



CENTRE TECHNIQUE INDUSTRIEL
DE LA CONSTRUCTION MÉTALLIQUE

RECOMMANDATIONS SUR LE CALCUL DES STRUCTURES DE MÂTS D'ÉCLAIRAGE DE GRANDS ESPACES

DEUXIÈME ÉDITION
DÉCEMBRE - 2000

Construction Métallique
N° 4 - 2000

Ces Recommandations ont été établies en 1995 par un Groupe de Travail composé de :

- M. Brozzetti (CTICM)
- M. Chabrolin (CTICM)
- M. Charbon (SERMETO)
- Mme Clavaud (CTICM)
- M. Galéa (CTICM)
- M. Grégoire (CETEN-APAVE)
- M. Haldric (Petitjean)
- M. Lapeyre (CEP)
- M. Lequien (CTICM)
- M. Marchandé (GHM)
- M. Maître (SOCOTEC)
- M. Marteau (Petitjean)
- M. Mayère (Bureau VERITAS)
- M. Pascal (CTICM)
- M. Perriau (SERMETO)
- Mme Rigoulay (Petitjean)
- M. Salomon (GHM)
- M. Vaillant (GHM)

Il n'est pas exclu que l'expérimentation de ces présentes Recommandations mette en évidence certains problèmes relatifs à l'applicabilité du document, conduisant à apporter des compléments jugés indispensables. Dans cette perspective, les utilisateurs des présentes Recommandations sont invités à faire connaître leurs observations avec, si possible, leurs propositions d'amendement à l'appui, au Centre Technique Industriel de la Construction Métallique (Domaine de Saint-Paul – B.P. 64, 78470 Saint-Rémy-lès-Chevreuse).

La nouvelle version 2000 constitue une mise à jour qui inclut principalement le modificatif N° 2 relatif à la carte des zones de vent et l'actualisation des références normatives.

TABLE DES MATIÈRES

1 INTRODUCTION

- 1,1 Objet des Recommandations
- 1,2 Domaine d'application
- 1,3 Définition des termes
- 1,4 Symboles utilisés
- 1,5 Convention pour les axes des éléments

2 BASES DES CALCULS

- 2,1 Définition des actions et de leurs valeurs caractéristiques
- 2,2 Définition des combinaisons d'actions et des coefficients partiels de sécurité

3 MATÉRIAUX

- 3,1 Généralités
- 3,2 Propriétés des aciers de construction des mâts
- 3,3 Propriétés des vis, écrous et rondelles
- 3,4 Propriétés des aciers pour tige d'ancrage
- 3,5 Produits d'apport de soudage
- 3,6 Galvanisation
- 3,7 Classe de résistance du béton de fondation
- 3,8 Caractéristiques générales

4 ÉTATS LIMITES DE SERVICE

5 ÉTATS LIMITES ULTIMES

- 5,1 Bases de calcul
- 5,2 Calcul des sollicitations
- 5,3 Vérification de la résistance des sections transversales
- 5,4 Résistance du cadre d'ouverture ou des renforts

6 RÉSISTANCE DES ASSEMBLAGES ET JOINTS

- 6,1 Résistance des boulons
- 6,2 Résistance des tiges d'ancrage
- 6,3 Résistance des soudures
- 6,4 Résistance de l'assemblage par emboîtement
- 6,5 Résistance de la plaque d'embase et adhérence des tiges d'ancrage

7 FATIGUE

- 7,1 Introduction
- 7,2 Coefficients de sécurité
- 7,3 Spectre de charges dues au vent pour la fatigue
- 7,4 Courbes de résistance à la fatigue
- 7,5 Justification de la résistance à la fatigue
- 7,6 Justification forfaitaire
- 7,7 Exigences relatives à la fabrication

ANNEXE A : Caractéristiques de la section efficace des sections polygonales

1. – INTRODUCTION

1,1 – Objet des Recommandations

- (1) Les présentes Recommandations concernent les méthodes de vérification de la sécurité des structures de mâts d'éclairage réalisés en acier.
- (2) Ces Recommandations sont, sur le plan des principes de sécurité, conformes à la norme expérimentale P 22-311 (soit la prénorme ENV 1993-1-1 « Calcul des structures en acier. Partie 1.1 : Règles générales et règles pour les bâtiments » avec son Document d'Application Nationale).
- (3) Compte tenu des aspects spéciaux liés à la conception et à la construction des mâts d'éclairage, les présentes Recommandations définissent des règles de vérification particulières complémentaires.
- (4) Les règles d'exécution couvrant la fabrication et le montage sont en dehors du champ d'application des présentes Recommandations.
- (5) Les sujets suivants sont traités dans ces Recommandations :

Chapitre 1 : Introduction

Chapitre 2 : Bases des calculs

Chapitre 3 : Matériaux

Chapitre 4 : États limites de service

Chapitre 5 : États limites ultimes

Chapitre 6 : Résistance des assemblages et joints

Chapitre 7 : Fatigue

1,2 – Domaine d'application

- (1) Le domaine d'application couvert par les présentes Recommandations a trait aux structures de mâts d'éclairage autostables supportant des projecteurs, de section fermée polygonale ou circulaire, dont le cercle moyen circonscrit à cette section varie linéairement avec la hauteur.
- (2) Les mâts d'éclairage visés par ces Recommandations sont constitués d'une seule pièce ou de plusieurs tronçons assemblés par brides, par emboîtement ou par soudage et leur hauteur est comprise entre 15 et 80 m. Ne sont pas couvertes les structures relevant de la norme EN 40 : Candélabres.
- (3) Le nombre de pans de la section polygonale est supérieur ou égal à 6 et n'excède pas 18.

1,3 – Définition des termes

- (1) Les termes particuliers ci-après sont utilisés dans les présentes Recommandations avec les définitions suivantes :
 - **Cahier des charges du projet** : Document contractuel entre fournisseur et client définissant, entre autres, les spécifications techniques particulières à la fourniture.

- **Structure** : Comprend la totalité des éléments structuraux directement assemblés et dimensionnés pour agir ensemble afin de résister aux actions.
- **Fût** : Partie de forme tronconique de section polygonale ou circulaire ancrée au sol et supportant la herse.
- **Montant de herse** : Ossature support des projecteurs, passerelle et échelle.
- **Emboîtement** : Partie d'assemblage de tronçons de fût qui s'encastrent l'un dans l'autre
- **Plaque d'embase** : Partie constituée par les pièces d'appui qui forment l'extrémité d'un poteau, par laquelle il transmet ses sollicitations aux fondations de l'ouvrage.
- **Bride** : Couronne circulaire, raidie ou non raidie, servant à assembler un tronçon de fût par boulonnage.
- **Projecteur** : Appareil, orientable et autonome, projetant les rayons d'une source lumineuse intense.

1,4 – Symboles utilisés

Les symboles utilisés sont conformes à la norme expérimentale P 22-311. Les définitions des paramètres sont données, lorsque nécessaire, dans les différents articles.

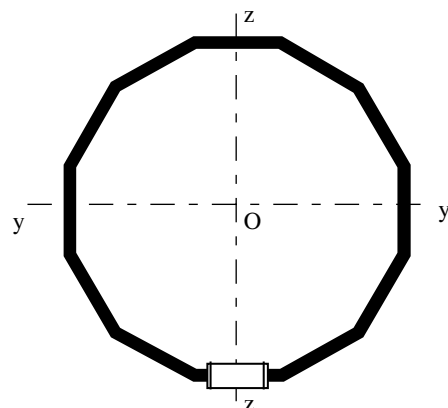
1,5 – Convention pour les axes des éléments

En général, la convention pour les axes des éléments structuraux est :

xx axe longitudinal du mât d'éclairage,

yy axe de la section transversale selon la figure ci-dessous (axe parallèle au plan de l'ouverture),

zz axe de la section transversale selon la figure ci-dessous (axe perpendiculaire au plan de l'ouverture).



2. – BASES DES CALCULS

2,1 – Définition des actions et de leurs valeurs caractéristiques

2,11. – Charge permanente (G)

- (1) Le poids propre de la structure est calculé sur la base des dimensions nominales et des masses volumiques moyennes.
- (2) Le poids propre des équipements est obtenu à partir des spécifications précisées par les fournisseurs de ces équipements.

2,12. – Charge d'entretien (Q)

La charge d'entretien prise en compte sur la passerelle est de 150 daN/m².

2,13. – Charge de neige (S)

- (1) La charge de neige appliquée aux surfaces concernées (projection horizontale) est prise forfaitairement égale à 90 daN/m² pour des mâts d'éclairage situés à des altitudes inférieures à 200 m. Au-delà de ces altitudes, on modifie la valeur forfaitaire de charge de neige en fonction de l'altitude (z en m) comme suit :

pour	$200 \text{ m} \leq z < 500 \text{ m}$	$S_{alt.} = 0,15 z + 60$
pour	$500 \text{ m} \leq z < 1000 \text{ m}$	$S_{alt.} = 0,30 z - 15$
pour	$1000 \text{ m} \leq z < 2000 \text{ m}$	$S_{alt.} = 0,45 z - 165$

- (2) Les charges d'entretien ne sont pas cumulables avec les charges de neige.

2,14. – Charge de vent (W)

- (1) Pressions dynamiques de base :

Selon les zones définies sur la carte du modificatif n° 2 relatif à la carte Vent des Règles NV 65, la pression dynamique de base nécessaire au calcul des actions du vent à prendre en compte sur les structures est donnée par le tableau ci-après :

Zones	1	2	3	4	5
q (daN/m ²)	50	60	75	90	120
$q_{k,10}$ (daN/m ²)	60	72	90	108	144
<p>La pression dynamique de base caractéristique ($q_{k,10}$) a été obtenue en multipliant la pression dynamique de base normale (q) par le coefficient 1,2.</p> <p>On rappelle que $q_k = \frac{1}{2} \rho V_k^2$, avec $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$.</p>					

- (2) Modifications de la pression dynamique de base :

(a) Effet de la hauteur au-dessus du sol :

Pour h compris entre 0 et 500 m, l'effet de la hauteur h au-dessus du sol est défini (excepté pour les constructions en bordure immédiate du littoral ; dans ce cas, on adopte une pression constante entre 0 et 10 m égale à celle régnant à 10 m) par la formule :

$$\frac{q_h}{q_{k,10}} = 2,5 \frac{h + 18}{h + 60}$$

h : hauteur en m au-dessus du sol au centre du tronçon courant (cf. § 5,31 (2)),

q_h : pression dynamique agissant à la hauteur h ,

$q_{k,10}$: pression dynamique à 10 m de hauteur.

Lorsque le sol environnant la construction du mât d'éclairage présente des dénivellations avec fortes pentes, la hauteur h est comptée à partir d'un niveau inférieur à celui du pied de la construction (cf. commentaires C. 1,241 des règles NV 65).

(b) Effet de site :

Pour tenir compte de la nature du site d'implantation des mâts, il convient de multiplier la valeur des pressions dynamiques de base caractéristiques par un coefficient de site k_s donné par le tableau ci-dessous :

	Zones				
Sites	1	2	3	4	5
Protégé	0,80	0,80	0,80	0,80	–
Normal	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Exposé (*)	1,35	1,30	1,25	1,20	1,20
<p>(*) Un site exposé correspond, par exemple, au littoral en général (sur une profondeur d'environ 6 km), au sommet des falaises, aux îles et presqu'îles, aux vallées étroites où le vent s'engouffre, aux montagnes isolées ou élevées, etc.</p>					

La nature du site doit être définie par le cahier des charges du projet. À défaut de précisions, on adoptera une implantation de type site normal.

L'application du coefficient de site protégé aux mâts d'éclairage doit être expressément justifiée.

(c) Effet de masque :

Le fait qu'un mât d'éclairage soit masqué partiellement ou totalement par d'autres constructions n'est pas à prendre en compte dans les calculs, sauf si derrière ce « masque » se produit une perturbation due au sillage turbulent de vent.

(d) Effet des dimensions :

La pression dynamique de base doit être affectée d'un coefficient δ ayant pour valeurs celles données dans le tableau ci-après.

Dans le cas où la hauteur h est comptée à partir d'un niveau inférieur à celui du pied de la construction, il convient de se reporter aux courbes de la figure R.III.2 des Règles NV65.

H (m)	$15 \leq H \leq 80$	$30 \leq H \leq 60$	$60 < H \leq 80$	$35 \leq H \leq 80$		
h (m)	$0 \leq h \leq 30$	$30 < h \leq 35$		$35 < h \leq 40$	$40 < h \leq 45$	$h > 45$
δ	$1 - 0,13(\log h + 0,301)$	$1 - 0,12(\log h + 0,301)$	0,75	0,80	0,85	0,90

H est la hauteur totale du mât, h est la cote du centre du tronçon considéré. Il conviendra de prendre un nombre de tronçons suffisant pour représenter les charges dues au vent (cf. § 5,312).

