

normalisation française

XP ENV 1993-3-1
Novembre 2001

Indice de classement : **P 22-331**

ICS : 91.080.10

Eurocode 3

Calcul des structures en acier et Document d'Application Nationale — Tours, mâts et cheminées

Partie 3-1 : Pylônes et mâts haubanés

E : Eurocode 3 — Design of steel structures and National Application Document —
Towers, masts and chimneys — Part 3-1 : Towers and masts
D : Eurocode 3 — Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten und national
Anwendungsdokumente — Türme, Maste und Schornsteine —
Teil 3-1 : Türme und Maste

Norme expérimentale

publiée par AFNOR en novembre 2001.

Les observations relatives à la présente norme expérimentale doivent être adressées à AFNOR avant le 31 décembre 2001.

Correspondance

Le présent document reproduit intégralement la prénorme européenne ENV 1993-3-1:1997 et intègre les adaptations nationales relatives à cette ENV.

Analyse

Ce document contient des règles détaillées de calcul des pylônes en treillis et des mâts haubanés, y compris des dispositions concernant les haubans de ces derniers.

Ces règles de calcul complètent ou modifient celles de l'ENV 1993-1-1.

Descripteurs

Thésaurus International Technique : construction métallique, acier de construction, pylône, mât de poteau, conception, calcul, matériau, résistance des matériaux, assemblage, montage, fabrication, résistance à la fatigue, vérification, prévention de la corrosion, résistance au vent, amortissement.

Modifications

Corrections

Par rapport au 1^{er} tirage, pages 104 et 105, les paragraphes E.1.3, E.2.2 et E.2.4 sont grisés.



Membres de la commission de normalisation

Président : M BROZZETTI

Secrétariat : M PESCATORE — BNCM

M	ARIBERT	INSA RENNES
M	BARJON	SERVICE TECHNIQUE DES REMONTEES MECANQUES
M	BAZIN	SECRÉTAIRE GÉNÉRAL CGNORBÂT-DTU
M	BORGEOT	CTICM
M	BRAHAM	ASTRON BUILDING SYSTEMS
M	BROZZETTI	CTICM
M	CHABROLIN	CTICM
M	CRETON	BNS
MME	DUSSAUGEY	SYNDICAT NATIONAL DES INDUSTRIES D'EQUIPEMENTS
M	ESTEVE	EDF DIRECTION DE L'EQUIPEMENT
M	GALEA	CTICM
M	GAULIARD	SYNDICAT DE LA CONSTRUCTION METALLIQUE DE FRANCE
M	GOURMELON	LABORATOIRE CENTRAL DES PONTS ET CHAUSSEES
M	GRIMAUULT	TUBEUROP FRANCE
M	IZABEL	SNPPA
M	KRUPPA	CTICM
M	LAPEYRE	C.E.P.
M	LE CHAFFOTEC	SOCOTEC
M	MAITRE	SOCOTEC
M	D. MARTIN	SNCF
M	MAYERE	BUREAU VERITAS
M	MOUTY	
M	PAMIÈS	CETEN APAVE
MME	PATROUILLEAU	AFNOR
MME	PECHENARD	AFFIX
M	J. PERFETTI	C.S.N.E.
M	PERNIER	MINISTERE DE L'EQUIPEMENT, DU LOGEMENT, DU TRANSPORT ET DU TOURISME
M	PESCATORE	BNCM
M	RAMEAU	EDF
M	RAOUL	SETRA
M	ROUSSEAU	INSTITUT DE SOUDURE
M	RYAN	CTICM
M	SOKOL	P.A.B.
M	VILLETTE	BAUDIN-CHATEAUNEUF
M	VOISIN	I.N.R.S.

Ont participé en tant qu'experts au groupe de travail EC3 partie 3-1/DAN :

Animateur : P. LE CHAFFOTEC

M	BAES	PETITJEAN
M	DUFRESNE	BOUYGUES TELECOM
M	FEYFANT	CGTI PYLÔNES
M	FOUQUENET	CGTI PYLÔNES
M	GREGOIRE	CETEN/APAVE
M	GROSSE	T.D.F.
M	LE CHAFFOTEC	SOCOTEC
M	LECLERC	ANTENNES LECLERC
M	LETSCHER	E.D.F.
M	MARCEL-VENAULT	JOSEPH PARIS
M	MAYERE	BUREAU VERITAS
M	MOLDOVAN	CTICM
M	PERRIAU	VALMONT TELECOM CENTRE
M	PERRIER	RICHARD DUCROS
M	SARRAND	SFR
M	TURLIN	ZACOM TELECOM

Sommaire

	Page
AP.1 Introduction	4
AP.2 Présentation générale de l'EC3-3-1 DAN	4
AP.2.1 Les objectifs de l'EC3-3-1 DAN	4
AP.2.2 Les différentes lectures de EC3-3-1 DAN	4
AP.2.3 Le statut prescriptif des adaptations nationales	5
AP.2.4 Les textes normatifs de référence	5
AP.3 Modalités d'application	5
AP.3.1 Domaine d'application	5
AP.3.2 La référence aux textes normatifs	5
AP.3.3 Modalités contractuelles	6
AP.3.4 Modalités d'expérimentation	6
AP.4 Liste des normes et textes normatifs de référence	6

Avant-propos national

AP.1 Introduction

La présente norme française expérimentale, dénommée EC3-3-1 DAN, reproduit intégralement l'ENV 1993-3-1 (en clair l'Eurocode 3 partie 3-1, en abrégé l'EC3-3-1), approuvée par le Comité Européen de Normalisation (CEN) en tant que prénorme européenne (ENV).

La présente norme française expérimentale spécifie, en outre, les adaptations nationales qui ont été apportées à l'EC3-3-1 dont la réunion constitue le Document d'Application Nationale (en abrégé le DAN).

Les parties de l'EC3-3-1 que le DAN n'invalide pas et les différents segments du DAN forment la norme française expérimentale qui transpose l'EC3-3-1.

AP.2 Présentation générale de l'EC3-3-1 DAN

AP.2.1 Les objectifs de l'EC3-3-1 DAN

L'EC3-3-1 DAN répond à plusieurs objectifs :

- a) À la demande du CEN, produire à l'intention des pays francophones la version française in extenso de l'EC3-3-1.
- b) Présenter les adaptations nationales qui sont apportées à l'EC3-3-1 et qui, pour une part, apportent des éclaircissements pour l'application de ce dernier pendant la phase d'expérimentation, et pour une autre part, préfigurent les observations que présentera la France quand il sera question de conférer à l'EC3-3-1 le statut de norme européenne (EN).
- c) Préciser les valeurs des coefficients de sécurité qu'il incombe aux autorités de chaque État membre de fixer (voir clause (13) de l'avant-propos), en amendement éventuellement les valeurs encadrées dans l'EC3-3-1.
- d) Recenser les textes normatifs auxquels se réfère la norme française expérimentale et préciser les modalités d'application des normes ou règlements nationaux de référence dès lors que ceux-ci sont particuliers au cadre de l'EC3-3-1.
- e) Apporter aux maîtres d'ouvrages, publics et privés, les éléments d'une norme de conception et de justification des structures qui soient contractualisables en application notamment de la Directive 71/305/CEE (incluant ses amendements) sur la coordination des procédures de marchés publics de travaux et de la Directive 89/106/CEE relative au rapprochement des dispositions législatives, réglementaires et administratives des États membres concernant les produits de construction.

AP.2.2 Les différentes lectures de EC3-3-1 DAN

La matérialisation de ces différents objectifs permet de produire dans un document unique trois textes bien distincts moyennant les lectures différenciées ci-après :

- a) La norme française expérimentale transposant l'EC3-3-1 est comprise dans tout ce qui n'est pas grisé.
- b) Le DAN est délimité par les zones encadrées qui sont indexées «I», «A» ou «C», et intègre aussi les valeurs encadrées de l'EC3-3-1 qui n'ont pas été invalidées.
- c) La traduction française de la version originale de l'EC3-3-1 est donc à trouver dans tout ce qui n'est pas à la fois encadré et indexé, zones grisées incluses.

AP.2.3 Le statut prescriptif des adaptations nationales

Un statut prescriptif est attribué à chacune des adaptations nationales (cf. tableau AP.1).

Tableau AP.1 : Statuts prescriptifs des adaptations nationales

Statut de l'adaptation	Conception de représentation du statut
PRINCIPE	P précédent le texte
RÈGLE D'APPLICATION	Écriture droite Caractère normal
COMMENTAIRE	Écriture droite Petit caractère

La portée d'une adaptation nationale vis-à-vis de la spécification européenne à laquelle elle se rapporte, a été également codifiée (voir tableau AP.2).

Tableau AP.2 : Portée des adaptations nationales

Catégorie d'adaptation	Codification de l'adaptation
INVALIDATION	I avec grisé de la partie de la prescription de l'EC3-3-1 invalidée
AMENDEMENT	A
COMMENTAIRE	C

AP.2.4 Les textes normatifs de référence

Le répertoire des normes et autres textes normatifs de référence de l'EC 3-3-1 DAN est donné à l'article AP.4 de cet avant-propos.

AP.3 Modalités d'application

AP.3.1 Domaine d'application

Le domaine d'application de l'EC3-3-1 DAN couvre la construction de pylônes en treillis et de mâts haubanés, y compris des dispositions concernant les haubans de ces derniers.

Pour les applications à la marge de ce domaine, il est recommandé de consulter la Commission de Normalisation de la Construction Métallique (CNCMét).

AP.3.2 La référence aux textes normatifs

Dans les répertoires de l'article AP.4 du présent avant-propos sont présentées :

- partie gauche : les normes européennes ;
- partie droite et en regard des normes européennes, les normes nationales et autres documents s'y substituant temporairement et à utiliser, en totalité ou partiellement avec la présente norme française expérimentale.

Dans le cadre de l'application de la norme française expérimentale, on se référera aux normes répertoriées dans la partie droite de l'article AP.4. En l'absence de normes européennes, il est fait appel, pour l'essentiel aux normes nationales. Il n'a pas été jugé nécessaire, chaque fois que l'EC3-3-1 fait référence à une norme (européenne ou ISO) de mentionner dans le corps même du DAN, la (les) norme(s) nationale(s) équivalente(s). À charge pour l'utilisateur de retrouver celle(s)-ci dans l'article AP.4 par une lecture allant de la gauche vers la droite.

AP.3.3 Modalités contractuelles

La présente norme expérimentale n'est applicable, en totalité ou en partie, dans le cadre contractuel d'un marché public ou privé que s'il y est fait explicitement référence :

- pour les marchés publics, dans le Cahier des Clauses Administratives Particulières à l'article 2 — où la liste des pièces générales rendues contractuelles mentionnera la norme française expérimentale et en cas d'utilisation partielle les parties de celle-ci à considérer — et à l'article 10 — qui indiquera la dérogation correspondante faite au Cahier des Clauses Techniques Générales — ;
- pour les marchés privés, dans des documents particuliers du marché tels que définis dans la norme NF P 03-001, décembre 2000 (Cahier des Clauses Administratives Particulières, Cahier des Clauses Spéciales, Cahier des Clauses Techniques Particulières).

AP.3.4 Modalités d'expérimentation

L'ENV 1993-3-1 a été approuvé par le CEN le 30 juin 1997.

Au terme d'une période expérimentale de trois ans, les pays membres du CEN auront à opter soit pour un ultime prolongement du statut de l'ENV pour une période d'au moins trois ans, soit pour le statut de norme européenne (EN).

Cette décision sera très certainement assortie d'une révision de la norme.

Dans cette perspective, les utilisateurs de la présente norme expérimentale sont invités à faire connaître leurs observations avec, si possible, propositions d'amendements à l'appui, à AFNOR (11 avenue Francis de Pressensé — 93571 Saint-Denis La Plaine Cedex) qui transmettra au BNCM.

Évolution des adaptations nationales

Il n'est pas exclu que l'expérimentation de l'EC3-3-1 DAN mette en évidence certains problèmes relatifs à l'applicabilité du document, conduisant la CNCMét à formuler des amendements ou à apporter des compléments jugés indispensables aux adaptations nationales déjà produites. En cas de difficulté, il y aura lieu de se rapprocher de d'AFNOR ou du BNCM.

AP.4 Liste des normes et textes normatifs de référence

Le présent article a pour objet de donner la liste des normes et autres textes normatifs auxquels il y a lieu de se référer pendant la phase d'expérimentation de l'EC3-3-1 DAN.

Normes européennes ou internationales publiées		Normes pouvant être appliquées avec l'ENV	
Désignation	Intitulé	Désignation	Intitulé
ENV 1991-1	<i>Eurocode 1 : Bases de calcul et actions sur les structures — Partie 1 : Bases de calcul</i>	XP ENV 1991-1	<i>Eurocode 1 : Bases de calcul et actions sur les structures et document d'application nationale — Partie 1 : Bases de calcul</i>
ENV 1991-2-1	<i>Eurocode 1 : Partie 2-1 : Poids volumique, poids propre et charges d'exploitation</i>	XP ENV 1991-2-1	<i>Eurocode 1 : Bases de calcul et actions sur les structures et document d'application nationale — Partie 2-1 : Poids volumique, poids propre et charges d'exploitation</i>
ENV 1991-2-2	<i>Eurocode 1 : Partie 2-2 : Actions sur les structures exposées au feu</i>	XP ENV 1991-2-2	<i>Eurocode 1 : Bases de calcul et actions sur les structures et document d'application nationale — Partie 2-2 : Actions sur les structures exposées au feu</i>
ENV 1991-2-3	<i>Eurocode 1 : Partie 2-3 : Charges de neige</i>	XP ENV 1991-2-3	<i>Eurocode 1 : Bases de calcul et actions sur les structures et document d'application nationale — Partie 2-3 : Charges de neige</i>

Normes européennes ou internationales publiées		Normes pouvant être appliquées avec l'ENV	
Désignation	Intitulé	Désignation	Intitulé
ENV 1991-2-4	<i>Eurocode 1 : Partie 2-4 : Actions du vent</i>	XP ENV 1991-2-4	<i>Eurocode 1 : Bases de calcul et actions sur les structures et document d'application nationale — Partie 2-4 : Actions du vent</i>
ENV 1991-2-5	<i>Eurocode 1 : Partie 2-5 : Actions thermiques</i>		
ENV 1993-1-1	<i>Eurocode 3 : Calcul des structures en acier — Partie 1-1 : Règles générales et règles pour les bâtiments</i>	XP P 22-311 ENV 1993-1-1	<i>Eurocode 3 : Calcul des structures en acier et document d'application nationale — Partie 1-1 : Règles générales et règles pour les bâtiments</i>
ENV 1993-1-2	<i>Eurocode 3 : Partie 1-2 : Calcul du comportement au feu</i>	XP P 22-312 ENV 1993-1-2	<i>Eurocode 3 : Calcul des structures en acier et document d'application nationale — Partie 1-2 : Calcul du comportement au feu</i>
ENV 1993-1-3	<i>Eurocode 3 : Partie 1-3 : Règles supplémentaires pour les profilés et plaques à parois minces formés à froid</i>	XP ENV 1993-1-3	<i>Eurocode 3 : Calcul des structures en acier et document d'application nationale — Partie 1-3 : Règles supplémentaires pour les profilés et plaques à parois minces formés à froid</i>
ENV 1993-1-4	<i>Eurocode 3 : Partie 1-4 : Règles supplémentaires pour les aciers inoxydables</i>	XP ENV 1993-1-4	<i>Eurocode 3 : Calcul des structures en acier et document d'application nationale — Partie 1-4 : Règles supplémentaires pour les aciers inoxydables</i>
ENV 1993-1-5	<i>Eurocode 3 : Partie 1-5 : Règles supplémentaires pour les plaques planes, raidies ou non, chargées dans leur plan</i>	XP ENV 1993-1-5	<i>Eurocode 3 : Calcul des structures en acier et document d'application nationale — Partie 1-5 : Règles supplémentaires pour les plaques planes, raidies ou non, chargées dans leur plan</i>
ENV 1993-1-6	<i>Eurocode 3 : Partie 1-6 : Règles supplémentaires pour la résistance et la stabilité des structures en coque</i>		
ENV 1993-1-7	<i>Eurocode 3 : Partie 1-7 : Règles supplémentaires pour la résistance et la stabilité des plaques planes chargées transversalement</i>		
ENV 1993-3-2	<i>Eurocode 3 : Partie 3-2 : Cheminées</i>		
ENV 1998	<i>Eurocode 8 : Conception et dimensionnement des structures pour leur résistance aux séismes</i>		
ENV 1090	<i>Exécution des structures en acier</i>	FD ENV 1090-1 XP P 22-501-1	<i>Exécution des structures en acier — Partie 1 : Règles générales et règles pour les bâtiments</i>
ISO 1000	<i>Unités SI et recommandations concernant l'emploi de leurs multiples ainsi que de certaines autres unités</i>	NF X 02-006	<i>Le système international d'unités. Description et règles d'emploi — Choix de multiples et de sous-multiples</i>
ISO 8930	<i>Principes généraux de fiabilité des constructions — Listes de termes équivalents</i>	P 06-007	<i>Principes généraux de fiabilité des constructions — Listes de termes équivalents</i>

Version française

**Eurocode 3 —
Calcul des structures en acier et Document d'Application Nationale —
Pylônes et mâts haubanés**

Eurocode 3 —
Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten
und national Anwendungsdokumente —
Türme, Maste und Schornsteine —
Teil 3-1 : Türme und Maste

Eurocode 3 —
Design of steel structures and National Application
Document — Towers, masts and chimneys —
Part 3-1 : Towers and masts

La présente prénorme européenne (ENV) a été adoptée par le CEN le 30 juin 1997 comme norme expérimentale pour application provisoire. La période de validité de cette ENV est limitée initialement à trois ans. Après deux ans, les membres du CEN seront invités à soumettre leurs commentaires, en particulier sur l'éventualité de la conversion de l'ENV en norme européenne (EN).

Les membres du CEN sont tenus d'annoncer l'existence de cette ENV de la même façon que pour une EN et de rendre cette ENV rapidement disponible au niveau national sous une forme appropriée. Il est admis de maintenir (en parallèle avec l'ENV) des normes nationales en contradiction avec l'ENV en application jusqu'à la décision finale de conversion possible de l'ENV en EN.

Les membres du CEN sont les organismes nationaux de normalisation des pays suivants : Allemagne, Autriche, Belgique, Danemark, Espagne, Finlande, France, Grèce, Irlande, Islande, Italie, Luxembourg, Norvège, Pays-Bas, Portugal, République Tchèque, Royaume-Uni, Suède et Suisse.

CEN

COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION

Europäisches Komitee für Normung
European Committee for Standardization

Secrétariat Central : rue de Stassart 36, B-1050 Bruxelles

Sommaire

	Page
Avant-propos	5
1 Généralités	8
1.1 Objet	8
1.2 Distinction entre principes et règles d'application	8
1.3 Références normatives	9
1.4 Définitions	9
1.5 Symboles	10
1.6 Unités	11
1.7 Terminologie	11
1.8 Convention concernant les axes des sections transversales	12
2 Bases de calcul	13
2.1 Généralités	13
2.2 Hypothèses	13
2.3 Différentiation des classes de fiabilité	13
2.4 Exigences fondamentales	13
2.5 Actions et influences de l'environnement	14
2.6 Dimensionnement assisté par des essais	15
2.7 Dimensionnement par calculs	15
3 Matériaux	16
3.1 Acier de construction	16
3.2 Moyens d'assemblage	16
3.3 Haubans et accessoires	16
4 États limites de service	17
4.1 Bases	17
4.2 Déplacements	17
4.3 Effets dynamiques	18
5 États limites ultimes	18
5.1 Bases	18
5.2 Calcul des sollicitations	19
5.3 Classification des sections transversales	20
5.4 Résistance des sections transversales	21
5.5 Résistance au flambement des éléments	21
5.6 Longueur de flambement des éléments	24
5.7 Facteur d'élanement efficace k	33
5.8 Choix des courbes de flambement par flexion	36
5.9 Éléments secondaires	38
6 Assemblages	39
6.1 Bases	39
6.2 Assemblages boulonnés	40
6.3 Assemblages soudés	41
6.4 Assemblages particuliers pour les mâts haubanés	41

Sommaire (suite)

	Page
7	Fabrication et montage 43
7.1	Généralités 43
7.2	Les spécifications du projet 43
7.3	Restrictions concernant la fabrication 43
7.4	Préparation des matériaux 43
7.5	Assemblages boulonnés 43
7.6	Assemblages soudés 44
7.7	Tolérances 44
7.8	Pré-tension des haubans 45
8	Dimensionnement assisté par des essais 46
9	Vérifications à la fatigue 46
9.1	Généralités 46
9.2	Chargement de fatigue 46
9.3	Résistance à la fatigue 47
9.4	Évaluation de la sécurité 48
9.5	Coefficients partiels 49
9.6	Fatigue des haubans 49
10	Protection anticorrosion 50
10.1	Généralités 50
10.2	Haubans 50
11	Amortisseurs 50
11.1	Amortisseurs de structure 50
11.2	Amortisseurs de haubans 50
12	Isolateurs 51
13	Équipements annexes et autres 52
13.1	Moyens d'accès et plates-formes 52
13.2	Protection parafoudre 52
13.3	Signalisation aérienne 52
13.4	Protection contre le vandalisme 52
Annexe A (normative)	Modélisation des actions météorologiques 53
A.1	Généralités 53
A.2	Traînée aérodynamique 54
A.3	Comportement des pylônes en treillis 67
A.4	Comportement des mâts haubanés 74
Annexe B (informative)	Charges de givre et combinaisons de givre et de vent 85
B.1	Généralités 85
B.2	Chargement de givre 86
B.3	Poids du givre 86
B.4	Vent et givre 86
B.5	Charge de givre asymétrique 87
B.6	Combinaisons de givre et de vent 87

Sommaire (fin)

	Page
Annexe C (normative) Haubans et éléments tendus à haute résistance	88
C.1 Définitions	88
C.2 Actions	90
C.3 Exigences générales	91
C.4 Matériaux	92
C.5 Caractéristiques mécaniques	93
C.6 Exigences générales	95
C.7 Fatigue	97
C.8 Informations exigées pour les fournisseurs de câbles	97
C.9 Exigences concernant les essais	98
Annexe D (informative) Rupture de haubans	100
D.1 Introduction	100
D.2 Modèle analytique simplifié	100
D.3 Analyse après une rupture de hauban	102
D.4 Procédure offrant une marge de sécurité	102
Annexe E (informative) Équipements annexes et autres	103
E.1 Échelles et échelons	103
E.2 Plates-formes	104
A Annexe F (informative) Spécifications techniques du projet — Contenu	106

Avant-propos

Objectifs des Eurocodes

- (1) Les Eurocodes structuraux constituent un ensemble de normes élaborées en vue du calcul géotechnique et structural des bâtiments et ouvrages de Génie Civil.
- (2) Ils ne couvrent l'exécution et le contrôle que dans la mesure où cela est nécessaire pour indiquer la qualité des produits de construction et le niveau d'exécution indispensables pour la conformité aux hypothèses des règles de calcul.
- (3) Jusqu'à ce que l'ensemble des spécifications techniques harmonisées pour les produits et pour les méthodes d'essai de leurs comportements soit disponible, quelques-uns des Eurocodes structuraux couvrent certains de ces aspects dans des annexes informatives.

Historique du programme des Eurocodes

- (4) La Commission des Communautés Européennes (CCE) eut l'initiative de démarrer le travail d'établissement d'un ensemble de règles techniques harmonisées pour le calcul des bâtiments et ouvrages de génie civil, règles destinées à être utilisées, au début, comme alternative aux différentes règles en vigueur dans les différents états membres et, ultérieurement, à les remplacer. Ces règles techniques se sont fait connaître sous le nom «d'Eurocodes structuraux».
- (5) En 1990, après consultation de ses états membres, la CCE a transféré le travail d'élaboration, de diffusion et de mise à jour des Eurocodes Structuraux au CEN, et le Secrétariat de l'AELE a accepté d'aider le CEN dans cette tâche.
- (6) Le Comité Technique CEN/TC 250 du CEN est responsable de tous les Eurocodes Structuraux.

Programme des Eurocodes

- (7) Les travaux sont en cours sur les Eurocodes Structuraux suivants, chacun étant généralement constitué de plusieurs parties :

EN 1991	Eurocode 1	Bases de calcul et actions sur les structures ;
EN 1992	Eurocode 2	Calcul des structures en béton ;
EN 1993	Eurocode 3	Calcul des structures en acier ;
EN 1994	Eurocode 4	Calcul des structures mixtes acier-béton ;
EN 1995	Eurocode 5	Calcul des structures en bois ;
EN 1996	Eurocode 6	Calcul des structures en maçonnerie ;
EN 1997	Eurocode 7	Calcul géotechnique ;
EN 1998	Eurocode 8	Résistance des structures aux séismes ;
EN 1999	Eurocode 9	Calcul des structures en aluminium.
- (8) Des sous-comités distincts ont été constitués par le CEN/TC 250 pour les différents Eurocodes énoncés ci-dessus.
- (9) La présente partie 3-1 de l'ENV 1993 est publiée par le CEN en tant que Prénorme Européenne (ENV) pour une durée de vie initiale de trois ans.
- (10) La présente prénorme est destinée à une application expérimentale et est soumise à commentaires.
- (11) Au terme d'une durée approximative de deux ans, les membres du CEN seront invités à soumettre des commentaires formels qui seront pris en compte dans la détermination des actions futures.
- (12) Dans l'intervalle, les réactions et commentaires concernant la présente prénorme devront être adressés au Secrétariat du sous-comité CEN/TC 250/SC 3 à l'adresse suivante :

BSI Standards
British Standards House
389 Chiswick High Road
Londres W4 4AL
Angleterre

ou à votre organisme national de normalisation.

Documents d'Application Nationale

(13) Dans l'optique des responsabilités incombant aux autorités des pays membres en ce qui concerne la sécurité, la santé, et autres domaines couverts par les exigences essentielles de la Directive sur les Produits de Construction (DPC), certains éléments de sécurité figurant dans la présente ENV ont été affectés de valeurs indicatives identifiées par . Il appartient aux autorités de chaque pays membre de revoir les valeurs encadrées, et elles ont la faculté de substituer des valeurs alternatives définitives pour ces éléments de sécurité en vue de l'application nationale.

(14) Certaines normes européennes ou internationales de référence indispensables peuvent ne pas être disponibles à la publication de la présente prénorme. Il est par conséquent prévu qu'un Document d'Application Nationale (DAN) donnant les valeurs définitives des éléments de sécurité faisant références aux normes d'accompagnement compatibles et précisant les directives nationales d'application de la présente prénorme, soit publié dans chaque état membre ou son organisme de normalisation.

(15) Il est prévu que la présente prénorme soit utilisée conjointement avec le DAN en vigueur dans le pays où le bâtiment ou l'ouvrage de génie civil est situé.

(16) Les Parties de l'ENV 1993 dont la publication est actuellement envisagée sont les suivantes :

ENV 1993-1-1	Règles générales : Règles générales et règles pour les bâtiments ;
ENV 1993-1-2	Règles générales : Calcul du comportement au feu ;
ENV 1993-1-3	Règles générales : Règles supplémentaires pour les profilés et plaques à parois minces formés à froid ;
ENV 1993-1-4	Règles générales : Règles supplémentaires pour les aciers inoxydables ;
ENV 1993-1-5	Règles générales : Règles supplémentaires pour les plaques planes, raidies ou non, chargées dans leur plan ;
ENV 1993-1-6	Règles générales : Règles supplémentaires pour la résistance et la stabilité des structures en coques ;
ENV 1993-1-7	Règles générales : Règles supplémentaires pour la résistance et la stabilité des plaques planes chargées transversalement ;
ENV 1993-2	Ponts métalliques ;
ENV 1993-3-1	Pylônes et mâts haubanés ;
ENV 1993-3-2	Cheminées ;
ENV 1993-4-1	Silos ;
ENV 1993-4-2	Réservoirs ;
ENV 1993-4-3	Canalisations ;
ENV 1993-5	Pieux et palplanches ;
ENV 1993-6	Chemins de roulement ;
ENV 1993-7	Structures marines et maritimes ;
ENV 1993-8	Structures agricoles.

(17) La présente Partie 3.1 a été élaborée en association avec la Partie 3.2 : Cheminées, afin d'éviter les chevauchements et les répétitions.

(18) Dans le cas de mâts haubanés cylindriques, il est fait référence à la Partie 3.2 pour les aspects similaires à ceux concernant les cheminées.

(18) C Les pylônes autostables à section polygonale variable ne sont pas couverts par la Partie 3.2.

- (19) De même, la Partie 3.2 fait référence à la présente Partie pour le calcul des haubans.
- (20) Les règles concernant la fatigue sont données tant dans la Partie 3.1 que dans la Partie 3.2, mais la Partie 3.1 fait référence à la Partie 3.2 pour certains détails.
- (21) L'Annexe A a été élaborée pour compléter les dispositions de l'ENV 1991-2-4 par rapport aux actions du vent sur les pylônes en treillis et les mâts haubanés. Son contenu est destiné à être transféré dans l'EN 1991 ultérieurement.
- (22) Une différenciation de la sécurité a été introduite dans la présente Partie 3.1 sous forme de trois classes, pour une utilisation en accord avec les autorités nationales compétentes par rapport aux conséquences économiques et sociales d'une ruine.

(22) **C** Il appartient au maître de l'ouvrage de définir la classe de fiabilité à prendre en compte.

23 Le présent document a été élaboré en consultation avec le Comité TC11 CENELEC.

(23) **C** Pour les supports de lignes d'électricité, le concepteur peut se référer à la norme pr EN 50341 préparé par le TC11 du CENELEC, si c'est considéré comme approprié.

(24) Le présent document comprend des dispositions permettant l'utilisation éventuelle d'un coefficient partiel différent pour la résistance dans le cas particulier de pylônes standard construits en cornières et dont la conception a fait l'objet d'essais-types.

(24) **I** Article invalidé

1 Généralités

1.1 Objet

(1)P La présente Partie 3.1 de l'ENV 1993 s'applique au calcul des pylônes en treillis et des mâts haubanés. Des dispositions concernant les pylônes cylindriques autoporteurs et haubanés sont données dans la Partie 3.2 de l'ENV 1993. Des dispositions concernant les haubans des structures haubanées sont données dans la présente Partie.

(1) C Les pylônes autostables à section polygonale variable ne sont pas couverts par la Partie 3.2.

(1) A Les supports de lignes de transport d'électricité ne sont pas couverts par la présente partie 3.1. Pour ces ouvrages, il y a lieu de se reporter à la norme pr EN 50341 préparée par le TC 11 du CENELEC.

(2)P Les dispositions figurant dans la présente Partie complètent ou modifient celles données dans la Partie 1.

(3) Lorsque l'applicabilité d'une disposition est limitée, pour des raisons pratiques ou par simplification, son usage est expliqué et les limites d'applicabilité sont mentionnées.

(4) Les détails concernant les actions météorologiques s'exerçant sur les pylônes en treillis et les mâts haubanés devant être pris en compte dans le calcul sont donnés dans l'Annexe A.

NOTE Ceci est une mesure provisoire. Ces détails sont destinés à être incorporés ultérieurement dans l'ENV 1991.

(4) C L'annexe A ne traite que des actions dues au vent. Les actions dues au givre sont données en annexe B.

(5) La présente Partie ne couvre pas le calcul des poteaux d'éclairage à sections circulaire et polygonale, qui est couvert dans l'EN 40. Les autres pylônes à section polygonale ne sont pas couverts dans la présente Partie.

(5) C Pour les mâts d'éclairage ne relevant pas de l'EN 40, il convient de se reporter aux «Recommandations sur le calcul des structures de mâts d'éclairage de grands espaces», publiées dans la revue «Construction métallique» n° 00/4 disponible auprès du CTICM, BP 64, 78470 Saint Rémy-lès-Chevreuse.

(6) La présente Partie ne couvre pas les dispositions particulières concernant le calcul sismique, qui sont données dans l'ENV 1998-3.

(7) Les mesures particulières pouvant s'avérer nécessaires pour limiter les conséquences d'accidents ne sont pas couvertes dans la présente Partie. Pour la résistance au feu, il convient de se reporter à l'ENV 1993-1-2.

1.2 Distinction entre principes et règles d'application

(1)P En fonction du caractère de chaque alinéa, une distinction est faite dans la présente Partie entre principes et règles d'application.

(2)P Les principes comprennent :

- des déclarations générales ou définitives pour lesquelles il n'existe aucune alternative ;
- des exigences et des modèles analytiques qui n'admettent aucune alternative, sauf mention contraire.

(3) Les principes sont identifiés par la lettre P suivant le numéro d'alinéa.

(4)P Les règles d'application sont en général des règles reconnues qui suivent les principes et qui satisfont leurs exigences. On peut utiliser des règles de calcul alternatives différentes des règles d'application données dans l'Eurocode, à condition qu'il soit démontré que la règle alternative respecte les principes concernés et présente une fiabilité au moins identique.

(5) Dans la présente Partie, les règles d'application sont identifiées par un numéro entre parenthèses, comme dans le présent alinéa.

1.3 Références normatives

La présente Prénorme Européenne intègre, par référence datée ou non, des dispositions provenant d'autres publications. Ces références normatives sont citées aux endroits appropriés du texte et les publications sont indiquées ci-après. En ce qui concerne les références datées, les révisions ou amendements ultérieurs de ces publications ne s'appliquent à la présente Prénorme Européenne que lorsqu'ils y sont intégrés par amendement ou révision. Pour les références non datées, c'est l'édition la plus récente de la publication concernée qui s'applique.

ENV 1991, *Eurocode 1 : Bases de calcul et actions sur les structures* :

- Partie 1 : *Bases de calcul* ;
- Partie 2.1 : *Poids volumique, poids propre et charges d'exploitation* ;
- Partie 2.2 : *Actions sur les structures exposées au feu* ;
- Partie 2.3 : *Charges de neige* ;
- Partie 2.4 : *Actions du vent* ;
- Partie 2.5 : *Actions thermiques*.

ENV 1993, *Eurocode 3 : Calcul des structures en acier* :

- Partie 1.1 : *Règles générales : Règles générales et règles pour les bâtiments* ;
- Partie 1.2 : *Règles générales : Calcul du comportement au feu* ;
- Partie 1.3 : *Règles générales : Règles supplémentaires pour les profilés et plaques à parois minces formés à froid* ;
- Partie 1.4 : *Règles générales : Règles supplémentaires pour les aciers inoxydables* ;
- Partie 1.5 : *Règles générales : Règles supplémentaires pour les plaques planes, raidies ou non, chargées dans leur plan* ;
- Partie 1.6 : *Règles générales : Règles supplémentaires pour la résistance et la stabilité des structures en coque* ;
- Partie 1.7 : *Règles générales : Règles supplémentaires pour les plaques planes chargées hors de leur plan* ;
- Partie 3.2 : *Cheminées*.

ENV 1998, *Eurocode 8 : Conception et dimensionnement des structures pour leur résistance aux séismes*.

ENV 1090, *Exécution des structures en acier* .

ISO 1000, *Unités SI et recommandations concernant l'emploi de leurs multiples ainsi que de certaines autres unités*.

ISO 8930, *Principes généraux de fiabilité des constructions — Listes de termes équivalents*.

1.4 Définitions

- (1) Les termes qui sont définis dans l'ENV 1991-1 pour l'usage courant dans les Eurocodes Structuraux s'appliquent à la présente Partie 3.1 de l'ENV 1993.
- (2) Sauf indication contraire, les définitions données dans l'ISO 8930 s'appliquent également à cette Partie 3.1.
- (3) Dans le cadre de la présente Partie 3.1, outre celles données dans la Partie 1 de l'ENV 1993, les définitions suivantes s'appliquent.

1.4.1 analyse globale : Détermination d'un ensemble cohérent de sollicitations dans une structure, qui sont en équilibre avec un ensemble particulier d'actions s'exerçant sur cette structure.

1.5 Symboles

(1) Outre ceux donnés dans l'ENV 1993-1-1, les symboles principaux suivants sont utilisés :

G	Facteur de rafale
H	Charge horizontale
K	Facteur de longueur de flambement
N	Résistance au flambement d'un élément comprimé, nombre de cycles
P	Charge
R	Force / effort
f	Opacité
m	Pente
r	Intensité de force / d'effort
t	Épaisseur
w	Facteur de poids

(2) Outre ceux donnés dans l'ENV 1993-1-1, les indices suivants sont utilisés :

b	Boulon, longueur de panneau secondaire, flambement
c	Référence
d	Diagonale
dyn	Dynamique
F	Action
f	Fatigue
g	Haubans
i	Isolateurs
ice	Givre
j	Cornières boulonnées
o	Plastification, accumulation
red	Réduit
s	Facteur de concentration de contrainte
stat	Statique
vec	Effet vectoriel (résultante)
W	Vent

(3) Outre ceux donnés dans l'ENV 1993-1-1, les symboles grecs suivants sont utilisés :

Λ	Élancement réduit
α	Facteur d'imperfection, angle de cône
β	Facteur pour l'aire efficace
η	Facteur d'équivalence, coefficient réducteur
ρ	Facteurs pour l'aire efficace
τ	Rapport d'élancement fondamental
ϕ	Facteur de flambement, angle de frottement
ε	Coefficient

(4) D'autres symboles sont définis lors de leur première utilisation.

1.6 Unités

(1)P Les unités S.I. doivent être utilisées conformément à l'ISO 1000.

(2) L'utilisation des unités suivantes est recommandée pour les calculs :

- Forces et charges : kN, kN/m, kNm² ;
- masse volumique : kg/m³ ;
- poids volumique : kN/m³ ;
- contraintes et résistances : N/mm² (= MN/m² ou MPa) ;
- moments fléchissants : kNm ;
- moments de torsion : kNm.

1.7 Terminologie

Dans le cadre de la présente Partie 3.1, outre celle donnée dans la Partie 1 de l'ENV 1993, la terminologie suivante s'applique :

1.7.1 pylône : structure autoporteuse à treillis en acier de section droite rectangulaire ou triangulaire.

1.7.2 mât haubané : structure treillis en acier de section droite rectangulaire ou triangulaire, ou structure en acier cylindrique, stabilisée à différents niveaux sur sa hauteur par des haubans ancrés au sol.

1.7.2 C Les haubans ne sont pas nécessairement ancrés au sol (toiture-terrasse, château d'eau, etc.)

1.7.3 fût : structure verticale en acier d'un mât haubané.

1.7.4 membrures : éléments en acier constituant les éléments porteurs principaux de la structure.

1.7.5 contreventements principaux : éléments autres que les membrures, supportant des efforts provoqués par les charges appliquées sur la structure.

1.7.6 contreventements secondaires : éléments utilisés pour réduire la longueur de flambement d'autres éléments.

1.7.7 cornières «schifflerisées» : cornières à ailes égales à 90° modifiées, dont chaque aile a été pliée selon un angle de 15° de telle sorte qu'il existe un angle de 30° entre la partie extérieure de chaque aile et l'axe de symétrie.

1.7.8 traînée aérodynamique : résistance au vent offerte par les éléments d'un pylône ou d'un mât haubané ainsi que par tout équipement annexe qu'ils supportent, donnée par le produit du coefficient de traînée et d'une aire projetée de référence, givre compris le cas échéant.

1.7.9 équipement annexe linéaire : tout élément non structurel s'étendant sur plusieurs panneaux, tels les guides d'ondes, descentes de câbles, échelles et canalisations.

1.7.10 équipement annexe discontinu : tout élément non structurel concentré à l'intérieur de quelques panneaux, tels les réflecteurs paraboliques, antennes, éclairages et isolateurs.

1.7.10 C La liste n'est pas exhaustive : paliers, garde-corps, etc.

1.7.11 aire projetée : aire de l'élément considéré projetée sur une élévation parallèle à la face de la structure considérée, givre compris le cas échéant. Pour le vent soufflant dans une direction autre que perpendiculaire à l'une des faces de la structure, on utilise une face de référence pour l'aire projetée (voir annexe A et annexe B).

