

Arnaud Bury

AIDE-MÉMOIRE

Ouvrages en béton armé

6^e édition

DUNOD

Photo de couverture : © Evannovostro/Shutterstock.com

Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage.

Le Code de la propriété intellectuelle du 1^{er} juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements

d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour

les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée. Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du Centre français d'exploitation du

droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).



© Dunod, 1997, 2006, 2009, 2013, 2018, 2022

11, rue Paul Bert 92240 Malakoff

ISBN 978-2-10-084597-2

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2° et 3° a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

Table des matières

Avant-propos	1
1 ■ Présentation	3
1.1 Les Eurocodes	3
1.2 L'Eurocode 0 – Bases des calculs de structure	7
1.3 L'Eurocode 1 – Actions	16
1.4 L'Eurocode 2 – Structures en béton	16
1.5 Notations utilisées dans les Eurocodes	16

A

Règles générales

2 ■ Matériaux	23
2.1 Béton	23
2.2 Aciers de béton armé	35
2.3 Association acier-béton	37
2.4 Durabilité et dispositions constructives	58
3 ■ Actions	69
3.1 Actions permanentes	69
3.2 Actions variables	74
3.3 Actions accidentelles	79
4 ■ Sollicitations	80
4.1 Analyse structurale	80
4.2 Modélisation	80

5 ■ États limites ultimes	91
5.1 Flexion simple et composée	91
5.2 Effort tranchant	107
5.3 Liaison entre les membrures d'une poutre et l'âme	125
5.4 Cisaillement le long des surfaces de reprise	127
5.5 Torsion	129
5.6 Poinçonnement	142
5.7 Modèles bielles et tirants	149
5.8 Pressions localisées	160
6 ■ États limites de service	162
6.1 Généralités	162
6.2 Limitation des contraintes	162
6.3 Maîtrise de la fissuration	164
6.4 État limite de déformation	182

B

Règles applicables aux éléments courants

7 ■ Poteaux et voiles	197
7.1 Effets du second ordre	197
7.2 Méthodes d'analyse	201
7.3 Poteaux	208
7.4 Voiles	220
8 ■ Poutres	232
8.1 Sollicitations	232
8.2 Armatures longitudinales	247
8.3 Armatures transversales	255

9 ■ Dalles	258
9.1 Définitions	258
9.2 Sollicitations	259
9.3 Armatures de flexion	260
9.4 Dispositions sur les appuis	262
9.5 Armatures d'effort tranchant	262
9.6 Armatures de chaînage	269
9.7 Éléments saillants	272

C

Règles particulières

10 ■ Planchers-dalles	277
10.1 Analyse des planchers-dalles	277
10.2 Dispositions constructives	278
11 ■ Comportement au feu	283
11.1 Généralités	283
11.2 Valeurs tabulées	286
11.3 Méthodes simplifiées	298
11.4 Effort tranchant, torsion et ancrage des armatures	315
11.5 Éclatement	317
11.6 Jonctions	319
11.7 Revêtements de protection	319
12 ■ Fondations superficielles	320
12.1 Domaine d'application	320
12.2 Modèle de comportement	324
12.3 Justifications des fondations vis-à-vis du sol (GEO)	336
12.4 Justifications vis-à-vis des matériaux (STR)	342

12.5	Justifications vis-à-vis du soulèvement hydraulique (UPL)	347
12.6	Dispositions constructives	358
13	▪ Fondations profondes	362
13.1	Domaine d'application	362
13.2	Modèle de comportement	363
13.3	Justifications vis-à-vis du sol (GEO)	379
13.4	Justifications vis-à-vis des matériaux (STR)	381
14	▪ Murs de soutènement	406
14.1	Généralités	406
14.2	Actions	408
14.3	Justifications vis-à-vis du sol (GEO)	418
14.4	Justifications vis-à-vis des matériaux (STR)	421
	Bibliographie	438
	Index	440

Avant-propos

La rédaction du présent Aide-mémoire a été conduite avec l'idée constante que l'ingénieur de bureau d'études doit trouver rapidement dans cet ouvrage la réponse à la question qu'il se pose pour la justification d'un élément ou d'un ouvrage de béton armé qu'il peut rencontrer dans le cadre d'un projet de bâtiment.

