

ICS 91.010.30; 91.080.40

Version Française

Eurocode 2: Calcul des structures en béton - Partie 4: Structures de soutènement et réservoirs

Eurocode 2: Planung von Stahlbeton- und
Spannbetontragwerken - Teil 4: Stütz- und
Behälterbauwerke aus Beton

Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 4: Liquid
retaining and containment structures

La présente Prénorme européenne (ENV) a été adoptée par le CEN le 27 mai 1997 comme norme expérimentale pour application provisoire.

La période de validité de cette ENV est limitée initialement à trois ans. Après deux ans, les membres du CEN seront invités à soumettre leurs commentaires, en particulier sur l'éventualité de la conversion de l'ENV en Norme européenne.

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

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



COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION
EUROPÄISCHES KOMITEE FÜR NORMUNG
EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION

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

Sommaire

Avant-propos.....	3
Introduction	6
1.1 Domaine d'application.....	6
1.1.2 Domaine d'application de la Partie 4 de l'Eurocode 2.....	6
1.7 Symboles spéciaux employés dans la Partie 1 de l'Eurocode 2.....	7
1.7.5 Symboles spéciaux employés dans la partie 4 de l'Eurocode 2.....	7
2 Bases du calcul.....	8
2.2 Définitions et classifications	8
2.2.2 Actions.....	8
2.3 Exigences de calcul.....	8
2.3.1 Généralités.....	8
2.3.2 Etats-limites ultimes	9
2.3.3 Coefficients de sécurité partiels pour les états-limites ultimes.....	9
2.3.4 Etats-limites de service	10
2.5 Analyse	10
2.5.1 Dispositions générales.....	10
2.5.6 Détermination des effets de la température.....	10
3 Propriétés des matériaux	13
3.1 Béton	13
3.1.2 Béton de masse volumique normale	13
4 Dimensionnement et calcul des sections	13
4.1 Exigences de durabilité.....	13
4.1.6 Abrasion.....	13
4.1.7 Surfaces des ouvrages destinés au stockage de l'eau potable.....	14
4.2 Données du projet	14
4.2.1 Béton	14
4.3 Etats-limites ultimes	14
4.3.2 Sollicitation d'effort tranchant.....	14
4.3.6 Dimensionnement pour les explosions dues à la poussière	14
4.4 Etats-limites de service	15
4.4.2 Etats-limites de fissuration	15
5 Dispositions constructives.....	20
5.3 Unités de précontrainte.....	20
5.3.3 Espacement horizontal et vertical.....	20
5.3.4 Ancrages et coupleurs pour les câbles de précontrainte	20
5.4 Eléments structuraux	20
5.4.7 Voiles de béton armé.....	20
5.4.9 Voiles précontraints	21
Annexe (informative) 105 Effet de la température sur les propriétés du béton	23
A.105.1 Généralités.....	23
A.105.2 Propriétés des matériaux aux températures négatives	23
A.105.3 Propriétés des matériaux aux températures élevées.....	24
Annexe (Informative) 106 Calcul des déformations et des contraintes dans une section de béton non fissurée soumise à des déformations imposées gênées	25
A.106.1 Formules pour le calcul des contraintes et déformations.....	25
A.106.2 Evaluation du bridage	25
Annexe (informative) 107 Calcul des débits de fuites au travers des fissures dans les réservoirs servant au stockage de liquides.....	27
A.107.1 Equation pour la prédiction des débits de fuites	27

Avant-propos

Objectifs des Eurocodes

- (1) Les Eurocodes structuraux constituent un ensemble de normes pour la conception structurale et géotechnique des bâtiments et des ouvrages de génie civil.
- (2) Ils ne traitent de l'exécution et du contrôle que dans la mesure où il est nécessaire d'indiquer la qualité des produits de construction et le niveau de réalisation à satisfaire pour être conforme aux hypothèses adoptées dans les règles de calcul.
- (3) Jusqu'à ce que l'ensemble des spécifications techniques harmonisées concernant les produits et les méthodes de contrôle de leurs performances soient disponibles, certains Eurocodes structuraux traitent de certains de ces aspects dans des annexes informatives.

Contexte du programme Eurocodes

- (4) La Commission des Communautés Européennes (CCE) a entrepris d'établir un ensemble de règles techniques harmonisées pour le calcul des ouvrages de bâtiment et de génie civil, afin de proposer une alternative aux différentes règles en vigueur dans les Etats Membres et finalement, de les remplacer. Ces règles techniques sont connues sous le nom d'Eurocodes Structuraux".
- (5) En 1990, après consultation des différents Etats membres, la CCE a chargé le CEN d'assurer le développement, la publication et la mise à jour des Eurocodes structuraux, et le secrétariat de l'AELE a accepté de soutenir le CEN dans son travail.
- (6) Le Comité Technique CEN/TC 250 est responsable de l'ensemble des Eurocodes Structuraux.

Programme des Eurocodes

- (7) Les travaux concernant les différents Eurocodes Structuraux sont en cours, chacun étant en général constitué de plusieurs parties :

EN 1991 Eurocode 1 Bases de calcul et actions sur les structures

EN 1992 Eurocode 2 Calcul des structures en béton

EN 1993 Eurocode 3 Calcul des structures en acier

EN 1994 Eurocode 4 Calcul des structures mixtes acier béton

EN 1995 Eurocode 5 Calcul des structures en bois

EN 1996 Eurocode 6 Calcul des structures en maçonnerie

EN 1997 Eurocode 7 Calcul géotechnique

EN 1998 Eurocode 8 Calcul des structures résistant aux séismes

EN 1999 Eurocode 9 Calcul des structures en alliage d'aluminium

- (8) Des sous-comités distincts, chargés des divers Eurocodes énumérés ci-dessus, ont été institués par le CEN/TC 250.

(9) Cette 4^{ème} partie de l'Eurocode 2 est publiée comme Prénorme Européenne (ENV) pendant une durée de trois ans.

- (10) La présente prénorme est destinée à *des applications expérimentales* ainsi qu'*au recueil d'observations*.

(11) Au terme d'une durée approximative de deux ans, les Membres du CEN seront invités à formaliser leurs commentaires en vue de leur prise en compte pour la définition des actions futures à entreprendre.

(12) Entre temps, il convient d'envoyer les réactions et les observations concernant cette Prénorme au Secrétariat du CEN/TC 250/SC 2 à l'adresse suivante :

Deutsches Institut für Normung e. v. (DIN)

Burggrafenstrasse 6

D-10787 Berlin

Tél. : (+49) 30 - 26 01 - 25 01

Fax : (+49) 30 - 26 01 - 12 31

Documents d'Application Nationale (DAN)

(13) Etant donné les responsabilités des autorités des Etats Membres en matière de sécurité, santé et autres points couverts par les exigences essentielles de la Directive Produits de Construction (DPC), des valeurs indicatives ont été attribuées à certains éléments de sécurité de l'ENV, valeurs qui sont identifiées par |_|. Il incombe aux autorités de chaque Etat Membre d'attribuer des valeurs définitives à ces éléments de sécurité.

(14) Certaines des Normes d'accompagnement européennes ou internationales ne seront peut-être pas disponibles au moment de la publication de cette Prénorme. Il est par conséquent prévu qu'un Document d'Application Nationale (DAN) donnant les valeurs définitives des éléments de sécurité, faisant référence aux normes d'accompagnement compatibles et précisant les directives nationales d'application de la Prénorme soit publié par chaque Etat Membre ou son organisme de Normalisation.

(15) Il est prévu que cette Prénorme soit utilisée conjointement avec le DAN valable dans le pays où le bâtiment ou l'ouvrage de génie civil sont situés.

Points spécifiques à cette Prénorme

(16) Le domaine d'application de l'Eurocode 2 est défini au paragraphe 1.1.1 de l'ENV 1992-1-1 et celui de cette Partie de l'Eurocode 2 au paragraphe 1.1.2. D'autres parties complémentaires de l'Eurocode 2, déjà publiées sous forme d'ENV, sont indiquées au paragraphe 1.1.3 de l'ENV 1992-1-1; elles couvrent des techniques ou applications additionnelles, en complément et en supplément à cette Partie.

(17) Lors de l'utilisation de cette Prénorme, il convient de respecter tout particulièrement les hypothèses et conditions indiquées au paragraphe 1.3 de l'ENV 1992-1-1.

(18) Les cinq chapitres de cette Prénorme sont complétés par trois annexes informatives. Ces annexes ont été constituées pour fournir des informations générales sur les matériaux et le comportement structural, informations générales qui peuvent être utilisées en l'absence d'information spécifique concernant les matériaux effectivement utilisés ou les conditions de service réelles.