1.7.11 I **aire projetée** : se reporter à l'annexe A.

1.7.12 tronçon (d'un pylône ou d'un mât haubané) : toute partie d'un pylône ou d'un mât haubané subdivisé verticalement dans le but de déterminer les aires projetées et la traînée aérodynamique. Les tronçons sont souvent, mais pas nécessairement, compris entre des intersections de membrures et de contreventements principaux.

1.7.13 sous-ensemble (d'un pylône ou d'un mât haubané) : toute partie d'un pylône ou d'un mât haubané comprenant plusieurs tronçons presque ou exactement semblables, utilisée dans le but de déterminer la traînée aérodynamique.

1.7.14 hauban : élément travaillant en traction, assemblé à chaque extrémité à des terminaisons et formant un ensemble constituant un appui pour le mât haubané à un niveau donné. L'extrémité inférieure du hauban est ancrée au sol et comporte en général un dispositif de réglage de la tension du hauban.

1.7.14 C Les haubans ne sont pas nécessairement ancrés au sol (toiture-terrasse, château d'eau, etc.)

NOTE 1 Bien que les termes «tirant» et «hauban» soient en général interchangeables, le mot «hauban» est utilisé tout au long du présent document.

NOTE 2 Des définitions spécifiques de haubans, leurs compositions et équipements, sont données dans l'annexe C.

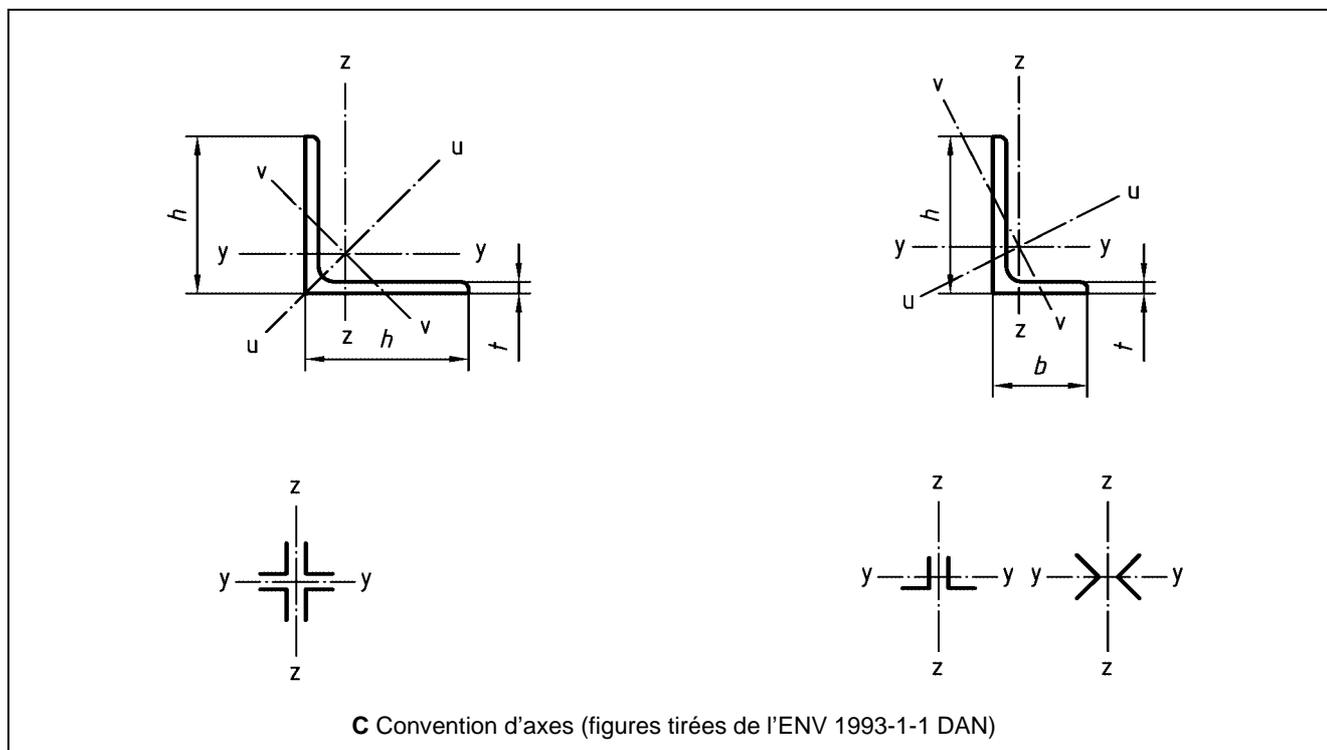
1.7.15 amortisseur : dispositif augmentant l'amortissement d'une structure ou limitant la réponse d'une structure ou d'un hauban.

1.8 Convention concernant les axes des sections transversales

(1) La convention concernant les axes des cornières adoptée dans la présente partie de l'ENV 1993 est celle indiquée à la figure 1.1 de l'ENV 1993-1-1.

NOTE Ceci évite la confusion inhérente à l'adoption de conventions différentes pour les cornières laminées à chaud et pour les cornières formées à froid.

(2) Pour les éléments reconstitués, la convention d'axes est celle de la figure 5.9.5 de l'ENV 1993-1-1.



2 Bases de calcul

2.1 Généralités

(1)P Les bases de calcul doivent être conformes aux dispositions de l'ENV 1991-1.

2.2 Hypothèses

(1)P Les hypothèses spécifiées dans l'ENV 1991-1 s'appliquent à la présente Partie 3.1 de l'ENV 1993.

2.3 Différentiation des classes de fiabilité

(1) Différents niveaux de fiabilité peuvent être adoptés dans le calcul des pylônes et des mâts haubanés, en fonction des conséquences économiques et sociales éventuelles de leur effondrement.

(2) Trois classes de fiabilité liées aux conséquences d'une ruine de la structure sont utilisées dans la présente Partie, élevée (classe 3), normale (classe 2) et réduite (classe 1). En fonction de la classe de fiabilité, différents facteurs de sécurité sont donnés pour les états limites ultime et de service :

— **Fiabilité élevée** (classe 3) : Pylônes et mâts haubanés érigés dans des zones urbaines, où leur ruine est susceptible d'entraîner des blessures ou des pertes humaines ; pylônes et mâts haubanés utilisés pour des installations de télécommunication vitales ; autres structures importantes où les conséquences prévisibles d'une ruine seraient considérables.

— **Fiabilité normale** (classe 2) : Pylônes de radiocommunications et d'éclairage situés sur des sites habités ; pylônes et mâts haubanés situés au voisinage immédiat de voies ferrées ou de routes principales ; tous autres pylônes et mâts haubanés ne pouvant entrer dans les classes 1 ou 3.

— **Fiabilité réduite** (classe 1) : Pylônes et mâts haubanés construits sur des sites inhabités en zone rurale ouverte ; pylônes et mâts haubanés dont la ruine ne risquerait pas d'entraîner des blessures de personnes.

(3) Il convient que le choix de classe de fiabilité fasse l'objet d'un accord entre le concepteur, le client et l'autorité compétente.

(3) A Il appartient au maître de l'ouvrage de définir la classe de fiabilité à prendre en compte ainsi que la durée de vie escomptée de l'ouvrage.

2.4 Exigences fondamentales

(1)P Tous les pylônes et mâts haubanés doivent être calculés de telle sorte qu'ils soient capables, sous réserve qu'ils soient convenablement construits et entretenus, de satisfaire les exigences fondamentales spécifiées dans l'ENV 1991-1.

(2)P En outre, les mâts haubanés de fiabilité élevée (classe 3) doivent être calculés pour résister à la rupture de l'un des haubans sans s'effondrer.

(3) Il convient que ce calcul soit effectué en considérant les deux conditions suivantes :

— une charge dynamique appliquée sur le mât haubané dans des conditions atmosphériques calmes, pour simuler la rupture du hauban ;

— une analyse statique sous vitesse de vent réduite en l'absence du hauban rompu.

NOTE Des directives sont données dans l'annexe D.

(4) Il convient que les détails de ces vérifications fassent l'objet d'un accord entre le concepteur, le client et l'autorité compétente.

(4) A Il appartient au maître de l'ouvrage de préciser dans les spécifications techniques du projet s'il autorise l'utilisation de la méthode simplifiée D4
--

2.5 Actions et influences de l'environnement

2.5.1 Actions du vent

(1)P Du fait que les actions de vent spécifiées dans l'ENV 1991-2-4 ne fournissent pas toutes les informations spécifiques nécessaires au calcul de structures flexibles de type pylônes et mâts haubanés, qui sont particulièrement sensibles aux actions du vent, les données de vent fondamentales données dans l'ENV 1991-2-4 doivent être complétées par les règles supplémentaires données dans l'annexe A.

(1) C On rappelle la possibilité de déterminer les actions du vent, quelle que soit sa direction, à partir d'une catégorie de terrain unique conduisant aux effets les plus défavorables.

2.5.2 Charges de givre

(1)P Pour les pylônes et les mâts haubanés susceptibles d'être soumis à une charge de givre, les épaisseurs, les densités et les répartitions de givre appropriées doivent être déterminées d'après l'ISO ... [en cours d'élaboration par l'ISO TC98/SC3/WG6].

NOTE Des directives sont données dans l'annexe B.

(2)P Des combinaisons d'actions de vent et de charges de givre doivent également être prises en compte le cas échéant.

(3) Il convient d'utiliser les facteurs de combinaison appropriés, qui dépendent de la fréquence de la formation de givre, au lieu des règles de combinaison générales données dans l'ENV 1991-1.

NOTE Des directives sont données dans l'annexe B.

2.5.3 Actions thermiques

(1)P Les actions thermiques doivent être déterminées au moyen de l'ENV 1991-2-5.

(1) C Se reporter également à C.2.3 (annexe C) pour le cas des mâts haubanés.

2.5.4 Charges permanentes

(1)P Les charges permanentes doivent être déterminées conformément à l'ENV 1991-2-1.

2.5.5 Charges d'exploitation

(1)P Les éléments disposés selon un angle maximum de [30°] avec l'horizontale doivent être calculés pour supporter le poids d'une personne inspectant la structure, qui, dans ce but, peut être pris égal à une charge verticale concentrée de 1 kN.

(1) C Les charges d'exploitation comprennent également :

- les charges sur paliers, plates-formes et garde-corps ;
- les éventuelles charges ponctuelles liées à l'exploitation de l'ouvrage.

Ces valeurs sont définies par le maître de l'ouvrage dans les spécifications techniques du projet.

À défaut d'autres indications mentionnées dans les spécifications du projet, les plates-formes seront calculées avec une charge d'exploitation de 2,5 kN/m².

2.5.6 Autres actions

(1)P Les actions accidentelles et de collision ne doivent être prises en compte que si cela est exigé dans le cahier des charges du projet.

(2) Il convient de considérer les actions survenant en cours d'exécution en prenant dûment en compte le système de construction et la durée limitée d'exposition.

(3) Pour les pylônes en treillis reposant sur des fondations individuelles pour chaque membrure, il convient de prendre en compte les actions provoquées par les tassements différentiels et, pour les structures haubanées, celles provoquées par le tassement différentiel entre la base du mât haubané et les massifs d'ancrage des haubans.

A (4) Il convient de prendre en compte les actions résultant de l'utilisation de moyens d'accès permanents dont l'implantation est précisée dans les spécifications du projet et matérialisée sur l'ouvrage. La valeur de ces actions doit respecter les prescriptions des règles et normes en vigueur.

2.5.7 Répartition des actions

(1) Il est nécessaire de prendre en compte les effets des charges réparties sur la longueur des éléments et les effets des charges provoquées par le vent ou par les charges permanentes s'exerçant sur d'autres éléments assemblés sur l'élément considéré ; de telles charges peuvent entraîner une flexion significative dans l'élément considéré.

(1) C La prise en compte des effets mentionnés peut intervenir dans une vérification locale des éléments, à l'issue d'une analyse globale en considérant les charges appliquées aux nœuds.

2.6 Dimensionnement assisté par des essais

(1)P Les exigences spécifiées dans la Section 8 de l'ENV 1991-1 doivent être satisfaites, conjointement avec les exigences spécifiques données dans la Section 8 de la présente Partie 3.1 de l'ENV 1993.

(2) Pour les pylônes « standard » construits en cornières et soumis à des essais à échelle réelle, les critères modifiés pour la vérification par calculs donnés dans la Section 5 de la présente Partie 3.1 de l'ENV 1993 peuvent être adoptés, sous réserve de l'accord du concepteur, du client et de l'autorité compétente.

(2) I cf (24) invalidé de l'avant-propos.

2.7 Dimensionnement par calculs

(1)P Pour les vérifications aux états limites ultimes, la méthode par coefficients partiels spécifiée dans la Section 9 de l'ENV 1991-1 doit être utilisée.

(2)P Pour les situations de calcul durables et transitoires, les coefficients partiels pour les actions donnés dans le tableau 2.1 doivent être utilisés pour les actions spécifiées dans l'ENV 1991-2.

(2) C Ces coefficients partiels correspondent aux vérifications à l'E.L.U.

Tableau 2.1 — Coefficients partiels pour les actions pour les situations de calcul durables et transitoires.

Tableau 2.1 A Compte tenu de l'effet très prépondérant des actions de vent et des valeurs des coefficients donnés au tableau 2.1, l'usage des combinaisons simplifiées de l'ENV 1993-1-1 n'est pas autorisé.

Type d'effet	Classe de fiabilité	Actions permanentes	Actions variables
Défavorable	Élevée (3)	1,2	1,6
	Normale (2)	1,1	1,4
	Réduite (1)	1,0	1,2
Favorable	Toutes	0,9	0,0

(3) Dans le cas d'actions particulières pour d'autres situations de calcul appropriées aux pylônes «standard», il convient que des coefficients partiels fassent l'objet d'un accord entre le concepteur, le client et l'autorité compétente.

(3) I cf (24) invalidé de l'avant-propos

(4) Pour les situations de calcul accidentelles, il convient de prendre les coefficients partiels pour les actions variables égaux à $1,0$.

(5) Lorsque les composantes d'un effet vectoriel peuvent varier indépendamment, il convient de multiplier les composantes favorables par un coefficient réducteur :

$$\psi_{vec} = 0,8$$

(6) Lorsque l'on utilise des analyses de réponse dynamique (voir annexe A), il convient de prendre le coefficient partiel pour les actions permanentes égal à $1,0$ pour tous les calculs.

(7) Il convient d'augmenter le coefficient partiel pour les actions permanentes résultant du poids propre des équipements annexes, comme les échelles, les plates-formes, les chemins de câbles et les antennes, à partir de valeurs données dans le tableau 2.1 si nécessaire lorsque l'on ne dispose pas d'informations spécifiques sur ces éléments lors de la phase de calcul.

(8) Il convient de prendre le coefficient partiel pour les tensions initiales dans les haubans égal à $1,0$ pour tous les calculs.

(9) Il convient de prendre les coefficients partiels pour la résistance comme spécifié dans les Sections 5, 6, 8 ou 9, selon le cas.

(10) A Pour les E.L.S. on utilise la combinaison d'actions rare, pour laquelle tous les coefficients partiels de sécurité sont égaux à $1,0$.

3 Matériaux

3.1 Acier de construction

(1) Pour les exigences et les caractéristiques concernant l'acier de construction, voir 3.2 et annexe D de l'ENV 1993-1-1.

3.2 Moyens d'assemblage

(1) Pour les exigences et les caractéristiques concernant les boulons et les produits d'apport de soudage, voir 3.3 de l'ENV 1993-1-1.

3.3 Haubans et accessoires

(1) Pour les haubans et accessoires, voir annexe C.

4 États limites de service

4.1 Bases

- (1)P Les états limites de service suivants doivent être pris en compte pour les pylônes et mâts haubanés :
- déformations ou flèches altérant l'utilisation effective de la structure, y compris le bon fonctionnement d'antennes ou de services ;
 - vibration, oscillation ou défaut d'aplomb entraînant la perte de signaux transmis ;
 - déformations, flèches, vibration, oscillation ou défaut d'aplomb provoquant une détérioration d'éléments non structuraux.
- (2) Il convient que les déformations, flèches et vibrations soient limitées afin d'éviter de franchir ces limites.
- (3) Il convient que les valeurs limites fassent l'objet d'un accord entre le concepteur, le client et l'autorité compétente.

(3) **A** Il convient que les valeurs limites soient définies par le maître de l'ouvrage dans les spécifications du projet.

4.2 Déplacements

4.2.1 Exigences

- (1)P Les pylônes et les mâts haubanés doivent être dimensionnés de telle sorte que les déplacements restent dans les limites appropriées à l'utilisation prévue de la structure.
- (2) Il convient de déterminer les déplacements au moyen de la combinaison d'actions caractéristique (rare) s'exerçant sur la structure et ses équipements.
- (3) Il convient de calculer les déplacements en prenant convenablement en compte tous effets du second ordre éventuels.

(3) **C** Les effets du second ordre peuvent généralement être négligés pour le calcul des déplacements des pylônes autostables.

4.2.2 Valeurs limites

- (1) Il convient que les valeurs limites appropriées, prenant en compte les exigences concernant les antennes et la nature des matériels à supporter, fasse l'objet d'un accord entre le concepteur, le client et l'autorité compétente.

NOTE Des limites très strictes peuvent être nécessaires pour l'utilisation de certaines structures de télécommunications.

(1) **A** Il convient que les valeurs limites soient définies par le maître de l'ouvrage dans les spécifications du projet. Sauf indication contraire, la flèche en tête sera limitée à $h/150$.

- (2) Pour les structures d'éclairage et de radiodiffusion, les valeurs limites à considérer sont celles concernant la flèche latérale et la rotation à la partie supérieure de la structure.

(2) **C** Cette règle d'application concerne également les structures de télécommunications. Le critère de limitation de la rotation (ou dépointage) peut être défini à tout niveau spécifié par le maître de l'ouvrage, en site et/ou en azimut.

(3) Dans les cas où des valeurs de flèches ou de rotations doivent être respectées pendant une fraction de temps donnée, il convient de spécifier le nombre d'heures pendant lesquelles les valeurs limites peuvent être dépassées.

(3) **I** Invalidé

4.3 Effets dynamiques

(1)P Les effets de toutes les oscillations induites par le vent et provoquées par une résonance harmonique, en raison de carénages ou d'éléments cylindriques ou encore d'instabilités de câbles, doivent être pris en compte (voir annexe A de l'ENV 1991-2-4 et annexe A de l'ENV 1993-3-2).

(1) C Au titre des états-limites de service, il convient de vérifier que ces oscillations ne génèrent pas de dysfonctionnement des équipements portés, ni de trouble pour le voisinage.

Les effets dynamiques doivent également être pris en compte au titre des états-limites ultimes de résistance et de fatigue : voir chapitres correspondants.

Les annexes de l'ENV 1991-2-4 à consulter sont les annexes B et C, et non l'annexe A.

(2) Il convient que les pylônes et les mâts haubanés fassent l'objet d'une étude concernant :

- les vibrations induites par les rafales ;
- les vibrations induites par les détachements tourbillonnaires.

(2) C Par «vibrations induites par les rafales», on entend : vibrations dans la direction du vent. Par «vibrations induites par les détachements tourbillonnaires», on entend : vibrations perpendiculaires à la direction du vent.

(3) Lorsque l'on prévoit que des pylônes et des mâts haubanés en treillis peuvent être soumis à des vibrations induites par le vent, et sauf si d'autres mesures sont prises dans la conception en vue de la réduction de ces vibrations, il convient que des dispositions soient prises pour l'installation de dispositifs amortisseurs si cela s'avère nécessaire à la lumière de l'expérience, voir annexe B de l'ENV 1993-3-2.

(3) C Pour les pylônes treillis, les seuls cas où des vibrations d'ensemble perpendiculaires à la direction du vent sont à considérer sont les cas où la structure est habillée d'un carénage cylindrique (radôme).

Il convient de s'assurer que les vibrations locales de barres de treillis entre nœuds sont maîtrisées. Voir 9.2.3(1) C.

5 États limites ultimes

5.1 Bases

5.1.1 Généralités

(1)P Les structures en acier et leurs composants doivent être dimensionnés de telle sorte que les exigences de calcul fondamentales pour l'état limite ultime données dans la Section 2 soient satisfaites.

(2)P Le coefficient partiel γ_M doit en général être pris égal aux valeurs suivantes :

— résistance de l'élément à la plastification : $\gamma_{M0} = 1,00$

(2) I Il convient de retenir (selon l'ENV 1993-1-1 DAN) :

$\gamma_{M0} = 1,0$ si les produits en acier utilisés bénéficient de la marque NF Acier

$\gamma_{M0} = 1,1$ dans les autres cas.

- résistance de l'élément aux instabilités : $\gamma_{M1} = 1,10$
- résistance de section nette au niveau des trous de boulons : $\gamma_{Mb} = 1,25$
- résistance des assemblages : voir Section 6
- résistance des haubans et de leurs terminaisons : $\gamma_{Mg} = 2,00$
- résistance du matériau des isolateurs : $\gamma_{Mi} = 2,50$

(2) **A** Le coefficient partiel γ_{Mg} est applicable à tous les éléments de la chaîne de haubanage situés entre la terminaison haute et la terminaison basse

(3) Pour les pylônes en cornières devant subir des essais-types, ou lorsque des configurations similaires ont antérieurement subi des essais-types, tous avec l'accord spécifique du concepteur, du client et de l'autorité compétente, le coefficient partiel γ_{M1} pour le flambement des éléments peut être pris égal à 1,0, voir 5.5.

(3) **I** cf. (24) invalidé de l'avant-propos

5.2 Calcul des sollicitations

5.2.1 Analyse globale

5.2.1.1 Méthodes d'analyse

(1)P Les sollicitations doivent être déterminées au moyen d'une analyse globale élastique.

5.2.1.2 Effets des déformations

(1)P Les sollicitations doivent en général être déterminées par l'une des méthodes suivantes :

— théorie du premier ordre, utilisant la géométrie initiale de la structure ;

— théorie du second ordre, prenant en compte l'influence de la déformation de la structure.

(2)P La théorie du premier ordre peut être utilisée pour l'analyse globale des pylônes en treillis.

(3)P La théorie du second ordre doit être utilisée pour l'analyse globale des mâts haubanés.

(4)P En outre, l'analyse globale d'un mât haubané doit prendre en compte le comportement non linéaire des haubans.

5.2.1.3 Analyse globale élastique

(1)P L'analyse globale élastique doit être fondée sur l'hypothèse que le comportement contrainte-déformation du matériau est linéaire quel que soit le niveau de contraintes.

(2)P On peut utiliser des caractéristiques de section transversale brute. Cette hypothèse peut être retenue pour l'analyse élastique au premier ordre ainsi qu'au second ordre.

(3)P Lors de l'analyse de structures existantes, il faut veiller à s'assurer que l'on utilise des caractéristiques appropriées.

(4)P Les caractéristiques de déformation des fondations doivent être prises en compte dans le choix du modèle de structure.

(4) **C** À défaut, il convient de vérifier a posteriori que le dimensionnement de la fondation permet de respecter l'hypothèse retenue pour l'analyse globale du pylône ou du mât.

(5)P Les hypothèses de calcul des assemblages doivent satisfaire les exigences spécifiées dans la Section 6.

(6) Pour l'analyse globale, il convient de s'assurer que la hauteur du pylône ou du mât haubané est subdivisée en un nombre suffisant de sections pour obtenir une modélisation représentative de la structure.

A 5.2.1.4 Flambement d'ensemble des mâts haubanés

(1)P Dans le calcul des mâts haubanés, il convient de prendre en compte le flambement global du fût

5.2.2 Hypothèses de calcul

5.2.2.1 Bases

(1)P Les hypothèses prises pour l'analyse globale de la structure doivent être cohérentes avec le type de comportement prévu des assemblages.

(2)P Les hypothèses prises pour le calcul des éléments doivent être cohérentes avec la méthode utilisée pour l'analyse globale (ou présenter une marge de sécurité par rapport à elle) et avec le type de comportement prévu des assemblages.

NOTE La procédure d'analyse des assemblages est donnée en 6.1.

(2) **C** Selon la note, se reporter en 6.1.4 (qui ne fait que renvoyer à 6.4 de l'ENV 1993-1-1 DAN).

(3)P Il doit être vérifié que l'état limite de transformation de la structure en mécanisme n'est pas atteint pour des valeurs d'actions inférieures ou égales aux valeurs de calcul. Dans ce calcul, les valeurs de calcul respectives de toutes les caractéristiques de structure, en particulier la rigidité des contreventements, doivent être prises en compte.

5.2.2.2 Ossature réticulée

(1) Dans la modélisation en structure réticulée, les assemblages entre les éléments peuvent être considérés comme ne développant pas de moments. Dans l'analyse globale, les éléments peuvent être considérés comme pourvus d'assemblages effectivement articulés.

(1) **C** Lorsqu'un pylône ou un fût en treillis fait l'objet d'une analyse globale sur modèle 3 D, les membrures sont généralement modélisées en barres continues et les barres de treillis articulées sur les membrures. L'analyse globale donne alors accès à des moments de flexion dans les membrures.

Lorsque l'analyse globale est réalisée sur un modèle unifilaire (barre unique équivalente), une attention particulière doit être portée à l'estimation de ces moments, notamment au droit des changements de pente éventuels des membrures.

(2) Il convient que les assemblages satisfassent les exigences concernant les assemblages nominalelement articulés, selon :

- 6.4.2.1 de l'ENV 1993-1-1 ;
- 6.4.3.1 de l'ENV 1993-1-1.

5.2.2.3 Ossature continue

(1) Il convient que l'analyse élastique soit fondée sur l'hypothèse d'une continuité totale, avec des assemblages rigides satisfaisant les exigences données en 6.4.2.2 de l'ENV 1993-1-1.

5.2.2.4 Ossature semi-continue

(1) Il convient que l'analyse élastique soit fondée sur une prévision fiable des relations moment-rotation ou effort-déplacement caractérisant les assemblages utilisés.

5.2.2.5 Répartition des actions

(1) Il convient de prendre convenablement en compte les effets des charges réparties (voir 2.5.7) dans le calcul des sollicitations.

5.3 Classification des sections transversales

(1)P Pour les pylônes et les mâts haubanés, les sections transversales de classe 1 ou de classe 2 (selon les définitions données en 5.3 de l'ENV 1993-1-1) doivent être limitées à un comportement élastique.

(1) **A** L'utilisation des caractéristiques plastiques des sections de classes 1 et 2 est admise.

5.4 Résistance des sections transversales

5.4.1 Éléments de mâts haubanés et pylônes en treillis

(1)P La résistance des sections transversales d'éléments de mâts haubanés et de pylônes en treillis doit être déterminée conformément aux exigences de 5.4 de l'ENV 1993-1-1.

NOTE La résistance de sections transversales comprimées ou soumises à une combinaison compression-flexion est couverte par la résistance de l'élément déterminée selon 5.5.

(2) Pour les cornières assemblées par une seule aile, des dispositions particulières sont données suivant 6.5.2.3 de l'ENV 1993-1-1 (assemblage boulonné) ou 6.6.10 (assemblage soudé).

(3)P Les éléments soumis à une traction axiale doivent être vérifiés en ce qui concerne :

— la résistance plastique de la section transversale brute ;

— la résistance ultime de la section transversale nette ;

conformément à 5.4.2 et à 5.4.3 de l'ENV 1993-1-1.

(4) Afin de prendre en compte les imperfections des membrures et de calculer les éléments secondaires, il convient d'introduire une force équivalente agissant transversalement à l'élément stabilisé, au niveau du nœud d'assemblage de l'élément secondaire. Voir 5.9(1) à 5.9(7).

5.4.2 Haubans et accessoires

(1) Pour la résistance des haubans et accessoires, voir annexe C.

5.4.3 Structures en coques

(1)P La résistance et la stabilité des structures en coques doivent être déterminées selon l'ENV 1993-1-6.

5.5 Résistance **au flambement** des éléments

5.5 I Cela ne concerne pas seulement le flambement.
--

5.5.1 Éléments comprimés

(1)P La résistance de calcul au flambement d'un élément comprimé d'un mât haubané ou d'un pylône en treillis doit être prise égale à :

$$N_{b,Rd} = \eta_j \chi \beta_A A f_y / \gamma_{M1} \quad \dots (5.1)$$

où :

η_j = 0,8 pour les cornières simples assemblées par un seul boulon à chaque extrémité ;

= 0,9 pour les cornières simples assemblées par un seul boulon à une extrémité et continues à l'autre extrémité ;

= 1,0 dans tous les autres cas ;

χ est le coefficient réducteur pour le mode de flambement approprié donné ci-dessous ;

β_A = 1 pour les sections transversales de classes 1, 2 ou 3 ;

β_A = A_{eff} / A pour les sections transversales de classe 4 ;

A est l'aire de la section transversale brute.

(1) C Pour les éléments faiblement élancés ($\lambda_e < 0,2$), la vérification au flambement n'est pas nécessaire.
--

(2) D'une manière générale, il convient d'utiliser la classification donnée en 5.3.2 de l'ENV 1993-1-1. Pour les sections transversales de classe 4, il convient normalement de calculer A_{eff} selon 5.3.5 de l'ENV 1993-1-1. Cependant, pour les cornières il convient de calculer A_{eff} au moyen de l'expression :

$$A_{\text{eff}} = A - (1 - \rho_1) t b_{p1} - (1 - \rho_2) t b_{p2} \quad \dots (5.2)$$

avec :

$$b_{p1} = h - 2t \quad \dots (5.3a)$$

$$b_{p2} = b - 2t \quad \dots (5.3b)$$

$$\rho_1 = 1 \text{ lorsque } \Lambda_{p1} \leq 0,673 \quad \dots (5.3c)$$

$$\rho_1 = (\Lambda_{p1} - 0,22) / \Lambda_{p1}^2 \text{ lorsque } \Lambda_{p1} > 0,673 \quad \dots (5.3d)$$

$$\rho_2 = 1 \text{ lorsque } \Lambda_{p2} \leq 0,673 \quad \dots (5.3e)$$

$$\rho_2 = (\Lambda_{p2} - 0,22) / \Lambda_{p2}^2 \text{ lorsque } \Lambda_{p2} > 0,673 \quad \dots (5.3f)$$

$$\Lambda_{p1} = (b_{p1} / t) (0,054 / \varepsilon) \quad \dots (5.3g)$$

$$\Lambda_{p2} = (b_{p2} / t) (0,054 / \varepsilon) \quad \dots (5.3h)$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad \dots (5.3i)$$

NOTE Dans le cas de cornières assemblées par une seule aile, le coefficient réducteur ρ ne s'applique qu'à l'aile assemblée.

(3) Pour une compression axiale constante s'exerçant dans des éléments de section transversale constante, la valeur de χ pour l'élançement réduit approprié Λ_e peut être déterminée par l'expression :

$$\chi = \frac{1}{\phi + [\phi^2 - \Lambda_e^2]^{0,5}} \text{ mais } \chi \leq 1 \quad \dots (5.4)$$

avec :

$$\phi = 0,5 [1 + \alpha (\Lambda_e - 0,2) + \Lambda_e^2] \quad \dots (5.5a)$$

$$\Lambda_e = k\Lambda \quad \dots (5.5b)$$

$$\Lambda = (\lambda / \lambda_1) (\beta_A)^{0,5} \quad \dots (5.5c)$$

$$\lambda_1 = \pi [E / f_y]^{0,5} \quad \dots (5.5d)$$

où :

α est le facteur d'imperfection ;

λ est l'élançement pour le mode de flambement approprié obtenu selon 5.6 ;

k est le facteur d'élançement efficace obtenu selon 5.7.

(4)P Le facteur d'imperfection α correspondant à la courbe de flambement appropriée (voir 5.8.1) doit être pris dans le tableau 5.1.

Tableau 5.1 — Facteurs d'imperfection α

Courbe de flambement	a	b	c	d
Facteur d'imperfection α	0,21	0,34	0,49	0,76

- (5) Pour les éléments minces formés à froid, voir ENV 1993-1-3.
- (6) Pour les cas de faible élancement, il convient de vérifier le mode par torsion ou par flexion-torsion. Il convient de se reporter à 6.2.3 de l'ENV 1993-1-3.

Pour les cornières à ailes égales lorsque :

$$\Lambda < \frac{5b_p}{\lambda_1 t} \quad \dots (5.6)$$

l'élancement réduit Λ peut être évalué comme :

$$\Lambda = \frac{b_p}{t} \sqrt{\frac{2,6f_y \beta_A}{E}} \quad \dots (5.7)$$

(6) **C** Si l'élancement réduit de l'élément considéré, constitué d'une cornière à ailes égales, est inférieur à $\frac{5b_p}{\lambda_1 t}$, c'est le flambement local de l'aile qui l'emporte. L'élément est alors vérifié en compression avec l'élancement réduit donné par (5.7).

5.5.2 Déversement des poutres

(1)P Le moment résistant de calcul au déversement d'une poutre non tenue latéralement doit être déterminé conformément à 5.5.2 de l'ENV 1993-1-1.

5.5.3 Flexion et traction axiale

(1)P Les dispositions de 5.5.3 de l'ENV 1993-1-1 doivent être respectées.

(2) En particulier, il convient de prendre en compte ces dispositions dans les cas où les excentremets suivants ne peuvent être évités :

- assemblage de 3 éléments ou plus avec des axes non concordants (sauf pour le cas de rond plein soudé continu illustré dans le tableau 5.7.2) ;
- joint à recouvrement simple de deux cornières (avec un seul ou plusieurs boulons dans chaque aile — voir, par exemple, le joint à recouvrement de la figure 6.5.11 de l'ENV 1993-1-1).

(2) **C** Le tableau à consulter est le tableau 5.3 inséré en 5.7.

(3) Il convient de traiter les cas d'excentrement d'extrémité rencontrés dans les cornières simples assemblées par une seule aile, avec un ou plusieurs boulons, conformément aux dispositions données en 5.4.1.

(4) Il convient de prendre en compte les contraintes de flexion provoquées dans les éléments par les charges locales réparties, telles que le vent.

5.5.4 Flexion et compression axiale

(1)P Les dispositions de 5.5.4 de l'ENV 1993-1-1 doivent être respectées, en prenant dûment en compte 5.5.1 ci-dessus pour la détermination des coefficients réducteurs χ_y et χ_z appropriés.

(2) En particulier, il convient de prendre en compte ces dispositions dans les cas où les excentremets suivants ne peuvent être évités :

- assemblage de 3 éléments ou plus avec des axes non convergents (sauf pour le cas de rond plein soudé continu illustré dans le tableau 5.7.2) ;
- joint à recouvrement simple de deux cornières (avec un seul ou plusieurs boulons dans chaque aile — voir, par exemple, le joint à recouvrement de la figure 6.5.11 de l'ENV 1993-1-1).

(2) **C** Le tableau à consulter est le tableau 5.3 inséré en 5.7.

(3) Il convient de traiter les cas d'excentrement d'extrémité rencontrés dans les cornières simples assemblées par une seule aile, avec un ou plusieurs boulons, conformément aux dispositions données en 5.4.1.

(4) Il convient de prendre en compte les contraintes de flexion provoquées dans les éléments par les charges locales réparties, telles que le vent.

A 5.5.5 Flambement global du fût en treillis d'un mât haubané

Le flambement global du fût est à considérer.

Pour les fûts treillis, outre le flambement individuel des éléments constituant le fût, le flambement global du fût doit être pris en compte selon les prescriptions de 5.9 de l'EC3-1-1 DAN.

5.6 Longueur de flambement des éléments

5.6.1 Généralités

(1)P L'élançement λ pour le mode de flambement approprié doit être déterminé selon 5.6.2 et 5.6.3.

(2) Il convient de considérer séparément chacune des différentes configurations utilisées couramment dans les pylônes en treillis et les mâts haubanés.

(3) Il convient de déterminer la longueur de flambement des éléments en prenant en compte le type de contreventement utilisé pour stabiliser l'élément considéré.

A (4) Dans le paragraphe 5.6, les termes «longueur de flambement», «longueur d'épure», «longueur critique d'épure», désignent la même grandeur : il s'agit de la longueur de flambement de l'élément visé avant correction éventuelle par le facteur d'élançement efficace k défini en 5.7.

Les valeurs limites d'élançement fixées en 5.6 s'appliquent à l'élançement et non à l'élançement réduit.

5.6.2 Membrures

5.6.2.1 Généralités

(1) Il convient que l'élançement des membrures ne soit généralement pas supérieur à 120.

5.6.2.2 Éléments simples

(1) Il convient de respecter les règles suivantes pour les cornières simples, profils tubulaires ou ronds pleins utilisés comme membrures. Pour les membrures soumises à une compression axiale et contreventées symétriquement dans deux plans normaux ou dans des plans à 60° dans le cas de structures triangulaires, il convient de déterminer l'élançement à partir de la longueur d'épure entre nœuds.

(2) Lorsque le contreventement est alterné en deux plans normaux ou en plans à 60° dans le cas de structures triangulaires, il convient de prendre la longueur d'épure égale à la longueur entre nœuds sur une face. Pour les cornières, il convient d'utiliser le rayon de giration selon l'axe de faible inertie pour calculer l'élançement. Lorsque l'on utilise des cornières, afin de compenser la flexion déviée, il convient de réduire en conséquence la résistance au flambement pour le cas illustré dans la figure 5.1(1), voir 5.7.

(2) I Dans un pylône à section rectangulaire avec contreventement alterné, (voir figure 5.1, cas 1) il convient de déterminer l'élançement conformément au tableau 5.2.

Dans un pylône à section triangulaire avec contreventement alterné, il convient de déterminer l'élançement à partir de la longueur d'épure sur une face avec le rayon de giration minimal, sauf indication particulière.

5.6.2.3 Éléments composés

(1) Les éléments composés destinés aux membrures peuvent être formés de deux cornières en croix, et il convient alors de respecter les dispositions de 5.9.4 et 5.9.5 de l'ENV 1993-1-1, **sauf comme indiqué en (2)**.

(1) I (2) est invalidé.

(2) Dans le cas de cornières à barrettes en croix avec deux barrettes (voir figures 5.9.7 de l'ENV 1993-1-1) il convient de mesurer la longueur d'épure entre les points médians de la paire de barrettes. Lorsqu'une seule barrette est utilisée au niveau de chaque assemblage, alternativement dans chaque direction, il convient de mesurer la longueur d'épure entre les barrettes alignées et de se baser sur le rayon de giration minimal i_{vv} pour l'élanement.

(2) I Les dispositions à respecter sont selon 5.9.4 et 5.9.5. de l'ENV 1993-1-1.

(3) Il convient que les éléments composés destinés aux membrures et formés de deux cornières dos à dos satisfassent les exigences de 5.6.3.13.

(4) Il convient que les barrettes empêchent tout glissement relatif des deux cornières. Si l'on utilise des assemblages boulonnés de catégories A et B, voir 6.5.3.1 de l'ENV 1993-1-1, il convient de réduire le diamètre des trous de boulons en fonction des exigences de l'autorité compétente.

(4) C Se reporter à 7.5.(3)A.

5.6.3 Contreventements

5.6.3.1 Généralités

(1) Il convient d'utiliser les règles suivantes pour les systèmes de contreventement principaux types illustrés dans la figure 5.1. Des contreventements secondaires peuvent être utilisés pour subdiviser le contreventement principal ou les membrures principales comme illustré, par exemple, dans les figures 5.1 (IA, IIA, IIIA, IVA) et 5.2.

(2) Il convient que l'élanement λ ne soit généralement pas supérieur à 180 pour les éléments de contreventement principaux, et à 240 pour les contreventements secondaires. Pour un contreventement en treillis multiple (figure 5.1(V)) il convient que l'élanement global ne soit pas supérieur à 350.

NOTE Des élanements élevés peuvent entraîner l'apparition de vibrations dans certains éléments et peut les rendre vulnérables à des détériorations dues à la flexion résultant de charges locales.

