par :

- la température du câble,
- le coefficient de surcharge (vent, givre),
- le paramètre.

Les formules figurant en annexe 5 des présentes Directives donne l'expression de l'équation de changement d'état.

1.4.2 PARAMETRE DE REPARTITION

Le paramètre de répartition correspond à la position la plus basse de la chaînette compte tenu d'un état initial caractérisé par le paramètre de référence.

La position la plus basse de la chaînette est elle-même obtenue pour la température maximale de fonctionnement du câble.

Dans certains cas de répartition en zone de givre moyen ou lourd c'est en hypothèse de givre que les câbles ont leur position la plus basse. Des vérifications particulières sont alors nécessaires (voir FASCICULE GIVRE). C'est dans cette position que l'on vérifiera les distances par rapport aux obstacles et au sol.

Les températures définissant le paramètre de répartition sont indiquées dans le paragraphe "hypothèse de répartition" du chapitre 3 des présentes Directives.

Dans certains cas de répartition en zone de givre moyen ou lourd c'est en hypothèse de givre que les câbles ont leur position la plus basse. Des vérifications particulières sont alors nécessaires (voir FASCICULE GIVRE).

1.4.3 PARAMETRE DE REGLAGE DES CABLES

Le paramètre de réglage est défini à partir de l'état initial caractérisé par le paramètre de référence pour différentes températures tenant compte de la période d'exécution du déroulage des câbles.

Compte tenu de l'inclinaison des chaînes dues aux dissymétries des portées et des dénivelées, le paramètre de réglage peut être différent d'une portée à l'autre dans un même canton. L'approximation de la méthode de BLONDEL (portée équivalente) adoptée par l'ONÉ (cf. chapitre Câbles, 2ème partie des directives LHT) permet d'avoir un même paramètre pour un canton donné.

COMMENTAIRES

Paragraphe 1.4.4 : PARAMETRE DE REFERENCE

Pour plus d'informations sur le mode de détermination des paramètres et températures de références, voir les indications de la note EDF EAL 0196 du 3 mai 1974 qui traite du cas de l'EDF.

Par ailleurs, pour tenir compte du fluage des câbles après réglage sur le terrain, il est nécessaire dans la détermination de la flèche de pose, de minorer la température ambiante de 5°C.

1.4.4 PARAMETRE DE REFERENCE

Dans l'hypothèse de répartition, les câbles sont considérés dans la position la plus basse avec des chaînes supposées verticales.

Dans l'hypothèse de réglage, les câbles sont réglés avec des chaînes verticales.

Or, l'étude comparative de l'évolution des tensions dans le câble suivant les valeurs de température, de vent et de paramètre à un état initial choisi montre que les chaînes ne peuvent être rigoureusement verticales dans chacune des deux hypothèses citées ci-dessus.

Le choix d'un paramètre de référence à une température de référence, comprise entre la température de répartition et celle de réglage, a pour but de réaliser un bon compromis entre les nécessités administratives de l'hypothèse de répartition et les conditions pratiques de l'hypothèse de réglage en minimisant l'erreur commise sur l'inclinaison des chaînes dans chacune de ces deux hypothèses.

1.4.4.1 PARAMETRE DE REFERENCE DES CABLES CONDUCTEURS

Le choix d'un paramètre de référence est nécessaire pour les lignes présentant d'importants déséquilibres entre les portées et de fortes dénivellations entre les supports (lignes de montagne).

Pour les lignes de plaine, le passage par un paramètre de référence reste néanmoins utile.

En effet, le choix de paramètres de référence proches de ceux utilisés pour la conception des familles de supports permet une meilleure optimisation de l'utilisation des supports lors de l'étude d'une ligne (cf chapitre Pylônes, 2ème partie des Directives LHT).

Les valeurs préférentielles à utiliser pour ces paramètres en fonction de l'ouvrage à réaliser sont indiquées dans le chapitre Câbles, 2ème partie des Directives LHT.

1.4.4.2 PARAMETRE DE REFERENCE DES CABLES DE GARDE

Afin d'obtenir une meilleure protection contre la foudre et d'éviter des rapprochements dangereux entre conducteurs et un câble de garde chargé de givre, les câbles de garde ont un paramètre de référence plus élevé que celui des conducteurs. Dans le cas général ce paramètre est obtenu en majorant celui des conducteurs de 200 m.

Cependant, cette règle générale ne conduit pas toujours à une distance suffisante entre conducteurs et câbles de garde dans les cas suivants :

- lorsqu'il existe un croisement entre un conducteur et un câble de garde,
- dans les zones de givre moyen ou lourd .

Lorsque les conditions de distance entre câbles ne sont pas vérifiées le câble de garde peut être tendu à un paramètre supérieur.

Dans les zones de givre moyen ou lourd et dans les cantons comportant de grandes portées, il est parfois nécessaire d'adopter un câble de garde de plus forte section et de le tendre à un paramètre supérieur ou de décaler les plans verticaux des conducteurs et câbles de garde .

1.5 METHODE DE CALCUL ET DE VERIFICATION

1.5.1 CHOIX ET JUSTIFICATION DES CABLES

1.5.1.1 CHOIX DES CABLES

Le type et la section des câbles à employer en fonction des caractéristiques de l'ouvrage sont indiqués dans le chapitre Câbles, 2ème partie des directives LHT.

