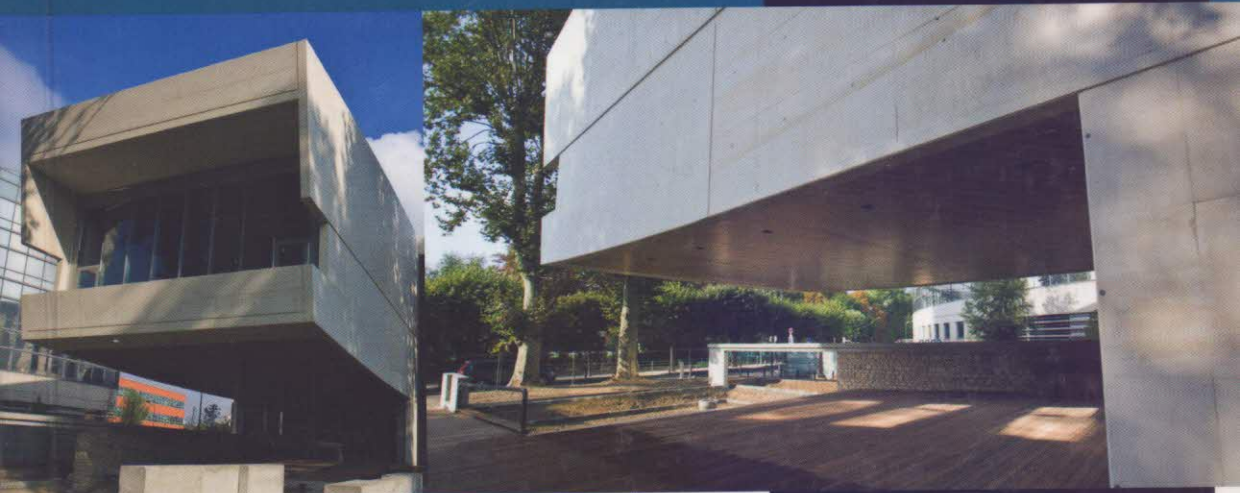


E U R O C O D E

Calcul des structures en béton

Guide d'application



Jean-Marie Paillé

afnor
ÉDITIONS

EYROLLES

TABLE DES MATIÈRES

Remerciements	1
Avant-propos	3
L'historique	3
Pourquoi les eurocodes ?	4
Où en est l'eurocode 2 ?	4
Quelle coexistence avec les règles actuelles ?	5
1. Rappels de l'eurocode 0 : bases de calcul des structures	6
2. Vérification par la méthode des coefficients partiels	7
3. Les principes du calcul aux états limites	8
4. Notions d'actions	8
4.1 Valeurs caractéristiques des actions	9
4.2 Les actions permanentes	9
4.3 Les actions variables	9
4.4 Les actions accidentelles	10
4.5 Les actions sismiques	10
4.6 Les actions de fatigue	10
4.7 Les actions dynamiques	10
4.8 Actions géotechniques	10
4.9 Autres notions d'actions utilisées dans les combinaisons d'actions	10
5. Propriétés des matériaux et des produits	11
6. Données géométriques	11
7. Analyse structurale	11
7.1 Modélisation structurale	11
7.2 Actions statiques	11
7.3 Actions dynamiques	12
7.4 Dimensionnement en cas d'incendie	13
8. Rappels sur la NF EN 1991 1-1	13
8.1 Les actions	13
8.1.1 Les charges permanentes	13
8.1.2 Charges d'exploitation	13
8.2 Disposition des charges	14
8.2.1 Planchers, poutres et toitures	14
8.2.2 Poteaux et murs	14
8.3 Valeurs caractéristiques des charges d'exploitation	14
8.3.1 Bâtiments résidentiels, sociaux, commerciaux ou administratifs	14
8.3.2 Valeurs des actions	15