5.6.3.2 Treillis simple

(1) Un treillis simple peut être utilisé lorsque les charges sont faibles et les longueurs relativement courtes, comme par exemple à proximité du sommet de pylônes ou dans les mâts haubanés légers (voir figure 5.1(I)). Il convient que l'élanement soit pris égal aux valeurs suivantes :

$$\lambda = L_d / i_{vv} \text{ pour les cornières} \quad \dots (5.8a)$$

$$\lambda = L_d / i_{yy} \text{ pour les tubes} \quad \dots (5.8b)$$

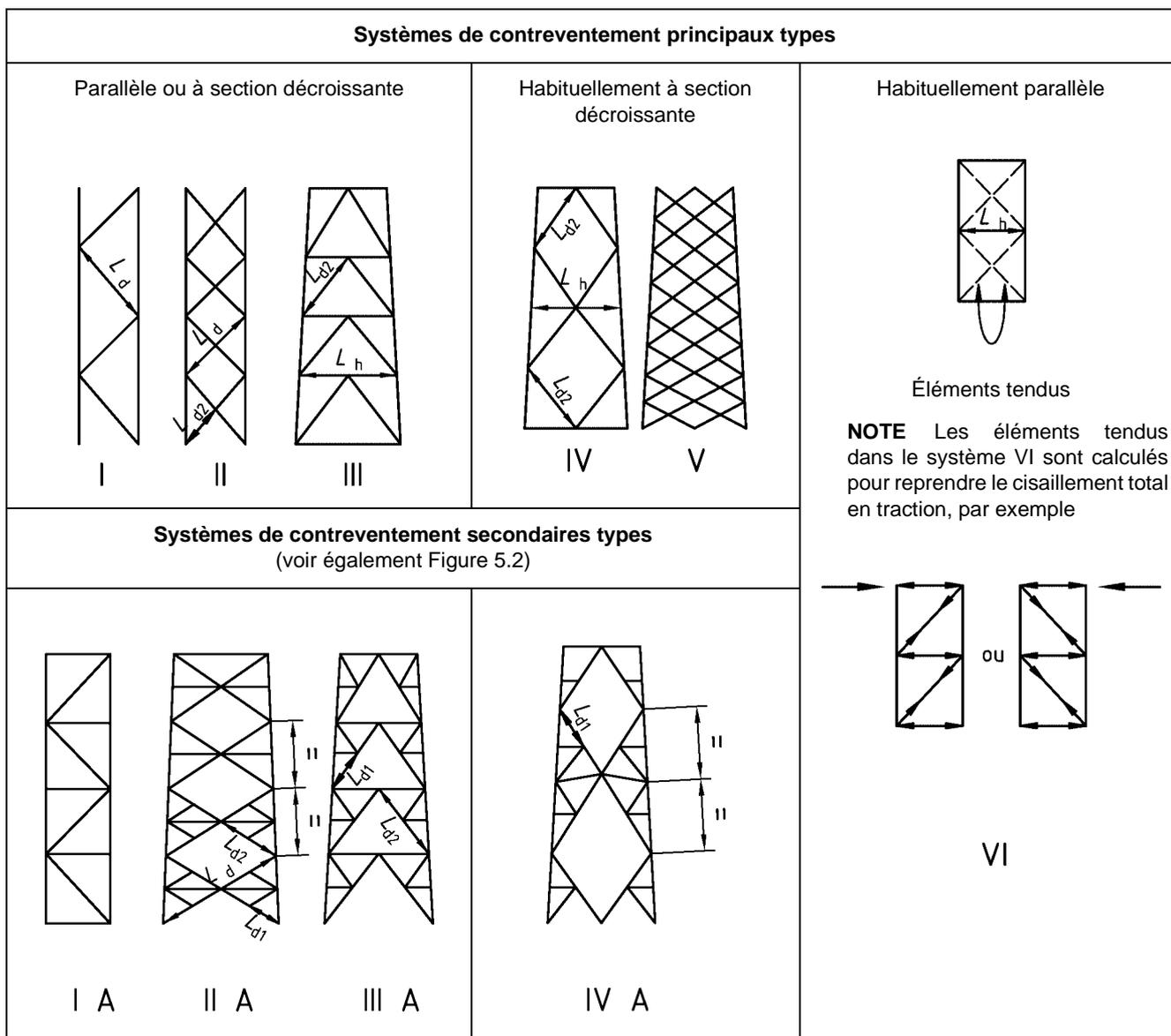


Figure 5.1 — Systèmes de contreventement types

5.6.3.3 Contreventement en croix

(1) À condition que la charge soit également partagée entre traction et compression, et à condition également que les deux éléments soient continus (voir figure 5.1(II)), le centre de la croix peut être considéré comme point fixe tant hors plan que dans le plan du contreventement, et la longueur critique d'épure devient L_{d2} sur l'axe de faible inertie. Il convient de prendre l'élanement égal aux valeurs suivantes :

$$\lambda = L_{d2} / i_{vv} \text{ pour les cornières} \quad \dots (5.9a)$$

$$\lambda = L_{d2} / i_{yy} \text{ pour les tubes} \quad \dots (5.9b)$$

(2) Lorsque la charge n'est pas également partagée entre traction et compression, et à condition que les deux éléments soient continus, il convient de vérifier les éléments comprimés de la même façon pour l'effort de compression le plus important. En outre, il convient de vérifier que la somme des résistances au flambement des deux éléments comprimés est au moins égale à la somme algébrique des efforts axiaux s'exerçant dans les deux éléments. Pour le calcul des résistances au flambement, il convient de prendre la longueur d'épure égale à L_d et le rayon de giration selon l'axe parallèle au plan du contreventement. Il convient de prendre l'élanement égal aux valeurs suivantes :

$$\lambda = L_d / i_{yy} \text{ ou } L_d / i_{zz} \text{ pour les cornières} \quad \dots (5.10a)$$

$$\lambda = L_d / i_{yy} \text{ pour les tubes ou les ronds pleins} \quad \dots (5.10b)$$

5.6.3.4 Contreventement en croix avec éléments secondaires

(1) Lorsque des éléments secondaires sont prévus pour stabiliser les membrures (voir figure 5.1(IIA et IVA) et figure 5.2(a)), en réduisant la longueur de flambement sur l'axe minimum à L_{d1} , il convient de prendre l'élançement égal aux valeurs suivantes :

$$\lambda = L_{d1} / i_{vv} \text{ pour les cornières} \quad \dots (5.11a)$$

$$\lambda = L_{d1} / i_{yy} \text{ pour les tubes ou les ronds pleins (normalement non déterminant)} \quad \dots (5.11b)$$

(2) Il convient de vérifier également le flambement sur la longueur L_{d2} selon l'axe orthogonal pour le flambement transversal au contreventement, puis sur la longueur L_d pour la somme algébrique des efforts axiaux, voir 5.6.3.3.

5.6.3.5 Contreventement en croix discontinu avec élément horizontal continu à l'intersection centrale

(1) Il convient que l'élément horizontal soit suffisamment rigide dans le sens transversal pour réaliser les encastres nécessaires pour les cas où la compression dans un élément est supérieure à la traction dans l'autre, ou lorsque les deux éléments sont comprimés, voir figure 5.1 (IV).

(2) Ce critère peut être satisfait en s'assurant que l'élément horizontal supporte (comme élément comprimé sur la totalité de sa longueur selon l'axe orthogonal) la somme algébrique de l'effort axial s'exerçant dans les deux éléments du contreventement en croix, en projection horizontale.

NOTE En outre, il est nécessaire de prendre en compte les contraintes de flexion induites dans les éléments de rive par les charges locales s'exerçant transversalement à l'ossature, telles que le vent.

NOTE C Il est précisé que l'élément horizontal continu est calculé en compression avec flexion, la flexion résultant de l'action du vent sur l'élément lui-même et sur les diagonales stabilisées.

5.6.3.6 Contreventement en croix avec entretoises d'angle

(1) Dans certaines configurations de contreventement en croix, une entretoise d'angle peut être utilisée pour réduire la longueur de flambement transversalement au plan de contreventement (voir figure 5.2(b)). Une procédure similaire à celle décrite en 5.6.3.3 peut être utilisée pour déterminer si cette configuration donne un encastrement satisfaisant.

(2) Dans ce cas, il convient d'effectuer cinq vérifications au flambement de la façon suivante :

- flambement de l'élément sous la charge maximale sur la longueur L_{d1} selon l'axe minimal.
- flambement de l'élément sous la charge maximale sur la longueur L_{d2} selon l'axe orthogonal transversal.
- flambement de deux éléments du contreventement en croix sous la somme algébrique des charges s'exerçant dans le contreventement en croix sur la longueur L_{d3} selon l'axe transversal.
- flambement de deux éléments (un dans chacune de deux faces adjacentes) sous la somme algébrique des charges s'exerçant dans les deux éléments assemblés par l'entretoise d'angle sur la longueur L_{d4} selon l'axe transversal.
- flambement de quatre éléments (chaque élément de contreventement en croix dans deux faces adjacentes) sous la somme algébrique des charges s'exerçant dans les quatre éléments sur la longueur L_d selon l'axe transversal.

(2) A Il faut lire « effort axial » en lieu et place de « charge ».
--

5.6.3.7 Diagonales de contreventement en K

(1) En l'absence d'éléments secondaires (voir figure 5.1 (III)) il convient de prendre la longueur critique d'épuration égale à L_{d2} selon l'axe de faible inertie, et l'élanement égal aux valeurs suivantes :

$$\lambda = L_{d2} / i_{vv} \text{ pour les cornières} \quad \dots (5.12a)$$

$$\lambda = L_{d2} / i_{yy} \text{ pour les tubes ou les ronds pleins} \quad \dots (5.12b)$$

(2) Lorsque les faces comportent un contreventement secondaire mais pas de contreventement d'angle (voir figure 5.1 (IIIA)) il convient de prendre la longueur critique d'épuration égale à L_{d2} selon l'axe orthogonal approprié. Il convient donc de prendre l'élanement égal à :

$$\lambda = L_{d2} / i_{yy} \text{ ou } L_{d2} / i_{zz} \quad \dots (5.13)$$

(3) Lorsqu'il existe un contreventement secondaire et un contreventement d'angle triangulé (voir figure 5.2(c)), il convient d'utiliser la longueur d'épuration appropriée entre les éléments d'angle L_{d4} pour la vérification du flambement transversalement au contreventement de la face selon l'axe orthogonal approprié. Il convient donc de prendre l'élanement égal à :

$$\lambda = L_{d4} / i_{yy} \text{ ou } L_{d4} / i_{zz} \text{ pour tous les types de profil} \quad \dots (5.14)$$

5.6.3.8 Éléments de faces horizontaux avec contreventement plan horizontal

(1) Lorsque la longueur des éléments de faces horizontaux devient importante, un contreventement plan peut être utilisé pour assurer la stabilité transversale.

(2) Il convient de prendre la longueur d'épuration de l'élément horizontal pour le flambement égale à la distance entre les points d'intersection du contreventement plan pour le flambement transversalement à l'ossature, et à la distance entre les appuis dans le plan pour le flambement dans le plan de l'ossature.

(2) I Pour l'élément horizontal, il convient de retenir :

- pour le flambement dans le plan horizontal, une longueur de flambement égale à la distance entre points d'intersection du contreventement horizontal.
- pour le flambement dans le plan de la face, une longueur de flambement égale à la distance entre nœuds de treillis.

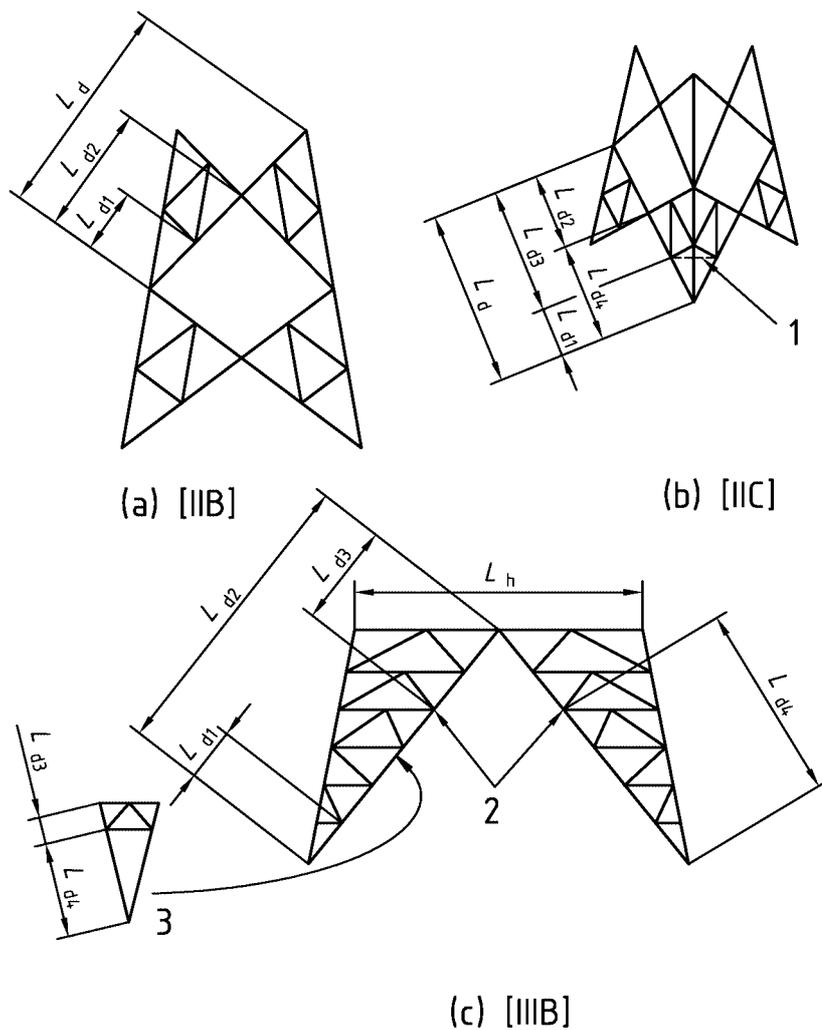
(3) Il convient de choisir soigneusement les axes vv ou orthogonal pour les éléments en cornière simple. Il convient d'utiliser l'axe vv sauf si un contreventement réalise un maintien approprié au niveau ou à proximité du point central de la longueur d'épuration. Dans ce cas, il convient de vérifier le flambement selon l'axe vv sur la longueur intermédiaire et selon l'axe orthogonal approprié sur la totalité de la longueur entre les maintiens sur cet axe.

(4) Il convient que le choix du facteur d'élanement efficace k soit basé sur les conditions d'extrémité de l'élément considéré, conformément à 5.7.

(5) Lorsque le contreventement plan n'est pas totalement triangulé, il convient de prendre également en compte les contraintes de flexion induites dans les éléments de rive par les charges telles que le vent transversal à l'ossature, voir figure 5.3.

(6) Pour éviter le flambement lorsque le contreventement plan n'est pas totalement triangulé :

- il convient que le contreventement plan horizontal soit calculé pour supporter une force horizontale concentrée de $1,5L$ kN appliquée au centre de l'élément, où L représente la longueur de l'élément en mètres ;
- il convient que la flèche (en mètres) du contreventement plan horizontal soumis à cette force ne soit pas supérieure à $L/1\ 000$.



Légende

- 1 Entretoise d'angle (d'efficacité limitée si les deux diagonales sont comprimées)
- 2 Contreventement d'angle en ces points
- 3 Contreventement d'angle totalement triangulé

Figure 5.2 — Utilisation de systèmes de contreventement secondaires

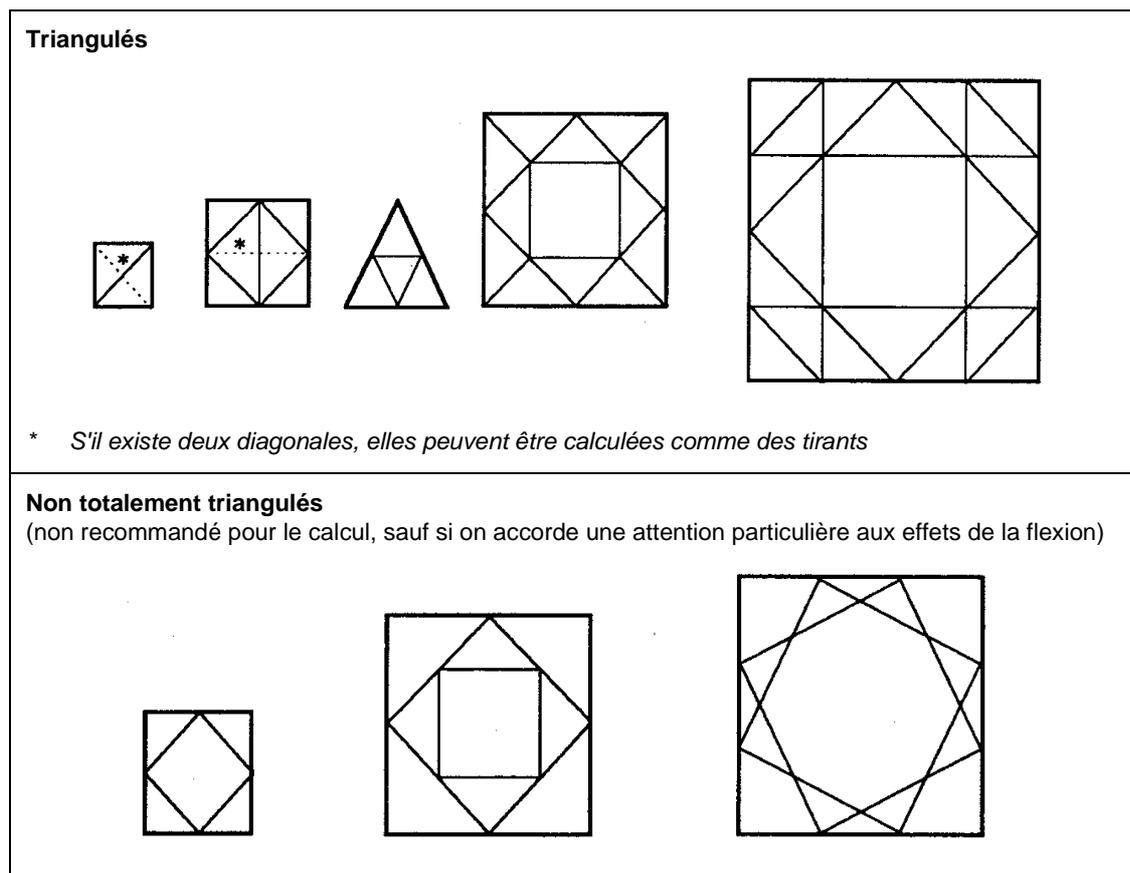


Figure 5.3 — Contreventements plans types

5.6.3.9 Éléments horizontaux sans contreventement plan

(1) Pour de faibles largeurs de pylônes et pour les mâts haubanés, un contreventement plan peut être omis dans les cas appropriés dûment justifiés.

(2) Il convient d'utiliser le rayon de giration selon l'axe yy pour le flambement transversalement au plan de la face sur la longueur L_h (voir figure 5.4(a)). En outre, pour les éléments en cornières simples, il convient d'utiliser le rayon de giration selon l'axe vv sur la longueur L_{h2} sauf si des contreventements secondaires disposés à intervalles sur la longueur réalisent un point fixe, auquel cas il convient de prendre la longueur d'épure égale à L_{h1} , voir figure 5.4(b).

(3) Afin d'éviter le flambement de l'élément horizontal, il convient que les critères exposés en 5.6.3.8(6) soient satisfaits.

NOTE Il est nécessaire de prendre également en compte les contraintes de flexion induites dans les éléments de rives par les charges locales s'exerçant transversalement au plan de la face, comme le vent.

NOTE C Il est précisé que l'élément horizontal continu est calculé en compression avec flexion, la flexion résultant de l'action du vent sur l'élément lui-même et sur les diagonales stabilisées. Il est nécessaire de prendre en compte ces contraintes pour tous les éléments.

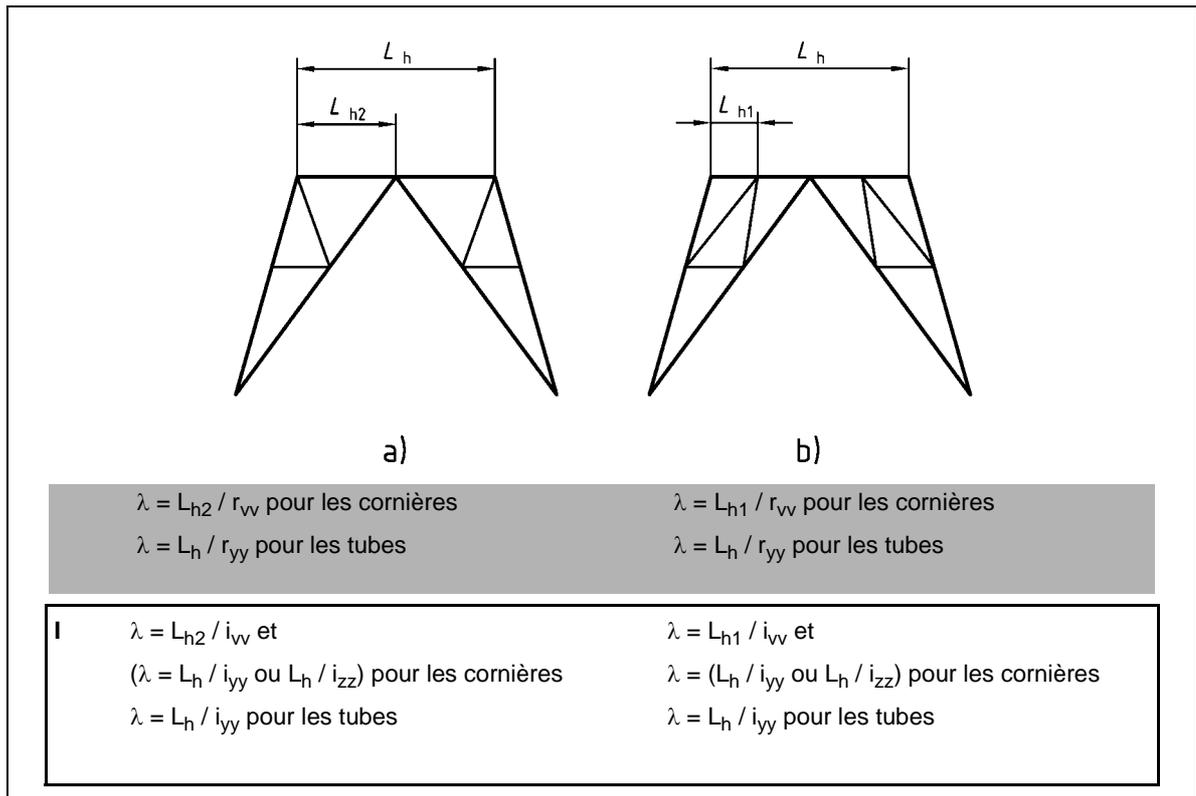


Figure 5.4 — Éléments horizontaux de contreventement, en K sans contreventement

5.6.3.10 Contreventement en K brisé

(1) Pour les pylônes de largeur importante, les diagonales principales peuvent présenter une brisure ou des cassures (voir figure 5.5), ce qui a pour effet de réduire la longueur et la dimension des éléments secondaires. Étant donné que ceci entraîne des contraintes élevées dans les éléments se rencontrant au niveau de la brisure, il convient de prévoir un maintien transversal au niveau du joint. Il convient de calculer les diagonales et les horizontales comme pour un contreventement en K, les longueurs d'épure des diagonales étant fonction des distances au joint brisé.

5.6.3.11 Portique

(1) Un élément horizontal peut être introduit à la brisure pour transformer le panneau en portique, voir figure 5.6. Étant donné que ceci entraîne un manque de déformabilité dans le contreventement en K, il convient d'accorder une considération particulière aux effets des mouvements ou des tassements des fondations.

(2) Le contreventement secondaire particulier illustré dans la figure 5.6 peut être utilisé pour réduire la susceptibilité au raccourcissement élastique des montants principaux.

(2) **I** Invalidé.

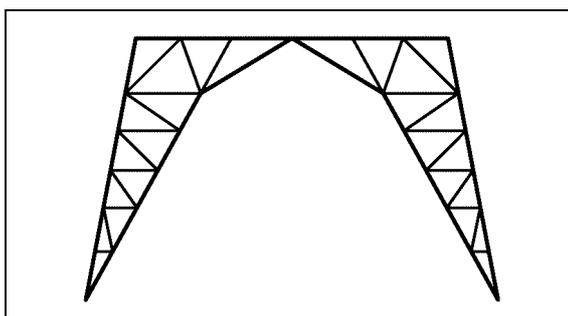


Figure 5.5 — Contreventement en K brisé

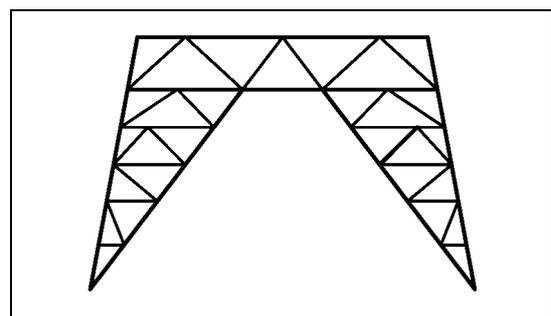


Figure 5.6 — Portique

5.6.3.12 Contreventement en treillis multiple

(1) Dans une configuration de treillis multiple, il convient de calculer les éléments de contreventement qui sont continus et assemblés au niveau de toutes les intersections comme des éléments secondaires (voir 5.9) sur une longueur d'épure entre membrures avec le rayon de giration approprié i_{yy} ou i_{zz} , voir figure 5.7. Pour la stabilité du panneau, il convient que l'élanement global L/i_{yy} soit inférieur à 350. Pour les éléments en cornières simples, il convient que i_{yy}/i_{vv} soit supérieur à 1,50, où i_{yy} représente le rayon de giration selon l'axe parallèle au plan du treillis.

(2) Il convient de vérifier la stabilité de l'élément A-B indiqué dans la figure 5.7 sous l'effort appliqué sur la longueur d'épure critique L_o pour l'élanement :

$$\lambda = L_o / i_{vv} \text{ pour les cornières} \quad \dots (5.15a)$$

$$\lambda = L_o / i_{yy} \text{ pour les tubes et les ronds pleins} \quad \dots (5.15b)$$

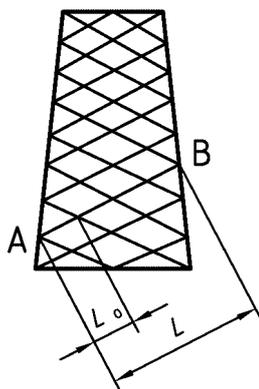


Figure 5.7 — Contreventement à treillis multiple

5.6.3.13 Éléments composés

(1) Des éléments composés, constitués de deux cornières dos à dos (formant un T) séparées par une faible distance et assemblées à intervalles au moyen d'entretoises et de boulons de couture, peuvent être utilisés comme éléments de contreventement. Il convient de vérifier leur flambement selon les deux axes orthogonaux de la façon suivante :

a) pour le flambement selon l'axe y-y (voir figure 5.9.6 de l'ENV 1993-1-1) :

Il convient de considérer que les deux cornières agissent ensemble pour le calcul de la rigidité et du rayon de giration.

(1) a) A	La formule 5.16 est également utilisée pour le flambement selon l'axe yy. On y remplace alors $i_{o,zz}$ par i_{yy} .
----------	---

b) pour le flambement selon l'axe z-z (voir figure 5.9.6 de l'ENV 1993-1-1) :

Il convient que l'entraxe des boulons de couture, a, soit limité à une valeur maximale de $90 i_{vv}$ ou $0,75 \frac{i_{vv}}{i_{ozz}} L$ en prenant la plus petite de ces deux valeurs.

Il convient de vérifier la totalité de l'élément à l'aide du rapport d'élançement majoré λ selon l'axe z-z.

$$\lambda = \left[\left(\frac{L}{i_{ozz}} \right)^2 + \left(\frac{a}{i_{vv}} \right)^2 \right]^{0,5} \quad \dots (5.16)$$

où :

i_{vv} est le rayon de giration d'une seule cornière selon l'axe v-v ;

i_{ozz} est le rayon de giration de la totalité de l'élément composé selon l'axe z-z.

(2) Il convient de ne pas considérer que les boulons de couture rendent la section totalement homogène lorsque l'écart entre les cornières est supérieur à 1,5 t, et il convient de calculer les caractéristiques en considérant un espace égal à la configuration réelle ou à 1,5 t, en prenant la plus petite de ces deux valeurs, où t représente l'épaisseur de la cornière. Si l'on utilise des barrettes en plus des boulons de couture, il convient de prendre les caractéristiques correspondant à la totalité de l'écart. Voir 5.9.4 et 5.9.5 de l'ENV 1993-1-1.

(3) Il convient que les éléments composés du contreventement formés de deux cornières assemblées en croix satisfassent les exigences de 5.6.2.3.

(4) Il convient que les barrettes empêchent tout glissement relatif des deux cornières ; si l'on utilise des assemblages boulonnés de catégories A et B, voir 6.3.5.1 de l'ENV 1993-1-1, il convient de réduire le diamètre de trou de boulon selon l'exigence de l'autorité compétente.

(4) C Se reporter à 7.5(3)A.

5.7 Facteur d'élançement efficace k

(1)P Afin de calculer l'élançement réduit de l'élément, le facteur d'élançement efficace k doit être déterminé en fonction des configurations de structures de la façon suivante :

a) *Membrures*

Il convient de prendre k dans le tableau 5.2.

b) *Diagonales de contreventement*

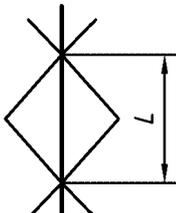
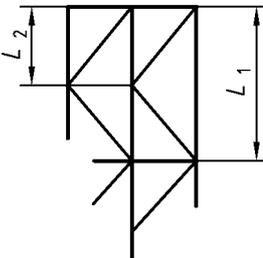
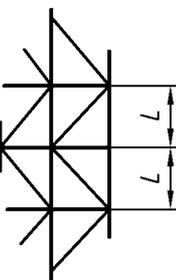
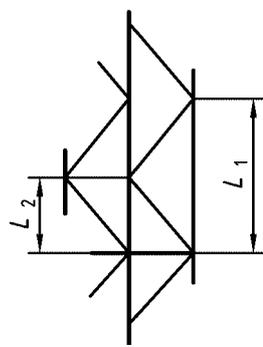
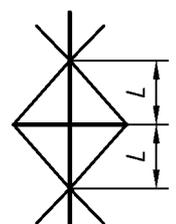
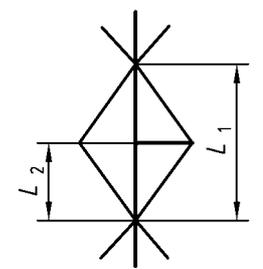
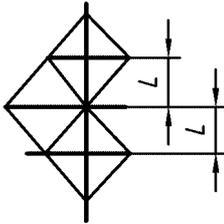
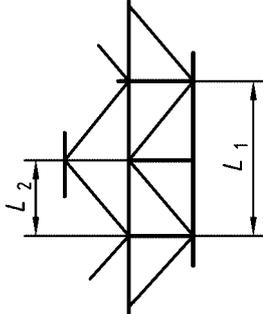
Il convient de déterminer k en prenant en compte à la fois le système de contreventement (voir figure 5.1) et les assemblages du contreventement sur les membrures. En l'absence d'informations plus précises, il convient de prendre les valeurs de k dans le tableau 5.3.

c) *Éléments horizontaux de contreventement*

Dans le cas d'éléments horizontaux de contreventement en K sans contreventement plan (voir 5.6.3.9) comprimés dans une moitié de leur longueur et tendus dans l'autre, il convient de multiplier le facteur d'élançement efficace k pour le flambement transversal à l'ossature déterminé au moyen du tableau 5.3 par le facteur k_1 donné dans le tableau 5.4 en fonction du rapport de la charge de traction N_t à la charge de compression N_c .

c) A Dans le cas général, il convient de prendre les valeurs de k dans le tableau 5.3.

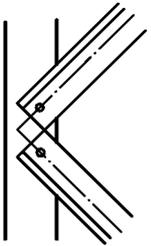
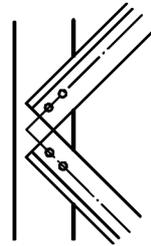
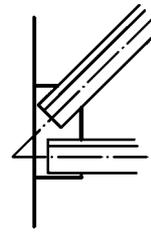
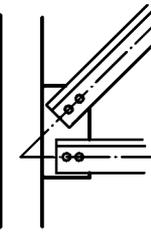
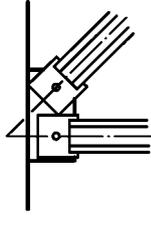
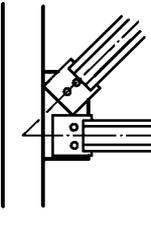
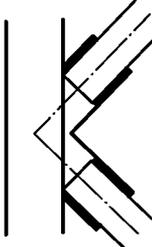
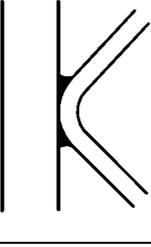
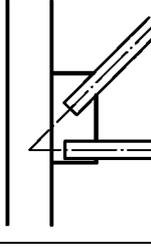
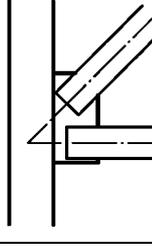
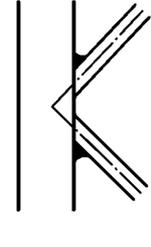
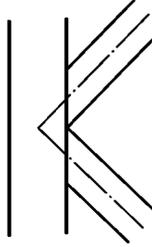
Tableau 5.2 — Facteur d'élanement efficace k pour les membrures

Contreventement symétrique			Contreventement dissymétrique			
Profil			Profil			
Axe	v-v	y-y	Axe	v-v	y-y	y-y
 Contreventement principal aux deux extrémités	$0,8 + \Lambda/10$ mais $\geq 0,9$ et $\leq 1,0$	$1,0$ ¹⁾	 Extrémité supérieure discontinue avec horizontales	$1,2 (0,8 + \Lambda/10)$	$1,2 (0,8 + \Lambda/10)$	$1,0$ sur L_1 ¹⁾
 Dissymétrique	$0,8 + \Lambda/10$	$1,0$ ¹⁾	 Contreventement principal aux deux extrémités	mais $\geq 1,08$ et $\leq 1,2$ sur L_2 ²⁾	mais $\geq 1,08$ et $\leq 1,2$ sur L_1	
 Symétrique Contreventement principal à une extrémité et contreventement secondaire à l'autre	mais $\geq 0,9$ et $\leq 1,0$		 Contreventement principal aux deux extrémités	$0,8 + \Lambda/10$	$0,8 + \Lambda/10$	$1,0$ sur L_1 ¹⁾
 Contreventement secondaire aux deux extrémités	$0,8 + \Lambda/10$ mais $\geq 0,9$ et $\leq 1,0$	$1,0$	 Contreventement principal aux deux extrémités	mais $\geq 0,9$ et $\leq 1,0$ sur L_2 ²⁾	mais $\geq 0,9$ et $\leq 1,0$ sur L_1	

1) Un coefficient réducteur peut être justifié par l'analyse.

2) Critique uniquement si l'on utilise une cornière à ailes très inégales.

Tableau 5.3 — Facteur d'élançement efficace k pour les éléments de contreventement

	Tubes et cornières assemblés par un boulon Ronds continus soudés		Tubes et cornières assemblés par deux boulons Ronds interrompus soudés		Tubes soudés ²⁾	
	Type	k	Type	k	Type	k
Membres en cornières		VV $0,7 + (0,35/\Lambda)$ et YY $0,7 + (0,58/\Lambda)$		VV $0,7 + (0,35/\Lambda)$ et — si assemblés par 2 boulons aux 2 extrémités : YY $0,7 + (0,58/\Lambda)$ ou : — si assemblés par 2 boulons à une extrémité, continuité à l'autre extrémité : YY $0,7 + (0,35/\Lambda)$		
		VV $0,7 + (0,35/\Lambda)$ et YY $0,7 + (0,58/\Lambda)$		VV $0,7 + (0,35/\Lambda)$ et — si assemblés par 2 boulons aux 2 extrémités : YY $0,65 + (0,58/\Lambda)$ ou : — si assemblés par 2 boulons à une extrémité, continuité à l'autre extrémité : YY $0,7 + (0,35/\Lambda)$		
Membres en tubes ou en ronds ¹⁾		$0,95$ ³⁾		Dans le plan $0,85$ ³⁾ Hors plan $0,95$		Dans le plan $0,85$ ³⁾ Hors plan $0,95$
		$0,85$		Dans le plan $0,70$ ³⁾ Hors plan $0,85$		Dans le plan $0,70$ ³⁾ Hors plan $0,85$
				$0,7$		$0,7$

1) Maintien des membrures comme indiqué sur les schémas par des assemblages de treillis sans excentrement.

2) Des assemblages avec deux boulons à serrage contrôlé précontraints peuvent être qualifiés pour cette condition sous réserve d'analyse.

2) I Les boulons à serrage contrôlé sont toujours précontraints.

3) Réduction pour longueur réelle uniquement. Les facteurs prennent en compte les réductions de longueur efficace en sus de celles concernant le degré de maintien, le cas échéant.

3) I Réduction à appliquer à la longueur d'épure. Les facteurs donnés tiennent compte de l'effet favorable de maintiens éventuels

Tableau 5.4 — Facteur modificatif (k_1) pour les éléments horizontaux de contreventement en K sans contreventement plan

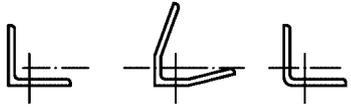
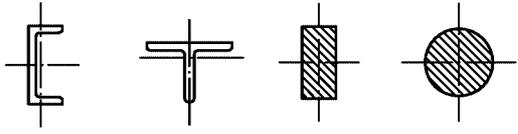
Rapport N_t/N_c	Facteur modificatif k_1
0,0	0,73
0,2	0,67
0,4	0,62
0,6	0,57
0,8	0,53
1,0	0,50

Une valeur de 1,0 s'applique lorsque le rapport N_t/N_c est négatif (c'est-à-dire lorsque les deux éléments sont comprimés).

5.8 Choix des courbes de flambement par flexion

(1) Pour le flambement par flexion, il convient de déterminer la courbe de flambement appropriée au moyen du tableau 5.5.

Tableau 5.5 — Choix de courbe de flambement pour une section transversale

Profils	Section transversale	Limites	Flambement selon l'axe	Courbe de flambement	
Profils courants	Cornières 	laminés à chaud	quelconque	b	
		formés à froid — utilisant f_{y0}	quelconque	c	
		formés à froid — utilisant f_{yu}	quelconque	c	
	Profils en C, en T et pleins 			quelconque	c
	Profils creux 		laminés à chaud	quelconque	b a
			formés à froid — utilisant f_{y0} f_{yb}	quelconque	c b
formés à froid — utilisant f_{yu} f_{ya}			quelconque	c	

(à suivre)

Tableau 5.5 — Choix de courbe de flambement pour une section transversale (fin)

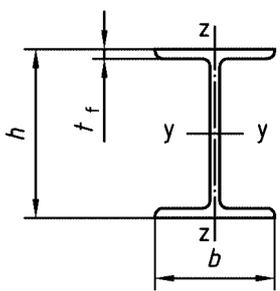
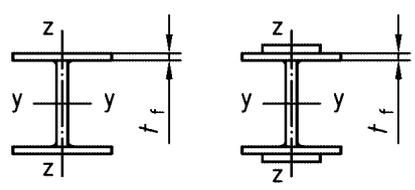
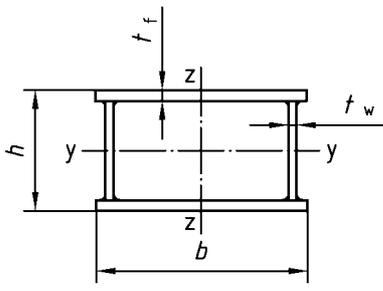
Profils	Section transversale	Limites	Flambement selon l'axe	Courbe de flambement
Autres profils		$h/b > 1,2 :$ $t_f \leq 40 \text{ mm}$	y-y z-z	a b
		$40 \text{ mm} < t_f \leq 100 \text{ mm}$	y-y z-z	b c
		$h/b \leq 1,2 :$ $t_f \leq 100 \text{ mm}$	y-y z-z	b c
		$t_f > 100 \text{ mm}$	y-y z-z	d d
		$t_f \leq 40 \text{ mm}$	y-y z-z	b c
		$t_f > 40 \text{ mm}$	y-y z-z	c d
		en général (sauf comme indiqué ci-dessous) soudures épaisses et	quelconque	b
		$b/t_f < 30$ $h/t_w < 30$	y-y z-z	c c

Tableau 5.5 I Les courbes de flambement des profils creux sont selon l'ENV 1993-1-1.