(19) Comme cela est indiqué en (14) de l'avant-propos, il convient de se référer aux Documents d'Application Nationale (DAN) qui donneront les détails des normes d'accompagnement compatibles à utiliser. Pour cette partie de l'Eurocode 2, une attention particulière doit être apportée à la Prénorme approuvée ENV 206 (Béton - Performances, production et conformité).

Pour l'ENV 1992-4, les paragraphes additionnels ci-après s'appliquent.

(20) Cette partie 4 de l'Eurocode 2 complète l'ENV 1992-1-1 pour les aspects particuliers concernant les réservoirs et les silos destinés respectivement au stockage des liquides et au stockage des solides pulvérulents.

(21) La présentation et l'organisation de cette partie 4 correspondent à celles de l'ENV 1992-1-1. Toutefois la partie 4 contient des Principes et des Règles d'application spécifiques aux réservoirs et aux silos.

(22) Lorsqu'un paragraphe particulier de l'ENV 1992-1-1 n'est pas mentionné dans la présente ENV 1992-4, ce paragraphe de l'ENV 1992-1-1 est applicable pour autant qu'il en est jugé ainsi au cas par cas.

Certains Principes et Règles d'application de l'ENV 1992-1-1 sont modifiés ou remplacés dans cette partie 4, auquel cas les versions modifiées se substituent à celles de l'ENV 1992-1-1 pour le calcul des silos et des réservoirs.

Lorsqu'un Principe ou une Règle d'application de l'ENV 1992-1-1 est modifié ou remplacé, le nouveau numéro est obtenu par l'addition de 100 au numéro original. Lorsqu'un nouveau Principe ou une nouvelle Règle d'application est ajouté, ce nouvel élément est identifié par un numéro qui suit le dernier numéro du paragraphe concerné de l'ENV 1992-1-1, auquel il est ajouté 100.

Un sujet non abordé par l'ENV 1992-1-1 est introduit dans cette Partie au moyen d'un nouveau paragraphe. Le numéro de ce paragraphe suit celui de l'article de l'ENV 1992-1-1 le plus approprié.

(23) La numérotation des équations, des figures, des notes et des tableaux de cette Partie suit la même logique que celle adoptée en (22) ci-dessus pour les articles.

Introduction

1.1 Domaine d'application

Remplacer le paragraphe 1.1.2 de l'ENV 1992-1-1 par :

1.1.2 Domaine d'application de la Partie 4 de l'Eurocode 2

P(101) La partie 4 de l'Eurocode 2 couvre le calcul des structures en béton non armé ou faiblement armé, en béton armé ou en béton précontraint servant au stockage de liquides ou de solides pulvérulents.

P(102) La présente partie fournit les Principes et Règles d'application pour le calcul des éléments de structure qui supportent directement les liquides ou matières stockées (c'est-à-dire les parois des réservoirs ou des silos). En ce qui concerne les autres éléments qui servent de support à ces éléments primaires (tour supportant la cuve d'un château d'eau, par exemple), il convient de les calculer conformément aux dispositions de la partie 1, les valeurs de calcul des actions dues à la matière stockée étant cependant calculées selon les dispositions de la présente partie 4 de l'Eurocode 2.

P(103) La présente partie ne couvre pas :

- les structures destinées au stockage de matière aux très basses températures ;
- les structures destinées au stockage de matière aux très hautes températures ;
- les structures destinées au stockage de matières dangereuses dont la fuite constituerait un risque majeur pour la santé ou la sécurité ;
- le choix et la conception des revêtements ;
- le calcul relatif à la résistance au feu. Ceci est couvert par la partie 1-2 de l'Eurocode 2 ou par des dispositions nationales ;
- les composants en béton sans fines ou en béton cellulaire, ni ceux constitués de granulats lourds ou contenant des éléments de charpente métallique (voir l'Eurocode 4 pour les *structures* mixtes acier-béton) ;
- les réservoirs sous pression ;
- les structures flottantes ;
- les structures soumises à des actions sismiques significatives (le calcul pour les actions sismiques est traité dans l'Eurocode 8).

(104) On admet qu'il s'agit d'un stockage de matière à très basses températures lorsque la température de la matière stockée est inférieure ou égale à -20 °C. Pour le stockage de gaz de pétrole liquéfié, voir EN 26502-2.

(105) On admet qu'il s'agit d'un stockage de matière à très hautes températures lorsque la température de la matière stockée dépasse 200 °C.

(106) Pour le choix et la conception des revêtements, il convient de faire référence aux documents appropriés.

1.7 Symboles spéciaux employés dans la Partie 1 de l'Eurocode 2

Ajouter après 1.7.4 :

1.7.5 Symboles spéciaux employés dans la partie 4 de l'Eurocode 2

1.7.5.1 Symboles majuscules latins

E_r module d'élasticité effectif de la matière stockée

L_c longueur de la fissure en m

Q débit de fuite en m³/s

Q_o valeur d'exploitation de la charge imposée

Q_w charge imposée due au liquide stocké

R_{ax} facteur définissant le degré de bridage axial extérieur assuré par des éléments assemblés à l'élément considéré

R_m facteur définissant le degré de bridage des moments assuré par des éléments assemblés à l'élément considéré

T_1 température de la matière en contact avec la surface 1

T_2 température de la matière en contact avec la surface 2

T_m température moyenne de la paroi en régime permanent

1.7.5.2 Symboles minuscules latins

f_{ctx} résistance à la traction, quelle qu'en soit la définition

f_{ckT} résistance caractéristique à la compression du béton, modifiée pour tenir compte de la température T

h épaisseur de paroi en m

w_{eff} ouverture de fissure effective en m

1.7.5.3 Symboles grecs

α_T coefficient tenant compte de l'humidité dans la masse du béton

α_1 résistance thermique au niveau de la surface 1

α_2 résistance thermique au niveau de la surface 2

γ_w coefficient partiel de sécurité pour la charge due au liquide stocké

Δp perte de charge au travers de l'élément en MPa

ΔT_{ss} différence de température en régime permanent (stabilisé)

ε_{av} déformation moyenne de l'élément

ε_{az} déformation réelle au niveau z

- ε_{iz} déformation intrinsèque imposée au niveau z
- ε_{Tr} déformation thermique transitoire
- ε_{Th} déformation thermique non gênée du béton s
- λ_c conductivité du béton ρ_f
- ρ_f poids volumique de la matière stockée, en kN/m^3
- ν_f coefficient de Poisson de la matière stockée
- σ_2 contrainte verticale dans la matière stockée en kN/m^2
- η viscosité dynamique du liquide en kg/ms

2 Bases du calcul

2.2 Définitions et classifications

2.2.2 Actions

2.2.2.3 Valeurs représentatives des actions variables

Remplacer ce paragraphe par :

P(101) La valeur représentative principale est la valeur caractéristique Q_k . La valeur représentative correspondant à la quantité spécifiée de matière pour laquelle la structure est conçue devrait plus justement être désignée par "valeur d'exploitation", Q_o , mais par commodité, on utilisera le symbole Q_k pour désigner cette valeur.

(102) Dans un réservoir, lorsque le niveau maximal de liquide peut être clairement défini et que le poids volumique effectif de celui-ci (compte tenu de tout solide en suspension) ne variera pas de manière significative, un coefficient de sécurité γ_w plus faible que celui du Tableau 2.2 de l'ENV 1992-1-1 peut être utilisé pour la valeur caractéristique de l'action due au liquide stocké, Q_w .

(103) Sauf indication contraire, il convient de prendre pour les valeurs de ψ_0 , ψ_1 et ψ_2 appliquées à la charge d'exploitation une valeur égale à 1,0.

2.3 Exigences de calcul

2.3.1 Généralités

Ajouter après le Principe P(4) :

(105) Les situations de projet à considérer doivent de préférence satisfaire l'ENV 1991-4, article 3. Pour les silos et les réservoirs en béton, les situations de projet à considérer peuvent être les suivantes :

- conditions d'exploitation, avec cycles de vidange et de remplissage ;
- explosions dues à la poussière ;
- effets thermiques causés par la matière stockée ou la température ambiante par exemple ;
- déformations imposées.

2.3.2 Etats-limites ultimes

2.3.2.2 Combinaisons d'actions

Ajouter une note sous le Tableau 2.1 de l'ENV 1992-1-1.

NOTE Lorsque γ_w est utilisé pour l'une des actions variables, on substitue à $\gamma_Q Q_k$ la valeur correspondante de $\gamma_w Q_w$.