8.3.3	Dispositions particulières	16
8.4	Cas des réductions des charges pour effet de surface	16
8.4.1	Coefficients de réduction pour les planchers et les toitures	16
8.4.2	Coefficients de réduction pour les poteaux et les murs	17
8.5	Aires de stockage et locaux industriels	18
8.5.1	Catégories	18
8.5.2	Valeurs des actions	18
8.5.3	Actions des chariots élévateurs	18
8.6	Garages et aires de circulation accessibles aux véhicules	19
8.6.1	Catégories	19
8.6.2	Valeurs des charges d'essieu	20
8.7	Toitures	20
8.7.1	Catégories	20
8.7.2	Valeurs des actions	21
8.8	Charges horizontales sur les garde-corps et les murs de séparation	21
9.	Valeurs caractéristiques des actions	22
10.	Les combinaisons d'actions et les états limites	23
10.1	Les différentes approches pour combiner les actions	23
10.1.1	Ensemble A : équilibre statique (EQU)	24
10.1.2	Ensemble B : dimensionnement des éléments structuraux (STR) + résistance du terrain (GEO)	25
10.1.3	Ensemble C : dimensionnement des éléments structuraux (STR) + résistance du terrain (GEO)	27
10.1.4	Valeurs de calcul des actions en situations accidentelles et sismiques	27
10.2	Exemples	28
10.2.1	Combinaison fondamentale ELU	28
10.2.2	Cas particulier des bâtiments	29
10.2.3	États limites de service (ELS)	29
10.2.4	États limites d'équilibre statique (EQU)	29
10.2.5	États limites en situations accidentelles et sismiques	29

I Matériaux : béton et acier 31

1.	Béton	31
1.1	Classes de résistance à la compression	31
1.1.1	Résistance de calcul pour la compression	31
1.2	Résistance à la traction	32
1.2.1	Traction moyenne	32
1.2.2	Traction de calcul	33
1.2.3	Traction flexion	33
1.3	Module de déformation	33
1.4	Prise en compte de l'âge du béton	34
1.4.1	Résistance à la compression f_{cm}	34
1.4.2	Résistance f_{ck} ou f_{cd}	35
1.4.3	Résistance à la traction f_{ctm} et f_{ctd}	35
1.4.4	Module en fonction du temps	36

1.5	Diagramme de contrainte déformation	36
1.5.1	Pour une analyse structurale (calcul des rotules plastiques, des flèches, retrait)	36
1.5.2	Pour une analyse au second ordre	37
1.5.3	Diagramme pour l'étude des sections	39
1.6	Cas particulier des BHP	43
1.7	Limites des compressions dans les bielles	45
1.7.1	Cas des bielles non tendues transversalement	45
1.7.2	Cas des bielles soumises à des tractions transversales	45
1.8	Limitation des contraintes de compression dans les nœuds	46
1.8.1	Cas du nœud soumis à aucune traction	46
1.8.2	Cas des nœuds en compression traction avec des armatures placées dans une seule direction	48
1.8.3	Cas des nœuds en compression traction avec des armatures placées dans plus d'une direction	49
1.8.4	Cas des compressions tri-axiales	49
1.9	Armatures reprenant les tractions exercées par les bielles	50
1.9.1	Comment estimer l'angle de diffusion de la bielle ?	51
1.9.2	Exemples de Discontinuity-regions	52
1.10	Coefficient de Poisson	53
1.11	Coefficient de dilatation thermique	53
1.12	Fluage	53
1.12.1	Coefficient de fluage pour des contraintes de compression modérée	53
1.12.2	Coefficient de fluage pour des contraintes de compression plus fortes	55
1.12.3	Coefficient de fluage effectif pour le calcul du second ordre	56
1.13	Déformation et module	56
1.13.1	Cas des compressions fortes ($> 0,45.f_{ck}$)	57
1.13.2	Cas des calculs du second ordre	58
1.14	Retrait	59
1.14.1	Valeurs usuelles du retrait ϵ_{cd} en ‰	60
1.14.2	Cas des BHP	62
1.14.3	Prise en compte des phénomènes de retrait et de température	63
2.	Les aciers	64
2.1	Les types d'aciers	64
2.2.	Diagramme contrainte déformation	66
2.2.1	Un diagramme général bilinéaire	66
2.2.2	Diagramme simplifié	68
2.3	Module d'élasticité	69
2.3.1	Cas des aciers Fe 500	69
2.4	Conditions limites	69