Cette 6^e édition est conforme aux Eurocodes et aux dernières interprétations de la commission de normalisation BNTRA CN EC2. Elle traite aussi bien des règles générales (partie A) que des règles applicables aux éléments courants que sont les poteaux et voiles, les poutres et les dalles (partie B).

Elle traite également des règles particulières relatives aux planchers-dalles, au calcul du comportement au feu et des fondations superficielles ou profondes, ainsi que les murs de soutènement (partie C).

Il peut être utile de préciser qu'il ne s'agit pas dans cet Aide-mémoire de procéder à une analyse exhaustive de l'Eurocode 2, mais d'en présenter les prescriptions pour une utilisation pratique, volontairement limitée aux cas les plus courants.

C'est ainsi, par exemple, que ne sont pas traitées la question de la fatigue, les structures préfabriquées, les structures en béton de granulats légers ou en béton de granulats recyclés et les structures en béton non armé (à l'exception des voiles et des pieux de fondations). Les bétons de classe de résistance supérieure à 50 MPa ne sont pas pris en compte.

Les références entre crochets renvoient au numéro de l'article correspondant de l'Eurocode 2. Les prescriptions spécifiques de l'annexe nationale sont repérées [NA] et celles du guide d'application de l'Eurocode 2 sont repérées [FD].

1

Présentation

1.1 Les Eurocodes

1.1.1 La réglementation

Parallèlement à l'évolution technique, la codification et la réglementation dans le domaine de la construction se sont développées, en intégrant les acquisitions faites quant à la connaissance du comportement des matériaux et les enseignements tirés de l'expérience.

Pour ce qui concerne les règles de conception des ouvrages en béton armé, les premières théories donnent lieu en France aux circulaires de 1906 et 1934.

La première génération de réglementation est dite « aux contraintes admissibles ». Il s'agit des Règles BA 45 et BA 60, CCBA 68.

La génération suivante est dite « aux états limites ». Il s'agit des **Règles BAEL** 83, 91 et 99. Les **Règles BAEL** font partie d'une réglementation nationale dont l'ensemble couvre l'essentiel du domaine de la construction.

Les Eurocodes sont des codes de conception-calcul des ouvrages de structure établis au plan européen qui se substituent aux normes nationales correspondantes dans chacun des États membres.

1.1.2 Les Eurocodes

Dans le domaine des règles de conception-calcul, il s'agit de dix textes codificatifs formant un ensemble cohérent se déclinant comme suit :

- ▶ NF EN 1990 – Bases de calcul des structures ;
- ▶ NF EN 1991 – Actions sur les structures ;

- ▶ NF EN 1992 – Calcul des structures en béton ;
- ▶ NF EN 1993 – Calcul des structures en acier ;
- ▶ NF EN 1994 – Calcul des structures mixtes acier-béton ;
- ▶ NF EN 1995 – Calcul des structures en bois ;
- ▶ NF EN 1996 – Calcul des structures en maçonnerie ;
- ▶ NF EN 1997 – Calcul géotechnique ;
- ▶ NF EN 1998 – Conception et dimensionnement des structures pour la résistance aux séismes ;
- ▶ NF EN 1999 – Calcul des structures en alliage d'aluminium.

Indice EN	Titre NF EN
NF EN 1991	Actions sur les structures
1991-1-1	Densités, poids propres et charges d'exploitation
1991-1-2	Actions sur les structures exposées au feu
1991-1-3	Charges de neige
1991-1-4	Actions du vent
1991-1-5	Actions thermiques
1991-1-6	Charges en cours d'exécution
1991-1-7	Actions accidentelles
1991-2	Charges sur les ponts dues au trafic
1991-3	Actions induites par les appareils de levage et les machines
1991-4	Actions dans les silos et réservoirs
NF EN 1992	Calcul des structures en béton
1992-1-1	Règles générales et règles pour les bâtiments
1992-1-2	Calcul du comportement au feu
1992-2	Ponts
1992-3	Silos et réservoirs
1992-4	Conception et calcul des éléments de fixation pour béton
NF EN 1993	Calcul des structures en acier
1993-1-1	Règles générales et règles pour les bâtiments
1993-1-2	Calcul du comportement au feu
1993-1-3	Généralités – Règles supplémentaires pour les profilés et plaques formés à froid
1993-1-4	Généralités – Règles supplémentaires pour les aciers inoxydables