Remplacer les règles d'application (5) à (8) par :

(105) Des valeurs caractéristiques adéquates des actions, de même que des combinaisons adéquates d'actions sont données dans l'Eurocode 1 partie 4 : Actions dans les silos et réservoirs.

2.3.3 Coefficients de sécurité partiels pour les états-limites ultimes

2.3.3.1 Coefficients partiels concernant les actions sur les structures

Remplacer le Tableau 2.2 par :

Tableau 2.102 – Coefficients partiels pour les actions dans les silos et réservoirs dans les situations de calcul durables et transitoires

	Actions permanentes γ_G	Actions variables, cas général γ_Q	Actions variables dues au liquide stocké γ_w	Précontrainte γ_p
Effet favorable	[1,0]*	**	**	*** [0,9] ou [1,0]
Effet défavorable	[1,35]*	[1,5]	[1,2] ¹⁾	[1,2] ou [1,0]

* Se reporter également aux alinéas (3) du paragraphe 2.3.3.1 de la Partie 1 et (109) ci-dessous.
 ** Voir l'Eurocode 1; dans les cas courants, $\gamma_{Q,inf} = 0$.
 *** Voir les articles correspondants.
 1) Couvre les incertitudes du modèle, voir ENV 1991-1, article 9 et annexe A.

Remplacer la Règle d'application (8) par :

(108) En adoptant les valeurs de γ données par le Tableau 2.102, on peut remplacer l'expression (2.7(a)) par celles des expressions suivantes qui donnent l'effet le plus défavorable :

— situations de calcul avec une seule action variable $Q_{k,1}$ ou Q_w :

$$\sum \gamma_{G,j} G_{k,j} + 1,5 Q_{k,1} \text{ ou } \boxed{1,2} Q_w \quad (2.108(a))$$

— situations de calcul avec deux actions variables ou plus :

$$\sum \gamma_{G,j} G_{k,j} + 1,35 \sum_{i \geq 1} Q_{k,i} + \boxed{1,2} Q_w \quad (2.108(b))$$

Il convient de n'utiliser les équations (2.108(a)) et (2.108(b)) que si les conditions relatives à l'action Q_w données en 2.2.2.3 (102) sont satisfaites. Dans le cas contraire, il convient d'appliquer à Q_w le coefficient partiel de sécurité $\gamma_Q = 1,5$.

(109) Les actions résultant du sol ou de l'eau dans le sol sont traitées comme des actions permanentes; il convient de les déterminer conformément à l'Eurocode 7. Il convient par ailleurs de considérer comme des actions variables les actions dues à la matière stockée dans les silos.

(110) Il convient de noter que, lorsque des remblais sont installés le long des parois extérieures de la structure, la sécurité doit être vérifiée à la fois avec et sans le remblai.

2.3.4 Etats-limites de service

Remplacer la Règle d'application (7) par :

(107) Lorsqu'on considère des actions autres que les actions environnementales (vent, neige température etc...), la combinaison rare peut être simplifiée pour donner les expressions suivantes, qui peuvent également être utilisées en substitution à la combinaison fréquente :

— situations de calcul avec une seule action variable, $Q_{k,1}$

$$\sum G_{k,j} (+P) + Q_{k,1} \quad (2.109(d))$$

— situations de calcul avec deux actions variables $Q_{k,i}$ ou plus

$$\sum G_{k,j} (+P) + \left| 1,0 \right| \cdot \sum Q_{k,i} \quad (2.109(e))$$

L'expression à considérer est celle conduisant à la valeur la plus défavorable.

Ajouter après le principe P(8) :

(109) Les critères d'acceptation des réservoirs peuvent inclure le débit maximal de fuite.

2.5 Analyse

2.5.1 Dispositions générales

2.5.1.1 Généralités

Ajouter après la Règle d'application (6) :

P(107) Il doit être tenu compte des effets de l'interaction sol-structure lorsque ceux-ci sont significatifs.

Ajouter après 2.5.5 :

2.5.6 Détermination des effets de la température

2.5.6.1 Généralités

(101) L'utilisation de méthodes basées sur l'hypothèse d'un comportement structural élastique convient généralement. Il y a toutefois lieu de tenir compte des effets du fluage, du retrait et de la fissuration lorsque ceux-ci sont susceptibles d'être significatifs.

(102) Des analyses rigoureuses peuvent être réalisées en utilisant l'équation (2.22) du paragraphe 2.5.5.1 de l'ENV 1992-1-1. Il convient de noter qu'il sera également nécessaire d'introduire des conditions de compatibilité et/ou d'équilibre pour aboutir à une solution (dans un élément de section uniforme, totalement bridé, par exemple, $\varepsilon_{\text{tot}}(t, t_0)$ doit être égal à zéro pour toutes les valeurs de t).

(103) Dans de nombreux cas, une analyse élastique réalisée sur la base du module d'élasticité effectif du béton, ajusté pour tenir compte des effets du fluage conformément à l'équation (2.24) en 2.5.5.1 (12) de l'ENV 1992-1-1, sera suffisamment précise.

(104) Lorsqu'un élément est soumis à des températures différentes sur ses faces opposées, la différence de température au travers de la paroi en régime permanent est donnée par l'équation (2.105) ci-après (voir Figure 2.106) :

$$\Delta T_{ss} = \frac{(h / \lambda_c)}{\alpha_1 + (h / \lambda_c) + \alpha_2} (T_2 - T_1) \quad (2.125)$$

avec

ΔT_{ss} différence de température en régime permanent ;

α_1 résistance thermique au niveau la surface 1. En l'absence de données spécifiques pour la situation considérée, les valeurs suivantes peuvent être adoptées pour α_1 :

0.005 m² °C/W pour les liquides ;

0.110 m² °C/W pour les matières pulvérulentes ;

0.060 m² °C/W pour l'atmosphère ambiante (valeur susceptible d'être affectée de manière significative par le vent).

α_2 résistance thermique au niveau de la surface 2 (valeurs comme pour α_1) ;

h épaisseur de paroi en m ;

λ_c conductivité du béton, qui peut être prise égale à 1,75 W/m°C en l'absence de données plus précises ;

T_1 température de la matière en contact avec la surface 1 ;

T_2 température de la matière en contact avec la surface 2 ; T_2 est supérieure à T_1 .

La température moyenne de la paroi en régime permanent peut être prise égale à :

$$T_m = T_1 + \left(0,5 + \frac{\lambda_c \alpha_1}{h} \right) \Delta T_{ss} \quad (2.126)$$

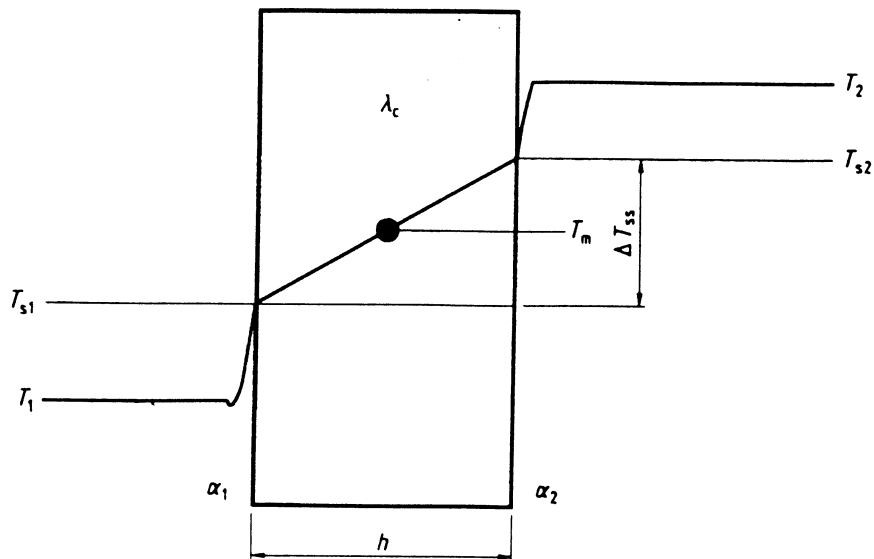


Figure 2.106 – Schéma de l'équilibre thermique dans une paroi

Dans la Figure 2.106 :

$$\frac{T_2 - T_1}{(\alpha_1 + (h / \lambda_c) + \alpha_2)} = \frac{T_2 - T_{s2}}{\alpha_2} = \frac{\Delta T_{ss}}{(h / \lambda_c)} = \frac{T_{s1} - T_1}{\alpha_1} \quad (2.127)$$

(105) Lorsque les températures moyennes d'éléments différents d'une même structure, assemblés de manière monolithique, diffèrent, il peut se produire des effets significatifs dus au bridage de certains éléments de structure par d'autres. Lorsqu'ils sont significatifs, il convient d'en tenir compte.

