

Eurocode 2 : Calcul des structures en béton
et Document d'Application Nationale

Partie 1-5 : Règles générales — Structures précontraintes par armatures extérieures ou non adhérentes

E : Eurocode 2 : Design of concrete structures — Part 1-5 : General rules —
Structures with unbonded and external prestressing tendons

D : Eurocode 2 : Planung von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken —
Teil 1-5 : Allgemeine Regeln — Tragwerke mit Spannglieder ohne Verbund

Norme expérimentale

publiée par l'AFNOR en mai 1997.

Les observations relatives à la présente norme expérimentale doivent être
adressées à l'AFNOR avant le 31 décembre 1997.

Correspondance

Le présent document reproduit intégralement la prénorme européenne
ENV 1992-1-5:1994 et intègre les adaptations nationales relatives à cette ENV.

Analyse

Le présent document constitue un complément à l'ENV 1992-1-1 pour la
conception et le calcul des structures contenant des armatures de précon-
trainte non adhérentes et extérieures au béton. Il définit les bases de calcul, les
valeurs de calcul des propriétés des matériaux, les exigences de résistance,
d'aptitude au service et de durabilité des ouvrages. Il contient des règles rela-
tives au dimensionnement et au calcul des sections et propose des dispositions
constructives.

Descripteurs

Thésaurus International Technique : structure en béton, béton, armature de
précontrainte, conception, calcul, propriété mécanique, résistance des maté-
riels, dimension, section, règle de construction, contrôle de qualité, durabilité,
conditions d'exécution.

Modifications

Corrections

Éditée et diffusée par l'Association Française de Normalisation (AFNOR), Tour Europe 92049 Paris La Défense Cedex
Tél. : 01 42 91 55 55 — Tél. international : + 33 1 42 91 55 55



Membres de la commission de normalisation

Président : M R. LACROIX

Secrétariat : M BUI — SETRA

M	ACKER	LABORATOIRE CENTRAL DES PONTS ET CHAUSSEES
M	BAR	BUREAU DE NORMALISATION SOLS ET ROUTES
M	BOIS	INSPECTION GENERALE OUVRAGES D'ART
M	BOLVIN	EDF — SEPTEN
M	BOUCHON	SERVICE D'ETUDES TECHNIQUES DES ROUTES ET AUTOROUTES
M	BOUSQUET	SNCF
M	BOUTIN	SOCOTEC — REPRESENTANT LE COPREC
M	CALGARO	SERVICE D'ETUDES TECHNIQUES DES ROUTES ET AUTOROUTES
M	CHARDIN	SYNDICAT DES PROCEDES INDUSTRIALISES DE PRECONTRAINT
M	CHAUSSIN	LABORATOIRE CENTRAL DES PONTS ET CHAUSSEES
M	COIN	SAE
M	CORTADE	BORIE — SAE
M	DARDARE	CENTRE D'ETUDES ET DE RECHERCHES DE L'INDUSTRIE DU BETON MANUFACTURE
M	DARPAS	INGENIEUR GENERAL DES PONTS ET CHAUSSEES
M	DUBOIS	MINISTERE DE LA DEFENSE
MME	FERNANDEZ	AFNOR
M	FOURE	CENTRE EXPERIMENTAL DE RECHERCHES ET D'ETUDES DU BATIMENT ET TRAVAUX PUBLICS
M	HAROUIMI	CHAMBRE DES INGENIEURS CONSEIL DE FRANCE
M	JALIL	SOCOTEC
M	LACROIX	PROFESSEUR HONORAIRE A L'ENPC
M	LEBLANC	SERVICE D'ETUDES TECHNIQUES DES ROUTES ET AUTOROUTES
M	LERAY	CONSEIL GENERAL DES PONTS ET CHAUSSEES
M	MATHEZ	CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DU BATIMENT
M	MATHIEU	INSPECTION GENERALE OUVRAGES D'ART
M	PERCHAT	FEDERATION NATIONALE DU BATIMENT
M	POINEAU	SERVICE D'ETUDES TECHNIQUES DES ROUTES ET AUTOROUTES
M	SCHMOL	SNBATI
M	THONIER	FEDERATION NATIONALE DES TRAVAUX PUBLICS
M	XERCAVINS	PX. CONSULTANTS

Avant-propos national

Liaison avec l'ENV 1992-1-1 : Eurocode 2 : Calcul des structures en béton — Partie 1-1 Règles générales et règles pour les bâtiments

La présente norme expérimentale P 18-715, qui reprend la prénorme européenne ENV 1992-1-5, est un complément à la norme expérimentale P 18-711 reprenant la prénorme ENV 1992-1-1.

L'avant-propos national de cette dernière s'applique au présent document et précise la correspondance entre les normes européennes citées en référence et les normes françaises.

ICS : 91.040.00 ; 91.080.40

Descripteurs : bâtiments, ouvrages en béton, calcul, codes applicables au bâtiment, règles de calcul.

Version française

Eurocode 2 : Calcul des structures en béton — Partie 1-5 : Règles générales — Structures précontraintes par armatures extérieures ou non adhérentes

Eurocode 2 : Planung von Stahlbeton- und
Spannbetontragwerken — Teil 1-5 : Allgemeine
Regeln — Tragwerke mit Spannglieder ohne
Verbund

Eurocode 2 : Design of concrete structures —
Part 1-5 : General rules — Structures with unbonded
and external prestressing tendons

La présente prénorme européenne (ENV) a été adoptée par le CEN le 1993-06-25 comme norme expérimentale pour application provisoire. La période de validité de cette ENV est limitée initialement à trois ans. Après deux ans, les membres du CEN seront invités à soumettre leurs commentaires, en particulier sur l'éventualité de la conversion de l'ENV en norme européenne (EN).