(3) Calcul des actions du vent :

Seule l'action horizontale dans la direction du vent (traînée) doit être prise en compte (en général les actions dans les directions perpendiculaires au vent seront plus faibles). Elle produit un effet d'entraînement et de renversement sur le mât, dans les directions les plus défavorables, selon l'effet considéré. Sont à prendre en compte :

a) L'action d'ensemble sur le fût est calculée par :

$$W_{fût} = C_{t,\lambda} \sum q_{k,h} S_{t,h}$$

Relation dans laquelle :

$C_{t,\lambda}$: coefficient global de traînée pour un fût de dimension finie : $C_{t,\lambda} = C_{t,\infty} \cdot \psi_\lambda$,

$q_{k,h}$: pression dynamique de base caractéristique corrigée par les différents effets agissant à la hauteur h ,

$S_{t,h}$: différentiel de surface du maître-couple à la hauteur h .

– Pour obtenir $C_{t,\lambda}$ sur un fût de section polygonale ou circulaire d'élancement fini $\lambda = H/b$, il convient de multiplier $C_{t,\infty}$ par le coefficient ψ_λ suivant :

λ	$1 \leq \lambda \leq 10$	$10 \leq \lambda \leq 100$
ψ_λ	$0,6 + 0,1 \log \lambda$	$0,45 + 0,25 \log \lambda$

Dans la relation $\lambda = H/b$, b est le diamètre sur angle à mi-hauteur.

– Le coefficient global de traînée ($C_{t,\infty}$) constant sur toute la hauteur du fût de section polygonale a pour valeurs celles définies dans le tableau ci-après (*) :

Cas	Forme de la section	$C_{t,\infty}$ (*)
I	Hexagone ($n = 6$)	1,6
II	Octogone ($n = 8$)	1,3
III	Décagone ($n = 10$)	1,3
IV	Dodécagone ($n = 12$)	0,9
V	pour $12 < n \leq 18$	0,7
VI	pour les fûts circulaires	cf. figure 2.1

(*) Ces valeurs (pour les cas I à V) ont été mesurées en soufflerie sur des corps à section polygonale, à surface lisse (acier galvanisé), à arêtes arrondies et pour Re (nombre de Reynolds) $\geq 2 \cdot 10^5$ et un élancement λ infini. Pour toute configuration différente il conviendra d'effectuer des essais ou de consulter des spécialistes.

– Dans la figure 2.1, k est la rugosité de la surface en m et b le diamètre du cylindre en m. Dans le cas de l'acier galvanisé on prend $k = 2 \cdot 10^{-4}$ m.

b) L'action sur la herse ou sur ses équipements est calculée par :

$$W_{herse \text{ et équipements}} = \sum C_t q_{k,h} S_{ref,h}$$

Relation dans laquelle :

C_t : coefficient global de traînée de la herse ou de ses équipements,

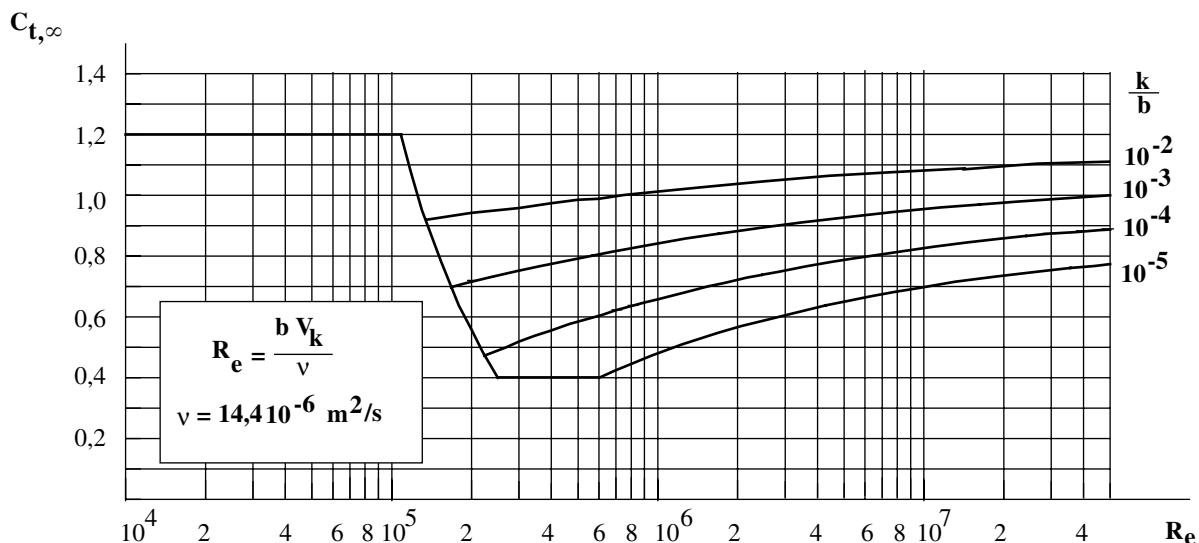


Fig. 2.1 – Coefficient global de traînée $C_{t,\infty}$ sur un cylindre circulaire d'élancement $\lambda = \infty$ pour différents rapports k/b

$q_{k,h}$ pression dynamique de base caractéristique corrigée des différents effets agissant à la hauteur h du centre de gravité géométrique de la herse,

$S_{ref,h}$ surface du maître-couple (surface totale moins les vides).

Les coefficients de traînée (C_f) sont évalués comme suit :

- Selon les valeurs spécifiées par les fabricants de projecteurs. Par défaut, ils sont pris égaux à 1,3 pour le vent de face et 1,0 pour le vent arrière.
- Selon les Règles NV 65 – Annexe 9 pour le calcul des C_f applicables sur les éléments de forme non polygonale (plates-formes, traverses, montants de herse en tubes ronds, échelles, etc.).

Le mât équipé est vérifié pour une exposition des équipements au vent arrière et au vent de face.

c) Action dynamique :

Pour tenir compte de l'amplification de l'action du vent exercée sur le mât due à la réponse dynamique de ce dernier, les pressions dynamiques servant au calcul de l'action d'ensemble sont à multiplier, à chaque niveau, par un coefficient de majoration dynamique β donné par la formule :

$$\beta = 1 + \xi \tau$$

ξ est le coefficient de réponse donné en fonction de la période T (en secondes) du mode fondamental d'oscillation du mât par le tableau ci-dessous :

T (s)	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	≥ 6
ξ	0,75	1,31	1,80	2,20	2,50	2,75	2,90	3,08	3,19	3,25	3,29	3,30

τ est le coefficient de pulsation donné en fonction du niveau h (en mètres) considéré par le tableau ci-dessous :

h (m)	≤ 10	20	30	40	50
τ	0,36	0,344	0,330	0,315	0,300
h (m)	60	70	80	90	100
τ	0,285	0,271	0,260	0,250	0,240

2,15. – Séisme (E)

La nécessité d'une protection sismique, lorsque prévue au cahier des charges du projet, doit être définie par référence au Décret n° 91-461 du 14 mai 1991 relatif à la prévention du risque sismique. Les mâts d'éclairage sont considérés comme des équipements de catégorie dite « à risque normal ». Les calculs sismiques se font conformément à la norme NF P 06-013, « Règles de construction parasismique – Règles PS applicables aux bâtiments », dites Règles PS92 ».

2,16. – Action de fatigue (F)

Les actions de fatigue à prendre en considération dans la vérification de la résistance en fatigue des mâts d'éclairage sont définies au chapitre 7.

2,2. – Définition des combinaisons d'actions et des coefficients partiels de sécurité

2,21. – Combinaisons d'actions aux états limites ultimes

- (1) Pour la détermination des actions d'ensemble exercées sur un mât d'éclairage on ne considère pas les actions simultanées des charges variables (neige, vent, entretien). Les charges variables sont exclusives.
- (2) Situations de projet durables et transitoires
 - a) Ces situations de projet correspondent aux :
 - Situations durables relatives aux conditions normales d'usage et d'entretien des mâts d'éclairage.
 - Situations transitoires dues, par exemple, au montage des mâts d'éclairage.
 - b) Les combinaisons fondamentales d'actions aux états limites ultimes à prendre en considération sont (Q désignant les charges d'entretien ou les charges variables en situation transitoire) :

$$1,35 G + 1,5 Q$$

$$1,35 G + 1,5 S$$

$$1,35 G + 1,5 W$$

W est l'action de vent caractéristique corrigée par les différents facteurs affectant cette action (cf. §. 2,14).

- c) L'observation des instructions de montage des mâts permet de s'assurer que les charges variables en situations transitoires ne sont pas dépassées.
- (3) Situations de projet accidentelles :
 - a) Les situations de projet accidentelles comprennent essentiellement la présence d'une action sismique.
 - b) La combinaison d'actions résultant de ces situations de projet accidentelles à prendre en considération est :

$$G + E$$

2,22. – Combinaison d'actions aux états limites de service

- (1) La combinaison d'actions aux états limites de service est donnée par :

$$G + W$$

2,23. – Définition des coefficients partiels de sécurité et des coefficients d'accompagnement

- (1) Les coefficients partiels de sécurité appliqués aux résistances (γ_M) sont donnés, lorsque nécessaire, dans chaque paragraphe concerné.
- (2) Les coefficients d'accompagnement relatifs aux actions d'accompagnement (essentiellement ψ_0 et ψ_1) sont intégrés dans les combinaisons d'actions données précédemment.

3. – MATÉRIAUX

3.1. – Généralités

- (1) Ce chapitre définit les normes de référence des matériaux et produits de construction des mâts d'éclairage.
- (2) Les valeurs des propriétés des matériaux (en particulier les caractéristiques mécaniques) à prendre en compte dans les calculs sont celles définies dans les normes de produits aciers. La résistance à la traction f_u est prise égale à la limite inférieure des valeurs «de fourchette» spécifiées par les normes.

3.2. – Propriétés des aciers de construction des mâts

- (1) Les propriétés des aciers auxquelles se réfèrent les présentes Recommandations sont celles définies dans les normes suivantes :

NF EN 10025 Produits laminés à chaud en aciers de construction non alliés – Conditions techniques de livraison.

NF EN 10113 Produits laminés à chaud en aciers de construction soudables à grains fins.

Partie 1 : Conditions générales de livraison.

Partie 2 : Conditions de livraison des aciers à l'état normalisé/laminage normalisant.

Partie 3 : Conditions de livraison des aciers obtenus par laminage thermomécanique.

NF EN 10149 Produits plats laminés à chaud en aciers à haute limite d'élasticité pour formage à froid.

Partie 1 : Conditions générales de livraison

Partie 2 : Conditions de livraison des aciers obtenus par laminage thermomécanique.

Partie 3 : Conditions de livraison des aciers à l'état normalisé ou laminage normalisant.

- (2) Les propriétés caractéristiques de calcul sont celles définies dans le tableau ci-dessous. Elles correspondent aux valeurs indiquées dans les normes citées à la date de parution des présentes Recommandations.

3.3. – Propriétés des vis, écrous et rondelles

- (1) Les vis, écrous et rondelles doivent être conformes aux normes suivantes :

NF EN 898-1 Caractéristiques mécaniques des éléments de fixation en acier ou carbone et en acier allié – Partie 1 : Boulons, vis et goujons.

NF EN 20898-2 Caractéristiques mécaniques des éléments de fixation – Partie 2 : Écrous avec charge d'épreuve spécifiée – Filetage à pas gros.

NF EN 24014 Éléments de fixation – Vis à tête hexagonale partiellement filetées – Grades A et B.

NF EN 24016 Éléments de fixation – Vis à tête hexagonale partiellement filetées – Grade C.

Valeurs spécifiées de la limite d'élasticité f_y et de la résistance à la traction f_u des aciers de construction conformes aux normes NF EN 10025, NF EN 10113, NF EN 10149										
Désignation des aciers	$3 \leq t \leq 16$ mm		$16 \text{ mm} < t \leq 40$ mm		$40 \text{ mm} < t \leq 63$ mm		$63 \text{ mm} < t \leq 80$ mm		$80 \text{ mm} < t \leq 100$ mm	
	f_y (N/mm ²)	f_u (N/mm ²)	f_y (N/mm ²)	f_u (N/mm ²)	f_y (N/mm ²)	f_u (N/mm ²)	f_y (N/mm ²)	f_u (N/mm ²)	f_y (N/mm ²)	f_u (N/mm ²)
NF EN 10025										
S235	235	340	225	340	215	340	215	340	215	340
S275	275	410	265	410	255	410	245	410	235	410
S355	355	490	345	490	335	490	325	490	315	490
NF EN 10113-2										
S275N	275	370	265	370	255	370	245	370	235	370
S355N	355	470	345	470	335	470	325	470	315	470
NF EN 10113-3										
S275M	275	360	265	360	255	360				
S355M	355	450	345	450	335	450				
NF EN 10149-2										
S315MC	315	390								
S355MC	355	430								

- NF EN 24017 Éléments de fixation – Vis à tête hexagonale entièrement filetées – Grades A et B.
- NF EN 24018 Éléments de fixation – Vis à tête hexagonale entièrement filetées – Grade C.
- NF EN 24032 Éléments de fixation – Écrous hexagonaux, style 1 – Grades A et B.
- NF EN 24033 Éléments de fixation – Écrous hexagonaux, style 2 – Grades A et B.
- NF EN 24034 Éléments de fixation – Écrous hexagonaux – Grade C.
- NF E 25-513 Rondelles plates – Grade C.