Tableau 5.5 C Pour les aciers à haute limite d'élasticité relevant de l'annexe D de l'ENV 1993-1-1, les courbes de flambement à retenir sont définies dans cette même annexe.

5.9 Éléments secondaires

(1) Afin de prendre en compte les imperfections des membrures, et pour le calcul des éléments de contreventement secondaires, il convient d'introduire une force équivalente agissant transversalement à la membrure (ou autre élément s'il ne s'agit pas d'une membrure) stabilisée au niveau du nœud d'attache de l'élément de contreventement. En fonction de l'élançement de l'élément stabilisé, il convient de calculer la valeur de la force équivalente à utiliser pour le calcul d'un élément secondaire quelconque au moyen des indications de (2) et (3).

(2) Il convient de prendre la force à appliquer au niveau de chaque nœud tour à tour dans le plan de contreventement, exprimée sous forme de pourcentage de l'effort axial s'exerçant dans la membrure, selon la valeur de l'élançement λ de la membrure, dans le tableau 5.6, où :

$$\lambda = L_v / i_{vv}$$

où :

L_v est la longueur d'épure de la membrure pour le flambement selon l'axe v-v ;

i_{vv} est le rayon de giration minimum.

(3) Lorsqu'il existe plus d'un nœud intermédiaire dans un panneau, il convient de vérifier séparément les systèmes de contreventement secondaires pour 2,5 % de l'effort axial s'exerçant dans la membrure, réparti également entre tous les nœuds intermédiaires. Il convient de considérer que ces forces équivalentes agissent ensemble et dans le même sens, à angle droit par rapport à la membrure et dans le plan du système de contreventement.

(4) Dans les deux cas (2) et (3), il convient de déterminer la répartition des efforts à l'intérieur du panneau de contreventement secondaire triangulé au moyen d'une analyse élastique linéaire.

Tableau 5.6 — Force équivalente sous forme de pourcentage de l'effort axial dans la membrure

Élançement λ	Force appliquée (%)
0 à 40	1,02
45	1,15
50	1,28
55	1,42
60	1,52
65	1,60
70	1,65
75	1,70
80	1,75
85	1,80
90	1,85
95	1,92
100	2,00
105	2,08
110	2,15
115	2,23
120	2,30
(125)	(2,38)
(130)	(2,46)
(≥ 132)	(2,50)

(5) Il convient d'ajouter en général les effets de cette force équivalente à la force principale telle que calculée par l'analyse globale pour le calcul d'un élément principal quelconque.

Exceptionnellement pour les pylônes en treillis auto-porteurs de configuration standard, il n'est pas nécessaire d'ajouter les forces équivalentes aux forces principales, à condition que le contreventement principal soit vérifié pour les effets de la force équivalente, lorsque la force principale est inférieure. Pour les mâts haubanés, il convient de toujours ajouter les effets de la force équivalente à la force principale.

(5) I cf. (24) de l'avant-propos.

(6) Sous réserve que le système de contreventement soit calculé pour les forces équivalentes comme indiqué en (1) à (5), sa rigidité peut être considérée comme suffisante.

(7) Si la charge agissant sur l'élément principal est excentrée ou si l'angle entre la diagonale principale d'un contreventement en K et le montant est inférieur à 25°, la valeur de la force équivalente indiquée ci-dessus peut être insuffisante et il convient de déterminer une valeur plus précise en prenant en compte le moment d'excentrement et les contraintes secondaires provoquées par la déformation de la membrure.

(8) Lorsque le plan de flambement n'est pas le plan du contreventement, il convient de multiplier les valeurs du tableau 5.6 par un facteur de $\sqrt{2}$ pour les structures carrées et de $\sqrt{3}$ pour les structures triangulaires.

6 Assemblages

6.1 Bases

6.1.1 Généralités

(1)P Tous les assemblages doivent posséder une résistance de calcul telle que la structure reste efficace et que les exigences fondamentales données dans la Section 2 soient satisfaites.

(2)P Le coefficient partiel γ_M doit être pris égal aux valeurs suivantes :

— résistance des assemblages boulonnés $\gamma_{Mb} = 1,25$

— résistance des assemblages rivés $\gamma_{Mr} = 1,25$

— résistance des assemblages par axe d'articulation $\gamma_{Mp} = 1,25$

— résistance des assemblages soudés $\gamma_{Mw} = 1,25$

(2) I Conformément à l'ENV 1993-1-1 DAN :

- la valeur de γ_{Mb} doit être prise égale à :

- $\gamma_{Mb} = 1,50$ pour la résistance des boulons sollicités en traction
- $\gamma_{Mb} = 1,25$ dans les autres cas (boulon en cisaillement, cisaillement par poinçonnement de la tête du boulon et de l'écrou,...)

- la valeur de γ_{Mw} doit être prise égale à :

- $\gamma_{Mw} = 1,25$ pour l'acier S235
- $\gamma_{Mw} = 1,30$ pour l'acier S275
- $\gamma_{Mw} = 1,35$ pour l'acier S355

6.1.2 Résistance des assemblages

(1)P La résistance d'un assemblage doit être déterminée sur la base des résistances individuelles des éléments d'attache ou des soudures.

(2)P La justification d'un assemblage doit en général être effectuée selon une analyse élastique linéaire. En alternative, on peut utiliser une analyse non linéaire à condition qu'elle prenne en compte les caractéristiques de déformation sous les charges de tous les composants de l'assemblage.

6.1.3 Fatigue

(1)P Les assemblages doivent être vérifiés à la fatigue comme indiqué en 9.2.

(2)P La vérification à la fatigue doit également être effectuée lorsque les mouvements de la structure sont réduits au moyen de stabilisateurs ou de dispositifs d'amortissement.

6.1.4 Classification des assemblages

(1) Pour la classification des assemblages, voir 6.4 de l'ENV 1993-1-1.

6.2 Assemblages boulonnés

6.2.1 Classes de boulons

(1)P Les classes des boulons utilisés dans les assemblages de pylônes et de mâts haubanés doivent être conformes aux dispositions de l'ENV 1993-1-1.

6.2.2 Positionnement des trous

(1)P Le positionnement des trous de boulons doit être de nature à prévenir la corrosion ainsi que le voilement local, et à faciliter la mise en place des boulons.

(2)P Le positionnement des trous de boulons dans un assemblage doit respecter les règles données en 6.5.1 de l'ENV 1993-1-1.

6.2.3 Catégories d'assemblages boulonnés

(1)P Le calcul d'un assemblage boulonné doit être conforme à la catégorie dans laquelle cet assemblage est classé, selon la définition de 6.5.3.1 de l'ENV 1993-1-1.

6.2.4 Résistances de calcul des boulons

(1)P Les résistances de calcul des boulons au cisaillement, en pression diamétrale et en traction doivent être calculées conformément aux dispositions de 6.5.5 de l'ENV 1993-1-1.

(2)P Les résistances au glissement des boulons à haute résistance précontraints doivent être calculées conformément aux dispositions de 6.5.8 de l'ENV 1993-1-1.

6.2.5 Boulons tendus dans des platines (assemblages par brides)

(1)P Dans les platines d'extrémité (assemblages par brides) les efforts s'exerçant dans les boulons doivent être calculés en prenant en compte l'excentrement du chargement transmis par l'assemblage ainsi que les effets de levier comme indiqué en 6.5.9 de l'ENV 1993-1-1.

(2) Il convient d'utiliser de préférence des boulons précontraints.

(3) Il convient d'utiliser des boulons de diamètre 16 mm au moins.

6.3 Assemblages soudés

6.3.1 Exigences générales pour le soudage

(1)P Les assemblages réalisés par soudage doivent être conformes aux exigences appropriées concernant les matériaux et l'exécution, spécifiées dans les Sections 3, 7 et 9 de l'ENV 1993-1-1.

6.3.2 Résistance de calcul des soudures bout-à-bout

(1)P La résistance de calcul des soudures en bout à pleine pénétration doit être déterminée conformément à 6.6.6.1 de l'ENV 1993-1-1.

(2)P La résistance de calcul d'une soudure en bout à pénétration partielle doit être déterminée conformément à 6.6.6.2 de l'ENV 1993-1-1.

6.3.3 Résistance de calcul des soudures d'angle

(1)P La résistance de calcul des soudures d'angle doit être déterminée conformément à 6.6.5 de l'ENV 1993-1-1.

6.4 Assemblages particuliers pour les mâts haubanés

6.4.1 Pied de mât haubané articulé

(1)P La pression de contact de calcul de la rotule sphérique doit être basée sur les équations de Hertz (voir 6.4 de l'ENV 1993-2) et doit être inférieure à $\frac{2,5}{\gamma_{Mp}}$ fois la limite d'élasticité f_y du matériau d'appui.

(1) I Pression de contact de calcul $< 3,75 / \gamma_{Mp} f_y$

(2)P L'aire de la zone de compression doit se situer dans les limites des parties d'appui en prenant dûment en compte l'angle de rotation réel de la section de base du mât haubané.

(2) C Il convient donc de vérifier que la pièce d'appui reste comprimée sur toute sa surface.

(3) Si le pied de mât haubané repose sur un appui sphérique, il convient de considérer que le point de contact se déplace dans la direction d'une inclinaison quelconque de l'axe du mât haubané. Il convient de déterminer les excentricités e_u et e_o (voir figure 6.1) de la façon suivante :

$$e_u = r_1 \times \sin \psi_1 \quad \dots (6.1a)$$

$$e_o = r_2 (\sin \psi_1 - \sin \phi) \quad \dots (6.1b)$$

où :

r_1 est le rayon de la partie concave de l'appui ;

r_2 est le rayon de la partie convexe de l'appui ;

ϕ est l'inclinaison de l'axe du mât haubané en pied.

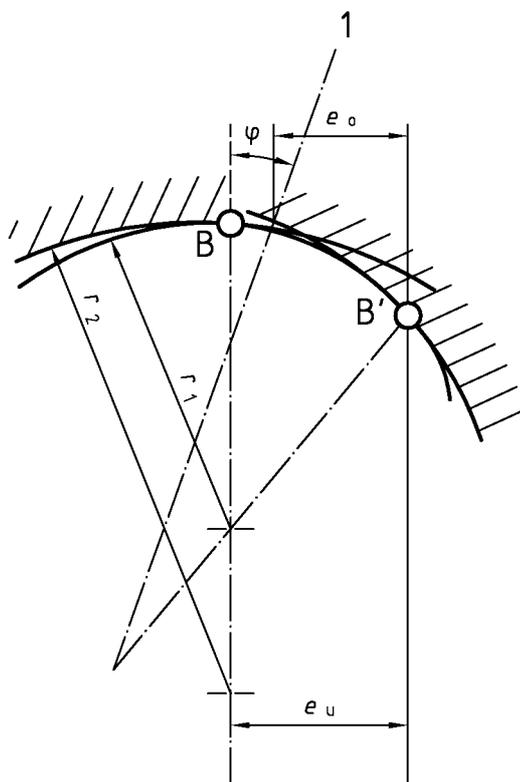
avec :

$$1 = \frac{r_2 \phi}{r_2 - r_1} \quad \dots (6.2a)$$

$$\psi_2 = \psi_1 - \phi \quad \dots (6.2b)$$

Si r_2 est infini, cas d'une surface plane, il convient de prendre $e_o = r_1 \phi \cos \phi$.

(3) I La construction de la figure 6.1 n'est pas explicitée ;
l'angle ψ_2 dont le calcul est prescrit n'est pas utilisé ;
l'utilisation des excentricités e_o et e_u n'est pas spécifiée.



Légende

1 Axe du mât haubané

Figure 6.1 — Excentrements provoqués par l'inclinaison du pied du mât haubané

(4)P Le système destiné à empêcher la torsion dans un pied de mât haubané articulé doit être conçu pour permettre la rotation de la section de base du mât haubané autour des axes horizontaux.

(5)P Un pied de mât haubané encastré doit être justifié en prenant en compte les tassements éventuels de la fondation ainsi que les tassements éventuels de celles des haubans.

(5)I Les déplacements éventuels des massifs sous fût et d'ancrage des haubans doivent être pris en compte dans l'évaluation des sollicitations.

6.4.2 Assemblages des haubans

(1) Il convient que tous les assemblages des haubans sur le mât haubané ou sur les fondations des haubans permettent la libre rotation des haubans tant dans le sens horizontal que dans le sens vertical. Il convient de prendre en compte dans la conception ainsi que dans les dispositions constructives des assemblages, la tendance des constructions haubanées à la torsion sous chargement de traction dans les haubans.

(2)P Les coefficients partiels γ_{Mg} pour le culot du hauban ainsi que pour l'axe d'articulation doivent être identiques à ceux pris pour le hauban lui-même, voir 5.1.1.

(3)P Le calcul des assemblages articulés au niveau du mât haubané dans le système de tension des haubans doit être conforme à 6.5.5 de l'ENV 1993-1-1 pour les assemblages à boulon unique, mais en prenant en compte la flexion de l'axe d'articulation. Pour une marge de sécurité suffisante, le calcul des assemblages articulés peut être basé sur les principes donnés en 6.5.13 de l'ENV 1993-1-1.

(4)P Tous les axes d'articulation doivent être protégés de manière appropriée contre les mouvements latéraux au moyen, par exemple, d'un écrou combiné avec une goupille.

(5)P La conception des tiges filetées du système de tension des haubans doit être conforme à 6.5.5(6) de l'ENV 1993-1-1.

(5) **A** Les tiges filetées faisant partie intégrante de la chaîne de haubanage, elles sont calculées avec un coefficient partiel $\gamma_{Mg} = 2$ (voir 5.1.1(2) A).

(6)P Le gousset d'assemblage du hauban sur le mât haubané ainsi que la plaque d'ancrage sur la fondation du hauban doivent tous deux être calculés pour l'effort latéral exercé par le hauban sous l'effet de la composante de charge de vent perpendiculaire au plan du hauban.

(7) Dans la mesure du possible, il convient que les dispositions constructives des assemblages soudés permettent la réalisation de contrôles visuels et non destructifs en exploitation.

7 Fabrication et montage

7.1 Généralités

(1)P Les pylônes et les mâts haubanés doivent être fabriqués et montés conformément à la norme d'exécution des structures soumises à un chargement de fatigue ENV 1090-5.

(1) **A** Dans l'attente de la parution de l'ENV 1090-5 en norme française, on se référera à la norme XP P 22-501-1 (catégorie d'exécution C1 et classe d'exécution 1 ou 2).

(2) Il convient de prendre en compte les exigences générales pour la fabrication et le montage exposées en 7.1 de l'ENV 1993-1-1.

7.2 Les spécifications du projet

(1) Il convient de respecter les exigences concernant les spécifications du projet exposées en 7.2 de l'ENV 1993-1-1.

7.3 Restrictions concernant la fabrication

(1) Voir 7.3 de l'ENV 1993-1-1.

7.4 Préparation des matériaux

(1) Voir 7.4 de l'ENV 1993-1-1.

7.5 Assemblages boulonnés

(1)P Les dispositions concernant les assemblages boulonnés exposées en 7.5 de l'ENV 1993-1-1 doivent être respectées.

(2)P En outre, tous les assemblages boulonnés des pylônes et mâts haubanés doivent faire l'objet de dispositions appropriées destinées à éviter tout desserrage des écrous en cours d'exploitation.

(2) **C** Les dispositions appropriées seront déterminées en fonction de la nature et de la prise au vent des équipements portés. Elles seront décrites dans les spécifications techniques du projet.

(3) Il convient d'adopter des tolérances pour les trous de boulons plus strictes que celles données dans l'ENV 1993-1-1 lorsque les déplacements sont déterminants (voir 4.2.2). Il convient que de telles limitations fassent l'objet d'un accord entre le concepteur, le propriétaire et l'autorité compétente.

(3) **A** Les limitations visées seront définies dans les spécifications techniques du projet en prenant en compte notamment :

- la nature et la prise au vent des équipements portés ;
- l'exposition du site ;
- le nombre de boulons par assemblage ;
- le nombre de plans de cisaillement et leur nature (partie lisse ou fileté) ;
- la limitation de la pression diamétrale ;
- le degré d'hyperstaticité de la structure (pylônes haubanés) ;
- la classe de fiabilité.

7.6 Assemblages soudés

(1)P Les assemblages soudés doivent être conformes aux dispositions de 7.6 de l'ENV 1993-1-1.

(2)P La qualité des soudures considérée pour le choix de la classe de fatigue appropriée d'un détail constructif, voir 9.3, doit être spécifiée sur les plans de fabrication de la structure. La réalisation de ce niveau de qualité doit être soumise à inspection et contrôle selon les spécifications du projet.

7.7 Tolérances

7.7.1 Généralités

(1) Les tolérances de fabrication de l'ENV 1993-1-1 doivent être satisfaites.

(2) Il convient de mentionner dans les spécifications du projet les tolérances particulières nécessaires pour garantir que la structure achevée ne présente aucun écart susceptible d'entraîner une réduction inacceptable de sa sécurité ou de son aptitude à l'emploi.

7.7.2 Tolérances de montage

7.7.2.1 Pylônes en treillis

7.7.2.1 I Pylônes en treillis autostables

(1) Il convient que le faux aplomb maximal au sommet du pylône soit inférieur à 1/1000 de la hauteur du pylône, sauf spécification contraire par le propriétaire ou l'autorité compétente.

(1) **A** La valeur du faux aplomb admissible est portée à 1/500 de la hauteur du pylône.

(2) Il convient d'effectuer le réglage final dans des conditions de vitesse de vent ne dépassant pas 5 m/s au sol.

7.7.2.2 Mâts haubanés

(1) Il convient d'effectuer les opérations finales de verticalité et de mise en tension des haubans dans des conditions de vitesse de vent ne dépassant pas 5 m/s au sol. Pendant ces opérations, si les vitesses de vent sont supérieures, il convient d'effectuer des calculs afin de compenser les effets du vent de manière appropriée.

(2) Il convient normalement d'effectuer les opérations finales de verticalité et de tension des haubans en procédant à partir du niveau de haubans le plus bas. Il convient que la position finale des attaches de haubans se situe à l'intérieur d'un cône vertical dont le sommet est situé à la base du mât haubané et d'un rayon de $\frac{1}{3000}$ de la hauteur au-dessus de la base du mât haubané. Ceci ne s'applique pas aux drisses ou aux réseaux d'antennes.

(2) A Le rayon du cône de tolérance est porté à $H/2000$ sauf prescription différente dans les spécifications du projet.

(3) Il convient que la composante horizontale résultante des tensions initiales de tous les haubans situés à un niveau donné ne dépasse pas [3 %] de la composante horizontale moyenne de la tension de haubans initiale pour ce niveau. Il convient que la tension initiale dans un hauban isolé quelconque à un niveau donné ne varie en aucun cas de plus de $\frac{10}{100}$ de la valeur de calcul.

(4) Il convient que la flèche initiale du fût du mât haubané entre deux niveaux de haubans reste inférieure à $L/\frac{2000}{100}$, où L représente la distance entre les niveaux de haubans en question.

(4) A La flèche initiale du fût entre 2 haubans consécutifs doit rester inférieure à $L/1000$, L étant la distance entre ces 2 haubans.

Le non-alignement de 3 appuis consécutifs doit rester inférieur à $(L_1 + L_2)/2000$, L_1 et L_2 étant les portées du fût entre les appuis considérés.

7.7.3 Mise en tension

(1)P Après montage, les haubans doivent être mis en tension conformément aux études d'exécution.

(2) Afin de réduire au minimum l'éventualité de vibrations de haubans, il convient de choisir des tensions en atmosphère calme telles que pour chaque hauban la tension soit inférieure à 10 % de sa charge de rupture.

(2) C Se reporter à 11.2.1(1).

7.8 Pré-tension des haubans

(1) Afin de s'assurer que le câble se trouve en état élastique véritable, il convient de pré-tensionner les haubans avant de procéder aux mesures et à l'achèvement. Ceci peut être effectué dans les ateliers du fournisseur ou, si l'on dispose des installations appropriées, sur le chantier de montage.

(2) Il convient d'effectuer une pré-tension, destinée à réduire les opérations d'ajustement de la tension nécessaires au cours des premières années, lorsqu'on utilise des câbles multi-torons d'un diamètre de plus de 20 mm, et de préférence sur tous les câbles hélicoïdaux ou clos.

(3) Il convient d'effectuer la pré-tension en chargeant le hauban de manière cyclique entre 10 % et 50 % de sa charge de rupture. Il convient de réaliser au moins 10 cycles de chargement. Il convient d'éviter, pour cette opération, de faire passer le hauban chargé autour d'une poulie.

8 Dimensionnement assisté par des essais

(1) Il convient de respecter les dispositions concernant le dimensionnement assisté par des essais données dans la Section 8 de l'ENV 1993-1-1.

(2) Lorsque les valeurs données dans l'ENV 1991-2-4 sont considérées inappropriées pour les pylônes en treillis et les mâts haubanés comportant, supportant ou composés d'éléments cylindriques, des essais peuvent être réalisés pour déterminer le décrétement logarithmique de l'amortissement structurel.

NOTE Des directives pour la détermination de δ_{sd} sont données dans la Section 8 de l'ENV 1993-3-2.

(3) Des modes supérieurs au mode fondamental peuvent être significatifs, particulièrement pour les mâts haubanés, et il convient par conséquent de prendre ceci dûment en compte dans la détermination du décrétement logarithmique approprié.

(4) Il convient de prendre en compte le fait que les fréquences de vibration varient en fonction de la situation de chargement considérée, par exemple en atmosphère calme, sous charges de vent ou de givre.

9 Vérifications à la fatigue

9.1 Généralités

(1)P Pour les vérifications à la fatigue, les dispositions de l'ENV 1993-1-1 doivent être appliquées.

(2) Pour les vérifications à la fatigue des pylônes en treillis et des mâts haubanés, il convient de prendre également en compte les dispositions supplémentaires données ci-dessous.

(3) Pour tous les détails concernant la fatigue donnés en 9.3, il convient d'utiliser les contraintes nominales pour la vérification à la fatigue étant donné que les concentrations de contraintes résultant des imperfections de la structure et de la géométrie sont déjà prises en compte dans les catégories de résistance à la fatigue.

(4) Des détails, tels qu'ouvertures ou forme géométrique particulière d'un assemblage, peuvent engendrer des concentrations de contraintes supplémentaires non prises en compte dans la classification des détails constructifs. Il convient de les prendre en compte en appliquant aux étendues de contraintes nominales des facteurs de concentration de contraintes géométriques.

(5) Des directives concernant la détermination des facteurs de concentration de contraintes pour certains détails peuvent être trouvées dans l'ENV 1993-1-6.

(6) Il convient de considérer les effets de l'existence éventuelle de moments secondaires dans les pylônes en treillis et les mâts haubanés sur la résistance à la fatigue lorsque ces effets ne sont pas déjà pris en compte.

9.2 Chargement de fatigue

9.2.1 Vibrations dans la direction du vent

(1) À condition que la catégorie de détail des détails constructifs soit supérieure à 71 N/mm², la durée de vie à la fatigue des structures soumises uniquement à des vibrations dans la direction du vent (sans vibrations transversales à la direction du vent) induites par des rafales de vent peut être considérée supérieure à 50 ans.

(2) Dans tous les autres cas, il convient de prendre dûment en compte les détails adoptés et d'effectuer une vérification à la fatigue.

(3) L'historique des contraintes de fatigue provoquées par les rafales de vent peut être évalué en déterminant les durées annuelles de différentes vitesses moyennes de vent dans diverses directions à partir des données météorologiques concernant le site. Les fluctuations autour des valeurs moyennes peuvent alors être considérées comme présentant une répartition statistique normale avec un écart type des contraintes correspondant à G/4 fois la contrainte provoquée par la vitesse de vent moyenne, où G représente le facteur de rafale approprié calculé conformément à l'annexe A.

(4) En l'absence de meilleures informations, l'étendue de contraintes $\Delta\sigma_{Si}$ peut être considérée égale à 1,1 fois la différence entre la contrainte résultant de celle incorporant le facteur de rafale G et celle provoquée par la vitesse moyenne de vent pendant dix minutes. Un nombre de cycles équivalent N_i peut alors être calculé par :

$$N_i = 10^5 T/50 \quad \dots (9.1)$$

où :

T est la durée de vie de calcul de la structure en années.

(4) C Voir aussi une prise en compte simplifiée en 9.4.(1) A

9.2.2 Vibrations transversales à la direction du vent

(1)P Le chargement de fatigue des pylônes et des mâts haubanés comportant, supportant ou composés d'éléments cylindriques, doit être déterminé à partir de l'amplitude maximale pour le mode de vibration approprié conformément à l'annexe C.4 de l'ENV 1991-2-4 et du nombre de cycles de contraintes N conformément à l'annexe C.9 de l'ENV 1991-2-4.

(2) Les valeurs nominales des étendues de contraintes dans la structure peuvent être déterminées à partir des forces d'inertie par unité de longueur selon l'annexe C.3 de l'ENV 1991-2-4 considérées comme agissant dans les deux sens transversalement au vent.

(1) et (2) A Les renvois à C.4, C.9 et C.3 sont respectivement des renvois à C.2.4, C.2.9 et C.2.3.

9.2.3 Réponse des éléments individuels

(1) Pour les structures composées de profils circulaires soudés, il convient de considérer l'éventualité d'une excitation des éléments individuels transversalement au vent. La vitesse de vent critique et l'amplitude du mode de vibration fondamental peuvent être déterminées à l'aide de l'annexe C de l'ENV 1991-2-4, et l'évaluation de la fatigue peut être effectuée comme pour la réponse globale, voir 9.2.2.

(1) C Le respect des critères dimensionnels ci-dessous :

— membrures : $\ell / D \leq 33$ et $D / t \leq 25$

— contreventements : $\ell / d \leq 24$ et $D / t \leq 25$

avec :

D : diamètre extérieur du tube ;

t : épaisseur du tube

ℓ : longueur entre points de fixation de l'élément.

permet en général de s'affranchir des phénomènes vibratoires des éléments individuels.

Ces critères peuvent être plus contraignants que ceux énoncés en 5.6 notamment pour les contreventements secondaires.

9.3 Résistance à la fatigue

(1)P On doit se reporter à l'annexe C de l'ENV 1993-3-2 pour les résistances des détails constructifs des pylônes et mâts haubanés.

(1)I On doit se reporter au chapitre 9 de l'ENV 1993-1-1 pour les résistances des détails constructifs des pylônes et mâts haubanés.

(2) Dans ces tableaux, il convient d'accorder une attention particulière à la qualité des soudures associée aux classes de fatigue, voir 7.6.

9.4 Évaluation de la sécurité

(1)P La justification de la résistance à la fatigue provoquée par la résonance aux tourbillons doit être effectuée conformément à la Section 9 de l'ENV 1993-1-1, au moyen de l'expression suivante :

$$\gamma_{Ff} \eta \Delta\sigma_s \leq \Delta\sigma_c / \gamma_{Mf} \quad \dots (9.2)$$

où :

γ_{Ff} est le coefficient partiel pour le chargement de fatigue ;

η est le facteur d'équivalence pour la transformation de $\Delta\sigma_s$ à $N_c = 2 \times 10^6$ cycles ;

$\Delta\sigma_s$ est l'étendue de contraintes associée à N cycles (voir 9.2) prenant en compte des facteurs de concentration de contraintes le cas échéant ;

$\Delta\sigma_c$ est la valeur de résistance à la fatigue à $N_c = 2 \times 10^6$ cycles pour la classe de fatigue du détail considéré ;

γ_{Mf} est le coefficient partiel pour la résistance à la fatigue.

(1) **A** La justification de la résistance à la fatigue provoquée par les vibrations en ligne doit être effectuée au moyen de la même formulation, ou bien par la méthode suivante :

En application de B.6 de l'ENV 1991-2-4, la vérification à la fatigue pour les oscillations dans la direction du vent peut être effectuée de manière simplifiée et plaçant en sécurité, par :

$$\frac{\gamma_{Ff} \gamma_{Mf} S_k}{\Delta\sigma_c} \leq 5 \left(\frac{T}{20} \right)^{\frac{1}{m}}$$

où :

T durée de vie requise en années ;

S_k contrainte produite dans le détail constructif par le vent caractéristique (non pondéré) agissant dans la direction la plus défavorable ;

m = 3 ou 5 selon le type de détail constructif (pente de la courbe SN de résistance).

Lorsqu'il y a lieu de cumuler les effets (endommagements) longitudinaux et transversaux, on considérera que les oscillations dans la direction du vent correspondent à un endommagement égal à :

$$\left(\frac{\gamma_{Ff} \gamma_{Mf} S_k}{5\Delta\sigma_c} \right)^m \times \left(\frac{T}{20} \right)$$

(2) Le facteur d'équivalence η peut être déterminé par l'expression suivante :

$$\eta = \left(\frac{N}{2 \times 10^6} \right)^{\frac{1}{m}} \quad \dots (9.3)$$

où :

m est la pente de la courbe S-N.

(3) Le cas échéant, il convient que la justification de la résistance à la fatigue provoquée par la résonance aux tourbillons soit combinée avec celle résultant du chargement dans la direction du vent (voir 9.2.1) au moyen de la règle de cumul de Palmgren-Miner.

(3) **C** Cette règle de cumul est énoncée au 9.5.2.2 de l'ENV 1993-1-1DAN.

9.5 Coefficients partiels

(1) Il convient de prendre les coefficients partiels pour la fatigue dans le tableau 9.1 en fonction de la classe de fiabilité appropriée et des conditions de contrôle / entretien en découlant.

(2) Si la structure est soumise à un contrôle périodique, les coefficients du tableau 9.1 peuvent être réduits à des valeurs minimales de 1,0 pour γ_{Ff} pour toutes les classes et de 1,0 pour γ_{Mf} . Il convient de n'effectuer ces réductions qu'après accord du concepteur, du client et de l'autorité compétente, et de les conditionner à des visites de contrôle annuelles du propriétaire à l'occasion d'interruptions d'activité, à une détection des fissures des soudures à l'aide de méthodes de CND à intervalles ne dépassant pas 4 ans, à un entretien régulier et à un rapport sur les défauts éventuels avec planification des réparations.

(2) C Il appartient au maître d'ouvrage de donner cette possibilité dans les spécifications du projet.

(3) Il convient de n'utiliser les facteurs réduits donnés en (2) que s'il a été démontré que le système présente une redondance suffisante pour tolérer la ruine d'un seul élément ou assemblage sans effondrement global.

Tableau 9.1 — Coefficients partiels pour la fatigue

Coefficient partiel	Classe de fiabilité	Facteur ^{1) 2)}
γ_{Ff}	Élevée (Classe 3)	1,40
	Normale (Classe 2)	1,20
	Réduite (Classe 1)	1,10
γ_{Mf}	Toutes Classes	1,15

1) Ces facteurs ne supposent pas de contrôle des fissures dans les soudures. Il est également supposé qu'une inspection et un entretien réguliers seront effectués conformément aux exigences du client.

1) C L'utilisation des valeurs données pour γ_{Ff} ne dispense pas des contrôles de fabrication liés à la classe de qualité retenue pour les soudures.

2) Ces facteurs supposent que les courbes S-N et les classifications de détails utilisées pour la conception représentent des fractiles (caractéristiques) de 5 %.

9.6 Fatigue des haubans

(1) Il convient de vérifier le comportement à la fatigue des haubans au moyen des procédures données dans l'annexe C.7.

10 Protection anticorrosion

10.1 Généralités

(1) Il convient qu'une protection anticorrosion appropriée, adaptée à l'emplacement de la structure, à sa durée de vie prévue et à son régime d'entretien, fasse l'objet d'un accord entre le concepteur, le propriétaire et l'autorité compétente.

(1) **A** Les performances à atteindre sont définies par le maître d'ouvrage dans les spécifications du projet.

10.2 Haubans

(1)P On ne doit pas utiliser de câbles gainés sans remplissage en raison du risque d'apparition de corrosion non détectée.

(2) Il convient que les câbles de haubans réalisés en fils d'acier galvanisé reçoivent un revêtement de protection supplémentaire sous forme de graisse ou de peinture. Il convient de prendre soin de s'assurer que ce revêtement protecteur est compatible avec le lubrifiant utilisé lors de la fabrication des câbles de haubans. Il convient que les détails de cette protection fassent l'objet d'un accord entre le concepteur, le propriétaire et l'autorité compétente.

(2) **A** Les performances à atteindre sont définies par le maître d'ouvrage dans les spécifications du projet.

(3) Les câbles d'acier d'un diamètre inférieur ou égal à 20 mm peuvent être protégés par du polypropylène, auquel cas ils ne nécessitent aucune protection supplémentaire sauf si la gaine est endommagée en cours de montage et d'exploitation.

11 Amortisseurs

11.1 Amortisseurs de structure

(1) Il convient de limiter les vibrations éventuelles de la structure pouvant survenir dans un pylône ou un mât haubané sous l'effet du vent, comme décrit dans l'annexe A, si nécessaire, par l'utilisation des méthodes données dans l'annexe B de l'ENV 1993-3-2.

11.2 Amortisseurs de haubans

11.2.1 Généralités

(1) Afin de supprimer les vibrations éventuelles pouvant survenir dans les haubans sous l'effet du vent, comme décrit dans l'annexe A, il convient de suivre l'une des procédures suivantes :

- a) Il convient de monter des amortisseurs sur les haubans dans tous les cas où la tension initiale est supérieure à 10 % de la résistance nominale à la rupture du hauban.
- b) Lorsque l'on n'utilise pas d'amortisseurs de haubans, il convient d'observer attentivement les haubans pendant la première année d'exploitation afin de s'assurer de l'absence d'oscillations d'amplitude excessive ou trop fréquentes. Dans le cas contraire, il convient d'utiliser des amortisseurs comme décrit en (a).

11.2.2 Amortisseurs destinés à réduire l'excitation par détachements tourbillonnaires

- (1) Il convient d'installer des amortisseurs appropriés dans tous les cas où des vibrations induites par détachements tourbillonnaires sont prévues ou ont été observées. Il convient que ces amortisseurs soient d'un type dont l'efficacité a été démontrée par l'expérience. Il convient de spécifier une bande de fréquence de vibrations.
- (2) Différents types d'amortisseurs peuvent être utilisés, à savoir :
 - amortisseurs de type à inertie accordés, composés de deux masses situées aux extrémités de courtes longueurs de câble hélicoïdal en console, accordées sur la même fréquence que celle du hauban ;
 - boucles de câbles fixées par colliers sur les haubans ;
 - amortisseurs de type «dash pots» pour une exploitation particulière.
- (3) Il convient que le nombre et la position appropriés des amortisseurs à installer soient conformes aux recommandations du fabricant.

11.2.3 Amortisseurs destinés à empêcher le galop

- (1) Une maîtrise partielle du galop peut être obtenue en fixant un cordage de chanvre entre les haubans, en reliant les points d'amplitude maximale de deux ou plusieurs haubans. Il convient de prendre en compte cet effet dans des conditions de fort vent pour le calcul des assemblages sur les haubans.

(1) C D'autres matériaux que le chanvre peuvent être utilisés.

- (2) L'accrochage de chaînes peut également être utilisé pour une maîtrise partielle du galop. Il convient de calculer précisément de tels dispositifs afin de minimiser toute éventuelle flexion locale du hauban et de s'assurer que les chaînes agissent bien dans la plage de fréquences appropriée. Il convient de consulter un spécialiste.

(2) C Par «flexion locale», on entend ici irrégularité de forme de la chaînette.

12 Isolateurs

- (1) Il convient de choisir les isolateurs en fonctions des exigences électriques et mécaniques.
- (2) Il convient que la résistance minimale ultime soit garantie par le fabricant et, si nécessaire, confirmée par des essais destructifs réalisés sur des échantillons.
- (3) Il convient que chaque isolateur de hauban soit conçu de telle sorte que même si un isolateur subit une ruine électrique, la stabilité du mât haubané soit toujours assurée.
- (4) Il convient de prendre des dispositions en ce qui concerne les arcs électriques, de telle sorte qu'un arc ne puisse se produire sur la surface des matériaux isolants au voisinage immédiat de la partie en acier.
- (5) Lorsque l'on utilise des isolateurs à la base d'un mât haubané, il convient de prévoir la possibilité d'un vérinage afin de permettre la mise en place de pièces de remplacement.
- (6) Il convient que les caractéristiques électriques soient garanties par le fabricant et confirmées par des essais appropriés, sauf si des résultats antérieurs sont disponibles. Il convient que la tension de fréquence radio spécifiée puisse supporter la superposition d'une valeur appropriée de tension statique provoquée par l'approche d'orages.
- (7) Il convient de réaliser le chargement et déchargement mécanique dans un type quelconque de matériau isolant (pendant des essais mécaniques et/ou en cours de construction) selon un rythme d'environ 5 % de la charge prévue par étapes d'environ 1 minute, de telle sorte que tout chargement ou déchargement ne prenne pas moins de 20 minutes.

(7) A Pour les essais et la mise en œuvre des isolateurs, on se référera aux prescriptions du fabricant.

13 Équipements annexes et autres

13.1 Moyens d'accès et plates-formes

(1) Il convient que les échelles, plates-formes, garde-corps et autres équipements annexes satisfassent les exigences générales données dans l'annexe E.

(1) I Il convient que les escaliers, échelles, plates-formes, garde-corps et autres équipements annexes satisfassent les exigences générales données dans l'annexe E.

(1) C Ces équipements annexes doivent respecter les prescriptions réglementaires (d'application obligatoire) et les normes françaises mentionnées dans les spécifications du projet et dans le présent document.

13.2 Protection parafoudre

(1) Il convient que les pylônes, mâts haubanés et haubans soient connectés à la terre pour la protection contre la foudre. Ceci peut être réalisé par l'utilisation d'un ruban de cuivre relié à des plaques et tiges de cuivre enfouies dans le sol. Il convient que les ancrages de haubans soient protégés de manière similaire.

(1) C Pour une information plus complète, il convient de se reporter aux normes NF C 17-100 et 17-102.

(2) Il convient que les spécifications du projet comprennent les détails de la méthode de mise à la terre fonction des conditions de sol.

(3) Il convient que le système de mise à la terre soit achevé avant le montage de la structure en acier, et que les connections au système de terre soient réalisées au fur et à mesure du montage.

(4) À condition que la continuité électrique de tous les joints de la structure soit assurée, il est inutile de prévoir une liaison supplémentaire.

(5) Il convient de réaliser des essais afin de garantir que la résistance de la terre se situe dans les limites prescrites dans les spécifications du projet.

13.3 Signalisation aérienne

13.3 C Il appartient au maître d'ouvrage d'obtenir les autorisations nécessaires à la construction de l'ouvrage.

(1) Il convient que les structures représentant un danger potentiel pour la navigation aérienne soient signalées conformément aux exigences de l'Organisation Aéronautique Internationale.

(2) En outre, il convient de respecter les limitations éventuelles de hauteur imposées par l'Autorité Aérienne Militaire ou Civile en des lieux géographiques particuliers.

13.4 Protection contre le vandalisme

13.4 C La définition et la mise en œuvre des mesures de protection sont de la responsabilité du maître d'ouvrage.

(1)P Des dispositifs de protection appropriés doivent être installés sur toutes les structures de classe de fiabilité élevée (classe 3) afin d'interdire l'accès des personnes non autorisées.

NOTE Les dispositifs possibles comprennent l'installation d'une barrière sur la totalité du périmètre et la présence permanente de gardes armés. Il convient de ne pas se fier à l'installation d'alarmes, sauf si leur extrême fiabilité et leur résistance aux fausses alarmes sont dûment prouvées. Il convient d'établir des procédures de traitement des alarmes.