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

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

CEN

COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION

Europäisches Komitee für Normung
European Committee for Standardization

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

Sommaire

	Page
Avant-propos	4
Section 1 Introduction	7
1.1 Domaine d'application	7
1.1.2 Domaine d'application de la Partie 1-5 de l'Eurocode 2	7
1.4 Définitions	7
1.4.2 Termes spéciaux employés dans la Partie 1-5 de l'Eurocode 2	7
1.7 Symboles spéciaux employés dans la Partie 1-5 de l'Eurocode 2	7
1.7.3 Minuscules latines	7
1.7.4 Lettres grecques	8
Section 2 Bases de calcul	8
2.3 Prescriptions de calcul	8
2.3.2 États-limites ultimes	8
2.3.2.2 Combinaisons d'actions	8
2.5 Analyse	8
2.5.3 Méthodes de calcul	8
2.5.3.1 Généralités	8
Section 3 Propriétés des matériaux	9
3.3 Acier de précontrainte	9
3.3.6 Acier pour armatures de précontrainte non adhérentes, intérieures au béton	9
3.4 Accessoires de précontrainte	9
3.4.2 Tubes pour câbles extérieurs	9
3.4.2.1 Généralités	9
3.4.3 Câbles extérieurs non adhérents	10
3.4.3.1 Généralités	10
3.4.3.2 Ancrages	10
3.4.4 Câbles intérieurs non adhérents	11
3.4.4.1 Généralités	11
3.4.5 Déviateurs	11
3.4.5.1 Généralités	11
Section 4 Dimensionnement et calcul des sections	12
4.2 Données du projet	12
4.2.3 Béton précontraint	12
4.2.3.5 Calcul des éléments en béton précontraint	12
4.3 États-limites ultimes	12
4.3.1 États-limites ultimes pour les sollicitations d'effort normal et de flexion	12
4.3.1.4 Câbles extérieurs	12
4.3.1.5 Câbles intérieurs non adhérents	13
4.3.2 Effort tranchant	13
4.3.2.6 Construction par voussoirs préfabriqués	13
4.4 États-limites de service	14
4.4.0 Généralités	14
4.4.0.3 Cas de charges et combinaisons	14
4.4.1 Valeurs limites des contraintes en service	14
4.4.1.1 Considérations de base	14
4.4.2 États-limites de fissuration	14
4.4.2.1 Considérations générales	14
4.4.2.2 Sections minimales d'armatures	14
4.4.2.3 Contrôle de la fissuration sans calcul direct	15
4.4.2.4 Calcul des ouvertures de fissures	15

Sommaire (fin)

	Page
Section 5 Dispositions constructives	15
5.3 Unités de précontrainte	15
5.3.1 Disposition des unités de précontrainte	15
5.3.2 Enrobage	16
5.5 Limitation des désordres provoqués par des actions accidentelles	16
5.5.2 Dimensionnement des chaînages	16
Section 6 Exécution des travaux	16
Section 7 Contrôle de qualité	16
Annexe 1 Dispositions complémentaires relatives à la détermination des effets des déformations différées du béton	17
Annexe 2 Analyse non linéaire	17
Annexe 3 Compléments d'information sur le flambement des ossatures	17
Annexe 4 Vérification des flèches par le calcul	17

Avant-propos

Objectifs des Eurocodes

- (1) Les Eurocodes Structuraux regroupent un ensemble de normes pour le calcul des structures et fondations des ouvrages de bâtiment et de génie civil.
- (2) Ils ne traitent de l'exécution et du contrôle que dans la mesure où il est nécessaire de préciser 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 ainsi que les méthodes de contrôle de leurs performances soient disponibles, un certain nombre d'Eurocodes Structuraux traitent certains de ces aspects dans des Annexes informatives.

Historique du programme Eurocodes

- (4) La Commission des Communautés Européennes (CCE) a initié le travail d'élaboration d'un ensemble de règles techniques harmonisées pour le calcul des ouvrages de bâtiment et de génie civil, règles destinées, au début, à être utilisées en alternative aux différents règlements en vigueur dans les divers États Membres et à les remplacer ultérieurement. Ces règles techniques sont connues sous le nom d'«Eurocodes Structuraux».
- (5) En 1990, après consultation de ses États Membres, la CCE a transféré au CEN la charge de poursuivre le travail d'élaboration, de diffusion et de mise à jour des Eurocodes Structuraux, et le secrétariat de l'AELE a accepté d'aider le CEN dans cette tâche.
- (6) Le Comité Technique CEN/TC 250 est responsable de tous les Eurocodes Structuraux.

Programme Eurocodes

- (7) Le travail est en cours sur les différents Eurocodes Structuraux, chacun étant généralement constitué de plusieurs Parties :

EN 1991	Eurocode 1	Bases de calcul et actions sur les structures
EN 1992	Eurocode 2	Calcul des structures en béton
EN 1993	Eurocode 3	Calcul des structures en acier
EN 1994	Eurocode 4	Calcul des structures mixtes acier béton
EN 1995	Eurocode 5	Calcul des structures en bois
EN 1996	Eurocode 6	Calcul des structures en maçonneries
EN 1997	Eurocode 7	Calcul géotechnique
EN 1998	Eurocode 8	Résistance des structures au séisme
EN 1999	Eurocode 9	Calcul des structures en alliage d'aluminium
- (8) Des sous-comités séparés ont été formés par le CEN/TC 250 pour les divers Eurocodes énoncés ci-dessus.
- (9) La présente Partie 1-5 de l'Eurocode 2 est publiée comme Prénorme Européenne (ENV) pendant une durée de trois ans.
- (10) Cette Prénorme est destinée à être appliquée, à titre expérimental, ainsi que pour l'émission de commentaires.
- (11) Au terme d'une durée approximative de deux ans, les Membres du CEN seront invités à formuler des commentaires officiels qui seront pris en compte dans la détermination de l'action future.