2 Notion de durabilité et principe de l'analyse structurale . 71

1.	Durabilité	71
1.1	Classes d'environnement	71

1.2	Effets indirects : retrait, fluage, température	75
1.3	Conditions d'enrobage	75
1.3.1	Condition sur les exigences d'adhérence	76
1.3.2	Condition sur la durabilité C _{min,dur} en fonction de l'environnement	76
1.3.3	Les tolérances	78
1.3.4	Conséquences directes pour les dalles	79
1.3.5	Exemple récapitulatif	80
1.3.6	Différence entre le classement de la NF EN 206-1 et l'EC 2 ?	81
2.	Analyse structurale	82
2.1	Généralités	82
2.1.1	Types d'analyse structurale	82
2.1.2	Cas de charges et combinaisons	82
2.1.3	Cas de charges et combinaisons simplifiées des annexes et des recommandations professionnelles	83
2.2	Imperfections	84
2.2.1	Imperfections géométriques	84
2.3	Modèles structuraux	87
2.3.1	Idéalisation de la structure	87
2.3.1.2	Dalles	87
2.3.2	Portées de calcul des poutres et des dalles	89
2.3.3	Écrêtement des moments sur appuis	91
2.3.4	Sollicitations au droit des appuis ou des poteaux	91
2.3.5	Table de compression	92
3.	Méthodes de calcul	92
3.1	Les types d'analyse	92
3.1.1	L'analyse linéaire élastique	93
3.1.2	L'analyse linéaire élastique avec redistribution limitée ...	93
3.1.3	L'analyse non linéaire	93
3.1.4	L'analyse plastique	93
3.1.5	Peut-on justifier une poutre à l'ELS avec une redistribution limitée ?	93
3.2	Analyse linéaire avec redistribution limitée	94
3.2.1	Principes	94
3.2.2	Conditions de fermeture des moments	95
3.2.3	Position française	97
3.3	Analyse non linéaire	97
3.3.1	Principe	97
3.3.2	Cas des ponts	100
3.3.3	Analyse plastique	101
3.3.4	Cas de la poutre continue à 3 travées	118
3.3.5	Cas des dalles	122
3.3.6	Application : cas d'une dalle uniformément chargée	126
3.3.7	Cas du portique	130
3.4	Annexe nationale française sur les planchers	136
3.4.1	Poutrelles et poutres des planchers à charge d'exploitation modérée	136

3.4.2	Poutrelles et poutres des autres planchers	137
-------	--	-----

3	Dispositions constructives relatives aux armatures	141
1.	Possibilité de bétonnage correct	141
1.1	Espacement des barres	141
1.2	Cas particulier des paquets	142
2.	Courbures admissibles	142
2.1	Aciers	142
2.1.1	Cas des barres et des fils	142
2.1.2	Cas des assemblages soudés (barres et treillis) pliés après soudage	142
2.2	Béton	143
3.	Adhérence	144
3.1	Conditions d'une bonne adhérence	145
3.2	Contrainte d'adhérence ultime	145
4.	Longueurs d'ancrage	146
4.1	Longueur d'ancrage de référence	146
4.2	Longueur d'ancrage de calcul	147
4.3	Valeurs minimales des longueurs de scellement	150
4.4	Ancrage des cadres	151
5.	Longueur de recouvrement	152
5.1	Recouvrement des barres	152
5.2	Couture des recouvrements	153
5.2.1	Zones tendues	154
5.2.2	Zones comprimées	154
5.2.3	Cas des treillis soudés	155
5.2.4	Cas des boîtes d'attentes	157
6.	Cas des barres de fort diamètre	158
7.	Paquets de barres	159
7.1	Ancrage des paquets de barres	160
7.2	Recouvrement de paquets de barres	160
4	Les états limites ultimes de flexion	163
1.	Calcul de l'état limite ultime de résistance	163
1.1	Hypothèses fondamentales	163
1.2	Diagrammes de calcul des contraintes béton	164
1.2.1	Diagramme parabolique	164
1.2.2	Diagramme de calcul simplifié	166
2.	Cas des sections rectangulaires	167
2.1	Notations	167
2.2	Calcul des armatures	168
2.2.1	Principe du calcul avec le diagramme réel des aciers	168
2.2.2	Cas des aciers avec diagramme simplifié	172
2.2.3	Cas des bétons de résistance $f_{ck} > 50$ MPa	173
2.2.4	Calcul de l'armature tendue dans le cas où les aciers comprimés sont connus	175
2.3	Calcul du moment résistant ultime	176