- (2) Les valeurs nominales de la limite d'élasticité f_{yb} ainsi que de la résistance à la traction f_{ub} sont données dans le tableau ci-dessous :

Classe	4.6	4.8	5.6	5.8	6.6	6.8	8.8	10.9
f_{yb} (N/mm ²)	240	320	300	400	360	480	640	900
f_{ub} (N/mm ²)	400	400	500	500	600	600	800	1000

3.4. – Propriétés des aciers pour tiges d'ancrage

- (1) Les tiges d'ancrage sont constituées de barres ou de fils lisses ou à haute adhérence filetés en bout.
- (2) Les normes de référence des aciers des tiges d'ancrage sont données ci-après :
- Ronds lisses :
NF EN 10025 Produits laminés à chaud en aciers de construction non alliés – Conditions techniques de livraison.
 - Barres à haute adhérence :
XP ENV 10080 Acier pour l'armature du béton – Armatures pour béton armé soudables à verrous B500 – Conditions techniques de livraison pour les barres, les couronnes et les treillis soudés.
- (3) Les valeurs spécifiées de la limite d'élasticité f_y en N/mm² sont données dans le tableau ci-dessous :

3.5. – Produits d'apport de soudage

- (1) Les valeurs spécifiées de la limite d'élasticité, de la résistance à la traction, de l'allongement à la rupture et

de l'énergie minimale de rupture de l'éprouvette Charpy V du métal d'apport doivent toutes être égales ou supérieures aux valeurs correspondantes spécifiées pour la nuance d'acier à souder.

- (2) Les produits d'apport de soudage doivent être conformes aux normes suivantes :

NF EN 439 Produits consommables pour le soudage – Gaz de protection pour le soudage et le coupage à l'arc

NF EN 1597 Produits consommables pour le soudage – Méthodes d'essai

Partie 1 : assemblage d'essai d'éprouvettes prélevées dans le métal fondu hors dilution pour le soudage de l'acier, du nickel et des alliages de nickel

Partie 2 : préparation de l'assemblage d'essai pour la réalisation d'éprouvettes de soudage en une ou deux passes, en acier

Partie 3 : évaluation de l'aptitude des produits consommables à la réalisation de soudures d'angle en position

NF EN 759 Produits consommables pour le soudage – Conditions techniques de livraison des métaux d'apport pour le soudage – Type de produit, dimensions, tolérances et marquage

NF EN 499 Produits consommables pour le soudage – Électrodes enrobées pour le soudage manuel à l'arc des aciers non alliés et des aciers à grains fins – Classification

NF EN 440 Produits consommables pour le soudage – Fils électrodes et dépôts pour le soudage à l'arc sous gaz des aciers non alliés et des aciers à grain fin – Classification

NF EN 756 Produits consommables pour le soudage – Fils-électrodes et couples fils-flux pour le soudage à l'arc sous flux des aciers non alliés et à grains fins – Classification

NF EN 760 Produits consommables pour le soudage – Flux pour le soudage à l'arc sous flux – Classification

NF A 81-322 Soudage à l'arc sous flux en poudre – Couples fils électrodes métalliques nus massifs/flux en poudre déposant un acier non allié ou contenant de faibles quantités d'éléments d'addition – Symbolisation – Spécifications – Essais.

NF EN 757 Produits consommables pour le soudage – Électrodes enrobées pour le soudage manuel à l'arc des aciers à haute résistance – Classification

	Ronds lisses (NF EN 10025)						Barres à haute adhérence (XP ENV 10080)	
Nuances	S 235		S 275		S 355		B 500A	B 500B
Épaisseur mm	≤ 16	16 < t ≤ 40	≤ 16	16 < t ≤ 40	≤ 16	16 < t ≤ 40	6 à 16	6 à 40
f_y (N/mm ²)	235	225	275	265	355	345	500	500

NF EN 758 Produits consommables pour le soudage – Fils fourrés pour le soudage à l'arc avec ou sans protection gazeuse des aciers non alliés et à grains fins – Classification

NF EN 12535 Produits consommables pour le soudage – Fils fourrés pour le soudage à l'arc sous protection gazeuse des aciers à haute résistance – Classification

3,6. – Galvanisation

- (1) Les normes françaises suivantes sont applicables :

NF EN ISO 1461 Revêtements par galvanisation à chaud sur produits finis ferreux – Spécifications et méthodes d'essai

NF A 35-503 Aciers pour galvanisation par immersion à chaud.

3,7. – Classe de résistance du béton de fondation

- (1) Les présentes Recommandations sont basées sur la résistance caractéristique à la compression d'un cylindre, f_{ck} , mesurée après 28 jours de séchage.

- (2) La résistance f_{ck} doit être d'au moins 20 N/mm².

- (3) Les calculs de résistance sont fondés sur une résistance du béton de classe C20/25 correspondant à une valeur de $f_{ck} = 20$ N/mm². Les valeurs de résistances caractéristiques sont données ci-après :

- résistance caractéristique à la compression :

$$f_{ck} = 20 \text{ N/mm}^2$$

- résistance caractéristique à la traction :

$$f_{tk} = 1,5 \text{ N/mm}^2$$

3,8. – Propriétés générales

- (1) Pour les aciers couverts par les présentes Recommandations, on doit prendre en compte dans les calculs les valeurs des caractéristiques suivantes :

- module d'élasticité longitudinale : $E = 210\,000$ N/mm²

- module de cisaillement : $G = E/[2(1 + \nu)]$

- coefficient de Poisson : $\nu = 0,3$

- masse volumique : $\rho = 7\,850$ kg/m³

4. – ÉTATS LIMITES DE SERVICE

- (1) Les mâts d'éclairage doivent être dimensionnés de manière à ce que les flèches calculées sous les charges de service restent dans les limites précisées par le client dans le cahier des charges du projet.

- (2) À défaut d'une définition des flèches calculées admissibles on prend, à l'état limite de service, la valeur limite de la flèche horizontale suivante :

$$\delta_{lim.ELS} = 0,05 H$$

H est la distance entre le pied de mât et le centre d'éclairage.

- (3) Le calcul de la flèche horizontale à l'état limite de service sous l'action du vent caractéristique W_k corrigée par les différents effets peut s'effectuer sur la base des hypothèses d'un comportement élastique au premier ordre du mât d'éclairage.

- (4) Si un calcul au second ordre prouve, à l'ELU, qu'on a la flèche $\delta_{max.ELU} \leq 0,075 H$, la limite donnée à la clause 4 (2) est automatiquement non dépassée.

5. – ÉTATS LIMITES ULTIMES

5,1. – Bases de calcul

5,11. – Exigences de calcul

- (1) On doit effectuer les vérifications de résistance énumérées en 5,12 (1).

- (2) Ces vérifications doivent être effectuées sous les combinaisons d'actions définies au Chapitre 2 pour la vérification aux états limites ultimes. Toutes les situations de projet et tous les cas de charge à prévoir pour la structure doivent être considérés, les calculs pouvant n'être conduits que pour les combinaisons les plus déterminantes.

5,12. – Vérifications d'états limites ultimes à effectuer

- (1) Les vérifications suivantes doivent être effectuées :

- Stabilité globale (cf. § 5,2).
- Résistance des sections transversales du fût et de la crosse éventuelle (cf. § 5,3).
- Résistance du cadre de l'ouverture (cf. § 5,4).
- Résistance des assemblages par emboîtement (cf. § 6,4).
- Résistance des soudures (cf. § 6,3).
- Résistance de l'ancrage (cf. § 6,2 et § 6,5).
- Résistance à la fatigue (cf. chap. 7).

- (3) On considère que, pour le type de structures particulier visé dans ces Recommandations, les contraintes d'effort normal de compression sont suffisamment faibles pour ne pas avoir à vérifier la résistance au flambement du fût.

5.13. – Principe des vérifications aux états limites ultimes

- (1) Au cours des vérifications aux états limites ultimes, on doit s'assurer, d'une manière générale, que :

$$S_d \leq R_d$$

où S_d : valeur de calcul d'une sollicitation ou d'une combinaison de sollicitations (voir paragraphe 5.2 pour le calcul des sollicitations),

et R_d : résistance de calcul correspondant à l'état limite ultime considéré.

- (2) La résistance de calcul R_d est obtenue par :

$$R_d = R_k / \gamma_M$$

où R_k : valeur caractéristique de la résistance,

et γ_M : coefficient partiel de sécurité qui s'applique à cette résistance.

R_k est déterminée, en général, à partir des valeurs caractéristiques des propriétés du matériau et des données géométriques nominales des sections et de la structure.

- (6) Le coefficient partiel de sécurité utilisé dans les vérifications de résistance des sections et des éléments est pris égal à :

$$\gamma_M = 1,05$$

- (7) La valeur de calcul R_d peut être également déterminée par des essais. Des orientations sont données à ce sujet au Chapitre 8 de la norme P 22-311.

5.2. – Calcul des sollicitations

5.21. – Analyse globale

- (1) Les sollicitations agissant dans toute section transversale de la structure doivent être déterminées par une analyse globale élastique prenant en compte les effets du second ordre. En effet, bien que la compression axiale du fût soit, en général, relativement faible, la grande déformabilité du pylône peut introduire des effets du second ordre non négligeables.
- (2) L'analyse de la structure est réalisée en considérant les caractéristiques de section brute des sections transversales.

5.22. – Imperfection globale de structure

- (1) Étant donné la prédominance des effets horizontaux dus au vent, il n'est pas nécessaire de prendre en considération une imperfection globale d'aplomb de la structure ni d'imperfection d'élément dans l'analyse globale.

5.23. – Stabilité globale

- (1) La stabilité globale est assurée dès lors qu'il est possible de conduire à bon terme l'analyse globale de la structure,

c'est-à-dire si l'état d'équilibre (sollicitations et déplacements) de la structure sous les charges de calcul peut être déterminé.

5.3. – Vérification de la résistance des sections transversales

5.31. – Bases de calcul

- (1) Étant donné la spécificité des mâts d'éclairage visés dans ces Recommandations, il est considéré, dans ce § 5.3, que la sollicitation dimensionnante est la flexion, celle-ci étant largement prépondérante sur la compression axiale dans les combinaisons déterminantes étudiées. De ce fait, un certain nombre d'hypothèses simplificatrices ont été adoptées.
- (2) Le calcul des contraintes et les vérifications de résistance doivent être effectués aux points singuliers suivants :
- niveau du sol,
 - niveau bas de l'ouverture,
 - jonction fût-crosse,
 - tout changement brutal de section (épaisseur, diamètre ...).

De plus, compte tenu de la variation de la résistance et des sollicitations sur la hauteur des mâts, ces calculs devront être faits dans un nombre suffisant de sections (tous les trentièmes de hauteur au minimum) permettant de vérifier la section la plus défavorable.

5.32. – Caractéristiques des sections transversales brutes

- (1) Dans le calcul des caractéristiques des sections transversales, les épaisseurs sont considérées très petites par rapport aux diamètres.
- (2) La norme EN 40 : Candélabres d'éclairage public et méthode de vérification par le calcul, donne des indications sur le calcul des caractéristiques de sections brutes octogonales ou circulaires, avec ou sans ouverture ou renfort.

5.33. – Classification des sections transversales

- (1) Les sections transversales totalement ou partiellement comprimées sont classées en fonction du risque de voilement local. Par analogie avec la norme P 22-311, on définit la classification suivante :

a) Classes 1, 2 et 3, toutes assimilées ici à la Classe 3

Sections transversales dont la minceur de la paroi permet de compter sur la résistance élastique de la section complète.

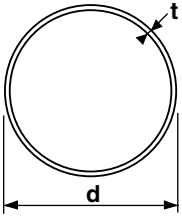
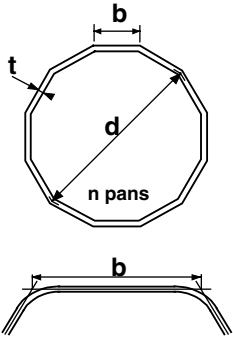
b) Classe 4

Sections transversales dont la minceur de la paroi est telle que la résistance élastique de la section complète ne peut être atteinte à cause du voilement local. La résistance est dans ce cas déterminée par des méthodes spécifiques.

- (2) Les critères de classement des sections transversales circulaires ou polygonales des grands mâts d'éclairage sont donnés dans le tableau 5.1.