- (12) En attendant, réactions et commentaires sur cette Prénorme devront être adressés au Secrétariat du sous-comité CEN/TC 250/SC 2 à l'adresse suivante :

Deutsches Institut für Normung e.v (DIN)
Burggrafenstraße 6
Postfach 11 07
D — 10 787 BERLIN
Allemagne

Tél : (49) 30.2601.2501
Fax : (49) 30.2601.1231

ou à votre organisme national de normalisation.

Document d'Application Nationale (DAN)

- (13) Étant donné les responsabilités des autorités des États Membres en matière de sécurité, santé et autres points couverts par les exigences essentielles de la Directive des Produits de Construction (DPC), des valeurs indicatives ont été attribuées à certains éléments de sécurité dans l'ENV qui sont identifiées par [___] (valeurs encadrées). Il incombe aux autorités de chaque État Membre d'attribuer des valeurs définitives à ces éléments de sécurité.
- (14) Certaines normes d'accompagnement européennes ou internationales ne seront 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 État 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 en 1.1.1 de l'ENV 1992-1-1 et celui de cette Partie de l'Eurocode 2 est défini en 1.1.2. Les Parties complémentaires de l'Eurocode 2 qui sont prévues sont indiquées en 1.1.3 de l'ENV 1992-1-1 ; elles comprendront des techniques ou applications additionnelles, en complément et en supplément à cette Partie.
- (17) En utilisant cette Prénorme, on s'attachera particulièrement aux hypothèses et conditions soulignées en 1.3 de l'ENV 1992-1-1.
- (18) Les sept chapitres de cette Prénorme sont complétés par quatre annexes qui ont le même statut normatif que les chapitres auxquels elles se rapportent. Ces annexes ont été constituées, par souci de clarté, en détachant de la partie principale du texte, certains Principes/Règles d'Application parmi les plus détaillés et qui ne sont utilisés que dans des cas particuliers.
- (19) Comme cela est indiqué à l'alinéa (14) du présent avant-propos, référence doit être faite au Document d'Application Nationale qui donnera les détails des normes d'accompagnement compatibles à utiliser. Pour cette Partie de l'Eurocode 2, une attention particulière doit être portée à la Prénorme approuvée ENV 206 (Béton — Performances, production, mise en œuvre et critères de conformité) ainsi qu'aux exigences de durabilité données en 4.1 de la présente prénorme.
- (20) Les dispositions de cette Prénorme sont basées en grande partie sur l'édition 1978 du Code Modèle CEB et autres documents CEB et FIP plus récents.
- (21) En développant cette Prénorme, des documents explicatifs ont été préparés et donnent des commentaires et justifications sur certaines dispositions de cette Prénorme.

En ce qui concerne l'ENV 1992-1-5, les alinéas complémentaires suivants sont applicables :

- (22) La présente Partie 1-5 de l'Eurocode 2 complète l'ENV 1992-1-1 pour ce qui concerne les aspects particuliers des structures à câbles non adhérents et extérieurs au béton.
- (23) La présentation et l'organisation de cette Partie 1-5 correspondent à celles de l'ENV 1992-1-1. Toutefois, la Partie 1-5 contient des Principes et des Règles d'Application propres aux structures à câbles non adhérents et extérieurs au béton.
- (24) En cas d'omission d'un paragraphe particulier de l'ENV 1992-1-1 dans la présente ENV 1992-1-5, ce paragraphe de l'ENV 1992-1-1 s'applique en tant que de besoin.

Dans la présente Partie, certains Principes et Règles d'Application de l'ENV 1992-1-1 sont modifiés ou remplacés ; dans ce dernier cas, ils annulent les précédents.

Lorsqu'un Principe ou Règle d'Application de l'ENV 1992-1-1 est modifié ou remplacé, le nouveau numéro s'identifie par l'adjonction du nombre 100 au numéro initial. Lorsqu'un nouveau Principe ou Règle d'Application est introduit, il s'identifie par le numéro immédiatement suivant le dernier numéro de l'ENV 1992-1-1, additionné du nombre 100.

Tout sujet non traité par l'ENV 1992-1-1 est introduit dans la présente Partie par un nouveau paragraphe. Le numéro du paragraphe correspondant suit la numérotation logique de l'ENV 1992-1-1.

- (25) La numérotation des équations, des figures, des annotations de bas de page et des tableaux de cette Partie suit les mêmes principes que la numérotation des paragraphes définie en (24) ci-dessus.
- (26) La précontrainte par câbles non adhérents, que concerne la présente ENV 1992-1-5, fait appel à deux technologies distinctes :
 - la précontrainte au moyen de câbles de faible puissance, en général monotorons, disposés dans une gaine de plastique de faible diamètre noyée dans le béton ;
 - la précontrainte au moyen de plus gros câbles, installés à l'extérieur du béton, généralement placés à l'intérieur des poutres-caissons ou entre les âmes des ouvrages à poutres multiples.
- (27) La première est habituellement utilisée pour les planchers de bâtiments, tandis que le domaine d'application spécifique de la seconde technologie intéresse la construction des ponts. Cependant, ces usages ne sont pas strictement limités, puisque d'une part, certains tabliers de ponts routiers peuvent être armés de câbles intérieurs non adhérents et que d'autre part la précontrainte extérieure a souvent été mise en œuvre lors de la construction de poutres constituées d'éléments préfabriqués, destinées à des bâtiments industriels.
- (28) L'attention est attirée sur les caractères spécifiques de la précontrainte extérieure. Certains modèles de calcul de référence de l'ENV 1992-1-1 doivent être rejetés et remplacés par de nouveaux modèles, dont la validité devra être démontrée. Le cas échéant, les indications utiles sont données dans la présente Partie 1-5 de l'ENV 1992.