1.5.1.2 JUSTIFICATION DE LA RESISTANCE MECANIQUE DES CABLES

La vérification de la tenue mécanique des câbles est faite pour chaque portée, dans les hypothèses climatiques choisies pour l'ouvrage soit :

- hypothèse A
- hypothèse HPV, éventuellement,
- hypothèse B
- hypothèses de givre, éventuellement.

La tension totale au point d'accrochage du câble appelée charge de service (T_c) doit rester inférieure aux charges maximales admissibles suivant les conditions définies dans le paragraphe "CONDITIONS DE RESISTANCE MECANIQUE A RESPECTER DANS LES PROJETS" ci-avant.

La charge de service est donnée par l'expression suivante :

$$T_c = T_o + mp H$$

T_c : charge de service dans le plan du câble (daN)

T_o : tension horizontale dans le câble pour l'hypothèse considérée (daN)

m : coefficient de surcharge du câble pour l'hypothèse considérée

p : poids linéique du câble (daN/m)

H : distance entre le point d'accrochage et le creux du câble pour l'hypothèse considérée (m)

1.5.2 VERIFICATION DE LA RESISTANCE MECANIQUE DU MATERIEL

Le calcul des efforts appliqués au matériel d'équipement est effectué dans les hypothèses suivantes :

- hypothèse A

- hypothèse HPV, éventuellement
- hypothèse B
- hypothèse de givre uniforme, éventuellement
- hypothèse de givre dissymétrique (pour les chaînes de suspension), éventuellement

Les charges de service appliquées au matériel doivent rester inférieures aux charges maximales admissibles suivant les conditions définies dans le paragraphe "CONDITIONS DE RESISTANCE MECANIQUE A RESPECTER DANS LES PROJETS" ci-avant.

L'expression de la charge de service (T_e) appliquée au matériel d'accrochage des câbles est la suivante :

$$T_e = \sqrt{V^2 + T^2 + L^2}$$

T_e : Charge de service

V : Effort vertical (daN) dû aux câbles, au poids de la chaîne et des contrepoids, éventuellement.

T : Effort transversal (daN) dû aux câbles et à la pression du vent sur la chaîne

L : Effort longitudinal dû aux câbles (daN).

1.5.3 VERIFICATION DES SUPPORTS

Le calcul est effectué pour chaque hypothèse de charge en utilisant les matrices figurant dans les notes de calcul générales :

- matrice indiquant les efforts dans chaque barre, pour une force unitaire portée successivement par les axes vertical, longitudinal et transversal et appliquée simultanément aux points d'accrochage des câbles (les efforts unitaires sont désignés respectivement par A, B, C pour les conducteurs et a, b, c pour les câbles de garde);
- matrice des efforts admissibles dans les barres, dans les différentes hypothèses,
- matrice des efforts provenant du "poids propre" du pylône : (PP)
- matrice des efforts provenant de la pression du vent transversal sur le pylône ("vent propre" : VP)

Conventionnellement V, T, L, v, t, l, sont les efforts verticaux, transversaux et longitudinaux appliqués au support par un conducteur (ou par chaque faisceau de conducteurs) et par un câble de garde.

La charge de service R_i de la barre i doit rester inférieure aux charges maximales admissibles suivant les conditions définies dans le paragraphe "CONDITIONS DE RESISTANCE MECANIQUE A RESPECTER DANS LES PROJETS" des présentes Directives, et a pour expression :

$$R_i = A_i V + B_i T + C_i L + a_i v + b_i t + c_i l + PP_i + VP_i$$

La justification du pylône suppose pour être correcte :

- que les matrices ont bien été établies pour l'armement utilisé et que les conducteurs et câbles de garde sont accrochés aux endroits prévus dans la note de calcul générale,
- que les efforts exercés sur le pylône par le où les conducteurs de chaque phase sont égaux et parallèles, cette condition devant également être respectés pour les câbles de garde,
- que les efforts V et v sont tous positifs, de manière à rester dans le domaine de validité des notes de calcul, pour les chaînes de suspension ,
- que l'effort dans les barres est de même nature (compression ou traction) que l'effort admissible indiqué dans les notes de calcul correspondantes. Lorsque l'effort admissible est négatif (traction) et lorsque l'effort exercé est positif (compression), le taux de travail de la barre est incorrect, puisqu'il néglige le flambement de la barre.

1.5.4 DETERMINATION A PRIORI DES MASSIFS DE FONDATION

Le calcul des efforts exercés sur les embases, utilise les matrices figurant dans la note de calcul générale des supports (méthode indiquée précédemment).

Connaissant la valeur de ces efforts il est possible :

- de déterminer l'effort d'arrachement (ou de compression) pour lequel le massif doit être dimensionné, compte tenu des coefficients de stabilité applicables dans les différentes hypothèses,
- de choisir les massifs "théoriques" à inscrire sur le carnet de piquetage sur la base des caractéristiques d'un terrain moyen.

Les massifs comprimés et arrachés peuvent être différents pour les pylônes supportant des angles importants ou les pylônes d'arrêt.