(2) Il convient de considérer l'installation de protections pour les autres classes de structures, les ancrages et les liaisons, afin d'interdire l'accès des personnes non autorisées.

Annexe A (normative)

Modélisation des actions météorologiques

NOTE Étant donné que la présente annexe traite des actions du vent sur les pylônes en treillis, les mâts haubanés et les cheminées haubanées, ainsi que de leur réponse, il est prévu de la transférer dans l'EN 1991-2-4.

A.1 Généralités

A.1.1 Objet de la présente annexe

(1) La présente annexe contient les informations supplémentaires suivantes en ce qui concerne les actions du vent sur les pylônes et mâts haubanés :

- traînée aérodynamique, voir A.2 ;
- réponse des pylônes en treillis, voir A.3 ;
- réponse des mâts haubanés, voir A.4.

A.1.2 Symboles

(1) Outre ceux donnés dans l'ENV 1993-1-1, les symboles principaux suivants sont utilisés dans cette annexe :

A	Aire projetée
C	Coefficient de traînée (pression)
D	Diamètre ; distance
F	Charge de vent
G	Facteur de réponse aux rafales
g	Facteur de pointe
I	Intensité de la turbulence
i	Schéma de chargement par tronçons
K	Facteur
L	Longueur projetée, longueur de membrure
m	Masse par unité de hauteur, masse
N	Nombre
n	Fréquence
Q	Paramètre
R	Résistance au vent
R_e	Nombre de Reynolds
S	Sollicitation dans un élément (par exemple : effort, cisaillement ou moment fléchissant)
T	Couple
V	Vitesse du vent
z	Hauteur
α	Pente d'un hauban par rapport à l'horizontale
β	Paramètre
δ	Décrément logarithmique d'amortissement
η	Coefficient de protection
θ	Angle d'incidence du vent par rapport à la perpendiculaire dans le plan ; pente
ρ	Densité
τ	Constante

ϕ	Opacité
Ψ	Angle d'incidence du vent par rapport à l'axe longitudinal
ω	Rapport d'espacement

(2) Outre ceux donnés dans l'ENV 1993-1-1, les indices suivants sont utilisés dans cette annexe :

A	Équipement annexe
av	Moyen
B	Base, fondamental
C	Cantilever, console
c	Éléments à section circulaire
e	Efficace
F	Face
f	Éléments à face plane
G	Hauban
H	Hauteur de mât haubané
L	Longueur
M	Mât haubané nu ou mât haubané uniquement
m	Mât haubané ; moyen
N	Global, hors-tout
s	Ossature simple
PL	Charge par tronçons
p	Zone
q	Cisaillement
s	Structure
sup	Super-critique
T	Pylône, total
W	Dans la direction du vent
w	Avec le vent
X	Dans la direction perpendiculaire au vent
Z	Dans la direction verticale
z	Hauteur z au-dessus du niveau du sol
q	Angle d'incidence du vent

A.2 Traînée aérodynamique

A.2.1 Généralités

A.2.1.1 Méthode

(1)P La traînée produite par la résistance au flux de vent, provoquée par un pylône ou un mât haubané et les éléments qu'il supporte doit être calculée au moyen de l'une des méthodes suivantes :

- coefficients donnés dans la Section A.2 ;
- essais réalisés sur des modèles en soufflerie dans des conditions simulant celles appropriées au site et dans la plage de vitesses de vent de référence prévues, soit en flux laminaire soit, de préférence, en flux turbulent à l'échelle.

NOTE Les exigences concernant les essais en soufflerie sont données dans l'ENV 1991-2-4.

(2)P Pour le calcul de la traînée aérodynamique, la structure doit être divisée en une série de tronçons dont chacune comprend plusieurs panneaux identiques ou presque identiques, voir figure A.2.1. Les projections des élé-

ments de treillis dans les faces parallèles à la direction du vent, et des contreventements horizontaux, doivent être omises dans la détermination de l'aire projetée de la structure.

(3) Il convient en général de diviser la structure en un nombre de sections suffisant pour permettre la modélisation appropriée des charges de vent en vue de l'analyse globale.

(4)P Lors de la détermination de la traînée aérodynamique dans des conditions de givre, les aires projetées des éléments de structure et des équipements annexes doivent être majorées pour tenir compte de l'épaisseur du givre le cas échéant.

(5)P Pour l'application de la méthode donnée dans la présente annexe, la traînée maximale sous un angle de $\pm 30^\circ$ par rapport à la direction de vent nominale doit être utilisée pour obtenir le chargement maximal dans la direction du vent.

A.2.1.2 Contraintes

(1) La traînée aérodynamique totale peut être obtenue suivant A.2.1.3 pour les structures carrées et triangulaires. Pour les autres formes de structures, il convient d'utiliser la méthode donnée en A.2.7.

(2) Il est possible de profiter de l'évaluation plus précise obtenue en utilisant la méthode générale donnée en A.2.7 dans le cas de panneaux de structures comportant des équipements annexes ne respectant pas les conditions suivantes :

- a) l'aire projetée totale des parties annexes adjacentes à la face considérée est inférieure à l'aire projetée des éléments structuraux de cette face (voir figure A.2.1) ;
- b) l'aire projetée totale perpendiculairement à une face quelconque de la structure d'un seul équipement annexe extérieur ou intérieur quelconque est inférieure à la moitié de l'aire brute de la face du panneau ;
- c) un équipement annexe quelconque ne dépasse pas de plus de 10 % la largeur de face totale de la structure à ce niveau.

NOTE Lorsque les aires projetées des équipements annexes sur chaque face restent dans la limite de 10 % les unes par rapport aux autres, et sont de profil circulaire ou plan, elles peuvent être traitées comme des éléments structuraux appropriés et les coefficients de traînée globaux peuvent être calculés conformément à A.2.2.

(2) I La méthode décrite en A.2.1.3 peut être utilisée pour les structures à section carrée ou triangulaire équilatérale présentant des aires égales sur chaque face ($\pm 10\%$, voir note ci-dessous) et respectant les conditions :

- a) l'aire projetée totale des équipements annexes attachés à la face considérée est inférieure à l'aire projetée des éléments structuraux de cette face (voir figure A.2.1) ;
- b) l'aire projetée perpendiculairement à une face de la structure d'un équipement annexe extérieur ou intérieur est inférieure à la moitié de l'aire brute de la face du panneau ; ($hb/2$).
- c) un équipement annexe quelconque ne dépasse pas de plus de 10 % la largeur de face totale de la structure à ce niveau.

Pour les autres structures, on doit avoir recours à la méthode décrite en A.2.7.

NOTE Lorsque les aires projetées des équipements annexes sur chaque face restent dans la limite de 10 % les unes par rapport aux autres, et sont de profil circulaire ou plan, elles peuvent être traitées comme des éléments structuraux appropriés et les coefficients de traînée globaux peuvent être calculés conformément à A.2.2. Dans ce cas, l'aire projetée de ces équipements est incorporée à A_S

A.2.1.3 Traînée aérodynamique totale :

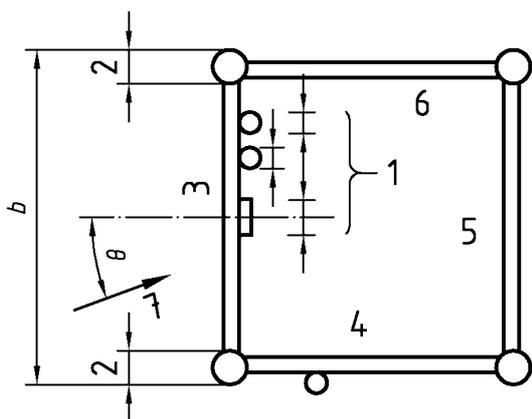
(1)P La traînée aérodynamique totale R_W dans la direction du vent sur une section de la structure doit être prise égale à :

$$\Sigma R_W = R_{SW} + R_{AW} \quad \dots (A.1)$$

où :

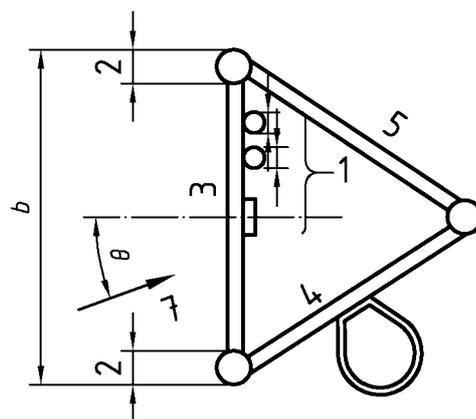
R_{SW} est la traînée aérodynamique de la section de structure nue, déterminée conformément à A.2.2 au moyen du rapport d'opacité ϕ approprié à la structure nue ;

R_{AW} est la traînée aérodynamique des équipements annexes, déterminée conformément à A.2.3 et A.2.4 selon le cas.



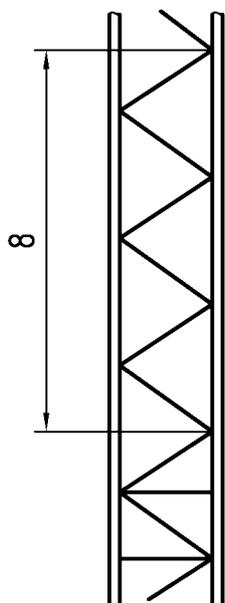
NOTE Il convient de prendre la face 1 comme la face au vent avec : $-45^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$

a) Coupe sur structure carrée

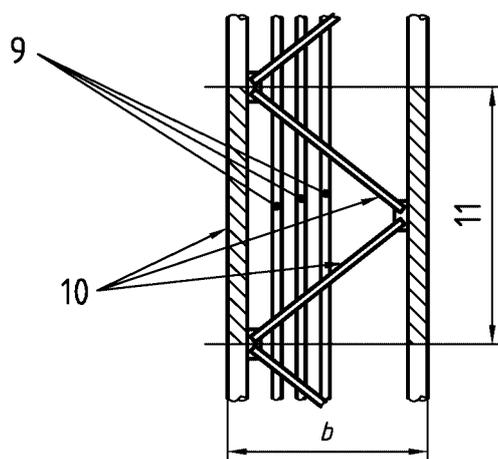


NOTE : Il convient de prendre la face 1 comme la face au vent avec : $-60^\circ \leq \theta \leq 60^\circ$

b) Coupe sur structure triangulaire



c) Section de mât haubané



d) Tronçon de structure

Pour A.2 et A.3 : opacité : $\phi = A_S / hb$

Pour la méthode donnée en A.2.7 : opacité : $\phi = (A_S + A_A) / hb$

NOTE Les composants structurels de la face avant (hachurés) ont une aire projetée A_S égale à A_F suivant A.2.2.

Légende

- | | |
|--|---|
| 1 Équipements annexes projetés perpendiculairement à la face (comprenant barreaux d'échelles, arceaux, etc.) | 7 Vent |
| 2 Membrure projetée perpendiculairement à la face | 8 Section de mât haubané |
| 3 Face 1 | 9 Composants annexes d'aire projetée A_A |
| 4 Face 2 | 10 Composants structurels d'aire projetée A_S |
| 5 Face 3 | 11 hauteur de tronçon (h) |
| 6 Face 4 | |

Figure A.2.1 — Aire de tronçon projetée utilisée pour le calcul du rapport d'opacité ϕ

A.2.2 Traînée aérodynamique de la structure

A.2.2.1 Généralités

(1)P Pour une structure en treillis de forme plane carrée ou triangulaire équilatérale, présentant des aires égales sur chaque face, la traînée totale au vent R_{SW} dans la direction du vent sur une hauteur de tronçon des éléments structuraux doit être prise égale à :

$$R_{SW} = K_{\theta} C_N A_S \quad \dots (A.2)$$

où :

C_N est le coefficient de traînée (pression) normale globale, déterminée selon A.2.2.2 ;

A_S est l'aire totale projetée perpendiculairement à une face des éléments structuraux de la face considérée dans une hauteur de tronçon au niveau concerné (voir figure A.2.1) comprenant le givre le cas échéant ;

K_{θ} est le facteur d'incidence du vent.

(2)P Le facteur d'incidence du vent K_{θ} peut être calculé par :

$$K_{\theta} = 1,0 + K_1 K_2 \sin^2 2\theta \text{ pour les structures carrées} \quad \dots (A.3a)$$

$$K_{\theta} = \frac{A_c + A_{c,sup}}{A_F} + \frac{A_f}{A_F} (1 - 0,1 \sin^2 1,5\theta) \text{ pour les structures triangulaires} \quad \dots (A.3b)$$

avec :

$$K_1 = \frac{0,55 A_f}{A_F} + \frac{0,8 (A_c + A_{c,sup})}{A_F} \quad \dots (A.3c)$$

$$K_2 = 0,2 \text{ pour } 0 \leq \phi \leq 0,2 \text{ et } 0,8 \leq \phi \leq 1,0 \quad \dots (A.3d)$$

$$= \phi \text{ pour } 0,2 < \phi < 0,5 \quad \dots (A.3e)$$

$$= 1 - \phi \text{ pour } 0,5 < \phi < 0,8 \quad \dots (A.3f)$$

où :

A_F est l'aire totale projetée perpendiculairement à une face et égale à A_S , lorsque tous les composants sont traités comme éléments structuraux ;

A_f , θ et ϕ sont tels que définis dans la figure A.2.2 ;

A_c , $A_{c,sup}$ sont tels que définis en A.2.2.2 ;

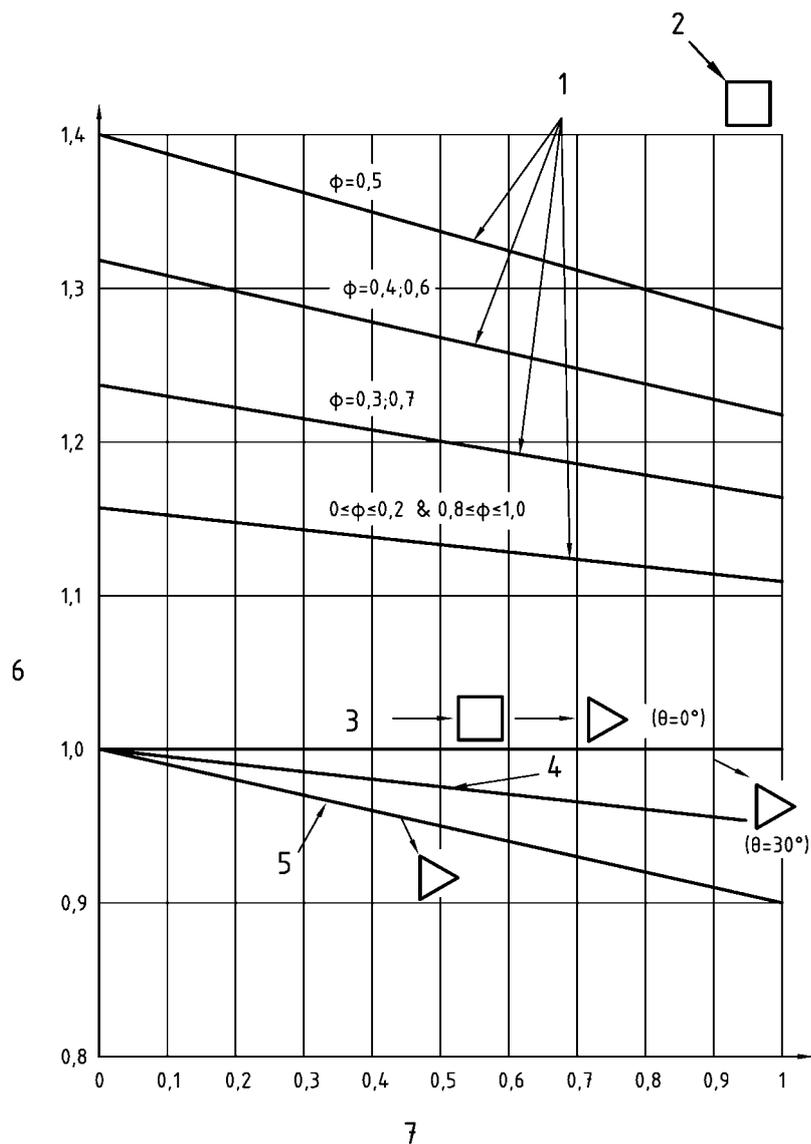
θ est l'angle d'incidence du vent par rapport à la face 1, en plan ; la face 1 doit être prise comme face au vent (voir figure A.2.1).

(3) Des valeurs de K_{θ} pour des valeurs courantes de θ peuvent être prises dans la figure A.2.2.

(4)P Les éléments à section circulaire doivent être considérés comme étant en régime sous-critique lorsque le nombre de Reynolds $R_e \leq 4 \times 10^5$ et peuvent être considérés comme étant en régime sur-critique pour des valeurs supérieures de R_e , uniquement lorsqu'ils sont exempts de givre.

(5) Il convient que la valeur de R_e soit calculée au moyen de 10.8.1 de l'ENV 1991-2-4.

(6)P Lorsque l'on prend pour hypothèse un régime sur-critique pour un seul ou pour la totalité des éléments, il doit être vérifié que cela ne provoque pas un chargement supérieur pour une vitesse de vent réduite correspondant à $R_e < 4 \times 10^5$.



Légende

- 1 Pylônes carrés Vent diagonal ($\theta = 45^\circ$)
 - 2 Vent
 - 3 Face de pylônes carrés ou triangulaires au vent
 - 4 Pylônes triangulaires, vent parallèle à la face
 - 5 Pylônes triangulaires Vent sur angle ($\theta = 60^\circ$)
 - 6 K_θ pour valeurs courantes de θ
 - 7 $\frac{A_f}{A_F}$
- A_f Aire projetée totale, perpendiculairement à la face, des éléments à face plane de la face ;
 A_F Aire projetée totale perpendiculairement à la face ;
 θ Angle d'incidence du vent par rapport à la face 1, en plan ;

ϕ Rapport de l'aire projetée totale à l'intérieur d'une hauteur de tronçon des composants structurels de la face au vent (A_S) visibles perpendiculairement à la face, à l'aire délimitée sur la hauteur de tronçon par l'ossature projetée perpendiculairement à la face, les deux au niveau considéré (voir figure A.2.1).

I
$$\phi = \frac{A_S}{hb}$$

Figure A.2.2 — Facteur d'incidence du vent K_θ

A.2.2.2 Coefficients de traînée normale globale

(1)P Les valeurs de coefficients de traînée (pression) normale globale C_N applicables à la structure de section carrée ou triangulaire équilatérale composée d'éléments à section circulaire et à faces planes doivent être prises égales à :

$$C_N = C_{Nf} \frac{A_f}{A_F} + C_{Nc} \frac{A_c}{A_F} + C_{Nc,sup} \frac{A_{c,sup}}{A_F} \quad \dots (A.4)$$

où :

C_{Nf} , C_{Nc} et $C_{Nc,sup}$ représentent les coefficients de traînée pour des sections composées d'éléments à faces planes, à section circulaire sous-critique et circulaire sur-critique, respectivement, donnés par :

$$C_{Nf} = 1,76 C_1 [1 - C_2 \phi + \phi^2] \quad \dots (A.5a)$$

$$C_{Nc} = C_1 (1 - C_2 \phi) + (C_1 + 0,875) \phi^2 \quad \dots (A.5b)$$

$$C_{Nc,sup} = 1,9 - \sqrt{(1 - \phi)(2,8 - 1,14C_1 + \phi)} \quad \dots (A.5c)$$

avec :

$C_1 = 2,25$ pour les structures carrées.

$= 1,9$ pour les structures triangulaires.

$C_2 = 1,5$ pour les structures carrées ;

$= 1,4$ pour les structures triangulaires.

où :

ϕ , A_f sont tels que définis dans la figure A.2.2 ;

A_c est l'aire projetée totale vue perpendiculairement à la face des éléments à section circulaire dans la face en régime sous-critique ;

$A_{c,sup}$ est l'aire projetée totale vue perpendiculairement à la face des éléments à section circulaire dans la face en régime sur-critique ;

A_F est l'aire projetée totale perpendiculairement à une face, donnée par :

$$A_F = A_f + A_c + A_{c,sup} ;$$

$= A_s$ (tel que défini en A.2.2.1) lorsque tous les composants sont traités comme des éléments structuraux.

(2) Pour les calculs de traînée, les éléments à section circulaire en régime sur-critique peuvent en toute sécurité être considérés comme étant en régime sous-critique.

(3) Des valeurs approchées de ces coefficients de traînée peuvent être prises dans la figure A.2.3.

A.2.3 Équipements annexes linéaires

(1)P La traînée aérodynamique R_{AW} dans la direction du vent d'une partie d'équipement annexe linéaire (y compris les guides d'ondes, lignes d'alimentation, etc.) à l'intérieur d'une hauteur de tronçon doit être prise égale à :

$$R_{AW} = C_N K_A A_A \sin^2 \psi \quad (\text{A.6})$$

où :

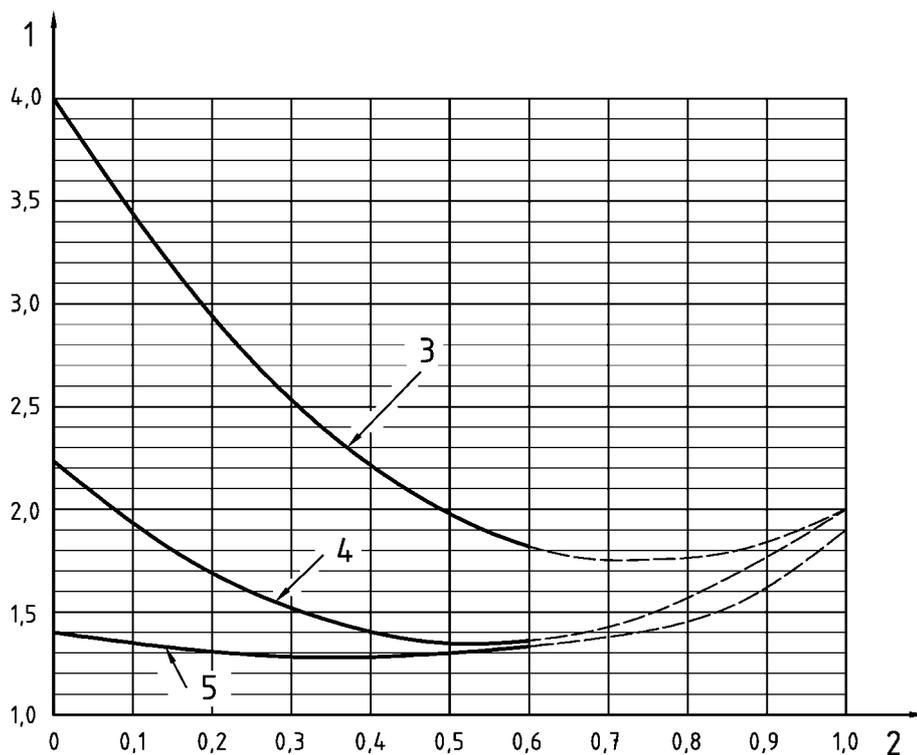
C_N est le coefficient de traînée normale globale appropriée à l'équipement et à son nombre de Reynolds, dont des valeurs sont données dans le tableau A.2.1 pour des éléments individuels isolés courants et pouvant être déterminées conformément à A.2.7.2 pour les parties composées de treillis simples ;

K_A est le coefficient réducteur prenant en compte la protection de l'élément par la structure ; K_A est donné dans le tableau A2.2 sauf pour les sections circulaires en régime sur-critique et pour les équipements annexes ne respectant pas les contraintes données en A.2.1.2, auquel cas $K_A = 1,0$;

A_A est l'aire de la partie visible vue dans la direction du vent y compris le givre le cas échéant. Pour les cylindres équipés de ceintures, il convient de baser A_A sur la largeur hors-tout incluant deux fois la hauteur de la ceinture ;

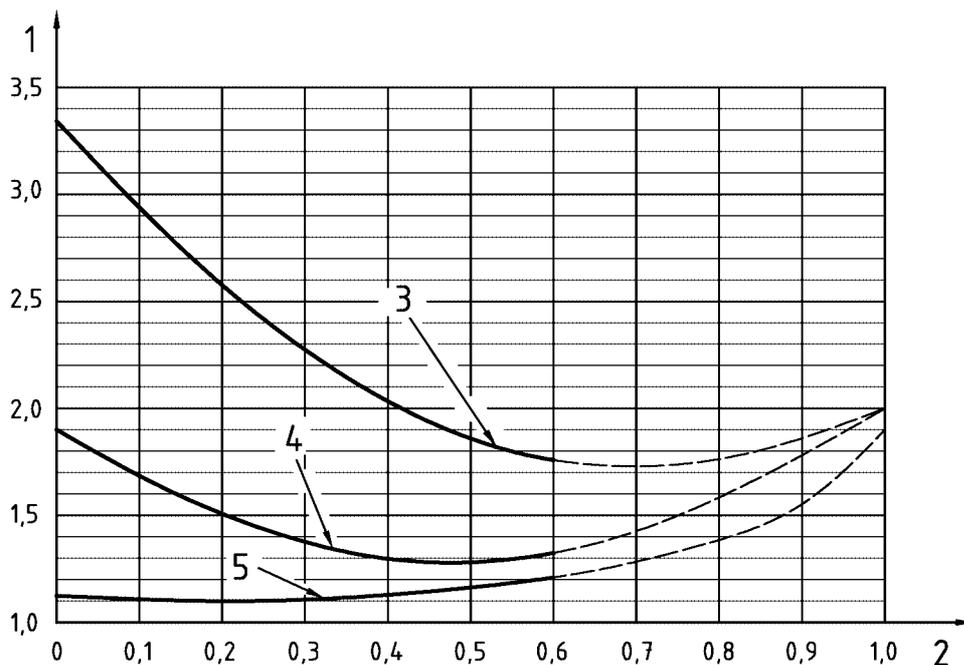
ψ est l'angle d'incidence du vent par rapport à l'axe longitudinal d'un élément linéaire quelconque.

(1) C Le coefficient réducteur K_A n'est à prendre en compte que si l'équipement est effectivement masqué par une face au moins de la structure ou réciproquement.



a) Structures carrées

Figure A.2.3 (à suivre)



b) Structures triangulaires

Légende

- 1 Coefficient de traînée, C_N
- 2 Opacité ϕ
- 3 À faces planes
- 4 Circulaire (sous-critique)
- 5 Circulaire (surcritique)

NOTE Pour les structures avec $\phi > 0,6$ il convient de considérer la possibilité de réponse perpendiculairement au vent provoquée par le détachement de tourbillons, voir ENV 1991-2-4.

Figure A.2.3 — Coefficients de traînée normale globale C_N pour les structures carrées et triangulaires (fin)

A.2.4 Équipements annexes ponctuels

(1)P Pour tout équipement annexe ponctuel, tel qu'un réflecteur parabolique, la traînée aérodynamique totale R_{AW} dans la direction du vent doit être prise égale à :

$$R_{AW} = C_A K_A A_A \quad \dots (A.7)$$

où :

C_A est le coefficient de traînée pour l'équipement approprié à la direction et à la vitesse du vent, devant être obtenu par des essais en soufflerie ;

A_A est l'aire de référence de l'équipement telle que définie dans l'essai en soufflerie et compatible avec la valeur de C_A ;

K_A est tel que défini en A.2.3 .

(1) **C** C_A et A_A peuvent être obtenus auprès du fabricant de l'équipement ou fixés par les spécifications du projet ; ce n'est qu'à défaut que des essais en soufflerie seront entrepris.

(2)P La traînée pour la réponse transversale correspondante R_{AX} ainsi que le soulèvement R_{AZ} doivent être calculés de la même façon que pour R_{AW} en prenant la direction de référence dans le plan perpendiculaire à la direction de vent moyenne, et C_A comme le coefficient approprié pour la réponse transversale et le soulèvement.

(3)P La traînée de torsion correspondante T_{AW} doit être calculée au moyen du coefficient approprié, obtenu par des essais en soufflerie en association avec le bras de levier approprié pour cette torsion.

A.2.5 Haubans

(1)P La traînée aérodynamique R_G perpendiculaire aux haubans dans le plan comprenant le hauban et le vent doit être prise égale à :

$$R_G = C_G D_G L_G \sin^2 \psi \quad \dots \text{(A.8)}$$

où :

C_G est le coefficient de traînée normale globale approprié au nombre de Reynolds, dont les valeurs sont données dans le tableau A.2.1 avec et sans givre ;

L_G est la longueur de corde du hauban ;

D_G est le diamètre du hauban avec ou sans givre selon le cas ;

ψ est l'angle d'incidence du vent par rapport à la corde.

A.2.6 Givrage

(1)P Lors de la détermination de la résistance au vent d'une structure et des équipements annexes dans des conditions de givre, chaque élément de la structure, les parties annexes et les haubans doivent être considérés comme enrobés de givre sur toutes leurs faces, avec une épaisseur égale à celle donnée dans l'annexe B.

(2) Lorsque l'espace entre éléments non givrés est inférieur à 75 mm, il convient de considérer que cet espace est totalement rempli par de la glace en cas de givre.

(3) Il convient de prendre les coefficients de traînée (pression) des éléments individuels dans le tableau A.2.1.

(4) Il convient de prendre en compte les conditions de givrage asymétrique avec certains haubans couverts de givre et d'autres exempts de givre (voir annexe B).

Tableau A.2.1 — Coefficients de traînée (pression) types pour les éléments individuels

Tableau A.2.1 A Les coefficients de traînée donnés pour C_N sont également valables pour C_G .

Type d'élément	Nombre de Reynolds R_e (voir ENV 1991-2-4)	Coefficient de traînée (pression) C_N	
		Sans givre	Avec givre
(a) Plaques et profils à faces planes	Toutes valeurs	2,0	2,0
(b) Profils circulaires et fil lisse	$\leq 2 \times 10^5$	1,2	1,2
	4×10^5	0,6	1,0
	$> 10 \times 10^5$	0,7	1,0
(c) Câbles à torons fins, par exemple conducteur rond en aluminium à âme d'acier, câbles clos, câbles hélicoïdaux comportant plus de sept fils	sans givre :		
	$\leq 6 \times 10^4$	1,2	
	$\geq 10^5$	0,9	
	avec givre :		
$\leq 1 \times 10^5$		1,25	
$\geq 4 \times 10^5$		1,0	
(d) Câbles à torons épais, par exemple filins à petits fils, câbles ronds, câbles hélicoïdaux ne comportant que sept fils (1 x 7)	sans givre :		
	$\leq 4 \times 10^4$	1,3	
	$> 4 \times 10^4$	1,1	
	avec givre :		
$\leq 1 \times 10^5$		1,25	
$\geq 2 \times 10^5$		1,0	
(e) Cylindres équipés de cerces hélicoïdales d'une hauteur jusqu'à 0,12D	Toutes valeurs	1,2	1,2

NOTE : Pour des valeurs intermédiaires de R_e , il convient de calculer C_N par interpolation linéaire.

**Tableau A.2.2 — Coefficient réducteur K_A
pour équipements annexes supplémentaires**

Position des équipements annexes	Coefficient réducteur K_A	
	Forme plane carrée ou rectangulaire	Forme plane triangulaire
Intérieurs à la section	0,6	0,5
Extérieurs à la section	0,7	0,6

A.2.7 Structures non conformes à A.2.1.2

A.2.7.1 Traînée aérodynamique totale

(1)P Pour les structures ne respectant pas les conditions de A.2.1.2, la traînée aérodynamique totale ΣR_w dans la direction du vent sur une hauteur de tronçon d'une structure carrée ou triangulaire comprenant des parties ou des équipements annexes ne respectant pas les conditions de A.2.1.2 ou d'une structure de section transversale rectangulaire à côtés inégaux doit être déterminée de la façon suivante :

— pour les structures carrées et rectangulaires :

$$\Sigma R_w = R_{1e} \cos^2 \theta_1 + R_{2e} \sin^2 \theta_1 \quad \dots (A.9)$$

— pour les structures triangulaires :

$$\Sigma R_w = R_{1e} \cos^2 \left(\frac{3\theta_1}{4} \right) + R_{2e} \sin^2 \left(\frac{3\theta_1}{4} \right) \quad \dots (A.10)$$

où :

R_{1e} est la traînée aérodynamique efficace donnée par les expressions suivantes :

— pour les structures carrées et rectangulaires :

$$R_{1e} = (R_1 + \eta_1 R_3) K_{\theta 1}$$

— pour les structures triangulaires :

$$R_{1e} = \left\{ R_1 + \frac{\eta_1}{2} (R_2 + R_3) \right\} K_{\theta 1}$$

R_{2e} est la traînée aérodynamique efficace donnée par les expressions suivantes :

— pour les structures carrées et rectangulaires :

$$R_{2e} = (R_2 + \eta_2 R_4) K_{\theta 2}$$

— pour les structures triangulaires :

$$R_{2e} = \left\{ R_2 + \frac{\eta_2}{2} (R_1 + R_3) \right\} K_{\theta 2}$$

R_1 à R_4 sont les traînées aérodynamiques données par :

$$R_1 = A_{s1} C_{n1} + R_{AW1} ;$$

$$R_2 = A_{s2} C_{n2} + R_{AW2} ;$$

$$R_3 = A_{s3} C_{n3} + R_{AW3} ;$$

$$R_4 = A_{s4} C_{n4} + R_{AW4} ;$$

A_{s1} à A_{s4} sont les aires projetées perpendiculairement aux faces 1, 2, 3 et 4 respectivement, des éléments traités comme des éléments structuraux à l'intérieur de la même hauteur de tronçon des faces 1, 2, 3 et 4, incluant le givre le cas échéant (voir figure A.2.1) ;

C_{n1} à C_{n4} sont les coefficients de traînée relatifs aux faces 1 à 4, respectivement, des éléments traités comme des éléments structuraux, pouvant être déterminés conformément à A.2.7.2 ;

R_{AW1} à R_{AW4} sont les traînées aérodynamiques relatives aux faces 1 à 4, respectivement, pour les équipements annexes non traités comme des éléments structuraux, déterminées conformément à A.2.3 ou A.2.4, selon le cas, mais en prenant $K_A = 1,0$ dans tous les cas ;

η_1 et η_2 sont les facteurs de protection efficace pour les faces 1 et 2, respectivement, comprenant les éléments structuraux et annexes.

— pour les structures carrées et rectangulaires, il convient de prendre η_1 et η_2 égaux à :

$$\eta_e + 0,15 (\omega - 1) (\phi - 0,1)$$

mais non supérieurs à 1,0 ;

— pour les structures triangulaires, il convient de prendre η_1 et η_2 égaux à :

$$\eta_e + 0,15 (\omega - 1) (\phi - 0,1)$$

mais non supérieurs à 1,0 ;

$\eta_e = \eta_f (A_F + 0,83 A_C + 2,1 A_{C,sup} + A_A) / (A_s + A_A)$ mais non supérieur à 1,0 ;

η_f donné par :

$$\eta_f = (1 - \phi)^{1,89}$$

où :

ϕ est défini dans la figure A.2.2.

Des valeurs approchées de η_f sont données dans la figure A.2.4 applicable aux faces 1 ou 2, selon le cas, en utilisant ϕ tel que défini dans le présent alinéa ;

$A_f, A_c, A_{c,sup}$ sont tels que définis en A.2.2.2 applicables aux faces 1 ou 2, selon le cas ;

A_A est l'aire projetée perpendiculairement à la face des équipements annexes non traités comme éléments structuraux relatifs aux faces 1 à 4 selon le cas ;

$A_F = A_s + A_A$ où $A_s = A_f + A_c + A_{c,sup}$;

ϕ est l'opacité relative à la face 1 ou 2, telle que définie dans la figure A.2.2, mais comprenant les éléments structuraux et annexes (voir figure A.2.1) ;

ω est le rapport d'espacement, égal à la distance entre la face considérée et celle qui lui est parallèle divisée par la largeur de la face considérée au niveau du centre de gravité de l'aire du panneau, mais non inférieur à 1,0 et égal à 1,0 pour les structures triangulaires ;

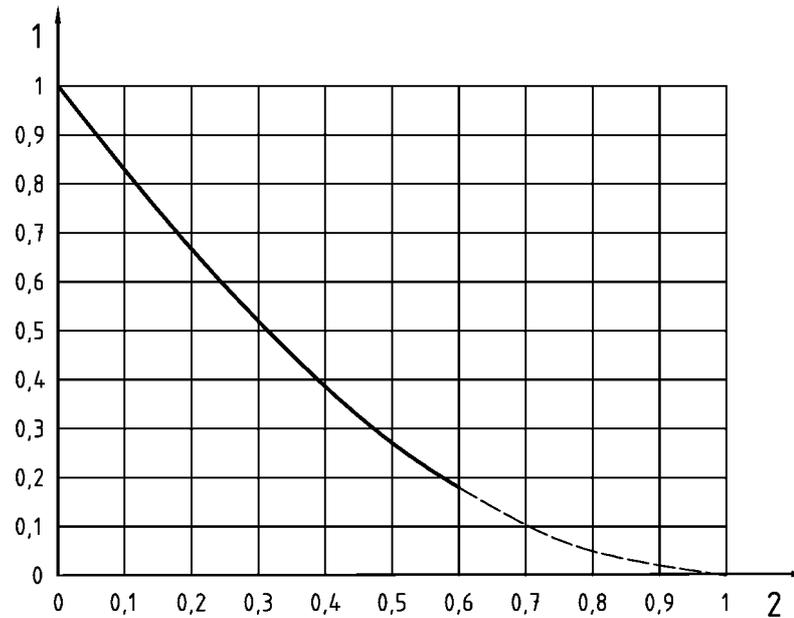
K_{01} et K_{02} sont à calculer selon A.2.2.1, applicable aux faces 1 ou 2, selon le cas, en utilisant A_F, A_f et ϕ tels que définis dans le présent alinéa ;

θ_1 est l'angle d'incidence du vent par rapport à la perpendiculaire à la face 1.

(1) C Les valeurs de η_f peuvent être lues sur l'abaque de la figure A.2.4.

Pour l'évaluation des R_{AWi} , toutes les surfaces d'équipements sont projetées sur la face i.

(2)P Pour les structures ne respectant pas les conditions de A.2.1.2, il convient de déterminer la traînée totale dans la direction perpendiculaire au vent sur un panneau R_X comme en (1), mais en prenant la direction de référence comme la perpendiculaire dans le plan par rapport à la direction de vent moyenne.



NOTE Pour les structures avec $\phi > 0,6$ il convient de considérer la possibilité de réponse perpendiculaire au vent provoquée par le détachement de tourbillons, voir ENV 1991-2-4.