TABLEAU 5.1

Classification des sections tubulaires fléchies

Type de section	Condition de Classe 4
	$d/t > 176 \epsilon^2$
	Pour $n = 6, 8, 12, 16$ et 18 $b/t > 42 \epsilon$
avec $\epsilon = (235/f_y)^{0,5}$ f_y en N/mm ²	

5,34. – Résistance des sections transversales circulaires sans ouverture, sous flexion prépondérante

La résistance d'une section transversale circulaire sans ouverture sous l'action d'un moment fléchissant prépondérant (cf. § 5,31(1)) est assurée si la contrainte longitudinale maximale $\sigma_{x,Ed}$ de calcul (intégrant l'effet de l'effort axial concomitant), déterminée sur la section brute, satisfait à la condition :

$$\sigma_{x,Ed} \leq \rho f_y / \gamma_M$$

avec :

Section de Classe 3 $\rho = 1$

Section de Classe 4 $\rho = 0,70 + \frac{53\epsilon^2}{d/t} \leq 1$

La figure 5.1 permet de déterminer directement le coefficient de réduction ρ en fonction de d/t pour les deux nuances d'acier les plus utilisées.

5,35. – Résistance des sections transversales polygonales sans ouverture, sous flexion prépondérante

a) Sections de Classe 3

La résistance d'une section transversale polygonale sans ouverture de Classe 3 est assurée si la contrainte longitudinale maximale $\sigma_{x,Ed}$ de calcul, déterminée sur la section brute en présence du moment fléchissant de calcul et de l'effort axial concomitant, satisfait à la condition :

$$\sigma_{x,Ed} \leq f_y / \gamma_M$$

b) Sections de Classe 4

- (1) La résistance d'une section transversale polygonale est basée sur la résistance élastique de la partie efficace de cette section, c'est-à-dire la section restant après déduction des parties susceptibles de voiler.

La section efficace est composée des largeurs efficaces de chaque pan de la section polygonale. La largeur efficace d'un pan est fonction du niveau et du diagramme des contraintes dans ce pan, celui-ci étant supposé bi-appuyé.

Le tableau 5.2 permet de déterminer les largeurs efficaces de parois planes partiellement ou totalement comprimées, dans le cas d'une variation linéaire des contraintes le long de la paroi.

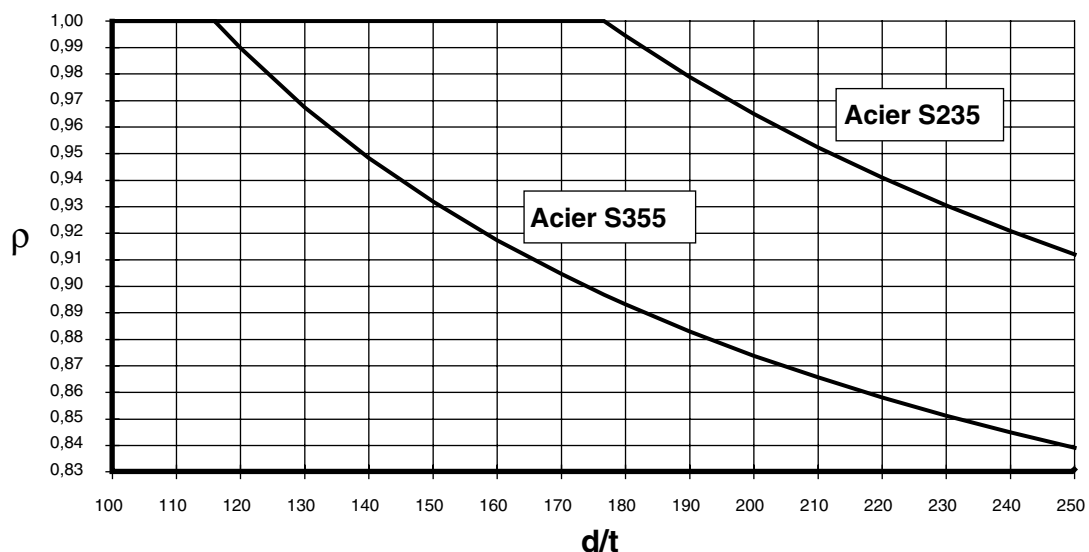

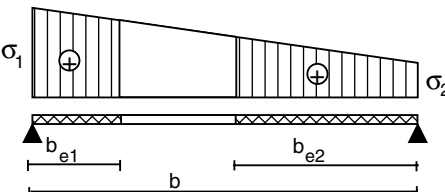
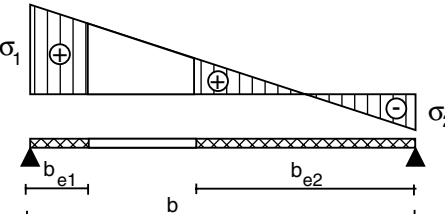


Fig. 5.1

TABLEAU 5.2
Parois partiellement ou totalement comprimées

Distribution de contraintes (compression positive)				Largeur efficace b_{eff} totale de la paroi		
				$\psi = +1 :$ $b_{eff} = \rho b$ $b_{e1} = 0,5 b_{eff}$ $b_{e2} = 0,5 b_{eff}$		
				$0 < \psi < 1 :$ $b_{eff} = \rho b$ $b_{e1} = \frac{2 b_{eff}}{5 - \psi}$ $b_{e2} = b_{eff} - b_{e1}$		
				$\psi \leq 0 :$ $b_{eff} = \frac{\rho - \psi}{1 - \psi} b$ $b_{e1} = 0,4 \left(b_{eff} + \frac{\psi}{1 - \psi} b \right)$ $b_{e2} = b_{eff} - b_{e1}$		
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	+ 1	$1 > \psi > 0$	0	$0 > \psi > -1$	- 1	$-1 > \psi > -2$
k_σ	4,0	$\frac{8,2}{1,05 + \psi}$	7,81	$7,81 - 6,29 \psi + 9,78 \psi^2$	23,9	$5,98 (1 - \psi)^2$
Alternativement, pour $1 \geq \psi \geq -1 :$ $k_\sigma = \frac{16}{[(1 + \psi)^2 + 0,112 (1 - \psi)^2]^{0,5} + (1 + \psi)}$						

- (2) De façon approchée et sécuritaire, le coefficient de réduction ρ intervenant dans le calcul des largeurs efficaces du tableau 5.2 peut être obtenu de la manière suivante :

lorsque $\bar{\lambda}_p \leq 0,673 :$ $\rho = 1$

lorsque $\bar{\lambda}_p > 0,673 :$ $\rho = (\bar{\lambda}_p - 0,22) / \bar{\lambda}_p^2$

où $\bar{\lambda}_p$ est l'élancement de la paroi, donné par :

$$\bar{\lambda}_p = [f_y / \sigma_{cr}]^{0,5} \quad \text{avec} \quad \sigma_{cr} = k_\sigma \frac{\pi^2 E}{12 (1 - \nu^2)} \left(\frac{t}{b} \right)^2$$

soit $\bar{\lambda}_p = \frac{b/t}{28,4 \varepsilon \sqrt{k_\sigma}}$ ε défini dans le tableau 5.1

où t : épaisseur de la paroi,

σ_{cr} : contrainte critique de voilement élastique,

k_σ : coefficient de voilement correspondant au rapport de contraintes ψ , tiré du tableau 5.2,

et b : largeur de paroi à considérer, (largeur d'épure du pan, voir tableau 5.2).

Dans l'Annexe A, les abaques A1 permettent une détermination rapide de b_{eff} .

- (3) En vue d'une meilleure économie, l'élancement $\bar{\lambda}_p$ d'une paroi peut être calculé en utilisant la contrainte maximale de compression $\sigma_{com.Ed}$ dans cette paroi à la place de la limite d'élasticité f_y , à condition que $\sigma_{com.Ed}$ soit déterminée en utilisant les largeurs efficaces b_{eff} de toutes les parois comprimées de la section. Cette procédure exige, en général, un calcul itératif au cours duquel ψ est redéterminé à chaque pas à partir des contraintes calculées sur la section efficace obtenue à la fin du pas précédent.

- (4) La résistance d'une section transversale polygonale sans ouverture, de Classe 4 et soumise à une flexion prépondérante (cf. § 5.31 (1)), est assurée si la condition suivante est satisfaite :

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

où A_{eff} : aire efficace de la section transversale supposée soumise à une contrainte de compression uniforme f_y . Les largeurs efficaces de tous les pans de la section polygonale sont, dans ce cas, identiques.

W_{eff} : module élastique de la section efficace, la section transversale étant supposée soumise uniquement à un moment fléchissant conduisant, sur la section efficace, à une contrainte maximale de compression égale à f_y .

L'Annexe A donne des abaques permettant une détermination rapide de A_{eff} et W_{eff} pour des sections polygonales sans ouverture.

5,36. – Résistance des sections transversales avec ouverture

- (1) On admet que les méthodes énoncées dans les clauses 5,32 à 5,34 sont également applicables à des sections avec ouverture. Le moment de flexion de calcul doit intégrer le moment secondaire dû à l'effort axial en présence du décalage de centre de gravité entre les sections brutes avec et sans ouverture.

5,4. – Résistance du cadre d'ouverture ou des renforts

5,41. – Bases de calcul

- (1) On admet que les montants du cadre d'ouverture, ou les renforts, sont essentiellement soumis à des efforts verticaux de compression dus à la flexion d'ensemble du fût et, dans une moindre mesure, à sa compression globale. La compression est maximale lorsque le moment de flexion maximal agit autour de l'axe yy .
- (2) Les montants verticaux du cadre, ou les renforts, doivent être vérifiés vis-à-vis du flambement en compression simple suivant la direction zz (cf. fig. 5.3 pour un cadre) ou radiale (pour les renforts). On admet que le flambement dans la direction orthogonale à cette direction n'est pas à craindre dans la mesure où la fixation sur la paroi du fût est effective sur toute la hauteur des montants ou des renforts. Des cordons de soudure discontinus éventuels seront conformes au § 6,622 de la norme P 22-311.

- (3) L'effort tranchant dans le fût conduisant en général à des contraintes relativement faibles, aucune vérification concernant le cisaillement de l'ouverture n'est exigée.

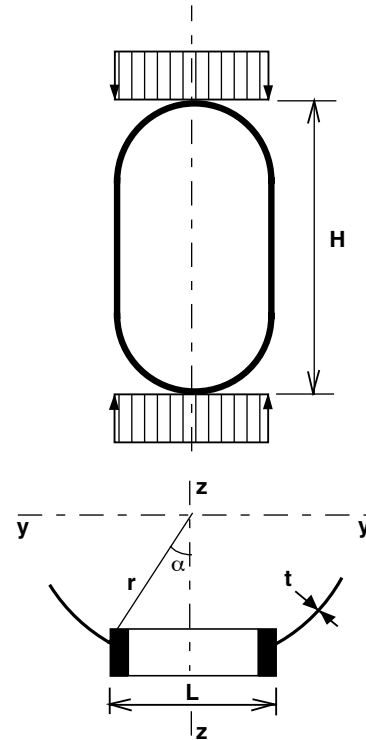


Fig. 5.3

5,42. – Flambement des montants d'un cadre

- (1) Les montants verticaux du cadre doivent être vérifiés vis-à-vis du flambement en compression simple suivant la direction zz avec une longueur de flambement l_y prise égale à 0,9 fois la hauteur totale H du cadre.
- (2) Soit $\sigma_{com,Ed}$ la contrainte de compression maximale déterminée dans les montants en considérant la section

TABLEAU 5.3
Caractéristiques de section efficace

A_{eff} en compression simple	W_{eff} en flexion simple

avec son ouverture et soumise aux sollicitations de calcul. La résistance des montants de cadre en compression est assurée si :

$$\sigma_{com.Ed} \leq \chi f_y / \gamma_M$$

avec :

$$\chi = \frac{1}{\phi + [\phi^2 - \bar{\lambda}^2]^{0.5}} \leq 1$$

où :

$$\phi = 0,5 [1 + \alpha (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2]$$

et :

$$\alpha = 0,49 \text{ (facteur d'imperfection, courbe } c \text{ de la norme P 22-311)}$$

$$\bar{\lambda} = \lambda / \lambda_1$$

$$\lambda = l_y / i_y$$

i_y : rayon de giration du montant

l_y : longueur de flambement du montant (cf. § 5,42 (1))

$$\lambda_1 = \pi [E/f_y]^{0.5} = 93,9 \text{ } \epsilon$$

$$\epsilon = [235/f_y]^{0.5} \quad (f_y \text{ en N/mm}^2)$$

5,43. – Flambement de renforts

- (1) Dans le cas de renforts, ceux-ci devront déborder en haut et en bas d'une longueur égale ou supérieure à 0,6 fois la largeur L de l'ouverture.
- (2) Ces renforts doivent être vérifiés vis-à-vis du flambement en compression simple suivant la direction perpendiculaire à la paroi avec une longueur de flambement prise égale à 0,5 fois la hauteur H de l'ouverture.
- (3) Pour le calcul des caractéristiques de section d'un renfort, on pourra lui associer, de chaque côté et sur toute sa hauteur, une largeur constante de paroi d'au maximum 15 fois l'épaisseur de celle-ci, limitée, du côté de l'ouverture, à la plus petite largeur disponible.
- (4) La procédure de vérification de la résistance au flambement est identique à celle explicitée en 5,42 (2) pour les montants de cadre.