(106) Dans les silos, des gradients de température élevés peuvent se produire lorsque le matériau stocké soit subit un auto-échauffement, soit est placé dans le silo à température élevée. Dans ce cas, il sera nécessaire de calculer les gradients de température résultants ainsi que les forces internes et moments induits. Deux situations peuvent devoir être considérées :

- gradients de température élevés dans les parois au-dessus du matériau en vrac du fait de la présence d'air chaud dans un silo pratiquement vide ;
- gradients de température réduits dans les parois du fait de l'effet d'isolation thermique créé par le matériau en vrac dans un silo pratiquement plein.

(107) Une augmentation des efforts de traction et des moments associés peut également se produire lorsqu'une chute de la température à l'extérieur du silo conduit au resserrement des parois du silo autour de la matière ensilée. Ces efforts et ces moments peuvent se calculer en estimant le module d'élasticité effectif de la matière ensilée à l'aide de la relation approchée :

$$E_r = \frac{3,09 \rho_r^{1,5} \sigma_z}{(1 - \nu_r)} \quad (2.128)$$

avec

E_r module d'élasticité effectif de la matière stockée ;

ρ_r poids volumique de la matière stockée, en kN/m^3 ;

ν_r coefficient de Poisson de la matière stockée ;

σ_z contrainte verticale dans la matière stockée, en kN/m².

3 Propriétés des matériaux

3.1 Béton

3.1.2 Béton de masse volumique normale

3.1.2.5.4 Coefficient de dilatation thermique

Remplacer le principe P(1) par :

(101) Les coefficients de dilatation thermique du béton diffèrent considérablement selon la nature des granulats et l'humidité du béton. En l'absence d'informations issues d'essais sur le béton devant réellement être utilisé dans l'ouvrage, on peut adopter une valeur de $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$.

3.1.2.5.5 Fluage et retrait

Ajouter après la Règle d'application (5) :

(106) Lorsque les éléments sont exposés à des températures élevées ($> 40^{\circ}\text{C}$) pendant des périodes importantes, le comportement au fluage est modifié de manière substantielle. Lorsque cette modification risque d'être significative, il convient de manière générale d'obtenir des données adéquates pour les conditions de service particulières envisagées. L'annexe informative 105 donne des indications sur l'estimation des effets du fluage aux températures élevées.

Ajouter après 3.1.2.5.5 :

3.1.2.5.6 Chaleur massique du béton

(101) Pour le calcul, la chaleur massique du béton de masse volumique normale peut être prise égale à 1 000 J/kg^{°C}.

3.1.2.6 Evolution de la chaleur d'hydratation et de la température

(101) On obtiendra généralement les caractéristiques d'évolution de la chaleur d'hydratation pour un ciment particulier à partir d'essais. Il convient alors de déterminer l'évolution réelle en tenant compte des conditions attendues pendant le jeune âge de l'élément (cure, conditions ambiantes par exemple).

4 Dimensionnement et calcul des sections

4.1 Exigences de durabilité

Ajouter après 4.1.5 :

4.1.6 Abrasion

4.1.6.1 Généralités

(101) L'abrasion de la face interne des parois d'un silo peut provoquer la pollution de la matière stockée ou conduire à une réduction significative de l'enrobage des armatures. Trois mécanismes d'abrasion peuvent se produire :

- attaque mécanique liée aux processus de remplissage et de vidange ;
- attaque physique liée à l'érosion et à la corrosion se produisant avec les variations de température et d'humidité ;

— attaque chimique liée à la réaction entre le béton et le matériau stocké.

(102) Il convient de mettre en oeuvre des mesures adaptées pour assurer que les éléments soumis à l'abrasion resteront aptes à l'emploi pendant la durée de vie prévue au projet.

4.1.7 Surfaces des ouvrages destinés au stockage de l'eau potable

(101) Il convient d'éviter l'utilisation de toute matière organique, dans le béton ou dans tout revêtement de surface appliqué au béton, qui pourrait conduire à une croissance bactérienne ou à l'apparition de moisissures. Il convient de se référer aux documents concernés.

4.2 Données du projet

4.2.1 Béton

Ajouter après 4.2.1.4 :

4.2.1.5 Effets de la température dus à l'hydratation du ciment

(101) Il convient, à partir de la formulation du béton, de la nature du coffrage et des conditions ambiantes, d'établir la valeur de l'augmentation maximale de la température et le moment où celle-ci se produit après le bétonnage.

4.3 Etats-limites ultimes

4.3.2 Sollicitation d'effort tranchant

4.3.2.1 Généralités

Ajouter après la Règle d'application (7) :

(108) Aucune disposition particulière n'est nécessaire en termes d'armatures d'effort tranchant au voisinage des angles des silos ou des cuves lorsque la résistance à l'effort tranchant est inférieure à la valeur donnée par l'équation (4.18) de l'ENV 1992-1-1.

4.3.2.4 Eléments avec armatures d'effort tranchant

4.3.2.4.4 Méthode des bielles d'inclinaison variable

Remplacer la Règle d'application (8) par :

(108) Il convient de ne pas utiliser la méthode des bielles d'inclinaison variable dans des situations dans lesquelles l'élément considéré est soumis à un effort normal significatif (soit en traction soit en compression).

Ajouter après 4.3.5 :

4.3.6 Dimensionnement pour les explosions dues à la poussière

4.3.6.1 Généralités

P(101) Lorsque les silos sont conçus pour contenir des matériaux susceptibles de poser un risque d'explosion du fait de la poussière, l'ouvrage doit soit être dimensionné pour résister aux pressions maximales attendues, soit être équipé d'un système de décharge adéquat qui réduira la pression à un niveau supportable.

P(102) La projection de flammes par les conduites d'évacuation ne doit pas porter atteinte à l'environnement ni entraîner des explosions dans d'autres parties du silo. Les risques pour les personnes du fait de la projection de verre et d'autres débris doivent être limités au maximum.

(103) Il convient de faire déboucher les événements de décharge directement à l'air libre au moyen de conduites d'évacuation, qui réduisent la surpression d'explosion.

- (104) Les systèmes de décharge doivent de préférence s'ouvrir à basse pression et avoir une inertie faible.
- (105) Il convient de traiter les actions dues à l'explosion provoquée par la poussière comme des actions accidentelles.

4.3.6.2 Calcul des éléments de structure

P(101) Tous les éléments de structure doivent être dimensionnés pour résister aux actions appropriées résultant d'une explosion, qu'il convient de considérer comme une action accidentelle (voir 2.3.1 et 2.3.2.2 de cette partie 4).

(102) Il convient de prendre dans les documents adéquats les valeurs indicatives de la vitesse de montée en pression et des surpressions maximales pour différents types de matières stockées.

(103) La pression maximale due à l'explosion se produit dans les trémies vides; néanmoins, la pression dans une trémie partiellement remplie, combinée à la pression correspondante de la matière en vrac, peut conduire à une condition de calcul plus critique.

(104) Lorsque des forces d'inertie apparaissent sous l'effet d'une décharge brutale de gaz, suivie par le refroidissement des fumées chaudes, la pression peut devenir inférieure à la pression atmosphérique. Il convient d'en tenir compte lors du dimensionnement de l'enceinte et des éléments du circuit d'acheminement des matériaux.

(105) Il convient de protéger les éléments formant le dispositif de décharge contre le risque d'arrachement qui viendrait s'ajouter à celui de la projection des débris.

(106) Lors de la chute de pression due à la décharge, des forces de réaction apparaissent; il convient d'en tenir compte dans le dimensionnement des éléments de structure.

(107) Il convient de demander l'aide de spécialistes lorsque des installations complexes sont envisagées ou que le risque de blessures en cas d'explosion serait élevé.

4.4 Etats-limites de service

4.4.2 Etats-limites de fissuration

4.4.2.1 Considérations générales

Ajouter après le principe P(9) :

(110) Il est commode de classer les réservoirs en fonction du degré requis de protection vis-à-vis des fuites. Le Tableau 4.118 donne cette classification.

Tableau 4.118 – Classification des réservoirs

Classe	Exigences en matière de fuite
0	Un certain débit de fuite admissible, ou fuite de liquides sans conséquence.
1	Etanchéité globale. Fuites à limiter à une valeur minimale. Taches en surface et plaques d'humidité admises.
2	Etanchéité locale. Fuites généralement non admises. L'aspect ne doit pas être altéré par des taches.