Indice EN	Titre NF EN
NF EN 1993	Calcul des structures en acier
1993-1-5	Plaques planes
1993-1-6	Résistance et stabilité des structures en coques
1993-1-7	Structures en plaques chargées hors de leur plan
1993-1-8	Calcul des assemblages
1993-1-9	Résistance à la fatigue
1993-1-10	Choix des qualités d'acier
1993-1-11	Calcul des structures à câbles ou éléments tendus
1993-2	Ponts
1993-3-1	Tours, mâts et cheminées — Pylônes et mâts haubanés
1993-3-2	Tours, mâts et cheminées — Cheminées
1993-4-1	Silos
1993-4-2	Réservoirs
1993-4-3	Canalisations
1993-5	Pieux et palplanches
1993-6	Structures de chemins de roulement
NF EN 1994	Calcul des structures mixtes acier-béton
1994-1-1	Règles générales et règles pour les bâtiments
1994-1-2	Calcul du comportement au feu
1994-2	Ponts
NF EN 1995	Calcul des structures en bois
1995-1-1	Règles générales et règles pour les bâtiments
1995-1-2	Calcul du comportement au feu
1995-2	Ponts
NF EN 1996	Calcul des structures en maçonnerie
1996-1-1	Règles générales pour ouvrages en maçonnerie armée et non armée
1996-1-2	Calcul du comportement au feu
1996-2	Conception, choix des matériaux et mise en œuvre des maçonneries
1996-3	Méthodes de calcul simplifiées pour les ouvrages en maçonnerie non armée
NF EN 1997	Calcul géotechnique
1997-1	Règles générales
1997-2	Reconnaissance des terrains et essais

Indice EN	Titre NF EN
NF EN 1998	Conception et dimensionnement des structures pour la résistance aux séismes
1998-1	Règles générales, actions sismiques et règles pour les bâtiments
1998-2	Ponts
1998-3	Évaluation et renforcement des bâtiments
1998-4	Silos, réservoirs et canalisations
1998-5	Fondations, structures de soutènement et aspects géotechniques
1998-6	Tours, mâts et cheminées
NF EN 1999	Calcul des structures en alliage d'aluminium
1999-1-1	Règles générales et règles applicables aux bâtiments
1999-1-2	Calcul de la résistance au feu
1999-1-3	Structures sensibles à la fatigue
1999-1-4	Tôles de structure formées à froid
1999-1-5	Coques

Pour chaque partie des Eurocodes, il y a lieu d'associer deux documents :

- ▶ le document « harmonisé », c'est-à-dire commun à tous les pays membres du CEN (Comité Européen de Normalisation) : il est désigné NF EN 199X ;
- ▶ l'annexe nationale spécifique à chaque pays, qui fixe les critères laissés au libre choix des états dans le document « harmonisé ». Elle est dénommée NF EN 199X/NA.

1.1.3 Textes complémentaires aux Eurocodes

Les normes Eurocodes de conception et de dimensionnement sont complétées par des textes complémentaires. Il s'agit notamment des normes concernant les matériaux constitutifs du béton armé, ainsi que des normes d'application nationale des Eurocodes. Les principaux documents sont récapitulés ci-après :

- ▶ Matériau béton :
 - NF EN 206/CN : Béton – Spécification, performance, production et conformité (y compris complément national).

- ▶ **Matériau acier :**
 - NF EN 10080 : Aciers pour l'armature du béton – Aciers soudables pour béton armé – Généralités ;
 - NF A 35-080-1 & 2 : Aciers pour béton armé – Aciers soudables – partie 1 : Barres et couronnes ; partie 2 : Treillis soudés ;
 - NF A 35-027 : Produits en acier pour béton armé – armatures.
- ▶ **Documents d'application des Eurocodes :**
 - FD P 18-717 : Guide d'application des normes NF EN 1992 ;
 - NF P 94-261 : Norme d'application nationale de l'Eurocode 7 – fondations superficielles ;
 - NFP 94-262 : Norme d'application nationale de l'Eurocode 7 – fondations profondes ;
 - NFP 94-281 : Norme d'application nationale de l'Eurocode 7 – ouvrages de soutènement – murs.