Section 1 Introduction

La section correspondante de l'ENV 1992-1-1 est applicable, à l'exception de ce qui suit :

1.1 Domaine d'application

1.1.2 Domaine d'application de la Partie 1-5 de l'Eurocode 2

Complément à la suite du Principe (5) :

P(106) La présente Partie 1-5 de l'Eurocode 2 est une base générale de calcul pour les éléments de béton armé munis de câbles non adhérents, placés à l'intérieur ou à l'extérieur du béton. En outre, la présente Partie 1-5 donne des règles de calcul qui s'appliquent essentiellement aux bâtiments. La Partie 1-5 ne s'applique pas aux structures sujettes à une fatigue importante due à des charges variables. Elle ne s'applique pas aux structures dont les câbles ne sont pas encore injectés durant la construction [voir ENV 1992-1-1, 1.4.2 P(2) et 2.5.4.1(4)].

La présente ENV 1992-1-5 ne s'applique pas aux éléments précontraints dont les câbles sont situés au-delà des fibres extrêmes des sections.

P(107) La présente Partie 1-5 s'applique aux ouvrages de béton coulés en place ainsi qu'aux éléments préfabriqués. Les joints peuvent être ferrailés, traversés par des armatures ou encore non armés, avec ou sans application de produit adhésif ou d'étanchéité.

P(108) Tous les articles de l'ENV 1992-1-1 s'appliquent en général aux structures visées par la présente partie 1-5, sous réserve de l'application des dispositions constructives correspondantes et à condition que les actions des câbles soient considérées comme des forces extérieures.

P(109) Pour le calcul d'éléments à joints non armés, les modèles de calcul doivent prendre en compte les conséquences géométriques et mécaniques de l'ouverture de ces joints.

1.4 Définitions

1.4.2 Termes spéciaux employés dans la Partie 1-5 de l'Eurocode 2

Complément à la suite du Principe (2) :

P(103) câble extérieur : Câble de précontrainte par post-tension situé à l'extérieur de la section de béton, mais à l'intérieur du contour enveloppe de la section de béton, lié à celle-ci par le seul intermédiaire de déviateurs et d'ancrages.

P(104) déviateur : Organe (par exemple bossage de béton, pièce métallique ou entretoise) autour duquel un câble est dévié et où ce câble exerce une force radiale sur la structure.

P(105) câble intérieur non adhérent : Câble de précontrainte par post-tension noyé, constitué de torons ou autres armatures, lié à la structure par le seul intermédiaire d'ancrages.

P(106) toron de précontrainte gainé : Toron de précontrainte revêtu de graisse et enfilé dans une gaine constituée d'un tube de plastique, dans laquelle il peut se déplacer librement dans le sens longitudinal (monotoron).

1.7 Symboles spéciaux employés dans la Partie 1-5 de l'Eurocode 2

1.7.3 Minuscules latines

r Rayon de courbure d'un câble de précontrainte non adhérent ;

t Épaisseur d'une gaine constituée d'un tube d'acier.

1.7.4 Lettres grecques

- μ Coefficient de frottement entre un câble non adhérent et sa gaine ;
- φ_l Déviation parasite angulaire (par unité de longueur) des câbles non adhérents ;
- ϕ Diamètre extérieur de la gaine du câble de précontrainte non adhérent.

Section 2 Bases de calcul

La section correspondante de l'ENV 1992-1-1 est applicable, à l'exception de ce qui suit :

2.3 Prescriptions de calcul

2.3.2 États-limites ultimes

2.3.2.2 Combinaisons d'actions

Le Principe (1) est remplacé par :

P(101) Pour chaque cas de charge, les valeurs de calcul E_d des sollicitations doivent être déterminées à partir des règles de combinaison résultant des valeurs de calcul des actions données par le tableau 2.1 de l'ENV 1992-1-1.

Les combinaisons d'actions indiquées en 2.3.2.2 de l'ENV 1992-1-1 s'appliquent également aux structures comportant des câbles de précontrainte extérieurs non adhérents.

2.5 Analyse

2.5.3 Méthodes de calcul

2.5.3.1 Généralités

Complément à la suite de la Règle d'Application (5) :

P(106) Il est loisible d'appliquer les méthodes d'analyse données en 2.5.3 de l'ENV 1992-1-1, aux conditions suivantes :

- si des armatures sont nécessaires pour assurer la ductilité de la structure, il ne doit pas être tenu compte des câbles non adhérents et leur effet doit être considéré comme une force extérieure ;
- aucune redistribution des sollicitations n'est admise pour les structures constituées d'éléments préfabriqués à faces de contact non armées.

(107) *Les effets de la précontrainte peuvent se déterminer en pratique en remplaçant chaque câble par l'ensemble des forces qu'il exerce sur le béton, à savoir :*

- *forces concentrées aux ancrages ;*
- *forces radiales d'intensité P_m/r , r désignant le rayon de courbure de l'axe du câble et P_m la valeur moyenne de la force de précontrainte (voir ENV 1992-1-1, 2.5.4.2) ;*
- *forces tangentielles d'intensité dP_m/ds , ds désignant l'accroissement de l'abscisse curviligne le long du tracé et dP_m l'accroissement de la force du câble suivant son axe.*

(108) *Pour les câbles intérieurs des ossatures de bâtiment, on peut supposer que :*

- *la force dans un câble est constante sur toute la longueur d'une travée ;*
- *pour un élément horizontal, les forces radiales sont verticales lorsque les câbles sont déviés dans le plan vertical ;*
- *le tracé d'un câble est formé de tronçons rectilignes ou paraboliques.*

(109) *Dans ses parties courantes entre déviateurs, le câble peut être considéré comme rectiligne.*

Section 3 Propriétés des matériaux

La section correspondante de l'ENV 1992-1-1 est applicable, à l'exception de ce qui suit :

3.3 Acier de précontrainte

Compléments à la suite de 3.3.5.3(2) :

3.3.6 Acier pour armatures de précontrainte non adhérentes, intérieures au béton

- P(101) L'acier de précontrainte des câbles intérieurs non adhérents doit être protégé contre la corrosion de manière fiable et permanente.
- P(102) La protection fiable et permanente de l'acier de précontrainte doit être obtenue par le respect des exigences en matière d'acier de précontrainte gainé spécifiées par les textes applicables.
- P(103) Lorsque les spécifications du projet l'exigent, les câbles extérieurs ou intérieurs et non adhérents doivent recevoir une protection permanente contre les effets du feu.