Légende

- 1 Facteur de protection η_f
- 2 Opacité ϕ

Figure A.2.4 — Coefficient de protection η_f pour les treillis simples composés d'éléments à faces planes

Figure A.2.4 I Coefficient de protection η_f

A.2.7.2 Coefficients de traînée (pression) pour les treillis simples :

(1)P Les valeurs de coefficients de traînée (pression) normale C_n pour les treillis simples composés d'éléments à section circulaire et à faces planes doivent être prises égales à :

$$C_n = C_{nf} \frac{A_f}{A_s} + C_{nc} \frac{A_c}{A_s} + C_{nc,sup} \frac{A_{c,sup}}{A_s} \quad \dots (A.11)$$

(1) I

$$C_n = C_{nf} \frac{A_f}{A_F} + C_{nc} \frac{A_c}{A_F} + C_{nc,sup} \frac{A_{c,sup}}{A_F} \quad \dots (A.11)$$

où :

C_{nf} , C_{nc} et $C_{nc,sup}$ sont les coefficients de traînée (pression) normale pour les éléments à faces planes, à section circulaire sous-critique et circulaire sur-critique, respectivement, donnés par :

$$C_n = C_{nf} \left\{ \frac{A_f + (0,6 + 0,4\phi^2)A_c + (0,33 + 0,62\phi^{5/3})A_{c,sup}}{A_F} \right\}$$

où :

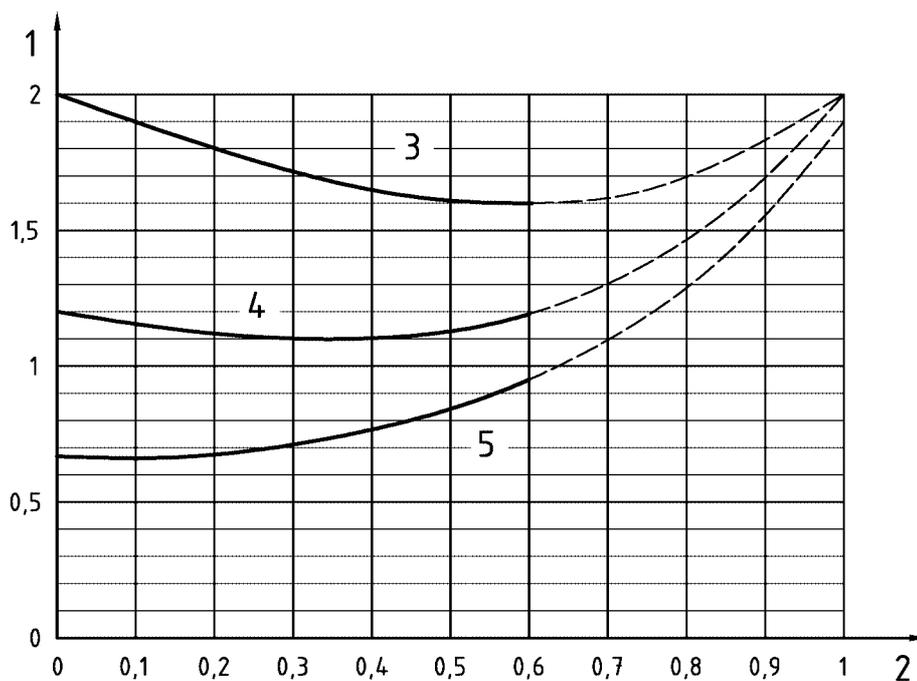
C_{nf} coefficient de traînée pour les treillis simples égal à :

$$1,58 + 1,05 (0,6 - \phi)^{1,8} \text{ pour } \phi \leq 0,6$$

$$1,58 + 2,625 (\phi - 0,6)^2 \text{ pour } \phi > 0,6$$

A_f , A_c , $A_{c,sup}$, A_F et ϕ sont tels que définis en A.2.7.1.

(2) Des valeurs approchées de ces coefficients de traînée sont données dans la figure A.2.5.



NOTE Pour les structures avec $\phi > 0,6$ il convient de considérer la possibilité de réponse perpendiculaire au vent provoquée par le détachement de tourbillons, voir ENV 1991-2-4.

Légende

- 1 Coefficient de traînée, C_n
- 2 Opacité ϕ
- 3 À faces planes
- 4 Circulaire (sous-critique)
- 5 Circulaire (surcritique)

Figure A.2.5 — Coefficient de traînée normale C_n pour les treillis simples

A.3 Comportement des pylônes en treillis

A.3 A Comportement des pylônes autostables en treillis

A.3.1 Généralités

(1)P Les efforts maximum à utiliser dans le calcul des fondations et des éléments des pylônes doivent être calculés en tenant compte de la réponse au vent turbulent.

(2) Il convient que ces efforts représentent l'effet résultant d'un chargement statique équivalent provoqué par un vent de vitesse égale à la valeur moyenne appropriée, agissant uniquement dans la direction du vent, et d'un chargement variable à la fois dans la direction du vent et dans la direction perpendiculaire au vent, provoqué par la turbulence.

A.3.2 Critères pour les méthodes statiques

(1) On doit utiliser l'une des méthodes suivantes de détermination des efforts maximum s'exerçant dans les éléments d'un pylône :

- a) la méthode statique équivalente, voir A.3.3 ;
- b) la méthode par analyse spectrale, voir A.3.4.

(2) La méthode statique équivalente prend en compte l'amplification dynamique de réaction typique de la majorité des pylônes susceptibles d'être construits conformément à la présente norme. La complexité de réalisation d'une analyse complète de la réaction dynamique est toutefois telle qu'il convient d'envisager une vérification de l'applicabilité de la procédure statique pour les pylônes autres que les pylônes standards. L'amplification dynamique s'accroît en général avec l'altitude des panneaux successifs de tout pylône, en particulier lorsqu'ils supportent de grandes concentrations d'équipements annexes ou lorsqu'ils présentent un profil général concave (Eiffelisation). Dans ces cas, il convient d'accorder une grande attention à l'application de la procédure statique aux pylônes où ces effets sont considérablement plus importants que ceux typiquement observés.

(3) Les procédures statiques équivalentes peuvent être utilisées si :

$$\frac{7 m_T}{\rho_s R_{WT} \sqrt{d_B} \tau_0} \left(\frac{5}{6} - \frac{h_T}{h} \right) < 1 \quad \dots (A.12)$$

où :

R_{WT} somme des traînées aérodynamiques des tronçons, en commençant par le sommet du pylône, de telle sorte que R_{WT} soit juste inférieur à un tiers de la sommation globale $\sum R_W$ pour la totalité du pylône (en m^2) ;

ρ_s masse volumique du matériau de la structure du pylône (en kg/m^3) ;

m_T masse totale des tronçons composant R_{WT} (en kilogrammes) ;

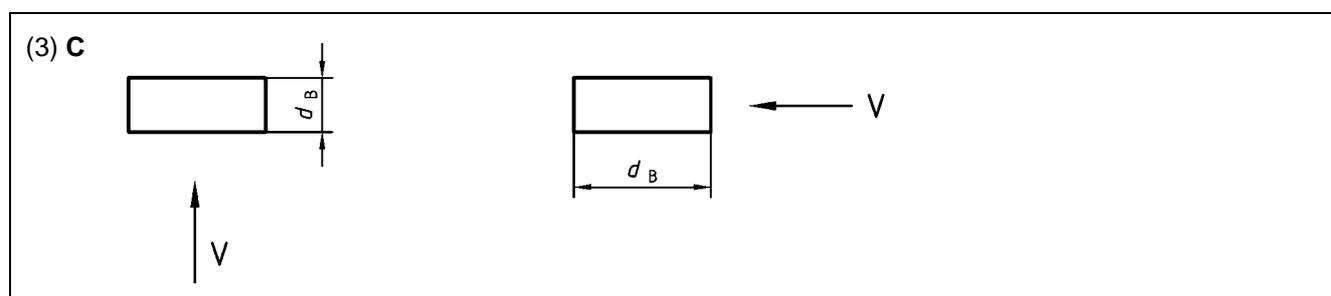
h hauteur du pylône (en mètres) ;

h_T hauteur totale des tronçons composant R_{WT} , sans être supérieur à $H/3$ (en mètres) ;

τ_0 constante volume/surface résistante prise égale à 0,001 m ;

d_B profondeur dans la direction du vent, égale à :

- la base d pour un pylône rectangulaire (en mètres) ;
- $0,75 \times$ largeur de base pour les pylônes triangulaires (en mètres).



A.3.3 Méthode statique équivalente

A.3.3.1 Généralités

(1)P Pour les pylônes symétriques avec membrures contreventées, avec ou sans équipement annexes dont la traînée a été calculée selon A.2.2, les efforts maximum s'exerçant dans les éléments doivent être calculés conformément à A.3.3. Pour les pylônes non symétriques avec membrures contreventées et contenant des équipements annexes, ou pour les pylônes dont la traînée a été calculée selon A.2.7, les efforts maximum s'exerçant dans les éléments doivent être calculés conformément à A.3.3.2.8.

A.3.3.2 Charges de vent

A.3.3.2.1 Généralités

(1)P La charge de vent maximale dans la direction du vent F_{TW} doit être prise égale à :

$$F_{TW} = \frac{\rho}{2} V_m^2(z) \sum R_W(1 + G) \quad \dots (A.13)$$

où :

G est le facteur de rafale approprié au moment fléchissant ou à l'effort tranchant, déterminé conformément à A.3.3.2.2 ou A.3.3.2.3 selon le cas ;

ρ est la masse volumique de l'air à la température et à la pression de référence ;

$V_m(z)$ est la vitesse moyenne du vent au niveau du centre de l'aire du tronçon à une hauteur de z mètres au-dessus du niveau du sol du site, déterminée conformément à 8.1 de l'ENV 1991-2-4 ;

$\sum R_W$ est la traînée aérodynamique totale de la structure (et de tout équipement annexe éventuel) dans la direction du vent sur la hauteur du tronçon concerné, déterminée conformément à A.2.

(2) Sauf spécification contraire dans l'annexe A de l'ENV 1991-2-4, la valeur de ρ doit être prise égale à $1,25 \text{ kg/m}^3$.

(3) Il convient de considérer ces charges comme agissant au niveau du centre de l'aire des faces (y compris les équipements annexes éventuels) à l'intérieur d'une hauteur du tronçon.

A.3.3.2.2 Chargement pour la détermination des moments fléchissants :

(1)P Le facteur de rafale G utilisé pour calculer les moments fléchissants globaux dans le calcul des membrures et des fondations doit être pris égal à :

$$G = G_B \left\{ 1 + 0,2 \left(\frac{z_m}{h} \right)^2 \right\} \quad \dots (A.14)$$

où :

G_B est le facteur fondamental de rafale déterminé conformément à A.3.3.2.4 ;

z_m est la hauteur au-dessus du sol à laquelle le moment fléchissant est calculé ;

h est la hauteur hors tout du pylône.

A.3.3.2.3 *Chargement pour la détermination des efforts tranchants :*

(1)P Le chargement à utiliser pour calculer les efforts s'exerçant dans les éléments de contreventement doit être évaluée à partir de la géométrie du pylône.

(2)P Pour les pylônes dans lesquels les pentes de membrures sont telles que, lorsqu'elles sont prolongées, leur intersection se situe au-dessus du sommet du pylône (voir figure A.3.1(a)), le facteur de rafale G utilisé dans le calcul du chargement de cisaillement global au-dessus d'un niveau donné devant être supporté par les contreventements ou les fondations doit être pris égal à :

$$G = G_B \left\{ 1 + 0,2 \left(\frac{z_g}{h} \right)^2 \right\} \quad \dots \text{ (A.15)}$$

où :

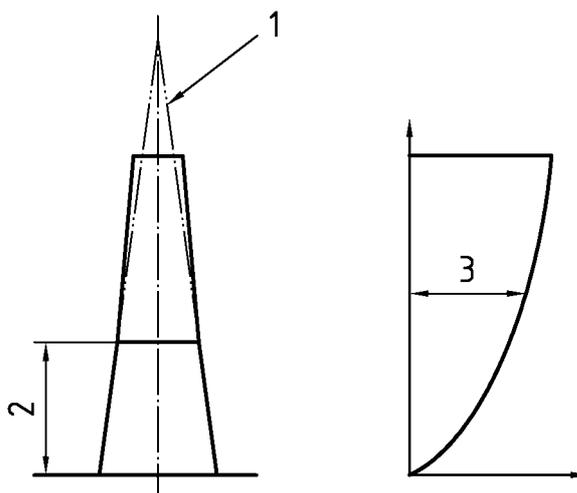
z_q est la hauteur au-dessus du sol à laquelle l'effort tranchant est calculé.

(3)P Pour les pylônes dans lesquels les membrures dans le tronçon considéré ont une pente telle que, lorsqu'elles sont prolongées, leur intersection se situe au-dessous du sommet du pylône (voir figure A.3.1(b)), deux analyses de chargement «partiellement réparti» doivent être effectuées, avec :

- a) le chargement de vent moyen considéré au-dessous de l'intersection (en prenant $G = 0,0$ en A.3.3.2.1), et une charge de vent «de rafale» équivalente au-dessus de l'intersection, déterminée selon A.3.3.2.1 (en utilisant le chargement donné en A.3.3.2.1) ;
- b) le chargement de vent moyen considéré au-dessus de l'intersection (en prenant $G = 0,0$ en A.3.3.2.1), et une charge de vent «de rafale» équivalente au-dessous de l'intersection, déterminée selon A.3.3.2.1 (en utilisant le chargement donné en A.3.3.2.1).

(3) C Les deux cas de chargement a) et b) ci-dessus ne sont utilisés que pour déterminer l'effort tranchant global dans le tronçon considéré ; les efforts tranchant globaux dans les tronçons éventuellement situés au-dessus sont à déterminer comme au cas 1 de la figure A.3.1

(4)P Dans le cas de plusieurs changements de pente, deux cas de chargement partiellement réparti doivent être analysés pour chaque panneau, voir figure A.3.1(c).

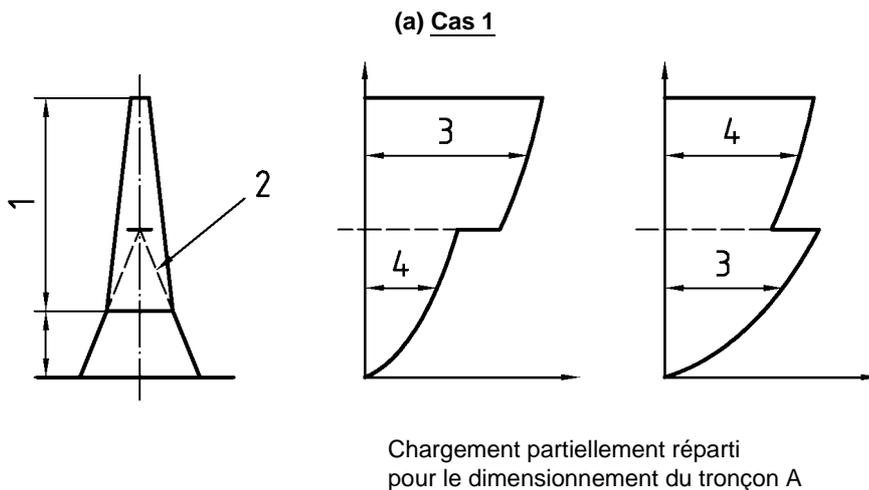


Efforts tranchants déterminés avec chargement moyen et facteur de réaction aux rafales

Légende

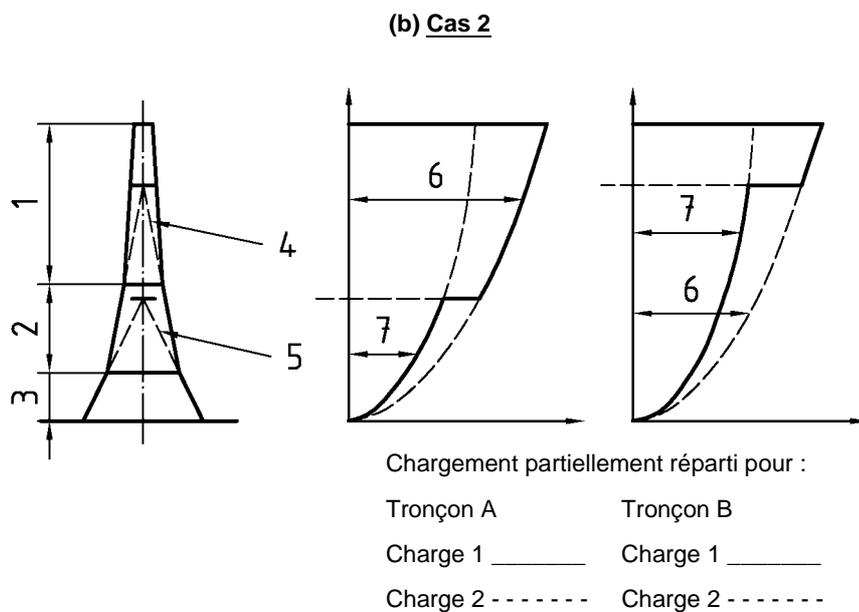
- 1 Prolongement des membrures du tronçon A
- 2 Tronçon A
- 3 Moyenne

Figure A.3.1 (à suivre)



Légende

- 1 Traiter les tronçons au-dessus du tronçon A comme le cas 1 Tronçon A
- 2 Prolongement des membrures du tronçon A
- 3 Rafale
- 4 Moyenne



Légende

- 1 Traiter les tronçons au-dessus du tronçon B comme le cas 1
- 2 Tronçon B
- 3 Tronçon A
- 4 Prolongement des membrures du tronçon B
- 5 Prolongement des membrures du tronçon A
- 6 Rafale
- 7 Moyenne

(c) Cas 3

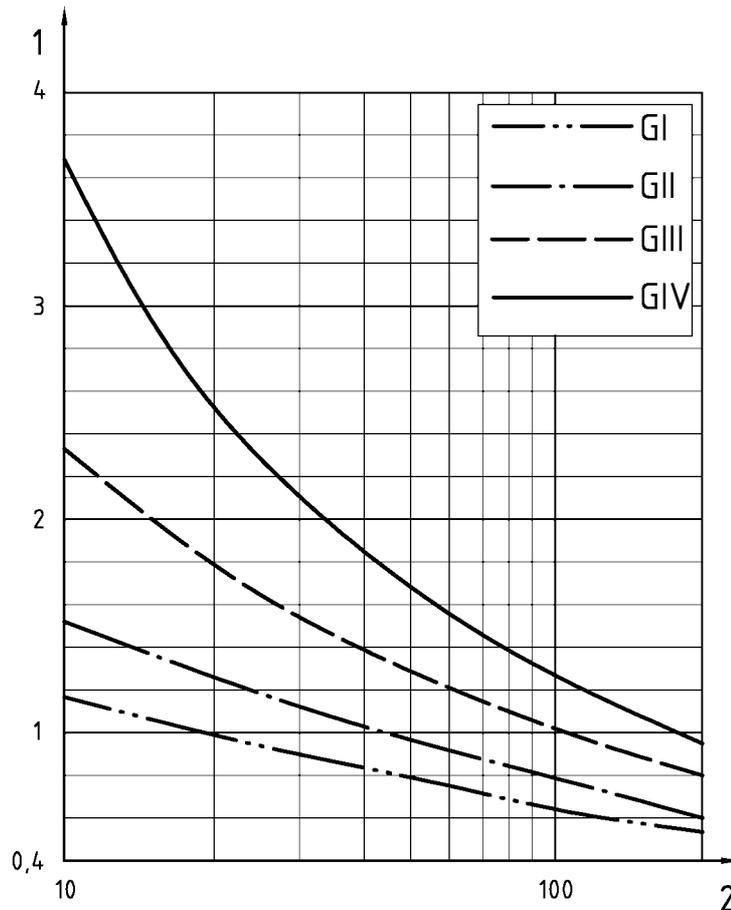
Figure A.3.1 — Chargement partiellement réparti de cisaillement (fin)

A.3.3.2.4 Facteur fondamental de rafale :

(1) Le facteur fondamental de rafale G_B peut être déterminé au moyen de la figure A.3.2 pour la catégorie appropriée selon l'ENV 1991-2-4 (en interpolant pour les catégories de terrain intermédiaires) et basé sur des valeurs types des paramètres, comme défini dans la figure.

(1) **A** Le facteur fondamental de rafale G_B peut être déterminé au moyen de la figure A.3.2 pour la catégorie de terrain appropriée selon l'ENV 1991-2-4 (en interpolant pour les catégories intermédiaires) si les valeurs des paramètres mentionnés en note 1 de la figure sont proches des valeurs réelles.

(2) Comme alternative, des valeurs plus précises de G_B peuvent être calculées selon la procédure donnée dans l'annexe B de l'ENV 1991-2-4, en utilisant les paramètres appropriés pour la structure considérée.



Légende

- 1 G_B
- 2 h (m)

NOTE 1 Cette figure donnée pour G_B est basée sur l'annexe B de l'ENV 1991-2-4 utilisant :

$$V_b = 25 \text{ m/sec}, b = 0,1h, n_1 = 60/h, \delta_s = 0,03$$

$$\delta_a = \frac{40 \times 10^{-6} V_m(z)}{n_1 t_{av}} \quad t_{av} = 8 \text{ mm}$$

NOTE 2 Pour d'autres valeurs de ces paramètres, il convient de calculer G_B au moyen de l'ENV 1991-2-4 en utilisant :

$$G_B = 2 g I_V(z_e) \sqrt{Q_0^2 + R_x^2}$$

où g , $I_V(z_e)$, Q_0 et R_x sont tels que définis dans l'ENV 1991-2-4.

Figure A.3.2 — Facteur fondamental de rafale G_B

A.3.3.2.5 Chargement sur les câbles :

C A.3.3.2.5 et .6 sont intégrés au présent chapitre, pylônes autostables, pour couvrir le cas de câbles portés.

(1)P Le chargement maximum du vent sur les câbles dans la direction du vent F_{cw} doit être pris égal à :

$$F_{cw} = \frac{\rho}{2} V_m^2(z) \sum R_{cw} (1 + G_c) \quad \dots (A.16)$$

où :

ρ est défini en A.3.3.2.1 ;

$V_m(z)$ est la vitesse moyenne du vent, z mètres au-dessus du niveau du sol du site, pour le point considéré du câble, déterminée conformément à l'ENV 1991-2-4 ;

$\sum R_{cw}$ est la traînée aérodynamique totale sur le câble dans la direction du vent, déterminée conformément à A.2 ;

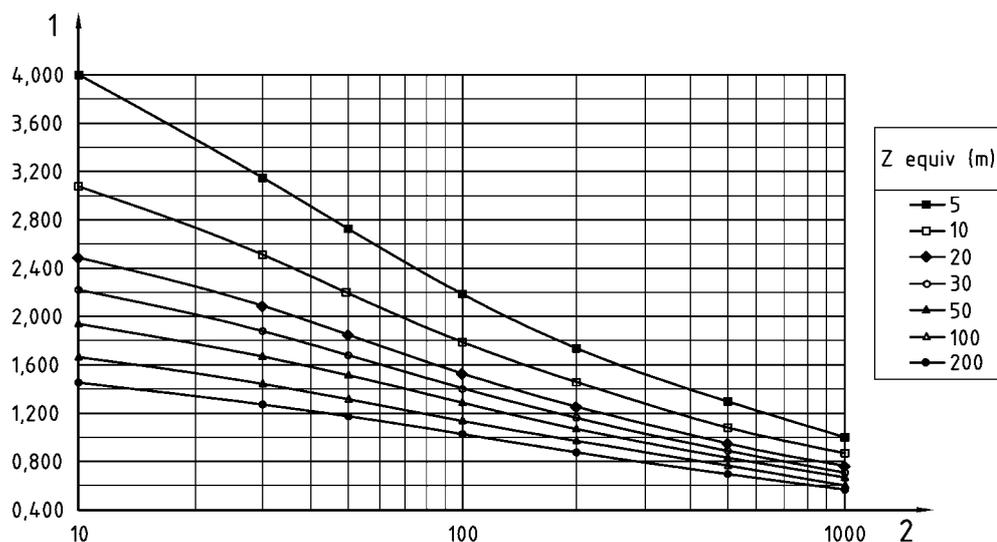
G_c est le facteur de rafale pour les câbles, déterminé selon A.3.3.2.6.

A.3.3.2.6 Facteur de rafale pour les câbles :

(1) Le facteur de rafale G_c pour les câbles peut être déterminé au moyen de la figure A.3.3 pour la catégorie de terrain appropriée selon la définition de l'ENV 1991-2-4 et basé sur des valeurs types des paramètres selon la définition de la figure.

(1) **A** Le facteur de rafale G_c pour les câbles peut être déterminé au moyen de la figure A.3.3 pour la catégorie de terrain 3 selon la définition de l'ENV 1991-2-4 si les valeurs mentionnées en note 1 de la figure sont proches des valeurs réelles.

(2) Comme alternative, des valeurs plus précises de G_c peuvent être calculées au moyen de la procédure donnée dans l'annexe B de l'ENV 1991-2-4, en utilisant les paramètres appropriés pour le câble considéré.



Légende

- 1 G_c
- 2 Portée b(m)

NOTE 1 Cette figure donnée pour G_c est basée sur l'annexe B de l'ENV 1991-2-4 utilisant :

$$V_b = 25 \text{ m/sec}, b = 0,02 \text{ m}, \delta_s = 0,02 \quad n = 2\text{Hz}$$

$$\text{catégorie de terrain 3, } \delta_a = 6,1 \times 10^{-5} \text{ V/hn}$$

NOTE 2 Pour d'autres valeurs de ces paramètres, il convient de calculer G_c au moyen de l'ENV 1991-2-4 en utilisant :

$$G_c = 2 g I_v(z_e) \sqrt{Q_0^2 + R_x^2}$$

où g, $I_v(z_e)$, Q_0 et R_x sont définis dans l'ENV 1991-2-4.

Figure A.3.3 — Facteur de rafale pour les câbles

A.3.3.2.7 Chargement pour le calcul des flèches

(1) Les flèches ne doivent normalement satisfaire que des exigences de service. Il convient de considérer les deux critères de service suivants :

- a) Pylônes pour lesquels pendant les périodes de non-exploitation autorisées, les limites de flèches spécifiées peuvent être uniquement dépassées occasionnellement. Dans ce cas, il convient de calculer les flèches à partir des composantes, moyennes sur une heure de la charge de vent fluctuante, en utilisant le facteur de rafale G approprié au chargement des membrures à la base du pylône (déterminé conformément à A.3.3.2.2) pour le calcul des composantes fluctuantes.
- b) Pylônes pour lesquels, pendant les périodes de non-exploitation, les limites de flèches spécifiées peuvent être dépassées pendant 50 % du temps : seul le chargement de vent moyen nécessite d'être pris en compte.

(1) I Les flèches ne doivent normalement satisfaire que des exigences de service. Il convient de calculer les flèches à partir des composantes, moyennes sur une heure de la charge de vent fluctuante, en utilisant le facteur de rafale G approprié au chargement des membrures à la base du pylône (déterminé conformément à A.3.3.2.2) pour le calcul des composantes fluctuantes.

A.3.3.2.8 Chargement de vent pour les pylônes non symétriques ou équipés d'accessoires complexes

(1)P Pour les pylônes non symétriques ou ceux qui comportent des équipements annexes de grandes dimensions et placés de façon non symétrique et/ou des câbles provoquant des charges en torsion et des charges transversales à la direction du vent significatives, le total des efforts dus à l'effet de la charge de vent doit prendre en compte l'action combinée du vent sur les parties individuelles, à la fois sous le vent et dans la direction perpendiculaire au vent, le cas échéant.

(2) Il convient de considérer les effets de charges fluctuantes provoqués par les efforts transversaux du détachement tourbillonnaire en conjonction avec les effets des charges de vent dans la direction de ce dernier.

(3)P Pour déterminer le chargement total en de tels cas, le chargement moyen du vent dans la direction du vent doit être séparé du chargement du vent fluctuant toujours dans la même direction du vent. Donc, selon A.3.3.2.1(1) :

— la charge moyenne maximale du vent dans la direction du vent ($F_{0,TW}$) doit être prise égale à :

$$F_{0,TW} = \frac{\rho}{2} V_m^2(z) \sum R_W \quad \dots \text{(A.17)}$$

— la charge fluctuante maximale du vent dans la direction du vent ($F_{1,TW}$) doit être prise égale à :

$$F_{1,TW} = \frac{\rho}{2} V_m^2(z) \sum R_W G \quad \dots \text{(A.18)}$$

(4) Les effets transversaux provoquent des charges de vent fluctuantes ($F_{1,TX}$) qu'il convient de prendre, en l'absence de plus amples informations, égales à :

$$F_{1,TX} = K_x \left(\frac{\sum R_x}{\sum R_W} \right) F_{1,TW} \quad \dots \text{(A.19)}$$

où :

K_x est le facteur prenant en compte l'intensité des effets transversaux du vent, et qu'il convient de prendre égal à : 0,5

$\sum R_x$ est la traînée de la structure (et de tout équipement annexe éventuel) dans la direction perpendiculaire au vent sur la hauteur du tronçon concerné, déterminée conformément à A.2.

NOTE 1 Les effets dans la direction perpendiculaire au vent sont soumis à des incertitudes considérables, et les règles ci-dessus doivent être utilisées avec précautions.

NOTE 2 Les effets dans la direction perpendiculaire au vent provoquent des charges fluctuantes, dans cette direction, même dans les pylônes symétriques ; cependant, ces charges n'affectent pas les éléments supportant une charge critique.

NOTE 2 C Ces charges sont habituellement négligées.

(5)P L'effet de la charge totale $\sum S_T$ provoqué par le vent dans un élément quelconque doit être pris égal à :

$$\sum S_T = S_{0,TX} + \sqrt{S_{1,TW} + S_{1,TX}} \quad \dots (A.20)$$

(5) I
$$\sum S_T = S_{0,TW} + S_{1,TW} + S_{1,TX} \quad \dots (A.20)$$

où :

$S_{0,TW}$ est l'effet de la charge provoqué dans l'élément par les charges de vent moyennes $F_{0,TW}$;

$S_{1,TW}$ est l'effet de la charge provoqué dans l'élément par la charge de vent fluctuante $F_{1,TW}$;

$S_{1,TX}$ est l'effet de la charge provoqué dans l'élément par la charge de vent fluctuante dans la direction perpendiculaire à celle du vent $F_{1,TX}$.

A.3.4 Méthode d'analyse spectrale

(1) Lorsque la réponse aux actions du vent est calculée par analyse spectrale, il convient de considérer les conditions météorologiques définies dans l'ENV 1991-2-4, et d'évaluer la résistance au vent selon A.2. En outre, il convient d'adopter les paramètres définis dans l'annexe B de l'ENV 1991-2-4 à défaut d'informations plus précises.

(2) Les effets transversaux du détachement tourbillonnaire provoquent des charges fluctuantes qui nécessitent d'être prises en compte en conjonction avec les effets du vent dans la direction de ce dernier. Il convient d'adopter des paramètres appropriés cohérents avec ceux adoptés pour les actions sous le vent incident.

A.3.5 Vibrations induites par les tourbillons

(1) Lorsque des pylônes comportent des renflements de grandes dimensions de forme cylindrique ou s'ils sont susceptibles de subir un fort givrage, il convient de déterminer leur sensibilité aux vibrations induites par les tourbillons, conformément à l'ENV 1991-2-4.

A.4 Comportement des mâts haubanés

A.4.1 Généralités

(1)P Les efforts maximum à utiliser dans le calcul des fondations et composants de mâts haubanés doivent être calculés en prenant dûment en compte la réponse au vent turbulent.

(2) Il convient que ces efforts représentent l'effet résultant d'un chargement statique équivalent provoqué par un vent de vitesse égale à la valeur moyenne appropriée sur 1 h, agissant uniquement dans la direction du vent, et d'un chargement fluctuant dans la direction du vent et, le cas échéant, dans la direction perpendiculaire au vent, provoqué par les rafales.

A.4.2 Critères pour les méthodes statiques

- (1) En général, des procédures d'analyse statique peuvent être utilisées pour déterminer les efforts maximum s'exerçant dans les éléments d'un mât haubané (voir A.4.3). Seuls les mâts haubanés susceptibles de présenter une réponse dynamique significative nécessitent l'utilisation de méthodes d'analyse de réponse dynamique (voir A.4.4).
- (2) Dans tous les cas, il convient de vérifier par des procédures de calcul la réponse dynamique des grands mâts haubanés dont les conséquences économiques d'une ruine ou les dangers potentiels découlant d'une ruine sont élevés (voir 2.3).

(2) C L'analyse de réponse dynamique suivant A.4.4 ne sera réalisée que si elle est prévue par les spécifications du projet.

- (3) Des directives concernant la sensibilité dynamique ainsi que des critères pour l'utilisation de méthodes statiques sont donnés en A.4.7.

A.4.3 Méthodes statiques équivalentes

A.4.3.1 Généralités

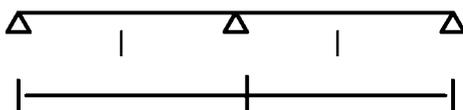
(1)P Pour prendre en compte la réponse dynamique des mâts haubanés aux charges de vent, le mât haubané doit être analysé pour une série de schémas de charges «partiellement réparties» basés sur le chargement moyen augmenté par des charges de vent «partiellement réparties». Cette procédure exige plusieurs analyses de vent statiques pour chaque direction de vent considérée, les résultats étant combinés pour donner la réaction maximale.

(1) A Pour éviter la multiplication des analyses globales en mode non linéaire, il est admis de rechercher un cas de chargement unique équivalent au cumul de la part statique et de la part dynamique de l'action du vent dans une direction donnée.

Ce cas de chargement est la somme de la part dynamique majorée par un coefficient d'équivalence et de la part statique non majorée. Le coefficient d'équivalence k_e est obtenu à l'issue d'une analyse linéaire du fût assimilé à une poutre continue sur appuis fixes.

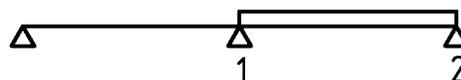
Exemple :

on assimile un mât haubané à 2 nappes de haubans et à 2 travées égales (l) à la poutre continue :



sous chargement non uniforme p (part dynamique seule) :

le moment maximal dans la travée 1-2 vaut $pl^2/10$



sous chargement uniforme $k_e p$



on cherche k_e pour obtenir le même moment maximal : $(k_e p)l^2/14,3 = pl^2/10k_e = 1,43$

(2)P Pour les mâts haubanés de section transversale symétrique avec contreventement triangulé, avec ou sans équipements annexes symétriques dans la direction du vent considérée, et qui ne sont pas susceptibles de sensibilité dynamique (voir A.4.7), les efforts maximum doivent être calculés conformément à A.4.3.2.

(3)P Pour les mâts haubanés comportant des équipements annexes non symétriques dans la direction du vent considérée, les efforts supplémentaires provoqués par les effets dans la direction perpendiculaire au vent doivent être déterminés conformément à A.4.3.2.8.

A.4.3.2 Cas de charges à considérer

A.4.3.2.1 Charge moyenne de vent

(1)P La charge de vent dans la direction du vent sur le fût du mât haubané F_{MW} provoquée par la vitesse moyenne de vent doit être prise égale à :

$$F_{MW} = \frac{\rho}{2} V_m^2(z) \sum R_W \quad \dots (A.21)$$

où :

ρ est la masse volumique de l'air à la température et à la pression de référence ;

$V_m(z)$ est la vitesse moyenne de vent au niveau du centre de l'aire de la section à une hauteur de z mètres au-dessus du niveau du sol du site, déterminée conformément à l'article 8.1 de l'ENV 1991-2-4 ;

$\sum R_W$ est la traînée aérodynamique totale de la structure (et de tout équipement annexe éventuel) dans la direction du vent sur la section de mât haubané concernée, déterminée conformément à A.2.

(2) Sauf spécification contraire dans l'annexe A de l'ENV 1991-2-4, la valeur de ρ doit être prise égale à $1,25 \text{ kg/m}^3$.

(3) Il convient de considérer que les charges agissent au niveau du centre des aires des faces (comprenant les équipements annexes éventuels) pour chacun des tronçons.

(4)P Le chargement de vent sur les haubans F_{GW} perpendiculairement aux haubans dans le plan formé par la tangente au point considéré du hauban et la direction du vent, provoqué par la vitesse moyenne du vent, doit être pris égal à :

$$F_{GW} = \frac{\rho}{2} V_m^2(z) R_c(z) \quad \dots (A.22)$$

où :

$R_c(z)$ est la traînée aérodynamique du hauban considéré déterminée conformément à A.2 ;

$V_m(z)$ est la vitesse moyenne du vent à chaque niveau auquel le hauban est subdivisé pour l'analyse.

(4) C En A.2.5, la traînée aérodynamique du hauban est désignée par $R_G(z)$.
--

(5) Si l'on utilise un chargement uniforme, il convient de prendre $V_m(z)$ égal à la vitesse de vent à une hauteur égale aux 2/3 de la hauteur de la fixation de l'arrimage sur le mât haubané.

(6)P Les effets de charge S_M provoqués par le vent moyen doivent être déterminés pour chaque composant du mât haubané par une analyse statique non linéaire sous le chargement moyen F_{MW} et F_{GW} .

A.4.3.2.2 Charges partiellement réparties

(1)P Outre le chargement moyen calculé au moyen de A.4.3.2.1, des charges partiellement réparties doivent être appliquées de la façon suivante :

- sur chaque travée du fût du mât haubané entre des niveaux d'arrimage adjacents (ainsi que sur la travée entre la base du mât haubané et le premier niveau d'arrimage) ;
- sur la console, le cas échéant ;
- entre points centraux de «travées» adjacentes ;
- entre la base et la mi-hauteur du premier niveau d'arrimage ;
- à partir de la mi-hauteur de la travée entre l'avant-dernier et le dernier arrimage s'il n'existe pas de console, mais incluant la console le cas échéant.

(2)P Ces zones sont indiquées dans la figure A.4.1. La charge «partiellement répartie» doit être prise égale à :

$$F_{PW} = \rho g I_v(z) V_m^2(z) \sum R_W(z) \quad \dots (A.23)$$

où :

ρ , $V_m(z)$ et $\sum R_W(z)$ sont tels que définis en A.4.3.2.1 ;

g est le facteur de pointe de turbulence de vent tel que défini selon 8.5 de l'ENV 1991-2-4, pouvant être pris égal à $g = 3.5$;

$I_v(z)$ est l'intensité de turbulence, tel que donné en 8.5 de l'ENV 1991-2-4, dépendant du terrain du site.

(2) C On peut assimiler chaque charge partielle comme une charge uniforme sur la hauteur considérée évaluée à mi-hauteur de la zone chargée. Les figures A.4.1 et A.4.2 sont établies selon ces bases.

(3)P Ces charges partiellement réparties doivent être appliquées sur le mât haubané dans sa position d'équilibre, sous chargement moyen de vent déterminé selon A.4.3.2.1.

(4)P La hauteur minimale d'une zone de charge quelconque doit être prise égale à 20 m. Donc, pour les mâts haubanés dont l'espacement des points d'arrimage est inférieur à 20 m, les charges partiellement réparties doivent être appliquées sur des travées adjacentes de telle sorte que la longueur supportant la charge partiellement répartie soit d'au moins 20 m (voir figure A.4.1).

(5) Pour les mâts haubanés d'une hauteur ne dépassant pas 20 m, un seul cas est à envisager, avec la charge partiellement répartie sur toute la hauteur du mât haubané.

A.4.3.2.3 Charges appliquées sur les haubans

(1)P Pour chaque cas de charge partiellement répartie appliqué sur le fût du mât haubané, comme indiqué en A.4.3.2.2, des charges de vent partiellement réparties F_G doivent être appliquées à l'intérieur des mêmes limites, voir figure A.4.2. Ces charges partiellement réparties doivent être appliquées perpendiculairement sur chaque hauban dans le plan formé par le hauban et la direction du vent, et prises égales à :

$$F_G = \rho g I_v(z) V_m^2(z) \sum R_c(z) \quad \dots (A.24)$$

où :

ρ , $V_m(z)$ sont définis en A.4.3.2.1 ;

$I_v(z)$ est défini en A.4.3.2.2 ;

g est le facteur de pointe de turbulence de vent tel que défini selon 8.5 de l'ENV 1991-2-4 ;

$R_c(z)$ est la traînée aérodynamique perpendiculairement au hauban dans le plan formé par le hauban et la direction du vent, déterminée conformément à A.2.

(1) C En A.2.5, la traînée aérodynamique du hauban est désignée par $R_G(z)$.

(2) Par simplification, on peut adopter un chargement uniforme sur la hauteur totale des haubans en question en multipliant la charge de vent ci-dessus par le rapport $(1 + z_p / z_G)$

où :

z_p est la «hauteur» de la zone de charge sur le hauban réel ;

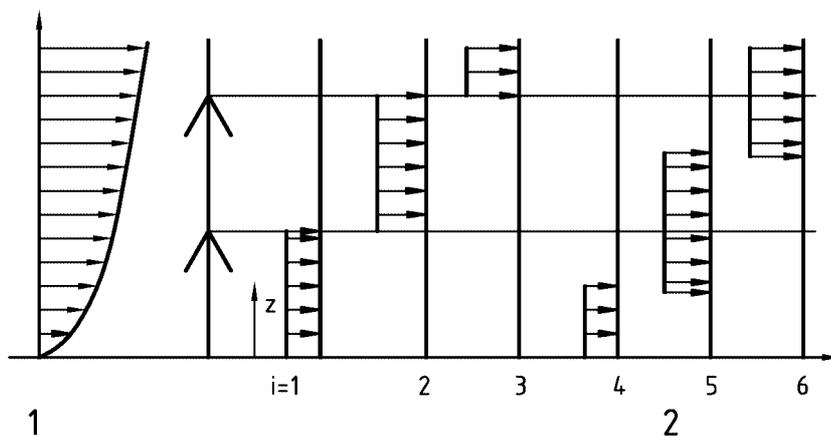
z_G est la hauteur d'arrimage du hauban sur le mât haubané.