1.2 L'Eurocode 0 – Bases des calculs de structure

L'Eurocode 0 (NF EN 1990) traite des bases des calculs de structure.

1.2.1 Exigences de base

Le calcul des structures en béton doit être conforme aux règles générales données dans l'EN 1990.

Les exigences de base de la NF EN 1990 section 2 sont réputées satisfaites lorsque sont remplies conjointement les conditions ci-après :

- ▶ calcul aux états limites avec la méthode des coefficients partiels et combinaisons d'actions selon la NF EN 1990 ;

- ▶ actions conformes à la NF EN 1991 ;
- ▶ résistance, durabilité et aptitude au service conformes à l'EN 1992.

1.2.2 Gestion de la fiabilité

La fiabilité requise pour les structures doit être obtenue :

- ▶ par un dimensionnement conforme aux NF EN 1990 à 1999 ;
- ▶ par des mesures appropriées en matière d'exécution, et de gestion de la qualité.

1.2.3 Durée d'utilisation de projet

La durée d'utilisation de projet doit être normalement spécifiée. Elle est fonction de la catégorie de durée d'utilisation de projet (tableau ci-après).

Durée d'utilisation – Valeurs de l'Annexe nationale [NA]

Catégorie	Durée d'utilisation	Exemples
1	10 ans	Structures provisoires
2	25 ans	Éléments structuraux remplaçables, par exemple appareils d'appui
3	25 ans	Structures agricoles et similaires
4	50 ans	Structures de bâtiments et autre structures courantes
5	100 ans	Structures monumentales de bâtiments, ponts et autres ouvrages de génie civil

1.2.4 Principes du calcul aux états limites

Les états limites sont des états idéalisés qui ne doivent pas être atteints sous peine de ne plus permettre à la construction de satisfaire les exigences du projet.

■ Situations de projet

Le recensement des états limites suppose une analyse des différentes situations que l'on peut raisonnablement s'attendre à rencontrer lors de l'exécution ou de l'utilisation de la construction.

Dans les cas courants, on distingue :

- ▶ les situations durables, qui font référence aux conditions d'utilisation normales ;
- ▶ les situations transitoires, qui font référence à des conditions temporaires, par exemple en cours de construction ou de réparation ;
- ▶ les situations accidentelles, qui font référence à des conditions exceptionnelles comme un incendie, une explosion ou un choc ;
- ▶ les situations sismiques, qui font référence aux conditions rencontrées lors de tremblements de terre.

■ États limites ultimes

Les états limites ultimes sont associés à une rupture. Ils concernent la sécurité des personnes et/ou la sécurité de la structure.

L'Eurocode classe les états limites ultimes en EQU, qui correspond à une perte d'équilibre statique, STR, qui correspond à une défaillance d'éléments structuraux, GEO, qui correspond à une défaillance du sol, et FAT, qui correspond à une défaillance due à la fatigue.

■ États limites de service

Les états limites de service rendent l'usage incompatible avec les exigences de fonctionnement, de confort pour les usagers ou d'aspect.

Une distinction doit être faite entre les états limites de services réversibles, pour lesquels on considère les combinaisons fréquentes et quasi-permanentes, et les états limites irréversibles pour lesquels on considère les combinaisons caractéristiques.

1.2.5 Vérification par la méthode des coefficients partiels

Les règles relatives à la méthode des coefficients partiels, et les formats de combinaisons d'actions pour les états limites ultimes et de service sont donnés dans l'Eurocode 0 section 6.

On doit vérifier que dans toutes les situations de projet à examiner, aucun état limite n'est dépassé.

■ Valeurs de calcul des effets des actions

La valeur de calcul F_d d'une action F peut s'exprimer sous forme générale par :

$$F_d = \gamma_f F_{\text{rep}}$$

où F_{rep} est la valeur représentative appropriée de l'action, et γ_f un coefficient partiel pour l'action ; $F_{\text{rep}} = \psi F_k$; F_k est la valeur caractéristique de l'action.