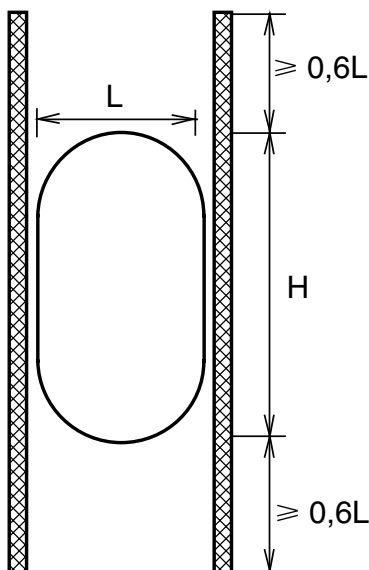


Fig. 5.4

6. – RÉSISTANCE DES ASSEMBLAGES ET JOINTS

6.1. – Résistance des boulons

- (1) L'usage de rondelles n'est pas exigé pour les boulons non précontraints, sauf mention contraire dans le cahier des charges du projet, et sauf lorsque la surface a une pente de plus de 3 degrés par rapport à un plan perpendiculaire à l'axe du boulon de diamètre d . Il faut, dans ce dernier cas, prévoir une rondelle biaisée.
- (2) Les diamètres des trous normaux doivent être les suivants :
 - $d_0 \leq (d + 1)$ mm pour les boulons M12 et M14,
 - $d_0 \leq (d + 2)$ mm pour les boulons M16 à M24,
 - $d_0 \leq (d + 3)$ mm pour les boulons M27 et au-dessus.
- (3) Des trous à jeu nominal de 2 mm peuvent également être spécifiés pour des boulons M12 et M14, à condition que le calcul soit conforme aux exigences énoncées en 6,1 (6).
- (4) Le positionnement des trous des boulons doit satisfaire le tableau ci-dessous :

Désignation des pinces et entraxes				Assemblage	
				Plat extérieur et plat intérieur	
Pince longitudinale e_1		\geq	\leq	$1,5 d_0$	$\max (12 t; 150 \text{ mm})$
Pince longitudinale e_2		\geq	\leq	$1,5 d_0$	$\max (12 t; 150 \text{ mm})$
Entraxe p_1	élément comprimé	file extérieure	\geq	$3 d_0$	$\min (14 t; 200 \text{ mm})$
		file intérieure	\leq	$3 d_0$	$\min (14 t; 200 \text{ mm})$
	élément tendu	file extérieure	\geq	$3 d_0$	$\min (14 t; 200 \text{ mm})$
		file intérieure	\leq	$3 d_0$	$\min (28 t; 400 \text{ mm})$
Entraxe p_2	élément comprimé		\geq	$3 d_0$	$\min (14 t; 200 \text{ mm})$
	élément tendu		\geq	$3 d_0$	

d_0 : diamètre du trou ; t : épaisseur du plat le plus mince

- (5) Les assemblages sollicités en cisaillement seront de catégorie A, c'est-à-dire des assemblages travaillant à la pression diamétrale.
- (6) Les résistances de calcul des boulons seront conformes aux règles suivantes :
 - À l'état limite ultime, l'effort de cisaillement $F_{v, Sd}$ appliqué à un boulon ne doit pas dépasser la plus petite des deux valeurs suivantes :
 - la résistance de calcul au cisaillement $F_{v, Rd}$,
 - la résistance de calcul à la pression diamétrale $F_{b, Rd}$.

Mode de résistance		Formule	Observation	γ_{Mb}
Cisaillement	Plan de cisaillement passant par la partie filetée	$F_{v,Rd} = \frac{0,6 f_{ub} A_s}{\gamma_{Mb}}$	Classes 4.6, 5.6, 6.6, 8.8	1,25
		$F_{v,Rd} = \frac{0,5 f_{ub} A_s}{\gamma_{Mb}}$	Classes 4.8, 5.8, 6.8, 10.9	1,25
	Plan de cisaillement passant par la partie non filetée	$F_{v,Rd} = \frac{0,6 f_{ub} A_s}{\gamma_{Mb}}$		1,25
Pression diamétrale		$F_{b,Rd} = \frac{2,5 \alpha f_u d t}{\gamma_{Mb}}$	avec : $\alpha = \min \left\{ \frac{e_1}{3 d_0} ; \frac{p_1}{3 d_0} - \frac{1}{4} ; \frac{f_{ub}}{f_u} ; 1,0 \right\}$	1,25
Traction		$F_{t,Rd} = \frac{0,9 f_{ub} A_s}{\gamma_{Mb}}$		1,50

- À l'état limite ultime, l'effort de traction $F_{t,Sd}$, incluant tout effort supplémentaire dû à l'effet de levier, ne doit pas dépasser la résistance de calcul en traction du boulon $F_{t,Rd}$.

Les résistances des boulons au cisaillement, à la pression diamétrale et à la traction ainsi que les coefficients partiels de sécurité à prendre en compte dans le calcul des résistances sont donnés au tableau ci-dessus.

Les boulons M12 et M14 peuvent également être utilisés dans des trous avec 2 mm de jeu, à condition que pour des boulons de classes 4.8, 5.8, 6.8 ou 10.9 la résistance de calcul au cisaillement $F_{v,Rd}$ soit prise égale à 0,85 fois la valeur donnée au tableau ci-dessus.

Les boulons soumis à des efforts combinés de cisaillement et de traction doivent, en outre, satisfaire à la condition suivante :

$$\frac{F_{v,Sd}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Sd}}{1,4 F_{t,Rd}} \leq 1$$

6.2. – Résistance des tiges d'ancrage

(a) Traction ou compression

- (1) L'effort de traction ou compression pondéré dans une tige d'ancrage ne devra pas dépasser la résistance donnée par l'expression :

$$F_{t,Rd} = F_{c,Rd} = \frac{0,9 A_s f_{ub}}{\gamma_{Mb}}$$

A_s : section résistante de la partie filetée,

γ_{Mb} : coefficient partiel de sécurité égal à 1,50,

f_{ub} : résistance à la traction spécifiée par les normes (§ 3.4).

(b) Cisaillement

- (2) L'effort de cisaillement pondéré ne devra pas dépasser la résistance au cisaillement d'une tige d'ancrage donnée par l'expression :

$$F_{v,Rd} = \frac{0,5 A_s f_{ub}}{\gamma_{Mb}}$$

γ_{Mb} : coefficient partiel de sécurité égal à 1,25.

(c) Efforts combinés de cisaillement et traction ou de cisaillement et compression

- (3) Les tiges d'ancrage soumises à des efforts combinés de cisaillement et de traction (ou de compression) doivent, en outre, satisfaire la condition suivante :

$$\frac{F_{v,Sd}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Sd}}{1,4 F_{t,Rd}} \leq 1$$

$$\left(\text{ou } \frac{F_{v,Sd}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{c,Sd}}{1,4 F_{c,Rd}} \leq 1 \right)$$

6.3. – Résistance des soudures

- (1) La résistance d'une soudure d'angle peut être considérée suffisante si, en tout point, la résultante de tous les efforts par unité de longueur transmise par la soudure ne dépasse pas sa résistance de calcul $F_{w,Rd}$.
- (3) Indépendamment de l'orientation des cordons de soudure, la résistance de calcul d'un cordon par unité de longueur $F_{w,Rd}$ est déterminée par la formule :

$$F_{w,Rd} = \frac{f_u a}{\sqrt{3} \beta_w \gamma_{Mw}}$$

a : gorge du cordon de soudure d'angle,

γ_{Mw} : coefficient partiel de sécurité donné par le tableau ci-dessous,

β_w : facteur de corrélation donné par le tableau ci-dessous.

Nuance d'acier	Résistance ultime en traction f_u en N/mm ²	Facteur de corrélation β_w	γ_{Mw}
NF EN 10025			
S 235	340	0,80	1,25
S 275	410	0,85	1,30
S 355	490	0,90	1,35
NF EN 10113			
S 275	370	0,85	1,30
S 355	470	0,90	1,35
NF EN 10149			
S 315	390	0,80	1,25
S 355	430	0,85	1,30

- (4) En alternative à la méthode indiquée ci-dessus, la résistance de calcul par unité de longueur d'une soudure d'angle peut être déterminée à partir de la méthode donnée dans l'Annexe M (Normative) de la norme P 22-311.

6.4. – Résistance de l'assemblage par emboîtement

- (1) Sauf spécification contraire définie dans le cahier des charges du projet, le raccordement entre tronçons de fût se fait par emboîtement.
- (2) L'assemblage par emboîtement ne relève pas d'une justification par note de calculs, mais par l'assurance d'une mise en oeuvre correcte de cet assemblage sur le site.
- (3) L'effort d'emboîtement doit au moins être égal à 1,35 fois la valeur de l'effort correspondant à la charge permanente de l'élément de mât d'éclairage (y compris ses équipements) situé au-dessus du tronçon de fût mâle.
- (4) Cet assemblage est défini, sur plan, avec une longueur nominale de recouvrement au moins égale à 1,5 fois le diamètre moyen maximum sur angles du tronçon femelle.
- (5) L'assemblage par emboîtement est réalisé sur chantier. Pour tenir compte des variations d'épaisseur apportées par la galvanisation et des variations dimensionnelles de la section polygonale, la longueur minimale effective d'emboîtement acceptable réalisée sur le site doit être supérieure à 1,35 fois le diamètre moyen maximum sur angles du tronçon femelle.
- (6) Sont prévus sur les tronçons de fût les dispositifs nécessaires pour assurer sur le site un emboîtement correct des tronçons de fût par vérinage ou tirefort selon la notice de montage du fournisseur.

6.5. – Résistance de l'embase et adhérence des tiges d'ancrage

- (1) Les Recommandations développées ci-après s'entendent pour une mise en oeuvre conforme à la procédure détaillée ci-dessous :
 - Pré-scellement des tiges d'ancrage dans le massif de fondation à l'aide d'un gabarit de scellement (déposé avant mise en place du mât).

– Lors de l'installation du mât d'éclairage, la plaque d'embase est montée sur les tiges, le réglage et le blocage du mât se font à l'aide des écrous situés sur et sous la semelle.

– La fondation est complétée par un bourrage au mortier de ciment sans retrait de l'espace vide entre l'arase et la face inférieure de l'embase (cf. fig. 6.1).

- (2) La distance entre le dessous de l'embase et l'arase de la fondation (h_v) doit être inférieure à 4ϕ pour éviter le risque de flambement des tiges d'ancrage, ϕ est le diamètre des tiges d'ancrage.

- (3) Dans le calcul des efforts exercés sur les tiges d'ancrage et la plaque d'embase on considère que le mât d'éclairage repose essentiellement sur les points d'appui qui constituent les tiges d'ancrage par l'intermédiaire des écrous. La surface de contact constituée par le bourrage de ciment, entre la plaque d'embase et le ciment, est négligée dans le calcul des efforts.
- (4) La distribution des efforts dans les tiges d'ancrage résultant du moment de renversement dû au vent est calculée en considérant que l'axe neutre de flexion passe par le barycentre des sections des tiges d'ancrage. En d'autres termes, on néglige la présence du mortier de bourrage.
- (5) Les efforts de traction exercés sur les tiges d'ancrage sont calculés à partir du moment de renversement seul (M_{Sd}), et les efforts de compression dans les tiges d'ancrage comprimées sont calculés sous l'action conjointe de M_{Sd} et de N_{Sd} , l'effort de compression résultant des charges permanentes du mât d'éclairage.
- (6) Les tiges d'ancrage sont vérifiées au cisaillement sous l'action de l'effort de vent exercé sur le mât d'éclairage. L'interaction entre le cisaillement et l'effort normal dans la tige d'ancrage la plus sollicitée est prise en considération conformément au § 6.2.
- (7) On s'assurera pour le transfert de l'effort tranchant par les tiges d'ancrage, en l'absence temporaire du mortier de bourrage, que celles-ci ne seront pas à même de se ruiner par l'apparition d'un mécanisme de ruine par formation de rotule plastique aux jonctions avec la plaque d'embase et avec la fondation. Cette condition conduit à vérifier que :

$$V_{Sd} \leq \frac{\phi^2}{12} \sigma_{ub} \left[n - \frac{128}{n} \left(\frac{M_{Sd}}{\pi d \phi^2 \sigma_{ub}} \right)^2 \right]$$