2.4	Exemples numériques	177
2.4.1	Exemple n° 1	177
2.4.2	Exemple n° 2	178
2.4.3	Exemple n° 3	179

5	Tranchant aux états limites ultimes	181
1.	Définitions	181
2.	Cas où aucune armature d'effort tranchant n'est requise	183
2.1	Effort tranchant résistant ultime $V_{Rd,c}$	183
2.1.1	Cisaillement minimum $\tau_{Rd,cmin}$ en flexion simple	185
2.1.2	Cisaillement résistant ultime $\tau_{Rd,c}$	185
2.1.3	Annexe nationale française pour les dalles et les voiles ...	186
3.	Cas où les armatures transversales sont requises	187
3.1	Treillis de Morsch selon l'eurocode 2	187
3.1.1	Origine des formules utilisées par l'eurocode 2	188
3.1.2	Armatures d'âmes droites	190
3.1.3	Armatures inclinées à 45°	191
3.2	Application aux armatures droites	192
3.2.1	Cisaillement ultime sous flexion simple ou composée avec compression	192
3.2.2	Cisaillement ultime en flexion composée avec traction ...	193
3.2.3	Signification du coefficient σ_{cw}	195
3.2.4	Cisaillements ultimes en flexion simple avec des bielles inclinées à 45°	196
3.2.5	Définition de l'angle limite en flexion simple	196
3.2.6	Application à la détermination des armatures droites en flexion simple	197
3.2.7	Cas de la bielle d'inclinaison 45° en flexion simple	200
3.2.8	Vérification rapide d'une poutre	201
3.2.9	Vérification en flexion composée	201
3.2.10	Section maximale des armatures d'effort tranchant droites avec bielles à 45°	202
3.3	Cas général des armatures inclinées	202
3.3.1	Cisaillement ultime avec des armatures et bielles inclinées à 45° en flexion simple	202
3.3.2	Détermination des armatures inclinées en flexion composée	203
3.3.3	Section maximale des armatures d'effort tranchant avec bielles à 45°	204
4.	Charges près des appuis	205
4.1	Cas des charges ponctuelles	205
4.1.1	Éléments sans armatures transversales	205
4.1.2	Éléments avec armatures transversales	206
4.1.3	Détermination pratique des cadres	208
4.2	Cas des charges réparties	209
4.2.1	Charges appliquées au-dessus de la poutre	210
4.2.2	Charges situées sous la poutre	211

5.	Décalage de la courbe des moments	211
5.1	Rappel sur le treillis de Ritter-Morsch	211
5.2	Décalage selon l'eurocode 2	214
5.3	Cas particulier des armatures droites et des bielles à 45°	214
6.	Répartition des armatures d'effort tranchant	215
6.1	Principe du calcul des répartitions	215
6.1.1	Épure d'arrêt des armatures d'effort tranchant	216
6.1.2	Problème de la variation de l'inclinaison des bielles	218
6.2	Cas des charges ponctuelles et réparties	219
6.2.1	Calcul du V_{Ed} à l'about	219
6.2.2	Exemple	220
7.	Justification en zone d'about	226
7.1	Ancrage des bielles sur appuis	226
7.1.1	Cas particulier d'un effort normal	229
7.1.2	Cas des armatures droites	229
7.2	Vérification de la bielle d'about	230
7.2.1	Vérification de la bielle	230
7.2.2	Autre approche du problème de la bielle d'about	232
7.2.3	Cas particulier de la bielle à 45°	234
7.2.4	Dispositions particulières pour les bielles d'about saturées	234
7.2.5	Bielles d'about des poutres à talon	236
8.	Ouvertures dans les poutres	237
8.1	Cas des petites ouvertures	237
8.1.1	Définition	237
8.1.2	Principe	238
8.1.3	Justifications	239
8.2	Cas des grandes ouvertures	239
8.2.1	Définition	239
8.2.2	Ouverture isolée	240
8.2.3	Principe des calculs	240
8.2.4	Étude de la zone de raccordement	244
8.3	Ouvertures successives	245
8.3.1	Principe	245
8.3.2	Zone d'about	246
9.	Grande ouverture proche d'un appui	247
9.1	Montant d'appui de largeur assez grande	247
9.2	Cas des variations d'inertie de poutres	248
9.2.1	Ouverture en partie supérieure	248
9.2.3	Ouverture en partie inférieure	248

6 Flexion-tranchant – Dispositions constructives des poutres et des dalles

1.	Les poutres	249
1.1	Armatures de flexion	249
1.1.1	Pourcentage minimum d'armatures longitudinales	249
1.1.2	Pourcentage maximum	249

1.1.3	Dispositions relatives aux appuis	249
1.1.4	Épure d'arrêt des barres	250
1.1.5	Cas des barres relevées	253
1.2	Armatures transversales	254
1.2.1	Pourcentage minimum d'armatures transversales	254
1.2.2	Pourcentage maximum d'armatures transversales	254
1.2.3	Espacement longitudinal maximum	255
1.2.4	Espacement transversal	255
1.2.5	Assemblage des armatures transversales	256
1.3	Ancrage des armatures longitudinales	257
1.3.1	Valeur minimale de l'effort à ancrer en rive	257
1.3.2	Cas d'appuis directs ou indirects	257
1.3.4	Ancrage des armatures inférieures sur appuis intermédiaires	258
1.3.5	Armatures de peau	259
1.3.6	Cas particulier des enrobages > 70 mm	260
1.4	Appui d'une poutre sur une autre poutre	261
1.5	Décrochement d'un hourdis comprimé	262
2.	Les dalles	262
2.1	Pourcentage d'acier minimum de flexion	262
2.2	Espacement des armatures	263
2.3	Moment minimum sur appui	263
2.3.1	Cas des rives	263
2.3.2	Arrêt des barres	263
2.4	Cas du tranchant	263
2.4.1	Ancrage minimum	264
2.4.2	Espacement des barres vis-à-vis du tranchant	264
3.	Plancher-dalle	265
3.1	Définition des bandes de flexion	265
3.1.1	Répartition des moments	266
3.1.2	Dispositions relatives au tranchant	266

