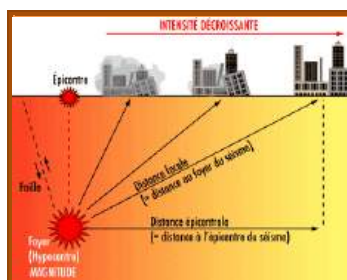


Guide Équipements chaudronnés & machines tournantes destinés aux procédés industriels



Mise en application de la section II
[Dispositions relatives aux règles parasismiques
applicables à certaines installations]
de l'arrêté du 4 octobre 2010 modifié

DT 114 Rev 1
Avril 2025

Fiche de synthèse des modifications
Révision 1 du guide DT 114 (Avril 2025)

Page du guide DT114 rév.1	paragraphe	Modification
10 ; 19, 20 ; 31 ; 71 ; 113 à 118 ; 150 à 156	1.3 ; 2.2 ; 3.2 ; annexes 2, 3 et 4	Corrections de renvois à des figures ou à des paragraphes
15	2.1	Introduction du chapitre 2 : Avertissement sur la prise en compte des effets du second ordre dans les calculs.
19	2.2	Estimation de la réponse sismique à partir de calculs analytiques : Ajout d'une note pour préciser la masse de produit à prendre en compte
34	4.1	Introduction du chapitre 4 : ajout de la nécessité de vérifier l'intégrité de la jonction entre la tête des poteaux et le tirant.
57 à 64	8	Références mise à jour de certaines références.
65	Annexe 1	Formulation simplifiée pour l'accélération a_{sp} : Correction de la formule. <i>L'ancienne formule comportait une erreur qui sous-estimait l'accélération absolue de la structure porteuse, dans le cas où l'accélération maximale au sol a_N a une valeur inférieure à 1 m/s^2.</i> <i>Dans les cas où $a_N > 1\text{ m/s}^2$, l'accélération absolue de la structure porteuse était surestimée (erreur conservative dans ces cas).</i> <i>Note : cette erreur figurait uniquement dans la formule A1/1-3, mais pas dans l'exemple numérique de la page 68 qui était juste.</i>
67	Annexe 1	Modification des valeurs de hauteur dans l'exemple numérique.
69	Annexe 2	Fréquence propre « verticale »/ Séisme verticale : Correction de la formule. <i>L'ancienne formule sous-évaluait la fréquence propre « verticale » d'un facteur 1,4.</i> <i>Cette erreur peut avoir un impact pour les colonnes sur jupes, vérifiées avec une méthode de calculs analytiques, et si le calcul a été fait sans se placer sur le palier dans le cas de fréquences élevées (à gauche du palier pour les graphiques $a=f(T)$). Dans ce cas l'ancienne formule sous-estimait la fréquence propre et donc sous-estimait l'accélération correspondante.</i>
75 à 101	Annexe 2	Corrections de l'exemple numérique
130 à 133	Annexe 3	Corrections de l'exemple numérique
144	Annexe 4	Corrections éditoriales

SOMMAIRE		Page
1	GÉNÉRALITÉS	5
1.1	Objet et domaine d'application du guide	5
1.2	Données relatives à la réalisation des évaluations et/ou des calculs des équipements chaudronnés	8
1.2.1	Équipements chaudronnés neufs	8
1.2.2	Équipements chaudronnés en service	8
1.3	Hypothèses de calcul et conditions particulières	10
1.3.1	Conditions générales	10
1.3.2	Interaction sol-structure	10
1.3.3	Interaction structure support-équipement	11
1.3.4	Spectres sismiques	11
1.3.5	Amortissement	11
1.3.6	Coefficient de comportement – Coefficient de réduction	12
1.3.7	Calcul à l'aide de modèles éléments finis	13
2	CHEMINÉES / TORCHÈRES, COLONNES ET RÉACTEURS VERTICAUX, RÉSERVOIRS VERTICAUX	15
2.1	Introduction	15
2.2	Estimation de la réponse sismique à partir de calculs analytiques (Procédure 1)	19
2.3	Détermination de la réponse sismique à l'aide de modèles numériques (Procédure 2)	20
2.4	Exemples	24
3	BALLONS ET RÉSERVOIRS HORIZONTAUX, RÉACTEURS HORIZONTAUX ET ÉCHANGEURS TUBULAIRES HORIZONTAUX	26
3.1	Introduction	26
3.2	Estimation de la réponse sismique à partir de calculs analytiques (Procédure 1)	31
3.3	Détermination de la réponse sismique à l'aide de modèles numériques (Procédure 2)	33
4	RÉSERVOIRS SPHÉRIQUES	34
4.1	Introduction	34
4.2	Estimation de la réponse sismique à partir de calculs analytiques (Procédure 1)	36
4.3	Détermination de la réponse sismique à l'aide de modèles numériques (Procédure 2)	41
5	AUTRES ÉQUIPEMENTS : FOURS, AÉROREFRIGÉRANTS, "BOITES FROIDES", CHAUDIÈRES	42
6	MACHINES TOURNANTES : POMPES, COMPRESSEURS, GROUPES ELECTROGÈNES, ET AGITATEURS	49
7	ORGANES DE SÉCURITÉ (Soupapes...)	56
8	RÉFÉRENCES	57

SOMMAIRE (Suite)		Page
ANNEXES		
ANNEXE 1	GÉNÉRALITÉS	65
	1° Partie : Détermination simplifiée de spectres de plancher	65
ANNEXE 2	COLONNE SUR JUPE	68
	1° Partie : Détermination des fréquences propres horizontales et verticale (Procédure 1)	68
	2° Partie : Exemple (Procédure1)	74
ANNEXE 3	RÉSERVOIRS HORIZONTAUX SUR DEUX BERCEAUX	102
	1° Partie : Estimation de la réponse sismique à partir de calculs analytiques (Procédure 1)	102
	2° Partie : Exemple (Procédure 1)	129
ANNEXE 4	RÉSERVOIRS SPHÉRIQUES	137
	1° Partie : Détermination des fréquences propres et estimation de la réponse sismique à partir de calculs analytiques (Procédure 1)	137
	2° Partie : Exemple (Procédure1)	152
ANNEXE 5	<i>Non utilisée</i>	
ANNEXE 6	MACHINES TOURNANTES	169
	1° Partie : Équipement sur support muni d'isolateurs	169

1 - GENERALITES

1.1 - Objet et domaine d'application du guide

Le but du présent guide est de définir, pour les équipements chaudronnés et machines tournantes neufs ou en service, des procédures et/ou méthodologies de vérification au séisme répondant aux exigences de la réglementation applicable sur le territoire français [1], [2], [3], [4], [6].

Les équipements objets des recommandations de la présente version du guide sont les équipements métalliques (Notes 1 & 2) à poste fixe définis ci-après et répondant aux critères définis par l'arrêté du 24 Janvier 2011 [6].

Chapitre 2 : Cheminées / Torchères, Colonnes et réacteurs verticaux, Réservoirs verticaux

Chapitre 3 : Ballons et réservoirs horizontaux, Réacteurs horizontaux et échangeurs tubulaires horizontaux

Chapitre 4 : Réservoirs sphériques

Chapitre 5 : Autres équipements : Fours, Aéroréfrigérants, "Boîtes froides", Chaudières

Chapitre 6 : Machines tournantes

Chapitre 7 : Organes de sécurité (Soupapes...)

Chapitre X : Références

Note 1 : Les équipements concernés peuvent être des équipements soumis à la pression ou non, la pression, le cas échéant, pouvant être positive ou négative (équipements fonctionnant au vide).

Note 2 : Les méthodologies proposées dans le présent guide sont destinées aux équipements métalliques essentiellement en acier ayant un comportement suffisamment ductile. L'extension de ces méthodologies à des équipements en matériaux composites, plastique, ... envisageable dans de nombreux cas, notamment pour des matériaux homogènes, reste toutefois de la responsabilité de l'intervenant.

Les données sismiques utilisées pour la vérification au séisme de ces équipements doivent être conformes aux exigences réglementaires applicables. A cet égard, l'exploitation et les interprétations éventuelles des textes réglementaires font l'objet du *Guide Méthodologie générale* [9a] auquel il convient de se reporter pour l'application du présent guide.

Dans le cadre du présent guide, la vérification au séisme des équipements considérés a pour but d'assurer le respect de l'une des conditions suivantes [9a §5] :

- E1 : Maintien en place de l'équipement (stabilité).

Note 1 : Cette exigence concerne notamment les équipements pour lesquels aucune condition particulière n'est requise mais dont les déplacements et/ou l'endommagement peuvent entraîner des désordres sur des équipements voisins pour lesquels l'un des critères définis ci-après doit être respecté (EAP [9a]).

- E2 : Maintien en place de l'équipement considéré & confinement du produit manipulé à l'intérieur de l'équipement (intégrité),

Note 1 : Les vérifications envisagées portent sur l'état limite ultime au sens de la référence [27 § 2.2.2]

Note 2 : Pour les assemblages non permanents (assemblages à brides boulonnés ou assemblages vissés uniquement), une fuite temporaire limitée peut être admise, sous réserve que celle-ci soit prise en compte dans les analyses de risques. Pour les assemblages à brides boulonnées si une étude s'avère nécessaire (par exemple fuite d'un produit très toxique via une bride à proximité immédiate d'une clôture) la fuite peut être évaluée en se reportant à la référence [125f].

Note 3 : Cette condition nécessite que les organes de sécurité installés sur l'équipement restent fonctionnels

- E3a : Maintien en place de l'équipement, confinement du produit manipulé à l'intérieur de l'équipement & maintien des capacités fonctionnelles de l'équipement considéré.

Note 1 : Le maintien des capacités fonctionnelles correspond notamment à l'absence d'obstruction des entrées/sorties par exemple en s'assurant du maintien en place des internes de l'équipement.

- E3b : Maintien en place de l'équipement, confinement du produit manipulé à l'intérieur de l'équipement & maintien des capacités fonctionnelles de l'équipement considéré & maintien de l'opérabilité de tout ou partie des organes d'exploitation de l'équipement (vannes, robinets...).

Note 1 : L'extension de cette dernière condition afin d'assurer le maintien en exploitation de l'équipement après séisme correspondrait à l'état de limitation des dommages au sens de la référence [27 § 2.2.3]

Il convient de rappeler que, dans la plupart des cas, le niveau E2 devrait permettre de répondre aux exigences réglementaires. Les niveaux E3, sensiblement plus contraignant, ne devraient être applicables que dans quelques cas exceptionnels ou, éventuellement, dans les cas où l'Exploitant souhaite préserver l'ensemble des capacités de production de ses unités.

Sauf pour la condition E3b le cas échéant, une analyse détaillée du comportement des internes des équipements n'est pas nécessaire sous réserve de vérifier que ceux-ci sont bien solidaires du corps des équipements (Figure 1.1).

La décision quant aux conditions à respecter est de la responsabilité du Donneur d'ordre (Équipements neufs) ou de l'Exploitant (Équipements en service).

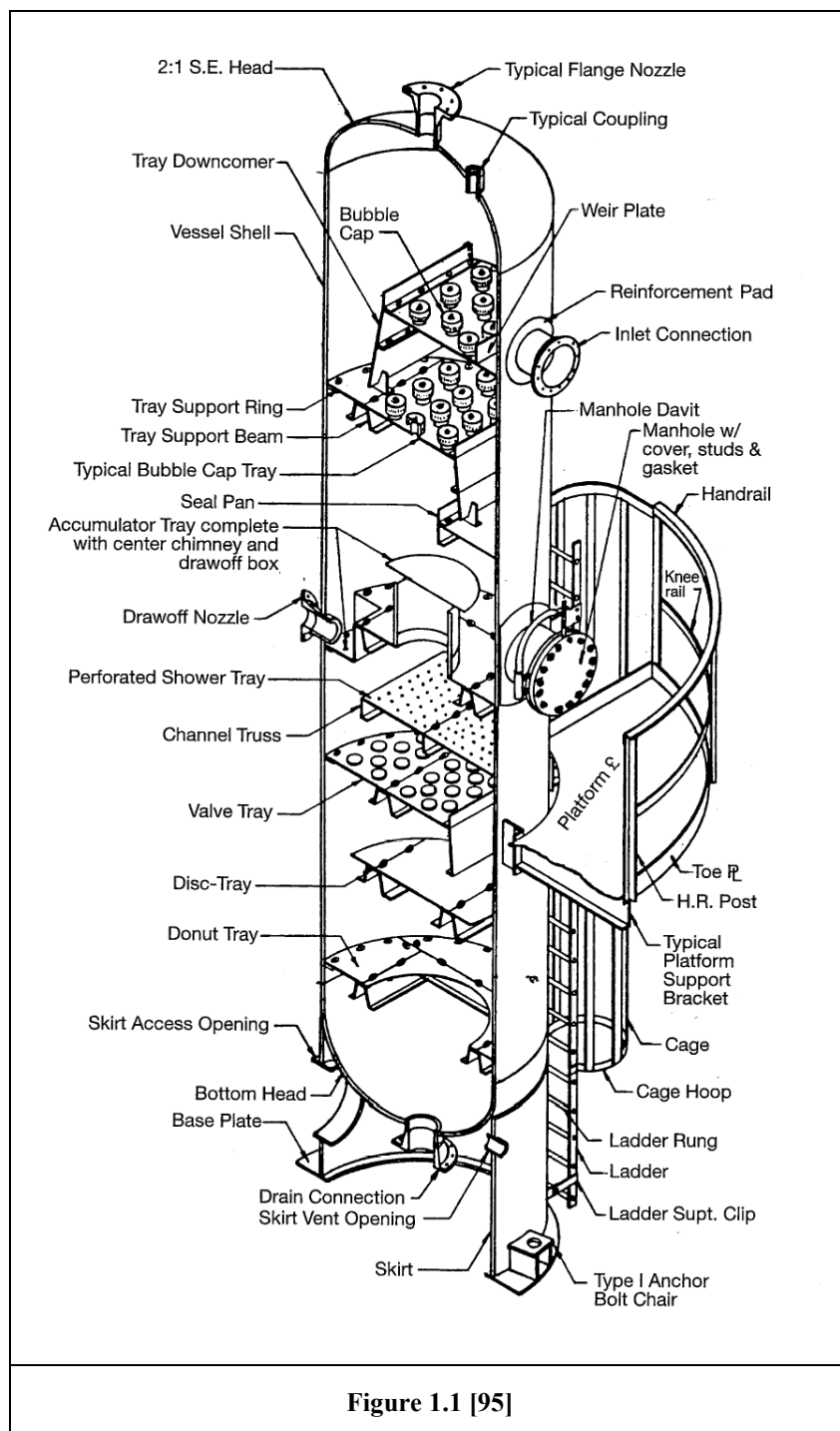




Figure 1.2

1.2 - Données relatives à la réalisation des évaluations et/ou des calculs des équipements chaudronnés

1.2.1 - Équipements chaudronnés neufs

Pour chacun des éléments intervenant dans l'évaluation et/ou les calculs : Matériaux, dimensions et épaisseurs y compris les éventuelles surépaisseurs de corrosion,

1.2.2 - Équipements chaudronnés en service

Pour chacun des éléments intervenant dans l'évaluation et/ou les calculs : Matériaux, dimensions et épaisseurs. Les épaisseurs à prendre en compte sont définies de la manière suivante :

- L'épaisseur nominale de commande (c.à.d. « tel que construit »), perte d'épaisseur due à la corrosion éventuelle déduite (voir Note).

Note 1 : Perte d'épaisseur estimée pour la période comprise entre la date de construction et la date du prochain relevé d'épaisseur prévu par le plan d'inspection. En fonction des matériaux utilisés, du produit stocké ainsi que des éventuelles dispositions constructives spécifiques (revêtement par exemple) cette perte d'épaisseur peut être nulle.

Note 2 : Cette épaisseur doit être supérieure ou égale à l'épaisseur minimale nécessaire requise par le référentiel (Code ou Norme) utilisé pour la construction ou le suivi en service et la maintenance de l'équipement considéré.

ou,

- L'épaisseur mesurée lors de la dernière inspection, perte d'épaisseur due à la corrosion éventuelle déduite (voir Note).

Note 1 : Perte d'épaisseur estimée pour la période comprise entre la date à laquelle les mesures d'épaisseur ont été effectuées et la date du prochain relevé d'épaisseur prévu par le plan d'inspection. En fonction des matériaux utilisés, du produit stocké ainsi que des éventuelles dispositions constructives spécifiques (revêtement par exemple) cette perte d'épaisseur peut être nulle.

Note 2 : Cette épaisseur doit être supérieure ou égale à l'épaisseur minimale nécessaire requise par le référentiel (Code ou Norme) utilisé pour la construction ou le suivi en service et la maintenance de l'équipement considéré.

ou,

- L'épaisseur minimale nécessaire requise par le référentiel (Code ou Norme) utilisé pour la construction ou le suivi en service et la maintenance de l'équipement considéré.

Note : L'épaisseur déterminée à partir d'éventuelles mesures lors des prochaines inspections et utilisée lors de l'application du référentiel retenu ne devra pas être inférieure à cette valeur.

Pour l'équipement considéré il convient de rassembler les rapports des opérations de surveillance, des inspections de routine ou des inspections réglementaires (voir notamment [163b] ainsi que [135] & [171]) définissant les examens et contrôles éventuels mis en œuvre pour le suivi en service de l'équipement. Les examens et contrôles qui ont pu être réalisés sont des contrôles non destructifs, des évaluations métallurgiques (mesures de dureté, répliques...), des essais mécaniques... Ces rapports doivent permettre de connaître les éventuelles opérations de réparation antérieures.

A ce titre, les dégradations ci-après, au minimum, doivent faire l'objet d'une attention particulière et peuvent nécessiter une visite sur site par du personnel expérimenté (voir [9a § 7.3.1]) :

- déformation excessive de l'équipement et/ou du supportage,
- défauts de forme et d'aspects des joints soudés,
- défauts de surface préjudiciables à la tenue mécanique de l'enveloppe sous pression,
- déformation de la paroi des appareils à pression raccordé à la tuyauterie,
- détérioration d'un revêtement de surface ou d'une peinture contre la corrosion

- boulons d'ancrage cisailés ou manquants,
- fondation fissurée,
- défauts de forme : écart de circularité, ovalisation, désalignement des fibres neutres et/ou angulaire des assemblages soudés,
- fuites éventuellement dues à de la corrosion ou à des assemblages non permanents (assemblage à brides le plus souvent),

ainsi que les modes d'endommagements suivants :

- Endommagements par perte d'épaisseur (Corrosion atmosphérique, Corrosion sous calorifuge, Corrosion galvanique, Corrosion par piqûres, Corrosion caverneuse, Érosion, Cavitation, Oxydation).
- Endommagements métallurgiques (Fluage, Fatigue mécanique, thermique ou thermomécanique, Rupture brutale (fragile ou ductile), Modification métallurgique du matériau dont corrosion sélective, décarburation, décohésion des joints de grain...).



Figure 1.3

1.3 - Hypothèses de calcul et conditions particulières

1.3.1 - Conditions générales

Les présentes recommandations couvrent les équipements construits en matériaux ferreux et non ferreux sous réserve du respect des conditions ci-après :

- Les matériaux des différents éléments composant l'équipement chaudronné et son supportage doivent présenter une ductilité suffisante à la température d'exploitation (Note 1).

Note 1 : Pour les équipements neufs, il est recommandé de se reporter aux exigences de l'Annexe 1 au Décret N° 99-1046 du 13 Décembre 1999 relatif aux Équipements sous pression § 7.5. Caractéristiques des matériaux qui requière notamment un allongement à rupture supérieur ou égal à 14%. Cette valeur peut être ramenée à 10% pour les équipements en service. Dans les deux cas, pour la boulonnerie, cette valeur doit être égale ou supérieure à 12%.

- Lorsque la température de service est supérieure à la température de fluage [163a] il convient de s'assurer de la ductilité au fluage du matériau et, dans les calculs au séisme, d'utiliser les caractéristiques mécaniques instantanées.
- Les assemblages permanents couverts par les présentes recommandations sont uniquement les assemblages réalisés par soudage.

1.3.2 - Interaction sol-structure

Les recommandations générales concernant la prise en compte de l'interaction sol-structure sont données par les références [9a] et [9c] et les éléments pratiques par les références [47] et [79]. Notamment pour les structures élancées (Torchères, cheminées, colonnes ... Figures 1.1, 1.2 et 1.3), il est recommandé de prendre en compte les effets de l'interaction sol-structure dès que la vitesse des ondes de cisaillement dans le sol de la fondation est inférieure à 1000 m/s. À cet effet, des modèles numériques simples (modèle brochette) peuvent être utilisés (voir Figure ~~2.72.11~~) pour évaluer l'influence de l'interaction sol-structure.

$$v_s = \sqrt{\frac{G}{\rho_s}}$$

v_s = Vitesse des ondes de cisaillement dans le sol

G = Module de cisaillement du sol

ρ_s = Masse volumique du sol

Si les propriétés du sol ont une influence importante sur la réponse sismique de la structure, il convient de tenir compte des incertitudes de ces paramètres en considérant au moins les 3 cas suivants, définis par leur valeur de module de cisaillement dynamique G à partir de la valeur moyenne G_{moy} estimée ou mesurée :

- Valeur minimale : $G_{\text{min}} = 2/3 G_{\text{moy}}$
- Valeur caractéristique : G_{moy}
- Valeur maximale : $G_{\text{max}} = 3/2 G_{\text{moy}}$

Note : En fonction des conditions de site d'un équipement spécifique, il peut être nécessaire d'étendre la plage de variation définie ci-dessus.

1.3.3 - Interaction structure support-équipement [9c],

On rappelle ci-dessous les critères de découplage dynamique présentés au § 3.3.2 de la référence [9c], référence à laquelle il convient de se reporter notamment lorsque ces critères ne sont pas respectés.

Les comportements de l'équipement et de la structure support peuvent être considérés comme découplés vis-à-vis des phénomènes dynamiques objets du présent guide, si un des critères suivants est vérifié :

- $R_m < 0,01$
- $R_m < 0,1$ et $R_f > 1,25$
- $R_m < 0,1$ et $R_f < 0,80$

où :

R_m : rapport entre la masse de l'équipement et la masse de la structure support

R_f : rapport entre la fréquence fondamentale de l'équipement et une des fréquences principales de la structure support.

Lorsque les comportements de l'équipement et de la structure support peuvent être considérés comme découplés, la masse de l'équipement doit être prise en compte dans la modélisation des masses de la structure support, comme une charge répartie ou une charge localisée, en tenant compte de sa localisation dans l'ouvrage. L'étude du comportement sismique de l'équipement doit alors être effectuée sur la base des mouvements sismiques transférés au droit des supports de l'équipement.

Lorsque les comportements de l'équipement et de la structure support ne peuvent pas être considérés comme découplés, un modèle global de la structure support et de l'équipement permettant la caractérisation des phénomènes de couplage dynamique doit être utilisé.

Dans les deux cas il convient de se reporter au Chapitre 5 de la référence [9c1] où les différentes procédures utilisables sont définies dont, notamment, la détermination simplifiée des spectres de plancher (Voir Annexe 1 du présent Guide).

1.3.4 - Spectres sismiques

Le séisme doit être appliqué dans deux directions horizontales orthogonales indépendamment, puis combinée en calculant la racine carrée de la somme des carrés des réponses dues à chaque composante horizontale et, éventuellement, de la composante verticale [28 Chapitre 5 § 5.3.2 & 5.4.2(4)]. Il est toutefois permis, d'étendre les règles des articles 3.2 et 4.2 de la référence [28a] aux structures axisymétriques et donc de ne prendre en compte qu'une seule direction horizontale.

Pour les structures élancées (torchères, cheminées, colonnes ...), lorsque leur hauteur est supérieure à 80 m et si le produit $a_g S$ (Note 1) est supérieure à 0,25g, alors la nécessité de la prise en compte de la composante en rotation des mouvements du sol doit être évaluée (Note 2) [29 Chapitre 3 § 3.1 Note 1)] notamment pour les sols de classe D et au-delà.

Note 1 : Avec a_g accélération de calcul au niveau d'un sol de classe A et S paramètre du sol tels que définis par la référence [27]

Note 2 : Une méthodologie utilisable pour la définition et l'utilisation des spectres en rotation est proposée en Annexe A de la référence [29].

Note 3 : Les valeurs de T_e spécifiées au Tableau A.1 de l'annexe A de la référence [27] doivent être remplacées par la valeur « 4s » de l'équation 3.5 du § 3.2.2.2 de la référence [27] (Spectre horizontal). Pour le spectre vertical aucune indication n'est fournie (ni par la réglementation ni par la référence [27]) pour déterminer l'accélération au-delà d'une valeur de la période supérieure à 4s.

Note 4 : Pour tenir compte de la variabilité de la structure, les spectres de plancher correspondant à la valeur moyenne des caractéristiques de sol (G_{moy}) pourront être élargis de +/-15% [9a].

1.3.5 - Amortissement

Pour les différentes situations envisageables et sauf justification particulière ou exigence spécifique, il convient d'utiliser, pour les équipements chaudronnés objet du présent guide, un coefficient d'amortissement égal à 5% pour les modes de structure et de 0,5% pour les modes de ballotement des liquides.

Note 1 : Voir aussi § 5.3.1.4 de [9a] pour d'autres types de structures métalliques

Note 2 : Pour les modes correspondant essentiellement au comportement du sol et des fondations de l'équipement, un amortissement supérieur à 5% peut être pris en compte mais dans ce cas le coefficient de comportement/de réduction doit être inférieur ou égal à 1,5.

1.3.6 - Coefficient de comportement – Coefficient de réduction [170], [9a], [27a]

La capacité des structures objet du présent guide à résister à des actions sismiques dans le domaine non linéaire permet en général d'effectuer leur dimensionnement à partir d'efforts plus faibles que ceux correspondant à un comportement linéaire élastique.

La capacité de dissipation d'énergie de la structure est due principalement au comportement ductile de ses éléments. Dans ces conditions et pour les calculs correspondant à la vérification à l'état limite ultime au sens de la référence [28], il est admis, pour les matériaux présentant une ductilité suffisante en conditions normales de service, d'utiliser un coefficient de comportement qui, sauf justification particulière, peut être pris égal à 1,5. [Note 1]. Ce coefficient de comportement peut alors être utilisé pour déterminer les spectres de calcul pour l'analyse élastique définis par la référence [27].

Note 1 : Dans le cas d'une vérification à l'état de limitation des dommages ce coefficient doit être égal à 1.

Si d'autres mécanismes interviennent, il est admis d'utiliser un coefficient de réduction englobant le coefficient de comportement précédemment défini et les effets complémentaires dus à ces mécanismes. Ce coefficient spécifique pour chaque type d'équipement est défini dans les différents chapitres du présent guide et peut alors être utilisé pour définir les spectres de calcul (Note 2).

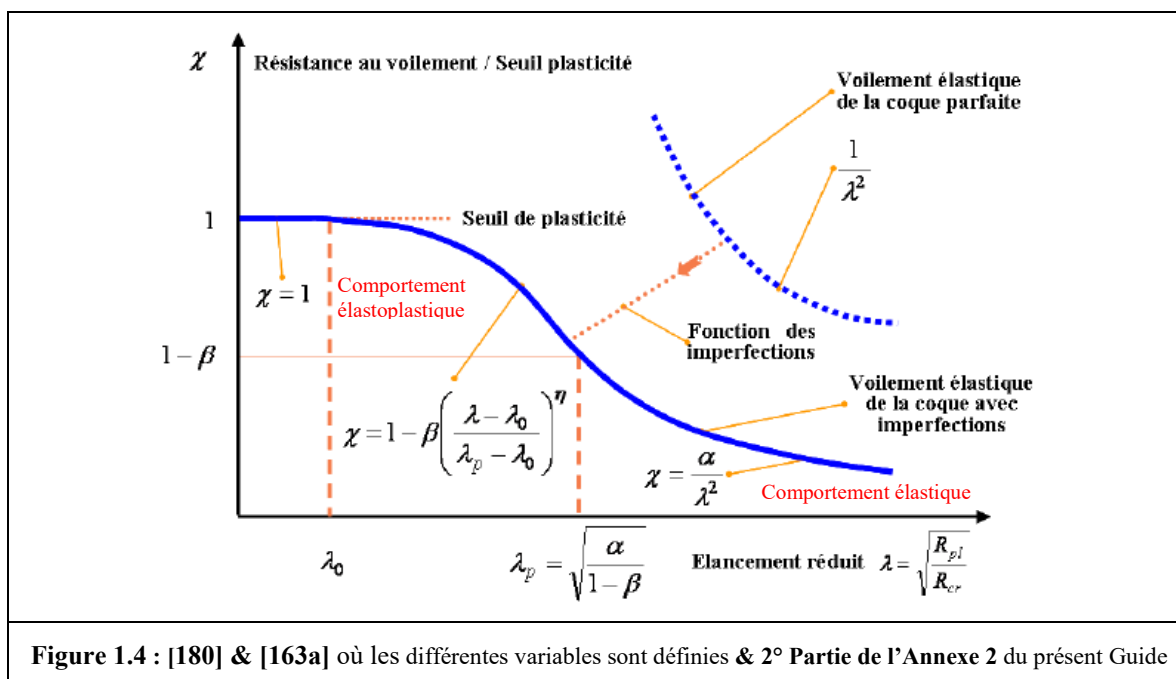
Note 2 : Il est rappelé que ces coefficients s'appliquent aux calculs des efforts mais n'affectent pas la détermination des déplacements

Il est rappelé toutefois que ces coefficients dépendent également de l'exigence imposée à la structure et donc du mode de défaillance étudié. A ce titre ces coefficients s'appliquent notamment pour la défaillance par déformation excessive (« contrainte de traction ») mais pas dans le cas d'instabilité élastique (flambement élastique Figure 1.4) sauf justification spécifique (Note 3).

Note 3 : Ductilité des ancrages par exemple. A cet égard, un allongement garanti des tiges d'ancrage de 12% pour les équipements neufs et de 10% pour des équipements en service sont des valeurs acceptables

Pour les phénomènes d'instabilité élastoplastique (Figure 1.4), en fonction des méthodologies appliquées c'est-à-dire avec prise en compte du comportement élastoplastique du matériau [167], [163], [180] ou non, ces coefficients ne devront pas être utilisés pour ce mode de défaillance ou pourront être utilisés, totalement ou partiellement, pour ce mode de défaillance (Voir les tableaux relatifs aux différents type d'équipement).

Par ailleurs, il est rappelé que ces coefficients, notamment quand ils s'appuient sur la ductilité du matériau, ne s'appliquent qu'aux réalisations pour lesquelles les certificats de réception des matériaux exigent des contrôles spécifiques de ces derniers (Par exemple pour des équipements neufs : Certificat 3.1 conforme à la norme NF EN 10204 : Janvier 2005).



1.3.7 - Calcul à l'aide de modèles éléments finis

Pour les différents équipements couverts par le présent guide, les modèles de calcul font l'objet de recommandations dans les différents chapitres ci-après. Ces modèles doivent être utilisés en respectant les recommandations ci-dessous.

1.3.7.1 - Loi de comportement, spectre de calcul et conditions aux limites

Au titre du présent guide deux possibilités sont envisagées :

- Calcul en élasticité linéaire sans prise en compte du contact avec le sol. Pour ce calcul, un spectre réduit (voir § 1.3.6 du présent guide) peut être pris en compte
- Calcul en élasto-plasticité avec prise en compte éventuelle du contact avec le sol. Pour ce calcul, le spectre réglementaire doit être utilisé.

Pour ce dernier cas, les calculs élasto-plastiques avec contact doivent tenir compte des hypothèses et exigences suivantes :

- Le sol est supposé indéformable pour toutes les zones sur lesquelles repose l'équipement, il n'est pas exclu de choisir une loi de comportement du sol en justifiant des paramètres utilisés.
- L'algorithme de calcul utilisé doit tenir compte des non linéarités géométriques (grandes transformations).
- La loi de comportement retenue doit être, sauf justification particulière, une loi de comportement élasto-plastique par exemple telle que décrite ci-dessous :
 - Élastique linéaire en deçà de la limite conventionnelle d'élasticité à 0.2% pour les aciers carbone/carbone manganèse, et 1% pour les aciers inoxydables austénitiques.
 - De type courbe d'écrouissage au-delà de la limite conventionnelle d'élasticité ou à défaut parfaitement plastique.

Note 1 : Pour simplifier le calcul et en première approche, il est possible d'utiliser une loi de comportement élastique linéaire parfaitement plastique.

Note 2 : Ces recommandations doivent être adaptées pour le cas des aciers inoxydables austénitiques.

Note 3 : Le présent guide n'exclut pas la possibilité de réaliser des calculs plus détaillés (calculs non linéaires/avec interaction fluide structure...).

Les chargements correspondant aux conditions normales de service (Pression, température ...) font l'objet, préalablement d'une analyse statique.

Puis, une analyse dynamique modale devra être réalisée pour déterminer les caractéristiques dynamiques intrinsèques du modèle de calcul (Fréquences et modes propres). Pour cela, le modèle devra prendre en compte la masse de l'enveloppe de l'équipement, la masse du produit contenu ainsi que les masses des accessoires éventuels.

Enfin une analyse spectrale ou une analyse statique équivalente doit être réalisée à partir des résultats de l'analyse modale et des spectres représentatifs de la situation de l'étude.

Note 4 : Une analyse plus détaillée telle qu'une analyse temporelle peut être mise en œuvre.

1.3.7.2 - Analyse des résultats

1.3.7.2.1 - Dans le cas d'une étude avec un comportement élastique linéaire du matériau :

Les résultats obtenus doivent faire, au minimum, l'objet des évaluations précisées dans le présent guide. Notamment, pour les zones en compression des équipements (pieds, jupe, berceaux, ...), les contraintes, doivent faire l'objet des vérifications requises aux différents paragraphes du présent guide relatifs aux équipements (§ 2.2 et Figure 2.8, Figure A3/1-9, Figure A4/1-7). Le cas échéant, ces évaluations doivent être complétées par la vérification des critères requis par le référentiel retenu pour l'analyse sismique de l'équipement.

1.3.7.2.2 - Dans le cadre d'une étude prenant en compte un comportement élasto-plastique du matériau :

Les résultats obtenus doivent faire, au minimum, l'objet des évaluations ci-dessous :

- Pour les zones en compression des équipements (pieds, jupe, berceaux, ...), les contraintes, doivent faire l'objet des vérifications requises aux différents paragraphes du présent guide relatifs aux équipements (§ 2.2 et Figure 2.8, Figure A3/1-9, Figure A4/1-7).
- Pour les autres cas, les déformations plastiques doivent être limitées à 5% pour un acier carbone/carbone-manganèse, et 7.5% pour les aciers inoxydables austénitiques sauf justifications spécifiques.

Note : Ces déformations plastiques (déformations plastiques cumulées) n'ont pas de signification physique et sont un critère d'arrêt des méthodes numériques (convergence ou divergence des calculs) mises en œuvre dans le cadre d'une analyse limite (recherche d'une borne inférieure du chargement limite).

Le cas échéant, ces évaluations doivent être complétées par la vérification des critères requis par le référentiel retenu pour l'analyse sismique de l'équipement.

1.3.8 - Combinaison des chargements et critères [9a §4.4]

En compléments aux efforts dus au séisme, les chargements à prendre en compte sont ceux correspondant aux situations de service normales : poids propre, pression(s) et température(s) de service et le cas échéant efforts sur les tubulures.

La combinaison des résultats et l'analyse de ceux-ci notamment des contraintes doivent être conformes aux exigences du référentiel (Code de construction ou Norme) retenu pour le dimensionnement de l'équipement et pour la vérification au séisme.



Figure 1.5

2 - CHEMINÉES / TORCHÈRES, COLONNES ET REACTEURS VERTICAUX, RESERVOIRS VERTICAUX

2.1 - Introduction

Le présent chapitre propose différentes procédures d'évaluation du comportement sismiques applicables aux cheminées et aux torchères [155] ainsi qu'aux colonnes, réacteurs verticaux et réservoirs verticaux (Figures 1.2 à 1.5 et [101]).

Les cheminées et les torchères peuvent être de type autoportantes ou supportées latéralement par un treillis (Figure 2.1) ou encore disposées sur différents types de charpentes (voir Figure 1.4-1.5 et § 5).

Les exigences relatives au comportement de ces équipements décrites au §1.1 du présent guides sont précisées aux § 5.5 et 6.4 de la référence [29]. Pour ce qui est des coefficients de réduction des cheminées et des éventuelles ossatures il convient de se reporter aux §4.10 et 6.1 de la référence [29]. Pour les autres équipements les valeurs de la Figure 2.2 peuvent être utilisées.

Pour les équipements haubanés il convient, pour la prise en compte des haubans, de se reporter aux recommandations de la référence [29a]

Ces équipements peuvent être supportés directement sur une jupe, des consoles, une couronne, des poteaux, des pieds, des poteaux ou une combinaison de ces différentes possibilités (voir Figure 2.3 ci-après).

Des exemples de comportement au séisme de ce type d'équipement sont donnés Figures 2.4 à 2.6.

La formule 4.28 du paragraphe 4.4.2.2 de la norme NF EN 1998-1 : 2005 peut être appliquée afin de s'assurer que les effets du second ordre ne doivent pas être pris en compte dans les calculs.

Note : Cette formule doit être utilisée en découpant, le cas échéant, l'équipement en tronçons assimilés aux « étages » tels que spécifiés dans le paragraphe 4.4.2.2 de la norme NF EN 1998-1 : 2005 »

Lorsque les effets du second ordre doivent être considérés, une méthode de calcul non linéaire doit être mise en œuvre (voir le paragraphe 5.3.1.1 du DT 106).



Figure 2.1

Mode de défaillance	Lorsque la fréquence propre fondamentale est calculée (Note 1)			En l'absence de calcul de la fréquence propre fondamentale (Note 1)		
	E1	E2	E3	E1	E2	E3

Déformation excessive	H	3	2	1	3	2	1
	V	1,5 Note 4	1,5 Note 4	1	1,5 Note 4	1,5 Note 4	1
Flambement élastique et Flambement élastoplastique	H	1 à 1,5 Note 3	1 à 1,5 Note 3	1	1 à 1,5 Note 3	1 à 1,5 Note 3	1
	V	1 à 1,5 Note 3	1 à 1,5 Note 3	1	1 à 1,5 Note 3	1 à 1,5 Note 3	1

Note 1 : Ces coefficients doivent être utilisés pour établir un spectre réduit conformément à la procédure définie par la référence [27].

Note 2 : Coefficients de comportement globaux à appliquer aux efforts résultant d'un calcul linéaire

Note 3 : Si et seulement si justifié par d'autres mécanismes que le comportement ductile du matériau de l'équipement (voir §1.3.6 Note 2)

Note 4 : Une valeur supérieure peut être utilisée sous réserve de justification appropriée

Figure 2.2 : Coefficient de comportement – Coefficient de réduction

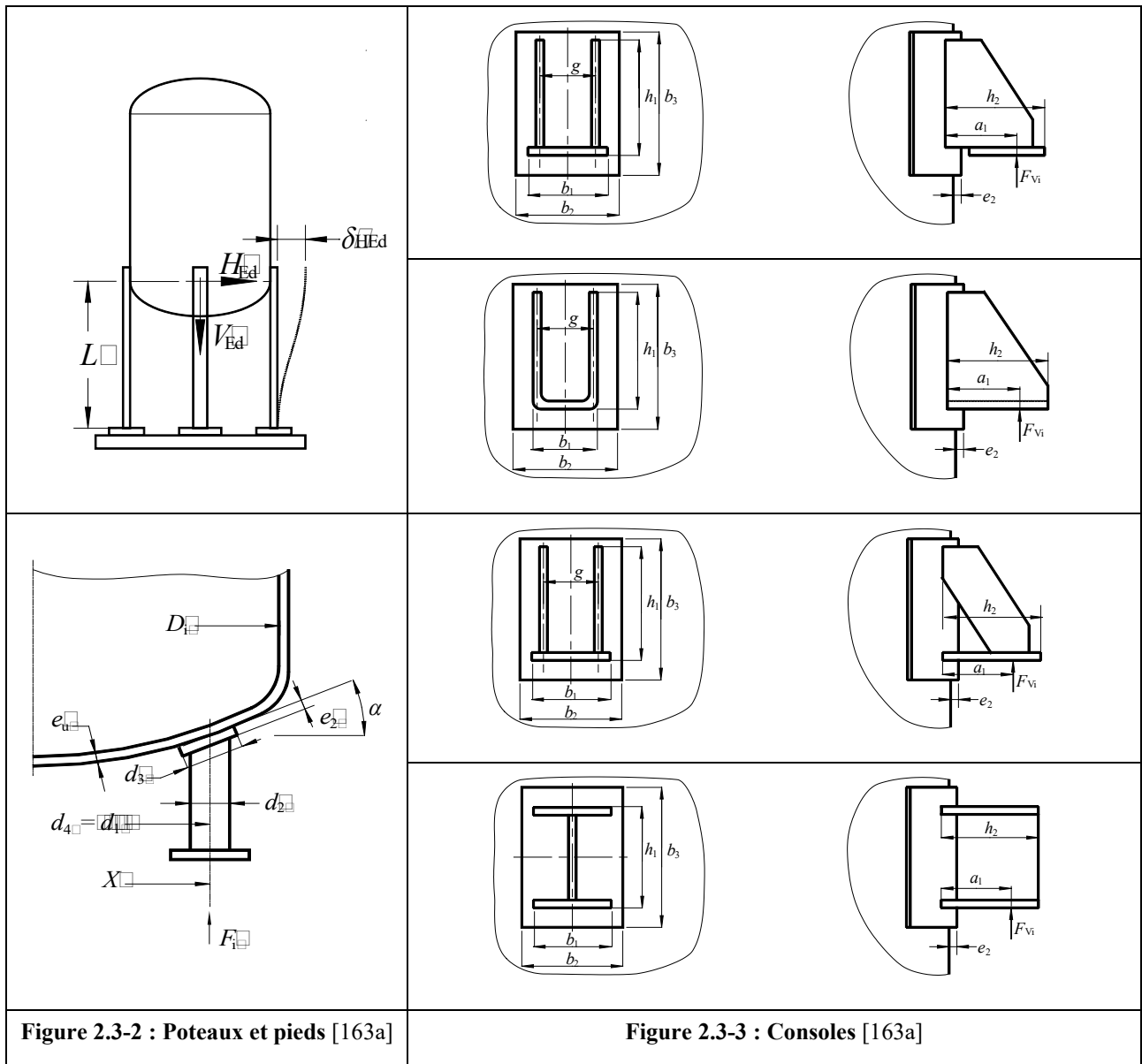
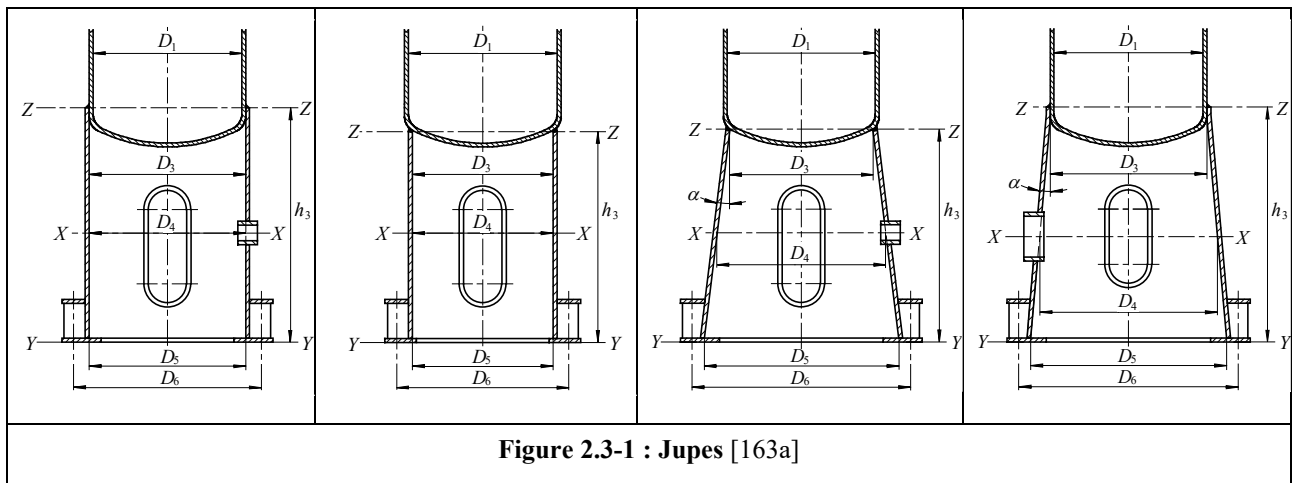




Figure 2.4

**[64] Cheminée d'acierie -JF Steel Sendai
Séisme de Tohoku, Magnitude 9 Japon 2011**



Figure 2.5 - Tour de refroidissement de cimenterie - Seisme de Maule, Magnitude 8.8, Chili 2010 [111]



Figure 2.6 - Industrie papetière / Tour de blanchiment - Séisme de Maule, Magnitude 8,8 Chili 2010 [112]

2.2 - Estimation de la réponse sismique à partir de calculs analytiques (Procédure 1)

En dehors de quelques cas simples (Équipement de section droite constante sans charge localisée) qui peuvent être traités à partir de formules simples [96], le comportement des équipements couverts par le présent chapitre peut être évalué à partir des procédures analytiques spécifiées Figure 2-5-2.7 pour ce qui est de la détermination des fréquences fondamentales et de la détermination des efforts dus au séisme et Figure 2-6-2.8 pour ce qui est du calcul des contraintes et de l'évaluation finale de l'équipement [95], [172], [173].

Ces procédures ne permettent pas de prendre en compte l'éventuelle interaction sol-structure, situation pour laquelle il convient de se reporter à la méthodologie précisée au § 2.4.

Ces procédures sont illustrées au § 2-5-2.4 par le cas d'une colonne sur jupe (Figures 2-9-2.16 & 2-10-2.17 et 2° Partie de l'Annexe 2).