(2) I Le coefficient multiplicateur pour uniformiser la charge sur la longueur du hauban est : z_p / z_G .

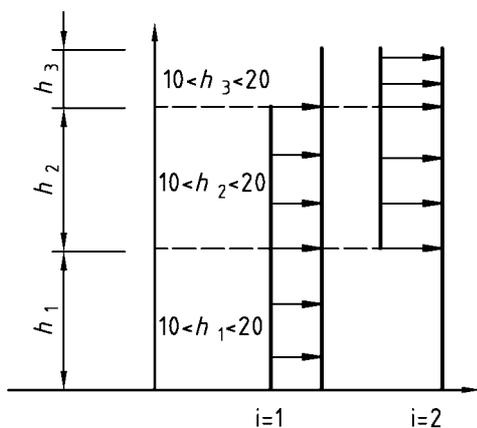
A.4.3.2.4 *Dérivation du comportement sous charges partiellement réparties*

(1)P L'effet de la charge s'exerçant dans chaque élément du fût et des arrimages du mât haubané dérivé de chaque charge partiellement répartie appliquée successivement S_{PLi} doit être calculé.

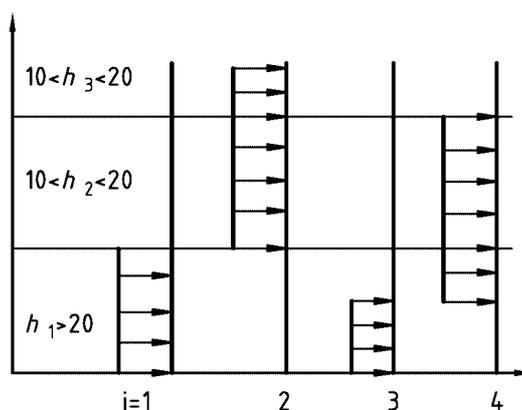
(2) Il convient d'effectuer cette opération en calculant la différence entre l'effet de charge provenant de la charge partiellement répartie combinée avec la charge moyenne, et l'effet de charge de la charge moyenne seule.



a) Toutes travées supérieures à 20 m



b) Toutes travées inférieures à 20 m



c) Certaines travées inférieures à 20 m
(exemple)

Légende

- 1 Chargement moyen de vent
- 2 Charges partiellement réparties

Figure A.4.1 — Application des charges partiellement réparties

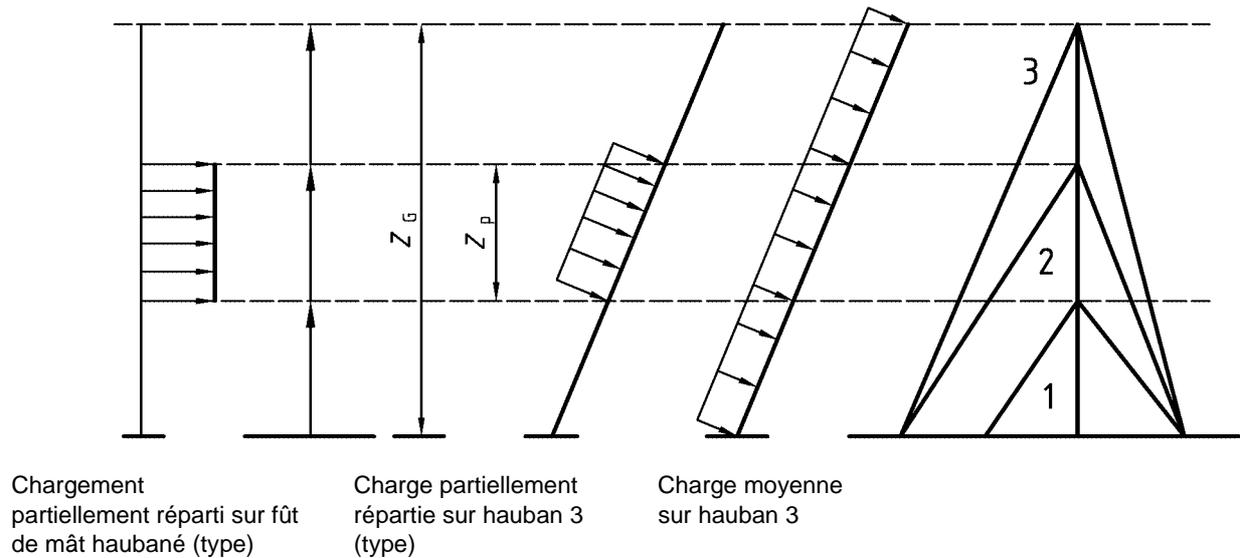


Figure A.4.2 — Chargement partiellement réparti sur les haubans

(3)P Ces effets de charges doivent alors être combinés selon la racine carrée de la somme des carrés, ou :

$$S_p = \sqrt{\sum_{i=1}^N S_{PLi}^2} \quad \dots (A.25)$$

où :

S_{PLi} est l'effet de charge (réponse) provoqué par le schéma de charge i ;

N est le nombre total de schémas de charge requis ;

S_p est l'effet de charge effectif total des charges partiellement réparties.

A.4.3.2.5 Effets de charges totales

(1)P Les effets de charges totales pour chaque composant du fût du mât haubané S_{TM} doivent être déterminés par :

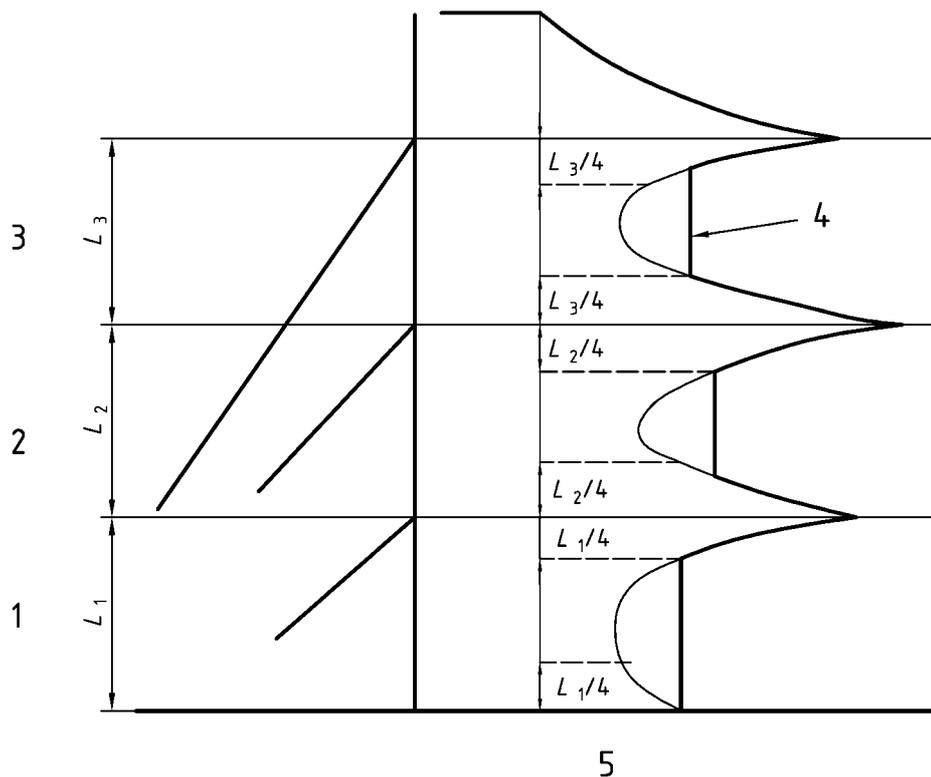
$$S_{TM} = S_M \pm S_p \quad \dots (A.26)$$

où :

S_M est l'effet de charge moyen déterminé selon A.4.3.2.3 ;

S_p est l'effet de charge fluctuant déterminé selon A.4.3.2.4 en utilisant le signe pour produire l'effet le plus sévère.

(2) Pour le calcul de l'effort total s'exerçant dans le contreventement cisailé de chaque «travée» du fût du mât haubané conformément à l'alinéa (1) ci-dessus, la valeur minimale à l'intérieur de cette travée doit être prise égale à la valeur la plus forte calculée à une distance d'un quart de la «travée» depuis l'un quelconque des niveaux de fixation du hauban (ou de la base du mât haubané le cas échéant). Dans ce contexte, le terme «travée» fait référence à la distance entre des niveaux d'arrimage adjacents, ou entre la base et le niveau d'arrimage le plus bas (voir figure A.4.3).



Légende

- 1 «Travée» 3
- 2 «Travée» 2
- 3 «Travée» 1
- 4 Valeur minimale à utiliser dans cette travée
- 5 Effort de cisaillement dans le contreventement

(2) I La résistance du fût à l'effort tranchant global est vérifiée dans chaque section pour le maximum des valeurs suivantes de l'effort tranchant :

- dans la section considérée,
- à une distance $L/4$ de l'appui origine de la travée de longueur L contenant la section,
- à une distance $L/4$ de l'appui extrémité

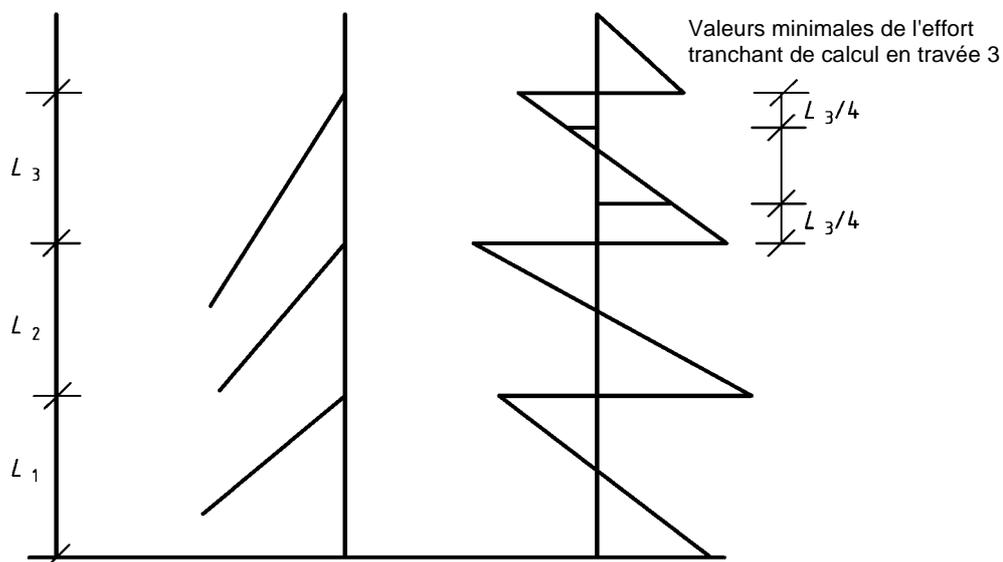
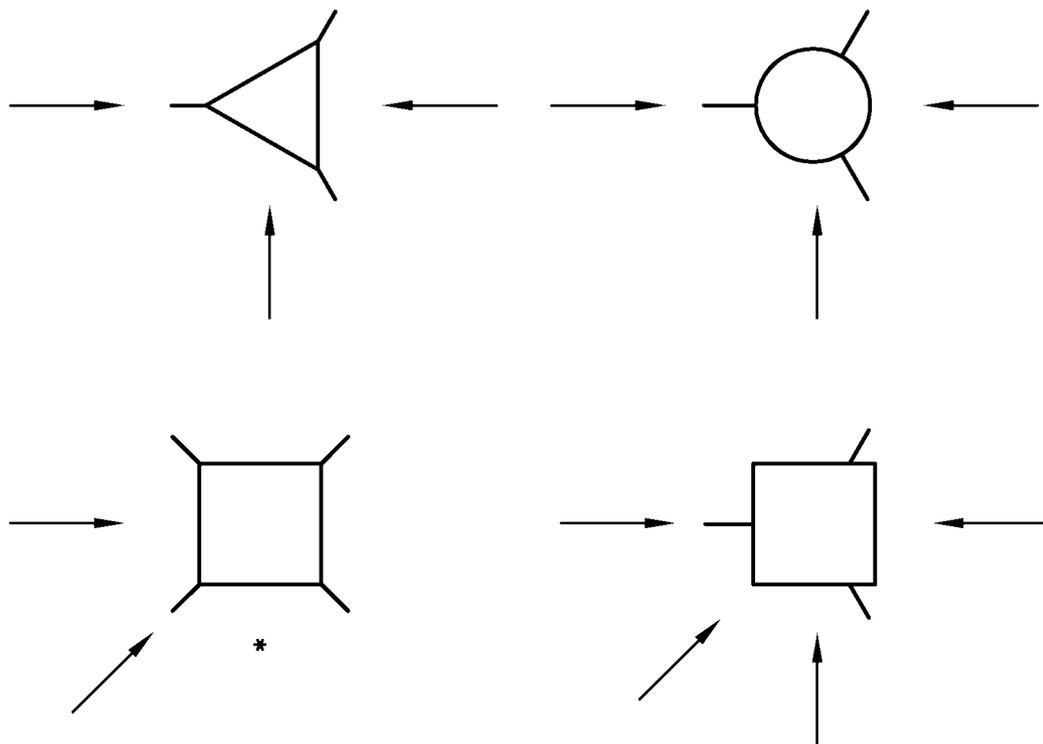


Figure A.4.3 — Efforts minimaux de cisaillement dans le contreventement d'un fût de mât haubané

A.4.3.2.6 Directions de vent à considérer

(1)P Pour chaque élément du mât haubané, la direction de vent donnant l'effet de charge total le plus sévère doit être considérée. En pratique, ceci signifie que plusieurs directions de vent doivent être étudiées.

(2) Si le mât haubané est presque symétrique en géométrie et en chargement, il convient d'analyser au moins trois directions de vent pour un mât haubané triangulaire haubané selon trois directions, soit perpendiculairement à une face, à 60° d'une face et à 30° d'une face. Pour un mât haubané de section transversale carrée et haubané selon quatre directions, il convient d'analyser au moins deux directions de vent, perpendiculairement à une face et à 45° d'une face. Des exemples sont illustrés dans la figure A.4.4.



Légende

* (similaire pour mât haubané circulaire à 4 arrimages)

Figure A.4.4 — Directions types de vent à considérer

A.4.3.2.7 Chargement pour le calcul des déplacements

(1) Les déplacements ne doivent normalement satisfaire que des exigences de service. Il convient de considérer les critères de service suivants :

- a) Pylônes pour lesquels pendant les périodes de non-exploitation autorisées, les limites de flèches spécifiées peuvent être dépassées uniquement occasionnellement. Dans ce cas, il convient de calculer les flèches à partir d'une analyse sous l'effet de la somme de la charge moyenne de vent et des enveloppes d'analyse de charges partiellement réparties pour le calcul de la composante fluctuante.
- b) Pylônes pour lesquels, pendant les périodes de non-exploitation, les limites de flèches spécifiées sont gouvernées par les flèches moyennes. Dans ce cas, les composantes fluctuantes du chargement de vent peuvent être négligées, et seules les flèches sous chargement moyen de vent nécessitent d'être prises en compte.

(1) I Le chargement pour le calcul des déplacements et les valeurs limites à respecter sont définis par les spécifications techniques du projet.

A.4.3.2.8 *Chargement de vent pour les mâts haubanés non symétriques ou ceux équipés d'accessoires complexes*

A.4.3.2.8.1 *Généralités*

(1)P Pour les mâts haubanés non symétriques ou ceux qui comportent des équipements annexes de grandes dimensions et placés de façon non symétrique et/ou des câbles provoquant des charges en torsion et des charges transversales à la direction du vent, le total des efforts dus à l'effet de la charge de vent doit prendre en compte l'action combinée du vent sur les parties individuelles, à la fois sous le vent et dans la direction perpendiculaire au vent, le cas échéant.

(2) Les effets transversaux du détachement tourbillonnaire provoquent des effets de charges fluctuants qui nécessitent d'être pris en compte en conjonction avec les charges de vent dans la direction du vent incident.

(3) Il est nécessaire d'utiliser la procédure de séparation des charges dans la direction du vent moyen incident et des charges fluctuantes, comme indiqué pour les pylônes en A.3.3.2.8. Cependant, pour les mâts haubanés, ceci nécessite l'application d'une série de charges de vent partiellement réparties transversalement, de façon similaire à celles concernant le vent incident comme indiqué en A.4.3.2.2.

(4)P Les effets de charge totaux doivent alors être déterminés au moyen de l'expression suivante :

$$S_{TM} = S_M \pm \sqrt{S_{PW}^2 + K_X^2 S_{PX}^2} \quad \dots \text{(A.27)}$$

où :

S_{PW} est l'effet de charge provoqué par les charges partiellement réparties incidentes ;

S_{PX} est l'effet de charge provoqué par les charges transversales partiellement réparties ;

K_X est le facteur prenant en compte l'intensité des effets transversaux du vent, et qu'il convient de prendre égal à : 0,5

NOTE 1 Les effets dans la direction perpendiculaire au vent sont soumis à des incertitudes considérables, et les règles ci-dessus doivent être utilisées avec précautions.

NOTE 2 Les effets dans la direction perpendiculaire au vent provoquent des charges fluctuantes, dans cette direction, même dans les mâts haubanés symétriques ; cependant, ces charges n'affectent pas les éléments supportant une charge critique.

(5) Comme alternative, par simplification, il n'est pas nécessaire de calculer les effets transversaux explicitement comme indiqué en A.4.3.2.8(4) ci-dessus, mais il convient d'augmenter de 10 % les effets du facteur de pointe incident S_{TM} , calculés au moyen de A.4.3.2.5(1), pour prendre en compte les effets transversaux à la direction du vent.

A.4.4 Méthodes par analyse spectrale

(1)P Lorsque la réponse est calculée par une analyse spectrale, celle-ci doit être utilisée uniquement pour la contribution de la résonance à la réponse.

(2) La réponse de fond peut être déterminée au moyen de la procédure statique générale (voir A.4.3.2) mais en utilisant $g = 3,0$.

(3) Il convient de considérer les conditions météorologiques définies dans l'ENV 1991-2-4, et d'évaluer la résistance au vent selon A.2. En outre, il convient d'adopter les paramètres définis dans l'annexe B de l'ENV 1991-2-4 à défaut d'informations plus précises.

(4) Les effets transversaux du détachement tourbillonnaire provoquent des effets de charges fluctuants qui nécessitent d'être pris en compte en conjonction avec les charges de vent dans la direction du vent incident. Il convient d'adopter des paramètres appropriés cohérents avec ceux adoptés pour les effets sous le vent.

(5) Il convient de calculer la réponse pour tous les modes de vibration présentant des fréquences naturelles inférieures à 2 Hz.

A.4.5 Vibrations induites par les tourbillons

(1) Lorsque des mâts haubanés comportent des renflements de grandes dimensions de forme cylindrique ou s'ils sont susceptibles de subir un fort givrage, il convient de déterminer leur sensibilité aux vibrations induites par les tourbillons, conformément à l'ENV 1991-2-4.

A.4.6 Vibrations des haubans

(1) Il convient de vérifier les haubans de mâts haubanés en ce qui concerne les vibrations induites par le détachement tourbillonnaire à haute fréquence et le galop des haubans, particulièrement lorsque les haubans sont givrés, de la façon suivante :

a) Excitation par le détachement tourbillonnaire

Les haubans peuvent être sujets à des vibrations de type résonnant de faible amplitude à des vitesses de vent faibles, provoquées par le détachement tourbillonnaire à haute fréquence.

Étant donné que l'excitation peut survenir en modes élevés, il est impossible d'établir des règles générales. Cependant, à titre indicatif, l'expérience montre que de telles vibrations sont susceptibles de se produire si les tensions des haubans en atmosphère calme sont supérieures à 10 % de leur charge de rupture.

b) Galop

Les haubans peuvent être sujets à une excitation de galop lorsqu'ils sont recouverts de givre ou d'une épaisse couche de graisse. La couche de givre ou de graisse peut produire des formes aérodynamiques conduisant à des instabilités de soulèvement et de traînée. Ce phénomène entraîne des vibrations de haute amplitude et de basse fréquence. Des vibrations similaires ont également été observées par temps de pluie.

Ici aussi, il est impossible de donner des règles générales étant donné que l'apparition du galop dépend de façon critique de la formation de givre ou de la forme de la couche de graisse. Il ne se produit en général qu'avec des haubans de diamètre important, et il est relativement insensible aux tensions d'arrimage initiales.

(2) Si l'on observe des vibrations de haubans, des amortisseurs ou des déflecteurs doivent être installés afin de limiter les contraintes résultantes, voir annexe B de l'ENV 1993-3-2.

(3) Il convient d'effectuer des vérifications à la fatigue des ancrages si l'on sait que de telles vibrations se sont produites et si aucun remède n'a été apporté. Dans ce cas, il convient de consulter un spécialiste.

A.4.7 Critères pour l'utilisation de méthodes statiques pour les mâts haubanés

(1) Il convient que les critères suivants soient satisfaits pour les procédures d'analyse statique utilisées :

a) toute console a une longueur totale au-dessus du niveau d'arrimage supérieure inférieure à la moitié de l'espacement entre l'avant-dernier arrimage et l'arrimage supérieur ;

b) le paramètre β_s est inférieur à 1, où :

$$\beta_s = \frac{4 \left(\frac{E_m I_m}{L_s^2} \right)}{\left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N K_{Gi} H_{Gi} \right)} \quad \dots \text{(A.28a)}$$

avec :

$$K_{Gi} = 0,5N_i A_{Gi} E_{Gi} \cos^2 \alpha_{Gi} / L_{Gi} \quad \dots \text{ (A.28b)}$$

où :

- N est le nombre de niveaux de haubans ;
- A_{Gi} est l'aire de section transversale du hauban au niveau i ;
- E_{Gi} est le module d'élasticité longitudinale pour le hauban au niveau i ;
- L_{Gi} est la longueur du hauban au niveau i ;
- N_i est le nombre de haubans fixés au niveau i ;
- H_{Gi} est la hauteur au-dessus de la base du mât haubané du niveau de hauban i ;
- α_{Gi} est la pente de la corde du hauban au niveau i par rapport à l'horizontale ;
- E_m est le module d'élasticité pour le mât haubané ;
- I_m est l'inertie moyenne de flexion du mât haubané ;
- L_s est la portée moyenne entre les niveaux de haubans.

c) Le paramètre Q est inférieur à 1, où :

$$Q = \frac{1}{30} \cdot 3 \sqrt{\frac{H V_H}{D_o}} \sqrt{\frac{m_o}{H R}} \quad \dots \text{ (A.29)}$$

- m_o est la masse moyenne par unité de longueur du fût du mât haubané, incluant les équipements annexes (kg/m) ;
- D_o est la largeur moyenne de face du mât haubané (mètres) ;
- V_H est la vitesse moyenne de vent V_e au sommet du mât haubané (m/s) ;
- R est la traînée aérodynamique moyenne totale calculée selon A.2 (m^2/m) ;
- H est la hauteur du mât haubané, y compris une console éventuelle (mètres).

(2) Si l'un quelconque des critères exposés en (1) n'est pas satisfait, il convient de suivre la méthode par analyse spectrale (voir A.4.4).

Annexe B (informative)

Charges de givre et combinaisons de givre et de vent

B.1 Généralités

- (1) Les charges de givre sur les mâts haubanés et les pylônes peuvent, pour les sites exposés, atteindre des épaisseurs considérables, et, en combinaison avec le vent, l'augmentation de la traînée aérodynamique due au givrage des éléments peut dans certains cas gouverner le dimensionnement.
- (2) L'importance des dépôts de givre sur les structures, ainsi que la densité, l'emplacement et la forme du givre sur les mâts haubanés et les pylônes, dépendent largement des conditions météorologiques locales, de la topographie ainsi que de la forme de la structure elle-même.
- (3) Le givrage atmosphérique est traditionnellement classé selon deux différents processus de formation :
 - givrage par brouillard ;
 - givrage par précipitation.
- (4) Ces processus peuvent entraîner divers types de givre, tels la gelée blanche tendre, la gelée blanche dure, la neige humide et le verglas, chacun présentant des caractéristiques physiques différentes en ce qui concerne la densité, l'adhérence, la cohésion, la couleur et la forme. Par exemple, la densité varie typiquement entre environ 200 kg/m^3 et 900 kg/m^3 . Le dépôt peut être concentrique (verglas et neige humide) à excentrique sur une seule face en direction du vent pour la gelée blanche tendre et dure.
- (5) Pour la conception, on considère en général que tous les éléments d'un mât haubané ou d'un pylône sont couverts d'une certaine épaisseur de givre, ce qui, accompagné d'une certaine densité, peut être utilisé pour le calcul du poids du givre ainsi que pour la traînée aérodynamique. Ces méthodes peuvent être justifiées dans les zones où la charge de givre est formée par du verglas ou de la neige humide, mais dans le cas de gelée blanche, la réalité physique ne coïncide pas avec une épaisseur de givre uniforme sur la totalité des éléments des pylônes et des mâts haubanés. Cependant, dans les zones où le dépôt de givre résultant d'une gelée blanche formée par le brouillard est relativement faible, la méthode de calcul du poids de givre et de la traînée aérodynamique prenant pour hypothèse un givrage uniforme peut s'avérer pratique et raisonnable si l'on utilise des valeurs offrant une marge de sécurité.
- (6) En revanche, il existe en Europe des zones très exposées à un givrage sévère, et pour ces zones, il convient de confier l'estimation de la charge de givre à des experts en givrage. Il convient que cette estimation comprenne le poids, l'emplacement, la forme, etc. de la charge de givre sur la structure réelle, ainsi que la combinaison appropriée de givre et de vent qu'il convient de spécifier de manière précise.
- (7) Les articles suivants donnent une description générale de la façon de traiter la charge de givre en combinaison avec le vent sur les pylônes et les mâts haubanés.

B.2 Chargement de givre

(1) Le chargement de givre caractéristique, comprenant la densité et autres paramètres de calcul, est donné dans l'ISO ... (en cours d'élaboration par le comité ISO TC98/SC3/WG6).

(1) **A** Dans l'attente de la parution de la norme ISO, on peut évaluer le phénomène de givre sur les bases suivantes :

- zone à givre nul : pas de givre ;
- zone à givre léger : manchon de 2 cm d'épaisseur ;
- zone à givre moyen : manchon de 4 cm d'épaisseur ;
- zone à givre lourd : manchon de 6 cm d'épaisseur ;
- zones très exposées : à voir au cas par cas (cf. B.1 (6)).

Les masses de givre sont évaluées à partir d'une masse volumique de 800 kg/m^3 .

Le choix de la zone de givre à considérer est fixé par les spécifications du projet. Le choix peut être guidé par les informations météorologiques locales (comparaison des points de rosée et températures relevées).

(2) Étant donné que le givre peut se déposer de façon asymétrique sur les pylônes et les mâts haubanés, il convient de prendre en compte de telles situations. Le givrage asymétrique présente un intérêt particulier pour les mâts haubanés où le givrage des différents haubans peut varier considérablement et provoquer des effets de flexion dans le fût du mât haubané. Le givrage asymétrique des haubans peut être provoqué en partie par un dépôt asymétrique dépendant de la direction du vent, et en partie par une répartition inégale dépendant des haubans.

(2) **A** Les seuls cas où le givre asymétrique doit être pris en compte sont ceux définis en B5. Pour les pylônes autostables et le fût des mâts haubanés, on ne considère pas le givre asymétrique dans le calcul.

(3) Pour les pylônes en treillis, le poids du givre lui-même ne conditionne généralement pas le calcul, même si ce givre se dépose de façon asymétrique sur le pylône.

B.3 Poids du givre

(1) Lors de l'estimation du poids du givre sur un pylône en treillis ou sur un fût de mât haubané, on peut en général considérer que la totalité des éléments structuraux, composants d'échelles, équipements annexes, etc. sont recouverts d'un givre présentant la même épaisseur sur la totalité de la surface de l'élément, voir figure B.1.

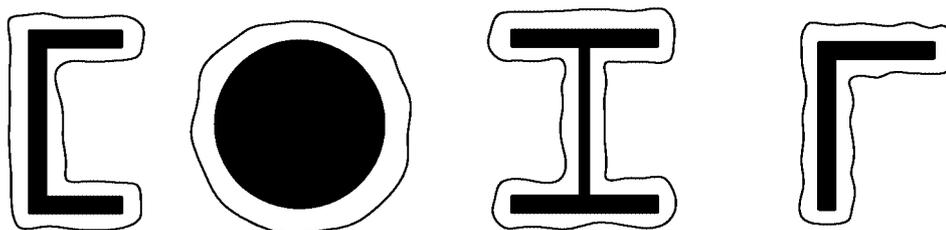


Figure B.1 — Épaisseur de givre sur des éléments structuraux

B.4 Vent et givre

(1) Dans les zones où il se produit du givre, ses combinaisons avec le vent peuvent conditionner la conception des mâts haubanés et des pylônes. L'augmentation de la traînée aérodynamique provoquée par le dépôt de givre sur les éléments individuels peut conduire à un chargement critique, même si les vitesses de vent associées sont inférieures aux valeurs caractéristiques maximales.

(2) La traînée aérodynamique d'un mât haubané ou d'un pylône couvert de givre peut être estimée au moyen de la même procédure fondamentale que celle donnée dans l'annexe A, en prenant en compte l'augmentation de largeur des éléments et composants provoquée par l'épaisseur de givre. Si les espaces entre éléments sont faibles (inférieurs à environ 75 mm), on peut considérer qu'ils sont remplis par le givre.

(3) Pour la combinaison de givre et de vent, la pression caractéristique de vent durant les périodes où un givrage peut survenir est inférieure à la pression caractéristique de vent dans toutes les situations. Ceci peut être pris en compte en multipliant les pressions caractéristiques de vent de l'annexe A par un facteur k.

(3) **C** L'annexe A mentionnée est celle de l'ENV 1991-2-4.

(4) À défaut de meilleures informations, le facteur k peut être pris égal à 0,64 ce qui correspond en période de givrage potentiel à une vitesse de vent de 80 % de la vitesse de vent cinquantenaire.

(4) **A** Il convient de retenir $k = 0,7$.

B.5 Charge de givre asymétrique

(1) Il convient de prendre en compte le givre asymétrique sur un mât haubané en appliquant la charge de givre appropriée sur le fût du mât haubané et sur tous les haubans, à l'exception :

- d'une bande du niveau de haubans supérieur ; et, comme cas séparé ;
- de deux bandes du niveau de haubans supérieur.

- (1) **I** — d'un hauban de la nappe supérieure ; et, comme cas séparé ;
— de deux haubans de la nappe supérieure.

B.6 Combinaisons de givre et de vent

(1) Il convient de considérer deux combinaisons de vent et de givre tant pour le givre symétrique que pour le givre asymétrique. Les valeurs de calcul des charges sont celles données en 2.5, et il convient d'utiliser les combinaisons suivantes :

— pour givre rare et vent fréquent :

$$\gamma_G G_k + \gamma_{\text{givre}} Q_{k,\text{givre}} + \gamma_W k \phi_W Q_{k,w} \quad \dots \text{(B.1)}$$

— pour givre fréquent et vent rare :

$$\gamma_G G_k + \gamma_W k Q_{k,w} + \gamma_{\text{givre}} \phi_{\text{givre}} Q_{k,\text{givre}} \quad \dots \text{(B.2)}$$

(2) À défaut de meilleures informations, les coefficients de combinaison ϕ_w et ϕ_{givre} peuvent être pris égaux aux valeurs suivantes :

$$\phi_w = 0,5 \quad \dots \text{(B.3a)}$$

$$\phi_{\text{givre}} = 0,5 \quad \dots \text{(B.3b)}$$

(3) Les coefficients partiels de sécurité concernant le poids propre γ_G , la charge de givre γ_{givre} et la charge de vent γ_W sont ceux donnés dans le tableau 2.1.

C Pour les différentes classes de fiabilité définies en 2.7, on obtient :

— combinaison givre rare + vent fréquent :

$$\text{classe 3 : } 1,2 G_k + 1,6 Q_{k,\text{givre}} + 1,6 \times 0,7 \times 0,5 Q_{k,w}$$

$$\text{classe 2 : } 1,1 G_k + 1,4 Q_{k,\text{givre}} + 1,4 \times 0,7 \times 0,5 Q_{k,w}$$

$$\text{classe 1 : } 1,0 G_k + 1,2 Q_{k,\text{givre}} + 1,2 \times 0,7 \times 0,5 Q_{k,w}$$

— combinaison givre fréquent + vent rare :

$$\text{classe 3 : } 1,2 G_k + 1,6 \times 0,5 Q_{k,\text{givre}} + 1,6 \times 0,7 Q_{k,w}$$

$$\text{classe 2 : } 1,1 G_k + 1,4 \times 0,5 Q_{k,\text{givre}} + 1,4 \times 0,7 Q_{k,w}$$

$$\text{classe 1 : } 1,0 G_k + 1,2 \times 0,5 Q_{k,\text{givre}} + 1,2 \times 0,7 Q_{k,w}$$

Annexe C (normative)

Haubans et éléments tendus à haute résistance

C.1 Définitions

Dans le cadre de la présente annexe, les définitions suivantes s'appliquent :

C.1.1 hauban : Élément uniquement tendu, assemblé à chacune de ses extrémités à des terminaisons, formant un ensemble de hauban constituant un appui horizontal pour le fût de mât haubané à des niveaux discrets. L'extrémité inférieure du hauban est ancrée au sol et comprend généralement un dispositif de réglage de la tension du hauban.

C.1.2 fil : Filament individuel en acier formant le plus petit composant unitaire tendu dans un câble. En général de section transversale circulaire et d'un diamètre de 3 à 8 mm, mais peut être non circulaire dans les câbles clos. Haute résistance obtenue en général par tréfilage à froid.

C.1.2 C Les fils de plus petit diamètre peuvent être utilisés.

C.1.3 toron hélicoïdal : Ensemble composé d'un certain nombre de fils disposés en hélice autour d'un fil rectiligne central. Les configurations les plus courantes comportent sept fils et dix-neuf fils, avec des nappes successives fréquemment enroulées en directions croisées.

C.1.4 câble clos : Toron dont les fils d'au moins les deux couches extérieures et (en général) plusieurs couches intérieures ont une forme telle qu'ils se bloquent les uns les autres, ne laissant virtuellement aucun espace vide dans cette partie de la section transversale. Les nappes intérieures de fils profilés sont parfois de section transversale trapézoïdale, mais plus couramment toutes les nappes comportent des fils en forme de Z.

C.1.4 C Les câbles utilisés pour les haubans de pylônes ont en général des couches intérieures constituées de fils à section circulaire.

C.1.5 câble à fils parallèles : Ensemble de fils disposés côte à côte parallèlement, soit rendus solidaires, soit dont les espaces entre les fils sont maintenus constants par des entretoises.

C.1.6 câble torsadé : Ensemble de torons hélicoïdaux disposés en hélice autour d'une fibre centrale ou d'une âme en acier, normalement câblée dans le sens opposé aux fils de la couche extérieure des torons (disposition ordinaire) ou parfois dans la même direction (câblage Lang). Les câbles comportant une âme en fibre ne sont normalement pas utilisés comme éléments de structure permanente des mâts haubanés.

C.1.6 A Les câbles à âme textile ne sont pas admis.

C.1.7 câble : Ensemble d'un ou plusieurs torons ou câbles des types décrits ci-dessus. Les torons peuvent être maintenus en contact ou séparés par des entretoises.

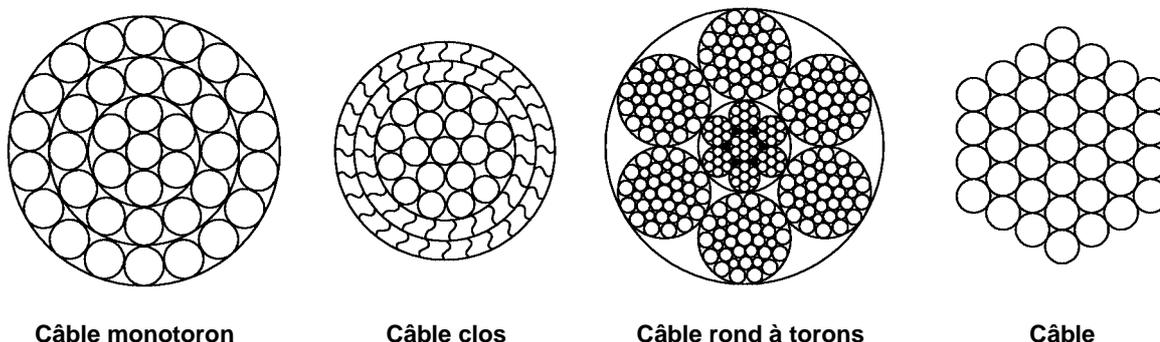


Figure C.1 C La figure de droite représente un câble à fils parallèles.
Le câble de la 3^e figure n'est pas utilisé pour le haubanage des pylônes (raideur insuffisante).

Figure C.1 — Éléments tendus à haute résistance

C.1.8 terminaison : Dispositif fixé aux extrémités d'un câble, d'un toron ou d'un fil pour permettre la transmission des charges entre celui-ci et le fût du mât haubané ou la structure en acier fixée à la fondation du hauban.

C.1.9 ancrage : Dispositif comprenant l'ensemble des composants et matériaux tels que culots, axes d'articulation, tiges filetées, etc., exigés pour retenir la force exercée dans un câble ou toron et pour transmettre cette force à la structure du mât haubané, de la fondation ou d'un autre élément de la structure.

C.1.10 culot : Terminaison permanente d'un câble ou d'un toron, destiné à transmettre des efforts entre le câble ou le toron et le reste de l'ancrage ; constitue habituellement un accessoire permanent du câble.

C.1.11 matériau de remplissage du culot : Matériau introduit à l'état liquide dans un culot de façon à enrober chaque fil du câble, et qui ensuite se solidifie ou durcit afin de constituer un lien structural ou un blocage entre les fils et le matériau de remplissage.

C.1.12 amortisseur : Dispositif fixé sur un hauban pour absorber l'énergie de vibration. Il peut être du type à inertie accordée (masselottes), ou du type hydraulique fixé entre le hauban et la structure.

C.1.12 A L'amortisseur peut aussi être constitué de boucles de câbles fixées par colliers sur les haubans

C.1.13 pas de toronnage (d'un toron) : Longueur mesurée dans l'axe d'un toron et sur laquelle un fil enroulé en hélice fait un tour complet de 360°. Cette longueur peut varier d'une couche à l'autre, réduisant ainsi au minimum le couple résiduel, et elle est en général exprimée en multiple du diamètre de la couche.

C.1.14 angle de toronnage (d'un toron) : angle entre le fil d'un toron et l'axe de ce toron.

NOTE L'angle de toronnage α et le pas de toronnage kD , où D représente le diamètre de la couche de fils concernée, sont en relation selon l'expression $k = \pi / \tan \alpha$.

C.2 Actions

C.2.1 Poids propre des torons

(1) En l'absence de Norme Européenne appropriée, l'expression approchée suivante donnant le poids propre nominal g par unité de longueur des torons eux-mêmes peut être utilisée pour un prédimensionnement.

$$g_k = \frac{\pi d^2}{4} f \rho w \quad \dots (C.1)$$

où :

- d est le diamètre extérieur du câble, comprenant la gaine anticorrosion le cas échéant ;
 - f est le coefficient de remplissage, défini comme le rapport entre l'aire de section transversale nette de l'acier et l'aire brute du câble comprenant la gaine ;
 - ρ est la densité de l'acier ;
 - w est le coefficient de poids, prenant en compte la protection anticorrosion.
- (2) Les valeurs de f et de w peuvent être prises dans le tableau C.1.