Pour un cas de charge spécifique, la valeur de calcul E_d de l'effet des actions peut s'exprimer sous forme générale par :

$$E_d = \gamma_{\text{Sd}} E\{\gamma_{f,i} F_{\text{rep},i} ; a_d\}$$

avec a_d la valeur de calcul des données géométriques, et γ_{Sd} un coefficient partiel tenant compte des incertitudes dans la modélisation des effets des actions.

Dans la plupart des cas, on peut simplifier en écrivant :

$$E_d = E\{\gamma_{F,i} F_{\text{rep},i} ; a_d\}$$

avec $\gamma_{F,i} = \gamma_{\text{Sd}} \gamma_{f,i}$.

■ Valeurs de calcul de la résistance

La valeur de calcul X_d d'une propriété de matériau peut s'exprimer sous forme générale par :

$$X_d = \eta \frac{X_k}{\gamma_m}$$

où X_k est la valeur caractéristique du matériau ; η est un coefficient de conversion qui tient compte des paramètres tels que les effets du volume,

de l'humidité ou de la température ; γ_m est un coefficient partiel pour la propriété du matériau.

La valeur de calcul R_d de la résistance peut s'exprimer sous forme générale par :

$$R_d = \frac{1}{\gamma_{Rd}} R\{X_{d,i} ; a_d\} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} R\left\{\eta_i \frac{X_{k,i}}{\gamma_{m,i}} ; a_d\right\}$$

avec γ_{Rd} un coefficient partiel qui couvre l'incertitude du modèle de résistance.

Dans la plupart des cas, on peut simplifier en écrivant :

$$R_d = R\left\{\eta_i \frac{X_{k,i}}{\gamma_{M,i}} ; a_d\right\}$$

avec $\gamma_{M,i} = \gamma_{Rd} \gamma_{m,i}$.

■ Coefficients partiels γ_m sur les matériaux

Le coefficient partiel sur le béton γ_c et le coefficient de sécurité partiel sur l'acier γ_s ont les valeurs suivantes :

	γ_c	γ_s
Pour les combinaisons fondamentales	1,5	1,15
Pour les combinaisons accidentelles, à l'exception du séisme	1,2	1,0
Pour les combinaisons sismiques	1,3	1,0
Pour les états limites de service	1,0	1,0

■ Coefficients partiels réduits γ_m sur les matériaux

L'Annexe A de l'Eurocode 2, informative, donne des recommandations pour des coefficients partiels réduits relatifs aux matériaux.

□ Réduction basée sur des tolérances réduites

Si l'exécution est soumise à un système de contrôle de la qualité qui garantit que les écarts défavorables des dimensions de la section droite sont inférieurs aux tolérances réduites données dans le tableau ci-dessous,

le coefficient partiel pour les armatures peut être réduit à la valeur $\gamma_{s,red1} = 1,1$.

En outre, s'il est démontré que le coefficient de variation de la résistance du béton n'est pas supérieur à 10 %, le coefficient partiel relatif au béton peut être réduit à la valeur $\gamma_{c,red1} = 1,4$.

Tolérances réduites

h ou b (mm)	≤ 150	400	$\geq 2\ 500$
Tolérance sur les dimensions de la section transversale $\pm\Delta h, \pm\Delta b$ (mm)	5	10	30
Tolérance sur la position moyenne des armatures dans la direction défavorable pour la hauteur utile (mm)	5	10	20

On peut effectuer une interpolation pour les valeurs intermédiaires.

□ Réduction basée sur l'utilisation, pour le calcul, de données géométriques réduites ou mesurées

Si le calcul de la résistance est basé sur des données géométriques critiques, y compris la hauteur utile, qui sont, soit réduites par les imperfections, soit mesurées dans la structure finie, les coefficients partiels peuvent être réduits aux valeurs $\gamma_{s,red2} = 1,05$ et $\gamma_{c,red2} = 1,45$.

En outre, s'il est démontré que le coefficient de variation de la résistance du béton n'est pas supérieur à 10 %, le coefficient partiel relatif au béton peut être réduit à la valeur $\gamma_{c,red3} = 1,35$.