3.4 Accessoires de précontrainte

Le paragraphe 3.4.2 de l'ENV 1992-1-1 est remplacé par ce qui suit :

3.4.2 Tubes pour câbles extérieurs

3.4.2.1 Généralités

- P(101) Les câbles extérieurs doivent être protégés de manière fiable contre la corrosion au moyen d'un procédé agréé.
- (102) *La protection des câbles extérieurs contre la corrosion est normalement assurée par leur confinement dans des tubes remplis de coulis de ciment ou d'autres agents protecteurs.*
- P(103) Les tubes doivent être étanches et aptes à résister à la pression d'injection sans présenter de déformation permanente. Ils doivent être constitués des matériaux prescrits par les documents d'agrément technique ou les normes correspondantes.
- P(104) Ni les gaines traditionnelles constituées de feuillards d'acier nervuré ni les tubes de PVC ne sont autorisées ¹⁾.
- (105) *Dans le cas d'injection au coulis de ciment, il convient que le tube puisse résister à une pression nominale interne de $[1,0]$ N/mm². Une résistance à une pression plus importante peut s'avérer nécessaire lorsque le tracé du câble exige une plus forte pression d'injection.*
- (106) *Dans le cas d'injection au coulis de ciment, il convient que le diamètre intérieur du tube soit supérieur ou égal à $1,6 \cdot \sqrt{A_p}$, A_p désignant l'aire nominale de la section transversale du câble.*
- (107) *En cas de remplissage au moyen d'un agent de protection tel que la graisse ou la cire, le tube doit pouvoir résister aux températures et aux pressions internes dont les valeurs sont spécifiées par les documents d'agrément technique. Il convient que les effets des variations de température entre le tube et le produit de remplissage n'altère pas la protection des câbles contre la corrosion.*
- (108) *Il convient que l'épaisseur t des tubes d'acier, en l'absence de précision à cet égard dans les documents d'agrément technique, soit au moins égale à la plus élevée des deux valeurs suivantes :*

$$t \geq \phi / 50 \quad (3.106)$$

$$t \geq 1,5 \text{ mm}$$

ϕ désignant le diamètre extérieur du tube.

1) Les gaines sont généralement des tubes de polyéthylène à haute densité (PEHD) ou d'acier.

Lorsque le tube d'acier est constitué de plusieurs tronçons assemblés par soudage, il convient que son épaisseur soit au moins égale à $\lfloor 3 \rfloor$ mm.

Il convient que le tube d'acier puisse être coudé à froid suivant un rayon de courbure de $\lfloor 20 \rfloor$ diamètres sans déformation notable du contour de sa section transversale initiale.

- (109) En l'absence d'information à cet égard dans les documents d'agrément technique, il convient que l'épaisseur t des tubes de PEHD puisse satisfaire les conditions suivantes :

$$t \geq \phi / 16 \quad (3.107)$$

$$t \geq 5 \text{ mm}$$

ϕ désignant le diamètre extérieur du tube.

- (110) Dans le cas de tube de PEHD, il convient que le matériau soit résistant aux rayons ultraviolets, avec une teneur en agents antioxydants au moins égale à 1 000 ppm.

Paragraphes complémentaires à la suite de 3.4.2.1 (110) :

3.4.3 Câbles extérieurs non adhérents

3.4.3.1 Généralités

P(101) Un câble extérieur non adhérent est un câble situé à l'extérieur de la section de béton originale, et lié à la structure par le seul intermédiaire d'ancrages et de déviateurs.

P(102) Le procédé de précontrainte par post-tension doit avoir reçu un agrément spécifique de la part des autorités compétentes pour l'utilisation de câbles extérieurs.

(103) Dans les zones d'ancrage, le câble est généralement noyé dans un chevêtre de béton ou un bossage ou encore fixé sur une pièce métallique.

(104) Les déviateurs peuvent être des bossages, des pièces métalliques ou des entretoises. Au droit des déviateurs, le câble est courbé et il exerce une pression radiale.

(105) Il convient que les ancrages et déviateurs puissent permettre le démontage du câble sans endommager les éléments structuraux, sauf disposition contraire figurant dans les spécifications techniques du projet.

3.4.3.2 Ancrages

(101) En l'absence d'information correspondante dans les documents d'agrément technique du procédé, le rayon de courbure minimal du câble dans la zone d'ancrage, au-delà de la plaque d'ancrage, est indiqué au tableau 3.105.

Tableau 3.105 : Rayons de déviation minimaux dans la zone d'ancrage

Unités		Rayons minimaux (m)
Torons	Fils	
19 ϕ 13 mm ou 12 ϕ 15 mm	54 ϕ 7 mm	3,5
31 ϕ 13 mm ou 19 ϕ 15 mm	91 ϕ 7 mm	4,0
55 ϕ 13 mm ou 37 ϕ 15 mm	140 ϕ 7 mm	5,0

Les interpolations linéaires à partir des valeurs du tableau 3.105 sont autorisées.