7 Les états limites de service et de déformation 269

1.	ELS : états limites de service	269
1.1	Dispositions au niveau béton	269
1.2	Dispositions au niveau acier	270
1.3	Maîtrise de la fissuration	270
1.3.1	Considérations générales	270
1.3.2	Notion d'ouverture de fissures	270
1.4	Méthodes de vérification des contraintes	272
1.5	Pourcentage d'aciers minimum	274
1.6	Contrôle de la fissuration sans calcul direct : cas général	278
1.6.1	Valeurs tabulées	278
1.6.2	Méthodes forfaitaires proposées par la France	282
1.6.3	Cas des poutres de hauteur > 1 m	283
1.6.4	Armatures de peau pour les poutres de plus de 1 m de hauteur	283

1.6.5	Contrôle de la fissuration sans calcul direct : cas des dalles	284
1.7	Calcul de l'ouverture des fissures	284
1.7.2	Annexe nationale française	287
1.7.3	Cas de plusieurs diamètres de barres	288
1.7.4	Cas des voiles épais	289
1.7.5	Cas des éléments armés dans deux directions	289
1.7.6	Autre approche du calcul de la fissuration	290
1.8	Cas des réservoirs	290
1.8.1	Principe	291
1.8.2	Maîtrise de la fissuration sans calcul direct	292
1.8.3	Évaluation simplifiée des contraintes des éléments soumis à des déformations gênées	296
2.	Application : cas des sections rectangulaires à l'ELS	297
2.1	Notations	297
2.2	Formules	298
2.3	Exemples d'application	300
2.4	Exemple de calcul d'ouverture de fissures	302
2.5	Exemple de section entièrement tendue	303
3.	États limites de déformation	305
3.1	Principes du code modèle CEB FIP 1990	305
3.1.1	Définition des stades	305
3.1.2	Comportement à l'état fissuré	307
3.2	Considérations générales	309
3.3	Cas où le calcul des flèches peut être omis	310
4.	Vérification des flèches par le calcul	312
4.1	Cas des sections non fissurées	312
4.2	Cas des sections fissurées	312
4.2.2	Principe du calcul des flèches	315
4.2.3	Méthode simplifiée	315
4.2.4	Cas des bâtiments	316
8	Exercices sur les poutres	321
1.	Poutre isostatique	321
1.1	Justification vis-à-vis de la flexion	322
1.1.1	Détermination des données	322
1.1.2	Calcul des aciers de flexion sous $M_u = 5,25 \text{ MNm}$	323
1.1.3	Vérifications à l'état limite de service	325
1.2	Justification au tranchant	328
2.	Vérification du béton et dimensionnement des armatures transversales	329
2.1	Détermination des cisaillements	329
3.	Zones d'about	334
3.1	Ancrage de la bielle	334
3.2	Bielle d'about	334
3.3	Longueur d'ancrage	336
3.4	Vérification de la bielle	340

2.	Poutres continues	340
2.1	Évaluation des moments	341
2.1.1	Recherche du moment maximum sur l'appui intermédiaire B	341
2.1.2	Recherche du moment maximum sur la première travée ..	341
2.1.3	Recherche du moment maximum sur la deuxième travée .	342
2.1.4	Récapitulatif	343
2.2	Comparaison avec le BAEL	344
3.	Exemple de dalles continues	345
3.1	Définition des portées	345
3.2	Actions	346
3.3	Calcul des sollicitations	346
3.3.1	Recherche du moment maximum sur appui sans redistribution	347
3.3.2	Recherche du moment mini sur appui correspondant au moment maxi en travée	347
3.3.3	Récapitulatif	351
3.3.4	Comparaison avec le BAEL	351
3.3.5	Calcul des armatures de flexion	352
3.3.6	Vérification de l'effort tranchant	356
3.4	État limite de service de compression et de traction	357
3.5	État limite de service de fissuration	358
3.6	État limite de service de déformation	358
3.6.1	Méthode rapide	358
3.6.2	Calcul de la flèche selon l'EC 2 (sans Annexe nationale)	358
4.	Étude d'une réservation dans une poutre (tranchant + traction) ...	360
4.1	Rappel	360
4.2	Action d'ensemble	362
4.2.1	Traverse supérieure	362
4.2.2	Traverse inférieure	364