Équipement	Période(s) / Fréquence(s) (Voir note 1)	Efforts sismiques
sur jupe cylindrique	[95] Figure 4-6 (c) & Annexe 2 du présent guide	[95] Procédures 4-8
sur jupe conique	-	[95] Procédures 4-9
sur poteaux sans contreventement	[95] Figure 4-6 (d)	[95] Procédures 4-4
sur poteaux avec contreventement	[95] Figure 4-6 (h)	[95] Procédures 4-5
sur couronne	-	[95] Procédure 4-6
sur consoles	-	[95] Procédure 4-7
Note 1 : Il est toujours possible d'éviter de déterminer la fréquence fondamentale de l'équipement, sous réserve de déterminer les efforts sismiques à partir des accélérations maximales définies par les spectres applicables.		
Note 2 : La masse de produit contenu dans l'équipement prise en compte dans les calculs doit être celle qui, compte tenu de la fréquence correspondante, conduit à la situation la plus pénalisante.		
Figure 2.7		

Équipement	Calcul des contraintes & évaluation de l'équipement [163a] ou [169]	
sur jupe	Chapitre C9.7 (Jupe) Annexe C9.A12 (Note) Annexe C9.A7 (Ouverture)	Clause 16.12
sur poteaux	Chapitre C9.9	Clause 16.11
sur couronne	-	Clause 16.13
sur consoles	Chapitre C9.4	Clause 16.10
Note : Cette annexe permet de déterminer les contraintes de compression admissibles. À cet effet il est aussi acceptable de se reporter aux propositions de la référence [167] qui conduisent à des résultats pratiquement identiques.		
Figure 2.8		

2.3 - Détermination de la réponse sismique à l'aide de modèles numériques (Procédure 2)

Lorsque les calculs analytiques s'avèrent insuffisants pour représenter correctement le comportement de l'équipement ou lorsque les résultats obtenus paraissent excessivement conservatifs il est possible d'évaluer les efforts dus au séisme à partir d'un modèle « éléments finis poutre » [99] [150].

Ce type de modèle permet de prendre en compte l'interaction sol-structure éventuelle (Figure 2.11 & [79]) et éventuellement l'influence d'une tuyauterie raccordée à l'équipement (Figure 2.13).

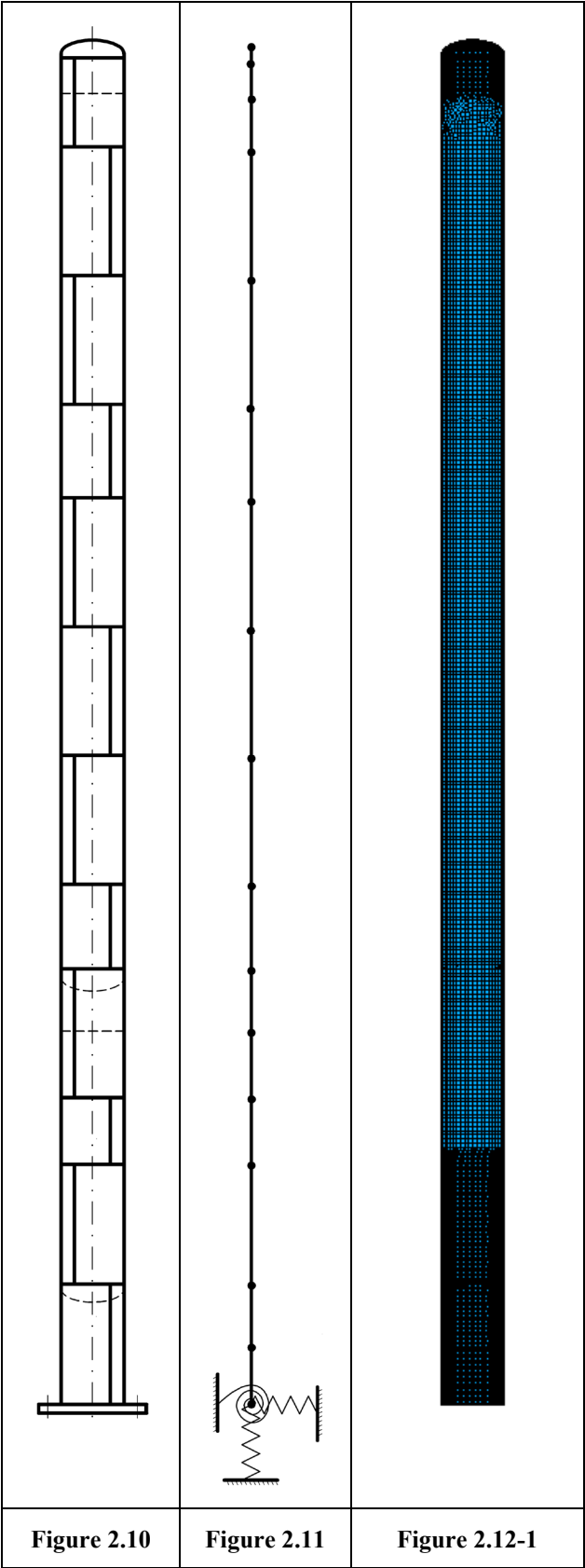
La détermination des efforts sismiques peut être réalisée soit à partir d'un calcul quasi-statique soit à partir d'un calcul spectral utilisant les spectres de réponse sismiques (voir aussi § 1.3.7) ou encore de méthode type « push over » [172].

Enfin, notamment dans le cas d'efforts sur tubulures importants, il est toujours possible de réaliser une étude sismique à partir d'un modèle « éléments finis coque » ([172] et Figure2.12-1 à Figure2.12-3) les contraintes admissibles restant toutefois inchangées.

Cette procédure est illustrée au § 2.5-2.4 par le cas d'une colonne sur jupe (Figures 2.16 & 2.17).



Figure 2.13



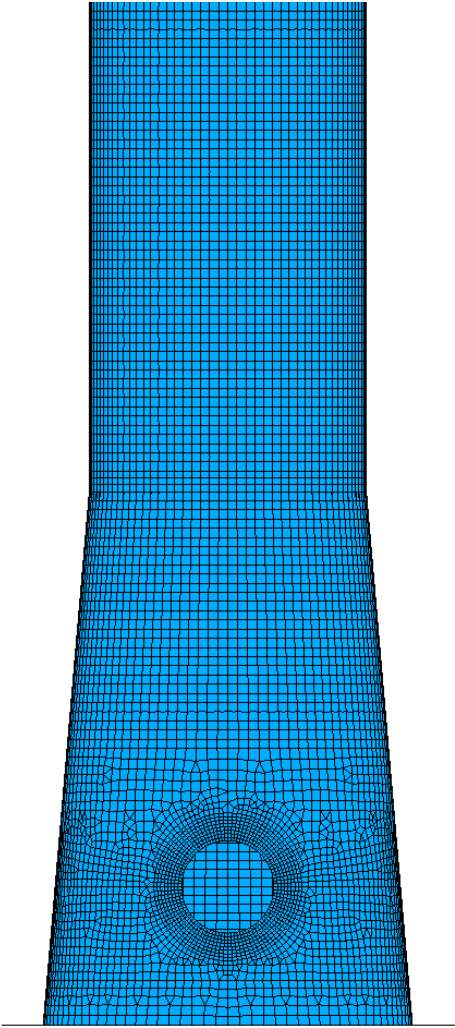
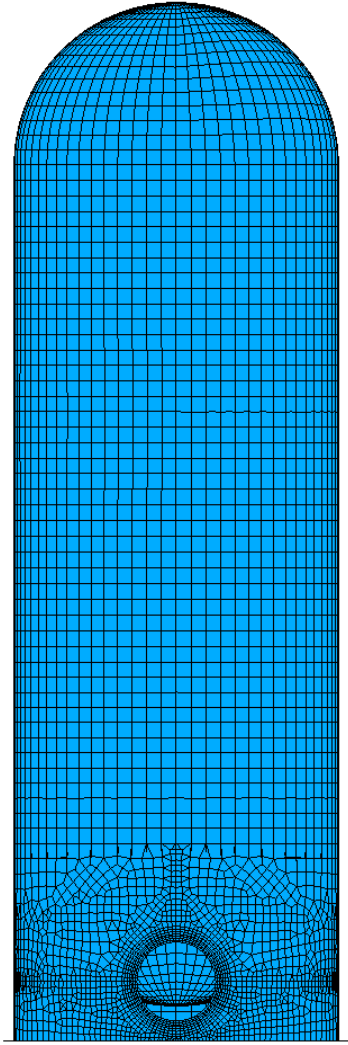
	
<p>Notes relatives à la modélisation éléments finis :</p> <p>Pour la jonction entre la platine d'ancrage et la jupe de la colonne, ainsi que pour la liaison entre la jupe et la colonne : maillage de type quadrangle régulier de taille approximativement égale à $1/20^{\text{ème}}$ du périmètre du réservoir pour la largeur et de dimension approximativement identique pour la hauteur</p> <p>Puis pour les zones courantes : maillage de transition de taille approximativement entre $1/20^{\text{ème}}$ et $1/5^{\text{ème}}$ du périmètre de l'appareil pour la largeur et de dimension approximativement identique pour la hauteur</p>	
Figure 2.12-2	Figure 2.12-3



Figure 2.14-1

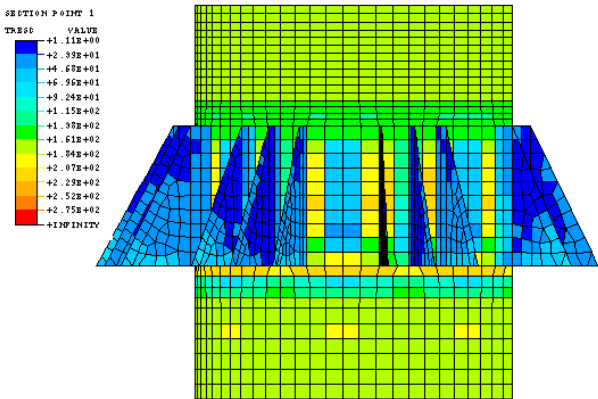


Figure 2.14-2

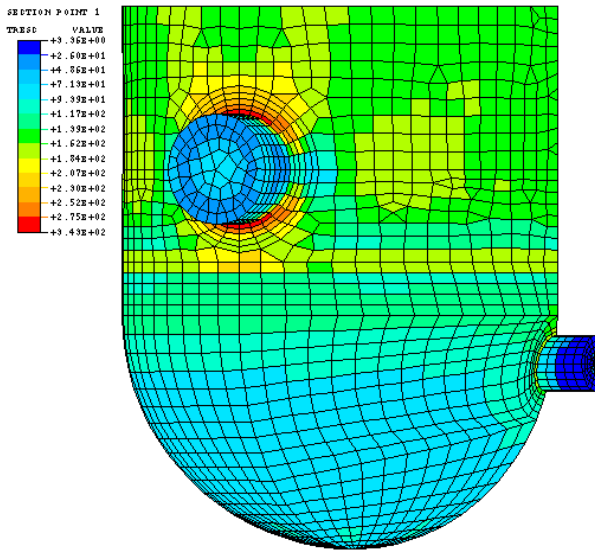


Figure 2.14-3



Figure 2.15-1

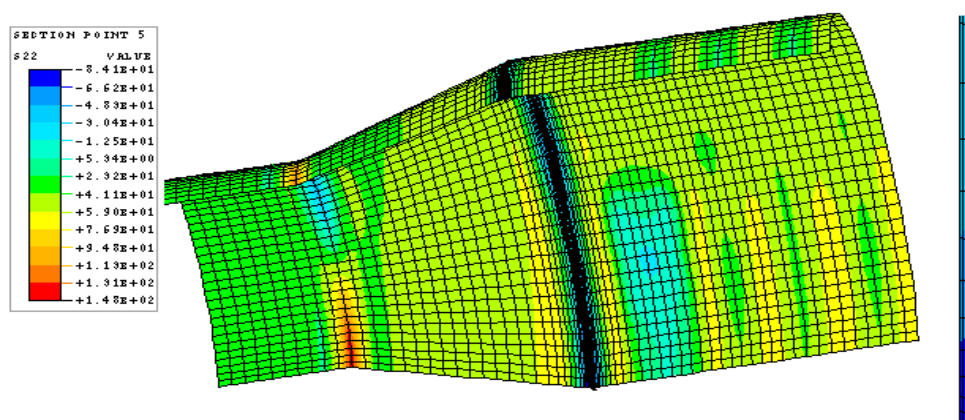
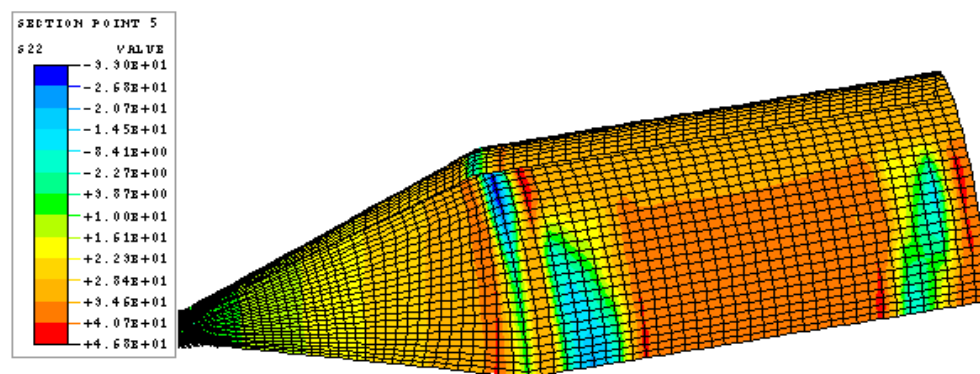
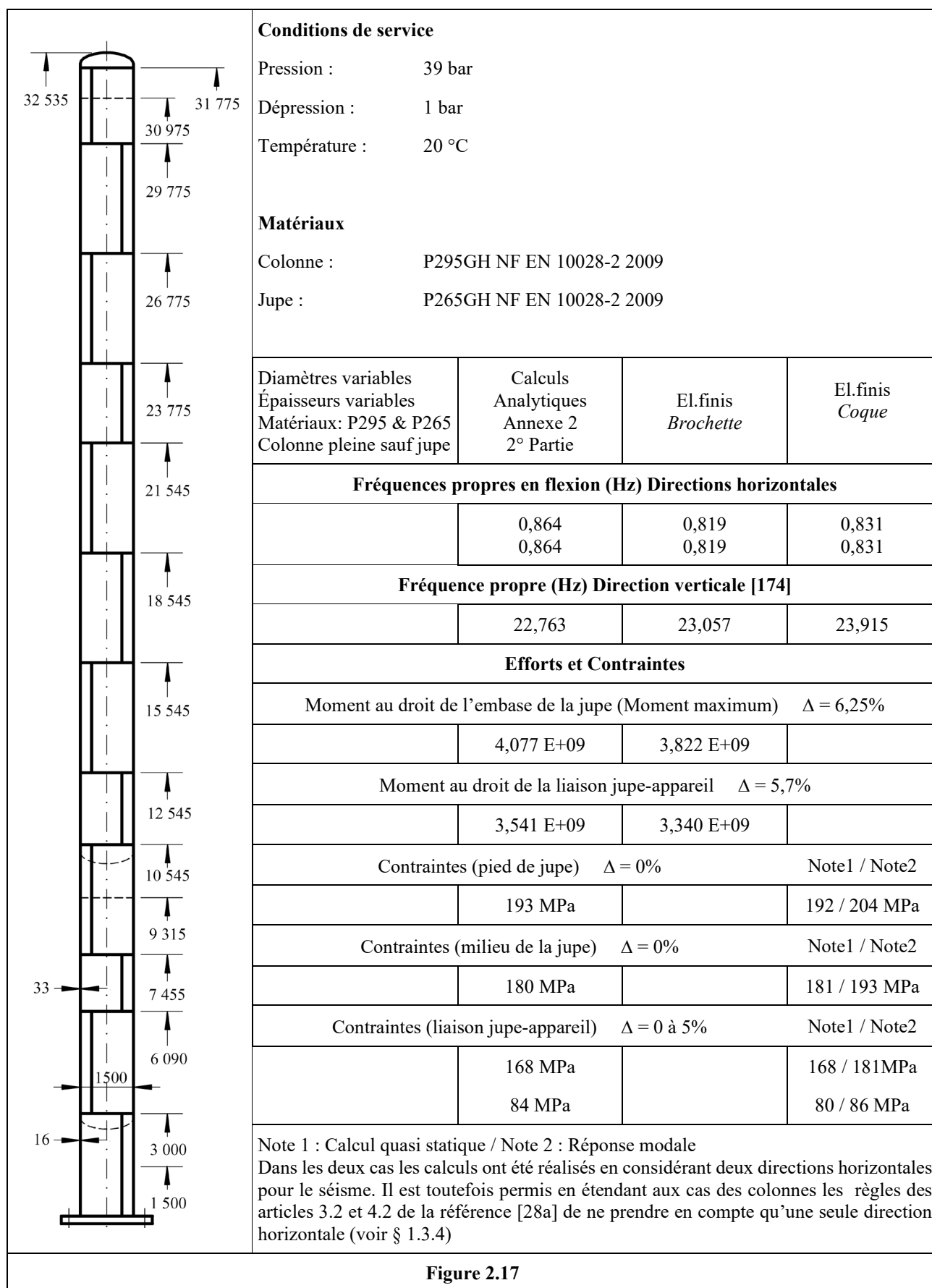


Figure 2.15-2 & 2.15-3

2.4 - Exemple

	Conditions de service				
	Pression : 39 bar				
	Dépression : 1 bar				
	Température : 20 °C				
	Matériaux				
	Colonne : P295GH NF EN 10028-2 2009				
	Jupe : P265GH NF EN 10028-2 2009				
	Fréquence propre en flexion (Hz) Direction horizontale				
		Formule	Calculs Analytiques	El.finis Brochette	El.finis Coque
	Diamètre constant Épaisseur constante = 33 mm Matériau identique : P295 Colonne vide	1,441	1,477	1,440	
	Diamètre constant Épaisseur constante = 33 mm Matériau identique : P295 Colonne pleine d'eau	0,927	0,950	0,927	
	Diamètres variables Épaisseurs variables Matériaux: P295 & P265 Colonne pleine sauf jupe	-	0,864 Annexe 1 2° Partie	0,819 (Note 1)	0,831 (Note 2)
	Diamètres variables Épaisseurs variables Matériaux: P295 & P265 Colonne pleine sauf jupe Interaction Sol-Équipement (Note 3) $k_y = 7.000E+08 \text{ N/m}$ $k_{mx} = 1.000E+11 \text{ N.m/rad}$	-	-	0,815 0,819	
	$k_y = 7.000E+07 \text{ N/m}$ $k_{mx} = 1.000E+10 \text{ N.m/rad}$	-	-	0,776 0,819	
	Diamètres variables Épaisseurs variables Matériaux: P295 & P265 Colonne pleine sauf jupe + Tuyauterie (voir Figure 2.10)	-	-	0,787 0,828	0,879 0,902
Note 1 Voir comparaison des efforts Figure 2.17					
Note 2 Voir comparaison des contraintes Figure 2.17					
Note 3 Voir [79]					

Figure 2.16



3 - BALLONS ET RESERVOIRS HORIZONTAUX, REACTEURS HORIZONTAUX ET ECHANGEURS TUBULAIRES HORIZONTAUX

3.1 - Introduction

Le présent chapitre propose deux procédures d'évaluation du comportement sismiques applicables aux ballons, réservoirs et réacteurs horizontaux (Figures 3.2 à 3.6) ainsi qu'aux échangeurs tubulaires horizontaux (Figures 3.8 à 3.13).

Pour les équipements sous talus (Figure 3.7), exclus du présent guide, il convient de se reporter aux documents spécifiques [161] [177].

Mode de défaillance		Lorsque la fréquence propre fondamentale est calculée (Note 1)			En l'absence de calcul de la fréquence propre fondamentale (Note 2)		
		E1	E2	E3	E1	E2	E3
Déformation excessive	H	3	2	1	3	2	1
	V	1,5 Note 4	1,5 Note 4	1	1,5 Note 4	1,5 Note 4	1
Flambement élastique et flambement élastoplastique	H	1 à 1,5 Note 3	1 à 1,5 Note 3	1	1 à 1,5 Note 3	1 à 1,5 Note 3	1
	V	1 à 1,5 Note 3	1 à 1,5 Note 3	1	1 à 1,5 Note 3	1 à 1,5 Note 3	1

Note 1 : Ces coefficients doivent être utilisés pour établir un spectre réduit conformément à la procédure définie par la référence [27].

Note 2 : Coefficients de comportement globaux à appliquer aux efforts résultant d'un calcul linéaire

Note 3 : 1,5 si et seulement si justifié par d'autres mécanismes que le comportement ductile du matériau (voir §1.3.6 Note 2)

Note 4 : Une valeur supérieure peut être utilisée sous réserve de justification appropriée

Figure 3.1 : Coefficient de comportement – Coefficient de réduction



Figure 3.2



Figure 3.3



Figure 3.4 [97]



Figure 3.5



Figure 3.6



Figure 3.7



Figure 3.8



Figure 3.9



Figure 3.10



Figure 3.11

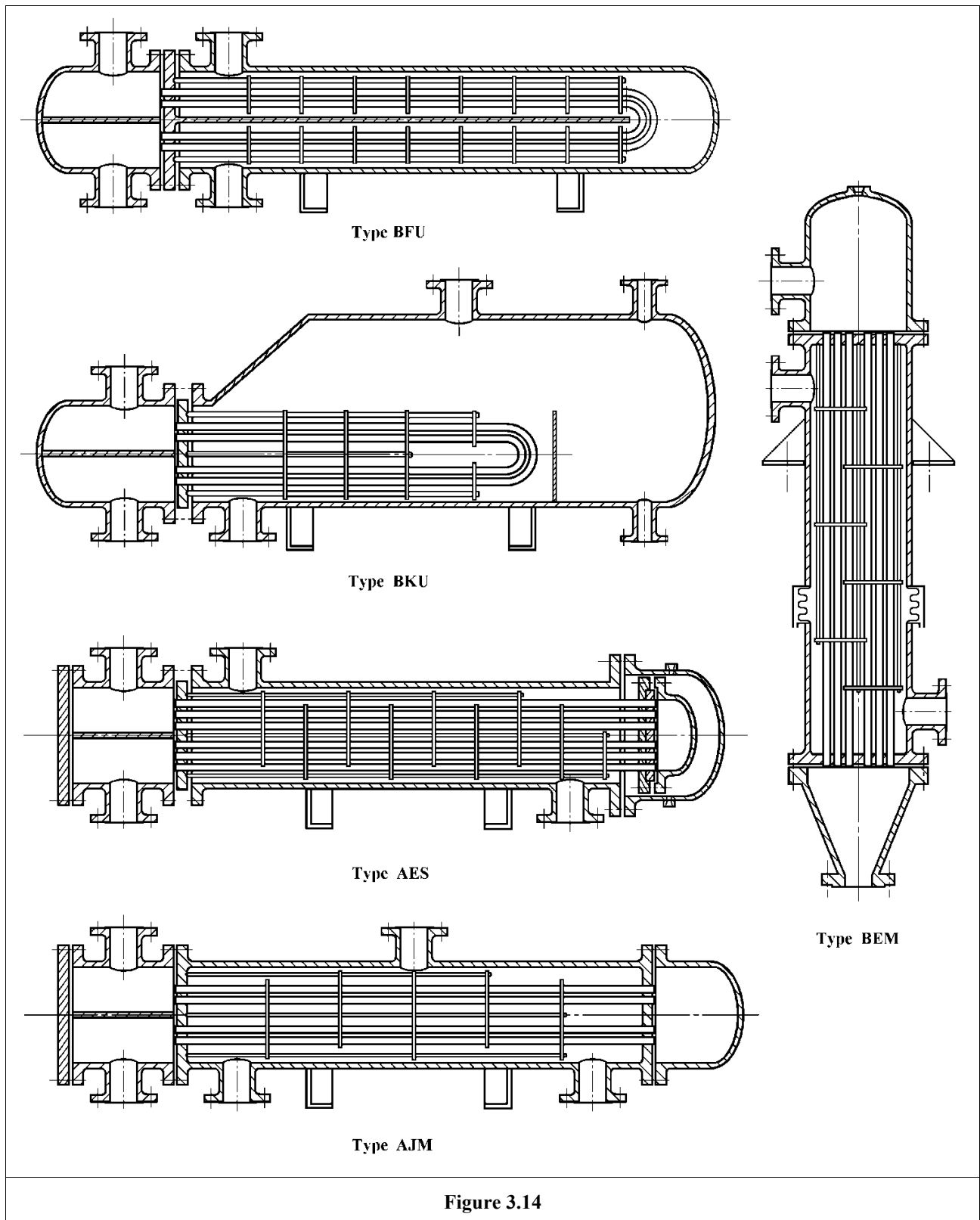




Figure 3.15 - Échangeur
Séisme de Marmara, Magnitude 7.4
Izmit Turquie 1999
[105] Endommagement du support « fixe »

3.2 - Estimation de la réponse sismique à partir de calculs analytiques

3.2.1 - Calculs analytiques simplifiés (utilisation d'abaques) [138] & [100] (Procédure 1)

Cette procédure permet d'évaluer le comportement sismique des ballons, réservoirs et réacteurs horizontaux ainsi que des échangeurs tubulaires horizontaux en service. Cette procédure, résumée dans l'organigramme Figure 3.16-3.17 ci-après et détaillée en 1^oPartie de l'Annexe 3, est illustrée par un exemple en 2^oPartie de l'Annexe 3.

Cette procédure suppose que l'équipement considéré a été réalisé conformément aux exigences d'un référentiel technique reconnu [186], [163] et respecte le domaine d'application défini Figure 3.16.

Cette procédure permet de vérifier que les ancrages ainsi que les supports ont une résistance suffisante et que les contraintes circonférentielles maximales en tête de berceaux sont acceptables.

-	-	Matériau (équipement et supports)	Acier au carbone
d_i	=	Diamètre intérieur de l'équipement	$300 \text{ mm} \leq d_i \leq 4\,250 \text{ mm}$
$l_{\text{réservoir}}$	=	Longueur totale de l'équipement	$1\,250 \text{ mm} \leq l_{\text{réservoir}} \leq 18\,250 \text{ mm}$

h_{cg}	=	Altitude du centre de gravité de l'ensemble équipement + fluide	$300 \text{ mm} \leq h_{cg} \leq 3\,500 \text{ mm}$
----------	---	---	---

n_{supports}	=	Nombre de supports	$2 \leq n_{\text{supports}} \leq 6$
d_{supports}	=	Distance entre les supports	$900 \text{ mm} \leq d_{\text{supports}} \leq 6\,000 \text{ mm}$
$d_{\text{ext_supports}}$	=	Distance entre l'extrémité de l'équipement et le premier support	$a \leq d_{\text{supports}} / 2$
n_{files}	=	Nombre de files de boulons d'ancrage	$n_{\text{files}} = 2 \text{ ou } 3$
n_{ancrages}	=	Nombre de boulons d'ancrage par file	$n_{\text{ancrages}} = 1 \text{ ou } 2$
$dist_{\text{ancrages}}$	=	Distance entre les ancrages les plus éloignés d'une même embase	$300 \text{ mm} \leq dist_{\text{ancrages}} \leq 3\,500 \text{ mm}$

$M_{\text{dsv_réservoir}}$	=	Masse volumique (Réservoir + fluide)	$950 \text{ kg/m}^3 \leq M_{\text{dsv_réservoir}} \leq 1\,200 \text{ kg/m}^3$
$M_{\text{dsv_échangeur}}$	=	Masse volumique (Échangeur + fluide)	$2\,000 \text{ kg/m}^3 \leq M_{\text{dsv_échang}} \leq 2\,900 \text{ kg/m}^3$

Note 1 : Dans le cadre de la présente procédure, l'équipement est considéré comme totalement rempli de liquide de densité 1.

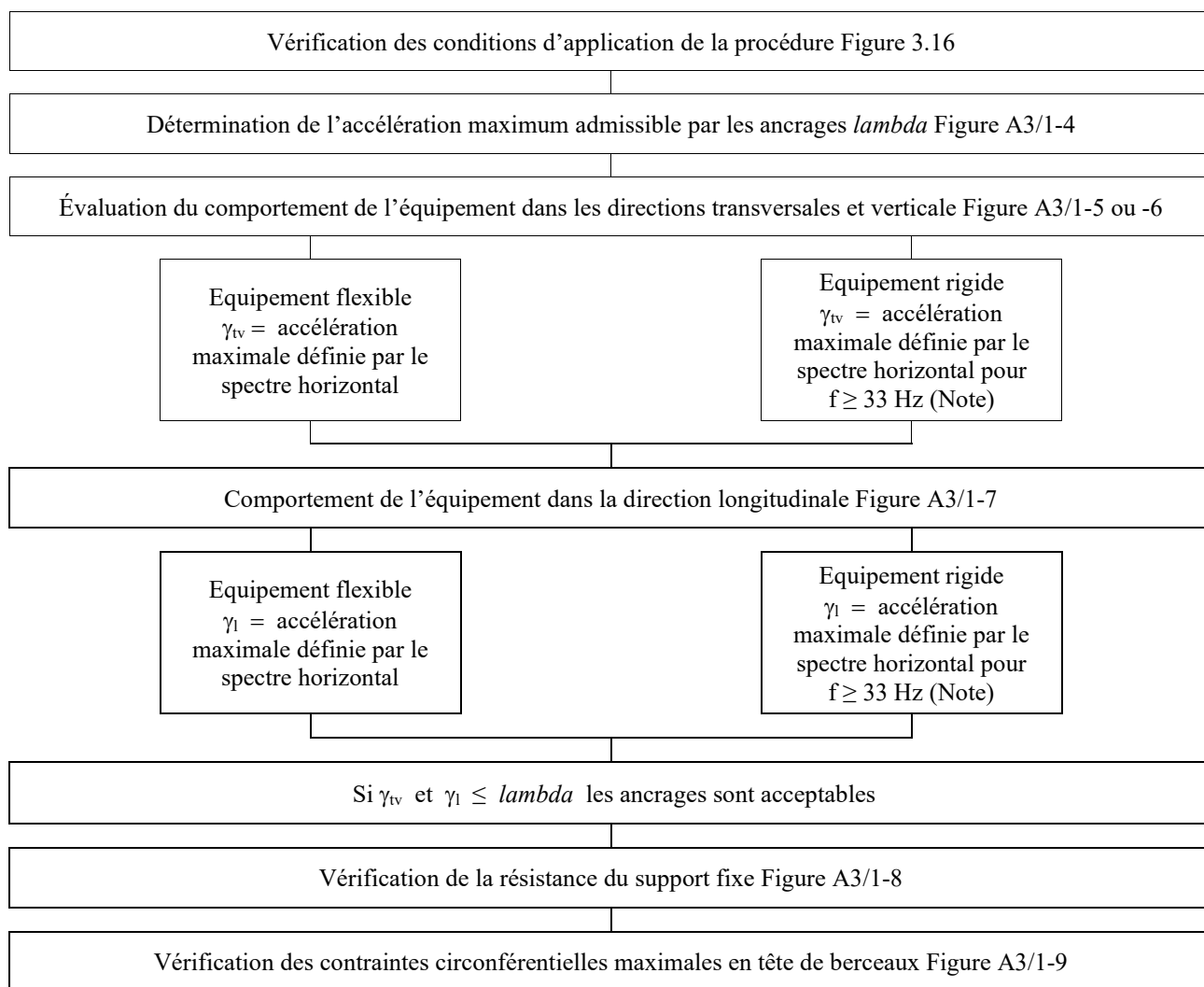
$150 \leq h_{cg} / d_{\text{supports}} \leq 600$	$150 \leq h_{cg} / dist_{\text{ancrages}} \leq 600$
--	---

Dans le cas de supports multiples, les distances entre supports doivent être sensiblement identiques.

Toutes les embases, à l'exception de l'une de celles d'extrémité (support fixe), doivent être pourvues de trous oblongs pour la boulonnerie afin de permettre la libre dilatation de l'appareil dans le sens de la longueur

Les embases des supports « déplaçables » dans le sens longitudinal doivent être pourvues de butées dans le sens transversal (Annexe 6 pour la détermination des efforts sur ces butées).

Figure 3.16 Domaine d'application de la Procédure 1



Note : Cette valeur peut être réduite à la valeur de la fréquence au-delà de laquelle il n'y a aucune amplification dynamique significative.

Figure 3.17

3.2.2 - Calculs analytiques complet (**Procédure 2**)

Cette procédure permet d'évaluer le comportement sismique des ballons, réservoirs et réacteurs horizontaux ainsi que des échangeurs tubulaires horizontaux neufs ou en service.

Cette procédure suppose que l'équipement considéré a été réalisé conformément aux exigences d'un référentiel technique reconnu [186], [163].

Cette procédure permet de vérifier l'ensemble des contraintes critique dans l'enveloppe de l'équipement ainsi le comportement des berceaux assurant le supportage de l'équipement.

Note : Les conditions d'exploitation notamment le taux de remplissage pour lequel la vérification est réalisée doivent être définies par l'exploitant

- 1/ Détermination des périodes impulsive et convective et des masses associées [28a], [92] & [69]
- 2/ Détermination des réactions au droit des supports [92 & 95b Procédure 4-10]
- 3/ Détermination et vérification des contraintes dans le réservoir et son supportage [95b Procédures 4-10 et 4-11]

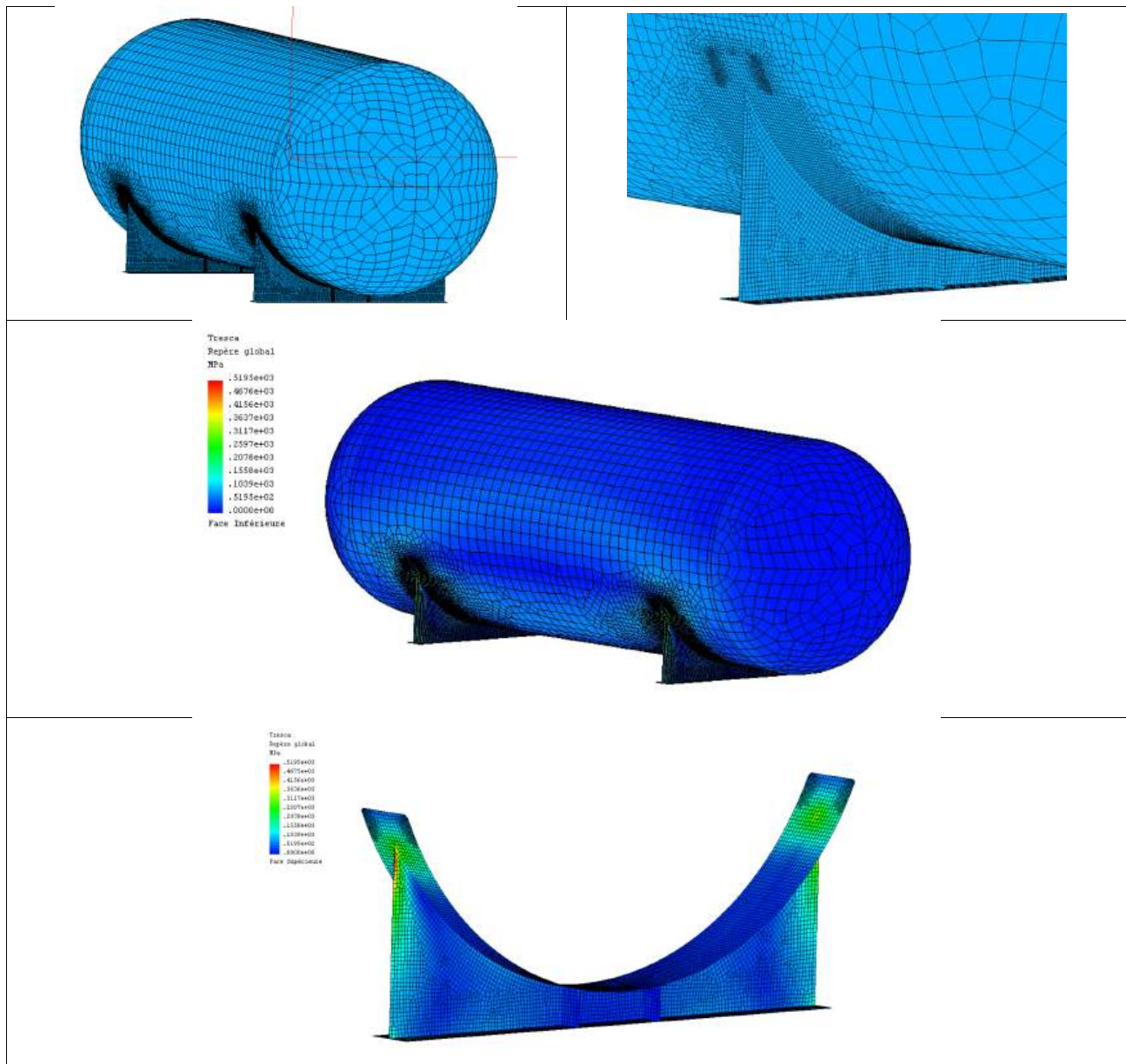
3.3 - Détermination de la réponse sismique à l'aide de modèles numériques (Procédure 3)

Lorsque les conditions d'application de la procédure analytique ne sont pas respectées, il est possible d'évaluer les efforts dus au séisme à partir d'un modèle éléments finis « coque » ([28 §A5], [91], [92] et § 1.3.7 du présent guide) réalisé conformément aux recommandations spécifiées Figure 3.18.

La détermination des efforts sismiques peut être réalisée soit à partir d'un calcul quasi-statique soit à partir d'un calcul spectral utilisant les spectres de réponse sismiques ou encore de méthode type « push over » [172].

Note 1 : Les conditions d'exploitation notamment le taux de remplissage pour lequel la vérification est réalisée doivent être définies par l'exploitant.

Note 2 : Dans l'hypothèse d'un réservoir partiellement rempli la modélisation peut tenir compte de la répartition des masses (masse impulsive et masse convective) et des accélérations correspondant aux fréquences associées [28a], [92] & [69].



Notes relatives à la modélisation éléments finis :

Pour les berceaux (semelle, âme, renforts et doublante) : maillage de type quadrangle le plus régulier possible, de taille approximativement égale à 1/50^{ème} du périmètre de l'appareil

Pour la jonction entre l'âme du berceau et la doublante et la zone de jonction entre la doublante et le réservoir: maillage de type quadrangle régulier de taille approximativement égale à 1/50ème du périmètre du réservoir pour la largeur et de dimension approximativement identique pour la hauteur

Puis pour les zones courantes : maillage de transition de taille approximativement entre 1/50ème et 1/5ème du périmètre de l'appareil pour la largeur et de dimension approximativement identique pour la hauteur

Figure 3.18

4 - RESERVOIRS SPHERIQUES

4.1 - Introduction

Le présent chapitre propose une première procédure analytique d'évaluation du comportement sismique applicable aux sphères aériennes ou sous talus supportées par des poteaux, ainsi qu'une deuxième procédure utilisant des modèles éléments finis permettant de traiter ces mêmes sphères ainsi que les sphères sur jupe [109], [172], [182], [176], [181], [162], [185] et [54], [95b], [139].

Afin de bénéficier des capacités de dissipation des tirants par déformation plastique, il convient au préalable de vérifier l'intégrité de la jonction entre la tête des poteaux et le tirant.

Mode de défaillance		Poteaux non contreventés (Note 1)			Poteaux contreventés (Note 1)		
		E1	E2	E3	E1	E2	E3
Déformation excessive	H	2,0 Note 5	2,0 Note 5	1	2,5 Note 5 Note 3	2,0 Note 5 Note 2	1
	V	1,5 Note 4	1,5 Note 4	1	1,5 Note 4	1,5 Note 4	1
Flambement élastique et élastoplastique (Note 6)	H	1	1	1	2,0 Note 2	2,0 Note 2	1
	V	1	1	1	1	1	1

Note 1 : Ces coefficients doivent être utilisés pour établir un spectre réduit conformément à la procédure définie par la référence [27].
Note 2 : Plastification des tirants, et uniquement des tirants, requise.
Note 3 : Plastification des tirants requise et éventuellement plastification limitée des têtes de poteaux permise
Note 4 : Une valeur supérieure peut être utilisée sous réserve de justifications appropriées
Note 5 : D'autres valeurs sont données par les références [179] et [182] et peuvent être utilisées sous réserve de justifications appropriées
Note 6 : Il s'agit ici du voilement (instabilité) en coque des poteaux supportant la sphère. L'enveloppe de la sphère, dimensionnée pour résister à la pression, ne présentera pas de risques de flambement.

Figure 4.1 : Coefficient de comportement - Coefficients de réduction



Figure 4.2



Figure 4.3



**Figure 4.4 : Instabilité (Flambement) des poteaux de supportage d'une sphère
[64] Séisme de Tohoku, Magnitude 9 Japon 2011**

4.2 - Estimation de la réponse sismique à partir de calculs analytiques (Procédure 1)

Cette procédure analytique, détaillée en **1^oPartie de l'Annexe 4**, permet de déterminer les fréquences fondamentales de l'équipement et de calculer et d'évaluer les contraintes sismiques dans l'équipement. Cette procédure est illustrée en **2^o Partie de l'Annexe 4** par un exemple complet.

Cette procédure s'applique aux équipements neufs ou en service et suppose que l'équipement considéré a été ou sera réalisé conformément aux exigences d'un référentiel technique reconnu [186], [163].

Le logigramme Figure 4.5-3 correspond aux sphères aériennes supportées par des poteaux non contreventés, celui Figure 4.5-4 correspond aux sphères aériennes supportées par des poteaux contreventés (Figure 4.5-1 et Figure 4.5-2).

Pour les sphères sur jupe, sauf justification particulière de la procédure analytique employée, il convient de se reporter à la procédure 2 du présent chapitre. Pour les sphères, sur poteaux ou sur jupe mais sous talus (Figure 4.3), il convient de se reporter aux documents spécifiques [161] [177].