3.4.4 Câbles intérieurs non adhérents

3.4.4.1 Généralités

- P(101) Un câble intérieur non adhérent consiste en un ou plusieurs fils, torons ou barres confinés dans une gaine souple et étanche noyée dans le béton, dans laquelle ils peuvent effectuer librement des déplacements longitudinaux, l'espace entre la gaine et l'armature de précontrainte étant rempli d'un matériau lubrifiant.
- P(102) L'armature de précontrainte doit être protégée en permanence contre la corrosion sur toute sa longueur, zones d'ancrage incluses.
- P(103) Le procédé de postcontrainte doit avoir reçu un agrément technique spécifique de la part des autorités compétentes pour son utilisation avec des câbles intérieurs.
- (104) *La gaine peut être en polyéthylène, en polypropylène ou tout autre matériau non corrosif. Le produit lubrifiant peut être une graisse non corrosive.*

3.4.5 Déviateurs

3.4.5.1 Généralités

- P(101) Les déviateurs doivent satisfaire les exigences suivantes :
- résister aux forces longitudinales et transversales appliquées par le câble et transmettre ces forces à la structure ;
 - assurer, sans discontinuité angulaire excessive, la liaison entre deux tronçons de câble rectilignes.
- (102) *Dans les zones de déviation, les tubes constituant les gaines peuvent être en acier ou en PEHD ; dans ce dernier cas, il doit être établi que ces gaines sont aptes à résister aux pressions radiales et aux mouvements longitudinaux du câble, sans présenter de dommages et sans que le fonctionnement de celui-ci soit altéré. Si les gaines sont en acier, il convient qu'elles soient précou-dées suivant le rayon défini par le projet.*
- (103) *En l'absence d'exigences dans les documents d'agrément technique du procédé, la valeur du rayon de courbure du câble dans la zone de déviation peut être choisie parmi celles du tableau 3.106 :*

Tableau 3.106 : Rayons de déviation minimaux dans la zone de déviation

Unités		Rayons minimaux (m)
Torons	Fils	
19 ϕ 13 mm ou 12 ϕ 15 mm	54 ϕ 7 mm	2,5
31 ϕ 13 mm ou 19 ϕ 15 mm	91 ϕ 7 mm	3,0
55 ϕ 13 mm ou 37 ϕ 15 mm	140 ϕ 7 mm	5,0

Les interpolations linéaires à partir des valeurs du tableau 3.106 sont autorisées.

- (104) *Les déviations angulaires de calcul des câbles sont autorisées jusqu'à $|0,02|$ radian sans selles de déviations spéciales, comme spécifié par les documents d'agrément technique. Il convient de prendre en compte dans le calcul les forces développées par les déviations.*

Section 4 Dimensionnement et calcul des sections

La section correspondante de l'ENV 1992-1-1 est applicable, à l'exception de ce qui suit :

4.2 Données du projet

4.2.3 Béton précontraint

4.2.3.5 Calcul des éléments en béton précontraint

4.2.3.5.5 Pertes de précontrainte

Complément à la suite de la Règle d'Application (11) :

- (112) *Dans le cas de câbles extérieurs au béton, constitués de fils ou de torons parallèles, la perte de précontrainte due aux déplacements angulaires parasites peut être négligée.*
- (113) *Pour les câbles extérieurs, en l'absence de données plus précises, les valeurs du coefficient de frottement μ peuvent être choisies parmi celles du tableau 4.115 :*

Tableau 4.115 : Coefficient de frottement μ pour différents types de câbles non adhérents

Coefficient de frottement μ	Tube d'acier	Tube PEHD
Torons lubrifiés	0,18	0,12
Fils lubrifiés	0,16	0,10
Torons non lubrifiés	0,25	0,14
Fils non lubrifiés	0,24	0,12

- (114) *Pour les monotorons graissés, en l'absence de données plus précises, on peut attribuer les valeurs suivantes au coefficient de frottement μ entre les torons et leur gaine et au déplacement angulaire parasite u_1 :*

$$\mu = |0,05| ;$$

$$u_1 = |0,06| \text{ rad/m.}$$

- (115) *Pour le calcul des pertes différées affectant un câble non adhérent, l'équation (4.10) de 4.2.3.5.5 de l'ENV 1992-1-1 est applicable, sous réserve que les valeurs des déformations de retrait et de fluage du béton soient considérées comme des valeurs moyennes :*

- *sur la partie rectiligne du câble comprenant l'abscisse considérée, pour un câble extérieur ;*
- *sur toute la longueur du câble, s'il s'agit d'un câble intérieur.*

4.3 États-limites ultimes

4.3.1 États-limites ultimes pour les sollicitations d'effort normal et de flexion

Complément à la suite de 4.3.1.3(3) :

4.3.1.4 Câbles extérieurs

P(101) Pour les câbles extérieurs, la déformation de l'armature de précontrainte à l'état-limite ultime est constante entre deux points de contact successifs avec la structure (ancrages ou déviateurs).

P(102) À l'état-limite ultime pour les sollicitations d'effort normal et de flexion, la déformation de l'armature de précontrainte est égale à la prédéformation définie en 2.5.4.4.3 de l'ENV 1992-1-1, augmentée de la déformation moyenne du béton entre deux points de fixation successifs [voir l'ENV 1992-1-1, 4.3.1.2(5)].

- (103) *Si, par souci de simplification, une vérification de section fondée sur une analyse linéaire est conduite plutôt qu'une analyse non linéaire de l'ensemble de la structure, il convient de négliger l'augmentation de la déformation de l'armature de précontrainte.*
- (104) *Lors de la vérification vis-à-vis des états-limites ultimes, il convient d'appliquer les coefficients partiels c_p définis au tableau 2.2 de 2.3.3.1 de l'ENV 1992-1-1 aux forces de précontrainte déterminées suivant P(101), (102) et (103) ci-dessus.*
- P(105) Des liaisons entre le câble et le béton doivent être assurées en un nombre suffisant de sections pour que le risque d'effets nuisibles des déformations du second ordre soit éliminé.