(111) Il convient de s'accorder avec le prescripteur sur des valeurs limites de fissuration adaptées en fonction de la classification de l'élément considéré, considération faite de la fonction que l'ouvrage doit remplir.

En l'absence d'exigences plus spécifiques, on peut adopter ce qui suit.

Classe 0 – les dispositions du paragraphe 4.4.2 de l'ENV 1992-1-1 peuvent être adoptées.

Classe 1 – en ce qui concerne les fissures dont on peut s'attendre à ce qu'elles traversent la section sur toute son épaisseur, il convient d'en limiter l'ouverture à 0,2 mm dès lors qu'on peut escompter une auto-réparation

des fissures, ou à $[0,1]$ mm en l'absence d'auto-réparation. Les dispositions du paragraphe 4.4.2 de l'ENV 1992-1-1 s'appliquent lorsque la section n'est pas fissurée sur toute son épaisseur et que les conditions indiquées en (112) et (113) ci-après sont satisfaites.

Classe 2 – il convient d'éviter les fissures dont on peut s'attendre à ce qu'elles traversent la section sur toute son épaisseur, sauf si des mesures adaptées ont été prises - telles que mise en oeuvre d'un revêtement ou de joints d'étanchéité préformés - afin d'éviter les fuites.

(112) Pour avoir l'assurance que les fissures ne traversent pas la section sur toute son épaisseur, il convient que la valeur de calcul de la hauteur de la zone comprimée calculée pour la combinaison d'actions la plus critique, effets de la température et du retrait compris, soit au moins égale à $[50]$ mm. Les effets des actions peuvent être calculés en supposant que le matériau a un comportement linéaire élastique. Il convient de calculer les contraintes résultantes dans la section en supposant que la résistance à la traction du béton est nulle.

(113) Lorsqu'il peut se former une fissure sur une face de l'élément pour une combinaison d'actions donnée et sur la face opposée pour une autre, alors il convient de considérer les fissures comme traversant toute l'épaisseur de la section sauf si une épaisseur de béton d'au moins $[50]$ mm demeure en compression pour toutes les combinaisons d'actions appropriées.

(114) On peut supposer que les fuites au travers d'une fissure sont proportionnelles au cube de son ouverture. L'annexe informative 107 de cette partie 4 donne des indications sur la prévision des fuites au travers des fissures.

(115) On peut supposer qu'il y a auto-réparation des fissures lorsque les éléments sont constitués d'un béton d'une composition particulière non soumis à des modifications significatives de charge ou de température en cours de service. En l'absence d'informations plus fiables, on peut admettre qu'il y a auto-réparation lorsque l'ordre de grandeur des déformations sur un an pour une section est inférieur à 150×10^{-6} .

(116) Si l'auto-réparation est improbable, toute fissure traversant la section sur toute son épaisseur, et quelle que soit son ouverture, peut conduire à des fuites.

(117) Les silos contenant de la matière sèche peuvent généralement être prévus de Classe 0 ; l'utilisation d'une classe supérieure peut toutefois se justifier lorsque la matière stockée est particulièrement sensible à l'humidité.

(118) Si du béton non armé ou faiblement armé est soumis à des contraintes conduisant à l'apparition de fissures, l'ouverture de celles-ci n'est pas contrôlable. Il convient par conséquent de limiter l'emploi du béton non armé ou faiblement armé.

(119) Il convient de porter une attention particulière au cas des éléments de structure soumis à des contraintes de traction dues au retrait gêné ou aux déformations thermiques.

4.4.2.3 Contrôle de la fissuration sans calcul direct

Remplacer la Règle d'application (2) par :

(102) Lorsque le pourcentage minimal d'armatures indiqué au paragraphe 4.4.2.2 de l'ENV 1992-1-1 au moins est prévu, la limitation de l'ouverture des fissures aux valeurs appropriées compte tenu de la classe de l'élément (voir Tableau 4.118) et l'absence de fissuration non contrôlée entre barres espacées peuvent généralement être assurées en limitant soit l'espacement des barres soit leur diamètre. Les Figures 4.134(a) et 4.134(b) ou les Tableaux 4.115 et 4.116 ci-dessous peuvent être utilisés pour établir les valeurs maximales du diamètre des barres ou de leur espacement de manière à assurer le contrôle de l'ouverture des fissures dans les limites choisies. Il *convient* de noter que des ouvertures de fissures supérieures à celles calculées peuvent occasionnellement se produire.

Les Figures 4.134(a) et 4.134(b) et les Tableaux 4.115 et 4.116 sont basés sur la formule (4.80) de l'ouverture des fissures du paragraphe 4.4.2.4 de l'ENV 1992-1-1, à l'exception des déformations intrinsèques imposées pour lesquelles la déformation moyenne ε_{sm} est calculée conformément à l'équation (4.184) de cette partie 4.

Les ouvertures de fissure ne dépasseront généralement pas les limites spécifiées pourvu que :

- dans le cas de fissures causées principalement par un bridage, les dimensions des barres données par la Figure 4.134(a) et le Tableau 4.115 ne soient pas dépassées, la contrainte de l'acier étant égale à la valeur obtenue immédiatement après *apparition de la première fissure* (c'est-à-dire que la contrainte est celle utilisée dans l'équation (4.78) de l'ENV 1992-1-1) ; et
- dans le cas de fissures causées principalement par les charges, les dispositions de la Figure 4.134(a) et du Tableau 4.115 ou celles de la Figure 4.134(b) et du Tableau 4.116 soient satisfaites.

Pour les sections en béton précontraint, les contraintes dans les armatures peuvent être calculées en considérant la précontrainte comme une force extérieure, sans tenir compte de la surtension dans les armatures de précontrainte dû au chargement.

Pour le béton armé, le diamètre maximal des barres donné par la Figure 4.134(a) ou le Tableau 4.115 peut être modifié comme suit :

pour les fissures causées principalement par un bridage :

$$\phi_s = \phi_s^* \frac{f_{ctm} h}{25 (h-d)} \geq \frac{\phi_s^* f_{ctm}}{2,5}$$

pour les fissures causées principalement par les charges :

$$\phi_s = \phi_s^* \frac{h}{10 (h-d)} \geq \phi_s^*$$

où

ϕ_s est le diamètre maximal ajusté des barres ;

ϕ_s^* est le diamètre maximal des barres obtenu à l'aide de la Figure 4.134(a) ou du Tableau 4.115 ;

h est la hauteur hors tout ou, dans le cas d'une paroi, son épaisseur ;

d est la hauteur utile de l'élément.

(103) Sur les Figures 4.134(a) et 4.134(b) et dans les Tableaux 4.115 et 4.116 respectivement, il convient d'évaluer les contraintes dans l'acier sur la base de la combinaison quasi-permanente des actions dans le cas du béton armé et sur la base de la combinaison fréquente d'actions et de l'estimation adéquate de la précontrainte dans le cas du béton précontraint. Sur la Figure 4.134(a) et dans le Tableau 4.115, si les contraintes sont dues principalement au bridage, alors il convient d'utiliser une contrainte dans l'acier égale au σ_s de l'équation (4.78) de l'ENV 1992-1-1.

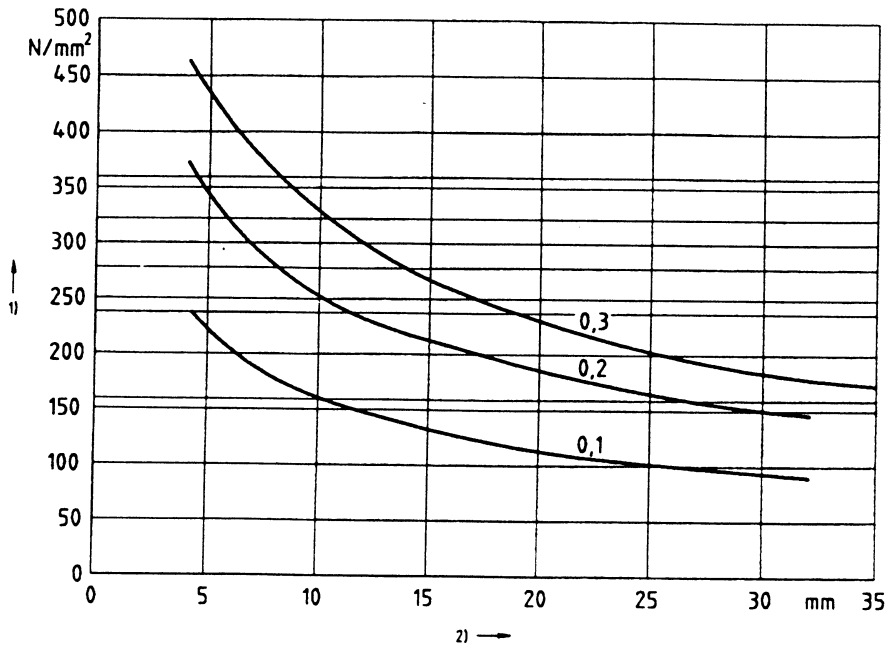
4.4.2.4 Calcul des ouvertures de fissures