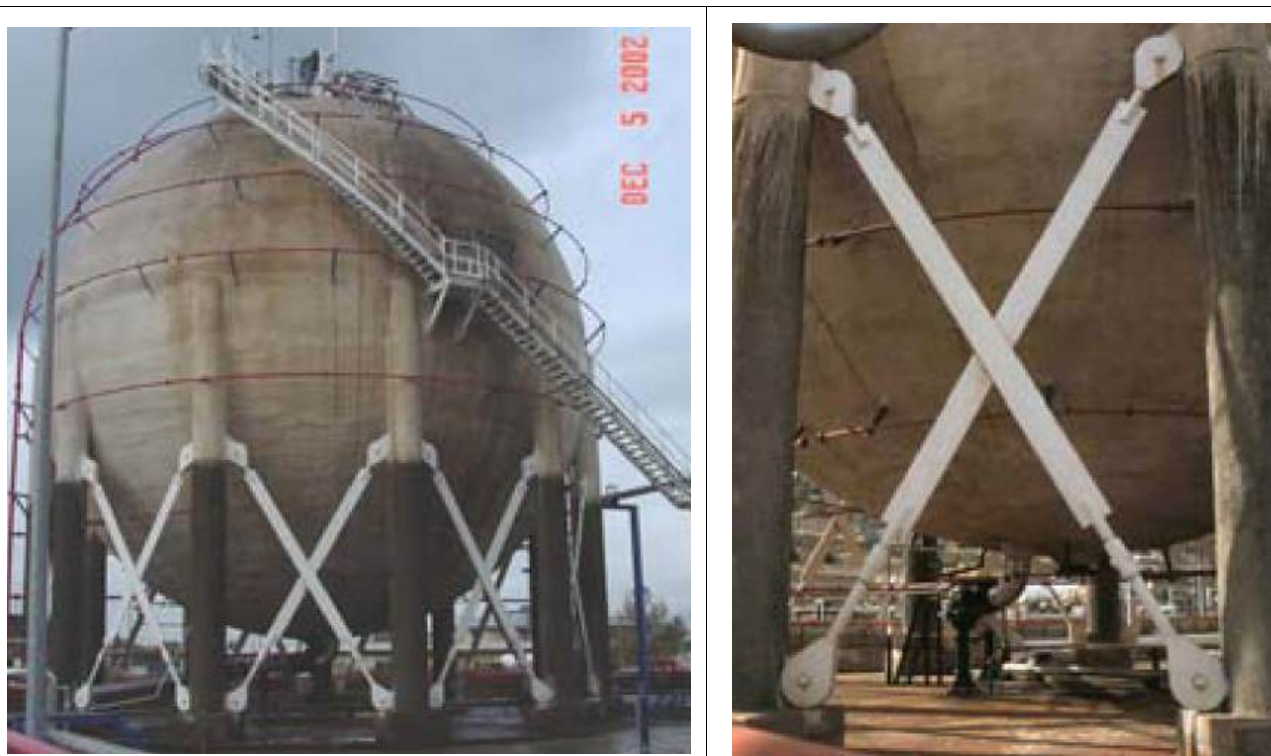


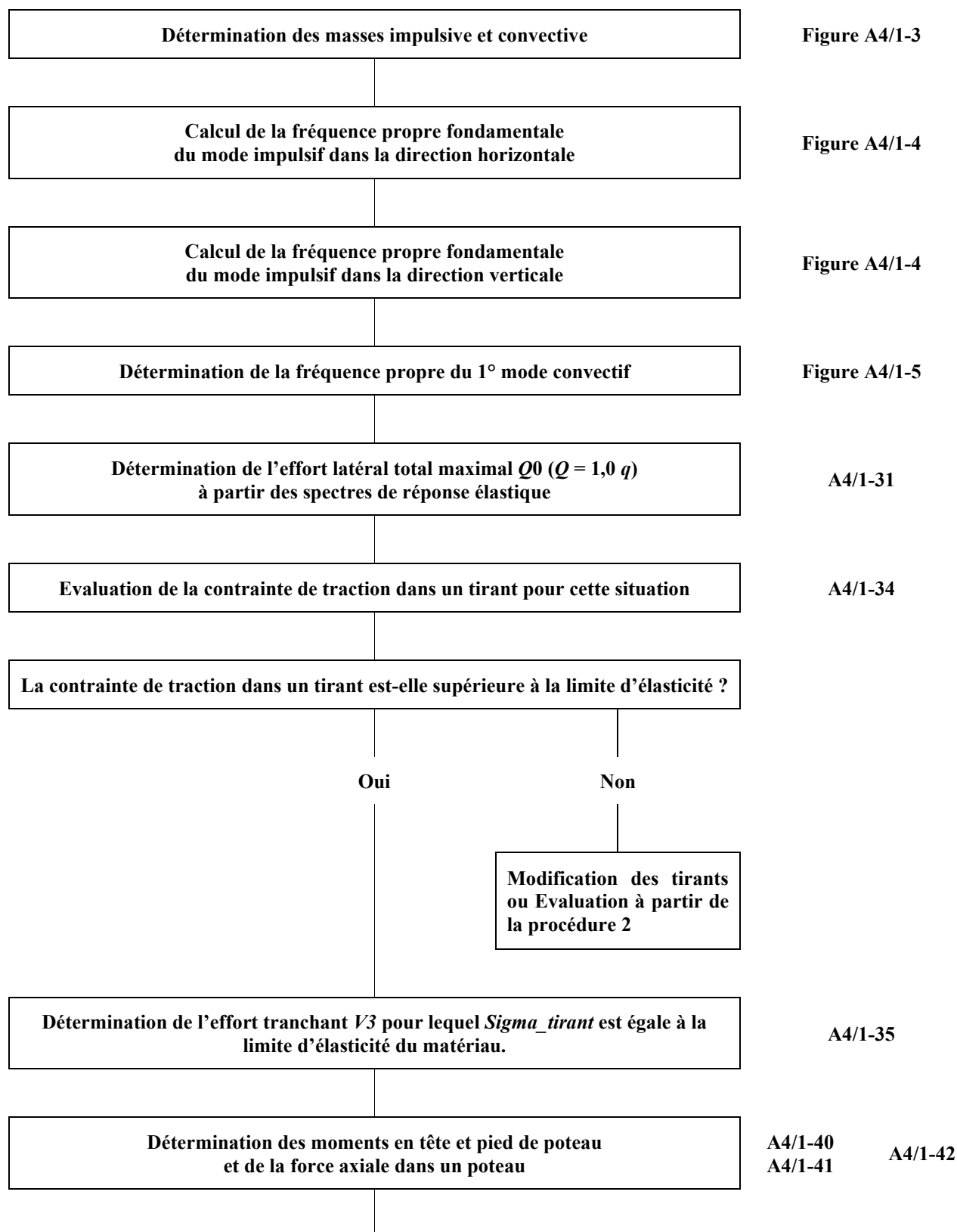
Figure 4.5-1 : Tirants (uniquement destinés à « reprendre » des efforts en traction) [103]

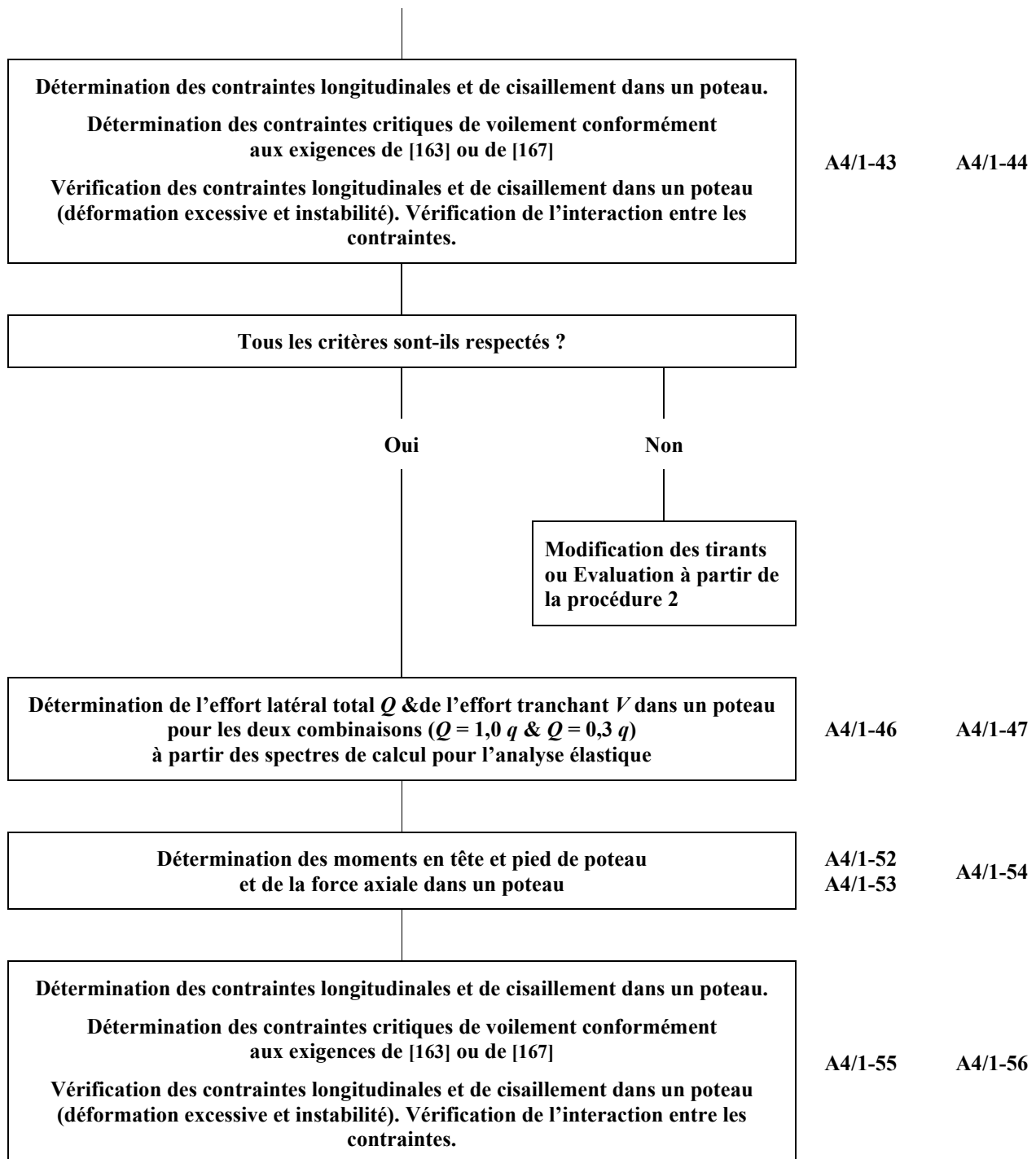


Figure 4.5-3 : Sphère - Poteaux non contreventés : Organisation des calculs

Détermination des masses impulsive et convective	Figure A4/1-3	
Calcul de la fréquence propre fondamentale du mode impulsif dans la direction horizontale	Figure A4/1-4	
Calcul de la fréquence propre fondamentale du mode impulsif dans la direction verticale	Figure A4/1-4	
Détermination de la fréquence propre du 1 ^o mode convectif	Figure A4/1-5	
Détermination de l'effort latéral total Q & de l'effort tranchant V dans un poteau pour les deux combinaisons ($Q = 1,0 q$ & $Q = 0,3 q$)	A4/1-19	A4/1-20
Détermination des moments en tête et pied de poteau et de la force axiale dans un poteau	A4/1-25 A4/1-26	A4/1-27
Détermination des contraintes longitudinales et de cisaillement dans un poteau. Détermination des contraintes critiques de voilement conformément aux exigences de [163] ou de [167] Vérification des contraintes longitudinales et de cisaillement dans un poteau (déformation excessive et instabilité). Vérification de l'interaction entre les contraintes.	A4/1-28	A4/1-29

Figure 4.5-4 : Sphère - Poteaux contreventés : Organisation des calculs

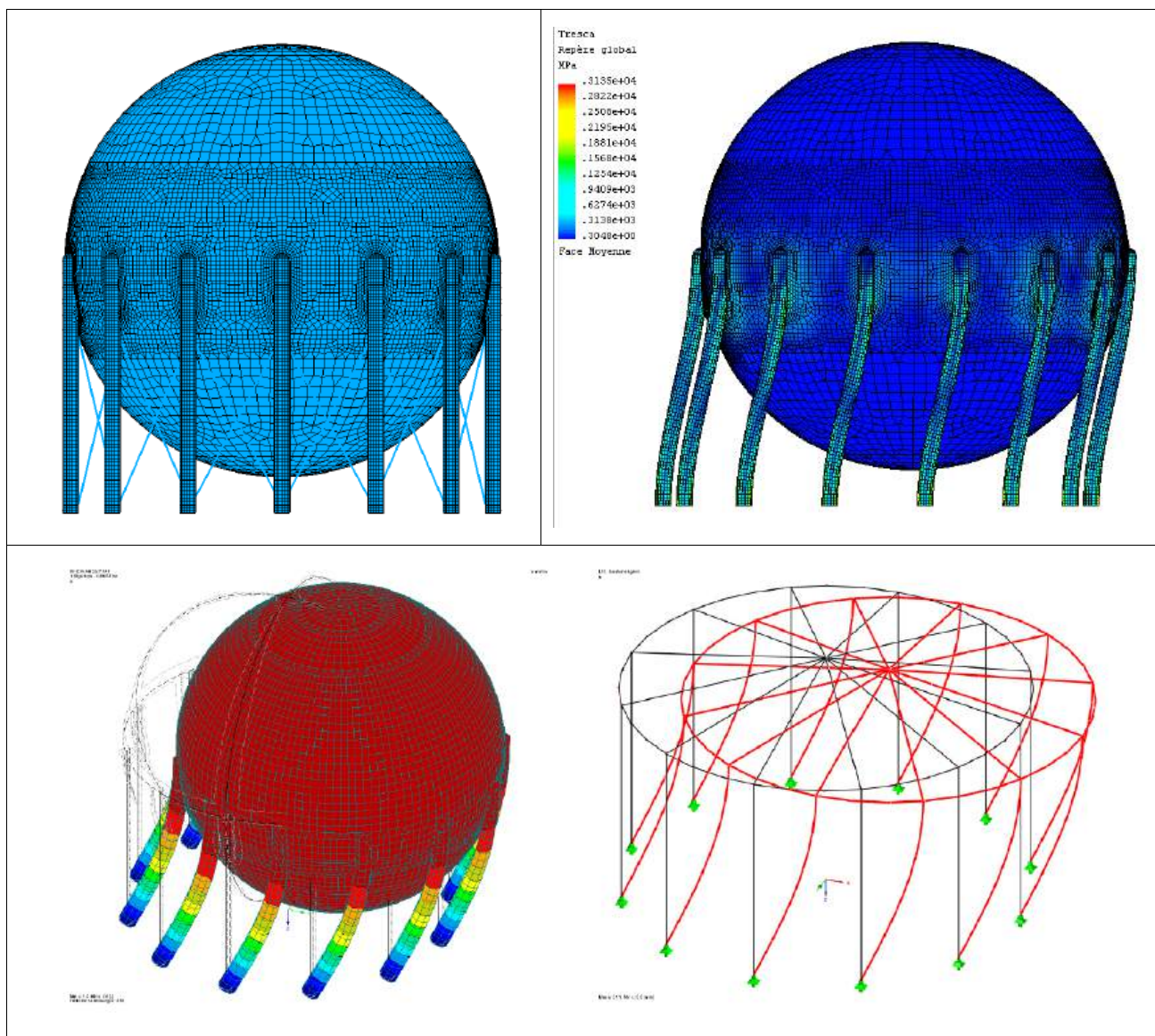




4.3 - Détermination de la réponse sismique à l'aide de modèles numériques (Procédure 2)

Lorsque les conditions d'application de la procédure analytique ne sont pas respectées, il est possible d'évaluer les efforts dus au séisme à partir d'un modèle éléments finis « poutre » ou « coque » ([109] [172] et § 1.3.7 du présent guide) réalisé conformément aux recommandations spécifiées Figure 4.6.

La détermination des efforts sismiques peut être réalisée soit à partir d'un calcul quasi-statique soit à partir d'un calcul spectral utilisant les spectres de réponse sismiques ou encore de méthode type « push over » [172].



Notes relatives à la modélisation éléments finis « coque » :

Pour les poteaux ou la jupe (semelle, âme, partie cylindrique du poteau loin de la liaison avec la sphère) : maillage de type quadrangle le plus régulier possible, de taille approximativement égale à 1/500ème du périmètre de l'appareil

Pour la jonction entre les poteaux ou la jupe et la sphère : maillage de type quadrangle régulier de taille approximativement égale à 1/500ème du périmètre du réservoir pour la largeur et de dimension approximativement identique pour la hauteur sur une longueur d'approximativement 1/100ème du périmètre de l'appareil

Puis pour les zones courantes : maillage de transition de taille approximativement entre 1/500ème et 1/100ème du périmètre de l'appareil pour la largeur et de dimension approximativement identique pour la hauteur

Pour les zones loin des zones d'étude, le maillage peut être moins fin (ex : calotte supérieure s'il n'y a pas d'appareil, d'accessoire ou de tuyauterie dont le comportement peut être significatif)

La raideur des tirant doit être correctement prise en compte à partir d'un modèle poutre suffisamment détaillé.

Figure 4.6

5 - AUTRES EQUIPEMENTS : FOURS, AEROREFRIGERANTS, "BOITES FROIDES", CHAUDIERES

De manière générale les exigences relatives aux **fours** (Figure 5.1 & [155], [182]) devraient se limiter au maintien en place de cet équipement (E1) (OAP) et donc, essentiellement, à la vérification des ancrages de ces équipements.

Toutefois il est rappelé que les équipements destinés au fonctionnement d'un four, notamment les alimentations en combustible peuvent être pleinement concernés par les recommandations du présent guide (ERS).

Pour les fours proprement dits, équipements de type « charpente », il convient donc de se reporter au Guide Structure support [9c] et le cas échéant (Cheminée), au chapitre 2 du présent guide.

La même démarche s'applique aux **aéroréfrigérants** (Figure 5.2 & [137c]) considérés eux aussi comme des éléments de charpente et donc, pour lesquels il convient de se reporter au Guide Structure support [9c]. (OAP)

Pour ce qui est des « **boîtes froides** » (Figure 5.3), si les équipements composants ces ensembles ne sont pas solidaires des charpentes, ils doivent répondre aux exigences du présent guide. Si les équipements sont solidaires des charpentes, il convient alors de se reporter au Guide Structure support [9c].

Pour les **chaudières à tubes de fumée ou à tubes d'eau** (Figures 5.4 & 5.5), l'exigence de maintien en place nécessite de vérifier les supportages notamment à partir des propositions du Guide Structure support [9c] (OAP). Par contre, de même que pour les fours, les équipements destinés au fonctionnement, notamment les alimentations en combustible peuvent être pleinement concernés par les recommandations du présent guide (ERS).

Les équipements sur pesons (Figure 5.6), compte tenu des conditions de fixations, nécessitent en général des études spécifiques (Modèles poutre ou coque).

La fonction d'un peson n'étant pas de résister à une excitation sismique, la conception de l'équipement doit permettre un transfert des efforts sismiques adapté.

Ces travaux nécessitent en général la connaissance des raideurs des équipements de pesage utilisés comme appuis. Ces valeurs sont à recueillir auprès des fournisseurs de ces équipements.



Figure 5.1
Fours [155], [182]



Figure 5.2 : Aéroréfrigérants [137c]



Figure 5.3 : « Boîtes froides »



Figure 5.4 : Chaudières à tubes de fumée

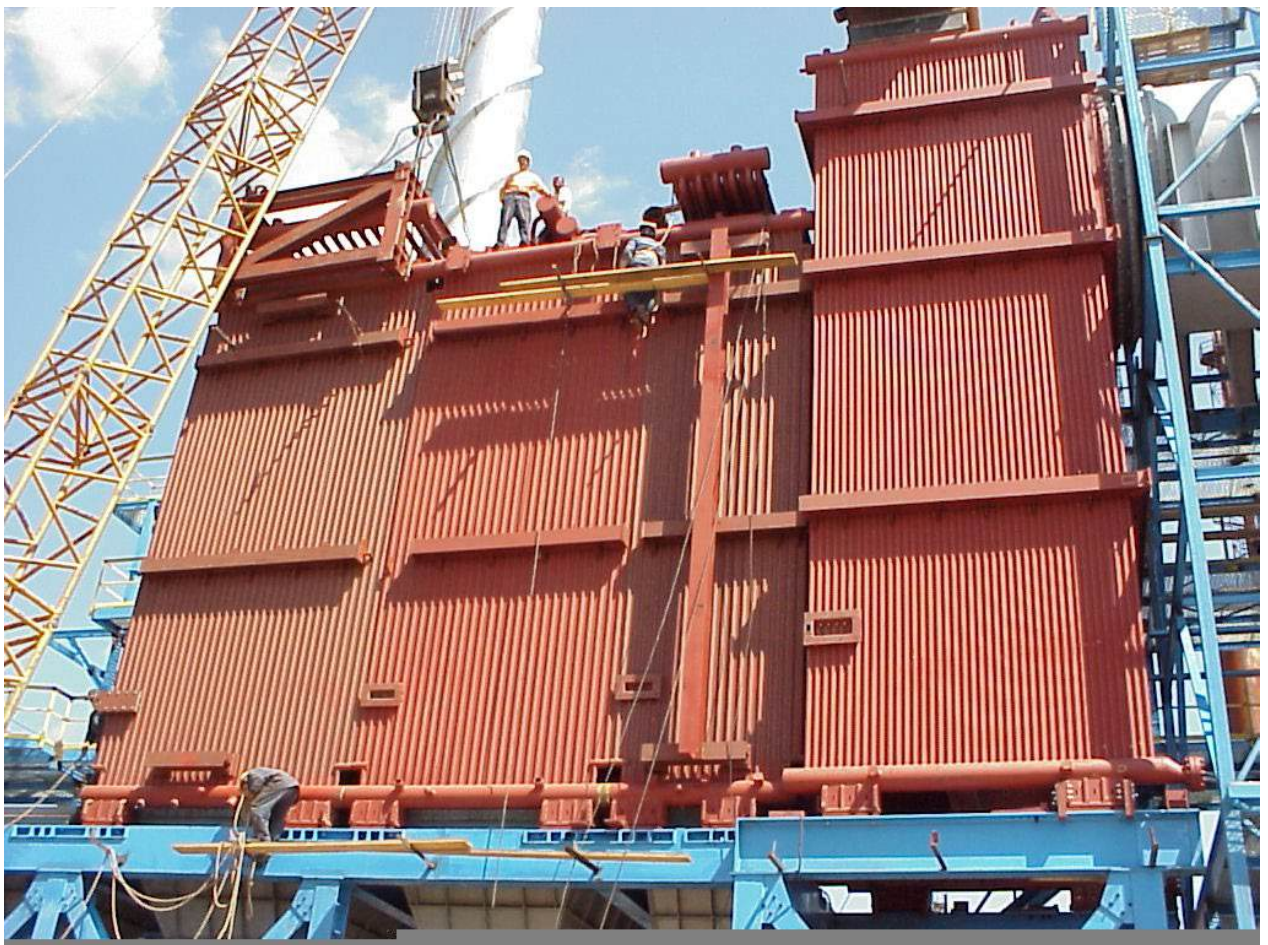
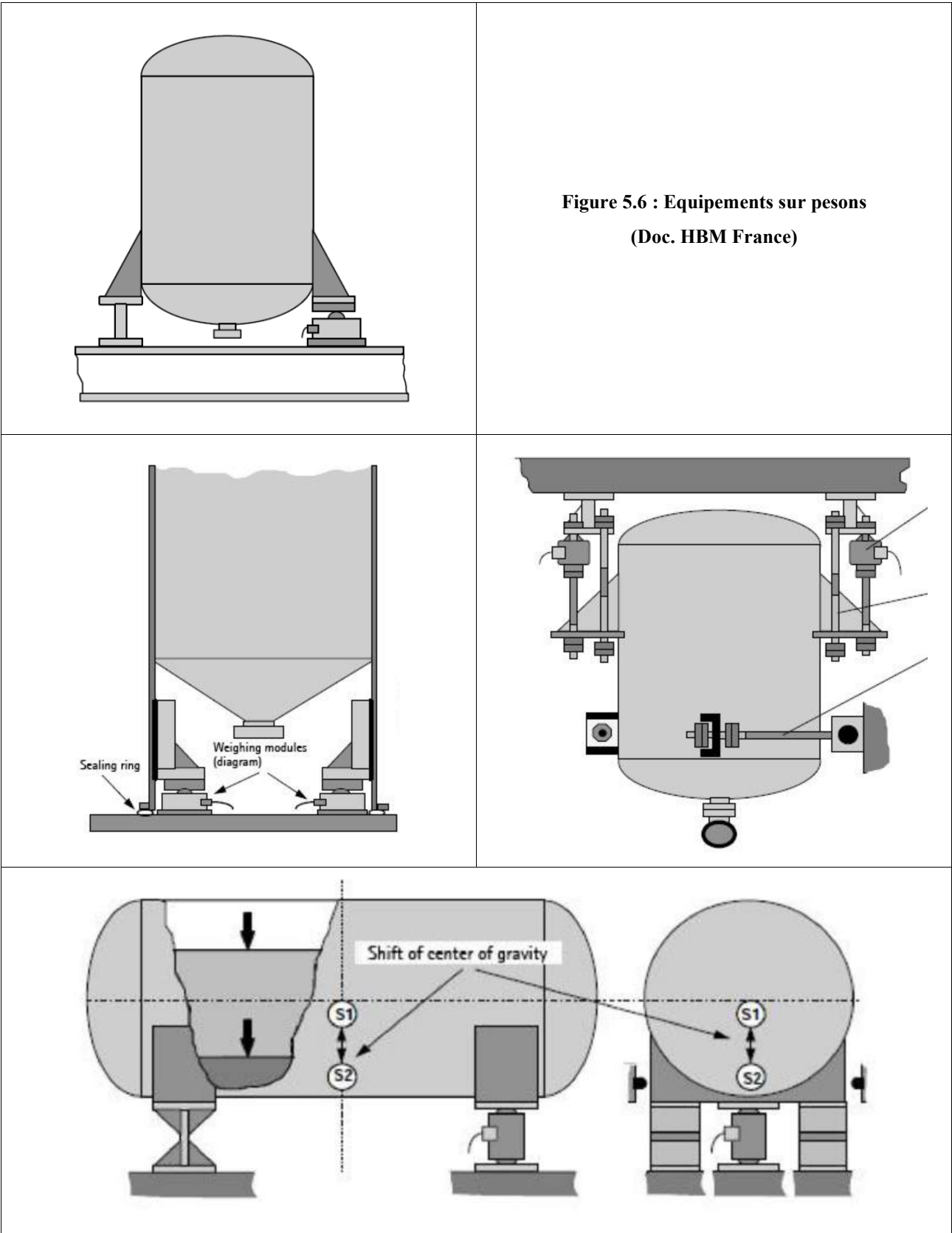


Figure 5.5 : Chaudières à tubes d'eau



6 - MACHINES TOURNANTES

Pour ces équipements, les références ci-après proposent différentes dispositions constructives permettant de répondre aux principales exigences (E1, E2 et E3) relatives au comportement sismique :

Pompes (Figure 6.1) [137c] Chapitre 4 [138] Chapitre 8.2.3 & 8.2.4

Compresseurs (Figure 6.2) [137c] Chapitre 5 [138] Chapitre 8.2.6

Groupes électrogènes (Figure 6.3) [108] [138] Chapitre 8.2.8 [178] [179] § D2

Pour les pompes, les compresseurs et les groupes électrogènes, il est recommandé que l'équipement proprement dit ainsi que sa motorisation soient solidaires du même support (« châssis commun ») afin de réduire au maximum les éventuels problèmes de désalignement susceptibles d'entraîner la défaillance de l'équipement.

Ces équipements sont très souvent installés sur des isolateurs permettant de limiter les vibrations transmises à son environnement par la machine tournante. Il convient donc de s'assurer que ces systèmes anti-vibratoires seront compatibles avec les excitations sismiques appliquées à l'ensemble considéré. De plus ces systèmes sont en général particulièrement sensibles aux efforts horizontaux et des butées dans les deux directions horizontales peuvent être nécessaires (Annexe 6).

Il est recommandé que les efforts générés par les tuyauteries raccordées aux équipements soient réduits au maximum. À cet effet, pour les pompes notamment, les dispositions définies par la norme NF CR 13931 peuvent être appliquées.

Lorsque l'opérabilité de l'un de ces équipements est requise, la justification pourra s'appuyer sur le REX d'équipements similaire ou sur des essais sur table vibrante [137c].

Agitateurs (Figure 6.4)

Lorsque le confinement du produit est requis et si en cas de défaillance de l'agitateur celui-ci risque de perforer l'enveloppe, alors la résistance de l'agitateur doit être vérifiée. À cet effet une justification pour une accélération égale à 3 fois l'accélération maximale aux ancrages de l'équipement est acceptable	Lorsque la fréquence propre fondamentale est calculée (Note 1)			En l'absence de calcul de la fréquence propre fondamentale (Note 2)		
	E1	E2	E3	E1	E2	E3

Pompes	1,5	1,5	1	1,5	1,5	1
--------	-----	-----	---	-----	-----	---

Moteurs	1,5	1,5	1	1,5	1,5	1
---------	-----	-----	---	-----	-----	---

Note 1 : Ces coefficients doivent être utilisés pour établir un spectre réduit conformément à la procédure définie par la référence [27]
Note 2 : Coefficients de comportement globaux à appliquer aux efforts résultant d'un calcul linéaire

Lorsque l'opérabilité de l'un de ces équipements est requise, la justification pourra s'appuyer sur le REX d'équipements similaires lors de séismes réels ou lors d'essais sur table vibrante, en suivant les indications du DT106 - Méthodologie Générale au §5.3.2 « Justification par retour d'expérience ».

Dans le premier cas, il convient de préparer avant les visites des fiches qui présenteront l'ensemble des points à vérifier sur site. La rédaction de ces fiches doit s'appuyer sur les documents explicitant et quantifiant le REX post-

sismique et incluant les spécificités de l'installation à qualifier. Les fiches initiales et les fiches, remplies après visite sur site, doivent être validées par un contrôle indépendant de l'équipe réalisant la visite.

Pour les équipements nouveaux, les recommandations données dans ces références sont à intégrer dans les spécifications de conception.

Pour certains équipements particuliers, pour lesquels l'opérabilité est exigée, la justification peut-être réalisée à l'aide d'un essai sur table vibrante, selon les indications du DT106 - Méthodologie Générale au §5.3.3 « Essais ». Pour la réalisation pratique des essais, il convient de rédiger une spécification d'essais précisant, en particulier, l'environnement mécanique de l'équipement à essayer (montage, structure porteuse, fixation, tuyauteries connectées...), le ou les signaux à appliquer (nombre de directions, amplitude, contenu fréquentiel, durée). Pour cela, on peut s'appuyer sur les références [137c], [138], [184], [191], [192] et [193].

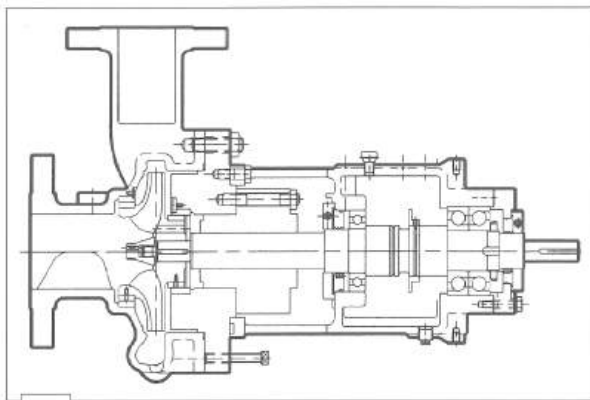


Figure 8.17 Exemple de pompe «Process» (API 8^e édition, Documentation IDP).

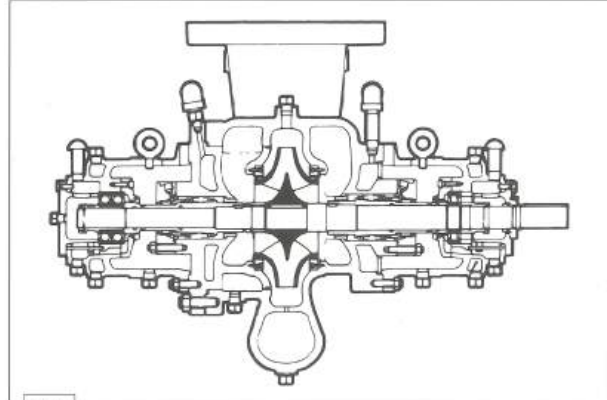


Figure 8.18 Pompe à double œillard (Documentation KSB).

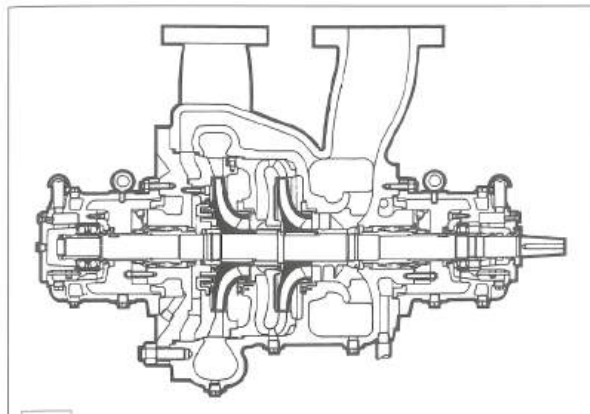


Figure 8.19 Pompe à deux étages (Documentation KSB).

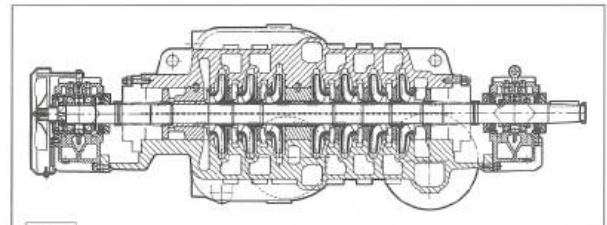


Figure 8.20 Pompe à plan de joint axial (Documentation KSB).

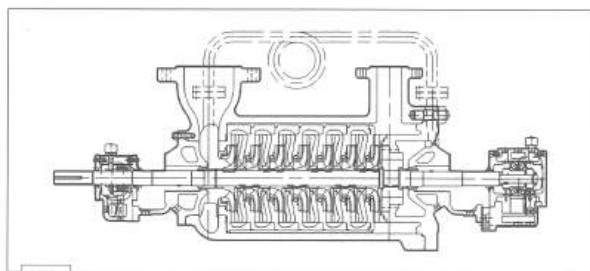


Figure 8.21 Pompe à joints radiaux, à enceinte sous pression monobloc, dite en «barrel» (Documentation IDP).

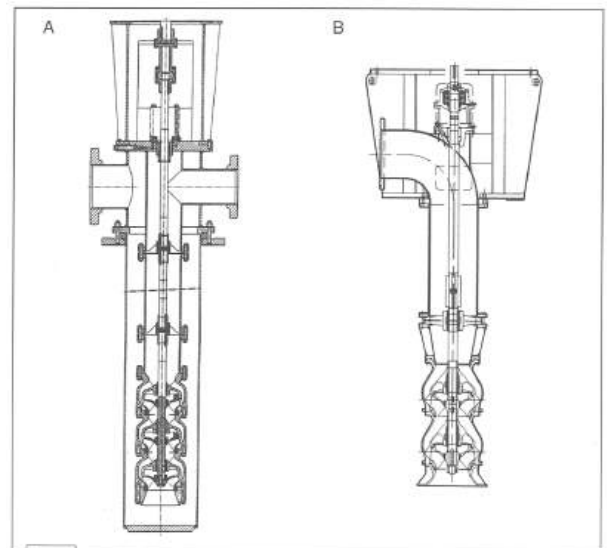


Figure 8.22 Pompe verticales. A. avec «barrel» (Documentation KSB); B. sans «barrel» (Documentation IDP).

Figure 6.1-1 : [101]



Figure 6.1-2



Figure 6.2
[65] Défaillance d'un compresseur monté sur des isolateurs de vibrations
Séisme de Northridge, Californie USA 1994



Figure 6.3-1

[106] Centrale hydroélectrique
de Teché
Groupe électrogène sur skid
Amortisseur endommagé
Séisme de Chi Chi, Magnitude 7,6
Formose 1999

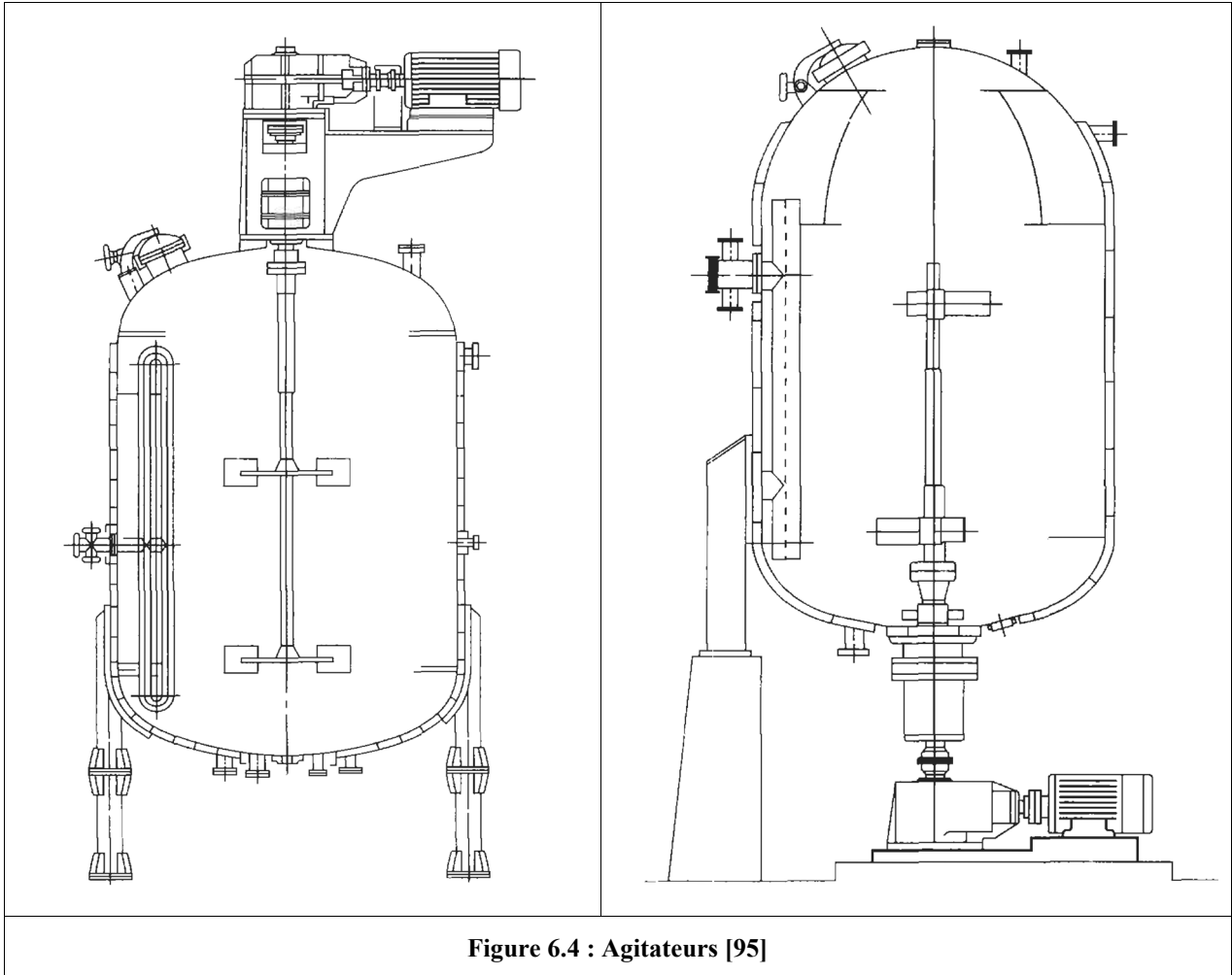


Figure 6.3-2

[106] Centrale hydroélectrique
de Mingtan
Groupe électrogène sur skid
Le groupe n'a pas démarré suite à la
perte d'un contact électrique mais n'a
subi aucun dommage.
Séisme de Chi Chi, Magnitude 7,6
Formose 1999



Figure 6.3-3



7 - ORGANES DE SECURITE (SOUPAPES...)

Pour les équipements de type soupape de sécurité il convient d'appliquer les méthodologies proposée par le Guide tuyauterie & Robinetterie [9d] notamment à son Chapitre 5. Si des calculs s'avèrent nécessaires, par exemple pour évaluer l'influence de la position du centre de gravité de l'équipement, ceux-ci peuvent être réalisés à partir d'une valeur forfaitaire déterminée conformément aux propositions de la référence [184 § C2.1].

Des informations complémentaires pour ce type d'équipement sont données par la référence [137c] au §3.2.

Lorsque les capacités fonctionnelles de ces équipements doivent être préservées ou lorsque l'opérabilité est requise et en l'absence de documents de qualification provenant du fournisseur de l'équipement des essais statique(s) ou dynamique(s) peuvent être nécessaires.

Dans ce cas, les recommandations du Chapitre 6 du présent guide peuvent être appliquées. A titre indicatif, il est rappelé que la référence [187 §7] traite spécifiquement des soupapes, ainsi que la référence [188].



Figure 7-1



Figure 7-2

8 - RÉFÉRENCES

- [1a] *Arrêté du 10 mai 2000 relatif à la prévention des accidents majeurs impliquant des substances ou des préparations dangereuses présentes dans certaines catégories d'installations classées pour la protection de l'environnement soumises à autorisation* (~~abrogé par l'arrêté du 26 mai 2014~~)
- [1b] Arrêté du 26 mai 2014 relatif à la prévention des accidents majeurs dans les installations classées mentionnées à la section 9, chapitre V, titre Ier du livre V du code de l'environnement
- [2a] Arrêté du 4 octobre 2010 relatif à la prévention des risques accidentels au sein des installations classées pour la protection de l'environnement soumises à autorisation (JO du 16 novembre 2010) modifié
- [3] Décret n° 2010-1254 du 22 octobre 2010 relatif à la prévention du risque sismique (JO du 24 octobre 2010)
- [4] Décret n° 2010-1255 du 22 octobre 2010 portant délimitation des zones de sismicité du territoire français (JO du 24 octobre 2010) modifié
- [5] Arrêté du 22 octobre 2010 relatif à la classification et aux règles de construction parasismique applicables aux bâtiments de la classe dite « à risque normal » (JO du 24 octobre 2010) modifié
- [6] Arrêté du 24 janvier 2011 fixant les règles parasismiques applicables à certaines installations classées (JO du 31 mars 2011) + (rectificatif) (JO du 9 avril 2011)
- [7] Projet d'arrêté relatif à la classification et aux règles de construction parasismique applicables aux canalisations, tuyauteries, silos, réservoirs, structures hautes et élancées de la classe dite « à risque normal »
- [8] *Référence non utilisée*
- [9a] DT 106 Méthodologie Générale
- [9b] *Référence non utilisée*
- [9c] Guide « séisme » : Structures support
- [9d] à [9e] *Références non utilisées*
- [10] à [26] *Références non utilisées*
- [27a] NF EN 1998-1 (Septembre 2005) + A1 (Mai 2013) Eurocode 8 Calcul des structures pour leur résistance aux séismes
Partie 1 : Règles générales, actions sismiques et règles pour les bâtiments
- [27b] NF EN 1998-1/NA (~~Décembre 2007~~Décembre 2013) Eurocode 8 - Calcul des structures pour leur résistance aux séismes -
Partie 1 : règles générales, actions sismiques et règles pour les bâtiments - Annexe nationale à la NF EN 1998-1 : 2005 - Règles générales, actions sismiques et règles pour les bâtiments
- [28a] NF EN 1998-4 (Mars 2007) Eurocode 8 Calcul des structures pour leur résistance aux séismes
Partie 4 : Silos, réservoirs et canalisations
- [28b] NF EN 1998-4/NA (Janvier 2008) Eurocode 8 - Calcul des structures pour leur résistance aux séismes -
Partie 4 : Silos, réservoirs et canalisations Annexe Nationale à la NF EN 1998-4 : 2007 Silos, réservoirs et canalisations

- [29a] NF EN 1998-6 (Décembre 2005) Eurocode 8 Calcul des structures pour leur résistance aux séismes
Partie 6 : Tours, mâts et cheminées
- [29b] NF EN 1998-6/NA (Octobre 2007) Eurocode 8 - Calcul des structures pour leur résistance aux séismes -
Partie 6 : Tours, mâts et cheminées Annexe Nationale à la NF EN 1998-6 : 2005 Tours, mâts et cheminées
- [30] à [46] *Références non utilisées*
- [47] G. Gazetas

Analysis of machine foundation vibrations: state of the art

Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1983, Vol. 2, No. 1
- [48] à [53] *Références non utilisées*
- [54] Design recommendation for storage tanks and their supports with emphasis on seismic design

2010 Edition

Architectural Institute of Japan
- [55] à [63] *Références non utilisées*
- [64] H. Nishi

Damage on hazardous materials facilities

Proceedings of the International Symposium on Engineering Lessons Learned from the 2011 Great East Japan
Earthquake, March 1-4, 2012, Tokyo, Japan
- [65] FEMA E-74
Reducing the Risks of Nonstructural Earthquake Damage

A Practical Guide, Fourth Edition January 2011
- [66] à [78] *Références non utilisées*
- [79] G. Mylonakis, S. Nikolaou, G. Gazetas

Footings under seismic loading : Analysis and design issues with emphasis on bridge foundations

Soil Dynamics and Earthquake engineering 26(2006)
- [80] à [90] *Références non utilisées*
- [91] Analysis of pressurized horizontal vessels under seismic excitations

A. Di Carluccio, G. Fabbrocino, E. Salzano , G. Manfredi

14th World Conference on Earthquake Engineering October 12-17, 2008, Beijing, China

- [92] Seismic analysis and design of horizontal cylindrical industrial vessels
Lazaros A. Patkas, Spyros A. Karamanos, Manolis A. Platyrrachos
4th European Workshop on the Seismic Behaviour of Irregular and Complex Structures
26-27 August, Thessaloniki, Greece
- [93] à [95] *Références non utilisées*
- [95a] D. Moss
Pressure Vessel Design Manual
Third Edition Elsevier 2004
- [95b] D. Moss
Pressure Vessel Design Manual 2013
- [96] L.E. Brownell & E.H. Young
Process Equipment Design
John Wiley & Sons 1959
- [97] F. Nateghi, H. Kazem
Seismic evaluation of Teheran oil refinery
13th World Conference on Earthquake Engineering
Vancouver, B.C., Canada August 1-6, 2004
- [98a] ASCE/SEI 7-10
Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures
- [98b] Proposal ASCE-003 2012 Expanded Commentary to ASCE/SEI 7-10
- [99] Étude de la tenue au séisme d'équipements industriels pétroliers et chimiques en région PACA
SNPE Ingénierie Mars 1997
- [100a] Ong Lin Seng
Analysis of Twin-Saddle-Supported Vessel Subjected to Non-Symmetric Loadings
Int. J. Pres. Ves. & Piping 35 (1988)
- [100b] Ong Lin Seng
Parametric Study of Peak Circumferential Stress at the Saddle Support
Int. J. Pres. Ves. & Piping 48 (1991)

- [100c] Ong Lin Seng
Seismic Loading on Saddle-Supported Cylindrical Vessel
Int. J. Pres. Ves. & Piping 1992
- [101] P. Trambouze
Le raffinage du pétrole
Volume 4 Matériels et Equipements
Éditions Technip 1999
- [102] *Référence non utilisée*
- [103] P.B. Summers & al.
Seismic risk reduction at petrochemical and LNG facilities : Main results from indepth project
The 14th World Conference on Earthquake Engineering October 2008, Beijing, China
- [104] *Référence non utilisée*
- [105] Investigation of the 1999 Kocaeli Turkey Earthquake : Effects on Power and Industrial Facilities
EPRI, Palo Alto, CA: 2001. 1003119.
- [106] Investigation of the 1999 Chi Chi Taiwan Earthquake
EPRI, Palo Alto, CA: 2001. 1003120
- [107] *Référence non utilisée*
- [108] The January 17,1994 Northridge Earthquake
EPRI TR-106635
- [109] M. Wieschollek & al.
Seismic design of spherical liquid storage tanks
COMPADYN 2011
- [110] *Référence non utilisée*
- [111] The 2010 Maule, Chile Earthquake : Lessons and Future Challenges
RMS 2011
- [112] 8,8 The Maule earthquake, Chile 27th February 2010
ITSEMAP MAPFRE
- [113] à [124] *Références non utilisées*

- [125a] CODE S.N.C.T Tuyauteries industrielles Divisions T1 à T3 1982
- [125b] CODETI CODE S.N.C.T Tuyauteries – Code français de construction des tuyauteries industrielles 1991
- [125c] CODETI CODE S.N.C.T Tuyauteries – Code français de construction des tuyauteries industrielles 1995
- [125d] CODETI 2001 - Code de construction des tuyauteries industrielles
- [125e] CODETI Division 1 : 2006 - Code de construction des tuyauteries industrielles
- [125f] CODETI Division 1 : 2013 - Code de construction des tuyauteries industrielles
- [125g] CODETI Division 1 : 2023 - Code de construction des tuyauteries industrielles
- [126] à [134] *Références non utilisées*
- [135] Guide de Surveillance des Ouvrages de Génie Civil et Structures
UIC UFIP DT 98 Avril 2012
- [136] à [137] *Références non utilisées*
- [137c] Guide for Seismic Evaluation of Active Mechanical Equipment
American Lifelines Alliance ASCE/FEMA October 2004
- [138] Seismic Evaluation procedure for Equipment in US Department of Energy Facilities
DOE/EH-0545 Mars 1997 US Department of Energy
- [139] Guidelines for Seismic Evaluation and Design of petrochemical Facilities
ASCE - 2nd Edition - 2011
- [140] à [149] *Références non utilisées*
- [150] UFIP 1997
Fiches Guides Séismes EDF/SEPTEN
- [151] à [154] *Références non utilisées*
- [155] V. Ciampi & al.
Passive control for seismic protection of critical components in industrial process plants
13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, Canada 2004
- [156] à [160] *Références non utilisées*
- [161] Guide for the Design, Construction and Use of Mounded Horizontal Cylindrical Vessel for Pressurized Storage of LPG at Ambient Temperatures
EEMUA Publication n°190 : 2000

[162] Earthquake Resistance Design Standard for High Pressure Gas Facilities

Kanagawa Prefecture

[163a] CODAP Divisions 1 & 2 : ~~2010 Révision 06-14~~2022

Code de construction des Appareils à pression non soumis à l'action de la flamme

[163b] ~~Référence non utilisée~~CODAP Division 3 : 2013 Recommandations pour la Maintenance des Appareils à pression

[164] CT Maintenance ESP : 2024

Règles pour la Maintenance des Equipements Sous Pression

~~[164]~~[165] à [166] *Références non utilisées*

[167a] NF EN 1993-1-6 (Juillet 2007) Eurocode 3 - Calcul des structures en acier

Partie 1-6 : Résistance et stabilité des structures en coque

[167b] NF EN 1993-1-6/NA (~~Décembre 2007~~Mai 2010) Eurocode 8 - Calcul des structures pour leur résistance aux séismes

Partie 1 : règles générales, actions sismiques et règles pour les bâtiments - Annexe nationale à la NF EN 1998-1 : 2005 - Règles générales, actions sismiques et règles pour les bâtiments

[168] Seismic resistance of pressure equipment and its supports

Practice note 19

IPENZ Version ~~36, September 2013~~April 2024

[169] NF EN 13445-3 Clause 16

Edition ~~2009-2021~~Version 4

[170] Recommandations AFPS 90 pour la rédaction de règles relatives aux ouvrages et installations à réaliser dans les régions sujettes aux séismes

Presses de l'école nationale des Ponts et chaussées Vol.1 : 1990 Vol.2 : 1992 Vol.3 : 1994

[171] Guide pour l'établissement d'un plan d'inspection Révision ~~B01D-03~~, de ~~février 2010~~mars 2020

DT 84 UIC UFIP

[172] Wieschollek & al.