4.3.1.5 Câbles intérieurs non adhérents

- (101) *Pour les bâtiments courants [voir 1.1.2 P(2) de l'ENV 1992-1-1], en l'absence de toute exigence spécifique concernant la vérification à l'état-limite ultime de flexion et d'effort normal, l'accroissement de contrainte des câbles de longueur inférieure ou égale à celle d'une travée est supposé égal à 100 N/mm^2 . Lorsque la longueur des câbles est supérieure, il convient de réduire cette valeur en tenant compte du nombre de travées et des charges appliquées.*

4.3.2 Effort tranchant

Compléments à la suite de 4.3.2.5 (6) :

4.3.2.6 Construction par voussoirs préfabriqués

- P(101) Les règles du béton armé s'appliquent au calcul des éléments dont les joints sont dépourvus d'armatures ; les contraintes internes des joints doivent être assimilées à des forces extérieures agissant sur l'élément de béton.
- P(102) Les joints dépourvus d'armatures doivent remplir les conditions relatives aux transferts de forces. La transmission doit être supposée s'effectuer uniquement dans la zone comprimée du joint. La transmission de l'effort tranchant au travers de joints dépourvus d'armatures doit être assimilée à celle de forces extérieures agissant sur l'élément de béton.
- L'attention doit être attirée sur la variation rapide du niveau de l'axe neutre lorsque le moment fléchissant augmente.
- (103) *Pour les bâtiments courants et dans un but de simplification, il est loisible d'admettre que l'effort normal dans un joint dépourvu d'armatures s'exerce au centre de gravité de la zone comprimée de la section.*

(104) *En prenant en compte l'action la plus défavorable [suivant l'équation (2.7(a)) de l'ENV 1992-1-1] et en l'absence de justifications établies à partir d'expérimentations antérieures, il convient de vérifier que les sections des joints dépourvus d'armatures sont comprimées sur les $\frac{2}{3}$ au moins de leur profondeur totale. Il convient d'apporter une attention particulière aux effets de la torsion lors du calcul des sections creuses.*

(104) I *En prenant en compte l'action la plus défavorable (suivant l'équation (2.7(a)) de l'ENV 1992-1-1) et en l'absence de justifications établies à partir d'expérimentations antérieures, pour les sections en T, il convient de vérifier que la table de compression reste comprimée sur toute son épaisseur.*

Il convient en outre de vérifier que la partie comprimée de la section peut résister à l'effort tranchant concomitant.

Lors de la vérification de sections creuses, il y a lieu d'apporter une attention particulière aux effets de la torsion.

4.4 États-limites de service

4.4.0 Généralités

Compléments à la suite de 4.4.0.2 P(1) :

4.4.0.3 Cas de charges et combinaisons

- (101) *En complément des combinaisons d'actions définies en 2.3.4 de l'ENV 1992-1-1, il convient de prendre en compte une différence de température de $|\pm 10|$ K entre un câble extérieur et le béton de la structure. Lorsque les câbles sont directement exposés au rayonnement solaire, des dispositions spéciales peuvent s'avérer nécessaires.*
- (102) *Dans un but de simplification lors de la vérification aux états-limites de service, il est loisible de supposer, dans le calcul des sollicitations, que le béton demeure non fissuré.*
- (103) *Lors du calcul de la force des câbles extérieurs résultant des actions variables, les déviateurs peuvent être considérés comme des points fixes (pas de déplacement longitudinal relatif entre le câble et le béton de l'ouvrage).*

4.4.1 Valeurs limites des contraintes en service

4.4.1.1 Considérations de base

La Règle d'Application (4) est remplacée par :

- (104) *Lorsque tous les câbles sont extérieurs ou intérieurs et non adhérents, il convient de traiter l'élément comme s'il s'agissait d'un élément de béton armé ; les règles de 4.4.1.1(4) de l'ENV 1992-1-1, spécifiques au béton précontraint, ne s'appliquent pas. Les règles du béton armé concernant la durabilité sont donc applicables.*

Pour les éléments à précontrainte extérieure avec joints de contact dépourvus d'armatures, voir 4.4.2.1(110) ci-après.

4.4.2 États-limites de fissuration

4.4.2.1 Considérations générales

La Règle d'Application (7) est remplacée par :

- (107) *4.4.2.1(7) de l'ENV 1992-1-1 s'applique aux éléments précontraints à câbles adhérents ou non. Cependant, lorsque tous les câbles sont extérieurs ou intérieurs et non adhérents, les règles de 4.4.2.1 de l'ENV 1992-1-1, spécifiques au béton précontraint, ne s'appliquent pas. Les règles de béton armé concernant la durabilité sont applicables.*

Complément à la suite du Principe P(9) :

- (110) *Pour les éléments à précontrainte extérieure avec joints de contact dépourvus d'armatures, les contraintes du béton telles que $\sigma_c > |f_{ct}|$ (vérification vis-à-vis de l'état-limite de décompression) ne sont pas admises dans les sections des joints sous combinaisons rares d'actions telles que définies par 2.3.4 P(2) de l'ENV 1992-1-1. Pour cette vérification, il est loisible d'assimiler la force de précontrainte à sa valeur moyenne P_m .*

4.4.2.2 Sections minimales d'armatures

Complément à la suite de la Règle d'Application (8) :

- (109) *Le 4.4.2.2 de l'ENV 1992-1-1 s'applique aux éléments à précontrainte extérieure coulés en place ou à joints armés et aux éléments à précontrainte intérieure et câbles non adhérents, à l'exception de la Règle (8) : les câbles de précontrainte non adhérents ne sont pas pris en compte dans les sections minimales d'armatures.*

4.4.2.3 Contrôle de la fissuration sans calcul direct

Complément à la suite de la Règle d'Application (6) :

P(107) Lorsque tous les câbles sont extérieurs ou intérieurs et non adhérents, les règles de 4.4.2.3 de l'ENV 1992-1-1, spécifiques au béton précontraint, ne s'appliquent pas.