Ajouter après la Règle d'application (8) :

(109) Pour les éléments soumis principalement à des déformations intrinsèques imposées (contraction thermique ou retrait, par exemple), la dernière phrase du paragraphe 4.4.2.4(2) de l'ENV 1992-1-1 ne s'applique pas. Dans ce cas, il convient de calculer la déformation moyenne, ε_{sm} , à l'aide de l'équation (4.184) plutôt qu'à l'aide de l'équation (4.81) de l'ENV 1992-1-1 :

$$\varepsilon_{sm} = 0,6 k_c k_{ct,ef} \left(\frac{A_{ct}}{E_s A_s} + \frac{1}{E_c} \right) \quad (4.184)$$

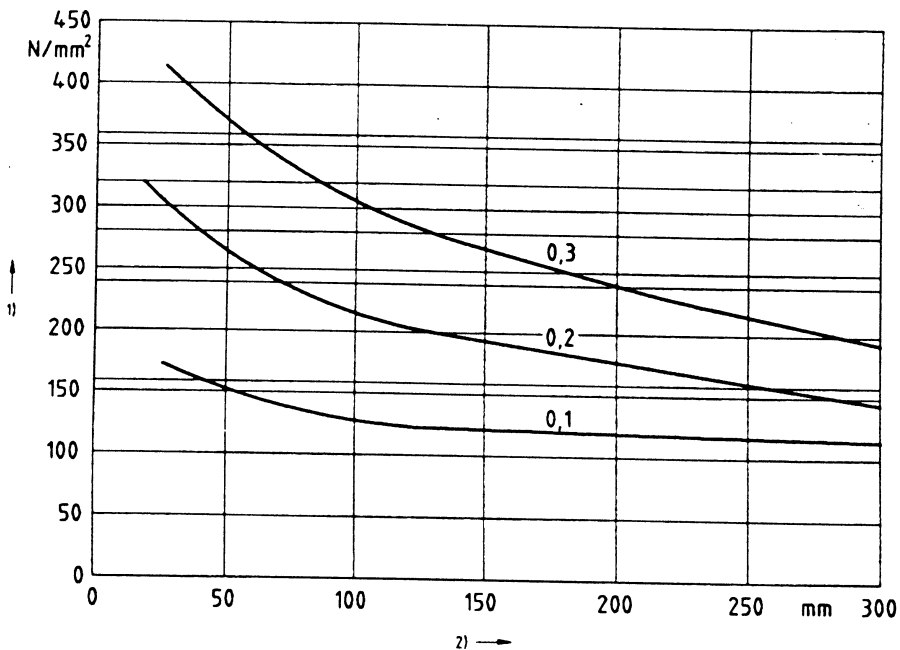
Les définitions des symboles sont celles du paragraphe 4.4.2.2 de l'ENV 1992-1-1. Il n'est pas nécessaire d'adopter d'autres mesures supplémentaires pour traiter des effets à long terme.



Légende

- 1) Contrainte dans les armatures σ_s
- 2) Diamètre maximal des armatures ϕ_s^*

Figure 4.134(a) – Diamètre maximal des armatures pour le contrôle de la fissuration



Légende

- 1) Contrainte dans les armatures σ_s
- 2) Espacement maximal des armatures s

Figure 4.134(b) – Espacement maximal des armatures pour le contrôle de la fissuration

Tableau 4.115 – Diamètre maximal ϕ_s^* des armatures dans le cas de barres à haute adhérence

Contrainte dans l'acier (MPa)	Diamètre maximal des armatures (mm) pour $w_k =$		
	0,3 mm	0,2 mm	0,1 mm
160	32	25	10
200	25	16	6
240	18	12	4
280	14	8	–
320	10	6	–
360	8	4	–
400	6	–	–
450	4	–	–

Tableau 4.116 – Espacement maximal des armatures s dans le cas des barres à haute adhérence

Contrainte dans l'acier (MPa)	Espacement maximal des armatures (mm) pour $w_k =$		
	0,3 mm	0,2 mm	0,1 mm
160	> 300	220	40
200	280	125	–
240	190	70	–
280	125	40	–
320	80	–	–
360	50	–	–
400	30	–	–

Ajouter après 4.4.2.4 :

4.4.2.5 Contrôle de la fissuration due à des déformations gênées

(101) Lorsqu'il est souhaitable de limiter la formation de fissures du fait de déformations imposées gênées dues aux variations de température ou au retrait, ceci peut être atteint pour les structures de la Classe 1 (voir Tableau 4.118) en s'assurant que les contraintes de traction résultantes ne dépassent pas la résistance à la traction $f_{ctk, 0,05}$ du béton et pour la classe 2, en s'assurant que la section de béton reste totalement comprimée. Ceci peut être obtenu :

- en limitant l'augmentation de température due à l'hydratation du ciment ;
- en supprimant ou réduisant le bridage ;
- en réduisant le retrait du béton ;
- en utilisant du béton présentant un coefficient de dilatation thermique faible ;
- en utilisant du béton avec une capacité de déformation en traction élevée (structures de classe 1 uniquement) ;
- en appliquant une précontrainte.

(102) Il sera généralement suffisamment précis de calculer les contraintes en supposant que le béton a un comportement élastique et en tenant compte des effets du fluage par l'utilisation du module d'élasticité effectif du béton. L'annexe informative 106 fournit une méthode simplifiée, qui peut être utilisée à défaut d'un calcul plus rigoureux, pour l'évaluation des contraintes dans des éléments en béton soumis à un bridage.

5 Dispositions constructives

5.3 Unités de précontrainte

5.3.3 Espacement horizontal et vertical

5.3.3.2 Précontrainte par post-tension

Ajouter après la Règle d'application (1) :

(102) Dans le cas de cuves circulaires avec précontrainte intérieure à la section de béton, le centre de gravité théorique des câbles horizontaux est généralement situé dans le tiers extérieur de la paroi. Lorsque les dispositions relatives à l'enrobage rendent ceci impossible, cette recommandation peut être assouplie, pourvu que le conduit demeure dans la moitié extérieure de la paroi.

(103) Il convient de limiter le diamètre des conduits à l'intérieur des parois à 1/5 de leur épaisseur.

(104) La force de précontrainte doit de préférence être distribuée de manière aussi uniforme que possible à l'intérieur du voile. Il convient de disposer les ancrages ou les butées de manière à réduire les risques de distribution non uniforme de la force de précontrainte, sauf si des dispositions spécifiques sont prises pour tenir compte de ces effets.

(105) Il convient généralement de ne pas utiliser d'armatures de précontrainte non adhérentes pour la précontrainte verticale dans les ouvrages soumis à des températures élevées. Si des armatures non adhérentes sont néanmoins utilisées, il convient de prévoir des dispositifs afin de pouvoir vérifier la présence de graisse et renouveler celle-ci si nécessaire.

5.3.4 Ancrages et coupleurs pour les câbles de précontrainte

Ajouter après la Règle d'application (5) :

(106) Il convient d'éviter les ancrages situés côté intérieur des cuves à cause des risques de corrosion.

5.4 Eléments structuraux

5.4.7 Voiles de béton armé

Ajouter après 5.4.7.4 :

5.4.7.5 Jonction des parois aux angles

(101) Lorsque la jonction des parois aux angles est monolithique et que celles-ci sont soumises à des moments et à des efforts tranchants tendant à ouvrir l'angle (i.e. les faces intérieures des voiles sont tendues), une attention particulière doit être apportée aux détails des armatures pour s'assurer que les efforts de traction en diagonale sont correctement pris en compte. L'utilisation de systèmes de bielles et de tirants telle qu'indiquée au paragraphe 2.5.3.6.3 de l'ENV 1992-1-1 constitue une approche adéquate pour le calcul.