Guidelines for Seismic Design and Analysis of Pressure Vessels

ASME 2013 Pressure Vessels and Piping Conference July 14-18, 2013, Paris, France

[173] H. Bednar

Pressure Vessel Design Handbook

1991, 2nd Edition, Krieger Publishing Company

- [174] [R.D.Blevins](#)
[Formulas for natural frequency and mode shape](#)
[VNR Company 1979](#)
- [175] NZS 4219:2009
Seismic Performance of Engineering Systems In Buildings
- [176] Recommandations pour la construction parasismique des installations industrielles à risque spécial
DRIRE PACA 1990
- [177] Dispositions spécifiques applicables aux réservoirs sous talus destinés au stockage de gaz inflammables liquéfiés
Cahier technique professionnel AFIAP Edition initiale juin 2004 Révision ~~MARS 2013~~[Décembre 2018](#)
- [178] F. Kauffmann, A. Bonnefoy, D. Fougères
Seismic qualification of an emergency generator and of its auxiliaries
I Mech E 1978
- [179a] Structural safety of industrial steel tanks, pressure vessels and piping systems under seismic loading
EUR 26319 EN Final report 2013
- [180] Buckling of Steel Shells European Design Recommendations
ECCS CECM EKS
5th Edition September 2013
- [181] Sloshing effects on the seismic design of horizontal-cylindrical and spherical industrial vessels
Spyros A. Karamanos, Lazaros A. Patkas, Manolis A. Platyrrachos
Transactions of the ASME Vol.128, August 2006
- [182] Proceedings of the International Conference on Seismic Design of Industrial Facilities
RWTH Aachen University Germany 2013
- [183] Rapport CETIM N°**Erreur ! Nom de propriété de document inconnu.** Erreur ! Nom de propriété de document inconnu.
- [184] Guide méthodologique pour la conception, l'installation et le diagnostic des équipements en zone sismique
AFPS Cahier Technique #30 Version 2 Avril 2011
- [185] Zhi-Rong Yang & al.
Earthquake Response Analysis of Spherical Tanks with Seismic Isolation

The Twelfth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction 2011

[186] ISO 16528-1 :2007 Chaudières et récipients sous pression -- Partie 1: Exigences de performance

ISO 16528-2 :2007 Chaudières et récipients sous pression -- Partie 2: Procédure pour répondre aux exigences de l'ISO 16528-1

[187] EPRI, Summary of the seismic Adequacy of 20 classes of Equipment..., report n°NP-7149-D, March 1991

[188] Sandia Report, Use of Seismic Experience and Test Data to Show Ruggedness of equipment, June 1992

[189] EPRI, Experience based qualification, report n° TR1016125, Dec 2007

[190] *Référence non utilisée*

[191] AFPS, Cahier Technique n°34, moyens expérimentaux pour les essais sismiques: recensement, comparaison, besoins, Nov 2014

[192] IEC 60068-2-xx: Environmental testing

[193] IEC 60068-3-3 Environmental testing - Part 3: Guidance. Seismic test methods for equipment

ANNEXE 1 GENERALITES

1° PARTIE DETERMINATION SIMPLIFIEE DE SPECTRES DE PLANCHER [9C]

a_{h_sp}	=	Accélération absolue au droit du supportage de l'équipement considéré tenant compte du couplage éventuel entre la structure porteuse et l'équipement	
	=	$\left(\frac{a_{sp}}{q_{sp}}\right) KT$	A1/1-1

avec

a_{sp}	=	Accélération absolue de la structure porteuse à la fréquence f_{sp} et à la cote h_{sp}	
		Formulation complète	
	=	$\left[C_{part_sp}^2 a_N^2 R a^2 \left(\frac{h_{sp}}{H_{sp}} \right)^{2\alpha} + a_N^2 \left[1 - C_{part_sp} \left(\frac{h_{sp}}{H_{sp}} \right)^\alpha \right]^2 \right]^{1/2}$	A1/1-2
		Formulation simplifiée	
	=	$a_N \left[1 + C_{part_sp}^2 R a^2 \left(\frac{h_{sp}}{H_{sp}} \right)^{2\alpha} \right]^{1/2}$	A1/1-3

et

a_N	=	Accélération maximale du sol	
C_{part_sp}	=	Coefficient de participation du mode de la structure porteuse dans l'hypothèse d'un comportement monomodal de cette dernière	
	=	$\frac{2\alpha + 1}{\alpha + 1}$ avec $\alpha = 1$ pour les portiques non contreventés et $\alpha = 1,5$ pour les portiques contreventés	A1/1-4

f_{eq}	=	Fréquence propre de l'équipement
f_{limite}	=	16,7 Hz (T=0,06s) [98], [9c]
f_{sp}	=	Fréquence propre de la structure porteuse : f_{l_sp} & f_{n_sp}
h_{sp}	=	Cote du plancher considéré
H_{sp}	=	Hauteur totale de la structure porteuse

KT	=	Coefficient d'amplification tenant compte des phénomènes de couplage entre la structure porteuse et l'équipement
		$f_{limite} < f_{eq} \quad KT = 1 \quad A1/1-5$
		$1,2 f_{n_sp} \leq f_{eq} \leq f_{limite} \quad KT = 5 - 4 \frac{\log\left(1,2 \frac{f_{n_sp}}{f_{eq}}\right)}{\log\left(1,2 \frac{f_{n_sp}}{f_{limite}}\right)} \quad A1/1-6$
		$0,8 f_{l_sp} \leq f_{eq} \leq 1,2 f_{n_sp} \quad KT = 5 \quad A1/1-7$
		$f_{eq} \leq 0,8 f_{l_sp} \quad KT = \frac{5}{\left(0,8 \frac{f_{l_sp}}{f_{eq}}\right)^2} \quad A1/1-8$
		$\frac{f_{eq}}{f_{sp}} \quad \text{Non connu} \quad KT = 5 \quad A1/1-9$

q_{sp}		Coefficient de comportement de la structure porteuse égal à 1,5 sauf justification particulière
Ra	=	Amplification spectrale, égale à 2,5 sauf justification particulière, mais toujours supérieure ou égale à 1



Spectres transférés [9c1 §5]

Page 1
20/02/25

Accélération du sol	$a_N =$	2,04	m/s ²
Cote du plancher considéré	$z_p =$	15,50	m
Hauteur totale de la structure porteuse	$H_t =$	15,00	m
Coefficient de comportement de la structure porteuse	$q_{sp} =$	1,50	
Masse de l'équipement étudié	$m_{\text{équip}} =$	1 500,00	kg
Coefficient relatif au contreventement	$\alpha_{\text{cont}} =$	1,50	1 ou 1,5
Coefficient de participation du mode fondamentale de la structure porteuse	$\text{Coeff}_{\text{part}_{sp}} =$	1,60	
Amplification spectrale du mode de la structure porteuse	$R_{\text{amplif}} =$	2,50	2,5 par défaut
Accélération absolue de la structure porteuse	$\text{Acc}_{\text{-abs}_{sp}} \text{ (formulation complète)} =$ $\text{Acc}_{\text{-abs}_{sp}} \text{ (formulation simplifiée)} =$	8,68 8,81	m/s ² m/s ²
Fréquence propre de l'équipement	$f_{\text{équip}} =$	10,00	Hz
Fréquence propre de la structure porteuse	$f_{sp} =$	5,00	Hz
	$f_{\text{limite}} =$	16,70	Hz
Coefficient d'amplification fonction du couplage structure porteuse - équipement amortissement = 5%		3,00	
Accélération absolue au droit du supportage de l'équipement étudié		17,39	m/s ²

ANNEXE 2
COLONNE SUR JUPE

1° PARTIE
DETERMINATION DES FREQUENCES PROPRES
HORIZONTALES ET VERTICALE (PROCEDURE 1)

Notations

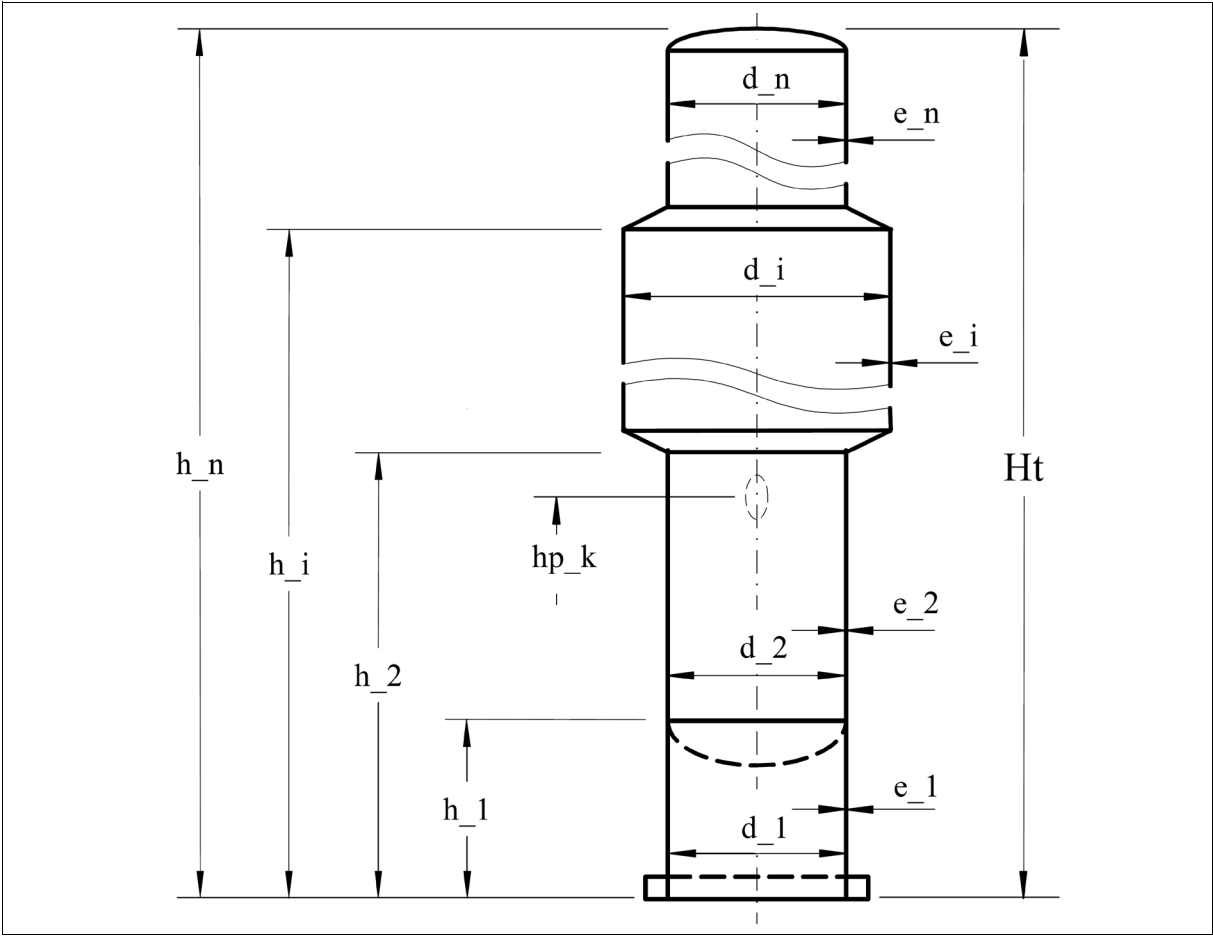


Figure A2-1

Fréquence propre en flexion / Séisme horizontal	
$f = \frac{1}{T} \text{ avec } T = 0,02 H_t^2 \sqrt{\frac{\sum_1^n m_i g \Delta\alpha_i + \frac{1}{H_t} \sum_1^{np} P d s_k \beta_k}{\sum_1^n E_i d_i^3 e_i \Delta\gamma_i}}$	
H_t	Hauteur totale
m_i	Masse linéique du tronçon considéré
g	Accélération de la gravité
$\Delta\alpha_i$	Variation de la valeur du coefficient α (Figure A1-3 <u>A2.3</u>) entre les deux extrémités du tronçon i considéré
$P d s_k$	Poids ponctuels
β_k	Coefficient relatif au poids ponctuel k considéré déterminé à partir de la Figure A1-4 <u>A2.4</u>
E_i	Module d'élasticité du matériau du tronçon i
d_i	Diamètre extérieur du tronçon i
e_i	Épaisseur du tronçon i
$\Delta\gamma_i$	Variation de la valeur du coefficient γ (Figure A1-5 <u>A2.5</u>) entre les deux extrémités du tronçon i considéré
Fréquence propre « verticale »/ Séisme verticale	
$f = \frac{1}{2^{3/2} \pi} \left[\frac{k_1}{m_1} + \frac{k_2}{m_1} + \frac{k_2}{m_2} \pm \left\{ \left(\frac{k_1}{m_1} + \frac{k_2}{m_1} + \frac{k_2}{m_2} \right)^2 - 4 \frac{k_1 k_2}{m_1 m_2} \right\}^{1/2} \right]^{1/2}$	
$k_i = \frac{E_i S_i}{L_i}$	Jupe i=1 Colonne i=2

Figure A2-2

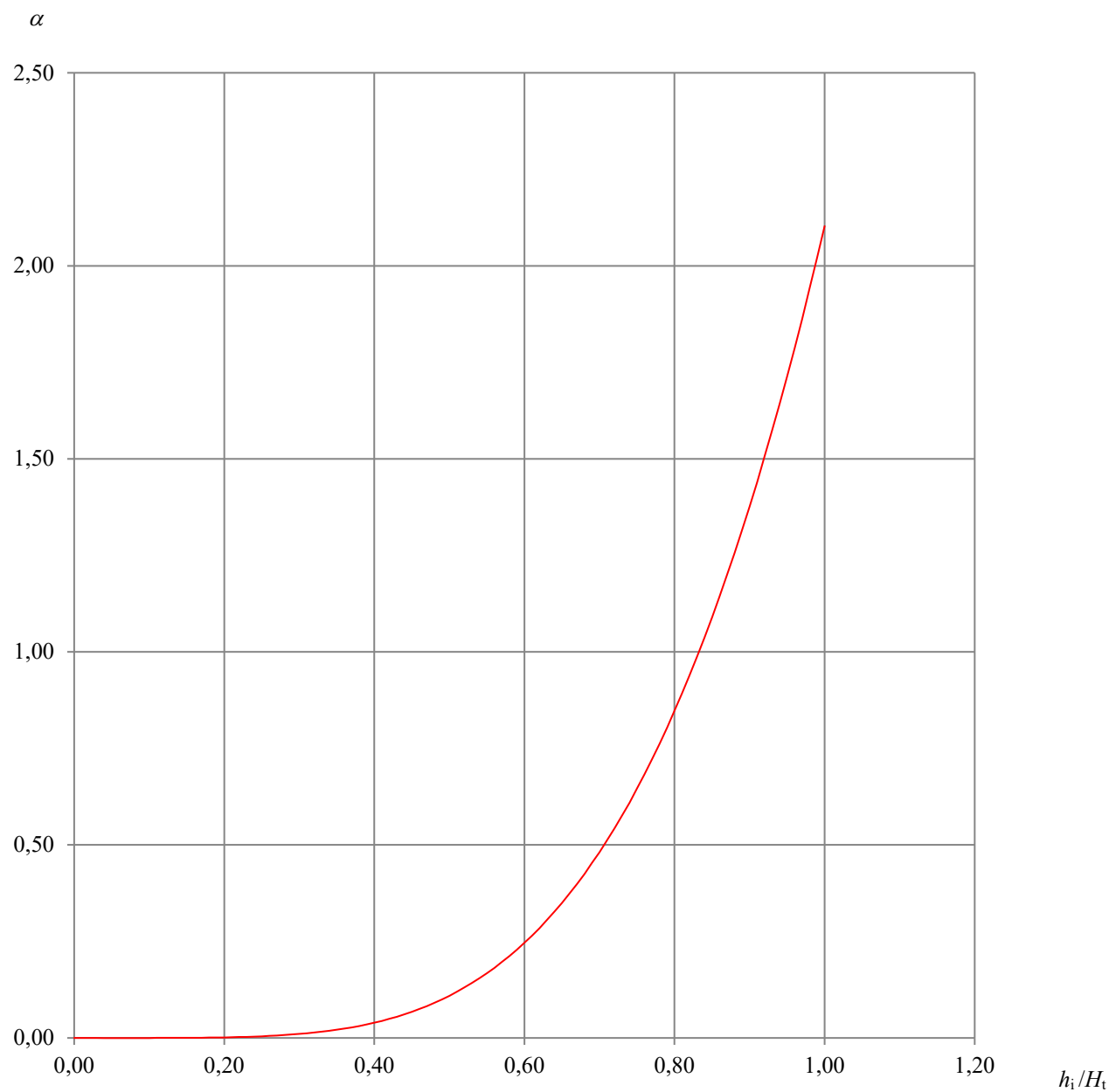


Figure A2-3

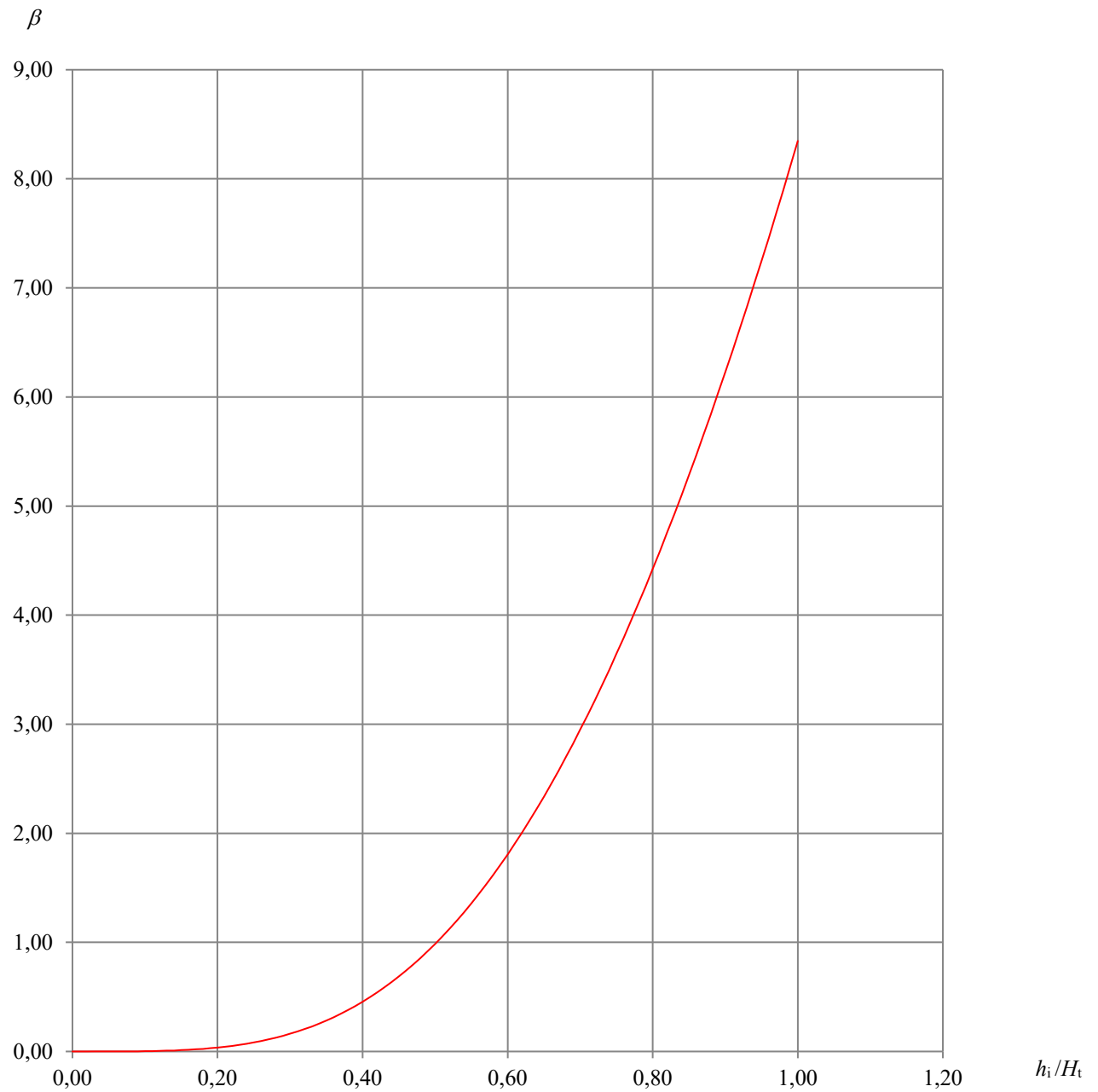


Figure A2-4

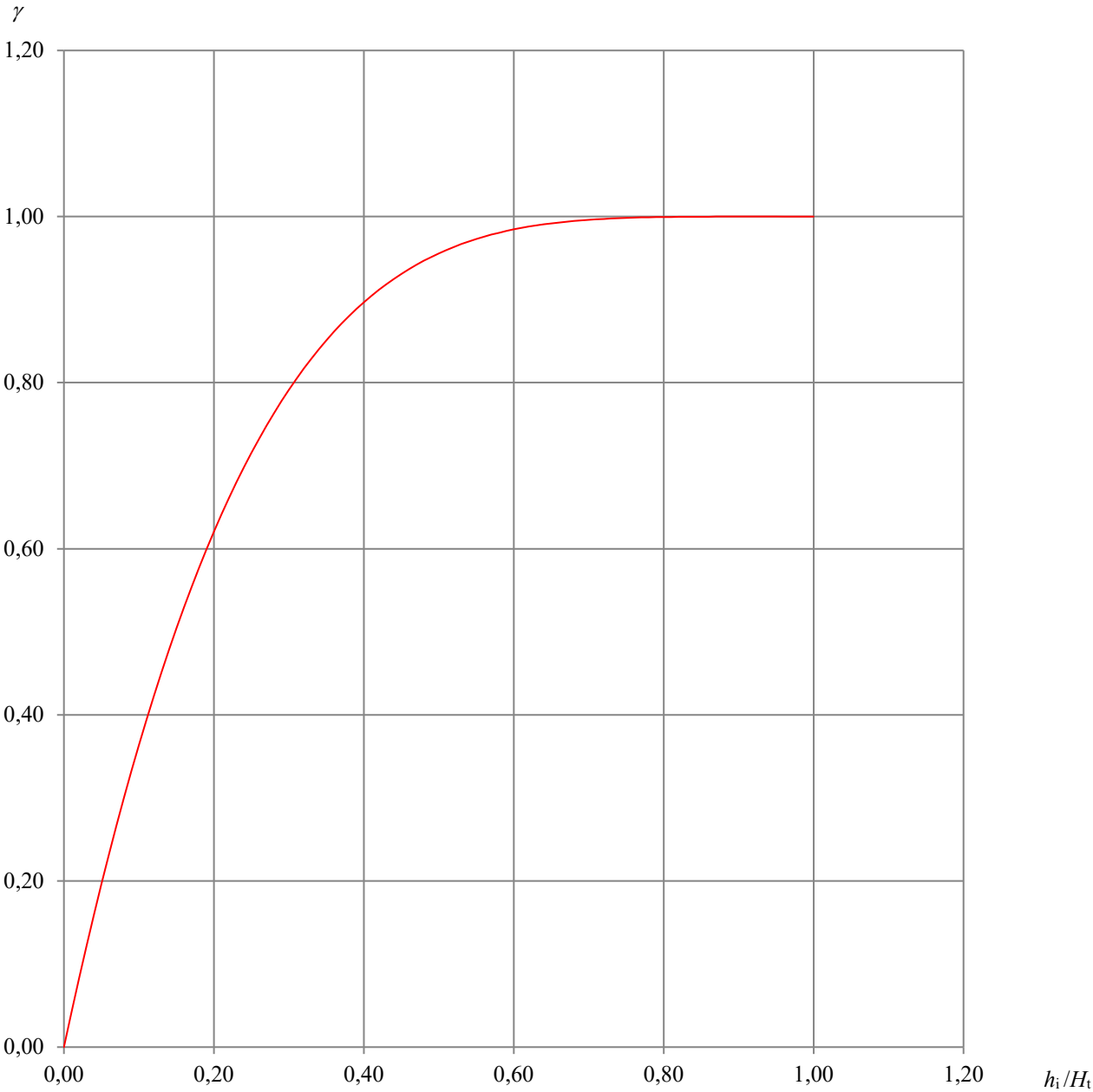


Figure A2-5

h_i/H_t	α	β	γ	h_i/H_t	α	β	γ	h_i/H_t	α	β	γ
1,00	2,103000	8,347000	1,000000	0,66	0,374000	2,452000	0,992885	0,32	0,014000	0,205000	0,81710
0,99	2,021000	8,121000	1,000000	0,65	0,349700	2,336500	0,99183	0,31	0,012000	0,182600	0,80459
0,98	1,941000	7,898000	1,000000	0,64	0,326900	2,224000	0,99065	0,30	0,010293	0,16200	0,7914
0,97	1,863000	7,678000	1,000000	0,63	0,305200	2,114800	0,98934	0,29	0,008769	0,14308	0,7776
0,96	1,787000	7,461000	1,000000	0,62	0,284600	2,008900	0,98789	0,28	0,007426	0,12576	0,7632
0,95	1,714000	7,248000	0,999999	0,61	0,265000	1,906200	0,98630	0,27	0,006249	0,10997	0,7480
0,94	1,642000	7,037000	0,999998	0,60	0,246400	1,806800	0,98455	0,26	0,005222	0,09564	0,7321
0,93	1,573000	6,830000	0,999997	0,59	0,228800	1,710700	0,98262	0,25	0,004332	0,08267	0,7155
0,92	1,506000	6,626000	0,999994	0,58	0,212200	1,617700	0,98052	0,24	0,003564	0,07101	0,6981
0,91	1,440000	6,425000	0,999989	0,57	0,196500	1,527900	0,97823	0,23	0,002907	0,06056	0,6800
0,90	1,377000	6,227000	0,999982	0,56	0,181600	1,441300	0,97573	0,22	0,002349	0,05126	0,6610
0,89	1,316000	6,032000	0,999971	0,55	0,167600	1,357900	0,97301	0,21	0,001878	0,04303	0,6413
0,88	1,256000	5,840000	0,999956	0,54	0,154500	1,277500	0,97007	0,20	0,001485	0,03579	0,6207
0,87	1,199000	5,652000	0,999934	0,53	0,142100	1,200200	0,96688	0,19	0,001159	0,02948	0,5992
0,86	1,143000	5,467000	0,999905	0,52	0,130500	1,125900	0,96344	0,18	0,000893	0,02400	0,5769
0,85	1,090000	5,285000	0,999867	0,51	0,119600	1,054700	0,95973	0,17	0,000677	0,01931	0,5536
0,84	1,038000	5,106000	0,999817	0,50	0,109400	0,986300	0,95573	0,16	0,000504	0,01531	0,5295
0,83	0,988000	4,930000	0,999754	0,49	0,099800	0,921000	0,95143	0,15	0,000368	0,01196	0,5044
0,82	0,939000	4,758000	0,999674	0,48	0,090900	0,858400	0,94683	0,14	0,000263	0,00917	0,4783
0,81	0,892000	4,589000	0,999576	0,47	0,082600	0,798700	0,94189	0,13	0,000183	0,00689	0,4512
0,80	0,847000	4,424000	0,999455	0,46	0,074900	0,741800	0,93661	0,12	0,000124	0,00506	0,4231
0,79	0,804000	4,261000	0,999309	0,45	0,067800	0,687600	0,93097	0,11	0,000081	0,00361	0,3940
0,78	0,762000	4,102000	0,999133	0,44	0,061200	0,636100	0,92495	0,10	0,000051	0,00249	0,3639
0,77	0,722000	3,946000	0,998923	0,43	0,055100	0,587200	0,91854	0,09	0,000030	0,00165	0,3327
0,76	0,683000	3,794000	0,998676	0,42	0,049400	0,540900	0,91173	0,08	0,000017	0,00104	0,3003
0,75	0,646000	3,645000	0,998385	0,41	0,044200	0,497100	0,90448	0,07	0,000009	0,00062	0,2669
0,74	0,610000	3,499000	0,998047	0,40	0,039500	0,455700	0,89679	0,06	0,000004	0,00034	0,2323
0,73	0,576000	3,356000	0,997656	0,39	0,035100	0,416700	0,88864	0,05	0,000002	0,00016	0,1966
0,72	0,543000	3,217000	0,997205	0,38	0,031100	0,380100	0,88001	0,04	0,000001	0,00007	0,1597
0,71	0,512000	3,081000	0,996689	0,37	0,027500	0,345600	0,87088	0,03	0,000000	0,00002	0,1216
0,70	0,481000	2,949000	0,996101	0,36	0,024200	0,313400	0,86123	0,02	0,000000	0,00000	0,0823
0,69	0,453000	2,820000	0,995434	0,35	0,021200	0,283300	0,85105	0,01	0,000000	0,00000	0,0418
0,68	0,425000	2,694000	0,994681	0,34	0,018500	0,255200	0,84032	0	0	0.	0.
0,67	0,399000	2,571000	0,993834	0,33	0,016100	0,229100	0,82901				

Figure A2-6 : Coefficients α , β , γ en fonction du rapport h_i/H_t [95]

ANNEXE 2
COLONNE SUR JUPE
2° PARTIE
EXEMPLE (PROCEDURE 1)

Note : Dans l'exemple ci-après, les calculs ont été réalisés en considérant deux directions horizontales pour le séisme. Il est toutefois permis (voir § 1.3.4 du présent guide) en étendant aux cas des colonnes les règles des articles 3.2 et 4.2 de la référence [28a] de ne prendre en compte qu'une seule direction horizontale.

Page 1
20/02/25

Technical drawing of a vertical structure, likely a chimney or tower, showing dimensions and a table of values.

The structure is divided into sections with the following dimensions (from top to bottom):

- Top section: 32 535
- Section 1: 31 775
- Section 2: 30 975
- Section 3: 29 775
- Section 4: 26 775
- Section 5: 23 775
- Section 6: 21 545
- Section 7: 18 545
- Section 8: 15 545
- Section 9: 12 545
- Section 10: 10 545
- Section 11: 9 315
- Section 12: 7 455
- Section 13: 6 090
- Section 14: 3 000
- Bottom section: 1 500

The width of the structure is 1500.

The table below shows the values for each section:

Section	Value
1	32 535
2	31 775
3	30 975
4	29 775
5	26 775
6	23 775
7	21 545
8	18 545
9	15 545
10	12 545
11	10 545
12	9 315
13	7 455
14	6 090
15	3 000
16	1 500

Page 2
21/02/25

n = 16

Page 3
21/02/25[illegible]
$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$



Ht = **32 535,00**

- 78 -

Page 5
21/02/25[illegible]

Page 6
21/02/25[illegible]



GUIDE SÉISME - EQUIPEMENTS CHAUDRONNES
Cheminées / Torchères, Colonnes et réacteurs verticaux, Réservoirs verticaux

Page 7
21/02/25

Colonne 42-C-403/404

Calcul de la première fréquence propre (Flexion) [95b] [139] **(Suite)**

$$f = \frac{1}{0,02 H_t^2} \sqrt{\frac{\sum_1^n E_i d_i^3 e_i \Delta \gamma_i}{\sum_1^n m_i g \Delta \alpha_i + \frac{1}{H_t} \sum_1^{np} P d s_k \beta_k}}$$

Période : 1,157 s
Fréquence : 0,864 Hz

Calcul de la première fréquence propre (Axiale) [174]

Raideur colonne	1 090 583 396,65 N/m	Masse colonne	89 040,54 kg
Raideur jupe	5 507 308 800,00 N/m	Masse jupe	1 834,82 kg

Période : 0,062 s
Fréquence propre : 16,096 Hz



GUIDE SÉISME - EQUIPEMENTS CHAUDRONNES
Cheminées / Torchères, Colonnes et réacteurs verticaux, Réservoirs verticaux

Page 8
21/02/25

Colonne 42-C-403/404

Caractéristiques du séisme

Zone de sismicité **3**
 Classe de sol **B**
 Equipement **Equipement neuf**
 Arrêté **Arrêtés du 4 Octobre 2010 & du 13 Septembre 2013**

Amortissement **5**

Coefficient de réduction Direction horizontale_1 **3**
 Coefficient de réduction Direction horizontale_2 **3**
 Coefficient de réduction Direction verticale **1,5**

ghg_1 = 2,42	TBH = 0,05	TBV = 0,03
ghg_2 = 2,42	TCH = 0,25	TCV = 0,2
gvg = 2,18	TDH = 2,5	TDV = 2,5
Csol = 1,35	TEH = 5	
neta = 1,00	TFH = 10,00	
dhg = 0,05		

Périodes	Direction horizontale_1	1,157 s	0,864 Hz
et	Direction horizontale_2	1,157 s	0,864 Hz
Fréquences	Direction verticale	0,062 s	16,096 Hz

Accéléérations

Bande de fréquences +/- **10** %

		Freq. -	Freq. =	Freq. +	
Spectre de réponse élastique					
Accélération sismique horizontale_1	gamma_h_1 =	1,9602	1,7641	1,6038	m/s2
Accélération sismique horizontale_2	gamma_h_2 =	1,9602	1,7641	1,6038	m/s2
Accélération sismique verticale	gamma_v =	6,5400	6,5400	6,5400	m/s2

Spectre de calcul pour l'analyse élastique

Accélération sismique horizontale_1	gamma_ch_1 =	0,6534	0,5880	0,5346	m/s2
Accélération sismique horizontale_2	gamma_ch_2 =	0,6534	0,5880	0,5346	m/s2
Accélération sismique verticale	gamma_cv =	3,6333	3,6333	3,6333	m/s2

Page 9
21/02/25

Efforts dus au séisme

[95b] [139]

Q (N) = V (N) = **1,7853E+05**

Coeff Période = k = 1,3287

- 83 -

Page 10
21/02/25[illegible]

Page 11
21/02/25[illegible]

Contraintes longitudinales

Compression

(Spectres réduits)

- 87 -

Page 14
21/02/25

(Spectres non réduits ou réduits en fonction de λ)

Page 15
21/02/25

Contraintes

Compression

(Spectres non réduits ou réduits en fonction de λ)

- 89 -

Page 16
21/02/25

Contraintes

Compression

(Spectres non réduits ou réduits en fonction de λ)

- 90 -

Page 17
21/02/25

Interaction [163]

[illegible]

Page 18
21/02/25[illegible]

Page 19
21/02/25[illegible]



CONTRAINTES CRITIQUES DE VOILEMENT ENVELOPPE CYLINDRIQUE

Page 1
20/02/25

Colonne 1° partie : Jupe

Situation

Pression d'étude Pétude = 0,00 MPa
Température d'étude Tétude = 20,00 °C

Matériau

NF EN 10028-2 2002 P265GH

Limite d'élasticité R_{pt_i} = 265,00 MPa
Module d'élasticité E_i = 210 000,00 MPa
Coefficient de Poisson nu = 0,30

Caractéristiques géométriques du composant

Cylindre

Diamètre intérieur di_i = 1 534,00 mm
Epaisseur e_i = 16,00 mm
Longueur l_i = 3 000,00 mm

Rayon moyen

rm_i = 775,00 mm

Conditions aux limites du composant

Direction radiale Direction méridienne

Extrémité 1 Appuyé Appuyé
Extrémité 2 Appuyé Appuyé

Imperfections de fabrication

Référentiel de construction

CODAP 2010

Diamètre maximum mesuré ** mm
Diamètre minimum mesuré ** mm
Ovalisation 0,015 -
Classe de tolérance relative à l'ovalisation C

Ecart de forme
Dir. longitudinale hors zones soudées 6,00 mm
Dir. longitudinale zones soudées - mm
Dir. circonférentielle hors zones soudées - mm
Dir. circonférentielle zones soudées - mm
Classe de tolérance relative aux écarts de forme C Val. max. Ecart : 4,09

Ecart d'alignement des fibres moyennes 2,60 mm
Ecart d'alignement des fibres moyennes / e_i 0,1625 -
Classe de tolérance relative aux écarts d'alignement B

Classe de tolérance globale C



CONTRAINTES CRITIQUES DE VOILEMENT ENVELOPPE CYLINDRIQUE

Page 2
20/02/25

Colonne 1° partie : Jupe

Contrainte critique de voilement longitudinale

$$\left| \frac{R}{e_u} \leq 0,03 \frac{E}{R_{pt}} \right. \quad \text{Eq. C9.A 12.5-1} \quad 48,44 > 23,77$$

La vérification du voilement sous l'effet des contraintes de compression longitudinales est nécessaire

Paramètre omega_x	Eq. C9.A 12.5-5	omega_x =	26,94	
Coefficient C_xb	Tab. C9.A 12.5	C_xb =	6,00	
Coefficient C_x	§ C9.A 12.5 c)	C_x =	1,00	
Contrainte théorique de voilement	Eq. C9.A 12.5-12	sigma_xRcr =	2 613,14	MPa
Paramètre Q (Tolérances)	§ C9.A 12.5 e)	Q =	16,00	
Ampl. d'imperfection delta_wk	Eq. C9.A 12.5-16	delta_wk =	6,96	
Facteur d'imperfection alpha_x	Eq. C9.A 12.5-17	alpha_x =	0,39	
Elancement limite lambda_cc0x	Eq. C9.A 12.5-18	lambda_cc0x =	0,20	
Facteur domplast. beta_x	Eq. C9.A 12.5-19	beta_x =	0,60	
Exposant d'interaction neta_x	Eq. C9.A 12.5-20	neta_x =	1,00	
Elancement réduit lambda_ccx	Eq. C9.A 12.5-21	lambda_ccx =	0,32	
Elancement limite lambda_ccpx	Eq. C9.A 12.5-22	neta_x =	0,99	
Coeff. de réduction khi_x	Eq. C9.A 12.5-23+	khi_x =	0,91	Flambement élasto-plastique
Contrainte critique	Eq. C9.A 12.5-26	sigma_xRk =	241,21	MPa
Force F_cmax	Eq. C9.A 12.5-27	F_cmax =	1,88E+07	N
Moment M_max	Eq. C9.A 12.5-28	M_max =	7,28E+09	N.mm
Coefficient d'interaction	Eq. C9.A 12.8.3-1	k_x =	1,93	



CONTRAINTES CRITIQUES DE VOILEMENT ENVELOPPE CYLINDRIQUE

Page 3
20/02/25

Colonne 1° partie : Jupe

Contrainte critique de voilement circonférentiel

$$\left| \frac{R}{e_u} \leq 0,21 \sqrt{\frac{E}{R_{pt}}} \right. \quad \text{Eq. C9.A 12.6-1} \quad 48,44 > 5,91$$

La vérification du voilement sous l'effet des contraintes de compression circonférentielles est nécessaire

Paramètre omega_teta	Eq. C9.A 12.6-4	omega_teta =	26,94	
Coefficient C_teta	Tab. C9.A 12.6-1	C_teta =	1,50	
Coefficient C_tetas	Tab. C9.A 12.6-2	C_tetas =	1,51	
Contrainte théorique de voilement	§ C9.A 12.6 d)	sigma_tetaRcr =	224,08	MPa
Facteur alpha_teta (Tolérances)	§ C9.A 12.6 e)	alpha_teta =	0,50	
Elancement limite lambda_cc0teta	Eq. C9.A 12.6-19	lambda_cc0teta =	0,40	
Facteur domplast. beta_teta	Eq. C9.A 12.6-20	beta_teta =	0,60	
Exposant d'interaction neta_teta	Eq. C9.A 12.6-21	netateta =	1,00	
Elancement réduit lambda_ccteta	Eq. C9.A 12.6-22	lambda_ccteta =	1,09	
Elancement limite lambda_ccpteta	Eq. C9.A 12.6-23	lambda_ccpteta =	1,12	
Coeff. de réduction khi_teta	Eq. C9.A 12.6-24+	khi_teta =	0,43	Flambement élasto-plastique
Contrainte critique	Eq. C9.A 12.6-27	sigma_tetaRk =	112,77	MPa
Pres. ext./ Dépression P_max		P_max =	2,33	MPa
Coefficient d'interaction	Eq. C9.A 12.8.3-2	k_teta =	1,57	



CONTRAINTES CRITIQUES DE VOILEMENT ENVELOPPE CYLINDRIQUE

Page 4
20/02/25

Colonne 1° partie : Jupe

Contrainte critique de voilement par cisaillement

$$\left| \frac{R}{e_u} \leq 0,16 \left(\frac{E}{R_{pt}} \right)^{\frac{2}{3}} \right. \quad \text{Eq. C9.A12.7-1} \quad 48,44 \quad > \quad 13,70$$

La vérification du voilement sous l'effet du cisaillement est nécessaire

Paramètre omega_tau	Eq. C9.A12.7-4	omega_tau =	26,94	
Coefficient C_tau	C9.A12.7-5+	C_tau =	1,00	
Contrainte théorique de voilement	C9.A12.7_8	Tau_xtetaRcr =	626,46	MPa
Facteur alpha_tau (Tolérances)	§ C9.A12.7 e)	alpha_tau =	0,50	
Elancement limite lambda_cc0tau	Eq. C9.A12.6-19	lambda_cc0tau =	0,40	
Facteur dom.plast. beta_tau	Eq. C9.A12.6-20	beta_tau =	0,60	
Exposant d'interaction neta_tau	Eq. C9.A12.6-21	neta_tau =	1,00	
Elancement réduit lambda_cctau	Eq. C9.A12.7-15	lambda_cctau =	0,49	
Elancement limite lambda_ccptau	Eq. C9.A12.7-16	lambda_ccptau =	1,12	
Coeff. de réduction khi_tau	Eq. C9.A12.7-17+	khi_tau =	0,92	Flambement élasto-plastique
Contrainte critique	Eq. C9.A12.7-20	tau_xtetaRk =	122,07	MPa
Effort tranchant Q_max		Q_max =	4,75E+06	N
Coefficient d'interaction	Eq. C9.A12-8.3-3	k_tau =	1,94	
Coefficient d'interaction	Eq. C9.A12-8.3-4	k_i =	0,15	



CONTRAINTES CRITIQUES DE VOILEMENT ENVELOPPE CYLINDRIQUE

Page 1
20/02/25

Colonne 2° partie : colonne

Situation

Pression d'étude Pétude = 3,90 MPa
Température d'étude Tétude = 20,00 °C

Matériau

NF EN 10028-2 2002 P295GH

Limite d'élasticité R_{pt_i} = 295,00 MPa
Module d'élasticité E_i = 198 500,00 MPa
Coefficient de Poisson nu = 0,30

Caractéristiques géométriques du composant

Cylindre

Diamètre intérieur di_i = 1 500,00 mm
Epaisseur e_i = 33,00 mm
Longueur l_i = 29 535,00 mm

Rayon moyen rm_i = 766,50 mm

Conditions aux limites du composant

Direction
radiale Direction
méridienne

Extrémité 1 Appuyé Appuyé
Extrémité 2 Appuyé Appuyé

Imperfections de fabrication

Référentiel de construction

CODAP 2010

Diamètre maximum mesuré ** mm
Diamètre minimum mesuré ** mm
Ovalisation 0,015 -
Classe de tolérance relative à l'ovalisation C

Ecart de forme
Dir. longitudinale hors zones soudées 6 mm
Dir. longitudinale zones soudées - mm
Dir. circonférentielle hors zones soudées - mm
Dir. circonférentielle zones soudées - mm
Classe de tolérance relative aux écarts de forme C Val. max. Ecart : 4,00

Ecart d'alignement des fibres moyennes 4,10 mm
Ecart d'alignement des fibres moyennes / e_i 0,1242 -
Classe de tolérance relative aux écarts d'alignement C
Classe de tolérance globale C



CONTRAINTES CRITIQUES DE VOILEMENT ENVELOPPE CYLINDRIQUE

Page 2
20/02/25

Colonne 2° partie : colonne

Contrainte critique de voilement longitudinale

$$\left| \frac{R}{e_u} \leq 0,03 \frac{E}{R_{pt}} \right. \quad \text{Eq. C9.A 12.5-1} \quad 23,23 \quad > \quad 20,19$$

La vérification du voilement sous l'effet des contraintes de compression longitudinales est nécessaire

Paramètre omega_x	Eq. C9.A 12.5-5	omega_x =	185,71	
Coefficient C_xb	Tab. C9.A 12.5	C_xb =	6,00	
Coefficient C_x	§ C9.A 12.5 c)	C_x =	0,60	
Contrainte théorique de voilement	Eq. C9.A 12.5-12	sigma_xRcr =	3 102,19	MPa
Paramètre Q (Tolérances)	§ C9.A 12.5 e)	Q =	16,00	
Ampl. d'imperfection delta_wk	Eq. C9.A 12.5-16	delta_wk =	9,94	
Facteur d'imperfection alpha_x	Eq. C9.A 12.5-17	alpha_x =	0,46	
Elancement limite lambda_cc0x	Eq. C9.A 12.5-18	lambda_cc0x =	0,20	
Facteur domplast. beta_x	Eq. C9.A 12.5-19	beta_x =	0,60	
Exposant d'interaction neta_x	Eq. C9.A 12.5-20	neta_x =	1,00	
Elancement réduit lambda_ccx	Eq. C9.A 12.5-21	lambda_ccx =	0,31	
Elancement limite lambda_ccpx	Eq. C9.A 12.5-22	neta_x =	1,08	
Coeff. de réduction khi_x	Eq. C9.A 12.5-23+	khi_x =	0,93	Flambement élasto-plastique
Contrainte critique	Eq. C9.A 12.5-26	sigma_xRk =	273,10	MPa
Force F_cmax	Eq. C9.A 12.5-27	F_cmax =	4,34E+07	N
Moment M_max	Eq. C9.A 12.5-28	M_max =	1,66E+10	N.mm
Coefficient d'interaction	Eq. C9.A 12.8.3-1	k_x =	1,94	