9 Coutures des membrures – Coutures des surfaces de reprise **369**

1.	Liaison hourdis nervure	369
1.1	Principes	369
1.1.1	Cas du bâtiment	369
1.1.2	Cas des Ponts	371
1.1.3	Dérogation au calcul des coutures des tables	371
1.2	Méthodes	372
1.2.1	Détermination de ΔF_d	372
1.2.2	Évaluation de l'angle des bielles	373
1.2.3	Aciers de couture de la jonction	373
1.2.4	Comparaison avec la méthode du BAEL	373
1.3	Cas des talons tendus ou aciers en saillie de la table pour une poutre soumise à un moment négatif	374
1.4	Cumul du tranchant et de la flexion transversale	374
1.5	Effort tranchant et flexion transversale dans le cas de poutres caissons	375

2. Exemple	375
2.1 Calcul de la couture par l'EC 2	375
2.2 Cas de l'approche BAEL	376
2.3 Vérification du cisaillement limite	377
3. Règle des coutures	378
3.1 Principe	378
3.2 Disposition des aciers de couture	382
3.3 Application aux murs de grandes dimensions en béton peu armé en zone sismique	382
10 Torsion	383
1. La torsion	383
1.2 Cisaillement de torsion	383
1.2.1 Cas des sections creuses	383
1.2.2 Cas des sections pleines	383
1.2.3 Cas des sections de forme complexe	384
2. Principes	385
2.1 Armatures transversales	386
2.2 Armatures longitudinales	386
3. Limitation de la compression des bielles	387
4. Cas d'actions combinées tranchant et torsion	387
4.3 Cas des poutres de ponts ou ouvrages d'art	389
4.3.1 Pour les sections pleines	389
4.3.2 Pour les caissons	390
5. Cas particulier du pourcentage d'acier minimum des poutres	391
6. Dispositions constructives	391
7. Exercice	392
11 Poinçonnement	395
1. Poinçonnement	395
1.1 Définitions	395
1.2 Principes	395
1.2.1 Les contours de contrôle	397
1.2.2 Détermination du facteur d'excentricité de la charge β	398
1.2.3 Cas particulier des trémies situées à moins de $6d$ d'un poteau ou d'une charge	401
1.3 Cisaillement limite sans armatures de renfort	401
1.3.1 Vérification au niveau de la section de contrôle de référence	401
1.3.2 Vérification au nu du poteau	402
1.3.3 Cas particulier des semelles de fondations	404
1.4 Cisaillement limite avec armatures de renfort	405
1.4.1 Cisaillement limite en présence d'armatures de poinçonnement	405
1.4.2 Non-écrasement des bielles	406
1.4.3 Détermination du contour où les armatures ne sont plus requises	406

1.5	Cas particulier des dalles	407
1.6	Dispositions constructives	407
1.7	Exemples	409
1.7.1	Exemple 1	409
1.7.2	Exemple 2	409

12 Analyse du second ordre – Cas des poteaux 413

1.	Instabilité élastique et flambement	413
1.1	Les définitions	413
1.2	Force critique de flambement	413
1.2.1	Notion de force critique d'Euler	414
1.2.2	Déformées de second ordre	415
2.	Les méthodes simplifiées	415
2.1	Cas des bâtiments	415
2.2	Systèmes de contreventement sans déformation significative d'effort tranchant	416
2.3	Cas où la déformation par tranchant n'est pas négligeable	418
3.	Imperfections géométriques	418
3.1	Inclinaison forfaitaire	419
3.2	Cas des éléments isolés	420
3.2.1	Cas des poteaux inclinés dans le même sens et contreventés	421
3.2.2	Cas des poteaux inclinés en opposition et contreventés ...	421
3.2.3	Cas d'un poteau incliné de toiture	421
3.2.4	Cas des murs ou des poteaux isolés dans des structures à nœuds fixes	422
3.3	Excentricité minimum	422
4.	Longueurs de flambement	422
4.1	Estimation des longueurs de flambement	422
4.1.1	Cas des poteaux isolés	423
4.1.2	Cas du poteau de hauteur l à nœuds fixes	423
4.1.3	Cas du poteau à nœuds déplaçables	423
4.1.4	Autre cas	425
4.1.5	Remarques complémentaires	426
4.2	Comparatif avec les méthodes françaises	426
4.2.1	Cas des poteaux isolés	426
4.2.2	Ossatures à nœuds déplaçables	428
4.3	Prise en compte des voiles transversaux	430
5.	Effets du second ordre négligés	432
5.1	Cas des poteaux isolés	432
5.1.1	Cas particulier des poteaux à nœuds fixes ou contreventés	434
5.1.2	Cas particulier des poteaux à nœuds déplaçables (comme un mat)	434
5.1.3	Autre critère de simplification	435
6.	Méthodes de calcul	435
6.1	Méthode générale par analyse non linéaire	435
6.1.1	Notion de fluage efficace	437