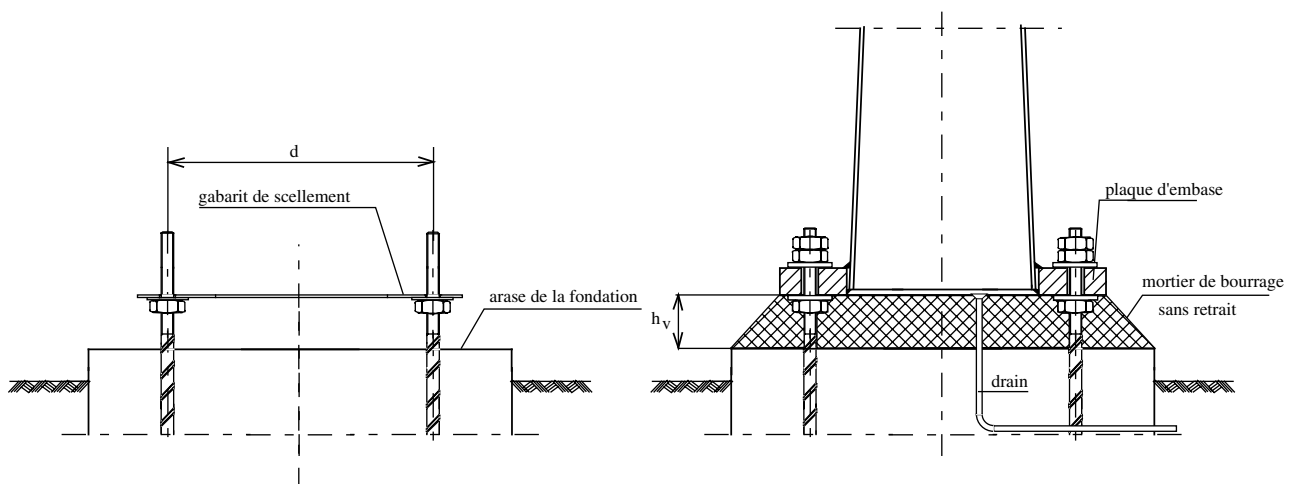


Fig. 6.1

avec :

$$\sigma_{ub} = \frac{0,9 f_{ub}}{\gamma_{Mb}}$$

- n le nombre de tiges d'ancrage,
 ϕ le diamètre de la section résistante des tiges d'ancrage,
 f_{ub} la résistance à la traction des tiges d'ancrage,
 γ_{Mb} le coefficient partiel de sécurité (= 1,25),
 d le diamètre sur lequel se positionnent les tiges d'ancrage,
 M_{Sd} le moment de renversement au niveau du plan du gabarit de scellement,
 V_{Sd} l'effort tranchant total.

(8) La plaque d'embase est vérifiée sous l'action conjointe de l'effort N_{Sd} , qui crée un effort de torsion uniformément distribué dans l'anneau de la plaque d'embase, et de l'effort de flexion M_{Sd} .

(9) Selon la rigidité et la résistance désirées, l'embase du mât peut être constituée d'une simple plaque sans raidisseur ou raidie par des goussets uniformément répartis autour du pied de mât ou, encore, d'une double plaque raidie par des goussets intermédiaires.

(10) Les résistances par adhérence des tiges d'ancrage selon les diverses dispositions sont données par les relations du tableau ci-après.

Avec :

f_{bd} : valeur de calcul de la contrainte ultime d'adhérence entre tige d'ancrage et béton en N/mm².

F_{cd} : valeur de la contrainte de calcul de la résistance en compression du béton (= f_{ck}/γ_c en N/mm², avec $\gamma_c = 1,5$).

(11) La valeur de calcul de la contrainte ultime d'adhérence est donnée par :

Rond lisse :

$$f_{bd} = \frac{0,36 \sqrt{f_{ck}}}{\gamma_c}$$

Barre à haute adhérence :

$$f_{bd} = \frac{2,25 f_{ctk\,0,05}}{\gamma_c}$$

avec $f_{ctk\,0,05} = 0,7 f_{ctm}$ et $f_{ctm} = 0,3 f_{ck}^{2/3}$

avec :

f_{ck} : valeur caractéristique de la résistance à la compression en MPa,

f_{ctm} : valeur moyenne de la résistance à la traction,

$f_{ctk\,0,05}$: valeur inférieure de la résistance caractéristique à la traction (fractile de 5 %),

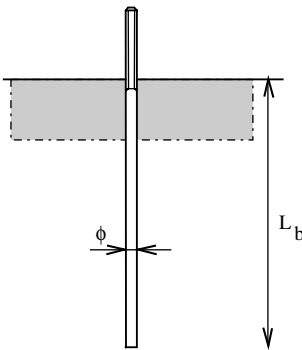
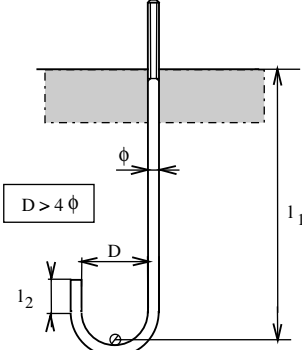
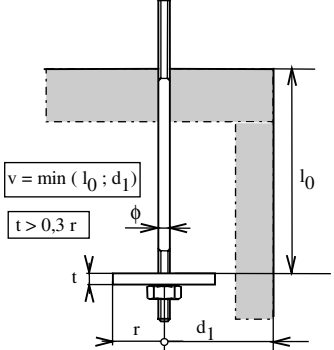
γ_c : coefficient partiel de sécurité (= 1,5).

Pour un béton de classe de résistance C20/25, le tableau ci-après donne les différentes valeurs des résistances :

	Désignation	Valeur en N/mm ²
f_{ck}	contrainte caractéristique du béton	20
f_{ctm}	contrainte moyenne de traction du béton	2,2
$f_{ctk\,0,05}$	contrainte caractéristique de traction du béton	1,55
f_{bd}	contrainte d'adhérence	
	rond lisse	1,1
	barre à haute adhérence	2,3

(12) La longueur d'ancrage nécessaire pour résister à l'effort de traction $F_{t, Sd}$ doit vérifier la relation :

$$F_{a, Rd} = \pi \phi L_b f_{bd} \geq F_{t, Sd}$$

Tige droite	Tige à crosse d'ancrage	Tige avec plaque d'ancrage
		
$F_{a, Rd} = \pi \phi L_b f_{bd}$	$F_{a, Rd} = \pi \phi L_b f_{bd}$ avec $L_b = (l_1 + 3,2 D + 3,5 l_2)$	$F_{a, Rd} = \pi \phi L_b f_{bd}$ avec $L_b = 2,55 \phi \frac{f_{cd}}{f_{bd}} \left(\frac{r^2}{\phi^2} - 0,25 \right) \left(1 - \frac{r}{v} \right) + l_0$

7. – FATIGUE

7.1. – Introduction

- (1) Les mâts, objet de ces Recommandations sont soumis à des charges variables dues au vent. Seuls les effets résultant de l'action du vent dans son plan sont à considérer pour la vérification à la fatigue. On admet que les effets du vent dans la direction perpendiculaire sont négligeables pour l'état limite de fatigue.
- (2) La norme P 22-311-9 (ENV 1993-1-1 chapitre 9 et son Document d'Application Nationale) est à appliquer. Les notations employées ici sont en conformité avec cette norme. Les présentes clauses en rappellent succinctement les principes, précisent certaines dispositions et définissent le chargement précis à considérer pour la justification (spectre de vent). Il est possible d'éviter de mener les calculs intermédiaires en utilisant les formules du § 7.6.
- (3) La présente méthode de vérification à la fatigue proposée est fondée sur des considérations théoriques et sur un spectre conventionnel de vitesse de vent.

7.2. – Coefficients de sécurité

- (1) Les coefficients partiels de sécurité γ_{Ff} et γ_{Mf} interviennent par leur produit pris égal à :

$$\gamma_{Ff}\gamma_{Mf} = 1,10$$

- (2) Il est admis de considérer $\gamma_{Ff}\gamma_{Mf} = 1,0$ dans les cas particuliers où la rupture du détail constructif considéré n'entraînerait pas la ruine du mât sous les combinaisons d'actions relatives aux états limites ultimes.
- (3) Dans les sites réputés être particulièrement sévères et exposés, notamment en bordure de littoral, sur des ponts, etc., le cahier des charges peut fixer des coefficients de sécurité plus élevés.

7.3. – Spectre de charges dues au vent pour la fatigue

- (1) Pour chaque détail étudié on considère la direction de vent la plus défavorable. Toutes les charges de vent provoquant la fatigue du détail et décrites ci-après sont supposées correspondre à cette direction.
- (2) Les charges de fatigue dues au vent sont basées sur un chargement de référence défini comme suit :

Dans le cas général, le chargement de référence résulte de l'application d'un vent de référence de période de retour 50 ans, dans la direction considérée. Ainsi les effets de ce chargement sont susceptibles d'être réalisés en moyenne une fois en 50 ans.

- (3) Le chargement de référence résulte de l'application des valeurs caractéristiques de vent (non pondérées).
- (4) Sauf justification détaillée, la variation de contrainte ΔS_{ref} produite par le vent de référence est prise égale à la contrainte produite par le chargement de référence (contraintes supposées fluctuer entre 0 et la contrainte maximale).
- (5) Pour les sections polygonales de Classe 4 (cf. chap. 5), il est admis de calculer ΔS_{ref} pour la fatigue comme si la section était pleinement efficace, de Classe 3 (emploi de W_{el} au lieu de W_{eff}).
- (6) Le spectre des variations de contrainte susceptibles de se produire pendant 50 ans, et rapportées à ΔS_{ref} , est donné à la figure 7.1. On y lit en abscisse le nombre de fois qu'est atteint ou dépassé en 50 ans le niveau ΔS de variation de contrainte rapporté à ΔS_{ref} (on désigne par r le taux $\Delta S/\Delta S_{ref}$). Le nombre total de cycles en 50 ans est de 10^9 .
- (7) Le tableau 7.1 présente l'histogramme des niveaux de variation de contraintes résultant du spectre ci-dessus avec 82 niveaux considérés. Cet histogramme associe à chacun des 82 niveaux $\Delta S_i/\Delta S_{ref}$ le nombre n_i de cycles à considérer dans l'évaluation de la résistance (cf. § 7.6).

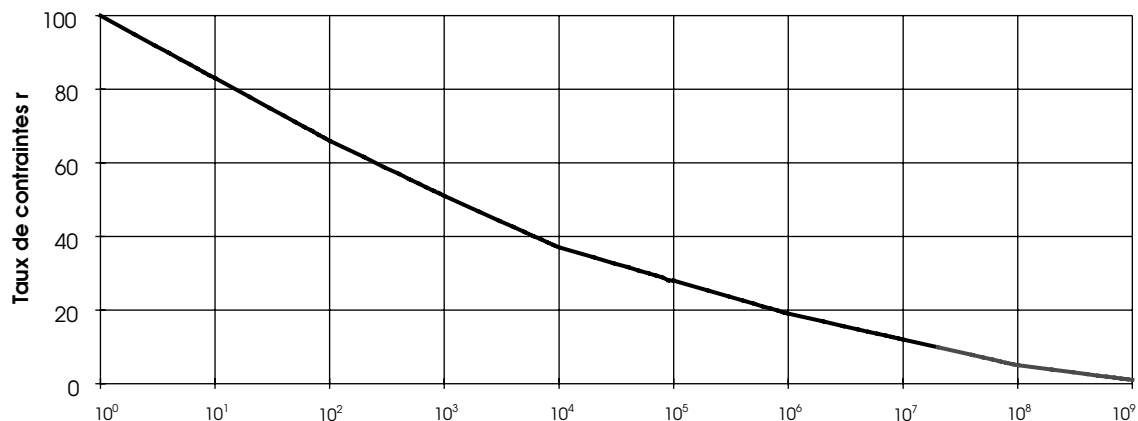


Fig. 7.1

TABLEAU 7.1

$r = \Delta S / \Delta S_{ref} (\%)$	n_i	$r = \Delta S / \Delta S_{ref} (\%)$	n_i	$r = \Delta S / \Delta S_{ref} (\%)$	n_i	$r = \Delta S / \Delta S_{ref} (\%)$	n_i
100	1	57	100	29,395	10^4	12	10^6
94,9	1	55,5	100	28,855	10^4	9,9	10^7
91,84	1	54,3	100	28,105	10^4	8,64	10^7
89,8	1	53,325	100	28	10^4	7,8	10^7
88,1	1	52,425	100	25,3	10^5	7,1	10^7
86,74	1	51,675	100	23,68	10^5	6,54	10^7
85,635	1	51	100	22,6	10^5	6,085	10^7
84,615	1	46,8	1000	21,7	10^5	5,665	10^7
83,765	1	44,28	1000	20,98	10^5	5,315	10^7
83	1	42,6	1000	20,395	10^5	5	10^7
77,9	10	41,2	1000	19,855	10^5	3,8	10^8
74,84	10	40,08	1000	19,405	10^5	3,08	10^8
72,8	10	39,17	1000	19	10^5	2,6	10^8
71,1	10	38,33	1000	16,9	10^6	2,2	10^8
69,74	10	37,63	1000	15,64	10^6	1,88	10^8
68,635	10	37	1000	14,8	10^6	1,62	10^8
67,615	10	34,3	10^4	14,1	10^6	1,38	10^8
66,765	10	32,68	10^4	13,54	10^6	1,18	10^8
66	10	31,6	10^4	13,085	10^6	1	10^8
61,5	100	30,7	10^4	12,665	10^6		
58,8	100	29,98	10^4	12,315	10^6		

- (8) Étant donné la croissance exponentielle des nombres de cycles lorsque le niveau de contraintes diminue, le calcul de résistance par cumul du dommage ne doit pas être effectué en considérant un nombre n_c , de niveaux inférieur à 80 : $n_c \geq 80$.