Tableau C.1 — Caractéristiques des haubans

Type de hauban		f	w	
Câbles clos	1 couche de fils profilés	0,81	0,83	1,08
	2 couches de fils profilés	0,84	0,83	1,08
	> 2 couches de fils profilés	0,88	0,83	1,08
Câbles monotorons ou à fils parallèles, avec protection anticorrosion par galvanisation et peinture, avec 3 couches de fils ou plus.		0,76	0,93	1,06
Câbles monomultitorons ou à fils parallèles, avec protection anticorrosion par gainage plastique et remplissage de graisse ou de ciment, avec 3 couches de fils ou plus.		0,60	1,05	1,34

Tableau C.1 I Les valeurs de w sont reprises dans le tableau A.1, annexe A, de l'ENV 1993-2.

C.2.2 Effets du vent

(1)P Les effets du vent ci-dessous doivent être pris en compte :

a) Effets statiques de traînée du vent sur les haubans, y compris les flèches et les effets éventuels de flexion résultants aux extrémités des haubans ;

a) I Efforts statiques de traînée du vent sur les haubans.

b) Excitation aérodynamique ou autre provoquant une oscillation éventuelle des haubans.

C.2.3 Effets thermiques

(1)P Les effets thermiques pris en compte doivent comprendre les effets de températures différentes entre les haubans et le mât haubané ou le fût de cheminée.

(2) À défaut de calcul plus précis ou d'informations plus détaillées, il convient de considérer que la température d'un hauban varie entre 10 °C au-dessous de la température moyenne du reste du mât haubané et un maximum de :

- a) 15 °C au-dessus (en cas de couleur claire) ;
- b) 30 °C au-dessus (en cas de couleur foncée).

C.2.4 Tension initiale dans les haubans

C.2.4 I Ce paragraphe est en contradiction avec C.3.2(1)

(1)P Lorsqu'il n'existe pas de dispositif de réglage des haubans, les valeurs de calcul des effets totaux des actions permanentes ajoutées à la tension initiale doivent être déterminées en prenant dûment en compte la plage de tolérances pouvant survenir dans la tension initiale.

(2) Il convient de prendre les tensions initiales dans les haubans égales aux sollicitations qui subsisteraient dans les haubans en l'absence d'actions météorologiques.

C.3 Exigences générales

C.3.1 Exigences générales pour les haubans

(1)P Des matériaux autres que l'acier peuvent être utilisés à condition qu'ils possèdent un module d'élasticité acceptable et à condition que des maintiens appropriés soient prévus pour empêcher les vibrations à hautes fréquences.

(2)P La configuration et le type de construction doivent prendre en compte :

(2) I La conception de l'ouvrage doit prendre en compte :

- la résistance du câble et de ses attaches ;
- la résistance à la fatigue du câble et de ses attaches ;
- la sensibilité du câble à l'excitation dynamique due au vent ou à une autre cause ;
- la rigidité du hauban (tant axiale qu'en flexion) ;
- les exigences concernant la protection anticorrosion du hauban ;
- les exigences concernant l'entretien et la possibilité de remplacement du hauban ;
- les exigences concernant les caractéristiques diélectriques.

C.3.2 Exigences générales pour les terminaisons

(1)P Les terminaisons doivent être conçues de telle sorte que la totalité des conditions suivantes soient satisfaites :

- a) Présence de dispositifs permettant un réglage adéquat de la longueur du hauban propre à satisfaire les exigences du cahier des charges concernant les prescriptions de tension initiale, de tolérances géométriques, etc., tant sur l'installation originale que par la suite.
- b) L'entrée du toron dans la terminaison est scellée afin d'empêcher toute pénétration d'humidité.
- c) La flexion du toron provoquée par le vent transversal ou les vibrations est réduite, par exemple par l'utilisation de cardans (croisillons).
- d) Les détails d'ancrage comportent une articulation pour pallier les imperfections de fabrication et de montage.
- e) Toutes les soudures des terminaisons sont soumises à des essais non destructifs. Ceci requiert normalement une étude particulière des détails constructifs soudés.

NOTE L'augmentation du niveau des exigences concernant les ancrages et les ensembles de haubans tiennent compte d'incertitudes plus grandes sur la résistance et des difficultés d'inspection de cette zone, ainsi que du caractère dynamique des charges.

(2)P Les terminaisons de haubans ainsi que leurs éléments porteurs dans la structure doivent être dimensionnés de telle sorte que leur résistance aux charges et à la fatigue soient supérieures à celles du hauban lui-même.

(2) C Par éléments porteurs, on entend seulement les axes de liaison entre terminaison et structure.

(3) Les terminaisons constituées par des culots fixés aux extrémités des torons peuvent être considérées comme satisfaisant les exigences exposées en (1) ci-dessus à condition qu'elles respectent les critères suivants :

- le culot et les matériaux de remplissage satisfont C.4.2 ;
- les fils des torons sont séparés et épanouis à l'intérieur de la longueur de la chambre du culot de façon à remplir le cône de manière uniforme ;
- la vérification à l'état limite ultime spécifiée en C.7.3 est satisfaite ;
- le toron est correctement aligné dans le culot.

C.4 Matériaux

C.4.1 Fils pour torons

(1)P Le fil destiné aux torons doit être du fil d'acier tréfilé à froid conforme à l'EN ...

(1) A Dans l'attente de la publication de l'EN 10264 relative aux fils tréfilés, la norme de référence est NF A 47-242.

(2)P Les fils doivent être galvanisés.

(2) A On peut également utiliser des fils inox.

(3)P Le fil doit posséder une ductilité suffisante pour permettre la redistribution des contraintes dans un toron.

(4) Les exigences exposées en (3) ci-dessus peuvent être considérées comme satisfaites si la déformation du fil, à la rupture, n'est pas inférieure à 2,5 % sur la totalité de la longueur, et à 3,5 % sur une longueur de référence de cinq fois le diamètre du fil, incluant la zone effective de rupture.

(4) I Voir (1) A ci-dessus.

C.4.2 Matériaux pour culots

(1)P Les culots doivent être en acier moulé conforme à l'EN ..., en acier forgé conforme à l'EN ..., ou usinés en acier de construction, voir Section 3. La nuance d'acier doit présenter une ténacité à l'essai Charpy-V d'au moins 27 J à - 20 °C.

(1) A Les culots peuvent être mécanosoudés.

(2)P Le matériau de culottage doit être choisi en tenant compte des charges et de la température d'exploitation, et de la conception du toron et de l'alvéole de culottage, de façon à éviter, en charge, le fluage prolongé du toron au travers du culot.

(3) Il convient d'effectuer le culottage à l'aide de métaux fondus et de résines conformément à l'EN ... Il convient de choisir le matériau de remplissage parmi les matériaux suivants :

- a) Métal fondu (par exemple : zinc, ou alliage de zinc aluminium) selon l'EN ...
- b) Plastique selon l'EN ...
- c) Résine époxyde avec incorporation de billes d'acier selon l'EN ...

(3) **A** Il convient d'effectuer le culottage des câbles conformément à la prEN 13411-4 (Terminaison des câbles en acier — Sécurité — Partie 4 : Culots métal et résine).

(4) Il convient que le matériau de culottage des câbles d'antennes soit métallique.

C.4.3 Haubans non métalliques

(1) Dans le cas de matériaux synthétiques constituant des produits de marque, il convient de se référer aux données du fabricant en ce qui concerne les caractéristiques. Il convient de choisir ces matériaux avec soin car le faible module d'élasticité de certains produits rend dangereux leur substitution aux haubans en acier sur la base de la seule résistance.

(1) **C** Une attention particulière sera accordée à la conformité des terminaisons aux spécifications du fabricant.

(2) Si nécessaire, il convient de donner aux haubans non métalliques une tension initiale plus élevée afin de compenser leur moindre rigidité ce qui peut éventuellement entraîner des vibrations à haute fréquence.

(3) Il convient de veiller à l'étanchéité des extrémités de ces câbles afin de prévenir toute pénétration d'humidité pouvant entraîner la conduction de la foudre.

C.5 Caractéristiques mécaniques

C.5.1 Résistance des fils, câbles et torons

(1) La résistance caractéristique du fil à la traction peut être prise égale à la valeur nominale spécifiée de la contrainte à la rupture.

(2) La valeur caractéristique de la limite d'élasticité à 0,2 % peut être prise égale à la valeur nominale spécifiée de la limite d'élasticité.

(3) La résistance caractéristique d'un câble à fils parallèles ou d'un câble clos peut être prise égale à la résistance caractéristique totale des fils composant le câble.

(4) La résistance caractéristique d'un câble hélicoïdal présentant un pas de toronnage d'au moins dix fois le diamètre nominal du câble peut être prise égale à 95 % de la résistance caractéristique totale des fils composant le câble.

(5) La résistance caractéristique d'un câble torsadé peut être prise égale à 90 % de la résistance caractéristique totale des fils composant ce câble.

(3) (4) (5) **A** Les valeurs données en (3) (4) ou (5) sont à utiliser au stade de l'avant-projet uniquement. En phase d'exécution, la résistance caractéristique des câbles à prendre en compte sera fournie par le fabricant

C.5.2 Rigidité des haubans

(1) Il convient de déterminer le module d'élasticité efficace de préférence par des essais de câbles de la configuration réelle à utiliser. À défaut de tels essais, il peut être calculé selon les indications de l'annexe G de l'ENV 1993-2.

(1) **I** Il convient de déterminer le module d'élasticité efficace par des essais sur les câbles réellement utilisés. À défaut de tels essais, il peut être calculé selon les indications de l'annexe A de l'ENV 1993-2.

(2) Comme alternative pour le calcul préliminaire, les valeurs suivantes sous charges variables peuvent être prises pour hypothèse :

— Fils à haute résistance isolés ou en câbles à fils parallèles :	200 000 N/mm ²
— Câbles clos :	170 000 N/mm ²
— Câbles hélicoïdaux avec pas de toronnage d'au moins 10 fois le diamètre de toron :	150 000 N/mm ²

(2) **A** Câbles monotorons avec pas de toronnage d'au moins 10 fois le diamètre de toron : 150 000 N/mm²

Câbles torsadés : < 120 000 N/mm²

(2) **A** Câbles multitorons : < 120 000 N/mm²

NOTE Ces valeurs ne prennent pas en compte une flexibilité éventuelle provoquée par la modification de géométrie sous la charge d'un câble en suspension caténaire.

(2) **C** Pour les haubans non métalliques, il convient de se référer aux spécifications du fabricant.

(2) **C** Dans le calcul de la rigidité EA du câble, la section A à prendre en compte est la section cumulée des fils.

(3) Il convient de prendre en compte les points suivants :

- Jusqu'à ce qu'un câble hélicoïdal de type quelconque ait pris sa place (soit par pré-étirement en usine, soit par mise en tension en cours de montage) le module d'élasticité efficace est indéterminé et il est, en général, sensiblement inférieur lors du premier chargement aux valeurs données ci-dessus.
- La déformation provoquée par le premier chargement n'est en général pas récupérable à 100 %.

(4) Il convient de déterminer la rigidité de flexion efficace d'un câble de préférence par des essais de câbles de la configuration réelle à utiliser. À défaut de tels essais, elle peut être calculée selon les indications de l'annexe G de l'ENV 1993-2.

(4) **C** Il convient cependant de noter que la rigidité n'est généralement pas utilisée pour les haubans de pylônes. L'annexe de l'ENV 1993-2 à utiliser est l'annexe A (et non l'annexe G).

(5) De préférence, il convient de préétirer les haubans avant leur mise à longueur, afin de s'assurer que le câble se trouve dans un état élastique réel, car ceci limite les opérations d'ajustement de la tension nécessaires au cours des premières années de vie du mât haubané.

(6) Il convient d'effectuer ce préétirement en chargeant le hauban de manière cyclique entre 10 % et 40 % de sa charge de rupture. Il convient que le nombre de cycle ne soit pas inférieur à dix. Il convient de ne pas effectuer cette opération en faisant passer le hauban chargé autour d'une poulie.

NOTE Les câbles à fils parallèles ne nécessitent pas de pré-étirement, et cette opération est moins efficace dans le cas de câbles de faible diamètre. Un préétirement est nécessaire surtout lorsqu'on utilise des câbles à torons multiples, des câbles d'un diamètre supérieur à 20 mm, et, dans une moindre mesure, des câbles hélicoïdaux et des câbles clos.

C.6 Exigences générales

C.6.1 Ancrages et terminaisons

- (1) Il convient que chaque ensemble de hauban comporte un système d'attaches permettant les réglages grossiers et fins en longueur (ou en tension), et facilitant leur installation ou leur remplacement.
- (2) Il convient de prendre dûment en compte les mouvements latéraux du hauban en exploitation lors du dimensionnement des plaques d'ancrage et des axes d'articulation, ainsi que dans la conception des assemblages sur le mât haubané.
- (3) Lorsqu'un effet de levier est possible, il convient d'utiliser uniquement un boulon ou un axe muni d'un écrou de blocage pour réaliser l'assemblage.

(3) C D'autres moyens de blocage des axes sont envisageables dès lors qu'ils empêchent l'échappement de l'axe de manière durable.

- (4) Il convient que les plaques d'ancrage des haubans soient dimensionnées de façon à procurer une rigidité latérale raisonnable.
- (5) Il convient de concevoir l'ancrage du hauban de façon à prévenir toute flexion latérale éventuelle et toute fissuration du béton provoquées par un mouvement latéral induit par le hauban.
- (6) Il convient de calculer tous les composants des ancrages de telle sorte qu'ils possèdent une résistance supérieure à celle des câbles qu'ils maintiennent.

(6) A Les composants des ancrages sont vérifiés pour les efforts calculés à l'E.L.U. Se reporter et se conformer à 5.1.1 (2) A pour les coefficients partiels.

C.6.2 Culots de haubans

- (1) En l'absence de vérification approfondie par essais, les culots de haubans dimensionnés selon les indications de la figure C.2 peuvent être vérifiés comme indiqué dans les alinéas (2) à (7).
- (2) Il convient de prendre la force de calcul F_{sd} appliquée à un culot de hauban égale à 1,05 fois la résistance caractéristique du câble auquel il est fixé, quelle que soit la charge de calcul s'exerçant dans ce câble.
- (3) Il convient de calculer la contrainte longitudinale de calcul $\sigma_{l,Ed}$ au niveau d'une section transversale quelconque d'un culot de hauban au moyen de l'expression :

$$\sigma_{l,Ed} = \frac{k_1 F_{l,Sd}}{A} \quad \dots (C.2)$$

où :

$F_{l,Sd}$ peut être considéré comme variant de façon linéaire entre F_{sd} au niveau de l'appui ou de l'extrémité ancrée du culot de hauban à zéro au niveau de l'extrémité libre ;

A est l'aire transversale du culot de hauban au niveau de la section considérée ;

k_1 est le facteur tenant compte du transfert de charge entre le toron et le culot de hauban, et pouvant être pris égal à 1,5.

- (4) Il convient de prendre la valeur de calcul de la force annulaire totale ($F_{r,Sd}$) dans le culot du hauban égale à :

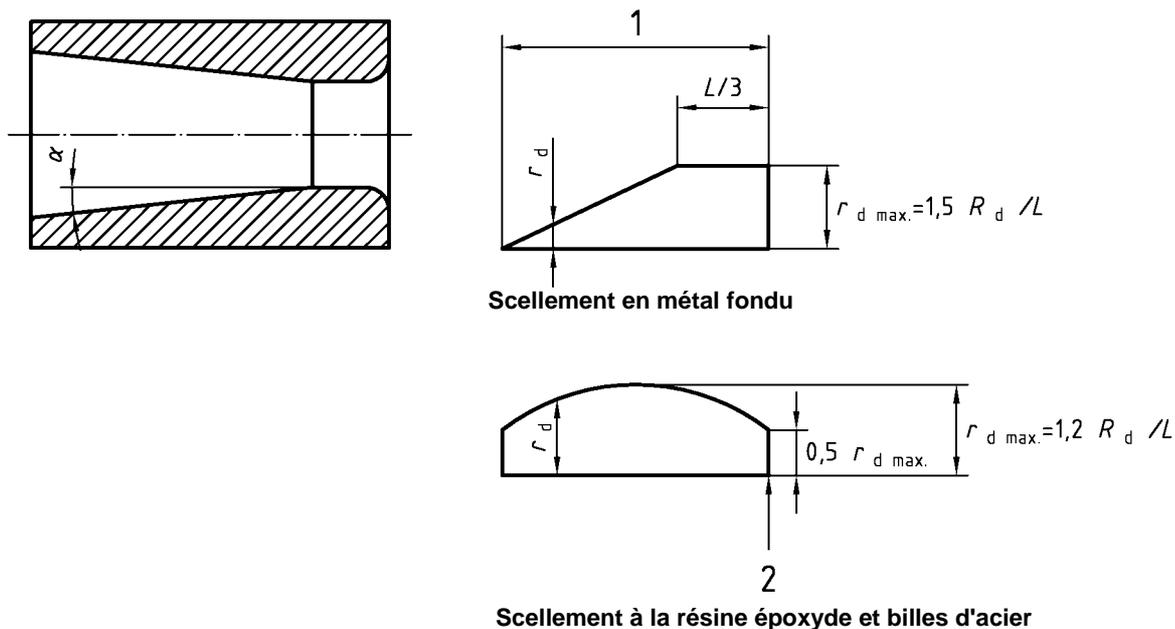
$$F_{r,Sd} = \frac{F_{l,Sd}}{2\pi \tan(\phi + \alpha)} \quad \dots (C.3)$$

où :

ϕ est l'angle de frottement entre le matériau de scellement et le culot, pouvant être pris égal à :

- 17° pour un remplissage en métal ;
- 22° pour un remplissage en résine ;

α est l'angle du cône, voir figure C.2.



Légende

- 1 Longueur totale du culot L
- 2 Face d'appui du culot

Figure C.2 A Il convient de comprendre :

- r_{Ed} au lieu de r_d
- $r_{Ed,max}$ au lieu de $r_{d,max}$
- $F_{r,Sd}$ au lieu de R_d

Figure C.2 — Répartition des efforts dans un embout

(5) La force annulaire totale $F_{r,Sd}$ peut être répartie sur la longueur du culot du hauban pour donner l'intensité locale r_{Ed} par unité de longueur comme indiqué dans la figure C.2.

(6) Il convient de prendre la contrainte annulaire de calcul $\sigma_{r,Ed}$ au niveau d'une section transversale quelconque du culot de hauban égale à :

$$\sigma_{r,Ed} = \frac{k_2 r_{Ed}}{(d_0 - d_i) / 2} \quad \dots (C.4)$$

où :

r_{Ed} est l'intensité locale de l'effort annulaire calculée selon (5) ;

d_0, d_i sont les diamètres extérieur et intérieur du culot au niveau de la section considérée ;

k_2 est le facteur prenant en compte la répartition inégale des contraintes sur l'épaisseur de paroi, pouvant être pris égal à 1,5.

(7) Il convient de déterminer la valeur maximale de la contrainte principale dans le matériau du culot au niveau d'une section transversale quelconque au moyen de $\sigma_{l,Ed}$ et de $\sigma_{r,Ed}$ au niveau de chaque section, et que cette valeur ne dépasse pas f_y / γ_{M0} .

C.6.3 Boucles

(1) Il convient d'utiliser l'une des solutions suivantes de terminaison dans le cas de câbles à torons multiples. Il convient de faire passer l'extrémité du câble dans la gorge de la cosse et de la fixer sur elle-même par l'un des moyens suivants :

- a) *épissure manuelle* : (Efficacité 60 % – 90 %). Il s'agit de la méthode la plus traditionnelle pour former une boucle terminale.
- b) *boucle manchonnée* : (Efficacité 90 % – 95 %). Le manchon est placé sur l'extrémité repliée en boucle du câble, puis serti à la presse.
- c) *serre-câbles* : (Efficacité 20 % – 90 %). Les serre-câbles et les prises bull-dog permettent la réalisation d'une terminaison sur chantier relativement aisée. Ils ne conviennent généralement pas aux câbles d'un diamètre supérieur à 12 mm, et exigent un resserrage à intervalles réguliers.
- d) *pince-câbles préformés* : (Efficacité 90 % – 100 %). Il s'agit de torons préformés que l'on a enduit au préalable d'une certaine substance (comme du sable abrasif), et qui sont enroulés sur la périphérie du câble à torons multiples sur une longueur pouvant aller jusqu'à 2 m, en fonction du type et de la dimension du hauban. Ce toron préformé permet ainsi la réalisation d'une terminaison en boucle sur chantier pouvant être réutilisée un nombre limité de fois.

C.7 Fatigue

(1)P La résistance à la fatigue d'un câble et de son attache sous charges axiales variables doit être déterminée au moyen de l'action spécifiée dans l'ENV 1991-2-4 en utilisant la catégorie appropriée de détail constructif.

(2)P La ruine par fatigue des câbles provoquée par des effets de flexion au voisinage des culots doit être évitée par l'emploi d'assemblages articulés.

(3) À défaut des essais décrits en C.9 ci-dessous, sous réserve des conditions mentionnées en (4), la catégorie de détail de fatigue peut être déterminée de la façon suivante :

- a) torons hélicoïdaux ou câbles clos avec scellement métallique : Catégorie 112
- b) câbles à fils parallèles avec scellement époxyde : Catégorie 160

(4) Il convient d'adopter les catégories données en (3) uniquement si :

- a) les culots satisfont les exigences générales données en C.4.2 et C.6.2.
- b) toute oscillation aérodynamique importante des câbles est empêchée, voir Section 11.
- c) une protection anticorrosion appropriée est réalisée, voir Section 10.

C.8 Informations exigées pour les fournisseurs de câbles

C.8 I Informations à exiger des fournisseurs de câbles

C.8.1 Caractéristiques mécaniques des câbles et équipements

(1) Comme alternative à la spécification de la configuration détaillée d'un hauban, il est possible de spécifier des exigences de comportement. Dans ce cas, il convient que ces exigences comprennent :

- a) la résistance exigée des fils du câble et la résistance du hauban complet, y compris les terminaisons ;
- b) le mode de ruine retenu (par exemple dans le câble plutôt qu'au niveau de la terminaison) ;
- c) la contrainte d'épreuve à 0,2 % pour les fils du câble ;

c) C Cela concerne l'essai à 0,2 % d'allongement.
--

- d) l'allongement à la rupture (ductilité) des fils constitutifs ;
- e) la rigidité (tant axiale que de flexion) du hauban complet ;
- f) la résistance à la fatigue du câble complet, y compris les terminaisons ;
- g) les exigences particulières éventuelles concernant le pas/l'angle de toronnage et la minimisation du couple résiduel ;
- h) les exigences particulières éventuelles concernant le type de culot et le système pour la mise en tension ;
- i) les tolérances dimensionnelles du câble et des équipements ;
- j) la méthode de préétirement et le marquage à longueur ;
- k) les pièces qu'il convient de concevoir comme pouvant être remplacées ;
- l) toute éventualité d'excitation aérodynamique (pouvant nécessiter l'utilisation d'amortisseurs) ;
- m) les codes et normes à utiliser ;
- n) les exigences particulières éventuelles concernant le marquage d'identification ;
- o) les précautions particulières éventuelles concernant le transport ;
- p) les exigences particulières éventuelles concernant l'assurance de la qualité.

C.8.2 Traitement de protection

(1) Comme alternative à la spécification des détails de traitement de protection, il est possible de communiquer des spécifications de comportement. Dans ce cas, il convient que les points à spécifier comprennent :

- a) l'environnement du site (exposition, types et niveaux de pollution, accès, etc.) ;
- b) les aspects particuliers de calcul pouvant affecter la protection (par exemple : la plage de contraintes ou la sensibilité aux oscillations peuvent interdire l'utilisation de certains types de gaines) ;
- c) les exigences particulières concernant le traitement de protection (par exemple : galvanisation des fils) ;
- d) la durée de vie exigée du traitement entre «entretiens courants» ;
- e) la durée de vie exigée du traitement jusqu'à réfection complète ;
- f) les codes et les normes à utiliser.

(2) Il convient de spécifier les détails des garanties éventuelles à fournir pour le système.

C.9 Exigences concernant les essais

C.9.1 Généralités

(1)P Tous les essais devant être effectués sur les câbles et leurs équipements pour garantir que leur comportement est conforme à celui prévu doivent être définis dans le cahier des charges du projet.

(2) Il convient que les essais mentionnés selon C.9.2 à C.9.5 soient spécifiés. S'ils sont couverts par une Norme Européenne appropriée, il convient de les spécifier par référence à cette Norme.

(3) Il convient de spécifier la fréquence des essais, la dimension et le nombre de spécimens, ainsi que les mesures à prendre en cas de non satisfaction des critères.

C.9.2 Essais effectués sur les fils

(1) Il convient de soumettre les fils à des essais effectués sur un banc d'essai de traction approprié, contrôlé selon des normes spécifiées.

(2) Il convient d'effectuer les essais pour la résistance à la traction, la charge d'épreuve et l'allongement. Il convient de spécifier la précision ainsi que la vitesse de mise en charge du banc d'essai.

(3) Il convient de spécifier un essai de pliage, non seulement pour le fil mais aussi pour la galvanisation, voir ci-dessous. Il convient que cet essai soit effectué en enroulant le fil autour d'un mandrin d'un diamètre égal à trois fois celui du fil, sans provoquer de rupture du fil ni de fissuration ou d'éclatement du revêtement de zinc.

C.9.3 Essais effectués sur le revêtement de zinc

(1) Outre l'essai d'enroulement mentionné en C.9.2(3), il convient de spécifier des essais pour déterminer l'uniformité et le poids du revêtement de zinc.

C.9.4 Essais effectués sur les haubans

(1) Dans la mesure du possible, il convient d'effectuer des essais destructifs sur des échantillons complets (avec culots) de chaque taille de câble, la charge d'essai étant appliquée par l'intermédiaire des culots de la même façon qu'en exploitation.

(2) Si le comportement d'une structure dépend de façon critique de la rigidité des haubans et sauf si les méthodes approchées de détermination suivant C.5.2 sont adoptées, il convient de déterminer cette rigidité par des essais effectués sur des haubans complets, équipés de culots comme en exploitation. Pour garantir que le câble s'est mis en place et a atteint un état stable, il convient de procéder à plusieurs cycles de chargement et de déchargement du câble avant de le couper à longueur et de monter les culots. Il convient d'effectuer ce chargement cyclique pour chaque hauban, et de déterminer et de relever la rigidité pour au moins un hauban de chaque diamètre.

(3) Si les informations disponibles concernant le comportement à la fatigue d'un hauban particulier sont insuffisantes pour procéder à des estimations fiables de sa durée de vie à la fatigue, il convient de déterminer par des essais cette durée de vie à la fatigue.

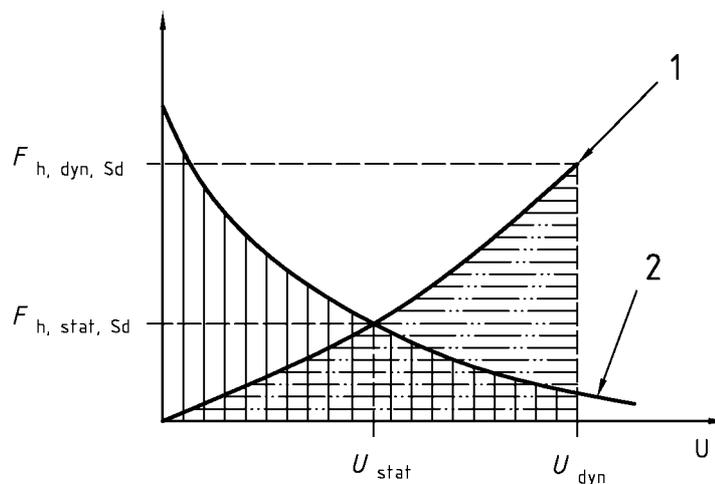
C.9.5 Autres essais

(1) Il convient de spécifier des essais supplémentaires si nécessaire pour justifier les hypothèses de calcul, notamment :

- a) essais de frottement (estimations des valeurs maximale et minimale) ;
- b) essais à long terme (fluage) sur des torons équipés de culots ;
- c) contrôles visuels, aux ultrasons et radiographiques sur les culots.

- (3) Pour une flèche u donnée, les haubans 2 et 3 agissent sur le fût de mât haubané avec une force $F_{h,Sd}$. La courbe 1 de la figure D.2 montre cette relation. On constate que $F_{h,Sd}$ décroît lorsque la flèche augmente en raison du relâchement des haubans.
- (4) Pour le système du mât haubané, sauf pour l'ensemble de haubans au niveau considéré, la relation entre une force horizontale extérieure et la flèche au nœud peut également être démontrée. La courbe 2 de la figure D.2 montre cette relation. À l'intersection des deux courbes 1 et 2, les deux forces sont égales, c'est-à-dire qu'un équilibre statique est atteint. La force agissant sur le joint est $F_{h,stat,Sd}$.
- (5) Au moment de la rupture, une énergie s'accumule dans les haubans 2 et 3. Lorsque le mât haubané commence à fléchir, cette énergie est partiellement transformée en énergie cinétique.
- (6) À la flèche maximale, l'énergie cinétique est égale à zéro, car l'énergie perdue dans les haubans 2 et 3 a été transmise au mât haubané sous forme d'énergie de déformation élastique dans le fût et les haubans. L'amortissement n'a pas été pris en compte.
- (7) Il convient de considérer que l'énergie perdue dans les haubans 2 et 3 est égale à l'aire A.2 située au-dessous de la courbe 1 dans la figure D.2.
- (8) La flèche résultante dans les deux aires A1 et A2 est égale, et il convient de la prendre égale à la flèche dynamique U_{dyn} .
- (9) La force dynamique $F_{h,dyn,Sd}$ correspond à cette flèche dynamique. Le facteur d'impact ϕ peut être déterminé au moyen de :

$$\phi = \frac{F_{h,dyn,Sd}}{F_{h,stat,Sd}} \quad \dots (D.1)$$



Légende

- 1 Courbe 2 — Mât sans haubans 1, 2 et 3
- 2 Courbe 1 — Haubans 2 et 3

Figure D.2 — Diagramme forces-déplacement

- (10) La procédure donnée ci-dessus pour l'analyse d'un mât haubané juste après une rupture de hauban éventuelle s'applique à un mât haubané selon trois directions. Pour les mâts haubanés selon quatre directions (ou plus) des procédures similaires basées sur les mêmes principes doivent être adoptées.

D.3 Analyse après une rupture de hauban

- (1) Outre la situation exposée ci-dessus, immédiatement après la rupture d'un hauban il convient que le mât haubané soit capable de résister aux charges de vent pendant une courte période jusqu'à l'installation d'un haubannage temporaire.
- (2) En l'absence d'autres exigences, il convient que le mât haubané sans le hauban rompu soit capable de résister à une charge de vent réduite, agissant comme une charge statique, et sans charge de vent partiellement répartie. Il convient de prendre le chargement de vent réduit égal à 50 % du chargement de vent moyen caractéristique, agissant dans la direction de vent la plus défavorable.

D.4 Procédure offrant une marge de sécurité

C La procédure simplifiée définie ci-après peut remplacer la procédure donnée en D.2 ; à l'issue de D.4, D.3 reste à appliquer.

- (1) Les forces dynamiques agissant dans le fût du mât haubané et les haubans à la suite d'une rupture de câble peuvent être estimées avec une marge de sécurité au moyen des calculs statiques suivants.
- (2) Il convient d'utiliser la composante horizontale de la tension du hauban avant sa rupture comme une force supplémentaire agissant sur le mât haubané sans le hauban rompu.
- (3) Il convient d'augmenter les tensions dans les haubans d'un facteur 1,3 dans le cas de mâts haubanés comportant deux nappes de maintien ou si l'on considère la rupture d'un hauban supérieur.

(3) C Ces majorations de tension concernent les haubans non rompus calculés en (2).

Annexe E (informative)

Équipements annexes et autres

I Équipements annexes et autres : Moyens d'accès et plates-formes

E.1 Échelles et échelons

E.1 I Moyens d'accès

E.1.1 Généralités

(1) Il convient de prévoir un accès sûr à tous les niveaux de la structure afin de faciliter les opérations d'inspection et d'entretien courantes. Il convient de prévoir cet accès au moyen d'échelles et de plates-formes, mais lorsqu'un contrôle fréquent est exigé, ou lorsqu'un accès rapide est nécessaire pour l'entretien des antennes, un ascenseur peut également être installé.

(2) Il convient de calculer les installations d'accès pour qu'elles supportent une charge concentrée d'au moins 1,5 kN.

E.1.2 Échelles

(1) En général, une seule échelle verticale suffit et, dans la mesure du possible, il convient de positionner celle-ci à l'intérieur de la structure.

(2) En général, il convient d'installer un câble ou un rail de sécurité continu efficace à proximité de l'échelle, pour que l'utilisateur puisse y être attaché constamment pendant la montée et la descente. En l'absence de rails de sécurité, les échelles peuvent être équipées de crinolines dans la mesure du possible.

E.1.2 I Choix d'un moyen d'accès et dispositions constructives

(1) Il convient de respecter les prescriptions réglementaires en vigueur et notamment celles concernant les interventions ultérieures sur les ouvrages. Il convient également de respecter les normes mentionnées dans les spécifications du projet.

(2) Le choix d'un moyen d'accès entre deux niveaux sera en particulier fonction :

- des conditions d'utilisation (type et fréquence d'accès) ;
- de la dénivellation entre niveaux ;
- de la géométrie (espace disponible) ;
- de la sécurité des utilisateurs ;
- des dispositions constructives à mettre en œuvre.

En l'attente de la parution de la norme EN ISO 14122 (moyens permanents d'accès aux machines) :

- partie 1 : choix d'un moyen d'accès fixe entre deux niveaux ;
- partie 2 : plates-formes de travail et passerelles ;
- partie 3 : escaliers, échelles à marches et garde-corps ;
- partie 4 : échelles fixes ;

il convient de respecter les normes :

- FD E 85-011 (Choix d'un moyen d'accès fixe entre deux niveaux) ;
- NF E 85-031 (Escaliers métalliques à volée droite) ;
- NF E 85-010 (Échelles fixes métalliques avec ou sans crinoline) ;
- NF E 85-101 (Garde-corps métalliques) ;
- et NF E 85-012 (Protection «anti-intrusion» condamnant l'accès bas à l'échelle).

E.1.3 Échelons

(1) Certains mâts haubanés et pylônes de petite taille peuvent offrir un espace insuffisant pour l'installation d'une échelle à l'intérieur du fût du mât haubané. Dans ce cas, lorsque l'installation d'une échelle est impossible, des échelons peuvent être fixés sur une face du mât haubané. Dans cette éventualité, il convient de prévoir un rail de sécurité continu.

E.2 Plates-formes

E.2.1 Généralités

(1) Il convient de prévoir l'installation de plates-formes pour les raisons suivantes :

- paliers de repos ;
- plates-formes de travail à tout autre niveau où un entretien régulier est exigé (par exemple : niveaux d'éclairage, niveaux d'antennes) ;
- paliers d'ascenseurs.

(2) Il convient que toutes les plates-formes soient équipées de surfaces antidérapantes avec prise en compte appropriée des conditions climatiques. Des surfaces grillagées ou nervurées se sont avérées satisfaisantes. Les surfaces horizontales constituent des pièges à humidité et il convient de prévoir un drainage afin de prévenir une corrosion excessive. Il convient de calculer le plancher des plates-formes en fonction des charges de neige et de verglas et du poids total de l'équipement et du personnel.

(2) **C** À défaut d'autres indications mentionnées dans les spécifications du projet, les plates-formes seront calculées avec une charge d'exploitation de 2,5 kN/m².

(3) Il convient d'équiper toutes les plates-formes de garde-corps et de plinthes conformément aux Normes Nationales.

E.2.2 Paliers de repos

(1) L'aire de ces plates-formes peut être très faible, mais de dimensions suffisantes pour qu'au moins une personne puisse s'y tenir debout confortablement. Il convient normalement que leur espacement vertical soit de 25 m, et qu'ils soient positionnés de façon à permettre un accès sûr à l'échelle.

E.2.2 I Voir E.1.2 I

E.2.3 Paliers d'ascenseurs

(1) Pour les mâts haubanés, il convient que la plate-forme couvre la totalité de l'aire du fût du mât haubané non occupée par l'ascenseur lui-même ou par des descentes de câbles ou guides d'ondes. Il convient de prendre des mesures appropriées afin de protéger l'aire occupée par l'échelle.

E.2.4 Plates-formes de travail

(1) Ces plates-formes peuvent être positionnées pour satisfaire les exigences vis-à-vis de la structure, et elles peuvent être intérieures ou extérieures à la structure. Il convient que les plates-formes extérieures soient équipées de garde-corps et de plinthes.

E.2.4 I	Voir E.1.2 I
---------	--------------

A Annexe F

(informative)

Spécifications techniques du projet — Contenu

La présente Partie 3.1 de l'Eurocode 3 renvoie son utilisateur aux spécifications techniques du projet pour un certain nombre de points.

Lorsque le marché de construction d'un pylône ou d'un mât haubané intègre cette Partie 3.1 à son référentiel technique, il appartient donc au maître d'ouvrage d'inscrire aux spécifications techniques du projet, les prescriptions et renseignements correspondants.

La présente annexe F rappelle la liste de ces prescriptions et renseignements. Cette liste ne décrit évidemment pas le contenu exhaustif de spécifications relatives à un pylône ou à un mât ; il appartient bien sur au maître d'ouvrage d'y définir complètement les caractéristiques et performances de l'ouvrage qu'il entend acheter, en fixant d'ailleurs, le cas échéant, des niveaux d'exigence supérieurs à ceux résultant de la présente Partie 3.1.

L'annexe C de la norme XP P 22-501-1 donne une liste, la plus exhaustive possible, des exigences pouvant figurer aux spécifications. Seuls sont rappelés ci-dessous les renvois aux spécifications techniques du projet apparaissant dans la Partie 3.1 :

- Définition de la classe de fiabilité de l'ouvrage : voir avant-propos (22) et 2.3 (3)A.
- Définition de la durée de vie attendue de l'ouvrage : voir 2.3 (3)A.
- Autorisation (ou non) d'utiliser la méthode simplifiée, suivant D.4 annexe D, pour estimer l'effet de la rupture d'un hauban lorsque cela est requis pour l'ouvrage concerné (mâts haubanés de classe de fiabilité élevée) : voir 2.4 (4)A.
- Définition de toutes charges d'exploitation spécifiques à l'ouvrage, ainsi que des charges accidentelles et de collision à considérer le cas échéant : voir 2.5.5 (1)C et 2.5.6 (1).
- Définition et implantation de moyens d'accès permanents : voir 2.5.6 (4)A.
- Définition de la valeur admissible des déplacements (flèches et/ou dépointages) : voir 4.1 (3)A et 4.2.2 (1)A et (2)C.
- Définition d'antidesserrage des boulons à mettre en œuvre, le cas échéant : voir 7.5 (2)C.
- Définition des diamètres de perçage en fonction des diamètres de boulons (jeu réduit) : voir 7.5 (3)A ; usage de boulons cisailés sur tige lisse.
- Nature et étendue des contrôles de soudage : voir 7.6 (2).
- Définition de tolérances de montage éventuellement plus sévères que celles mentionnées dans la Partie 3.1 : voir 7.7.1 (1).
- Autorisation (ou non) d'utilisation des coefficients partiels de sécurité réduits pour la fatigue par un programme d'entretien/maintenance : voir 9.5 (2)C.
- Définition des performances attendues de la protection anticorrosion : voir 10.1 (1)A et pour les haubans de mâts voir 10.2 (2)A.
- Définition du mode de mise à la terre : voir 13.2 (2).
- Définition des mesures de protection contre le vandalisme : voir 13.4.
- Obligation (ou non) d'une analyse spectrale pour les mâts haubanés : voir A.4.2 (2)C.
- Définition de l'épaisseur de givre de calcul : voir B.2 (1)A.
- Exigences relatives aux câbles constituant les haubans de mâts (voir C.8) et les essais à réaliser sur ces câbles (voir C.9).

Il est par ailleurs indiqué (13.3) qu'il appartient au maître d'ouvrage d'obtenir toutes les autorisations nécessaires à la construction (permis de construire, signalisation aérienne,...).