

# 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
<b>1</b>	<b>Matériaux : béton et acier .....</b>	<b>31</b>
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 $\epsilon_{cd}$ 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
<b>2</b>	<b>Notion de durabilité et principe de l'analyse structurale .</b>	<b>71</b>
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
<b>3</b>	<b>Dispositions constructives relatives aux armatures .....</b>	<b>141</b>
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
<b>4</b>	<b>Les états limites ultimes de flexion .....</b>	<b>163</b>
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 $\sigma_{cw}$ .....	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 ..... 249**

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
<b>8</b>	<b>Exercices sur les poutres .....</b>	<b>321</b>
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

4.	Poutres continues .....	340
4.1	Évaluation des moments .....	341
4.1.1	Recherche du moment maximum sur l'appui intermédiaire B .....	341
4.1.2	Recherche du moment maximum sur la première travée ..	341
4.1.3	Recherche du moment maximum sur la deuxième travée ..	342
4.1.4	Récapitulatif .....	343
4.2	Comparaison avec le BAEL .....	344
5.	Exemple de dalles continues .....	345
5.1	Définition des portées .....	345
5.2	Actions .....	346
5.3	Calcul des sollicitations .....	346
5.3.1	Recherche du moment maximum sur appui sans redistribution .....	347
5.3.2	Recherche du moment mini sur appui correspondant au moment maxi en travée .....	347
5.3.3	Récapitulatif .....	351
5.3.4	Comparaison avec le BAEL .....	351
5.3.5	Calcul des armatures de flexion .....	352
5.3.6	Vérification de l'effort tranchant .....	356
5.4	État limite de service de compression et de traction .....	357
5.5	État limite de service de fissuration .....	358
5.6	État limite de service de déformation .....	358
5.6.1	Méthode rapide .....	358
5.6.2	Calcul de la flèche selon l'EC 2 (sans Annexe nationale)	358
6.	Étude d'une réservation dans une poutre (tranchant + traction) ...	360
6.1	Rappel .....	360
6.2	Action d'ensemble .....	362
6.2.1	Traverse supérieure .....	362
6.2.2	Traverse inférieure .....	364

## **9** Coutures des membrures – Coutures des surfaces de reprise .....

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 $\Delta F_d$ .....	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
<b>10 Torsion .....</b>	<b>383</b>
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
<b>11 Poinçonnement .....</b>	<b>395</b>
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 $\beta$ .....	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 ouot 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

<b>16</b>	<b>Voiles et poutres-voiles – Chaînages –</b>	
	<b>Forces localisées .....</b>	<b>593</b>
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
2.1.1	Rappels des règles fondamentales .....	604
2.1.2	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
	<b>Bibliographie .....</b>	<b>620</b>