7.4. – Courbes de Wohler – Contraintes à considérer

La courbe de **Wohler** du détail considéré donne, pour un niveau de variation de contraintes agissantes donné, le nombre de cycles N au bout duquel le détail serait rompu s'il supportait des cycles de ce niveau. Cette courbe est associée dans le contexte de la norme P 22-311 et des présentes Recommandations à une probabilité de rupture de 5 % au plus (c'est-à-dire qu'en réalité la probabilité que le détail supporte un nombre plus grand de cycles de ce niveau est de 95 %).

7.4.1. – Détails classés

- (1) On se reportera à la norme P 22-311-9 pour l'identification d'un détail classé. On rappelle qu'un détail donné est identifié par sa géométrie, par la direction des

contraintes, et éventuellement par certains critères relatifs à sa fabrication (bombés de cordons de soudure, étendue et nature des contrôles, etc.).

- (2) Conformément à la norme P 22-311-9, les contraintes agissantes à considérer pour un détail classé sont les contraintes nominales dans les pièces, telles qu'on peut les calculer par la résistance des matériaux et à partir des prescriptions du chapitre 5; il arrive cependant qu'un détail pas tout à fait semblable à un détail classé puisse lui être assimilé à condition de remplacer ces contraintes nominales par des contraintes nominales « modifiées ».
- (3) On rappelle que la classification permet de repérer la classe du détail, c'est-à-dire sa résistance en MPa à deux millions de cycles de même étendue.
- (4) Selon le type de détail constructif de la classification, la courbe de résistance (courbe de **Wohler**) présente l'une des allures suivantes :
- a) pente $m = 3$ jusqu'à 5 millions de cycles, $m = 5$ jusqu'à 100 millions de cycles, horizontale au-delà (limite de troncature),
 - b) pente unique $m = 5$ jusqu'à 100 millions de cycles, horizontale au-delà (limite de troncature),
 - c) pente unique $m = 5$ quel que soit le nombre de cycles (pas de limite de troncature).

7,42. – Détails non classés. Méthode de calcul

- (1) Lorsque le détail constructif étudié ne figure pas dans la classification, on procède en utilisant la «méthode du point chaud»; elle consiste à évaluer les contraintes agissant sur la base de la variation de contrainte «géométrique», laquelle multiplie la variation de contrainte nominale par le coefficient de concentration de contraintes (CCC) représentant l'influence de l'accident de géométrie au point considéré (là où la fissure est susceptible de se produire : pied de cordon de soudure en général). Conformément à la norme P 22-311-9, la classe de détail à considérer sur la base de la variation de contrainte géométrique est de 90, 71 ou 36 selon les trois cas suivants :
 - a) Classe 90 : soudure pénétrée, Classe de qualité 1 selon NF P 22-471, profil du cordon contrôlé,
 - b) Classe 71 : soudure pénétrée, Classe de qualité 1 selon NF P 22-471, profil du cordon non contrôlé,
 - c) Classe 36 : autres cas, en particulier cordons de soudure avec manque de pénétration en racine.
- (2) Se reporter à la norme P 22-311-9 pour le critère de contrôle du profil du cordon de soudure.
- (3) On attire l'attention sur le caractère très défavorable et la nature forfaitaire du cas c), qui vise à éviter tout risque de fissuration en racine du cordon de soudure (dans une zone cachée, donc sans possibilité pratique de détection avant le stade débouchant de la fissure).

En réalité, l'expérience montre que ce risque n'existe pas toujours, même pour les cordons d'angle; mais seule l'expérimentation, ou le recours à des calculs de mécanique de la rupture, peut autoriser à déroger à l'application stricte des trois classes ci-dessus.

- (4) Dans cette procédure, la contrainte «géométrique» est celle qui résulte de la contrainte nominale et de l'influence de la géométrie globale du détail, à l'exclusion des phénomènes locaux tels que la présence du cordon de soudure, ou très locaux tels que les défauts de fabrication, les imperfections du cordon de soudure.
- (5) La détermination du coefficient de concentration de contraintes, par le calcul (éléments finis) ou par l'expérimentation (extensométrie sous chargement statique), repose sur la notion d'extrapolation de la contrainte au «point chaud» (le pied d'un cordon de soudure en général); elle est à conduire en collaboration avec un organisme dont la compétence en la matière est prouvée.

7,43. – Détermination expérimentale de la résistance

- (1) Au-delà de la détermination expérimentale du coefficient de concentration de contraintes évoquée au paragraphe précédent, il est loisible de déterminer expérimentalement la résistance à la fatigue intrinsèque du détail (par intrinsèque on entend indépendante de la nature du chargement), c'est-à-dire sa courbe de **Wohler**.
- (2) Il convient en premier lieu de définir la nature des contraintes qui sont retenues pour exprimer la résistance: contraintes nominales ou contraintes géométriques; dans le second cas les essais doivent prévoir l'extensométrie suffisante pour une mesure correcte de ces contraintes, selon les considérations évoquées en 7,42. et, en outre, cohérente avec la détermination éven-

tuelle de ces contraintes par le calcul (par éléments finis). A contrario, dans le premier cas, la résistance devra être rapportée aux contraintes nominales telles qu'on peut les déterminer par les calculs usuels basés sur les dimensions et caractéristiques mécaniques nominales plutôt qu'à des contraintes nominales issues de mesures.

- (3) D'une manière générale, chaque essai est effectué à un niveau de variation de contrainte constant.
- (4) Le plan d'expérimentation devra permettre de déterminer la classe de détail sur la base d'une hypothèse sur la forme de la courbe de **Wohler** (ses différentes pentes), tout en étant suffisamment varié en niveaux de contraintes pour montrer que la forme retenue n'est pas infirmée. Néanmoins il est admis de se concentrer sur la zone en deçà de 5 millions de cycles et d'admettre au-delà le changement de pente et/ou la limite de troncation à 100 millions de cycles en analysant le détail constructif par analogie avec la classification de la norme P 22-311.
- (5) Il est recommandé de mener les essais à au moins 4 niveaux de contraintes différents, avec au moins 3 essais pour au moins un des niveaux, soit un minimum absolu de 6 essais.
- (6) Pour vérification de l'hypothèse de forme retenue pour la courbe de **Wohler**, on commencera par regrouper les résultats d'un même niveau en leur moyenne, puis on calculera la droite de régression sur les points moyens ainsi obtenus, la pente de cette droite expérimentale étant à comparer aux valeurs usuelles de $m = 3$ et $m = 5$.
- (7) Une (ou plusieurs) pente de calcul étant retenue, on pourra ramener l'ensemble des points expérimentaux à des valeurs de résistance à 2 millions de cycles, et en effectuer l'analyse statistique conformément à la procédure des ENV 1991-1-1 et P 22-311, pour obtenir la résistance à 2 millions de cycles comme valeur caractéristique correspondant à une probabilité de non rupture de 95 % avec un niveau de confiance de 75 %; le nombre d'écarts-types à retrancher de la valeur moyenne dépend de ces deux fractiles et du nombre total d'essais effectués.
- (8) En alternative aux clauses (5) à (7), on pourra imposer des pentes $m = 3$ et $m = 5$, à condition de mener au moins 6 essais à un niveau donnant une durée de vie moyenne de l'ordre de un million de cycles.

7,5. – Justification de la résistance à la fatigue

- (1) La justification de la résistance à la fatigue se fait en calculant le dommage cumulé dû au spectre de vent décrit au § 7,3.

$$D = \sum_{i=1}^{n_c} \frac{n_i}{N_i}$$

n_i : nombre de cycles déduit du spectre de vent ou de l'histogramme donné au tableau 7.1, correspondant au niveau ΔS_i .

n_c : nombre de niveaux de contrainte de l'histogramme.

N_i : nombre de cycles déduit de la courbe de résistance du détail considéré (courbe de **Wohler**), correspondant au niveau $\Delta S_i / \gamma_{FF} \gamma_{MF}$.

- (2) Le dommage cumulé doit rester inférieur à 2,5, à défaut d'une spécification particulière de la part du client.

7,6. – Justification forfaitaire

- (1) En alternative à la justification détaillée spécifiée au § 7,5, on pourra utiliser les formules de vérification qui suivent et qui fournissent un degré de sécurité équivalent à l'emploi du spectre de vent de base et à la vérification d'un endommagement inférieur à 2,5. Néanmoins, leur emploi ne permet pas d'apprécier la durée de vie théorique correspondante, autrement que par le fait qu'elle est supérieure à 20 ans.
- (2) On désigne par C la Classe du détail considéré (cf. § 7,41).
- (3) Quelle que soit la courbe de résistance à la fatigue utilisée (courbe SN à trois branches : $m = 3$, $m = 5$, puis m infini, courbe SN à deux branches : $m = 5$, puis m infini,

courbe SN à une branche : $m = 5$, sans limite de troncature) on doit vérifier que :

$$\frac{\gamma_{Ef} \gamma_{Mf} \Delta S_{ref}}{C} \leq 5$$

7,7. – Exigences relatives à la fabrication

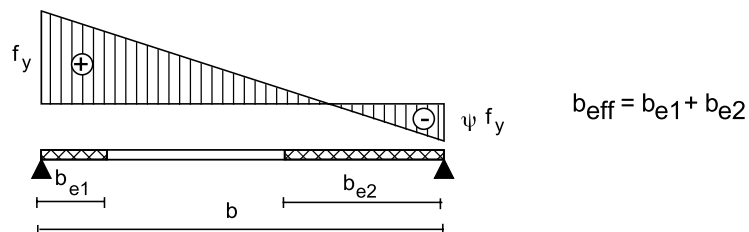
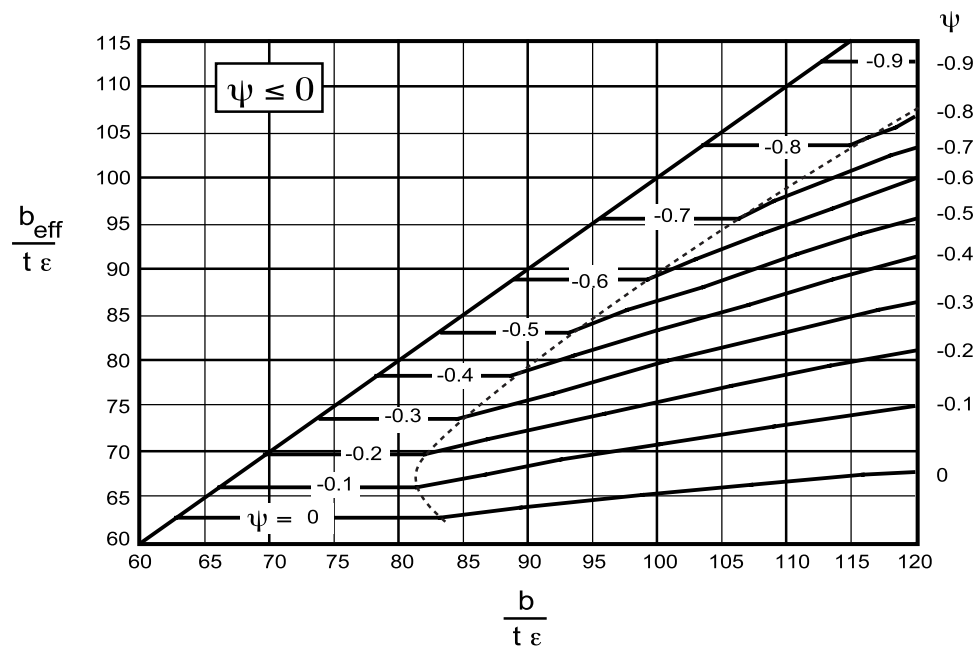
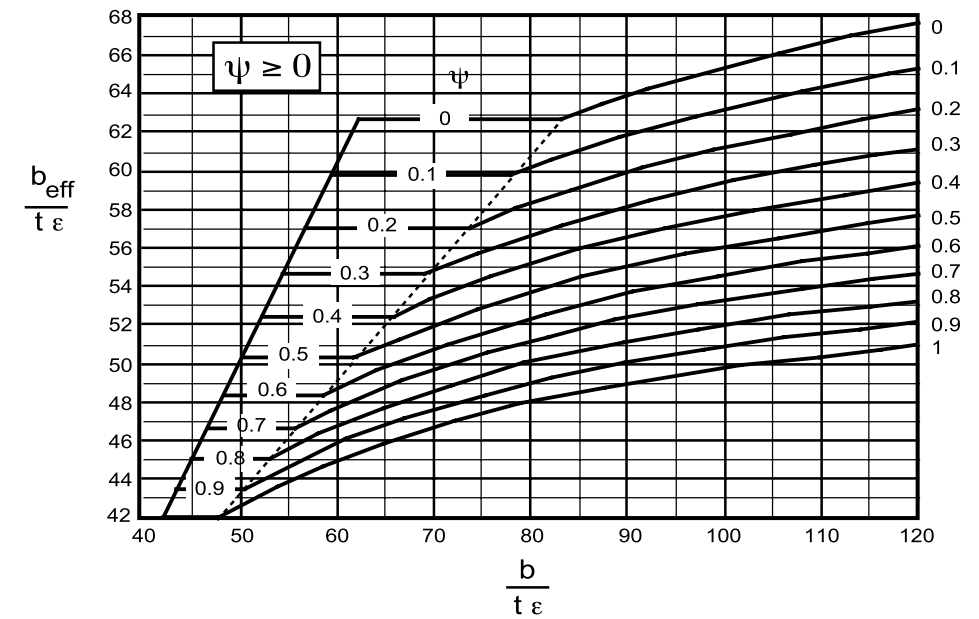
- (1) Conformément à la norme P 22-311, la qualité de réalisation des détails soudés doit répondre aux exigences de la NF P 22-471 Classe de qualité 2, telles que définies au tableau 5 de cette norme. Quelques exceptions sont mentionnées dans la norme P22-311 pour certains détails (consulter les tables de classification).