CONTRAINTES CRITIQUES DE VOILEMENT ENVELOPPE CYLINDRIQUE

Page 3
20/02/25

Colonne 2° partie : colonne

Contrainte critique de voilement circonférentiel

$$\left| \frac{R}{e_u} \leq 0,21 \sqrt{\frac{E}{R_{pt}}} \right. \quad \text{Eq. C9.A 12.6-1} \quad 23,23 > 5,45$$

La vérification du voilement sous l'effet des contraintes de compression circonférentielles est nécessaire

Paramètre omega_teta	Eq. C9.A 12.6-4	omega_teta =	185,71	
Coefficient C_teta	Tab. C9.A 12.6-1	C_teta =	1,50	
Contrainte théorique de voilement	§ C9.A 12.6 d)	sigma_tetaRcr =	102,11	MPa
Facteur alpha_teta (Tolérances)	§ C9.A 12.6 e)	alpha_teta =	0,50	
Elancement limite lambda_cc0teta	Eq. C9.A 12.6-19	lambda_cc0teta =	0,40	
Facteur domplast. beta_teta	Eq. C9.A 12.6-20	beta_teta =	0,60	
Exposant d'interaction neta_teta	Eq. C9.A 12.6-21	neta_teta =	1,00	
Elancement réduit lambda_ccteta	Eq. C9.A 12.6-22	lambda_ccteta =	1,70	
Elancement limite lambda_ccpteta	Eq. C9.A 12.6-23	lambda_ccpteta =	1,12	
Coeff. de réduction khi_teta	Eq. C9.A 12.6-24+	khi_teta =	0,17	Flambement élastique
Contrainte critique	Eq. C9.A 12.6-27	sigma_tetaRk =	51,05	MPa
Pres. ext./ Dépression P_max		P_max =	2,20	MPa
Coefficient d'interaction	Eq. C9.A 12.8.3-2	k_teta =	1,38	



CONTRAINTES CRITIQUES DE VOILEMENT ENVELOPPE CYLINDRIQUE

Page 4
20/02/25

Colonne 2° partie : colonne

Contrainte critique de voilement par cisaillement

$$\left| \frac{R}{e_u} \leq 0,16 \left(\frac{E}{R_{pt}} \right)^{\frac{2}{3}} \right. \quad \text{Eq. C9.A12.7-1} \quad 23,23 \quad > \quad 12,29$$

La vérification du voilement sous l'effet du cisaillement est nécessaire

Paramètre omega_tau	Eq. C9.A12.7-4	omega_tau =	185,71	
Coefficient C_tau	C9.A12.7-5+	C_tau =	1,00	
Contrainte théorique de voilement	C9.A12.7_8	Tau_xtetaRcr =	470,34	MPa
Facteur alpha_tau (Tolérances)	§ C9.A12.7 e)	alpha_tau =	0,50	
Elancement limite lambda_cc0tau	Eq. C9.A12.6-19	lambda_cc0tau =	0,40	
Facteur domplast. beta_tau	Eq. C9.A12.6-20	beta_tau =	0,60	
Exposant d'interaction neta_tau	Eq. C9.A12.6-21	neta_tau =	1,00	
Elancement réduit lambda_cctau	Eq. C9.A12.7-15	lambda_cctau =	0,60	
Elancement limite lambda_ccptau	Eq. C9.A12.7-16	lambda_ccptau =	1,12	
Coeff. de réduction khi_tau	Eq. C9.A12.7-17+	khi_tau =	0,83	Flambement élasto-plastique
Contrainte critique	Eq. C9.A12.7-20	tau_xtetaRk =	122,63	MPa
Effort tranchant Q_max		Q_max =	9,74E+06	N
Coefficient d'interaction	Eq. C9.A12-8.3-3	k_tau =	1,87	
Coefficient d'interaction	Eq. C9.A12-8.3-4	k_i =	0,03	

ANNEXE 3 **RESERVOIRS HORIZONTAUX SUR DEUX BERCEAUX** **1° PARTIE** **ESTIMATION DE LA REPONSE SISMIQUE** **A PARTIR DE CALCULS ANALYTIQUES (PROCEDURE 1)**

Figure A3/1-1 & Figure A3/1-2 : Schéma de l'équipement et notations

Figure A3/1-3 : Notations

Figure A3/1-4 : Détermination de l'accélération maximum admissible par les ancrages

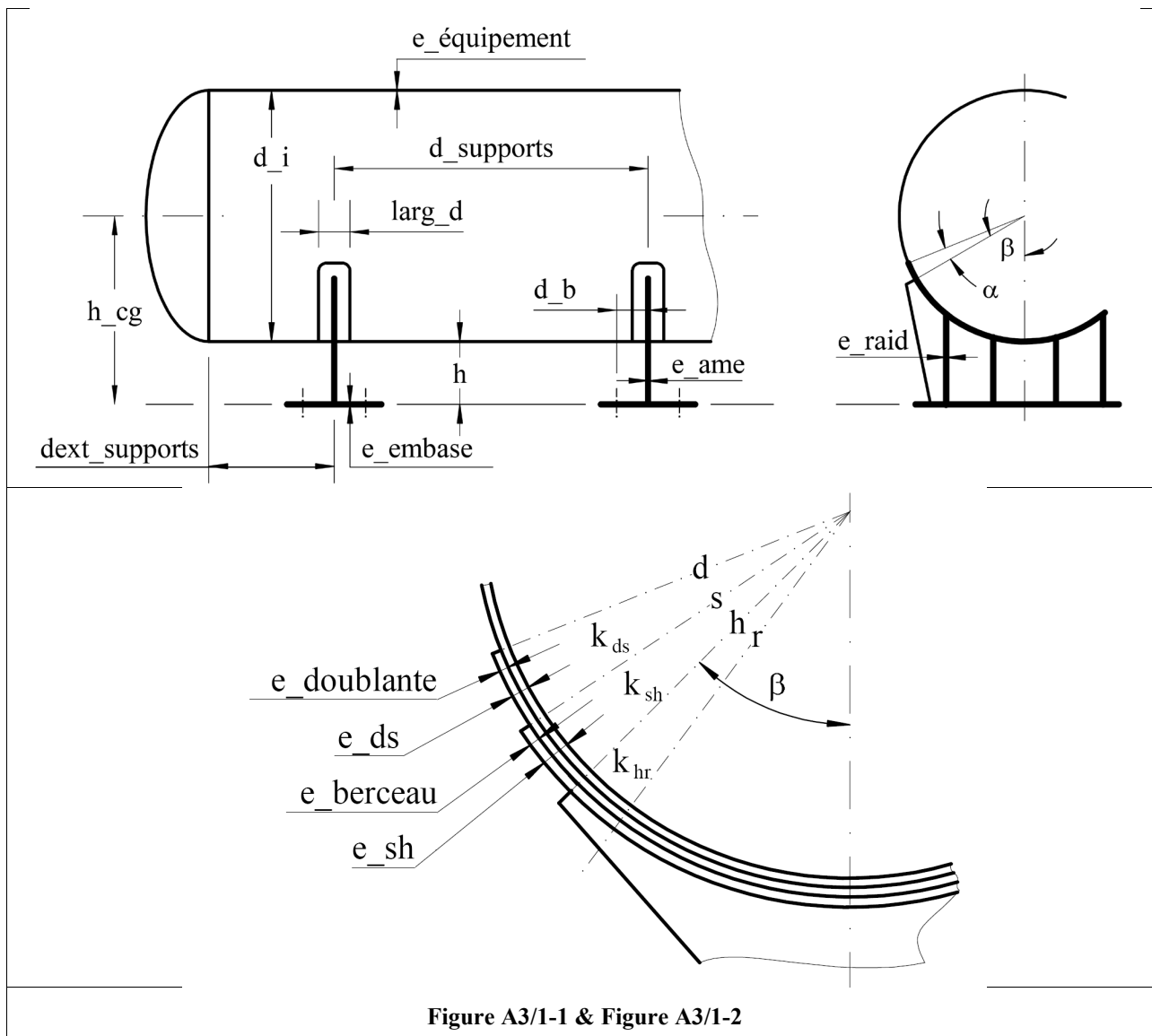
Figure A3/1-5 : Comportement du réservoir dans les directions transversale et verticale

Figure A3/1-6 : Comportement l'échangeur dans les directions transversale et verticale

Figure A3/1-7 : Comportement de l'équipement dans la direction longitudinale

Figure A3/1-8 : Vérification de la résistance du support fixe

Figure A3/1-9 : Contraintes circonférentielles maximales en tête de berceaux



Notations

$Cis_ancrage$	=	Effort de cisaillement admissible par un ancrage Note : il s'agit ici de la résistance de la tige (crosse) d'ancrage uniquement. La résistance du béton « correspondant » doit, par ailleurs, être évaluée par l'intervenant.
$d_supports$	=	Distance entre les supports
$dext_supports$	=	Distance entre l'extrémité de la partie cylindrique de l'équipement et le premier support
d_e	=	Diamètre extérieur de l'équipement
d_i	=	Diamètre intérieur de l'équipement
r_i		Rayon intérieur de l'équipement
$dist_ancrages$	=	Distance entre les ancrages les plus éloignés d'une même embase
e_ame	=	Épaisseur de l'âme des berceaux
$e_berceau$	=	Épaisseur de la tôle du berceau
e_embase	=	Épaisseur de l'embase
$e_équipement$	=	Épaisseur de la paroi de l'équipement
e_gorge	=	Gorge de la soudure de l'embase et de l'âme du support
e_raid	=	Épaisseur des renforts de l'âme du berceau
e_ref		Épaisseur e référence pour la détermination des coefficients k_r
$E_supports$	=	Module d'élasticité du matériau des supports
$f_soudure$	=	Limite admissible du matériau de la soudure
$f_enveloppe$	=	Contrainte de membrane admissible du matériau de la paroi de l'appareil
g_x, g_y, g_z	=	Accélérations sismiques dans les directions longitudinale, transversale et verticale respectivement
$G_supports$	=	Module de cisaillement du matériau des supports
h	=	Hauteur au droit de la génératrice inférieure de l'enveloppe du réservoir
h_cg	=	Altitude du centre de gravité de l'ensemble équipement + fluide
$I_{yy_supports}$	=	Moment d'inertie de la section droite du support au droit de la génératrice inférieure de l'équipement
$l_équipement$	=	Longueur totale de l'équipement

Figure A3/1-3

Notations (suite)

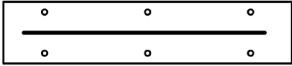
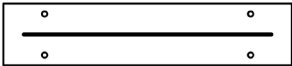
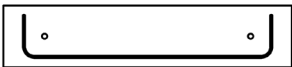
n_{ancrages}	=	Nombre de boulons d'ancrage par file (1 ou 2)
n_{files}	=	Nombre de files de boulons d'ancrage (2 ou 3)
		3 files & 2 ancrages par file
		2 files & 2 ancrages par file
		2 files & 1 ancrage par file
n_{supports}	=	Nombre de supports
ν_{supports}	=	Coefficient de Poisson du matériau des supports
P_{ds}	=	Poids de l'équipement (équipement + fluide)
Q	=	Réaction au droit d'un support
$R_{p_ancrage}$	=	Limite d'élasticité du matériau des ancrages
R_{p_embase}	=	Limite d'élasticité du matériau de l'embase
$R_{p_enveloppe}$	=	Limite d'élasticité du matériau de la paroi de l'appareil
$R_{p_soudure}$	=	Limite d'élasticité du matériau de la soudure
S_{supports}	=	Surface de la section droite du support au droit de la génératrice inférieure de l'équipement
T_{ancrage}	=	Effort d'arrachement admissible par un ancrage

Figure A3/1-3 (suite)

Détermination de l'accélération maximum admissible par les ancrages

Facteur de réduction de la résistance à la flexion de l'embase	$R_{embase} = \frac{Rp_{embase} \quad e_{embase}^2}{3 \quad T_{ancrage}}$
Facteur de réduction de la résistance de la soudure de l'embase	$R_{soudure} = \frac{2 \quad e_{soudure} \quad d_b \quad f_{soudure}}{T_{ancrage}}$
Effort d'arrachement admissible réduit	$Tr_{ancrage} = T_{ancrage} \quad \text{MIN}(R_{soudure} ; R_{embase})$

$\alpha = \frac{Tr_{ancrage}}{Cis_{ancrage}}$
$F1 = \sqrt{n_{supports}^2 + 1}$
$F2 = \sqrt{n_{files}^2 \left(\frac{h_{cg}}{dist_{ancrages}} \right)^2 + \left(\frac{2}{3} \right)^2 + \left(\frac{h_{cg}}{d_{supports}} \right)^2 \left(\frac{n_{supports}^2}{(n_{supports} - 1)^2} \right)}$
$W_b = \frac{Pds}{n_{supports} \quad n_{files} \quad n_{ancrages}}$
$\lambda 1 = \frac{Cis_{ancrage}}{W_b} \quad \frac{1}{F1}$ $\lambda 2 = \frac{\frac{Cis_{ancrage}}{W_b} + \frac{0,7}{\alpha}}{\frac{0,7}{\alpha} \quad F2 + F1}$

Accélération maximum admissible par les ancrages	$\lambda = \text{MIN}(\lambda 1 ; \lambda 2)$
--	---

Figure A3/1-4

Comportement du réservoir dans les directions transversales et verticales

Le graphique ci-après permet de déterminer, en fonction du diamètre du **réservoir**, l'espacement maximal entre supports en-deçà duquel le réservoir aura un comportement « rigide » ou, au contraire, au-delà duquel le réservoir aura un comportement « flexible ».

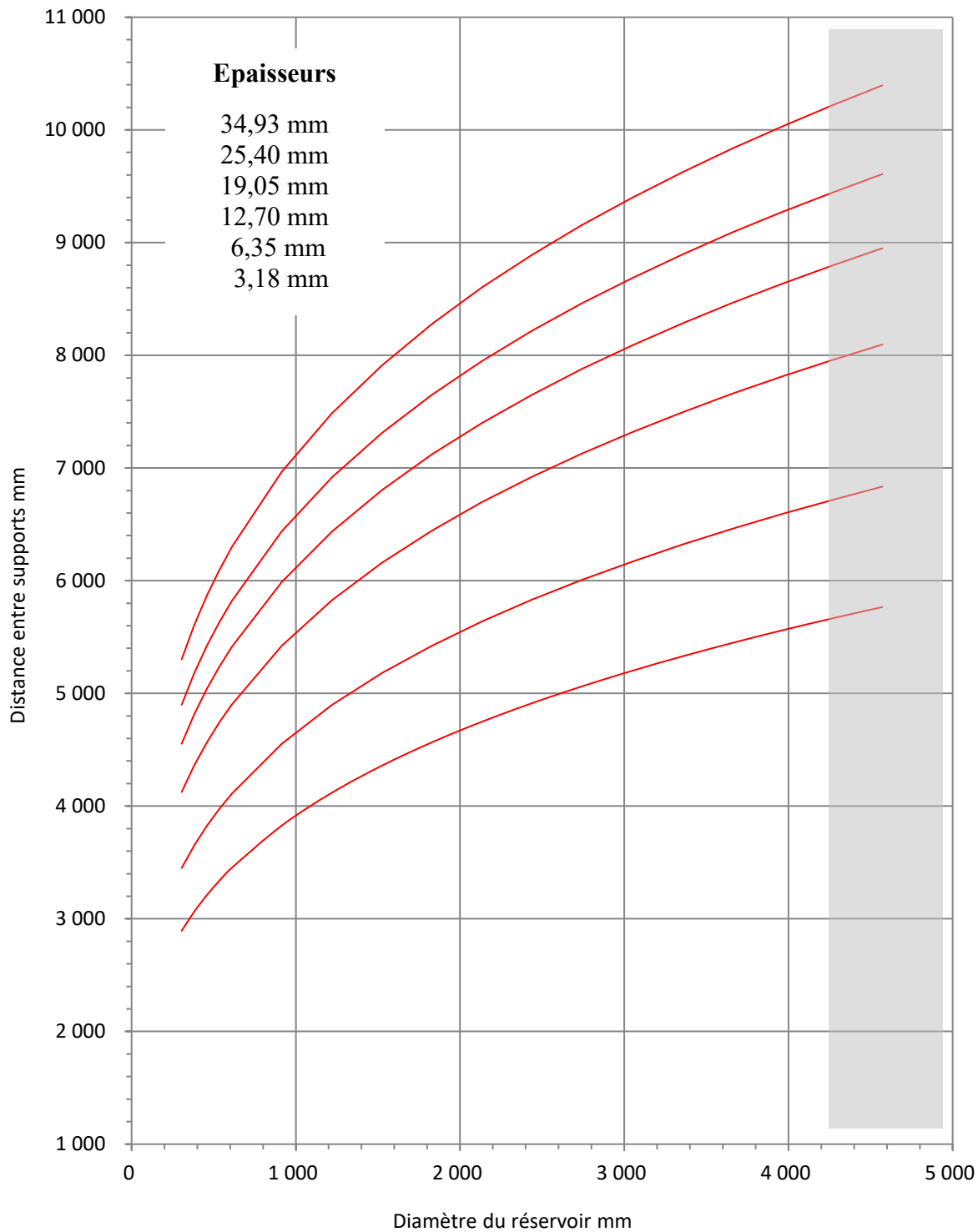


Figure A3/1-5

Comportement de l'échangeur dans les directions transversale et verticale

Le graphique ci-après permet de déterminer, en fonction du diamètre de **l'échangeur**, l'espacement maximal entre supports en-deçà duquel l'échangeur aura un comportement « rigide » ou, au contraire, au-delà duquel l'échangeur aura un comportement « flexible ».

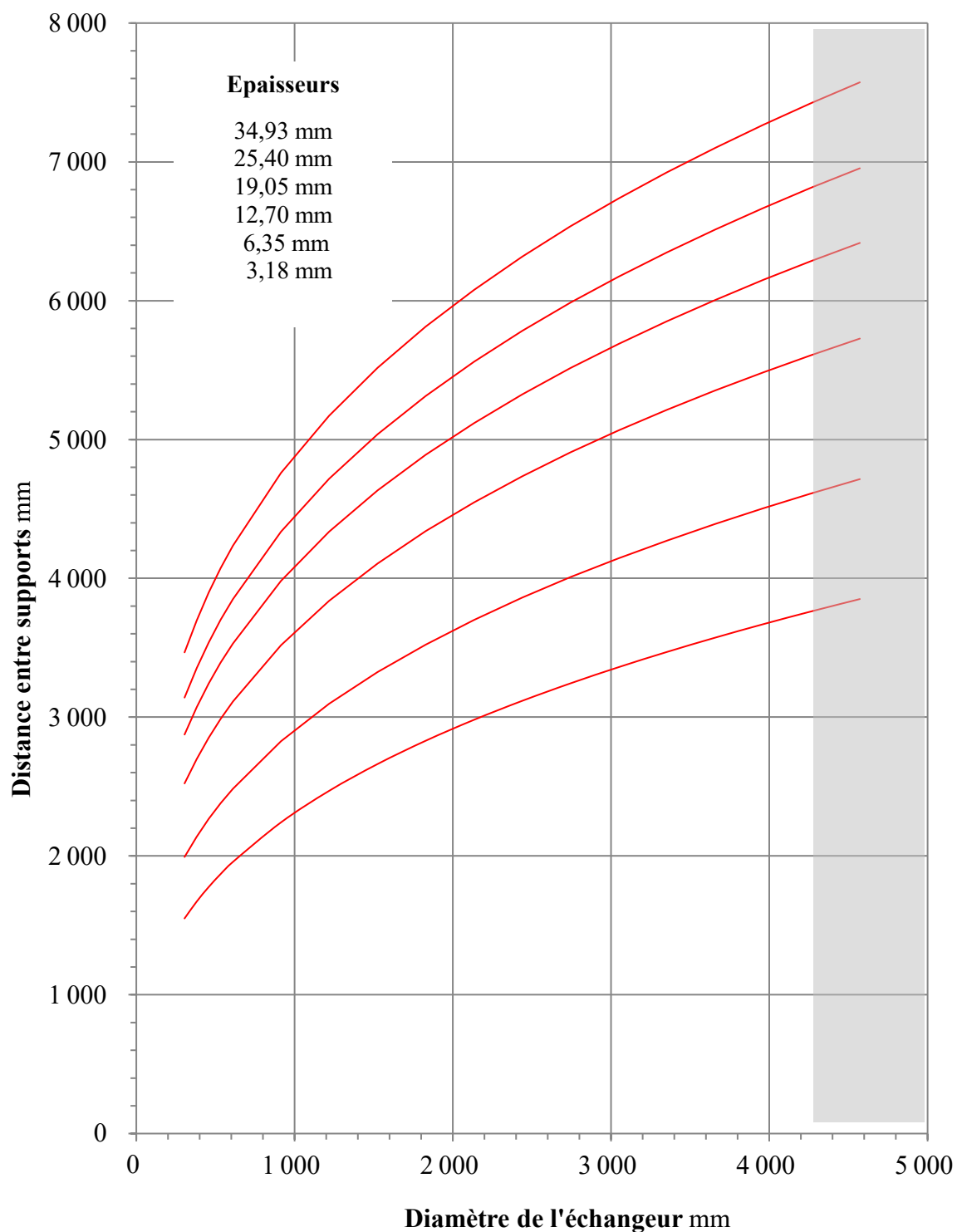


Figure A3/1-6

Comportement de l'équipement dans la direction longitudinale

Raideur du support dans la direction longitudinale	$k_{supports} = \frac{1}{\frac{h^3}{3 E_{supports} I_{yy_supports}} + \frac{h}{S_{supports} G_{supports}}}$
Fréquence fondamentale dans la direction longitudinale	$Fréquence_longi = \frac{1}{2 \pi} \sqrt{\frac{k_{supports} g}{Pds}}$ <p>Si la fréquence ainsi déterminée est ≥ 33 Hz (Note) alors l'équipement aura un comportement « rigide » dans la direction longitudinale, « flexible » dans le cas contraire.</p> <p>Note : Cette valeur peut être réduite à la valeur de la fréquence au-delà de laquelle il n'y a aucune amplification dynamique significative.</p>
Figure A3/1-7	

Évaluation du comportement sismique des ancrages de l'équipement

Si l'équipement peut être considéré comme ayant un comportement « rigide » dans les trois directions, les ancrages seront acceptables si l'accélération maximale définie par le spectre horizontal à la fréquence de 33 Hz est inférieure ou égale à l'accélération maximum λ admissible par l'équipement.

Si l'équipement doit être considéré comme ayant un comportement « flexible » dans les directions transversales et verticale, les ancrages seront acceptables si l'accélération maximale définie par le spectre horizontal (ou par le spectre vertical si cette valeur est supérieure) est inférieure ou égale à l'accélération maximum λ admissible par l'équipement.

Si l'équipement doit être considéré comme ayant un comportement « flexible » dans la direction longitudinale et rigide dans les deux autres directions, les ancrages seront acceptables si l'accélération maximale définie par le spectre horizontal à est inférieure ou égale à l'accélération maximum λ admissible par l'équipement.

Si l'équipement peut être considéré comme ayant un comportement « flexible » dans les trois directions, les ancrages seront acceptables si les accélérations maximales définies par le spectre horizontal et le spectre vertical sont inférieures ou égales à l'accélération maximum λ admissible par l'équipement.

Cette évaluation du comportement général de l'équipement et cette vérification des ancrages doivent être complétées par la vérification des supports (Note), notamment du support fixe et par la vérification des contraintes maximum en tête de berceau présentée ci-après.

Note : Cette vérification peut être réalisée simplement conformément aux procédures 4-10 & 4-11 de la référence [95b].

Vérification de la résistance du support fixe

Effort longitudinal admissible par le berceau

$$F_{Lbmax} \leq \frac{C_raid \quad Rp_ancrage \quad I_{yy}}{h + d_e \left(0,5 - \frac{\sin(\beta)}{2\beta} \right)}$$

C_raid = 1 pour des raidisseurs obtenus par pliage

C_raid = 0,6 pour des raidisseurs soudés

Effort longitudinal appliqué au berceau

$$F_{Lb} = Pds \quad \lambda$$

$$F_{Lb} \leq F_{Lbmax}$$

Figure A3/1-8

Contraintes circonférentielles maximales en tête de berceaux

Détermination des coefficients k_ϕ (effet de l'angle de supportage), k_a (effet de la distance entre l'extrémité de l'équipement et le premier support), k_c (effet de la distance entre les supports) à partir des graphiques Figures A3/2-10 à A3/2-14-A3/2-26 et du coefficient k_s (effet de l'éventuelle tôle de berceau et de l'éventuelle doublante) à partir de la procédure ci-après.

$$k_s = k_{ss} k_{sr}$$

Calcul de k_{ss}

Ce facteur permet de prendre en compte l'influence de la flexibilité du support. De manière conservatrice le support peut être considéré comme parfaitement rigide et dans ce cas $k_{ss} = 1$. Dans le cas contraire la procédure pour déterminer k_{ss} est la suivante :

$$k_{ss} = k_{hr} \frac{k_{\phi r}}{k_{\phi h}} \quad \text{avec :}$$

$k_{\phi r}$ et $k_{\phi h}$ coefficients k_ϕ respectivement pour les sections r et h Voir Figure A3/1-2

k_{hr} coefficient k_r (Figures A3/2-15 à A3/2-2726) pour la section hr Voir Figures A3/1-2

Calcul de k_{sr}

Ce facteur permet de prendre en compte l'influence de l'éventuelle tôle du berceau et de l'éventuelle doublante. Il doit être déterminé conformément à la procédure suivante :

$$k_{sr} = k_{ds} k_{sh}^2 k_{hr} \frac{k_{\phi r}}{k_{\phi s}}$$

$k_{\phi s}$ coefficient k_ϕ pour la section s Voir Figure A3/1-2

k_{ds} coefficient k_r (Figures A3/2-15 à A3/2-26) pour la section ds Voir Figure A3/1-2

avec $e_{ref} = e_{ds}$

k_{sh} coefficient k_r (Figures A3/2-15 à A3/2-26) pour la section sh Voir Figure A3/1-2

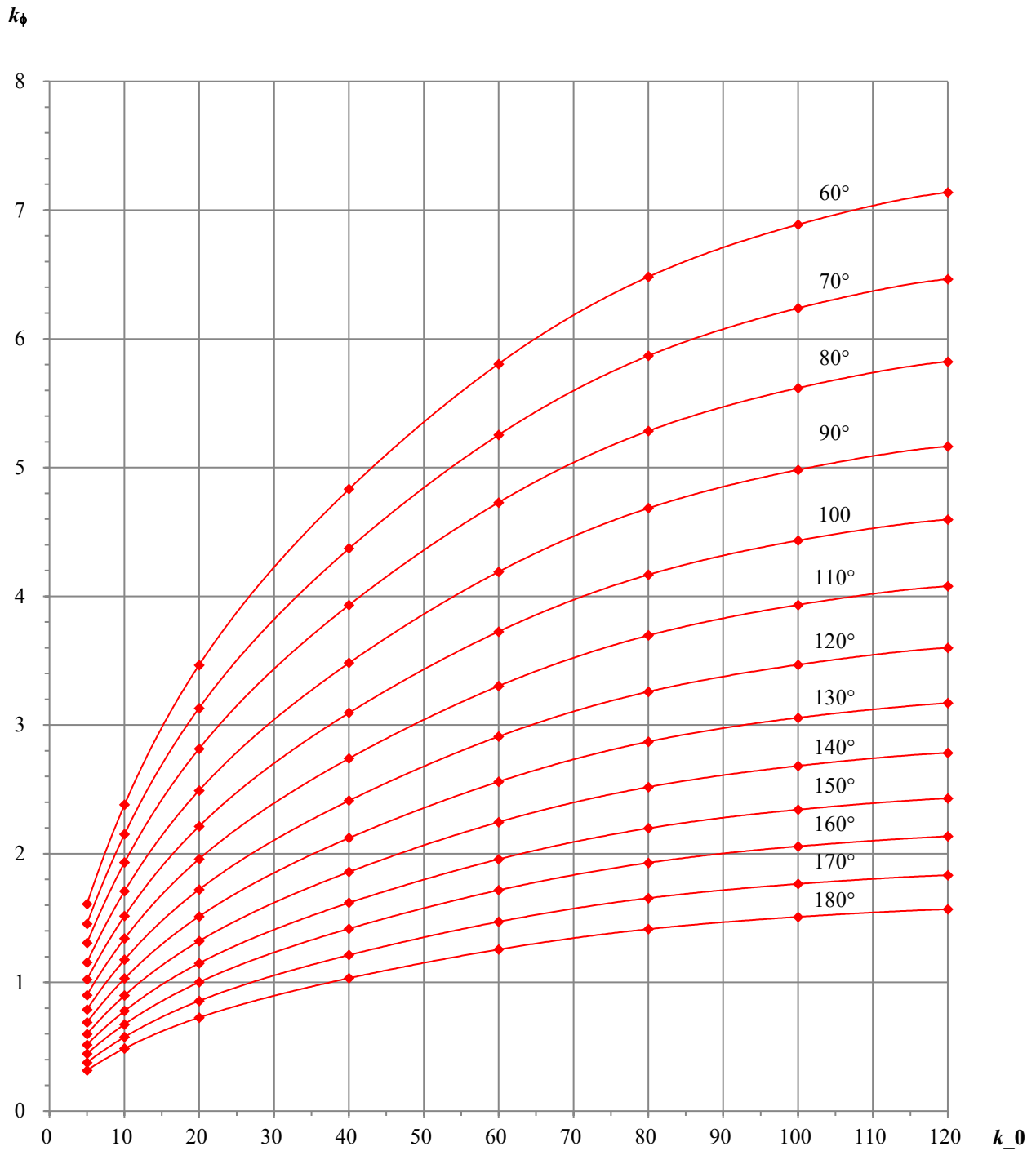
avec $e_{ref} = e_{sh}$

$$k_g = 3 \text{ voir aussi [100]}$$

Figure A3/1-9

Détermination et évaluation des contraintes circonférentielles maximales en tête de berceaux	
Défaillance par déformation excessive	
$\sigma_{\phi} = k_{\phi} k_a k_c k_s \left(-1 + \frac{h_{cg}}{d_{supports}} g_x + k_g g_y + g_z \right) \frac{Q}{e_{\text{équipement}}^2} \sqrt{\frac{2 e_{\text{équipement}}}{d_i}}$	
<p>Cette contrainte doit être combinée à la contrainte due à la pression de service et évaluée dans le cas du spectre réduit par rapport 1,5 fois la contrainte circonférentielle totale (membrane + flexion) admissible pour une situation normale de service ou dans le cas du spectre de base par rapport à 1,5 fois la contrainte circonférentielle totale (membrane + flexion) admissible pour une situation de service exceptionnelle.</p>	
Défaillance par instabilité élastique ou élastoplastique	
$\sigma_{\phi} = k_{\phi} k_a k_c k_s \left(-1 - \frac{h_{cg}}{d_{supports}} g_x - k_g g_y - g_z \right) \frac{Q}{e_{\text{équipement}}^2} \sqrt{\frac{2 e_{\text{équipement}}}{d_i}}$	
<p>Cette contrainte doit être combinée à la contrainte due à la dépression éventuelle et évaluée à partir du spectre de base par rapport à la contrainte de compression admissible déterminée à partir de la méthodologie définie par les références [167], [163], [180].</p>	

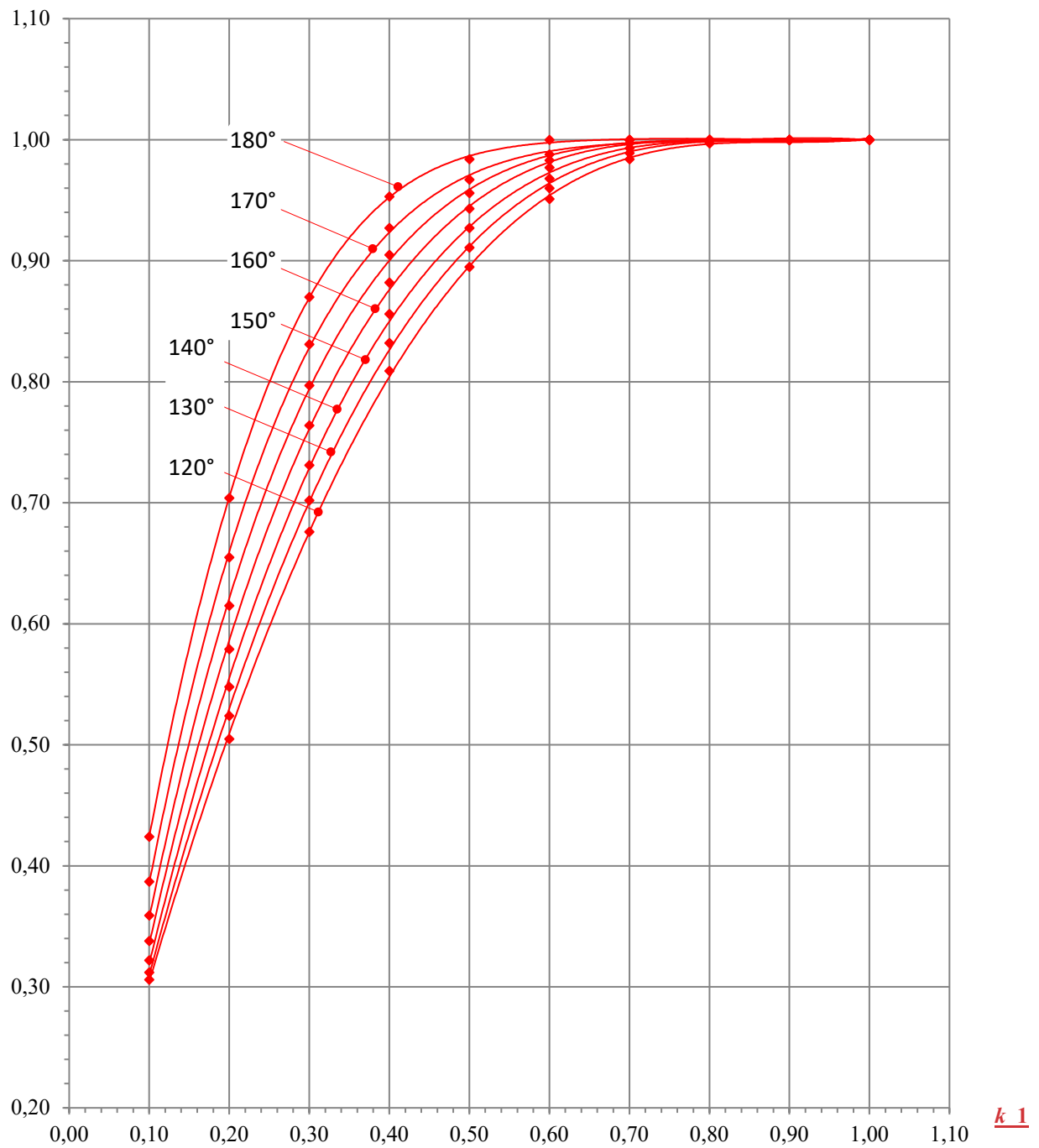
Figure A3/1-9 (suite)



$$k_0 = \frac{r_i}{larg_d} \sqrt{\frac{r_i}{e_{\text{équipement}}}}$$

Figure A3/1-10 : Coefficient k_ϕ

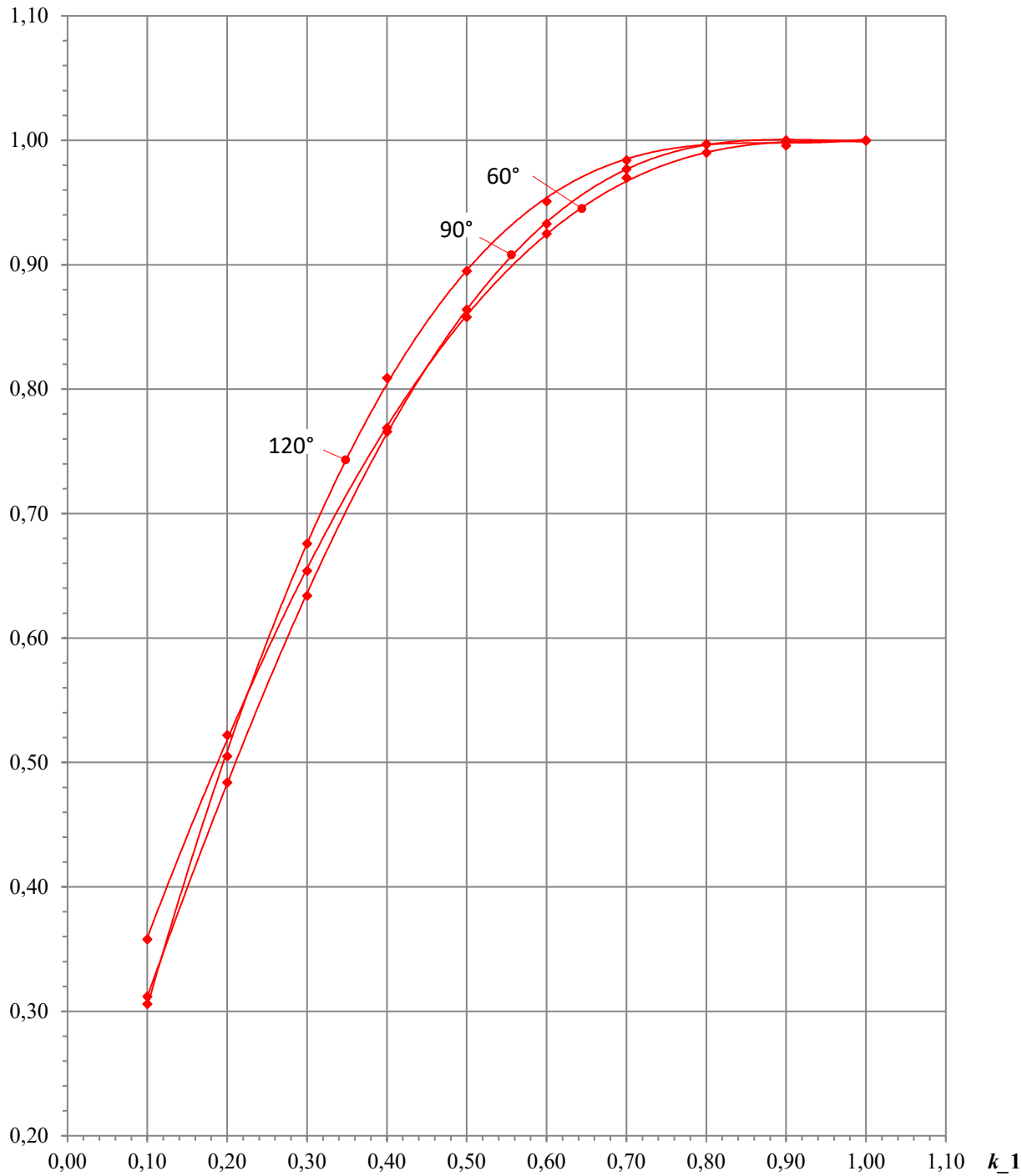
k_a



$$k_1 = \frac{d_{ext_supports}}{r_i} \sqrt{\frac{e_{\text{équipement}}}{r_i}}$$

Figure A3/1-11 : Coefficient k_a

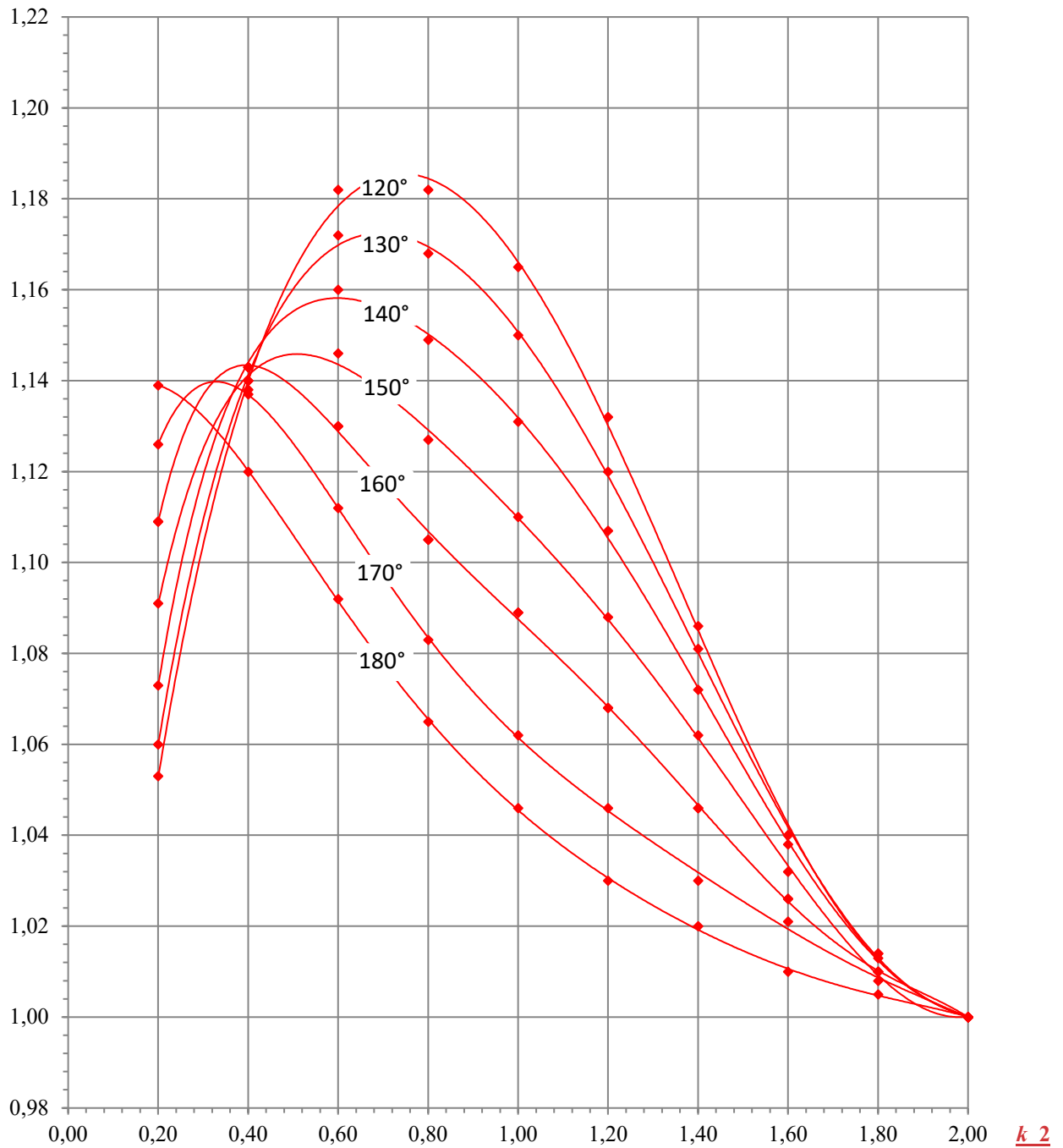
k_a



$$k_1 = \frac{d_{ext_supports}}{r_i} \sqrt{\frac{e_{\text{équipement}}}{r_i}}$$

Figure A3/1-12 : Coefficient k_a (suite)

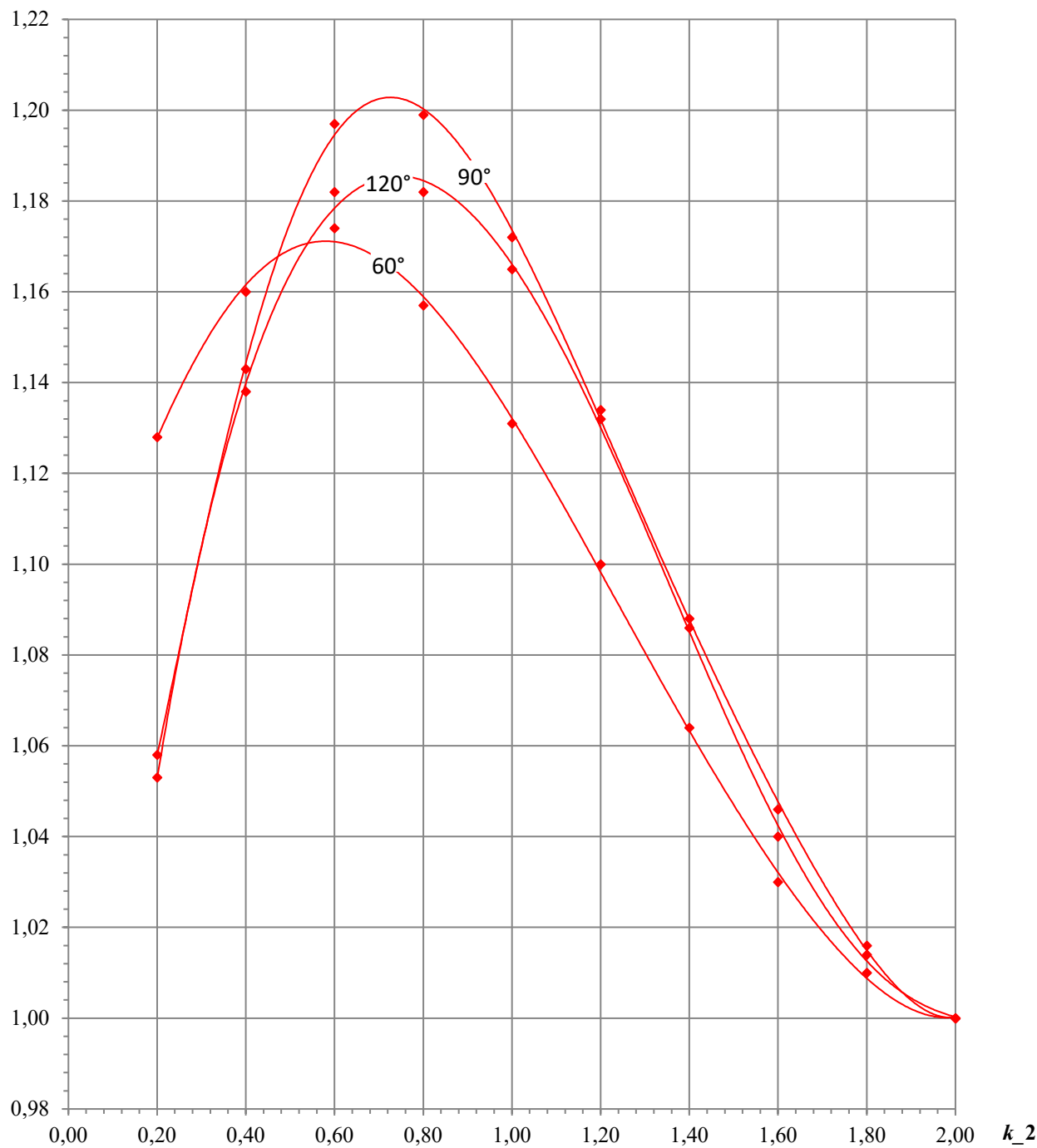
k_c



$$k_2 = \frac{d_{\text{supports}}}{r_i} \sqrt{\frac{e_{\text{équipement}}}{r_i}}$$