5.4.7.6 Joints de dilatation

(101) Il convient de doter les réservoirs de joints de dilatation dès lors que des moyens efficaces et économiques ne peuvent être mis en oeuvre par ailleurs pour limiter la fissuration. La stratégie à adopter dépendra des conditions de service de la structure et du niveau de risque de fuite acceptable. Il convient de noter que le bon fonctionnement des joints nécessite qu'ils soient correctement réalisés. Il convient de noter par ailleurs que les produits d'étanchéité pour joints ont fréquemment une durée de vie considérablement plus courte que la durée de service de la structure ; il convient par conséquent, dans ce cas, de réaliser les joints de manière à ce qu'ils puissent être contrôlés et réparés.

(102) Deux options principales sont possibles :

- a) bridage total : Dans ce cas, aucun joint de dilatation n'est prévu et les ouvertures de fissure et leur espacement sont contrôlés par la mise en oeuvre d'armatures adéquates conformément aux dispositions du paragraphe 4.4.2 ;
- b) liberté de mouvement : La fissuration est contrôlée par la proximité des joints. Un pourcentage modéré d'armatures est prévu, suffisant pour transmettre les mouvements éventuels au joint adjacent. De préférence, aucune fissuration significative ne doit se produire entre les joints. Lorsque le bridage est assuré par le béton au-dessous de l'élément considéré, un joint glissant peut être utilisé pour s'affranchir du bridage ou le réduire.

Le Tableau 5.106 donne des recommandations concernant ces options.

Tableau 5.106 – Conception des joints pour le contrôle de la fissuration

Option	Méthode de contrôle	Espacement des joints de dilatation	Armatures
(a)	Continu – bridage total	Généralement, pas de joints, bien que des joints très espacés puissent être souhaitables lorsqu'on prévoit une plage de variation de température importante	Ferrailage conformément aux paragraphes 4.3 et 4.4.2
(b)	Joints de dilatation rapprochés liberté de mouvement maximale	Joints de structure à plus de $\lfloor 5 \text{ m} \rfloor$ ou $\lfloor 1,5 \rfloor$ fois la hauteur de la paroi	Ferrailage conformément au paragraphe 4.3, mais pas moins que le minimum indiqué en 5.4.7.2 à 5.4.7.4.

(103) Un joint de structure est un joint pour lequel il y a discontinuité totale à la fois au niveau des armatures et du béton. Dans les réservoirs, les joints d'étanchéité préformés et l'obtention d'une étanchéité adéquate du joint sont essentiels.

5.4.9 Voiles précontraints

5.4.9.1 Section minimale d'acier

(101) Si les dispositions des paragraphes 4.4.2.1 (112) et (113) ne sont pas satisfaites, il convient de prévoir un pourcentage minimal d'armatures dans les deux directions et sur chacune des faces du voile, indépendamment de l'épaisseur de celui-ci, de telle sorte que la section minimale correspondante satisfasse :

$$A_s \geq \lfloor 300 \rfloor \text{ mm}^2/\text{m} \geq \lfloor 0,001 \rfloor \cdot A_c \quad (5.123)$$

où

A_c désigne l'aire totale de la section transversale du béton.

(102) Dans les cas où il n'y a pas de précontrainte verticale (ou pas de précontrainte inclinée dans les voiles inclinés), il convient de prévoir des armatures verticales (ou inclinées), sur la base du calcul de béton armé, de manière à compenser les efforts internes. Ces armatures doivent de préférence satisfaire également les critères ci-après :

— espacement maximal des barres: $s \leq \lfloor 200 \rfloor$ mm (5.124) ;

— pourcentage : $A_s \geq \lfloor 0,25 \% \rfloor$ en volume (5.125) ;

$$\text{— section : } A_s \geq |25 \%| \cdot A_{st} \quad (5.126).$$

où

A_{st} est l'aire de la section transversale des armatures transversales qui seraient installées en l'absence de précontrainte.

(103) Il convient généralement que l'épaisseur des voiles formant les côtés des réservoirs ou des cuves ne soit pas inférieure à 120 mm pour la Classe 0 ou 150 mm pour les Classes 1 ou 2. De préférence, l'épaisseur des voiles réalisés à l'aide de coffrages glissants ne doit pas être inférieure à 150 mm quelle que soit la classe, et les trous laissés par les barres de levage doivent être remplis avec un coulis de ciment.

Annexe (informative) 105

Effet de la température sur les propriétés du béton

A.105.1 Généralités

(101) La présente annexe traite des effets de l'exposition à long terme du béton à des températures comprises entre $- 20\text{ °C}$ et $+ 200\text{ °C}$ sur ses propriétés, à savoir résistance, raideur, fluage et déformation thermique transitoire.

(102) Dans tous les cas, les modifications des propriétés dépendent fortement du type de béton utilisé spécifiquement et la présente annexe ne fournit que des indications générales.

A.105.2 Propriétés des matériaux aux températures négatives

(101) Lorsque la température du béton est abaissée au-dessous de zéro, sa résistance mécanique et sa raideur augmentent. Cette augmentation dépend essentiellement de l'humidité du béton. L'augmentation de la résistance et de la raideur est d'autant plus importante que l'humidité est élevée.

(102) Le fait d'abaisser la température du béton à $- 20\text{ °C}$ conduit à une augmentation de la résistance à la compression :

- d'environ 5 MPa pour un béton partiellement sec ;
- d'environ 30 MPa pour un béton saturé.

(103) Les formules données au paragraphe 3.1.2.4(4) de l'ENV 1992-1-1 pour la résistance à la traction en fonction de la température peuvent être modifiées comme suit :

$$f_{ctx} = \alpha_T f_{ckT}^{2/3} \tag{A.105.1}$$

avec

f_{ctx} résistance à la traction, indépendamment de sa définition (voir Table A.105.1) ;

α_T coefficient tenant compte de l'humidité dans la masse du béton. Les valeurs de α_T sont données dans le Tableau A.105.1 ;

f_{ckT} résistance caractéristique à la compression du béton, modifiée pour tenir compte de la température conformément à (102) ci-dessus.

Tableau A.105.1 – Valeurs de α_T pour les bétons saturés et les bétons secs

Définition de la résistance à la traction f_{ctx}	Béton saturé	Béton conservé dans l'air
F_{ctm}	1,30	0,70
$F_{ctk, 0,05}$	0,56	0,30
$F_{ctk, 0,95}$	2,43	1,30

(104) Le fait d'abaisser la température du béton à $- 20\text{ °C}$ conduit à une augmentation du module d'élasticité :

- d'environ 2 000 MPa pour un béton partiellement sec ;
- d'environ 8 000 MPa pour un béton saturé.

(105) Aux températures négatives, on peut prendre pour le fluage une valeur égale à 60 % à 80 % de la valeur du fluage aux températures normales. Au-dessous de – 20 °C, on peut admettre que le fluage est négligeable.

A.105.3 Propriétés des matériaux aux températures élevées

(101) On peut généralement admettre que la résistance à la compression du béton n'est pas affectée par la température jusqu'à 200 °C.

(102) On peut admettre que la résistance à la traction du béton est indépendante de la température jusqu'à 50 °C. Au-delà, on peut admettre une diminution linéaire allant jusqu'à 20 % à une température de 200 °C.

(103) On peut admettre que le module d'élasticité du béton ne varie pas avec la température jusqu'à 50 °C. Au-delà, on peut admettre une diminution linéaire allant jusqu'à 20 % à une température de 200 °C.

(104) Dans le cas où le béton est chauffé avant chargement, on peut admettre que le coefficient de fluage, lorsque la température augmente au-delà d'une température normale (prise égale à 20 °C), est multiplié par le facteur approprié pris dans le Tableau A.105.2.

Tableau A.105.2 – Coefficients multiplicateurs des coefficients de fluage pour tenir compte de la température lorsque le béton est chauffé avant mise en charge

Température (°C)	Coefficient multiplicateur du coefficient de fluage
20	1,00
50	1,35
100	1,96
150	2,58
200	3,20

NOTE Note relative au Tableau A.1052 : Le tableau a été déduit du bulletin CEB n°208 et il concorde bien avec les coefficients multiplicateurs calculés sur la base d'une énergie d'activation de 8 kJ/mol pour le fluage.