□ Réduction basée sur l'évaluation de la résistance du béton dans la structure finie

Pour des valeurs de résistance du béton mesurées sur des essais dans un élément ou une structure terminés (voir l'EN 13791¹, l'EN 206/CN et les normes de produit appropriées), γ_c peut être réduit au moyen du coefficient de conversion $\eta = 0,85$.

¹ NF EN 13791 & CN : Évaluation de la résistance à la compression sur site des structures en béton.

Cependant, après application des réductions éventuelles telles qu'envisagées précédemment, la valeur résultante du coefficient partiel ne devrait pas être prise inférieure à $\gamma_{c,red4} = 1,3$.

1.2.6 États limites ultimes

■ Vérification de l'équilibre statique et de la résistance

Lorsque l'on considère un état limite d'équilibre statique (EQU), il faut vérifier que :

$$E_{d,dst} \leq E_{d,stb}$$

avec $E_{d,dst}$ la valeur de calcul de l'effet des actions déstabilisatrices, et $E_{d,stb}$ la valeur de calcul de l'effet des actions stabilisatrices.

Lorsque l'on considère un état limite de rupture ou de déformation excessive (STR ou GEO), il faut vérifier que :

$$E_d \leq R_d$$

avec E_d la valeur de calcul de l'effet des actions, et R_d la valeur de calcul de la résistance correspondante.

■ Combinaisons d'actions pour situations durables ou transitoires

Les combinaisons fondamentales à considérer s'écrivent symboliquement :

□ Vérification des états limites EQU (ensemble A)

$$1,10G_{k,sup} + 0,90G_{k,inf} + 1,50Q_{k,1} + 1,50 \sum \psi_{0,i} Q_{k,i>1}$$

□ Vérification des états limites STR ou GEO (ensemble B)

$$1,35G_{k,sup} + 1,00G_{k,inf} + 1,50Q_{k,1} + 1,50 \sum \psi_{0,i} Q_{k,i>1}$$

- ▶ $G_{k,\text{sup}}$ actions permanentes défavorables. Lorsque la prise en compte des effets du retrait est requise pour l'état limite ultime, il convient d'utiliser un coefficient partiel relatif aux effets du retrait $\gamma_{\text{SH}} = 1,0$.
- ▶ $G_{k,\text{inf}}$ actions permanentes favorables.
- ▶ $Q_{k,1}$ action variable dominante. Lorsqu'une action variable est physiquement bornée, le coefficient 1,50 est remplacé par 1,35.
- ▶ $Q_{k,i>1}$ actions variables d'accompagnement.

■ **Combinaisons d'actions pour situations accidentelles ou sismiques**

Les combinaisons accidentelles à considérer s'écrivent symboliquement :

$$G_{k,\text{sup}} + G_{k,\text{inf}} + A_d + (\psi_{1,1} \text{ ou } \psi_{2,1}) Q_{k,1} + \sum \psi_{2,i} Q_{k,i>1}$$

Nota : Le choix entre $\psi_{1,1}$ ou $\psi_{2,1}$ dépend de la nature de l'action accidentelle. Lorsque l'action accidentelle est un incendie, le coefficient de combinaison à considérer est $\psi_{1,1}$ (voir chapitre 11).

Les combinaisons sismiques à considérer s'écrivent symboliquement :

$$G_{k,\text{sup}} + G_{k,\text{inf}} + A_{\text{Ed}} + \sum \psi_{2,i} Q_{k,i \geq 1}$$

■ **Combinaisons d'actions en cas de présence d'eau souterraine**

□ **F_w action des eaux souterraines sur les structures**

Les actions dues à l'eau dans le sol sont définies à travers les situations de projet correspondant aux niveaux définis dans les documents particuliers du marché EB, EF, EH, EE (voir le chapitre 3 pour plus d'informations). Pour former les combinaisons d'actions, les actions dues à l'eau sont traitées comme des actions permanentes.