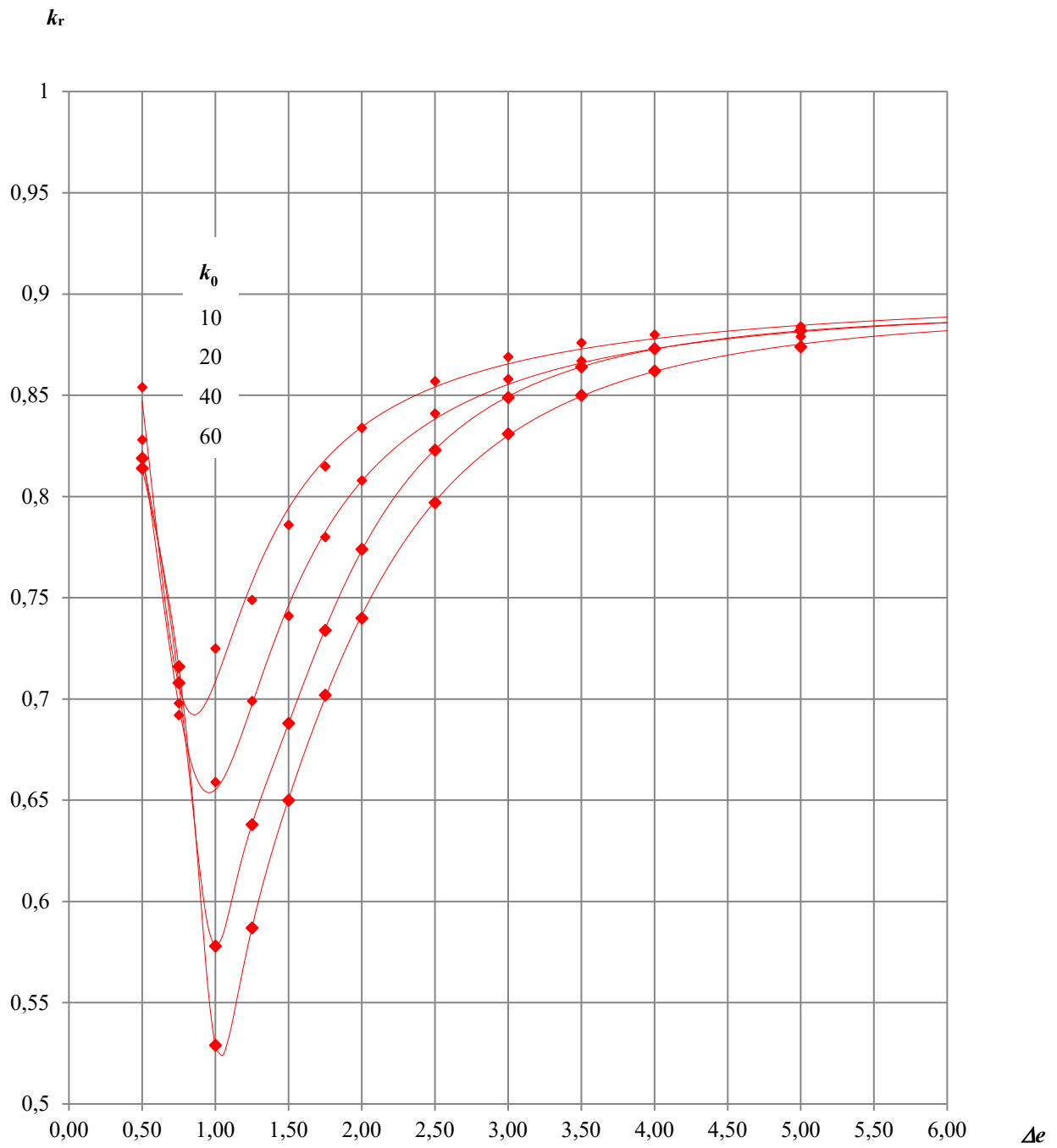
Figure A3/1-13 : Coefficient k_c

k_c



$$k_2 = \frac{d_{\text{supports}}}{r_i} \sqrt{\frac{e_{\text{équipement}}}{r_i}}$$

Figure A3/1-14 : Coefficient k_c (suite)



$$2\beta = 90^\circ \quad \alpha = 5^\circ \quad k_0 = \frac{r_i}{larg_d} \sqrt{\frac{r_i}{e_{\text{équipement}}}} \quad \Delta e = \frac{e_{\text{ref}}}{e_{\text{équipement}}}$$

Figure A3/1-15 : Coefficient k_r

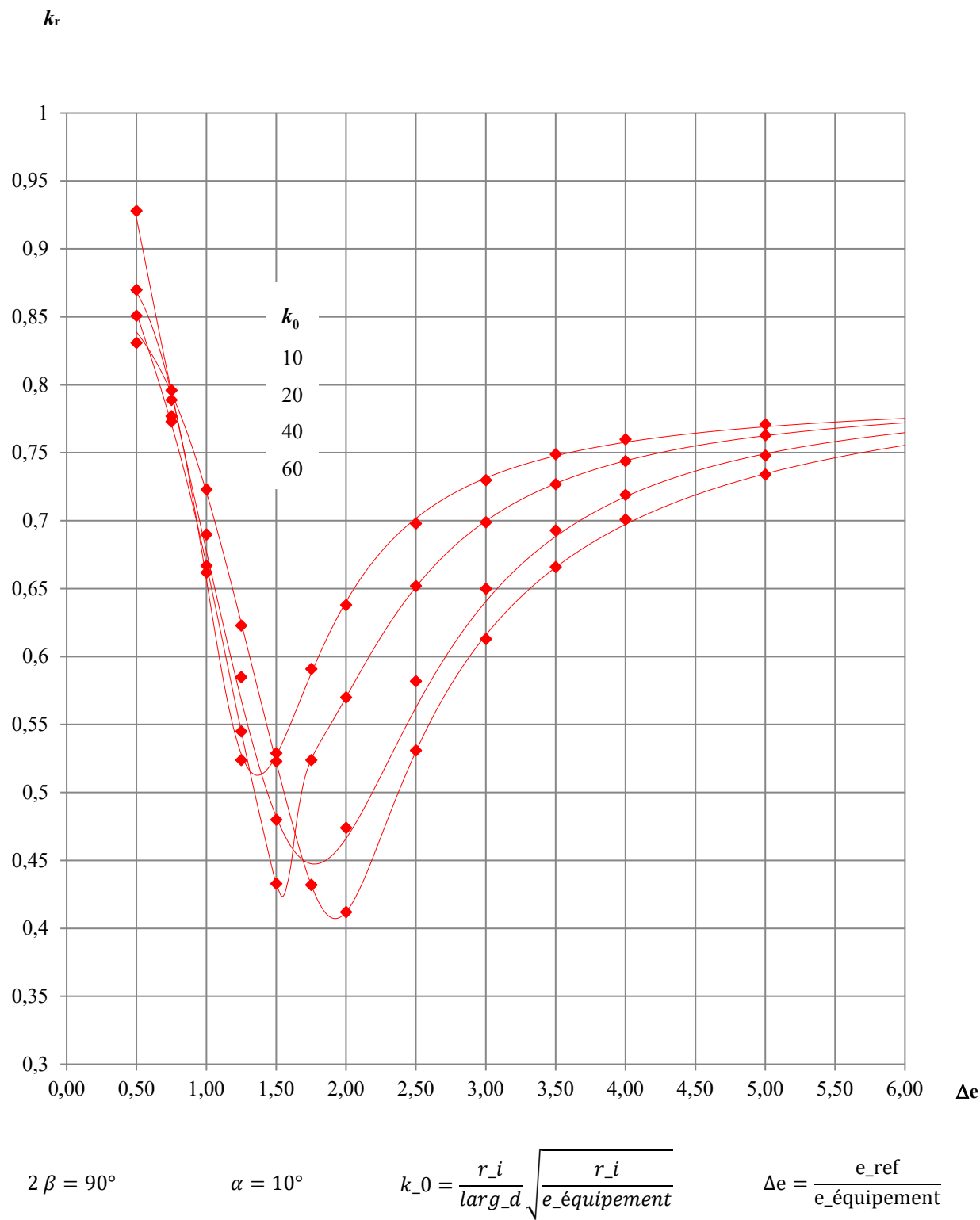


Figure A3/1-16 : Coefficient k_r

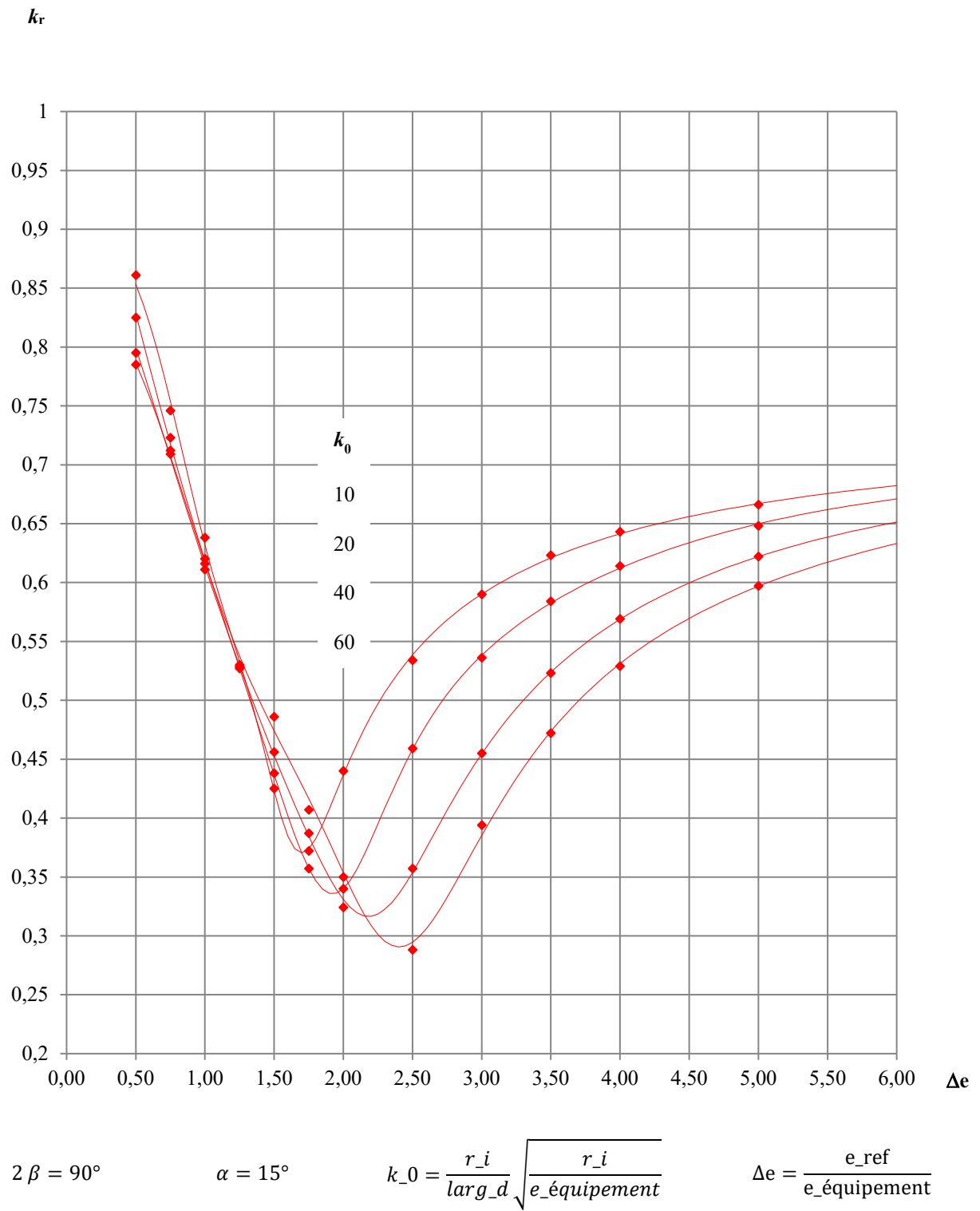
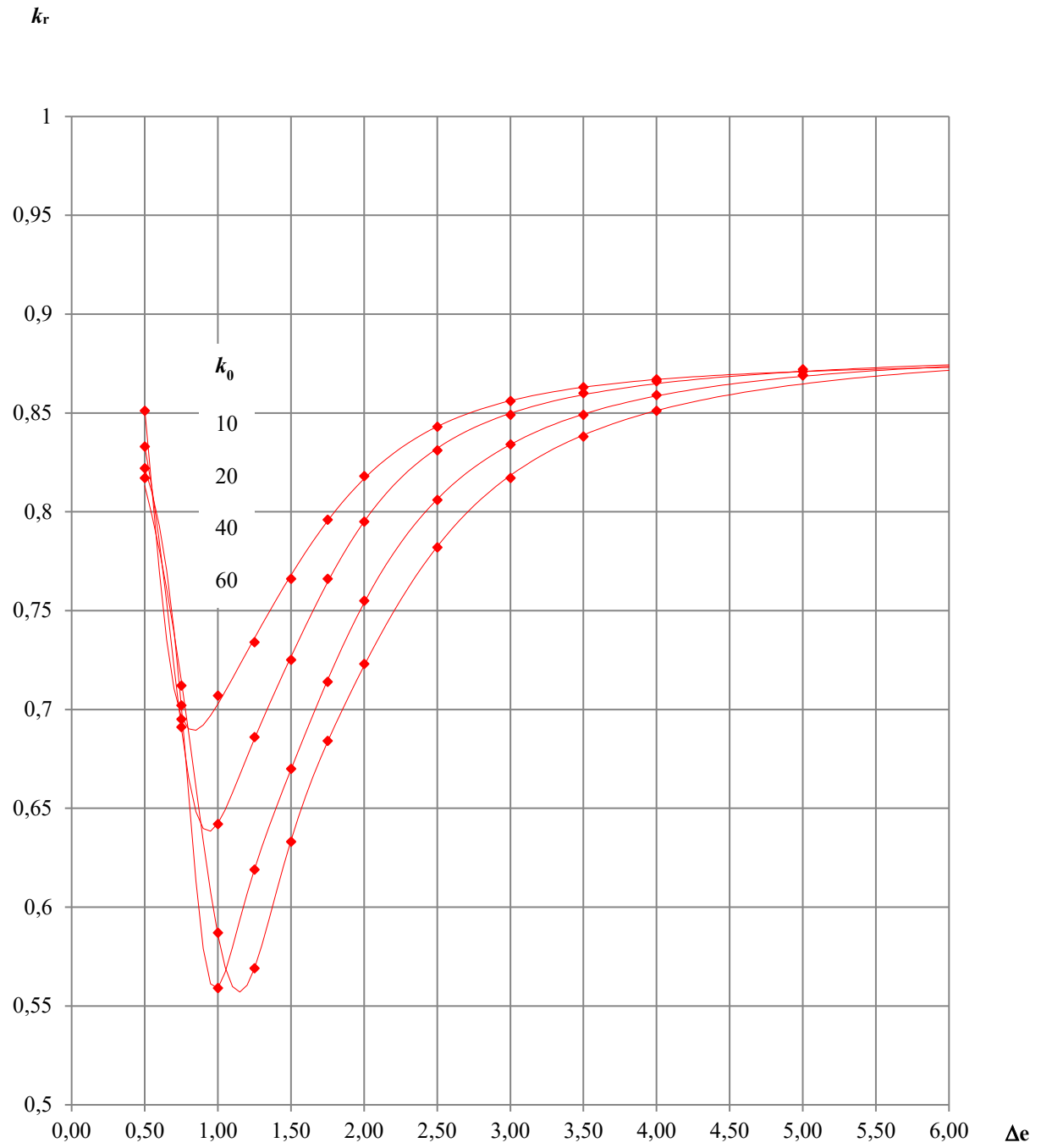


Figure A3/1-17 : Coefficient k_r



$$2\beta = 120^\circ \quad \alpha = 5^\circ \quad k_0 = \frac{r_i}{larg_d} \sqrt{\frac{r_i}{e_{\text{équipement}}}} \quad \Delta e = \frac{e_{\text{ref}}}{e_{\text{équipement}}}$$

Figure A3/1-18 : Coefficient k_r

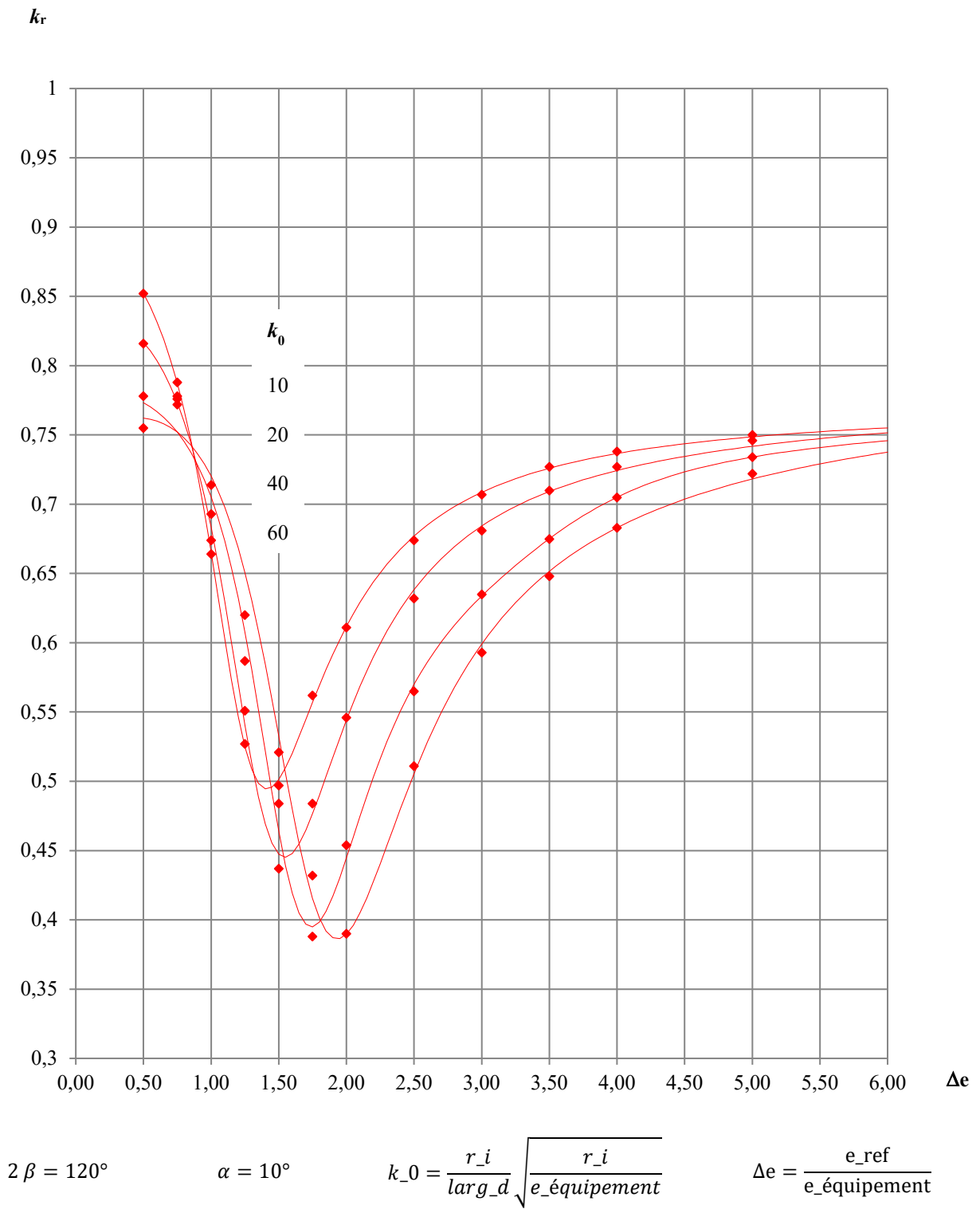
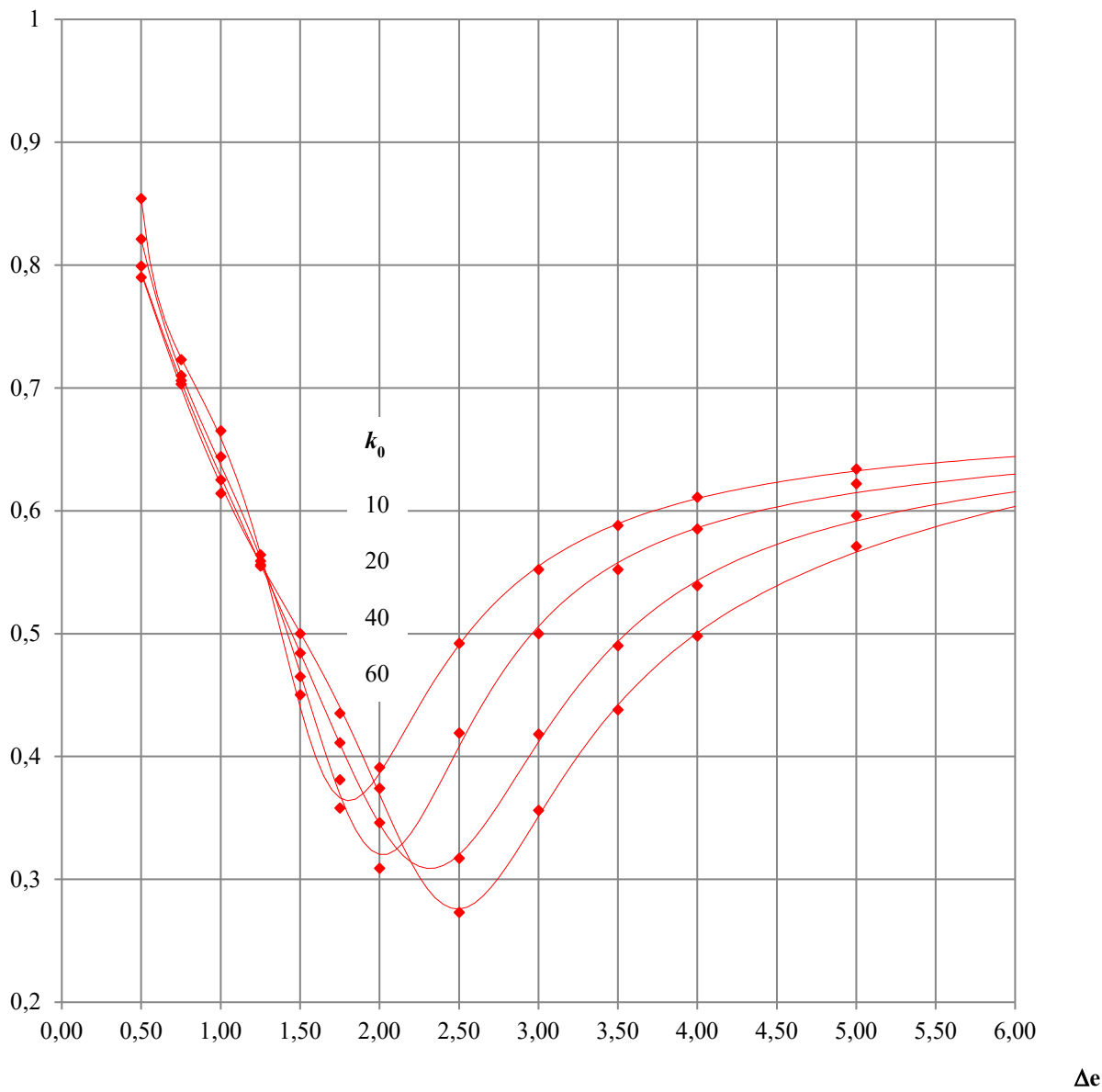


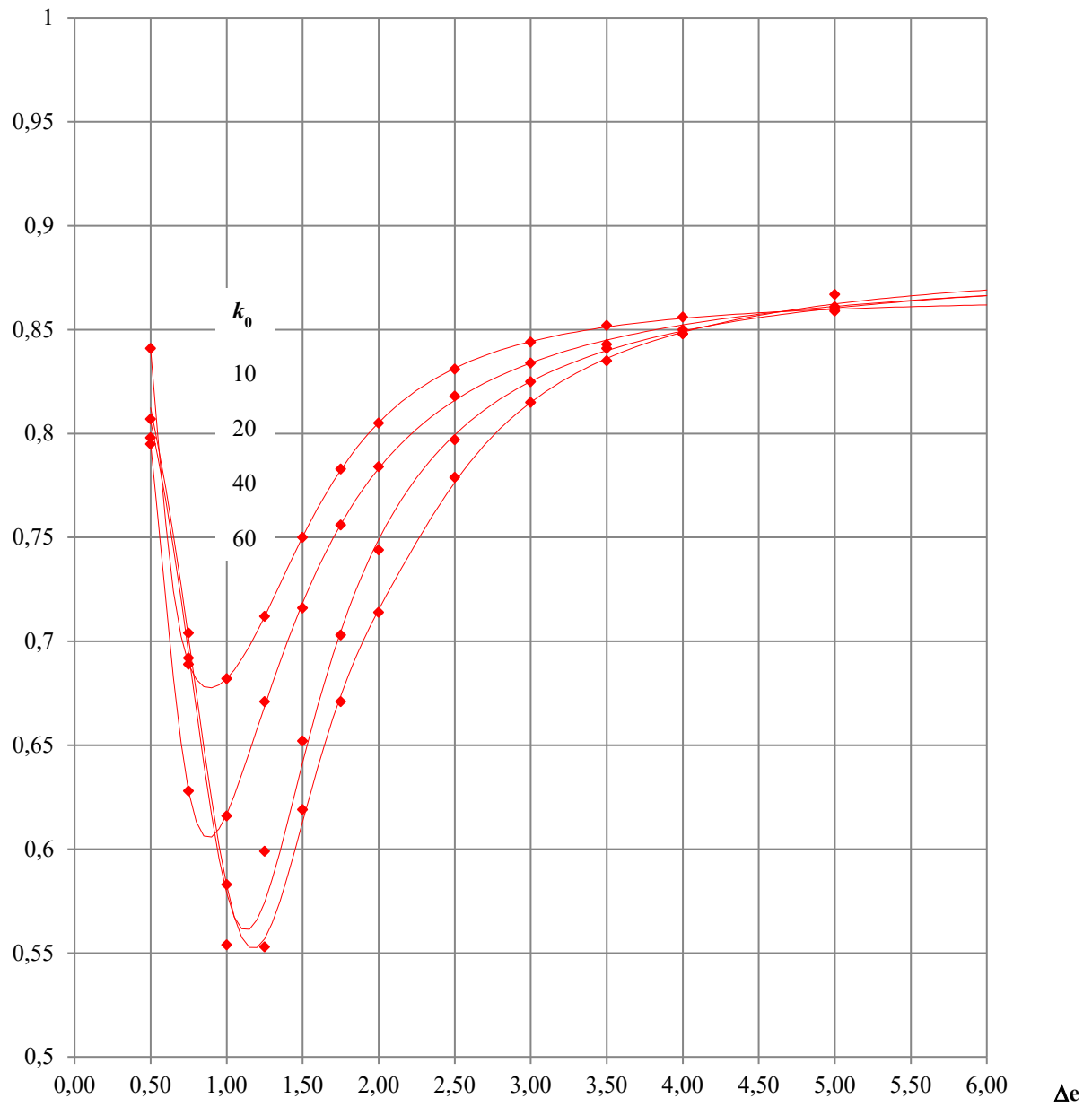
Figure A3/1-19 : Coefficient k_r

k_r



$2 \beta = 120^\circ$ $\alpha = 15^\circ$ $k_0 = \frac{r_i}{larg_d} \sqrt{\frac{r_i}{e_{\text{équipement}}}}$ $\Delta e = \frac{e_{\text{ref}}}{e_{\text{équipement}}}$

Figure A3/1-20 : Coefficient k_r

k_r


$$2\beta = 150^\circ$$

$$\alpha = 5^\circ$$

$$k_0 = \frac{r_i}{\text{larg}_d} \sqrt{\frac{r_i}{e_{\text{équipement}}}}$$

$$\Delta e = \frac{e_{\text{ref}}}{e_{\text{équipement}}}$$

Figure A3/1-21 : Coefficient k_r

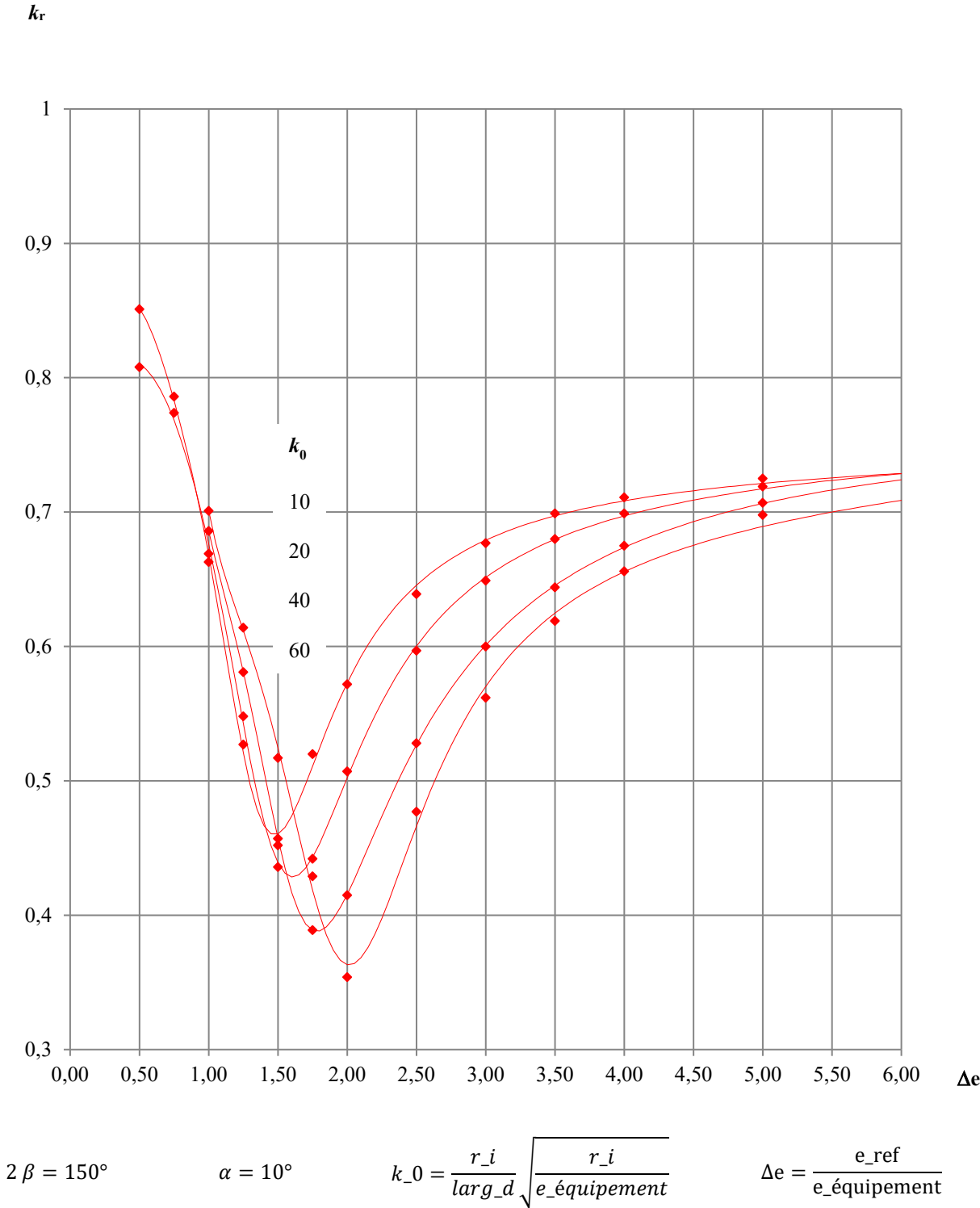
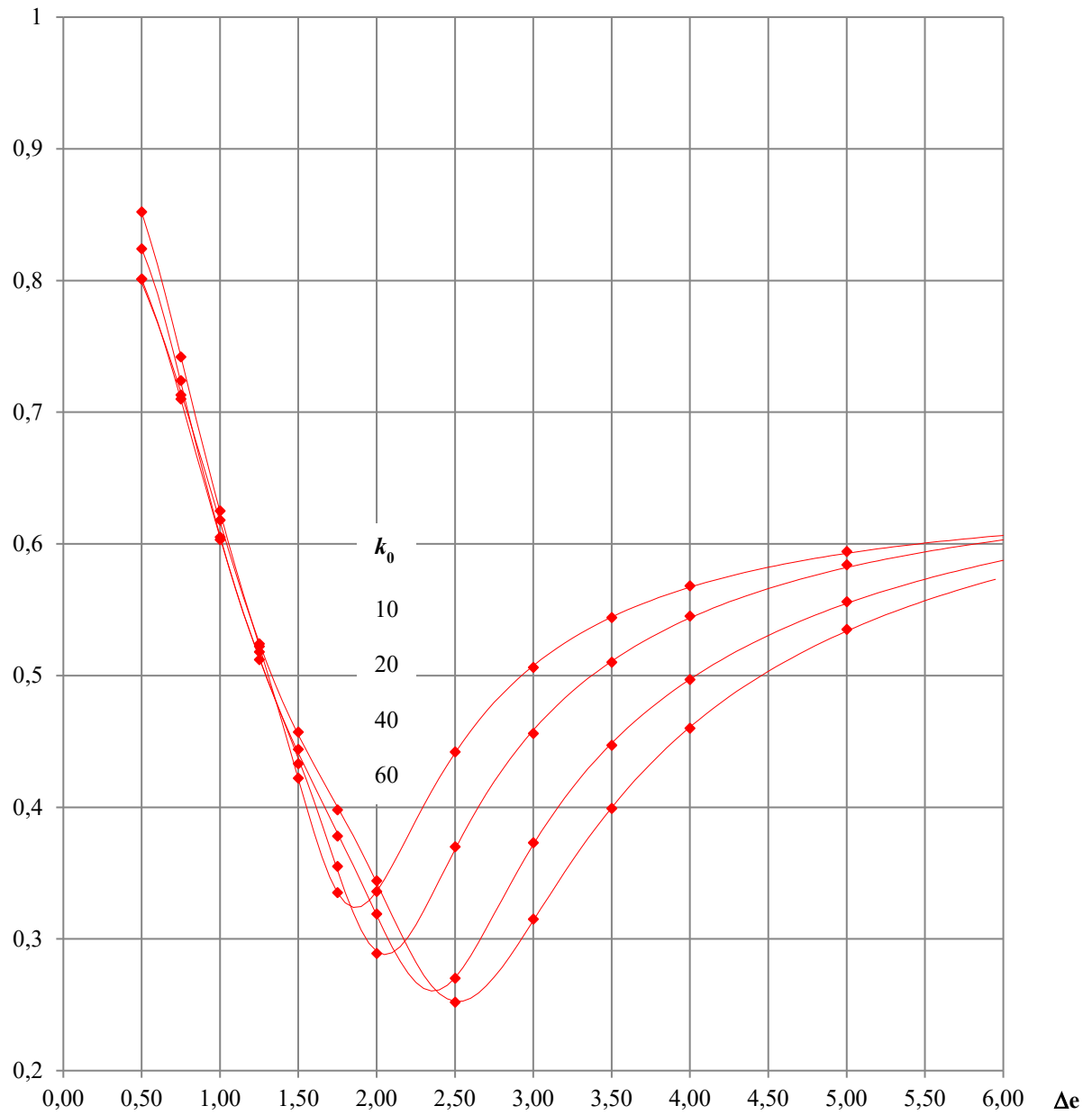


Figure A3/1-22 : Coefficient k_r

k_r



$$2\beta = 150^\circ$$

$$\alpha = 15^\circ$$

$$k_0 = \frac{r_i}{larg_d} \sqrt{\frac{r_i}{e_{\text{équipement}}}}$$

$$\Delta e = \frac{e_{\text{ref}}}{e_{\text{équipement}}}$$

Figure A3/1-23 : Coefficient k_r

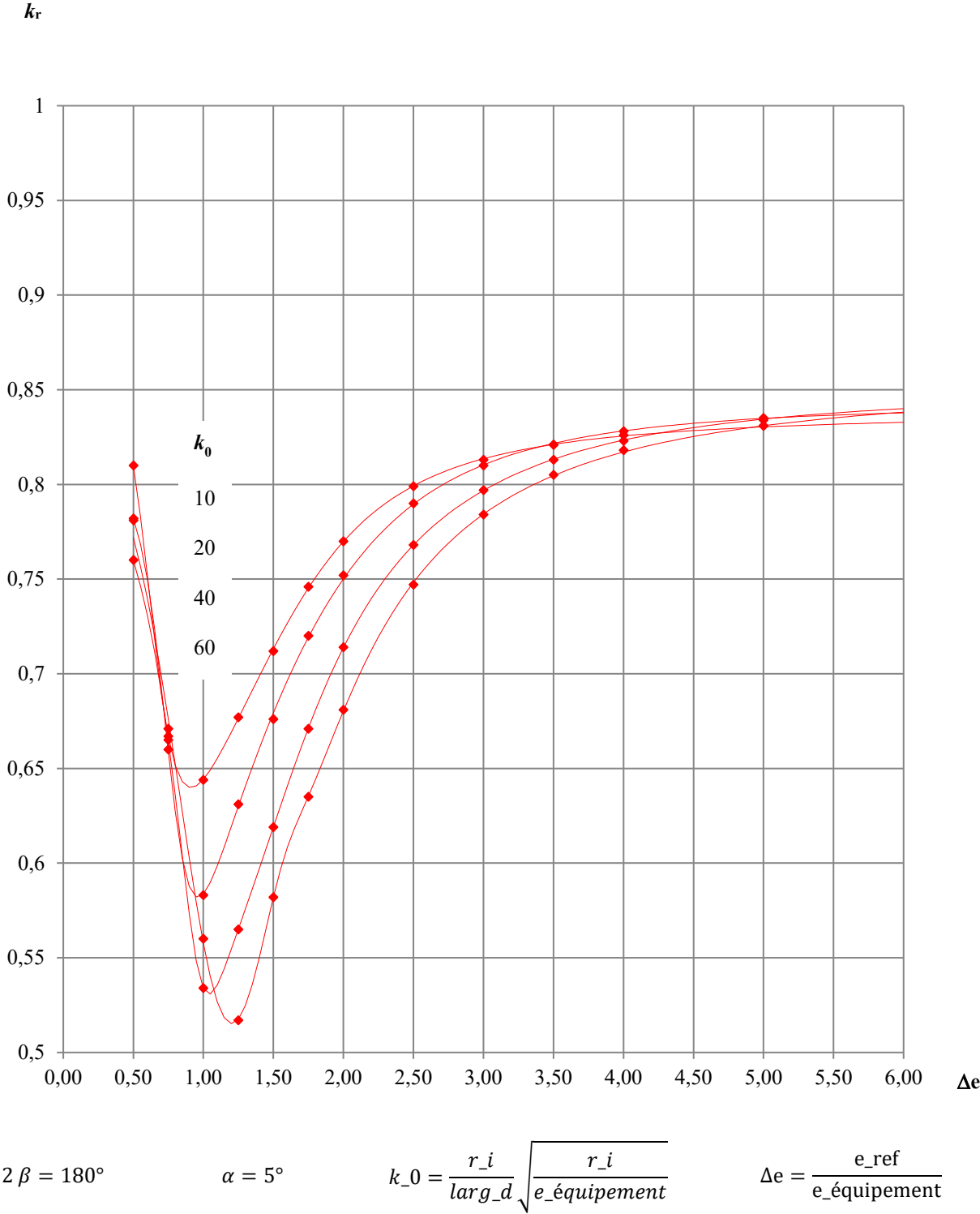


Figure A3/1-24 : Coefficient k_r

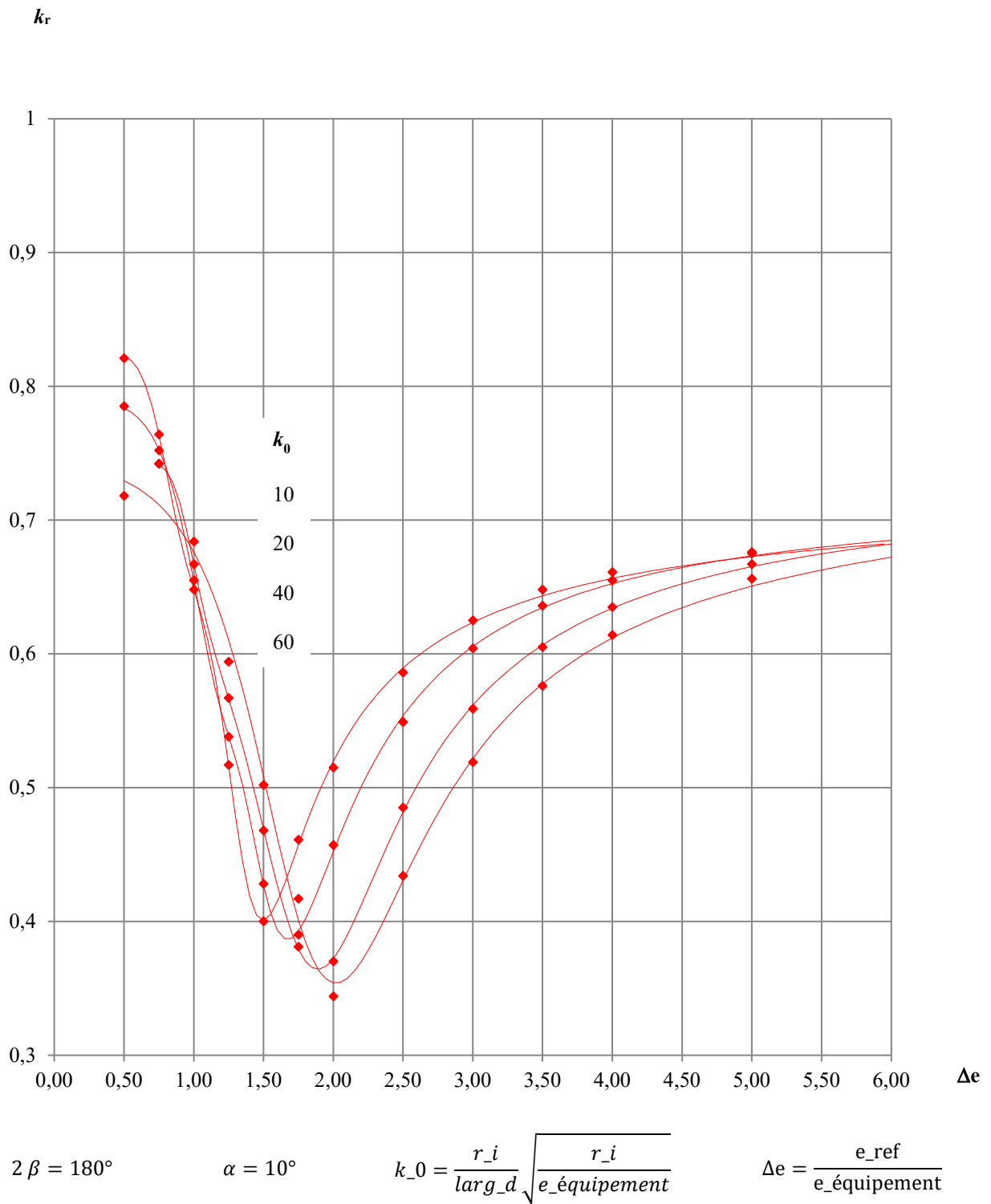


Figure A3/1-25 : Coefficient k_r

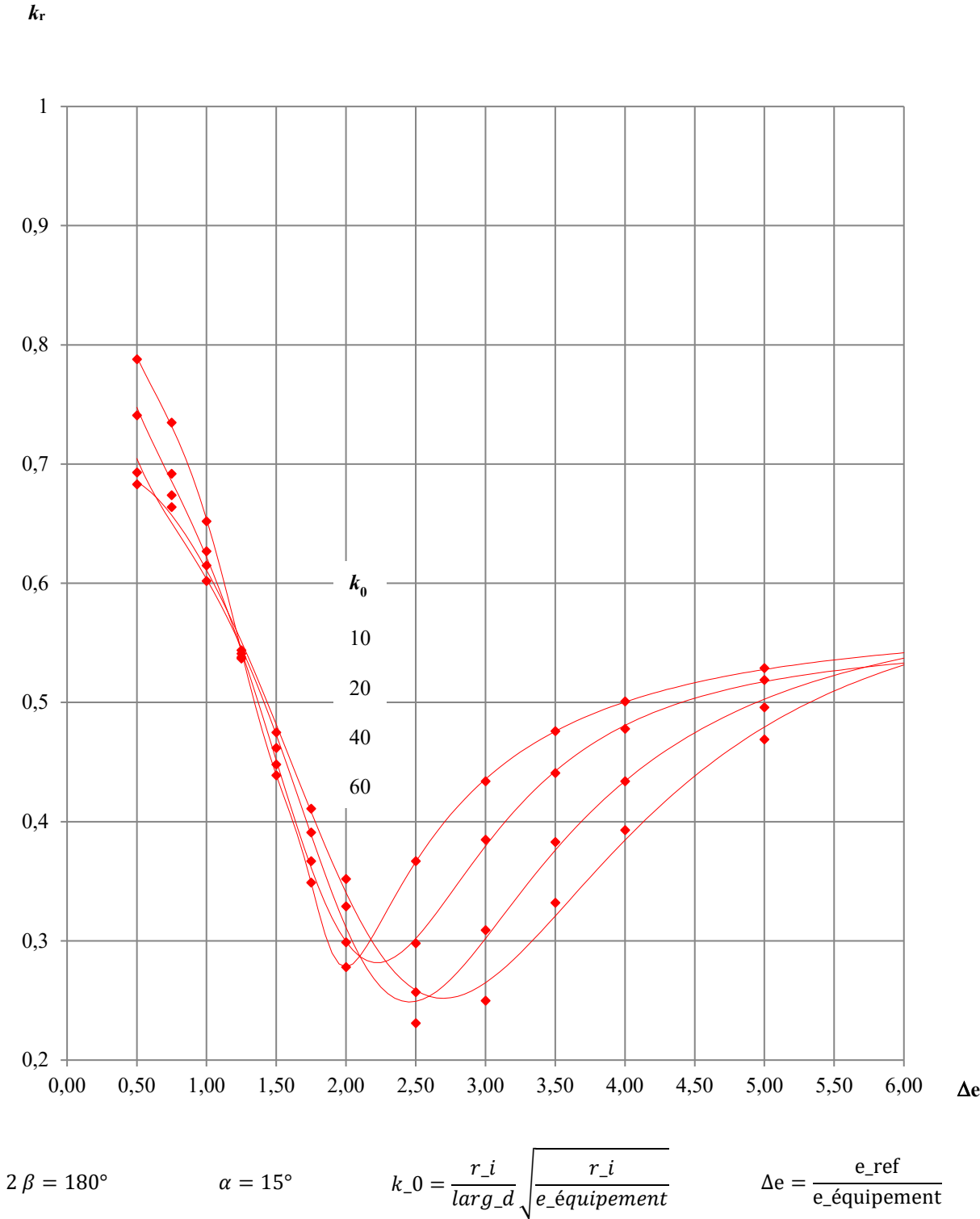


Figure A3/1-26 : Coefficient k_r

ANNEXE 3
RESERVOIRS HORIZONTAUX SUR DEUX BERCEAUX
2° PARTIE
EXEMPLE (PROCEDURE 1)