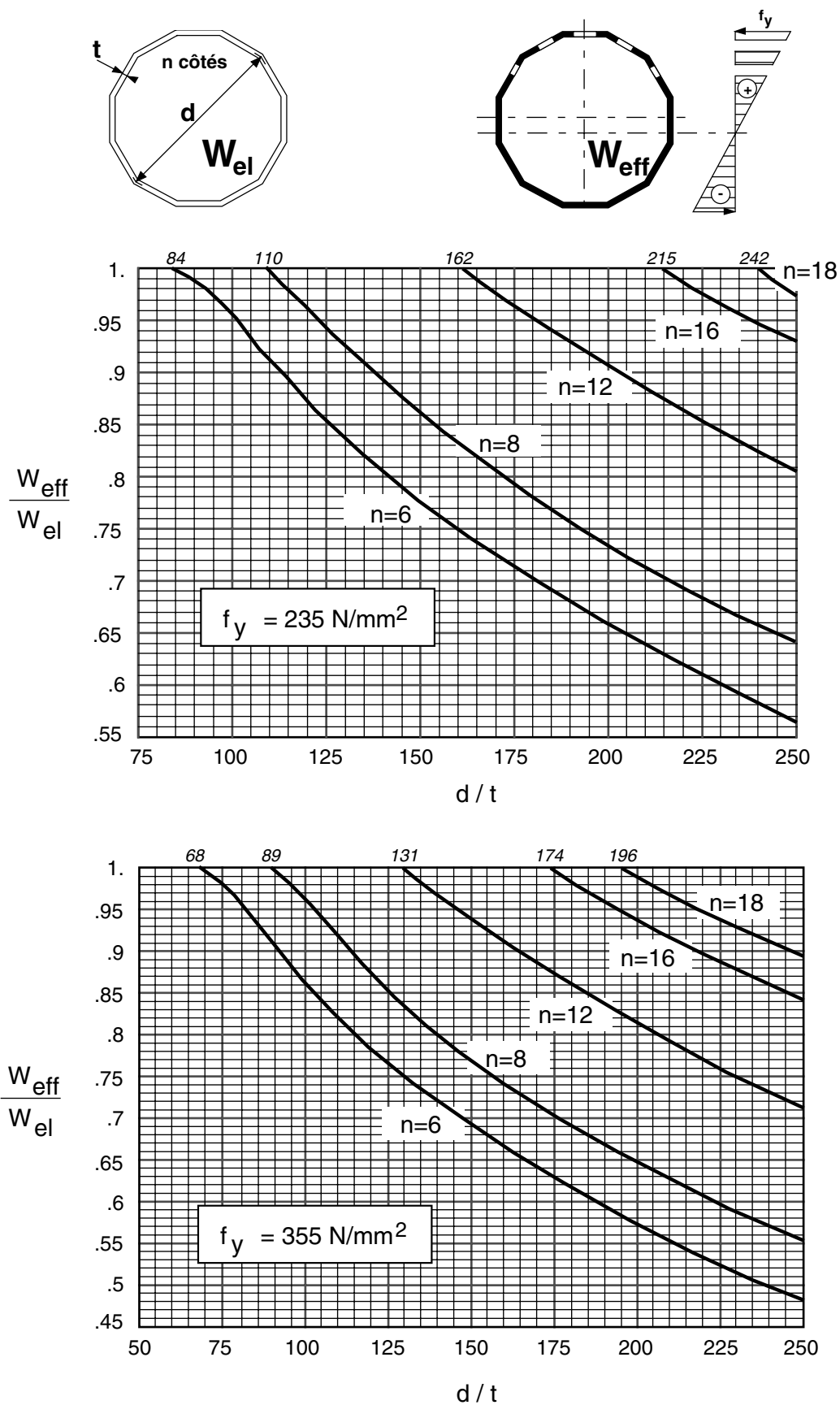
ANNEXE A

Caractéristiques de section efficace de Sections polygonales

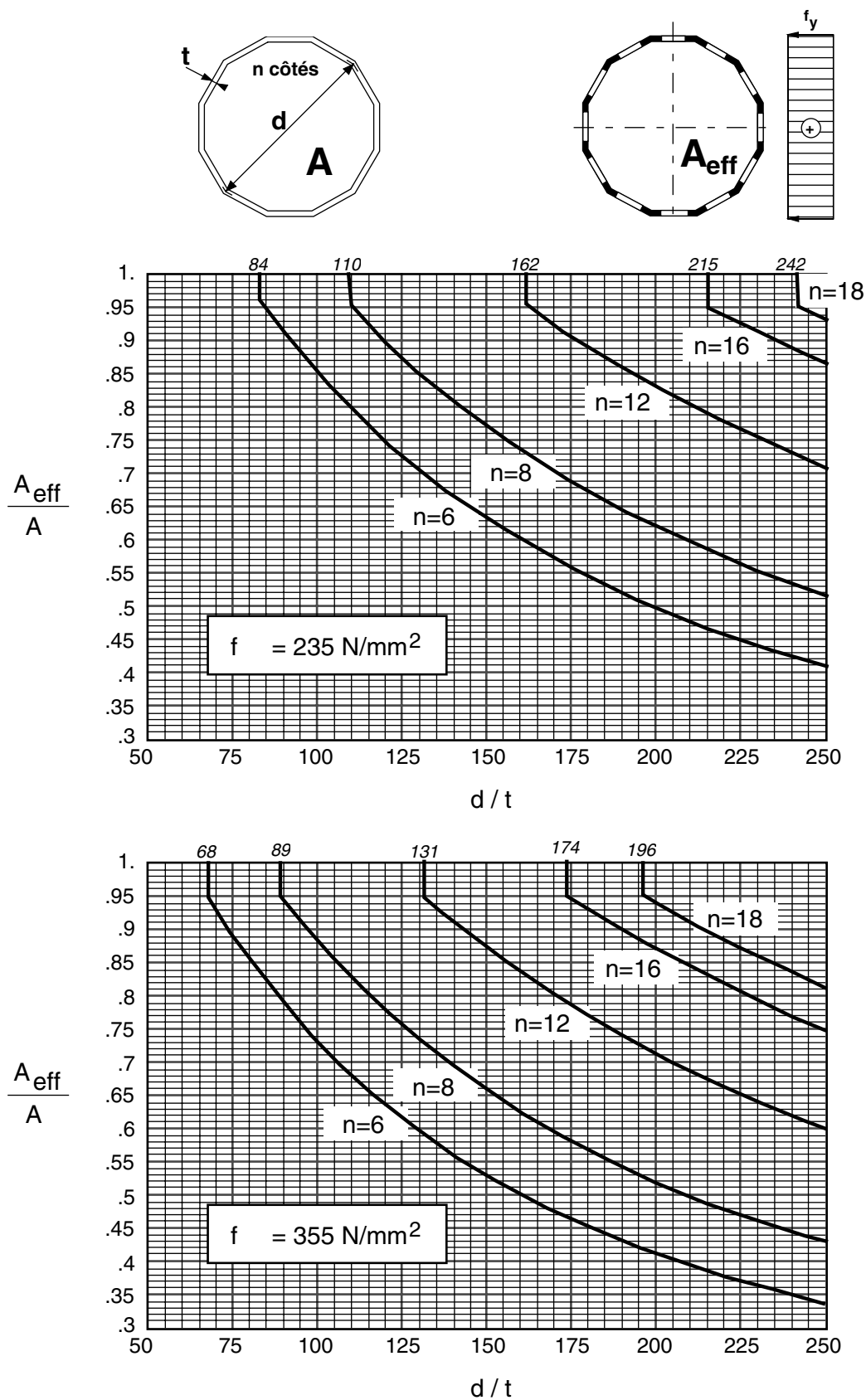
Abaques

A.1 Largeur efficace d'une paroi comprimée-fléchie



A.2 Sections polygonales fléchies – Module de résistance élastique W_{eff} de section efficace

A.3 Sections polygonales comprimées – Aire A_{eff} de section efficace



A.4 Note sur l'établissement des abaques A1, A2 et A3

La détermination des caractéristiques de section efficace repose sur la formulation de largeurs efficaces donnée au paragraphe 5.35 de la norme P 22-311 Partie 1.1 et reprise dans ces recommandations. Les congés sur arêtes des sections polygonales sont ignorés.

a) Largeur efficace d'une paroi comprimée-fléchie (A1)

Les pans d'une section polygonale sont assimilés à des parois bi-appuyées. Le tableau 5.31 (Feuille 1) de la norme P 22-311 donne la limite d'élancement suivante entre la Classe 3 et la Classe 4 :

$$\frac{b}{t\varepsilon} = \frac{42}{0,67 + 0,33 \psi} \quad \text{avec} \quad -1 \leq \psi \leq 1$$

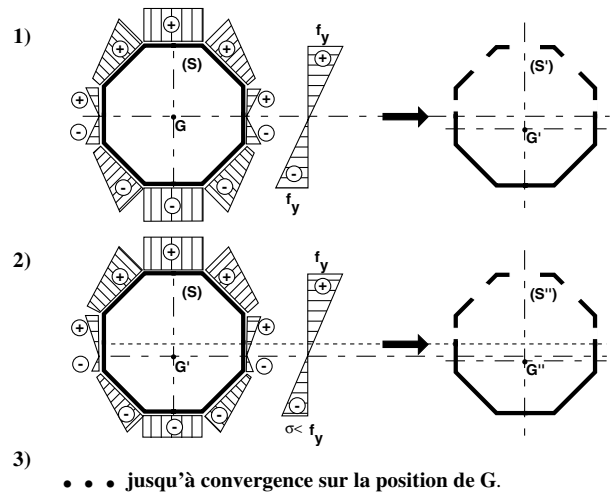
En-dessous de cette limite, la paroi est de Classe 3 et il n'y a pas lieu de procéder à un calcul de largeur efficace (P 22-311 § 5.32 (8)). La non-cohérence introduite par la norme P 22-311 entre cette limite et la valeur d'élancement correspondant à $\lambda_p = 0,673$ pour laquelle le coefficient de réduction ρ est égal à 1 dans le calcul de la largeur efficace crée une discontinuité qui se traduit par les paliers des abaques A1.

b) Caractéristiques efficaces des sections polygonales en flexion simple (A2)

Une procédure itérative est utilisée pour déterminer le module de résistance élastique de la section. Cette procédure reprend, dans l'esprit, le principe du calcul défini aux paragraphes 5.35 (4) et 5.35 (5) de la norme P 22-311.

Dans cette procédure itérative et à chaque itération, les largeurs efficaces de chaque pan sont calculées sur la base d'une répartition linéaire des contraintes sur la hauteur de la section, le moment fléchissant étant appliqué au centre de gravité déterminé pour la section efficace obtenue à la fin de l'itération précédente et la contrainte maximale de compression étant bornée à f_y . Au fil des itérations, la position du centre de gravité se stabilise et le module de résistance élastique W_{eff} de la section efficace finale est calculé.

Cette procédure a été informatisée et appliquée en faisant varier le nombre de pans et l'élancement d/t des sections polygonales, et pour les deux valeurs usuelles de la limite d'élasticité. Ceci a permis de tracer les abaques relatifs à la flexion.



c) Caractéristiques efficaces des sections polygonales en compression simple (A3)

Tous les pans de la section étant sollicités en compression pure, seules les largeurs efficaces de l'un d'eux sont déterminées et l'aire efficace A_{eff} de la section efficace complète en est déduite. La discontinuité visible pour chaque courbe aux alentours de $A_{eff}/A = 0,95$ est due à la limite inférieure 42ε de d/t en dessous de laquelle un pan comprimé devient de Classe 3 et donc complètement efficace. Cet effet n'est pratiquement pas visible pour la flexion car il est limité au pan le plus comprimé de la section.