4.4.2.4 Calcul des ouvertures de fissures

La Règle d'Application (4) est remplacée par :

(104) *La Règle d'Application (4) de 4.4.2.4 de l'ENV 1992-1-1 ne s'applique pas aux câbles non adhérents.*

Section 5 Dispositions constructives

La section correspondante de l'ENV 1992-1-1 est applicable à l'exception de ce qui suit :

5.3 Unités de précontrainte

5.3.1 Disposition des unités de précontrainte

Les Principes (1), (2) et la Règle d'Application (3) sont remplacés par :

P(101) Les câbles extérieurs doivent être efficacement protégés contre les attaques physiques et le vandalisme.

P(102) Lorsque le contrat le prescrit, il doit être possible de remplacer les câbles.

(103) *Pour les câbles extérieurs, la possibilité de remplacement est généralement prescrite par les documents d'agrément technique du procédé.*

(104) *Pour les câbles intérieurs, il convient de préciser dans chaque cas les conditions à remplir pour assurer le remplacement des câbles ainsi que la quantité de câbles susceptibles d'être remplacés simultanément.*

P(105) Les vibrations transversales critiques des câbles extérieurs dues au trafic, au vent ou à toute autre cause doivent être évitées au moyen des dispositifs appropriés.

P(106) En cas d'environnement agressif, tel celui des classes d'exposition 3, 4 ou 5 de l'ENV 1992-1-1, tableau 4.1, le contact entre éléments préfabriqués contigus doit s'effectuer par l'intermédiaire d'une mince couche de résine époxydique ou tout autre matériau approprié.

(107) *Il convient de disposer des déviateurs autorisant une déviation angulaire parasite d'au moins $[0,02]$ radians, à leurs deux extrémités.*

(108) *En l'absence d'indications dans les documents d'agrément technique du procédé, il convient de s'assurer que les rayons de courbures minimaux des monotorons respectent les valeurs suivantes :*

— monotorons ϕ 13 mm : 1,7 m ;

— monotorons ϕ 15 mm : 2,5 m.

(109) *En l'absence d'indications dans les documents techniques d'agrément du procédé, il convient de s'assurer que les sorties d'ancrage des câbles épousent des tracés rectilignes dont les longueurs minimales sont les suivantes :*

— câbles de résistance à la rupture inférieure ou égale à 2 MN : 0,8 m ;

— câbles de résistance à la rupture comprise entre 2 MN et 6 MN : 1,0 m ;

— câbles de résistance à la rupture supérieure à 6 MN : 1,5 m.

(110) *Les groupements de câbles intérieurs non adhérents sont autorisés dans les zones autres que les zones d'ancrage, sous réserve que la mise en place et le compactage du béton puissent s'effectuer de manière satisfaisante.*

5.3.2 Enrobage

Le Principe (1) est remplacé par :

- P(101) Les Règles de 5.3.2 de l'ENV 1992-1-1 concernant l'enrobage minimal ne s'appliquent pas aux câbles intérieurs non adhérents.
- (102) *Il convient de s'assurer que l'enrobage des câbles intérieurs non adhérents n'est pas inférieur à |20| mm.*

5.5 Limitation des désordres provoqués par des actions accidentelles

5.5.2 Dimensionnement des chaînages

Complément à la suite de la Règle d'Application (4) :

- P(105) Les structures précontraintes par câbles continus non adhérents peuvent présenter une plus grande vulnérabilité vis-à-vis de l'effondrement progressif, dans la mesure où un défaut localisé peut avoir des conséquences sur des sections éloignées.
- P(106) Lorsque des câbles non adhérents constituent des éléments du chaînage de la structure, on doit vérifier qu'une redistribution des forces reste possible en cas de rupture localisée d'un câble. Cette condition peut être remplie par la mise en place d'armatures adhérentes appropriées.
- (107) *Il convient de vérifier les dalles continues afin de s'assurer que la rupture simultanée de deux câbles quelconques, adjacents et non adhérents, n'entraîne pas l'effondrement.*

Section 6 Exécution des travaux

La section correspondante de l'ENV 1992-1-1 est applicable en tant que de besoin.

Section 7 Contrôle de qualité

La section correspondante de l'ENV 1992-1-1 est applicable en tant que de besoin.

Annexe 1 Dispositions complémentaires relatives à la détermination des effets des déformations différées du béton

L'article correspondant de l'ENV 1992-1-1 est applicable en tant que de besoin.

Annexe 2 Analyse non linéaire

L'article correspondant de l'ENV 1992-1-1 est applicable en tant que de besoin, sauf dans les cas suivants :

Complément au Principe P(4) :

- (105) *Dans le cas de structures préfabriquées à joints ouverts, il convient d'utiliser des méthodes d'analyse non linéaires aux états-limites ultimes.*
- (106) *Aux états-limites ultimes, il convient de calculer l'amplification des contraintes des câbles à l'aide de méthodes d'analyse non linéaires et en tenant compte du béton tendu.*

Annexe 3 Compléments d'information sur le flambement des ossatures

L'article correspondant de l'ENV 1992-1-1 est applicable en tant que de besoin.

Annexe 4 Vérification des flèches par le calcul

L'article correspondant de l'ENV 1992-1-1 est applicable en tant que de besoin.