6.1.2	Courbes contraintes déformations sous fluage	438
6.1.3	Prise en compte du béton tendu	441
6.1.4	Cas où le fluage n'est pas pris en compte	444
6.2	Méthode d'analyse basée sur une rigidité nominale	444
6.2.1	Estimation de la raideur nominale	445
6.2.2	Commentaires des background	447
6.3	Méthode par amplification des moments	449
6.3.1	Cas d'un moment de second ordre d'allure sinusoïdale	449
6.4	Méthode par estimation des courbures	451
6.4.1	Principe de la méthode	451
6.4.2	Comment évaluer la courbure $1/r$?	453
6.4.3	Cas des sections rectangulaires	454
6.4.4	Principes généraux de justifications.....	457
6.5	Poteaux sous compression centrée : Annexe nationale	458
6.5.1	Pour les poteaux rectangulaires courants	458
6.5.2	Cas des sections circulaires	458
6.6	Les méthodes usuelles françaises	459
6.6.1	Notion d'excentricité interne et externe	459
6.6.2	Méthode simple de l'équilibre	464
6.6.3	La colonne modèle	466
6.7	Examen de cas particuliers	468
6.7.1	Charge unique en tête	468
6.7.2	Appui élastique en pied	469
6.7.3	Charges à plusieurs niveaux	471
6.7.4	Prise en compte d'une charge uniformément répartie sur la hauteur du mat	471
6.7.5	Cas du poteau précontraint	472
6.7.6	Cas des piles de contreventement	473
7.	Dispositions constructives des poteaux	474
7.1	Dispositions particulières	474
7.1.1	Armatures longitudinales	474
7.1.2	Armatures transversales	474
7.1.3	Cas des poteaux présentant une réduction de section	476
7.1.4	Cas du poteau circulaire	476
7.1.5	Récapitulatif	476
7.2	Dimensionnement d'un poteau	476
8.	Instabilité latérale des poutres élancées	477
9.	Exercices d'application	478
9.1	Exercice 1 : méthode de la rigidité nominale	478
9.2	Exercice 2 : méthode de la courbure	480
9.3	Exercice 3 : méthode simplifiée et méthode de la courbure	483
9.4	Exercice 4 : détermination des longueurs de flambement	487
9.5	Méthode de l'équilibre	493

13 Les fondations profondes 501

1.	Fondations de type puits et pieux	501
1.1	Contrainte de référence	501
1.1.1	Comparaisons avec le DTU 13-2 Fondations profondes ..	501

1.2	Semelle sur un pieu ou un puits	502
1.2.1	Les principes	502
1.2.2	Disposition de ferrailage	503
1.3	Calcul du chevêtre	504
1.3.1	Traction dans le tirant	504
1.3.2	Comparatif des méthodes	506
1.3.3	Vérification des bielles de compression	506
1.3.4	Comparatif avec le BAEL	511
1.4	Exemple	511
2.	Cas du chevêtre soumis à un moment	514
2.2	Cas où les pieux ne sont pas tendus	514
2.2	Cas où un pieu est tendu	516
3.	Recommandations françaises	517
3.1	Cas de deux pieux	517
3.1.1	Limitation de la contrainte de compression des bielles	518
3.1.2	Armatures principales	519
3.1.3.	Armatures supérieures	520
3.1.4	Armatures de répartition verticales	520
3.2	Cas de trois pieux	520
3.2.1	Domaine de validité	520
3.2.2	Limitation de la contrainte de la compression des bielles .	521
3.2.3	Armatures principales	522
3.2.4	Armatures disposées en cerces avec un quadrillage de répartition	522
3.2.5	Armatures disposées en cerces et suivant les médianes	523
3.3	Cas de quatre pieux	524
3.3.1	Domaine de validité, hypothèses	524
3.3.1	Limitation de la contrainte de compression des bielles	524
3.3.2	Armatures principales	525