Lorsque l'action variable dominante sur la structure est celle due à l'eau souterraine, les combinaisons s'écrivent symboliquement :

- ELU EQU :
 $1,10 \cdot G_{k,\text{sup}} + 0,95 \cdot G_{k,\text{inf}} + F_{w,\text{EE}} + 1,50 \cdot Q_{k,1} + 1,50 \sum \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i>1}$
- ELU STR ou GEO, si l'action de l'eau est défavorable :
 $1,35 \cdot G_{k,\text{sup}} + 1,00 \cdot G_{k,\text{inf}} + 1,20 \cdot F_{w,\text{EH}} + 1,50 \cdot Q_{k,1} + 1,50 \sum \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i>1}$
- ELU STR ou GEO, si l'action de l'eau est favorable :
 $1,35 \cdot G_{k,\text{sup}} + 1,00 \cdot G_{k,\text{inf}} + 1,00 \cdot F_{w,\text{EB}} + 1,50 \cdot Q_{k,1} + 1,50 \sum \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i>1}$

1.2.7 États limites de service

■ Vérifications

Lorsque l'on considère un état limite de service, il faut vérifier que :

$$E_d \leq C_d$$

avec E_d la valeur de calcul de l'effet des actions spécifiées dans le critère d'aptitude au service considéré, et C_d la valeur limite de calcul du critère d'aptitude au service considéré.

■ Combinaisons d'actions

Les combinaisons caractéristiques à considérer s'écrivent symboliquement :

$$G_{k,\text{sup}} + G_{k,\text{inf}} + Q_{k,1} + \sum \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i>1}$$

Les combinaisons fréquentes à considérer s'écrivent symboliquement :

$$G_{k,\text{sup}} + G_{k,\text{inf}} + \psi_{1,1} Q_{k,1} + \sum \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i>1}$$

Les combinaisons quasi-permanentes à considérer s'écrivent symboliquement :

$$G_{k,\text{sup}} + G_{k,\text{inf}} + \sum \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i \geq 1}$$

1.3 L'Eurocode 1 – Actions

Les actions sont données par les parties concernées de l'Eurocode 1.

Voir le chapitre 3 pour plus d'informations.

1.4 L'Eurocode 2 – Structures en béton

L'Eurocode 2 s'applique au calcul des bâtiments et des ouvrages de génie civil en béton non armé, en béton armé et en béton précontraint.

On se limite ici aux ouvrages en béton armé et non armé.

L'Eurocode 2 est destiné à être utilisé conjointement avec les normes NF EN 1990, NF EN 1991, NF EN 1997 et NF EN 1998, ainsi qu'avec les textes relatifs aux produits de construction en rapport avec les structures en béton et à l'exécution des ouvrages en béton.

Rappel

Dans l'ouvrage, les références entre crochets renvoient au numéro de l'article correspondant de l'Eurocode 2. Les prescriptions issues de l'annexe nationale sont identifiées [NA] et les prescriptions issues du guide d'application FD P18-717 sont identifiées [FD].

1.5 Notations utilisées dans les Eurocodes

■ Notations en majuscules latines

A	Action accidentelle
A	Aire de la section droite
A_c	Aire de la section droite du béton
A_s	Aire de la section des armatures de béton armé
$A_{s,min}$	Aire de la section minimale d'armatures

A_{sw}	Aire de la section des armatures d'effort tranchant
E	Effet des actions
$E_c, E_{c(28)}$	Module d'élasticité tangent à l'origine ($\sigma_c = 0$) pour un béton de masse volumique courante à 28 jours
$E_{c,eff}$	Module d'élasticité effectif du béton
E_{cd}	Valeur de calcul du module d'élasticité du béton
E_{cm}	Module d'élasticité sécant du béton
$E_c(t)$	Module d'élasticité tangent à l'origine ($\sigma_c = 0$) au temps t pour un béton de masse volumique courante
E_s	Valeur de calcul du module d'élasticité de l'acier de béton armé
EI	Rigidité en flexion
EQU	Équilibre statique
F	Action
F_d	Valeur de calcul d'une action
F_k	Valeur caractéristique d'une action
G_k	Valeur caractéristique d'une action permanente
I_c	Moment d'inertie de la section de béton
L	Longueur
M	Moment fléchissant
M_{Ed}	Valeur de calcul du moment fléchissant agissant
N	Effort normal
N_{Ed}	Valeur de calcul de l'effort normal agissant (traction ou compression)
Q_k	Valeur caractéristique d'une action variable
R	Résistance
S	Efforts et moments internes (Sollicitations)
S	Moment statique
SLS	État limite de service (ELS)
T	Moment de torsion
T_{Ed}	Valeur de calcul du moment de torsion agissant
ULS	État limite ultime (ELU)
V	Effort tranchant
V_{Ed}	Valeur de calcul de l'effort tranchant agissant