GUIDE SEISME - EQUIPEMENTS CHAUDRONNES
Ballons et réservoirs horizontaux, Réacteurs et Echangeurs tubulaires horizontaux

Page 1
21/02/25

Réservoir sur berceaux

Géométrie de l'équipement

Réservoir

Diamètre intérieur	$d_i =$	3 800,00 mm
Longueur totale de l'équipement	$l =$	12 000,00 mm
Epaisseur de la paroi de l'équipement	$e_{\text{équipement}} =$	25,00 mm

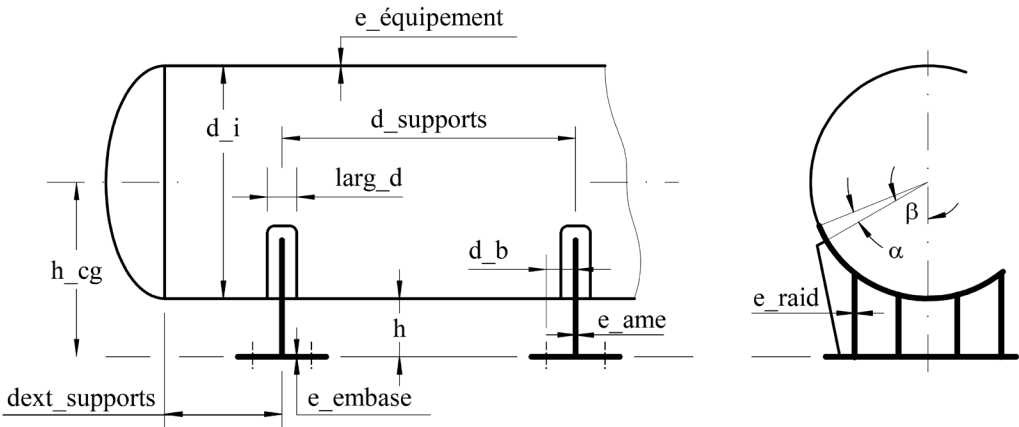
Matériau

Limite d'élasticité du matériau de l'enveloppe	$R_{p_enveloppe} =$	265,00 MPa
Résistance à la traction du matériau de l'enveloppe	$R_{m_enveloppe} =$	410,00 MPa
Contrainte nominale de calcul	$f_{\text{enveloppe}} =$	170,83 MPa

Poids de l'équipement	$P_{ds} =$	1 600 000,00 N
-----------------------	------------	-----------------------

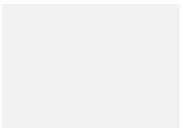
Masse volumique "équivalente" (avec fluide)		1 198,43 kg/m ³
---	--	-----------------------------------

Pression de service	$\text{pression} =$	20,00 bar
Dépression	$d_{\text{pression}} =$	1,00 bar



Supports

$n_{\text{supports}} =$	2	
$h_{\text{cg}} =$	3 000,00	mm
$d_{\text{supports}} =$	6 000,00	mm
$d_{\text{ext_supports}} =$	2 500,00	mm
$h =$	225,00	mm
$\text{larg_d} =$	762,00	mm
$e_{\text{embase}} =$	20,00	mm
$e_{\text{âme}} =$	20,00	mm
$e_{\text{soudure}} =$	10,00	mm
$e_{\text{berceau}} =$	20,00	mm
$e_{\text{doublante}} =$	20,00	mm
$e_{\text{raïd}} =$	10,00	mm



(soudure de l'embase et de l'âme du support)
Fig, A2/1-2
Fig, A2/1-2

$\beta =$	75,00	°
$\alpha =$	4,00	°



GUIDE SEISME - EQUIPEMENTS CHAUDRONNES
Ballons et réservoirs horizontaux, Réacteurs et Echangeurs tubulaires horizontaux

Page 2
21/02/25

Réservoir sur berceaux

Matériaux des supports

Module d'élasticité du matériau des supports	E_supports =	210 000,00	MPa
Coefficient de Poisson du matériau des supports	nu_supports =	0,3	
Module de cisaillement du matériau des supports	G_supports =	80 769,23	MPa
Limite d'élasticité du matériau de l'âme et des raidis	Rp_âme =	265,00	MPa
Limite d'élasticité du matériau de l'embase	Rp_embase =	265,00	MPa
Limite d'élasticité du matériau de la soudure	Rp_soudure =	265,00	MPa
Limite d'élasticité du matériau des ancrages	Rp_ancrage =	265,00	MPa

Ancrages

	d_b =	100,00	mm
Nombre de "files" d'ancrages	n_ligne =	2	
Nombre d'ancrages par "file"	n_ancrages =	2	
Distance entre les ancrages les plus éloignés	dist_ancrages =	3 285,00	mm
Diamètre des tiges d'ancrage	d_ancrage =	28,00	mm
Effort d'arrachement admissible dans une tige d'an	T_ancrage =	163 174,32	N
Cisaillement admissible dans une tige d'ancrage	Cis_ancrage =	97 904,59	N

Fig, A2/1-3

Fig, A2/1-3

Critères d'application de la procédure

h_cg/d_supports =	0,50	
	la procédure est applicable	
h_cg/dist_ancrages =	0,91	
	La procédure est applicable	

Facteur de réduction de la résistance de l'embase

R_embase = 0,22

Fig, A2/1-4

Facteur de réduction de la résistance de la soudure de l'embase

R_soudure = 4,59

Fig, A2/1-4

Effort de traction admissible "réduit" dans une tige d'ancrage

Tr_ancrage = 35 333,33 N

Fig, A2/1-4

Cisaillement admissible dans une tige d'ancrage

Cisr_ancrage = 97 904,59 N

Fig, A2/1-4

alpha = 0,36

Fig, A2/1-4

W_b = 200 000,00

Fig, A2/1-4

F1 = 2,24

Fig, A2/1-4

F2 = 2,19

Fig, A2/1-4

Accélération admissible par les ancrages

= 0,22 g

Fig, A2/1-4

= 2,15 m/s²



GUIDE SEISME - EQUIPEMENTS CHAUDRONNES
Ballons et réservoirs horizontaux, Réacteurs et Echangeurs tubulaires horizontaux

Page 3
21/02/25

Réservoir sur berceaux

Comportement de l'équipement dans les directions verticale et transversale

Distance maximale entre supports pour que
l'équipement puisse être considéré comme "rigide" $d_{\text{rigide}} = 9\,136,31$

Fig, A2/1-5

L'équipement peut être considéré comme 'rigide' dans les directions verticale et transversale

Comportement de l'équipement dans la direction longitudinale

Fig, A2/1-7

Moment d'inertie de la section droite du support
au droit de la génératrice inférieure
de l'équipement $I_{yy_supports} = 1,11E+08 \text{ mm}^4$

Module d'inertie de la section droite du support
au droit de la génératrice inférieure
de l'équipement $W_{yy_supports} = 6,97E+05 \text{ mm}^3$

Surface de la section droite du support
au droit de la génératrice inférieure
de l'équipement $S_supports = 8,05E+04 \text{ mm}^2$

Raideur du support dans la direction longitudinale $k_support = 5,08E+06 \text{ N/mm}$

Fréquence dans la direction longitudinale $f_longi = 0,89 \text{ Hz}$

L'équipement ne peut pas être considéré comme 'rigide' dans la direction longitudinale



GUIDE SEISME - EQUIPEMENTS CHAUDRONNES
Ballons et réservoirs horizontaux, Réacteurs et Echangeurs tubulaires horizontaux

Page 4
21/02/25

Réservoir sur berceaux

193

Caractéristiques du séisme

2

Zone de sismicité

3

Classe de sol

B

Equipement

Equipement en service

Arrêté

Arrêté du 4 octobre 2010 modifié

Amortissement

5

Coefficient de réduction

Direction horizontale_1

3

Coefficient de réduction

Direction horizontale_2

3

Coefficient de réduction

Direction verticale

1,5

ghg_1 = 2,04

TBH = 0,05

TBV = 0,03

ghg_2 = 2,04

TCH = 0,25

TCV = 0,20

gvg = 1,84

TDH = 2,50

TDV = 2,50

Csol = 1,35

TEH = 5,00

neta = 1,00

TFH = 10,00

dhg = 0,04

Périodes

Direction horizontale_1

* s

* Hz

et

Direction horizontale_2

* s

* Hz

Fréquences

Direction verticale

* s

* Hz

Accélérations

Bande de fréquences

+/-

0

%

Freq. -

Freq. =

Freq. +

Spectre de réponse élastique

Accélération sismique horizontale

gamma_h_1 =

2,75

2,75

2,75

m/s2

Accélération sismique horizontale

gamma_h_2 =

2,75

2,75

2,75

m/s2

Accélération sismique verticale

gamma_v =

5,52

5,52

5,52

m/s2

Spectre de calcul pour l'analyse élastique

Accélération sismique horizontale

gamma_ch_1 =

1,84

1,84

1,84

m/s2

Accélération sismique horizontale

gamma_ch_2 =

1,84

1,84

1,84

m/s2

Accélération sismique verticale

gamma_cv =

3,07

3,07

3,07

m/s2



GUIDE SEISME - EQUIPEMENTS CHAUDRONNES
Ballons et réservoirs horizontaux, Réacteurs et Echangeurs tubulaires horizontaux

Page 5
21/02/25

Réservoir sur berceaux

Evaluation des accélérations

Accélération dans la direction transversale	1,84	<=	2,15	Acceptable
Accélération dans la direction longitudinale	1,84	<=	2,15	Acceptable
Accélération dans la direction verticale	3,07	>	2,15	Non acceptable

Evaluation de la résistance du berceau fixe (C9.3.3.7.4-5)

Coefficient pour raidisseurs (0,6 : soudés - 1 : pliés)	0,60		
Effort longitudinal admissible par le berceau	447 105,11	N	
Effort longitudinal appliqué au berceau	299 449,54	N	Acceptable
Evaluation de la contrainte de flexion en pied de berceau au droit de la génératrice inférieure	177,48	MPa	

Vérification des contraintes maximum en tête de berceau

$k_0 =$	24,303	Fig, A2/1-10	
$k_1 =$	0,135	Fig, A2/1-11	
$k_2 =$	0,324	Fig, A2/1-13	
$k_\phi =$	1,271	Fig, A2/1-10	
$k_a =$	0,433	Fig, A2/1-11 & 12	
$k_c =$	1,130	Fig, A2/1-13 & 14	
$k_s =$	0,600	Fig, A2/1-9	
$Q =$	800 000,00	N	
$\sigma_{\phi_pds} \text{ \& } \sigma_{s\acute{e}isme_r} =$	-1,77	MPa	
$\sigma_{\phi_pds} \text{ \& } \sigma_{s\acute{e}isme_nr} =$	-139,41	MPa	
$\sigma_{\phi_pression} =$	152,00	MPa	
$\sigma_{\phi_adm_def} =$	265,00	MPa	
$pression + s\acute{e}isme - poids \text{ propre} =$	150,23	MPa	Acceptable
$\sigma_{\phi_adm_inst.} =$	-69,41	MPa	
$dpression - s\acute{e}isme - poids \text{ propre} =$	-147,01	MPa	Non acceptable



GUIDE SEISME - EQUIPEMENTS CHAUDRONNES
Contraintes critiques de voilement

Page 6
21/02/25

Réservoir sur berceaux - Direction circonférentielle

Situation

Pression d'étude	Pétude =	0,00 MPa
Température d'étude	Tétude =	20,00 °C

Matériau

NF EN 10028-2 2002 P265GH

Limite d'élasticité	R _{pt_i} =	265,00 MPa
Module d'élasticité	E _i =	210 000,00 MPa
Coefficient de Poisson	ν _i =	0,30

Caractéristiques géométriques du composant

Cylindre

Diamètre intérieur	d _{i_i} =	3 800,00 mm
Epaisseur	e _i =	25,00 mm
Longueur	l _i =	6 000,00 mm

Rayon moyen	r _{m_i} =	1 925,00 mm
-------------	--------------------	-------------

Conditions aux limites du composant

Direction radiale	Direction méridienne
----------------------	-------------------------

Extrémité 1	Appuyé	Appuyé
Extrémité 2	Appuyé	Appuyé

Imperfections de fabrication

Référentiel de construction	CODAP 2005
-----------------------------	-------------------

Diamètre maximum mesuré	**	mm
Diamètre minimum mesuré	**	mm
Ovalisation	0,020	-
Classe de tolérance relative à l'ovalisation	C	

Ecart de forme		
Dir. longitudinale hors zones soudées	8,00	mm
Dir. longitudinale zones soudées	-	mm
Dir. circonférentielle hors zones soudées	-	mm
Dir. circonférentielle zones soudées	-	mm
Classe de tolérance relative aux écarts de forme	C	-

Ecart d'alignement des fibres moyennes	3,50	mm
Ecart d'alignement des fibres moyennes / e _i	0,1400	-
Classe de tolérance relative aux écarts d'alignement	C	

Classe de tolérance globale	C
-----------------------------	---



GUIDE SEISME - EQUIPEMENTS CHAUDRONNES
Contraintes critiques de voilement

Page 7
21/02/25

Réservoir sur berceaux - Direction circonférentielle

Contrainte critique de voilement circonférentiel

$$\frac{R}{e_u} \leq 0,21 \sqrt{\frac{E}{R_{pt}}} \quad \text{Eq. C9.A12.6-1} \quad 77,00 > 5,91$$

La vérification du voilement sous l'effet des contraintes de compression circonférentielles est nécessaire

Paramètre omega_teta	Eq. C9.A12.6-4	omega_teta =	27,35	
Coefficient C_teta	Tab. C9.A12.6-1	C_teta =	1,50	
Coefficient C_tetas	Tab. C9.A12.6-2	C_tetas =	1,51	
Contrainte théorique de voilement	§ C9.A12.6 d)	sigma_tetaRcr =	138,81	MPa
Facteur alpha_teta (Tolérances)	§ C9.A12.6 e)	alpha_teta =	0,50	
Elancement limite lambda_cc0teta	Eq. C9.A12.6-19	lambda_cc0teta =	0,40	
Facteur dom.plast. beta_teta	Eq. C9.A12.6-20	beta_teta =	0,60	
Exposant d'interaction neta_teta	Eq. C9.A12.6-21	netateta =	1,00	
Elancement réduit lambda_ccteta	Eq. C9.A12.6-22	lambda_ccteta =	1,38	
Elancement limite lambda_ccpteta	Eq. C9.A12.6-23	lambda_ccpteta =	1,12	
Coeff. de réduction khi_teta	Eq. C9.A12.6-24+	khi_teta =	0,26	Flambement élastique
Contrainte critique	Eq. C9.A12.6-27	sigma_tetaRk =	69,41	MPa
Pres. ext./ Dépression P_max		P_max =	0,90	MPa
Coefficient d'interaction	Eq. C9.A12.8.3-2	k_teta =	1,45	

ANNEXE 4 RESERVOIRS SPHERIQUES

1° PARTIE DETERMINATION DES FREQUENCES PROPRES ET ESTIMATION DE LA REPONSE SISMIQUE A PARTIR DE CALCULS ANALYTIQUES (PROCEDURE 1)



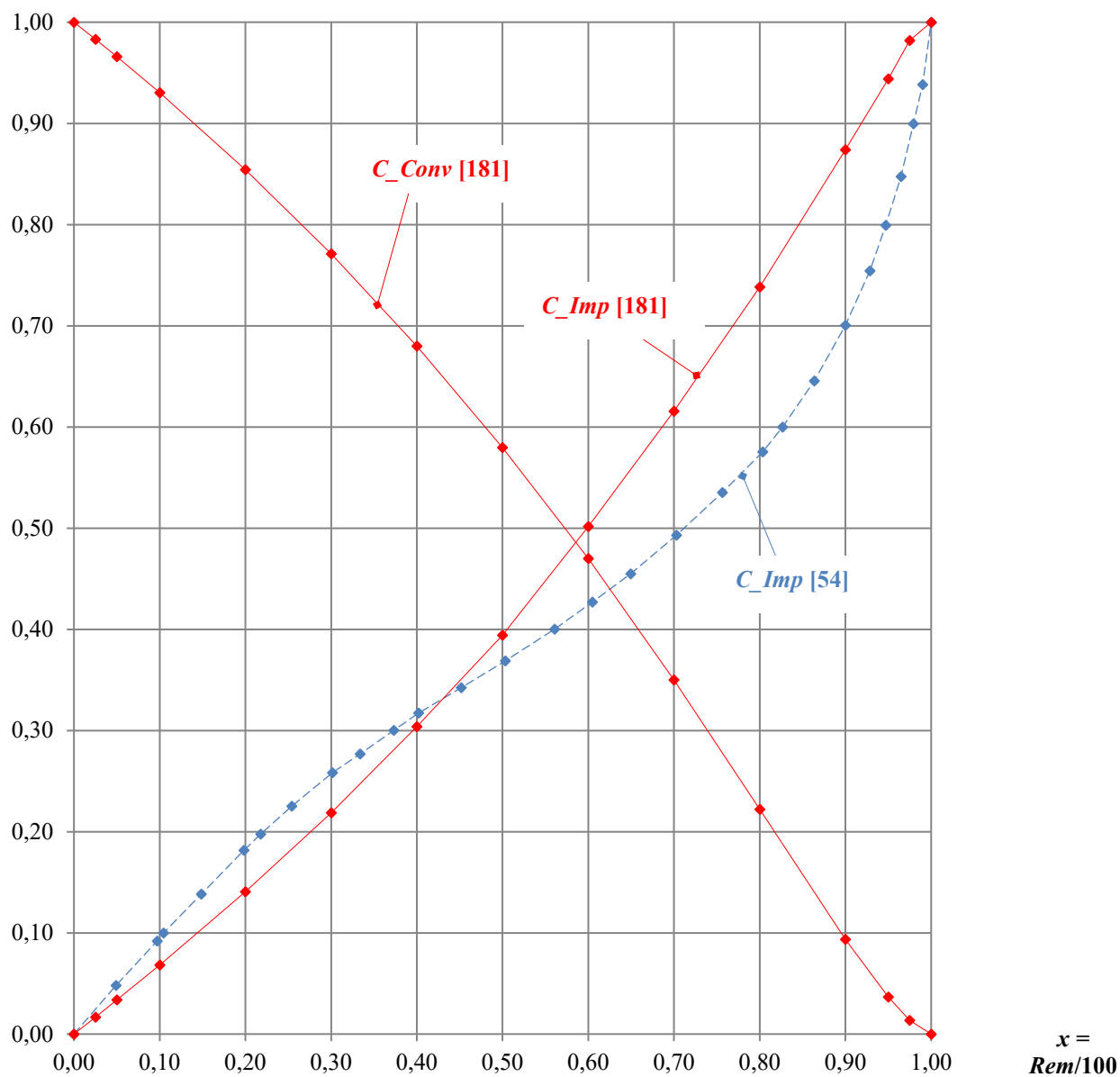
Figure A4/1-1 & Figure A4/1-2

Notations et limite d'application de la procédure
--

	=	
C_{imp}	=	Coefficient permettant de déterminer la masse impulsive
ds_{int}	=	Diamètre intérieur de la sphère
dp_{ext}	=	Diamètre extérieur des poteaux
dp_{int}	=	Diamètre intérieur des poteaux
$ds_{moy_{equ}}$	=	Diamètre moyen de la sphère à l'équateur
dt_{ext}	=	Diamètre extérieur des tirants
dt_{eint}	=	Diamètre intérieur des tirants
ep	=	Epaisseur des poteaux
es_{equ}	=	Epaisseur de la sphère à l'équateur
et	=	Epaisseur des tirants
$E_{poteaux}$	=	Module d'élasticité du matériau des poteaux
$E_{tirants}$	=	Module d'élasticité du matériau des tirants
g	=	Accélération de la gravité = 9,81 m/s ²
hs_{equ}	=	Hauteur à l'équateur
ht	=	Hauteur au droit de la fixation du tirant
H_{rem}	=	Hauteur de remplissage
ip	=	Rayon de giration d'un poteau
It	=	Rayon de giration d'un tirant
I_p	=	Moment d'inertie d'un poteau
I_t	=	Moment d'inertie d'un tirant
m_{conv}	=	Masse convective
m_{imp}	=	Masse impulsive
$m_{imp_{tot}}$	=	Masse totale de la sphère seule+ Masse impulsive+Masse des poteaux
m_{prod}	=	Masse volumique du produit stocké
$m_{prod_{tot}}$	=	Masse totale du produit stocké

m_{totale}		Masse totale de l'équipement (sphère, poteaux et produit stocké)
ms_{mat}	=	Masse volumique du matériau de la sphère
ms_{tot}	=	Masse totale de la sphère seule
mt_{mat}	=	Masse volumique du matériau des tirants
mp_{mat}	=	Masse volumique du matériau des poteaux
mp_{unit}	=	Masse d'un poteau
np	=	Nombre de poteaux
p	=	Pression de service
Rem	=	Taux de remplissage de la sphère (%)
$Rp_{poteaux}$	=	Limite d'élasticité du matériau des poteaux
Note : Les têtes de poteaux et les fûts des poteaux peuvent être réalisés dans des matériaux différents. Il convient alors de s'assurer que les hypothèses retenues tant en ce qui concerne les caractéristiques du matériau qu'en ce qui concerne les longueurs « de flambement » conduisent à des résultats raisonnablement conservatifs.		
$Rp_{sphère}$	=	Limite d'élasticité du matériau de la paroi de la sphère
$Rp_{tirants}$	=	Limite d'élasticité du matériau des tirants
Sp	=	Aire de la section droite d'un poteau
St	=	Aire de la section droite d'un tirant
La procédure proposée dans la présente annexe est applicable si et seulement si : $\frac{S_p}{S_t} \geq 8$ [172][182]		

Coefficients destinés à déterminer les masses impulsive et convective

 C_{imp} ou C_{conv} 

Note : Les courbes issues de la référence [181] ont été retenue dans le cadre des applications du présent guide ; Toutefois, pour ce qui est des masses impulsives, les valeurs, plus conservatives, obtenues à partir de la courbe issue de la référence [54] sont acceptables.

Figure A4/1-3 : Coefficients destinés à déterminer les masses impulsive et convective en fonction du taux de remplissage

Calcul de la fréquence propre fondamentale (Mode impulsif - Direction horizontale)

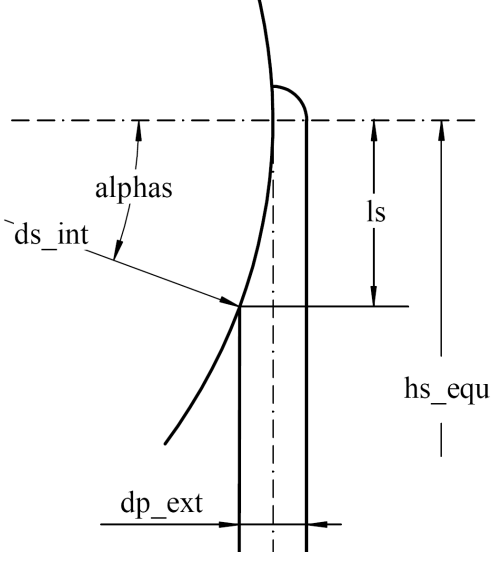
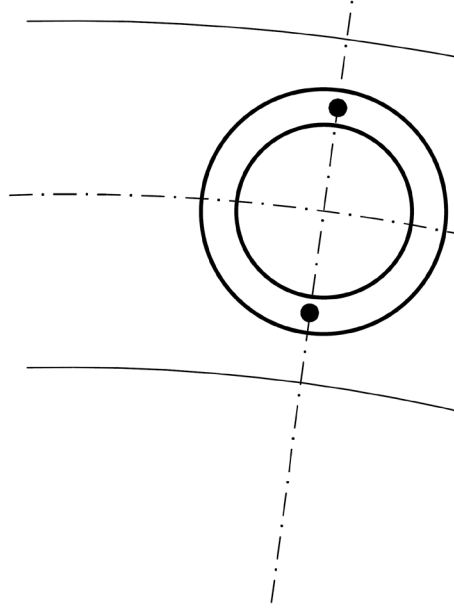
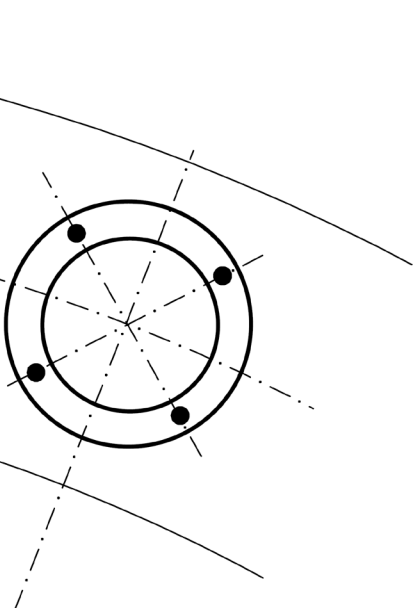
	$\alpha = \arccos \left[1 - \frac{dp_{ext} - ep}{ds_{moy_equ}} \right] \quad A4/1-1$ $ls = \frac{ds_{moy_equ} \cdot d}{2} \sin(\alpha) \quad A4/1-2$ $lc = hs_{equ} - 0,45 \, ls \quad A4/1-3$ $kp = n_p \frac{Cond \, E_{poteaux} \, Ip}{lc^3} \quad A4/1-4 \text{ Note 1}$ <p> <i>Cond</i> = 3 Pieds de poteaux « appuyés » <i>Cond</i> = 12 Pieds de poteaux « encastrés » </p>
<p>2 ancrages : « appuyés » [183]</p> 	<p>4 ancrages : « encastrés » [183]</p> 
$\text{Fréquence (Horizontale sans tirant)} = \frac{1}{2 \pi} \sqrt{\frac{kp}{m_{imp_tot}}} \quad A4/1-5$	

Figure A4/1-4

Calcul de la fréquence propre fondamentale (Mode impulsif - Direction horizontale) (suite)

	$b\acute{e}tat = \frac{360}{np}$	A4/1-6
	$dp = ds_{moy_equ} \sin \left(\frac{b\acute{e}tat}{2} \right)$	A4/1-7
	$alphat = \arctan \left(\frac{ht}{dp} \right)$	A4/1-8
	$kt = \frac{Et \ St}{lt} [\cos (alphat)]^3$	A4/1-9
	$a = \frac{ht}{lc} \quad b = 3 - a^2$	A4/1-10

$k1 = \frac{Cond \ E_{poteaux} \ Ip}{lc^3}$	$k2 = \frac{4 \ k1}{kt \ a^2} + 12 - 8 \ a$	A4/1-11
$kpt = \frac{np}{2} \left[k1 + \frac{k1 \ k2}{b(a^2 - 3) + k2} \right]$		A4/1-12 Note 1
Fréquence (horizontale tirants en traction) =	$f_{h_imp} = \frac{1}{2 \ \pi} \sqrt{\frac{kpt}{m_{imp_tot}}}$	A4/1-13 Note 2
$kptc = np \left[\frac{k1 \ k2}{b(a^2 - 3) + k2} \right]$		A4/1-14 Note 1
Fréquence (horizontale tirants en traction et en compression) =	$f_{h_imp} = \frac{1}{2 \ \pi} \sqrt{\frac{kptc}{m_{imp_tot}}}$	A4/1-15 Note 2

Calcul de la fréquence propre fondamentale (Direction verticale)

$kpv = np \frac{E_{poteaux} \ Sp}{lc}$	A4/1-16
Fréquence (Direction verticale) = $f_{v_imp} = \frac{1}{2 \ \pi} \sqrt{\frac{kpv}{m_{totale}}}$	A4/1-17

Note 1 : La valeur de la raideur ainsi déterminée peut être modifiée par la prise en compte, le cas échéant, par l'influence du comportement du sol.

Note 2 : Dans le cadre du présent guide et dans le cas d'un équipement pourvu de tirants/contreventement, il est recommandé, sauf justifications appropriées, de considérer qu'ils ne « travaillent » qu'en traction.

Figure A4/1-4 (suite)

Détermination de la fréquence propre du 1^o mode convectif

$$f_{conv} = \frac{\omega}{2\pi}$$

$$\frac{\omega^2 ds_{int}}{2g}$$

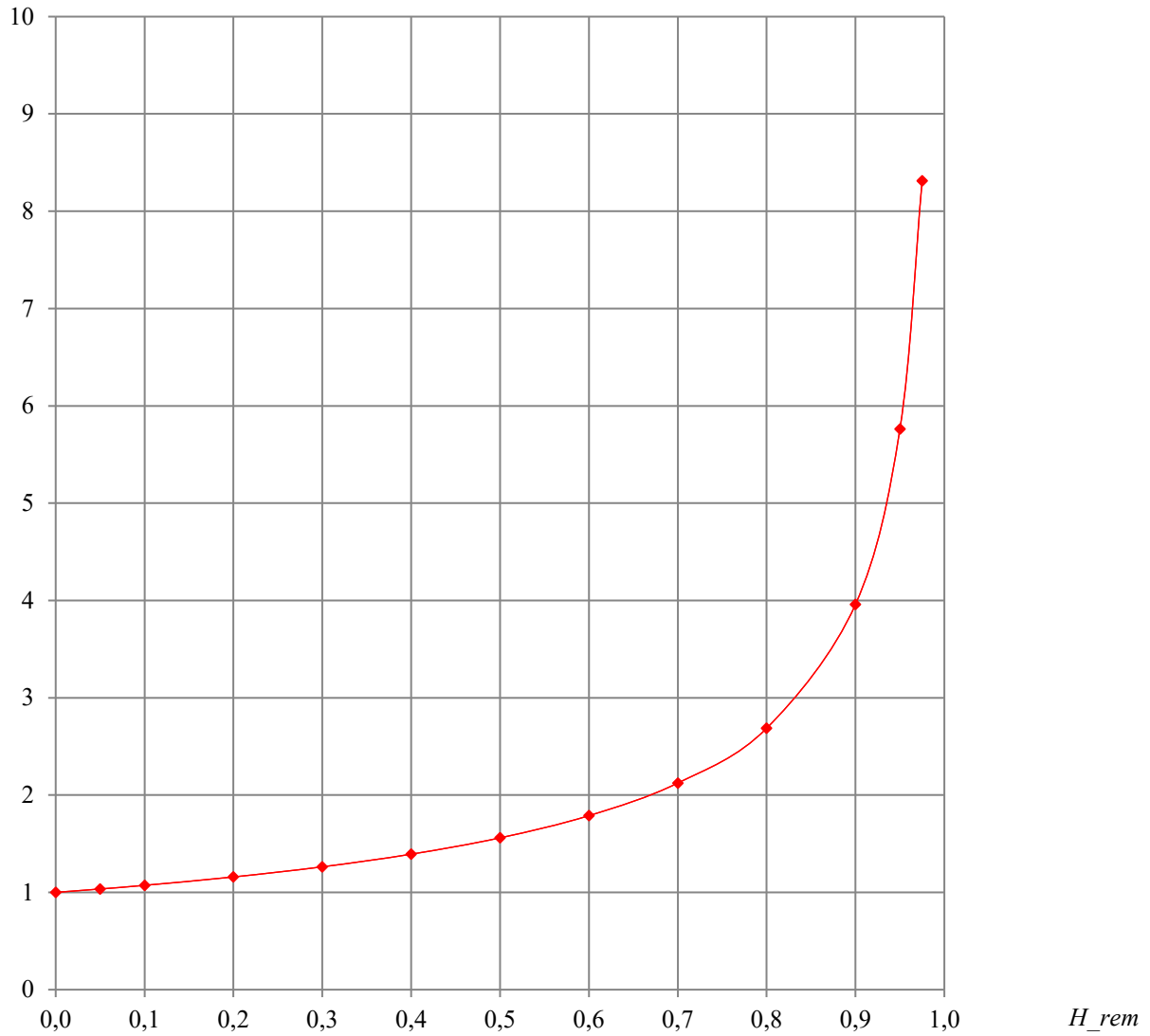


Figure A4/1-5

Exemples

Les résultats présentés ci-dessous illustrent le calcul des fréquences propres de différentes sphères et l'influence des conditions aux limites retenues pour les calculs.

Période	Exemple 1 [176] Note 1	Exemple 2 [54] Note 2	Exemple 3 [172] Note 3	Exemple 4a [183] Note 4	Exemple 4b [183] Note 4	Exemple 5 [181] & [183] Note 5
Horizontale Sans tirant						
Procédure 1			1,56 s	2,91 s	1,45 s	0,40 s
Eléments finis			[172] : 1,57 s	[183] : 2,89 s	[183] : 1,46 s	[183] : 0,45 s
Horizontale Tirants en traction						
Procédure 1	0,67 s		0,71 s	1,56 s	1,13 s	0,323 s
Eléments finis			[172] : 0,70 s	[183] : 1,56 s	[183] : 1,13 s	[183] : 0,333 s
Calculs analytiques	[176] : 0,67 s					
Horizontale Tirants en traction et compression						
Procédure 1		0,432 s	0,53 s	1,19 s	0,92 s	
Eléments finis			[172] : 0,53 s	[183] : 1,20 s	[183] : 0,95 s	
Calculs analytiques		[54] : 0,446 s				
Verticale						
Procédure 1	0,065s			0,122 s	0,122 s	0,031 s
Eléments finis				[183] : 0,124 s	[183] : 0,123 s	[183] : 0,049 s
Calculs analytiques	[176] : 0,064 s					

Note 1 : Pieds de poteaux « semi-encastés » (= 6) et « forçage » de la longueur l_c compte tenu des approximations du document de référence

Note 2 : Pieds de poteaux « appuyés » Masse impulsive suivant [54]

Note 3 : Pieds de poteaux « appuyés » Masse impulsive suivant [181]

Note 4a : Pieds de poteaux « appuyés » Note 4b : Pieds de poteaux « encastrés »

Note 5 : Pieds de poteaux « encastrés »

Figure A4/1-6

Vérification des contraintes Poteaux non contreventés**Détermination des efforts horizontaux**

Pour une direction de séisme donnée, l'effort latéral (appliqué au centre de gravité de la sphère) est donné par la formule suivante :

$$q = q_x = q_y = \sqrt{(g_{imp_hor} m_{imp_tot})^2 + (g_{conv_hor} m_{conv})^2} \quad A4/1-18$$

où $g_{(imp_hor)}$ et $g_{(conv_hor)}$ sont les accélérations obtenues à partir des spectres de calcul pour l'analyse élastique (Spectres réduits en fonction des coefficients définis Figure 4.1).

Conformément à la possibilité offerte au § 1.3.4 et en assimilant une sphère sur poteaux à une structure axisymétrique, une seule direction horizontale de séisme est prise compte. Dans ces conditions et conformément aux exigences de ([27a] § 4.3.3.5.1) deux cas doivent être envisagés pour l'effort latéral total Q :

L'effort latéral total Q est égal à :

$$Q1 = 1,0 q \quad A4/1-19a$$

$$Q2 = 0,3 q \quad A4/1-19b$$

L'effort tranchant dans un poteau est égal à :

$$V1 = \frac{Q1}{np} \quad A4/1-20a$$

$$V2 = \frac{Q2}{np} \quad A4/1-20b$$

$$Coeff_Moments = 0.66 \quad \text{Pieds de poteaux « appuyés »} \quad A4/1-21$$

$$Coeff_Moments = 0.50 \quad \text{Pieds de poteaux « encastrés »} \quad A4/1-22$$

$$a_poteaux = lc \ Coeff_Moments \quad A4/1-23$$

$$b_poteaux = lc \ (1 - Coeff_Moments) \quad A4/1-24$$

Moment en tête de poteaux

$$M_tête1 = \pm (+a_poteaux \ V1) \quad A4/1-25a$$

$$M_tête2 = \pm (+a_poteaux \ V2) \quad A4/1-25b$$

Moment en pied de poteaux

$$M_pied1 = \pm (-b_poteaux \ V1) \quad A4/1-26a$$

$$M_pied2 = \pm (-b_poteaux \ V2) \quad A4/1-26b$$

Force axiale dans les poteaux

$$F1 = - \frac{m_{totale} (g \pm 0,3 g_{imp_vert})}{np} \quad A4/1-27a$$

$$F2 = - \frac{m_{totale} (g \pm g_{imp_vert})}{np} \quad A4/1-27b$$

Figure A4/1-7

Vérification des contraintes Poteaux non contreventés (suite)**Contrainte longitudinale dans un poteau**

$$\sigma_N = \frac{M}{I_p / d_{p_ext} * 2} + \frac{F}{S_p}$$

A4/1-28

$$\sigma_N = \frac{M_{tête1}}{I_p / d_{p_ext} * 2} + \frac{F1}{S_p}$$

$$\sigma_N = \frac{M_{pied1}}{I_p / d_{p_ext} * 2} + \frac{F1}{S_p}$$

$$\sigma_N = \frac{M_{tête1}}{I_p / d_{p_ext} * 2} + \frac{F1}{S_p}$$

$$\sigma_N = \frac{M_{pied1}}{I_p / d_{p_ext} * 2} + \frac{F1}{S_p}$$

$$\sigma_N = \frac{M_{tête2}}{I_p / d_{p_ext} * 2} + \frac{F2}{S_p}$$

$$\sigma_N = \frac{M_{pied2}}{I_p / d_{p_ext} * 2} + \frac{F2}{S_p}$$

$$\sigma_N = \frac{M_{tête2}}{I_p / d_{p_ext} * 2} + \frac{F2}{S_p}$$

$$\sigma_N = \frac{M_{pied2}}{I_p / d_{p_ext} * 2} + \frac{F2}{S_p}$$

Note : Les têtes de poteaux et les fûts des poteaux pouvant être réalisés dans des matériaux différents, les exigences ci-dessus peuvent être adaptées en conséquence.

Les contraintes longitudinales résultant des différentes combinaisons des moments et des forces axiales définies ci-dessus doivent respecter les exigences ci-dessous :

La contrainte longitudinale minimum ne doit pas être inférieure à la contrainte critique de voilement déterminée conformément aux exigences de [163] ou de [167]

La contrainte longitudinale maximum ne doit pas être supérieure à la limite d'élasticité du matériau affectée d'un coefficient partiel de sécurité de 1,1.

Contrainte de cisaillement dans un poteau

$$\sigma_{Cis} = \frac{4}{3} \frac{V1}{S_p}$$

A4/1-29

La contrainte de cisaillement ne doit pas être supérieure à 0,5 fois la limite d'élasticité du matériau affectée du coefficient partiel de sécurité de 1,1.

Interaction

L'interaction entre les contraintes longitudinales et les contraintes de cisaillement doit être vérifiée conformément aux exigences de [163] ou de [167] à partir des coefficients déterminés à partir des procédures définies par ces mêmes références.

Figure A4/1-7 (suite)

Vérification des contraintes Poteaux contreventés**Détermination des efforts horizontaux**

Pour une direction de séisme donnée, l'effort latéral (appliqué au centre de gravité de la sphère) est donné par la formule suivante :

$$q = q_x = q_y = \sqrt{(g_{imp_hor} m_{imp_tot})^2 + (g_{conv_hor} m_{conv})^2} \quad A4/1-30$$

où $g_{(imp_hor \text{ et } conv_hor)}$ sont les accélérations obtenues à partir des spectres de réponse élastique .

Conformément à la possibilité offerte au § 1.3.4 et en assimilant une sphère sur poteaux à une structure axisymétrique, une seule direction horizontale de séisme est prise compte. Dans ces conditions l'effort latéral total Q maximal est égal à :

$$Q_0 = 1,0 q \quad A4/1-31$$

Évaluation de la contrainte de traction dans un tirant :

Accélération « équivalente » : $Accélération_{nr} = \frac{Q_0}{m_{imp_tot}}$ A4/1-32

Allongement du tirant : $Allongement = Accélération_{nr} \frac{COS(\alpha)}{4 \pi^2 f h_{imp}^2}$ A4/1-33

Contrainte de traction : $Sigma_{tirant} = E_{tirants} \frac{Allongement}{lt}$ A4/1-34
(Notes
1 & 2)

Note 1 : Cette formulation suppose que les dimensions du tirant sont homogènes sur toute sa longueur. Dans le cas contraire il convient d'adapter la longueur lt de la formule A4/1-23 en fonction de la longueur de la partie du tirant soumise préférentiellement à déformation.

Note 2 : Par ailleurs, la précontrainte éventuelle peut être ajoutée à la valeur de $Sigma_{tirant}$.

Si $Sigma_{tirant}$ est inférieure à la limite d'élasticité du matériau du tirant, soit les tirants doivent être modifiés soit les vérifications relatives aux contraintes dans les poteaux doivent être réalisées à partir de la procédure 2 sans prise en compte de coefficient de réduction.

Si $Sigma_{tirant}$ est supérieure à la limite d'élasticité du matériau du tirant, alors les coefficients de réduction de la Figure 4.1 peuvent être utilisés pour déterminer le spectre de calcul pour l'analyse élastique à utiliser pour les vérifications relatives aux contraintes dans les poteaux.

Toutefois, il convient de vérifier au préalable et à partir de la procédure ci-dessous que lorsque la contrainte de traction dans un tirant atteint la limite d'élasticité du matériau, les contraintes dans les poteaux calculées avec les accélérations déterminées à partir des spectres de réponse élastique restent acceptables.

Note : Les éléments de fixation des tirants (oreilles....) doivent être vérifiés à partir des règles proposées dans le référentiel retenu pour le dimensionnement de l'appareil.

Figure A4/1-7 (suite)

Vérification des contraintes Poteaux contreventés (suite)**Détermination de l'effort latéral lorsque la contrainte de traction dans un tirant atteint la limite d'élasticité du matériau**

Les formules A4/1-32 à A4/1-34 permettent de déterminer la valeur de l'effort latéral total $Q3$ maximal pour lequel σ_{tirant} est égale à la limite d'élasticité du matériau.

L'effort tranchant dans un poteau est alors égal à : $V3 = \frac{Q3}{np}$ A4/1-35

$Coeff_Moments = 0.66$ Pieds de poteaux « appuyés » A4/1-36

$Coeff_Moments = 0.50$ Pieds de poteaux « encastrés » A4/1-37

$a_{poteaux} = lc \cdot Coeff_Moments$ A4/1-38

$b_{poteaux} = lc (1 - Coeff_Moments)$ A4/1-39

Moment en tête de poteaux $M_{tête3} = \pm (a_{poteaux} V3)$ A4/1-40

Moment en pied de poteaux $M_{pied3} = \pm (-b_{poteaux} V3)$ A4/1-41

Force axiale dans les poteaux $F3 = - \frac{m_{totale} (g \pm 0,3 g_{imp_vert})}{np}$ A4/1-42

Contrainte longitudinale dans un poteau $\sigma_{N} = \frac{M}{I_p / dp_{ext} * 2} + \frac{F}{S_p}$ A4/1-43

$$\sigma_{N} = \frac{M_{tête3}}{I_p / dp_{ext} * 2} + \frac{F3}{S_p} \quad \sigma_{N} = \frac{M_{pied3}}{I_p / dp_{ext} * 2} + \frac{F3}{S_p}$$

$$\sigma_{N} = \frac{M_{tête3}}{I_p / dp_{ext} * 2} + \frac{F3}{S_p} \quad \sigma_{N} = \frac{M_{pied3}}{I_p / dp_{ext} * 2} + \frac{F3}{S_p}$$

Note : Les têtes de poteaux et les fûts des poteaux pouvant être réalisés dans des matériaux différents, les exigences ci-dessus peuvent être adaptées en conséquence.

Les contraintes longitudinales résultant des différentes combinaisons des moments et des forces axiales définies ci-dessus doivent respecter les exigences ci-dessous :

La contrainte longitudinale minimum ne doit pas être inférieure à la contrainte critique de voilement déterminée conformément aux exigences de [163] ou de [167]

La contrainte longitudinale maximum ne doit pas être supérieure à la limite d'élasticité du matériau affectée d'un coefficient partiel de sécurité de 1,1.

Figure A4/1-7 (suite)

Vérification des contraintes Poteaux contreventés (suite)**Contrainte de cisaillement dans un poteau**

$$\sigma_{Cis} = \frac{4}{3} \frac{V3}{Sp}$$

A4/1-44

La contrainte de cisaillement ne doit pas être supérieure à 0,5 fois la limite d'élasticité du matériau affectée du coefficient partiel de sécurité de 1,1.

Interaction

L'interaction entre les contraintes longitudinales et les contraintes de cisaillement doit être vérifiée conformément aux exigences de [163] ou de [167] à partir des coefficients déterminés à partir des procédures définies par ces mêmes références.

Si les conditions ci-dessus sont respectées, alors la détermination des efforts et des contraintes dans les poteaux peuvent être réalisées en utilisant, en fonction du mode de défaillance étudié, les coefficients de réduction définis au Figure 4.1 pour des poteaux contreventés conformément à la procédure ci-après. Si tel n'est pas le cas, alors soit les tirants doivent être modifiés soit, éventuellement, les vérifications ci-dessus, relatives aux contraintes dans les poteaux, doivent être réalisées à partir de la procédure 2, toujours sans prise en compte de coefficient de réduction.

Détermination des efforts horizontaux

Pour une direction de séisme donnée, l'effort latéral (appliqué au centre de gravité de la sphère) est donné par la formule suivante :

$$q = q_x = q_y = \sqrt{(g_{imp_hor} m_{imp_tot})^2 + (g_{conv_hor} m_{conv})^2}$$

A4/1-45

où $g_{(imp_hor)}$ et $g_{(conv_hor)}$ sont les accélérations obtenues à partir des spectres de calcul pour l'analyse élastique (Spectres réduits en fonction des coefficients définis Figure 4.1).