14 Les semelles de fondation 529

1.	Semelles filantes et isolées	529
1.1	Dimensionnement de la semelle	529
1.1.1	Cas de la semelle sous charge centrée	529
1.1.2	Cas de la semelle soumise à un moment	529
1.1.3	État limite de service vis-à-vis des déformations	530
1.1.4	Recommandations françaises	531
1.2	Semelles non armées transversalement	532
1.3	Semelles armées transversalement	533
1.3.1	Principe des calculs d'une semelle soumise à N_u , M_u	533
1.3.2	Détermination des aciers	534
1.3.3	Arrêt des barres	535
1.3.4	Approximations reconduites par les recommandations	538
1.4	Armatures minimales de chaînage	540
1.5	Aciers en attente	541
1.6	Vérification du non-poinçonnement	541
1.6.1	Définition de la section de contrôle	541
1.6.2	Cas d'une charge centrée	542

1.6.3	Cas des semelles avec moment	543
1.7	Cas particuliers traités par l'Annexe française	545
1.7.1	Fondations à des niveaux différents	545
1.7.2	Fondations superficielles à proximité d'ouvrages sur pieux	546
1.7.3	Fondations au voisinage de fouilles et talus	546
1.7.4	Précaution contre le gel	546
1.7.5	Béton de propreté	546
1.8	Les fondations à encuvement	547
1.8.1	Conception des encuvements à parois à clés	547
1.8.2	Encuvements à parois lisses	550
1.8.3	Règles de l'Art	550
1.8.4	Cas particulier de l'encuvement avec $\mu = 0$	550
1.8.5	Vérification du pied du poteau	552
1.8.6	Cas particulier de l'encuvement avec $\mu > 0$	553
2.	Exemples	554
2.1	Cas d'une charge centrée	554
2.2	Cas d'une charge excentrée	557
3.	Cas des murs de soutènement	560
3.1	Détermination des actions	560
3.1.1	Les approches	560
3.2	Exemple	562
3.2.1	Données	562
3.2.2	ELU de glissement sur la base	564

15 Les nœuds de portiques et les consoles courtes 571

1.	Les nœuds	571
1.1	Principe des justifications	571
1.2	Cas des moments négatifs	571
1.2.1	Poutres et poteaux de hauteurs comparables	571
1.2.2	Cas des poutres et poteaux de hauteurs différentes ($h_p/h_t > 1,5$)	572
1.2.3	Cas particulier	573
1.3	Cas des moments positifs	574
1.3.1	Cas des nœuds peu sollicités	574
1.3.2	Cas des nœuds fortement sollicités : ($A_g/bh > 2\%$)	575
1.3.3	Dispositions dans le cas du portique simple	576
1.4	Calcul d'un portique articulé en pied	578
2.	Corbeaux consoles courtes	584
2.1.	Définition	584
2.2	Méthode classique	584
2.1.2	Méthode des bielles-tirants	585
2.2	Ferraillage complémentaire	589
2.2.1	Cas 1 : $a < h_c/2$	589
2.2.2	Cas 2 : $a > h_c/2$ et $F_u > V_{Rd,c}$	590
2.2.3	Cas 3 $a > 0,5h_c$ et $F_{Ed} > V_{Rd,c}$	591

16	Voiles et poutres-voiles – Chaînages –	
	Forces localisées	593
1.	Les voiles ou murs non armés	593
1.1	Définition de l'Annexe nationale de l'eurocode 2	593
1.2	Résistance de calcul aux forces axiales et moment	593
1.3	Effort tranchant d'un mur non armé	595
1.4	Comparaison des cisaillements des zones armées et zones faiblement armées	597
1.5	Annexe nationale française	599
1.6	Constructives minimales des murs : Annexe française	600
1.7	Épaisseur minimale des voiles	601
1.8	Contrainte normale dans un voile	601
2.	Poutres-voiles	602
2.1	Définition	602
2.2	Rappel sur le schéma de bielles	602
2.2.1	Calcul en voûte de décharge	602
2.3	Modèle bielles-tirants dans une poutre-voile selon l'eurocode 2	604
2.3.1	Rappels des règles fondamentales	604
2.3.2	Dispositions constructives des poutres-voiles	607
2.4	Annexe nationale française	608
3.	Les voiles armés	608
3.1	Définition	608
3.2	Dispositions constructives	609
3.2.1	Annexe nationale française	609
3.3	Effort tranchant d'un mur armé	611
4.	Les chaînages	611
4.1	Chaînages verticaux	611
4.2	Chaînages horizontaux périphériques et internes	612
4.3	Chaînages horizontaux	612
5.	Forces localisées	612
5.1	Principe des calculs	612
5.2	Application au cas simple d'une zone d'ancrage	616
5.2.1	Modèle de calcul	616
5.2.2	Limitation des contraintes dans la zone de diffusion	617
5.2.3	Limitation des contraintes après la zone de diffusion	617
5.2.4	Ferraillage dans le prisme de première régularisation	618
	Bibliographie	620