■ Notations en minuscules latines

a	Distance
a	Donnée géométrique
Δa	Tolérance pour les données géométriques

b	Largeur totale d'une section droite ou largeur réelle de la table d'une poutre en T ou en L
b_w	Largeur de l'âme des poutres en T, en I ou en L
b_{cst}	Largeur participante de la table de compression
d	Diamètre ; profondeur
d	Hauteur utile d'une section droite
d_s	Dimension nominale supérieure du plus gros granulat
e	Excentricité
f_c	Résistance en compression du béton
f_{cd}	Valeur de calcul de la résistance en compression du béton
f_{ck}	Résistance caractéristique en compression du béton, mesurée sur cylindre à 28 jours
f_{cm}	Valeur moyenne de la résistance en compression du béton, mesurée sur cylindre
f_{ctk}	Résistance caractéristique en traction directe du béton
f_{ctm}	Valeur moyenne de la résistance en traction directe du béton
$f_{0,2k}$	Valeur caractéristique de la limite d'élasticité conventionnelle à 0,2 % de l'acier de béton armé
f_t	Résistance en traction de l'acier de béton armé
f_{tk}	Résistance caractéristique en traction de l'acier de béton armé
f_y	Limite d'élasticité de l'acier de béton armé
f_{yd}	Limite d'élasticité de calcul de l'acier de béton armé
f_{yk}	Limite caractéristique d'élasticité de l'acier de béton armé
f_{ywd}	Limite d'élasticité de calcul des armatures d'effort tranchant
h	Hauteur
h	Hauteur totale de la section droite
i	Rayon de giration
k	Coefficient ; facteur
l (ou L)	Longueur ; portée
m	Masse
n	Coefficient d'équivalence acier-béton intégrant l'historique du chargement
r	Rayon
$1/r$	Courbure en une section donnée
t	Épaisseur
t	Instant considéré
t_0	Âge du béton au moment du chargement
u	Périmètre de la section droite de béton dont l'aire est A_c
u, v, w	Composantes du déplacement d'un point

x	Profondeur de l'axe neutre
x, y, z	Coordonnées
z	Bras de levier des forces internes

■ Notations en minuscules grecques

α	Angle ; rapport
β	Angle ; rapport ; coefficient
γ	Coefficient partiel
γ_A	Coefficient partiel relatif aux actions accidentelles A
γ_c	Coefficient partiel relatif au béton
γ_f	Coefficient partiel relatif aux actions F
γ_G	Coefficient partiel relatif aux actions permanentes G
γ_M	Coefficient partiel relatif à une propriété d'un matériau, compte tenu des incertitudes sur la propriété elle-même, sur les imperfections géométriques et sur le modèle de calcul utilisé
γ_Q	Coefficient partiel relatif aux actions variables Q
γ_s	Coefficient partiel relatif à l'acier de béton armé
γ_i	Coefficient partiel relatif aux actions, compte non tenu des incertitudes de modèle
γ_p	Coefficient partiel relatif aux actions permanentes, compte non tenu des incertitudes de modèle
γ_m	Coefficient partiel relatif à une propriété d'un matériau, seules les incertitudes sur la propriété du matériau étant prises en compte
δ	Incrément
ζ	Coefficient de réduction ; coefficient de distribution
ϵ_c	Déformation relative en compression du béton
ϵ_{c1}	Déformation relative en compression du béton au pic de contrainte
ϵ_{cu}	Déformation relative ultime du béton en compression
ϵ_s	Déformation relative de l'acier de béton armé sous charge maximale
ϵ_{sk}	Valeur caractéristique de la déformation relative de l'acier de béton armé sous charge maximale
θ	Angle
λ	Coefficient d'élanement
μ	Coefficient de frottement
ν	Coefficient de Poisson
ν	Coefficient de réduction de la résistance du béton fissuré en cisaillement
ρ	Masse volumique du béton séché en étuve, en kg/m^3
ρ_l	Pourcentage d'armatures longitudinales