Conformément à la possibilité offerte au § 1.3.4 et en assimilant une sphère sur poteaux à une structure axisymétrique, une seule direction horizontale de séisme est prise compte. Dans ces conditions et conformément aux exigences de ([27a] § 4.3.3.5.1) deux cas doivent être envisagés pour l'effort latéral total Q :

L'effort latéral total Q est égal à :

$$Q1 = 1,0 q$$

A4/1-46a

$$Q2 = 0,3 q$$

A4/1-46b

L'effort tranchant dans un poteau est égal à :

$$V1 = \frac{Q1}{np}$$

A4/1-47a

$$V2 = \frac{Q2}{np}$$

A4/1-47b

Figure A4/1-7 (suite)

Vérification des contraintes Poteaux contreventés (suite)

$Coeff_Moments = 0.66$	Pieds de poteaux « appuyés »	A4/1-48
$Coeff_Moments = 0.50$	Pieds de poteaux « encastrés »	A4/1-49
$a_poteaux = lc \ Coeff_Moments$		A4/1-50
$b_poteaux = lc (1 - Coeff_Moments)$		A4/1-51
Moment en tête de poteaux	$M_tête1 = \pm (+a_poteaux \ V1)$	A4/1-52a
	$M_tête2 = \pm (+a_poteaux \ V2)$	A4/1-52b
Moment en pied de poteaux	$M_pied1 = \pm (-b_poteaux \ V1)$	A4/1-53a
	$M_pied2 = \pm (-b_poteaux \ V2)$	A4/1-53b
Force axiale dans les poteaux	$F1 = - \frac{m_totale (g \pm 0,3 \ g_imp_vert)}{np}$	A4/1-54a
	$F2 = - \frac{m_totale (g \pm g_imp_vert)}{np}$	A4/1-54b

Contrainte longitudinale dans un poteau

$$\sigma_N = \frac{M}{I_p / dp_ext * 2} + \frac{F}{Sp}$$

A4/1-55

$\sigma_N = \frac{M_tête1}{I_p / dp_ext * 2} + \frac{F1}{Sp}$	$\sigma_N = \frac{M_pied1}{I_p / dp_ext * 2} + \frac{F1}{Sp}$
$\sigma_N = \frac{M_tête1}{I_p / dp_ext * 2} + \frac{F1}{Sp}$	$\sigma_N = \frac{M_pied1}{I_p / dp_ext * 2} + \frac{F1}{Sp}$
$\sigma_N = \frac{M_tête2}{I_p / dp_ext * 2} + \frac{F2}{Sp}$	$\sigma_N = \frac{M_pied2}{I_p / dp_ext * 2} + \frac{F2}{Sp}$
$\sigma_N = \frac{M_tête2}{I_p / dp_ext * 2} + \frac{F2}{Sp}$	$\sigma_N = \frac{M_pied2}{I_p / dp_ext * 2} + \frac{F2}{Sp}$
Note : Les têtes de poteaux et les fûts des poteaux pouvant être réalisés dans des matériaux différents, les exigences ci-dessus peuvent être adaptées en conséquence.	

Les contraintes longitudinales résultant des différentes combinaisons des moments et des forces axiales définies ci-dessus doivent respecter les exigences ci-dessous :

La contrainte longitudinale minimum ne doit pas être inférieure à la contrainte critique de voilement déterminée conformément aux exigences de [163] ou de [167]

La contrainte longitudinale maximum ne doit pas être supérieure à la limite d'élasticité du matériau affectée d'un coefficient partiel de sécurité de 1,1.

Figure A4/1-7 (suite)

Vérification des contraintes Poteaux contreventés (suite)**Contrainte de cisaillement dans un poteau**

$$\sigma_{Cis} = \frac{4}{3} \frac{V1}{Sp}$$

A4/1-56

La contrainte de cisaillement ne doit pas être supérieure à 0,5 fois la limite d'élasticité du matériau affectée du coefficient partiel de sécurité de 1,1.

Interaction

L'interaction entre les contraintes longitudinales et les contraintes de cisaillement doit être vérifiée conformément aux exigences de [163] ou de [167] à partir des coefficients déterminés à partir des procédures définies par ces mêmes références.

Figure A4/1-7 (suite)

ANNEXE 4
RESERVOIRS SPHERIQUES
2° PARTIE
EXEMPLE (PROCEDURE 1)



GUIDE SEISME - EQUIPEMENTS CHAUDRONNES

Réservoirs sphériques

Page 1
28/04/18

Sphère [172]

Sphère

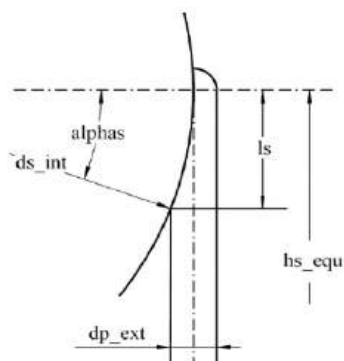
Diamètre intérieur	ds_int =	19 625,50	mm
Epaisseur (à l'équateur)	es_equ =	74,50	mm
Diamètre moyen (à l'équateur)	ds_moy_equ =	19 700,00	mm
Hauteur (à l'équateur)	hs_equ =	12 000,00	mm
Masse totale de la sphère (à épaisseur constante)	ms_tot =	707 647,97	kg
Matériau	NF EN 10028-2 P355GH		
Limite d'élasticité	Rp_sphère =	355,00	MPa
Masse volumique	ms_mat =	7 850,00	kg/m3
Pression	p =		bar

Poteaux

Nombre de poteaux	np =	12	
Diamètre extérieur du poteau	dp_ext =	1 016,00	mm
Epaisseur du poteau	ep =	18,00	mm
Diamètre intérieur du poteau	dp_int =	980,00	mm
Moment d'inertie du poteau	Ip =	7,0285E+9	mm4
Rayon de giration	ip =	352,90	mm
Matériau	NF EN 10028-2 P355GH		
Module d'élasticité	E_poteaux =	210 000,00	MPa
Limite d'élasticité	Rp_poteaux =	345,00	MPa
Masse volumique	mp_mat =	7 850,00	kg/mm3
Surface de la section droite	Sp =	56 435,57	mm2
Masse d'un poteau	mp_unit =	5 220,35	kg

Produit

Remplissage	Rem =	97,50	%
Masse volumique	m_prod =	522,00	kg/m3
Masse de produit	m_prod_tot =	2 014 354,63	kg
Masse impulsive	[181] m_imp =	0,98	kg
	[54] m_imp =	0,89	kg
Masse convective	[181] m_conv =	0,02	kg



alphas =	18,32	°	A4/1-1
ls =	3 095,37	mm	A4/1-2
Coeff_long_effective =	0,45		
lc =	10 607,08	mm	A4/1-3
lc/ip =	30,06		Méthode applicable
Coeff_Poteaux =	12		Encastré-Encastré
kp =	178 097,96	N/mm	A4/1-4
[181] m_imp_tot =	2 734 335,09	kg	
[54] m_imp_tot =	2 557 637,36	kg	

Mode impulsif (Direction horizontale) Sans tirants

[181] Fréquence =	1,28	Hz	A4/1-5
Période =	0,78	s	
[54] Fréquence =	1,33	Hz	A4/1-5
Période =	0,75	s	



GUIDE SEISME - EQUIPEMENTS CHAUDRONNES

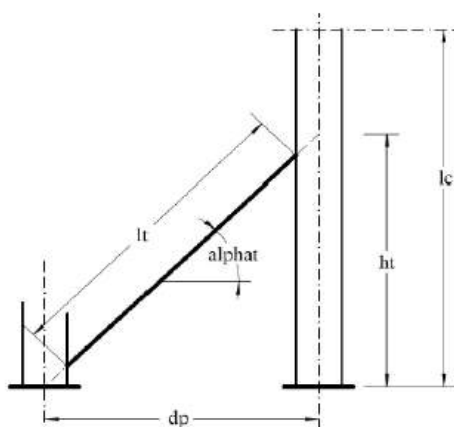
Réservoirs sphériques

Page 2
28/04/18

Sphère [172]

Tirants

Diamètre extérieur du tirant	dt_ext =	150,00	mm
Epaisseur du tirant	et =	10,00	mm
Diamètre intérieure du tirant	dt_int =	130,00	mm
	dt_ext / et =	15,00	Méthode applicable
Hauteur au droit de la fixation du tirant	ht =	8 405,00	mm
Matériau		S235	
Module d'élasticité	E_tirants =	202 000,00	MPa
Limite d'élasticité	Rp_tirants =	235,00	MPa
Résistance à la traction	Rt_tirants =	360,00	MPa
Allongement à rupture	A% =	17,00	%
Masse volumique	mt_mat =	7 850,00	kg/m3
Surface de la section droite	St =	4 398,23	mm2
Longueur	lt =	9 830,62	mm
Masse d'un tirant	mti =	339,41	kg/m3



Sp/St = 12,83 [172] [182]
Sp/St > 8 : Méthode applicable

bétat =	30,00	°	A4/1-6
dp =	5 098,74	mm	A4/1-7
alphat =	58,76	°	A4/1-8
	1,026	rad.	
kt =	24 311,47	N/mm	A4/1-9
a =	0,79		A4/1-10
k1 =	14 841,50	N/mm	A4/1-11
k2 =	9,55		A4/1-11
b =	2,37		A4/1-10

m_totale = 2 792 792,67 kg

Mode impulsif (Direction horizontale)

Si les tirants en compression
ne sont pas pris en compte :

A4/1-12	kpt =	3,06E+05	N/mm
	avec masse impulsive de [181] :		
A4/1-13	Fréquence =	1,68	Hz
	Période =	0,5941	s
avec masse totale de produit :		1,67	
avec masse impulsive de [54] :		1,74	

Mode impulsif (Direction horizontale)

Si les tirants en compression
sont pris en compte :

	kpt_T&C =	4,34E+05	N/mm	A4/1-14
	avec masse impulsive de [181] :			
	Fréquence =	2,00	Hz	A4/1-15
	Période =	0,50	s	

Mode impulsif (Direction verticale)

avec masse impulsive de [181] :

A4/1-16	kpv =	1,34E+07	N/mm
A4/1-17	Fréquence =	11,52	Hz
	Période =	0,0868	s

Mode convectif

avec masse convective de [181] :

	omega =	2,88	Annexe 1	Figure A4/1-5
	Fréquence =	0,46	Hz	Figure A4/1-5
	Période =	2,1796	s	



GUIDE SEISME - EQUIPEMENTS CHAUDRONNES Réservoirs sphériques

Page 3
28/04/18

Sphère [172]

Accélération sismiques

Mode impulsif (Direction horizontale)	$g_{imp_hor_nr} =$	3,44	m/s ²	Annexe 2
Mode convectif	$g_{conv_nr} =$	1,26	m/s ²	Annexe 2
Mode impulsif (Direction verticale)	$g_{imp_vert_nr} =$	6,54	m/s ²	Annexe 2
Mode impulsif (Direction horizontale)	$g_{imp_ho_r} =$	1,72	m/s ²	Annexe 2
Mode convectif	$g_{conv_r} =$	1,26	m/s ²	Annexe 2
Mode impulsif (Direction verticale)	$g_{imp_vert_r} =$	3,63	m/s ²	Annexe 2

	1° Situation (1 + 0,0)	2° Situation (0,3 + 0,0)	Vérification vs Rp tirant (1 + 0,0)			
	1	0,3	1			
Effort latéral (1 direction horizontale)						
$Q_{nr} =$	9,40E+06	2,82E+06	A4/1-31	6,74E+06	N	
$Q_r =$	4,70E+06	1,41E+06	A4/1-46	-	N	
Effort tranchant dans un poteau						
$V_{nr} =$	7,83E+05	2,35E+05		5,62E+05	N	A4/1-35
$V_r =$	3,92E+05	1,17E+05	A4/1-47	-	N	
Contrainte de traction dans les tirants						
Accélération $nr =$	3,44	1,03	A4/1-32	2,47	m/s ²	
Allongement =	15,94	4,78	A4/1-33	11,44	mm	
Précontrainte =	0,00	0,00		0,00	MPa	
Contrainte de traction =	327,49	98,25	A4/1-34	235,00	MPa	

Accélération pour laquelle la limite d'élasticité est atteinte = **2,47** m/s²

Moments dans les poteaux		Coeff_Moments =	0,50		A4/1-36 & 48
		$a_{poteaux} =$	5 303,54	mm	A4/1-38 & 50
		$b_{poteaux} =$	5 303,54	mm	A4/1-39 & 51

Moment en tête de poteaux						
$M_{nr_tête} =$	4,15E+09	1,25E+09		2,98E+09	N.mm	
$M_{r_tête} =$	2,08E+09	6,23E+08		-	N.mm	
$M_{tête} =$	2,08E+09	1,25E+09	A4/1-52	2,98E+09	N.mm	A4/1-40

Moment en pied de poteau						
$M_{nr_pied} =$	-4,15E+09	-1,25E+09		-2,98E+09	N.mm	
$M_{r_pied} =$	-2,08E+09	-6,23E+08		-	N.mm	
$M_{pied} =$	-2,08E+09	-1,25E+09	A4/1-53	-2,98E+09	N.mm	A4/1-41

Forces axiales dans les poteaux

$F_{nr_min} =$	-3,81E+06	-3,81E+06		-3,81E+06	N	
$F_{r_min} =$	-3,13E+06	-3,13E+06		-	N	
$F_{min} =$	-3,13E+06	-3,81E+06	A4/1-54	-3,81E+06	N	A4/1-42
$F_{nr_max} =$	-7,61E+05	-7,61E+05		-7,61E+05	N	
$F_{r_max} =$	-1,44E+06	-1,44E+06		-	N	
$F_{max} =$	-1,44E+06	-7,61E+05	A4/1-54	-7,61E+05	N	A4/1-42



GUIDE SEISME - EQUIPEMENTS CHAUDRONNES
Réservoirs sphériques

Page 4
28/04/18

Sphère [172]

Contraintes longitudinales en tête de poteau

I/v = 1,38E+07 mm3

A4/1-55 M_tête +	A4/1-55 M_tête -	A4/1-55 M_tête +	A4/1-55 M_tête -	A4/1-43 M_tête +	A4/1-43 M_tête -	
150,10	-150,10	90,06	-90,06	215,42	-215,42	MPa
F_min =	F_min =	F_min =	F_min =	F_min =	F_min =	
-55,44	-55,44	-67,43	-67,43	-67,43	-67,43	MPa
94,66	-205,54	22,63	-157,48	147,99	-282,84	MPa
F_max =	F_max =	F_max =	F_max =	F_max =	F_max =	
-25,47	-25,47	-13,49	-13,49	-13,49	-13,49	MPa
124,63	-175,57	76,57	-103,54	201,93	-228,90	MPa

SigmaN_min =	-282,84	>	Annexe 3 -289,71	MPa	Acceptable
SigmaN_max =	201,93	<	313,64	MPa	Acceptable

Contraintes de cisaillement dans les poteaux

SigmaCis_nr =	18,50	5,55		13,28	MPa	
SigmaCis_r =	9,25	2,78		-	MPa	
SigmaCis =	9,25	5,55	A4/1-56	13,28	MPa	A4/1-44
SigmaCis =		13,28	<	156,82	MPa	Acceptable

Interaction

[163b] Eq. C9.A12.8.3-5

k_x	k_teta	k_tau	k_i			
1,94	-	1,88	-			
0,9545	-	0,0096	-	0,9641	< 1	Acceptable
0,4251	-	0,0096	-	0,4347	< 1	Acceptable



GUIDE SEISME - EQUIPEMENTS CHAUDRONNES
Réservoirs sphériques

Page 5
28/04/18

Sphère [172]

Contraintes longitudinales en pied de poteau

I/v = 1,38E+07 mm3

A4/1-55 M_pied +	A4/1-55 M_pied -	A4/1-55 M_pied +	A4/1-55 M_pied -	A4/1-43 M_pied +	A4/1-43 M_pied -	
-150,10	150,10	-90,06	90,06	-215,42	215,42	MPa
F_min =	F_min =	F_min =	F_min =	F_min =	F_min =	
-55,44	-55,44	-67,43	-67,43	-67,43	-67,43	MPa
-205,54	94,66	-157,48	22,63	-282,84	147,99	MPa
F_max =	F_max =	F_max =	F_max =	F_max =	F_max =	
-25,47	-25,47	-13,49	-13,49	-13,49	-13,49	MPa
-175,57	124,63	-103,54	76,57	-228,90	201,93	MPa
SigmaN_min =		-282,84	>	-289,71	MPa	Acceptable
SigmaN_max =		201,93	<	313,64	MPa	Acceptable

Contraintes de cisaillement dans les poteaux

SigmaCis_nr =	18,50	5,55		13,28	MPa	
SigmaCis_r =	9,25	2,78		-	MPa	
SigmaCis =	9,25	5,55	A4/1-56	13,28	MPa	A4/1-44
SigmaCis =		13,28	<	156,82		Acceptable

Interaction

[163b] Eq. C9.A12.8.3-5

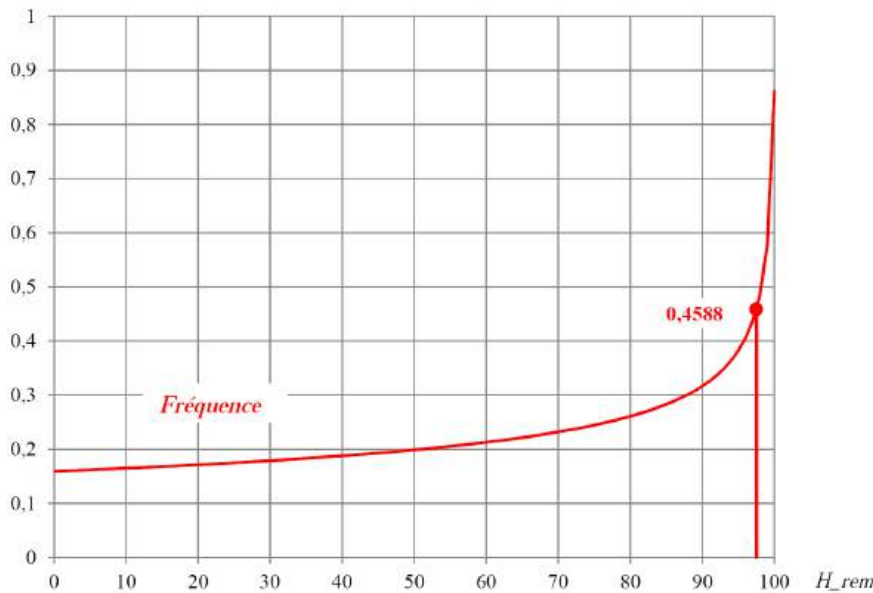
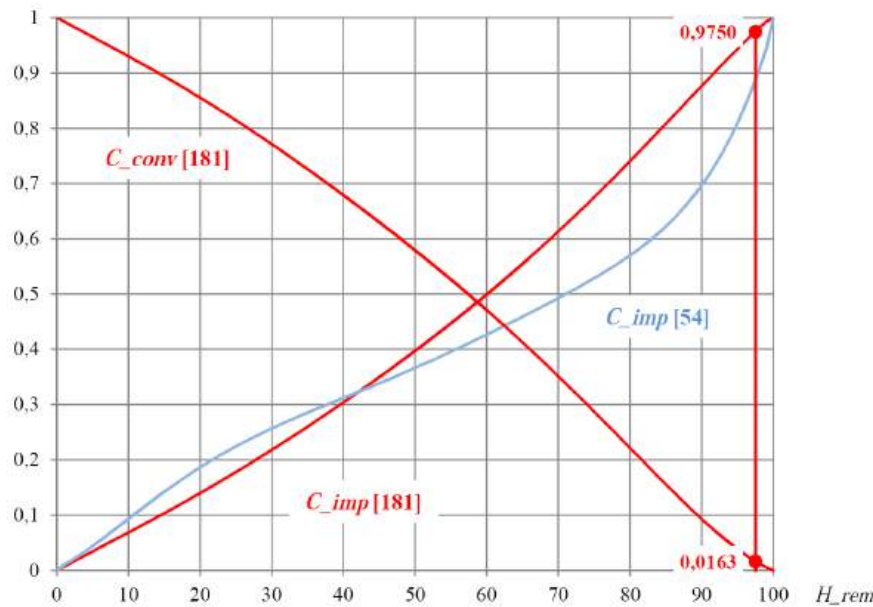
k_x	k_teta	k_tau	k_i			
1,94	-	1,88	-			
0,95	-	0,01	-	0,9641	< 1	Acceptable
0,43	-	0,01	-	0,4347	< 1	Acceptable



GUIDE SEISME - EQUIPEMENTS CHAUDRONNES
Annexe 1 : Masses impulsive et masse convective

Page 6
08/03/15

Sphère [172]





GUIDE SEISME - EQUIPEMENTS CHAUDRONNES
Annexe 2 : Caractéristiques du séisme - Accélérations

Page 7
 08/03/15

Sphère [172]

Caractéristiques du séisme

Type d'équipement	Sphère	
Zone de sismicité	3	
Classe de sol	B	
Equipement	Equipement neuf	
Arrêté	Arrêtés du 4 Octobre 2010 & du 13 Septembre 2013	
Amortissement	5	%
Coefficient de réduction	Mode impulsif horizontal	2
Coefficient de réduction	Mode convectif (Amortissement 0,5%)	1
Coefficient de réduction	Direction verticale	1,5
ghg_1 = 2,42 TBH = 0,05 TBV = 0,03 ghg_2 = 2,42 TCH = 0,25 TCV = 0,20 gvg = 2,18 TDH = 2,50 TDV = 2,50 Csol = 1,35 TEH = 4,00 neta = 1,00 TFH = 10,00 dhg = 0,05		

	Périodes		Fréquences
Mode impulsif horizontal	0,5941 s		1,68 Hz
Mode convectif (Amortissement 0,5%)	2,1796 s		0,46 Hz
Direction verticale	0,0868 s		11,52 Hz

Bande de fréquences	+/-	0	%
---------------------	-----	----------	---

	Freq. -	Freq. =	Freq. +	
Accélérations : Spectre de réponse élastique				
Acc. sismique Mode imp. hor. gamma_h_1 =	3,4368	3,4368	3,4368	m/s ²
Acc. sismique Mode convectif gamma_h_2 =	1,2632	1,2632	1,2632	m/s ²
Acc. sismique verticale gamma_v =	6,5400	6,5400	6,5400	m/s ²

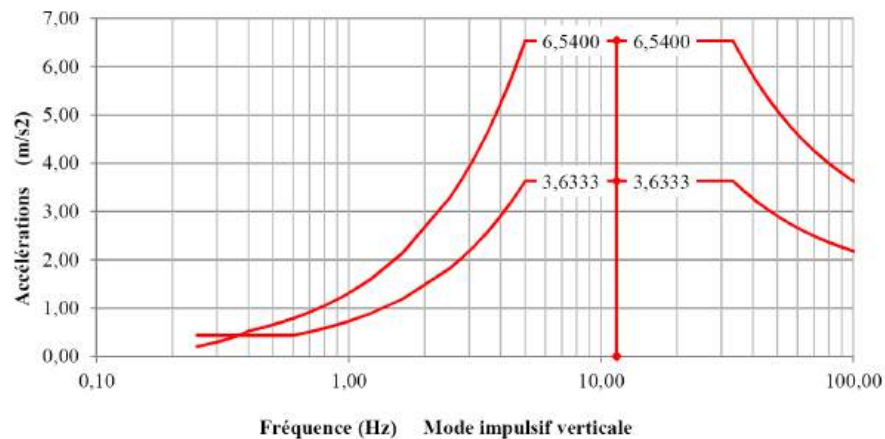
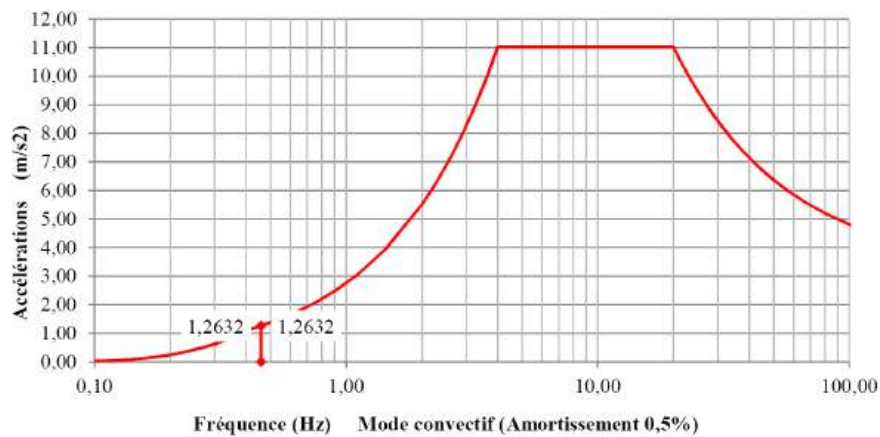
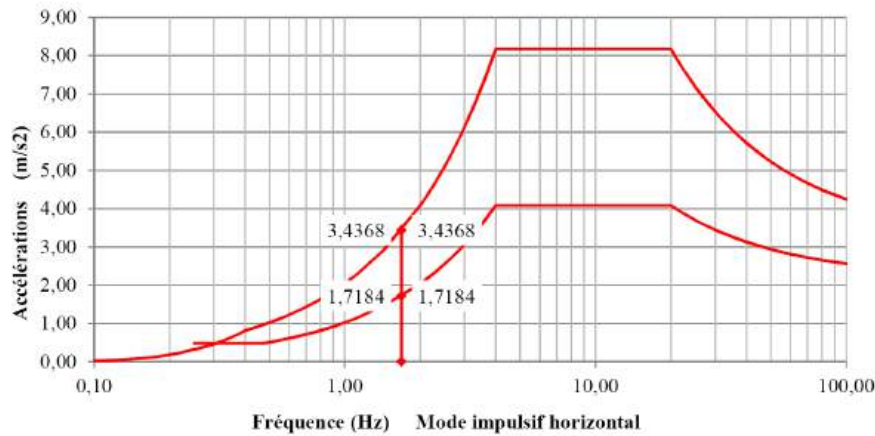
Accélérations : Spectre de calcul pour l'analyse élastique				
Acc. sismique Mode imp. hor. gamma_ch_1 =	1,7184	1,7184	1,7184	m/s ²
Acc. sismique Mode convectif gamma_ch_2 =	1,2632	1,2632	1,2632	m/s ²
Acc. sismique verticale gamma_cv =	3,6333	3,6333	3,6333	m/s ²



GUIDE SEISME - EQUIPEMENTS CHAUDRONNES
Annexe 2 : Caractéristiques du séisme - Accélération

Page 8
08/03/15

Sphère [172]





GUIDE SEISME - EQUIPEMENTS CHAUDRONNES
Annexe 3 : Contraintes critiques de voilement Têtes des poteaux

Page 9
08/03/15

Sphère [172]

Situation

Pression d'étude P_étude = 0,00 MPa
 Température d'étude T_étude = 20,00 °C

Matériau NF EN 10028-2 P355GH

Limite d'élasticité Rp_poteaux = 345,00 MPa
 Module d'élasticité E_poteaux = 210 000,00 MPa
 Coefficient de Poisson nu = 0,30

Caractéristiques géométriques du composant **Cylindre**

Diamètre nominal (intérieur) dp_int = 998,00 mm
 Epaisseur ep = 18,00 mm
 Longueur lc = 10 607,08 mm
 Rayon moyen rm_i = 517,00 mm

Conditions aux limites du composant

Direction radiale Direction méridienne

Extrémité 1 Encastré Encastré
 Extrémité 2 Encastré Encastré

Imperfections de fabrication

Référentiel de construction **CODAP 1995**

Diamètre maximum mesuré 1008 mm
 Diamètre minimum mesuré 990 mm
 Ovalisation 0,02

Classe de tolérance relative à l'ovalisation **C**

Ecart de forme

Dir. longitudinale hors zones soudées - mm
 Dir. longitudinale zones soudées - mm
 Dir. circonférentielle hors zones soudées 6 mm
 Dir. circonférentielle zones soudées - mm
 Distance entre deux soudures circulaires 1000 mm
 Distance entre deux soudures longitudinales 1000 mm

Classe de tolérance relative aux écarts de forme **C**

Ecart d'alignement des fibres moyennes 2,80 mm
 Ecart d'alignement des fibres moyennes / ep 0,16 -
 Classe de tolérance relative aux écarts d'alignement **B**

Classe de tolérance globale **C**



GUIDE SEISME - EQUIPEMENTS CHAUDRONNES
Annexe 3 : Contraintes critiques de voilement Têtes des poteaux

Page 10
08/03/15

Sphère [172]

Contrainte critique de voilement longitudinale

$$\frac{R}{e_n} \leq 0,03 \frac{E}{R_{pt}} \quad 28,72 > 18,26 \quad [163b] \text{ Eq. C9.A12.5-1}$$

La vérification du voilement sous l'effet des contraintes de compression longitudinales est nécessaire

Paramètre omega_x	omega_x =	92,31		[163b] Eq. C9.A12.5-5
Coefficient C_xb	C_xb =	6		[163b] Tab. C9.A12.5
Coefficient C_x	C_x =	0,82		[163b] § C9.A12.5 e)
Cont. théorique de voilement	sigma_xRcr =	3623,127196	MPa	[163b] Eq. C9.A12.5-12
Paramètre Q (Tolérances)	Q =	16,00		[163b] § C9.A12.5 e)
Ampl. d'imperfection delta_wk	delta_wk =	6,03		[163b] Eq. C9.A12.5-16
Facteur d'imperfection alpha_x	alpha_x =	0,44		[163b] Eq. C9.A12.5-17
Elancement limite lambda_cc0x	lambda_cc0x =	0,20		[163b] Eq. C9.A12.5-18
Facteur dom.plast. beta_x	beta_x =	0,60		[163b] Eq. C9.A12.5-19
Exposant d'interaction neta_x	neta_x =	1,00		[163b] Eq. C9.A12.5-20
Elancement réduit lambda_ccx	lambda_ccx =	0,31		[163b] Eq. C9.A12.5-21
Elancement limite lambda_ccpx	neta_x =	1,05		[163b] Eq. C9.A12.5-22
Coeff. de réduction khi_x	khi_x =	0,92	Flt. elasto-plastique	[163b] Eq. C9.A12.5-23+
Contrainte critique	sigma_xRk =	318,68	MPa	[163b] Eq. C9.A12.5-26
Force F_cmax	F_cmax =	1,86E+07	N	[163b] Eq. C9.A12.5-27
Moment M_max	M_max =	4,81E+09	N.mm	[163b] Eq. C9.A12.5-28
Coefficient d'interaction	k_x =	1,94		[163b] Eq. C9.A128.3-1



GUIDE SEISME - EQUIPEMENTS CHAUDRONNES
Annexe 3 : Contraintes critiques de voilement Têtes des poteaux

Page 11
28/04/18

Sphère [172]

Contrainte critique de voilement circonférentiel

$$\frac{R}{e_u} \leq 0,21 \sqrt{\frac{E}{R_{pt}}} \quad 28,72 \quad > \quad 5,18 \quad [163b] \text{ Eq. C9.A12.6-1}$$

La vérification du voilement sous l'effet des contraintes de compression circonférentielles est nécessaire

Paramètre omega_teta	omega_teta =	92,31		[163b] Eq. C9.A12.6-4
Coefficient C_teta	C_teta =	1,50		[163b] Tab. C9.A12.6-1
				[163b] Tab. C9.A12.6-2
Cont. théorique de voilement	sigma_tetaRcr =	94,53	MPa	[163b] § C9.A12.6 d)
Facteur alpha_teta (Tolérances)	alpha_teta =	0,5		[163b] § C9.A12.6 e)
Elancement limite lambda_cc0teta	lambda_cc0teta =	0,40		[163b] Eq. C9.A12.6-19
Facteur dom.plast. beta_teta	beta_teta =	0,60		[163b] Eq. C9.A12.6-20
Exposant d'interaction neta_teta	neta_teta =	1,00		[163b] Eq. C9.A12.6-21
Elancement réduit lambda_ccteta	lambda_ccteta =	1,91		[163b] Eq. C9.A12.6-22
Elancement limite lambda_ccpteta	lambda_ccpteta =	1,12		[163b] Eq. C9.A12.6-23
Coeff. de réduction khi_teta	khi_teta =	0,14	Flt. élastique	[163b] Eq. C9.A12.6-24+
Contrainte critique	sigma_tetaRk =	47,26	MPa	[163b] Eq. C9.A12.6-27
Pres. ext./ Dépression P_max	P_max =	1,65	MPa	
Coefficient d'interaction	k_teta =	1,35		[163b] Eq. C9.A12.8.3-2



GUIDE SEISME - EQUIPEMENTS CHAUDRONNES
Annexe 3 : Contraintes critiques de voilement Têtes des poteaux

Page 12
28/04/18

Sphère [172]

Contrainte critique de voilement par cisaillement

$$\frac{R}{e_u} \leq 0,16 \left(\frac{E}{R_{pt}} \right)^{\frac{2}{3}} \quad 28,72 \quad > \quad 11,49 \quad [163b] \text{ Eq. C9.A12.7-1}$$

La vérification du voilement sous l'effet du cisaillement est nécessaire

Paramètre omega_tau	omega_tau =	92,31	[163b] Eq. C9.A12.7-4
Coefficient C_tau	C_tau =	1	[163b] C9.A12.7-5+
Contrainte théorique de voilement	Tau_xtetaRcr =	570,75 MPa	[163b] C9.A12.7_8
Facteur alpha_tau (Tolérances)	alpha_tau =	0,50	[163b] § C9.A12.7 e)
Elancement limite lambda_cc0tau	lambda_cc0tau =	0,40	[163b] Eq. C9.A12.6-19
Facteur dom.plast. beta_tau	beta_tau =	0,60	[163b] Eq. C9.A12.6-20
Exposant d'interaction neta_tau	neta_tau =	1,00	[163b] Eq. C9.A12.6-21
Elancement réduit lambda_cctau	lambda_cctau =	0,59	[163b] Eq. C9.A12.7-15
Elancement limite lambda_ccptau	lambda_ccptau =	1,12	[163b] Eq. C9.A12.7-16
Coeff. de réduction khi_tau	khi_tau =	0,84 Flt. élasto-plastique	[163b] Eq. C9.A12.7-17+
Contrainte critique	tau_xtetaRk =	145,00 MPa	[163b] Eq. C9.A12.7-20
Effort tranchant Q_max	Q_max =	4.24E+06 N	
Coefficient d'interaction	k_tau =	1,88	[163b] Eq. C9.A12.8.3-3
Coefficient d'interaction	k_i =	0,02	[163b] Eq. C9.A12-8.3-4



GUIDE SEISME - EQUIPEMENTS CHAUDRONNES
Annexe 4 : Contraintes critiques de voilement Fûts des poteaux

Page 13
28/04/18

Sphère [172]

Situation

Pression d'étude	P_étude =	0,00	MPa
Température d'étude	T_étude =	20,00	°C

Matériau

P355GH

Limite d'élasticité	Rp_poteaux =	345,00	MPa
Module d'élasticité	E_poteaux =	210 000,00	MPa
Coefficient de Poisson	nu =	0,30	

Caractéristiques géométriques du composant

Cylindre

Diamètre nominal (intérieur)	dp_int =	998,00	mm
Epaisseur	ep =	18,00	mm
Longueur	lc =	10 607,08	mm
Rayon moyen	rm_i =	517,00	mm

Conditions aux limites du composant

Direction
radiale

Direction
méridienne

Extrémité 1	Encastré	Encastré
Extrémité 2	Encastré	Encastré

Imperfections de fabrication

Référentiel de construction

CODAP 1995

Diamètre maximum mesuré	1008	mm
Diamètre minimum mesuré	990	mm
Ovalisation	0,02	

Classe de tolérance relative à l'ovalisation

C

Écarts de forme

Dir. longitudinale hors zones soudées	-	mm
Dir. longitudinale zones soudées	-	mm
Dir. circonférentielle hors zones soudées	6	mm
Dir. circonférentielle zones soudées	-	mm
Distance entre deux soudures circulaires	1000	mm
Distance entre deux soudures longitudinales	1000	mm

Classe de tolérance relative aux écarts de forme

C

Ecart d'alignement des fibres moyennes	2,80	mm
Ecart d'alignement des fibres moyennes / ep	0,16	-
Classe de tolérance relative aux écarts d'alignement	B	

Classe de tolérance globale

C



GUIDE SEISME - EQUIPEMENTS CHAUDRONNES
Annexe 4 : Contraintes critiques de voilement Fûts des poteaux

Page 14
28/04/18

Sphère [172]

Contrainte critique de voilement longitudinale

$$\frac{R}{e_u} \leq 0,03 \frac{E}{R_{pt}} \quad 28,72 \quad > \quad 18,26 \quad [163b] \text{ Eq. C9.A12.5-1}$$

La vérification du voilement sous l'effet des contraintes de compression longitudinales est nécessaire

Paramètre omega_x	omega_x =	109,95		[163b] Eq. C9.A12.5-5
Coefficient C_xb	C_xb =	6		[163b] Tab. C9.A12.5
Coefficient C_x	C_x =	0,78		[163b] § C9.A12.5 c)
Cont. théorique de voilement	sigma_xRcr =	3441,934496	MPa	[163b] Eq. C9.A12.5-12
Paramètre Q (Tolérances)	Q =	16,00		[163b] § C9.A12.5 e)
Ampl. d'imperfection delta_wk	delta_wk =	6,03		[163b] Eq. C9.A12.5-16
Facteur d'imperfection alpha_x	alpha_x =	0,44		[163b] Eq. C9.A12.5-17
Elancement limite lambda_cc0x	lambda_cc0x =	0,20		[163b] Eq. C9.A12.5-18
Facteur dom.plast. beta_x	beta_x =	0,60		[163b] Eq. C9.A12.5-19
Exposant d'interaction neta_x	neta_x =	1,00		[163b] Eq. C9.A12.5-20
Elancement réduit lambda_ccx	lambda_ccx =	0,32		[163b] Eq. C9.A12.5-21
Elancement limite lambda_ccpx	neta_x =	1,05		[163b] Eq. C9.A12.5-22
Coeff. de réduction khi_x	khi_x =	0,92	Flt. élasto-plastique	[163b] Eq. C9.A12.5-23+
Contrainte critique	sigma_xRk =	316,74	MPa	[163b] Eq. C9.A12.5-26
Force F_cmax	F_cmax =	1,85E+07	N	[163b] Eq. C9.A12.5-27
Moment M_max	M_max =	4,78E+09	N.mm	[163b] Eq. C9.A12.5-28
Coefficient d'interaction	k_x =	1,94		[163b] Eq. C9.A12.5-3-1



GUIDE SEISME - EQUIPEMENTS CHAUDRONNES
Annexe 4 : Contraintes critiques de voilement Fûts des poteaux

Page 15
28/04/18

Sphère [172]

Contrainte critique de voilement circonférentiel

$$\frac{R}{e_u} \leq 0,21 \sqrt{\frac{E}{R_{pt}}} \quad 28,72 \quad > \quad 5,18 \quad [163b] \text{ Eq. C9.A12.6-1}$$

La vérification du voilement sous l'effet des contraintes de compression circonférentielles est nécessaire

Paramètre omega_teta omega_teta = 109,95 [163b] Eq. C9.A12.6-4

Coefficient C_teta C_teta = 1,50 [163b] Tab. C9.A12.6-1

Cont. théorique de voilement sigma_tetaRcr = 82,18 MPa [163b] § C9.A12.6 d)

Facteur alpha_teta (Tolérances) alpha_teta = 0,5 [163b] § C9.A12.6 e)

Elancement limite lambda_cc0teta lambda_cc0teta = 0,40 [163b] Eq. C9.A12.6-19

Facteur dom.plast. beta_teta beta_teta = 0,60 [163b] Eq. C9.A12.6-20

Exposant d'interaction neta_teta neta_teta = 1,00 [163b] Eq. C9.A12.6-21

Elancement réduit lambda_ccteta lambda_ccteta = **2,05** [163b] Eq. C9.A12.6-22

Elancement limite lambda_ccpteta lambda_ccpteta = 1,12 [163b] Eq. C9.A12.6-23

Coeff. de réduction khi_teta khi_teta = 0,12 Flt. élastique [163b] Eq. C9.A12.6-24+

Contrainte critique sigma_tetaRk = **41,09** **MPa** [163b] Eq. C9.A12.6-27

Pres. ext./ Dépression P_max P_max = 1,43 MPa

Coefficient d'interaction k_teta = **1,34** [163b] Eq. C9.A128.3-2



GUIDE SEISME - EQUIPEMENTS CHAUDRONNES
Annexe 4 : Contraintes critiques de voilement Fûts des poteaux

Page 16
28/04/18

Sphère [172]

Contrainte critique de voilement par cisaillement

$$\frac{R}{e_u} \leq 0,16 \left(\frac{E}{R_{pt}} \right)^{\frac{2}{3}} \quad 28,72 \quad > \quad 11,49 \quad [163b] \text{ Eq. C9.A12.7-1}$$

La vérification du voilement sous l'effet du cisaillement est nécessaire

Paramètre omega_tau omega_tau = 109,95 [163b] Eq. C9.A12.7-4

Coefficient C_tau C_tau = 1 [163b] C9.A12.7-5+

Contrainte théorique de voilement Tau_xtetaRcr = 522,94 MPa [163b] C9.A12.7_8

Facteur alpha_tau (Tolérances) alpha_tau = 0,50 [163b] § C9.A12.7 e)

Elancement limite lambda_cc0tau lambda_cc0tau = 0,40 [163b] Eq. C9.A12.6-19

Facteur dom.plast. beta_tau beta_tau = 0,60 [163b] Eq. C9.A12.6-20

Exposant d'interaction neta_tau neta_tau = 1,00 [163b] Eq. C9.A12.6-21

Elancement réduit lambda_cctau lambda_cctau = 0,62 [163b] Eq. C9.A12.7-15

Elancement limite lambda_ccptau lambda_ccptau = 1,12 [163b] Eq. C9.A12.7-16

Coeff. de réduction khi_tau khi_tau = 0,82 Flt. élasto-plastique [163b] Eq. C9.A12.7-17+

Contrainte critique tau_xtetaRk = **141,20** **MPa** [163b] Eq. C9.A12.7-20

Effort tranchant Q_max Q_max = 4,13E+06 N

Coefficient d'interaction k_tau = **1,86** [163b] Eq. C9.A12.8.3-3

Coefficient d'interaction k_i = **0,01** [163b] Eq. C9.A12-8.3-4

ANNEXE 6
MACHINES TOURNANTES
1° PARTIE
EQUIPEMENT SUR SUPPORT MUNI D'ISOLATEURS

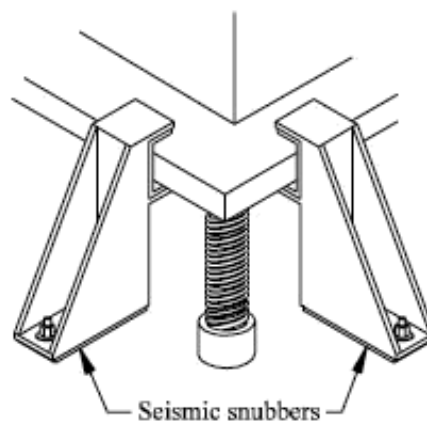
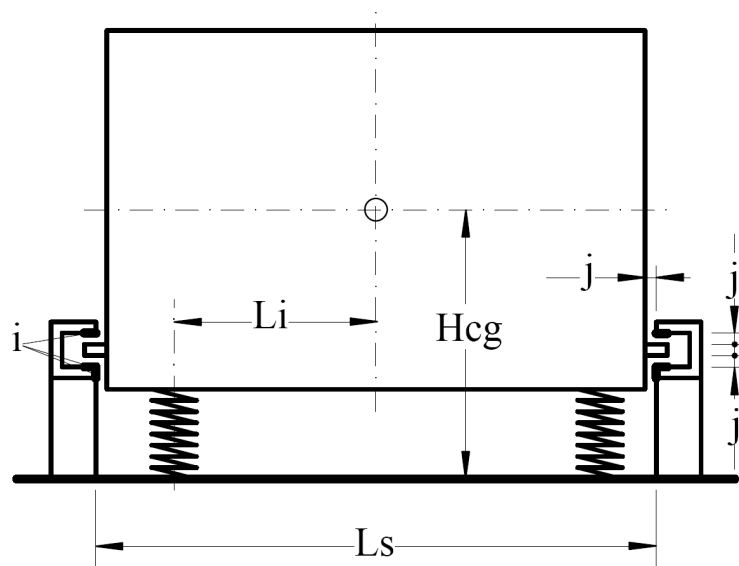


Figure A6-1

Evaluation des efforts sur les butées [175]

j = jeu suffisant pour que les isolateurs fonctionnent correctement en service normal

i = éventuellement matériau élastique (néoprène...)

Il est nécessaire de disposer deux supports/butés sur chacun des quatre côtés du châssis ou de l'embase de l'équipement

Cette procédure est applicable si $0,45 L_s \leq L_i \leq 0,55 L_s$

H_{cg} = Hauteur du centre de gravité de l'équipement

L_i = Voir Figure

L_s = Voir Figure

M_{eq} = Masse totale de l'équipement

$AccH$ = Accélération horizontale à période nulle pour la direction de séisme considérée

C_{ji}	=	1	Supports pourvus de butées élastiques et dont le jeu, j , dans la direction de séisme considérée est inférieur ou égal à 6 mm
	=	1,5	Supports non pourvus de butées élastiques (contact métal-métal) et dont le jeu, j , dans la direction de séisme considérée est inférieur ou égal à 6 mm
	=	2	Supports pourvus de butées élastiques et dont le jeu, j , dans la direction de séisme considérée est supérieur à 6 mm
	=	3	Supports non pourvus de butées élastiques (contact métal-métal) et dont le jeu, j , dans la direction de séisme considérée est supérieur à 6 mm

Force horizontale sur chaque support actif dans la direction de séisme considérée

$$FH = \frac{Meq AccH}{NH} Cji \quad \text{où NH est le nombre de supports actifs pour la direction de séisme horizontale considérée} \quad A6/1-1$$

Force verticale sur chaque support actif

$$FVc \text{ ou } FVt = \pm 1,3 \frac{Meq AccH}{NV Ls} Cji \quad \text{où NV est le nombre de supports actifs pour la direction verticale} \quad A6/1-2$$

Figure A6-2