(105) Lorsque les actions s'exercent pendant le chauffage du béton, il se produira des déformations, en excès de celles calculées à l'aide des coefficients multiplicateurs des coefficients de fluage donnés en (104) ci-dessus. Cette déformation excessive, la déformation thermique transitoire, est une déformation indépendante du temps, irrécupérable, qui se produit dans le béton chauffé sous contrainte. La déformation thermique transitoire maximale peut être calculée de manière approchée à l'aide de l'expression :

$$\varepsilon_{Tr} = k \cdot \sigma_c \cdot \varepsilon_{Th} / f_{cm} \tag{A 105.2}$$

avec

k constante obtenue à partir d'essais. La valeur de k sera telle que $1,8 \leq k \leq 2,35$;

f_{cm} valeur moyenne de la résistance à la compression du béton ;

ε_{Tr} déformation thermique transitoire ;

ε_{Th} déformation thermique non gênée du béton (i.e variation de température multipliée par le coefficient de dilatation thermique) ;

σ_c contrainte de compression appliquée.

Annexe (Informative) 106

Calcul des déformations et des contraintes dans une section de béton non fissurée soumise à des déformations imposées gênées

A.106.1 Formules pour le calcul des contraintes et déformations

(101) La déformation à tout niveau d'une section est donnée par :

$$\varepsilon_{az} = (1 - R_{ax}) \varepsilon_{av} + (1 - R_m) (1/r) (z - z_c) \quad (\text{A } 106.1)$$

et la contrainte dans le béton peut être calculée à partir de :

$$\sigma_z = E_c (\varepsilon_{iz} - \varepsilon_{az}) \quad (\text{A } 106.2)$$

avec

R_{ax} facteur définissant le degré de bridage axial extérieur appliqué par des éléments assemblés à l'élément considéré ;

R_m facteur définissant le degré de bridage des moments assuré par les éléments assemblés à l'élément considéré. Dans les cas les plus courants, R_m peut être pris égal à 1,0 ;

ε_{av} déformation moyenne de l'élément ;

ε_{iz} déformation intrinsèque imposée au niveau z ;

ε_{az} déformation réelle au niveau z ;

z hauteur de la section z ;

z_c hauteur du centre de gravité de la section ;

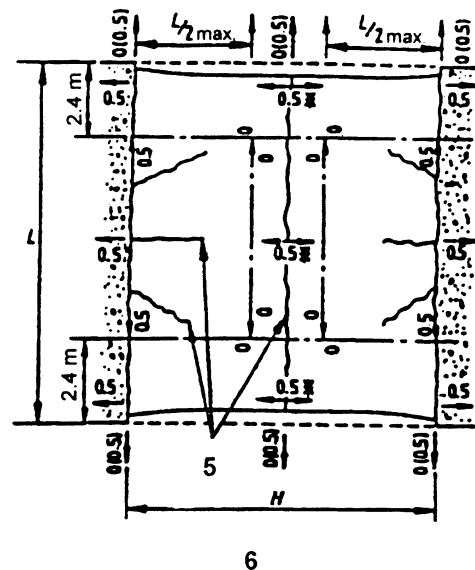
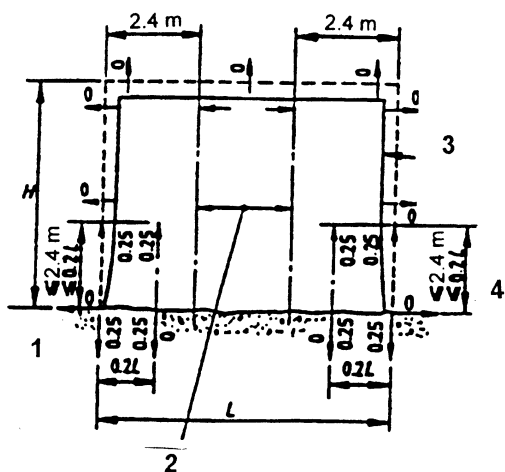
$1/r$ courbure.

A.106.2 Evaluation du bridage

(101) Les facteurs de bridage R_{ax} et R_m peuvent être calculés à partir de la connaissance des raideurs de l'élément considéré et des éléments assemblés à celui-ci. Alternativement, des valeurs pratiques du facteur de bridage axial peuvent être prises du Tableau A.106.1 et de la Figure A.106.1 pour des situations courantes. Dans de nombreux cas (voile coulé sur une dalle de fond existante lourde, par exemple), il est clair qu'aucune courbure significative ne pourra se produire et un facteur R_m de 1,0 sera adapté.

Tableau A.106.1 – Facteurs de bridage R_{ax} et R_m pour les parties centrales des voiles de la Figure A.106.1(a)

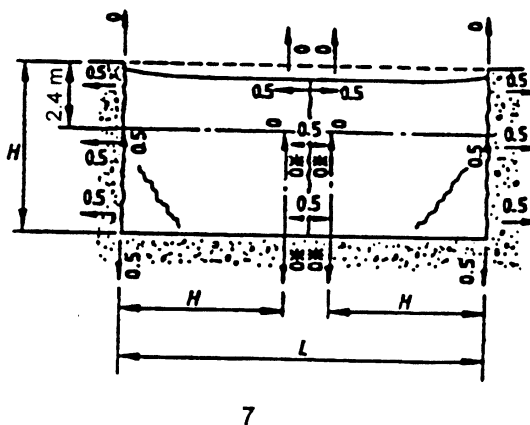
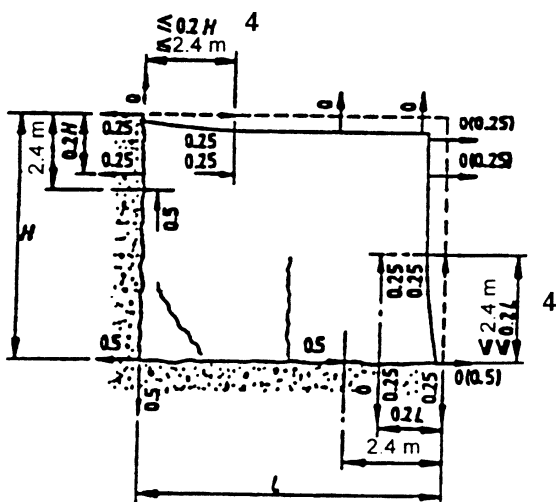
Rapport L/H (voir Figure A.106.1)	Facteurs de bridage à la base	Facteurs de bridage en tête
1	0,5	0
2	0,5	0
3	0,5	0,05
4	0,5	0,3
> 8	0,5	0,5



Voir Tableau A.106.1 pour cette zone centrale

(a) Voile sur dalle de fond

(b) Dalle horizontale entre éléments de bridage rigides



(c) Construction séquentielle de paroi de compartiment
 (avec joints de construction)

(d) Variante de construction de paroi de compartiment
 (avec joints de construction)

Légende

- 1 Facteurs de bridage vertical
- 2 Facteurs de bridage horizontal
- 3 Joints de dilatation ou joints de retrait
- 4 Si cette valeur est supérieure
- 5 Fissures initiales potentielles
- 6 Lorsque $H \leq L$, ce facteur vaut = $0,5 \left(1 - \frac{H}{L} \right)$
- 7 Lorsque $L \leq 2H$, ces facteurs de bridage valent = $0,5 \left(1 - \frac{H}{L} \right)$

Figure A.106.1 – Facteurs de bridage R_{ax} et R_m pour les parties centrales des voiles

Annexe (informative) 107

Calcul des débits de fuites au travers des fissures dans les réservoirs servant au stockage de liquides

A.107.1 Equation pour la prédiction des débits de fuites

(101) Les débits de fuites au travers d'une fissure peuvent être prédites par l'équation (A 107.1) :

$$Q = \frac{K}{\eta} w_{\text{eff}}^3 L_c \frac{\Delta p}{h} \text{ [m}^3 \text{ / s]} \quad (\text{A.107.1})$$

avec

Q débit de fuite en m^3/s ;

K coefficient dépendant des caractéristiques de surface de la fissure ;

η viscosité dynamique du liquide en kg/ms ;

w_{eff} ouverture de fissure effective en m ;

L_c longueur de la fissure en m ;

Δp perte de charge au travers de l'élément en Pa ;

h épaisseur de l'élément en m .

(102) L'ouverture effective de fissure, w_{eff} , peut être obtenue à l'aide de la relation ci-dessous :

$$w_{\text{eff}} = [2(w_i w_o)^2 / (w_i + w_o)]^{1/3} \quad (\text{A 107.2})$$

avec

w_o ouverture de fissure sur la face extérieure de l'élément ;

w_i ouverture de fissure sur la face intérieure de l'élément.

La valeur de K peut être prise égale à 1/50 pour les fissures sans auto-réparation. Pour les fissures dans l'eau avec auto-réparation et $w_{\text{eff}} \leq 0,2 \text{ mm}$, on peut admettre que K diminue depuis la valeur 1/50 pour tendre vers 0 à mesure que l'on se rapproche de $t = \infty$.