

Afin d'harmoniser les règles de conception des structures en béton entre les états membres de l'Union européenne, les règles de calcul ont été unifiées avec la publication de l'eurocode 2. La phase finale de la rédaction des Annexes françaises de la norme NF EN 1992-1-1, « Calcul des structures en béton » publiée par AFNOR en octobre 2005, a été achevée fin 2007.

Appliquer les méthodes de calcul de l'eurocode 2

Pratique de l'eurocode 2 présente, à partir des lois classiques de la résistance des matériaux, et après l'étude des méthodes de calcul propres à chaque sollicitation élémentaire (effort normal, effort tranchant, moment fléchissant, moment de torsion), le dimensionnement des éléments de base d'une structure en béton armé (tirant, poteau, poutre). Chaque chapitre comporte des rappels théoriques suivis d'une ou plusieurs applications traitées en détail. Les applications sont accompagnées de nombreuses informations utiles pour les calculs.

Pratique de l'eurocode 2 est complété par *Maîtrise de l'eurocode 2* qui porte notamment sur l'étude du flambement, du poinçonnement, des déformations et de l'ouverture des fissures.

Permettre une transition entre l'application des règles BAEL 91 et de l'eurocode 2

L'organisation de l'ouvrage s'apparente à celle de l'ouvrage *Pratique du BAEL 91* (Éditions Eyrolles), ce qui permet d'assurer la transition entre les règles françaises amenées à disparaître et l'eurocode 2 destiné à les remplacer, en y introduisant les spécificités propres à ces nouvelles règles (classes d'exposition des constructions, dispositions constructives, etc.).

- Chapitre 1 — Introduction
- Chapitre 2 — Matériaux
- Chapitre 3 — Béton armé - Généralités
- Chapitre 4 — Dispositions constructives
- Chapitre 5 — Traction simple
- Chapitre 6 — Compression centrée
- Chapitre 7 — Flexion simple
- Chapitre 8 — Effort tranchant
- Chapitre 9 — Torsion
- Chapitre 10 — Épures de répartition des armatures longitudinales et des armatures d'âme
- Chapitre 11 — Flexion composée

Les fichiers relatifs à certaines annexes (calcul manuel d'une section rectangulaire avec armatures symétriques à l'ELU, vérification à l'ELU d'une section rectangulaire dont on connaît les armatures, vérification des contraintes à l'ELS pour une section quelconque en flexion composée) au format pdf sont disponibles à l'adresse suivante : www.editions-eyrolles.com



Cet ouvrage s'adresse aux techniciens, ingénieurs, projeteurs, vérificateurs, formateurs, enseignants et étudiants... chargés de la conception, du calcul, du dimensionnement et de la justification des structures de bâtiment en béton armé.

afnor
EDITIONS

www.boutique-livres.afnor.org
www.editions-eyrolles.com
Groupe Eyrolles | Diffusion Geodif | Distribution Sodis

Pratique de l'eurocode 2

Guide d'application

J. Roux

Code éditeur : Eyrolles : G12044
ISBN EYROLLES : 978-2-12-12044-8
Code éditeur : Afnor 3273211
ISBN AFNOR : 978-2-12-273211-3



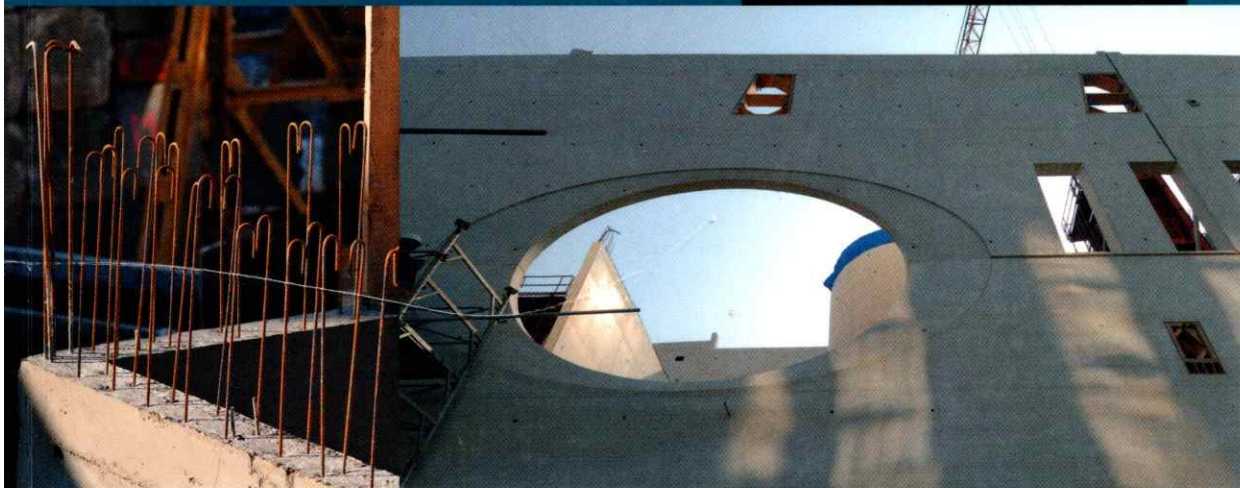
9

72 €

E U R O C O D E

Pratique de l'eurocode 2

Guide d'application



Jean Roux

afnor
ÉDITIONS

EYROLLES

Table des matières

Avant-propos	1
1. Présentation des eurocodes et de l'ouvrage	1
2. Références réglementaires	2
3. Numérotation des formules	3
4. Couleurs des figures	4
5. Notations et symboles particuliers	4
Notations et symboles	7
1. Majuscules romaines	7
2. Minuscules romaines	10
3. Majuscules ou minuscules grecques	14
1 Introduction	17
1. Rappels théoriques des unités	17
2. Principe du béton armé	17
2.1 Principe	17
2.2 Exemple 1 – Poutre console	18
2.3 Exemple 2 – Dalle encastrée sur son contour	19
3. Formes usuelles des éléments	20
4. Les différentes méthodes de calcul	21
4.1 Calcul aux contraintes admissibles	21
4.2 Calcul à la rupture	23
4.3 Calcul aux états limites	23
2 Matériaux	25
I. RAPPELS THÉORIQUES	25
1. Aciers	25
1.1 Types	25
1.2 Caractères géométriques	26
1.3 Caractères mécaniques	26
1.3.1 Limite d'élasticité garantie	27
1.3.2 Diagramme contraintes-déformations	28
1.4 Caractères technologiques	29
1.4.1 Surface relative des nervures	29
1.4.2 Autres caractères technologiques	30
2. Béton	30
2.1 Constituants	30
2.1.1 Ciment	30

2.1.2	Granulats	31
2.1.3	Eau	31
2.2	Résistances mécaniques	31
2.2.1	Définition de la valeur caractéristique requise d'ordre p ..	31
2.2.2	Résistance caractéristique à la compression du béton	32
2.2.3	Résistance à la traction	33
2.2.4	Classes de résistance	35
2.2.5	Valeurs à introduire dans les projets	36
2.3	Déformations du béton – Incidence sur le béton armé	37
2.3.1	Déformations spontanées	37
2.3.2	Déformations instantanées – Courbe expérimentale contraintes-déformations (σ_{bc} - ϵ_{bc})	41
2.3.3	Déformations lentes sous charges de longue durée	43
2.3.4	Déformations transversales – Coefficient de Poisson	48
II.	APPLICATION	49
	Détermination du coefficient de fluage et des modules d'élasticité du béton	49
	–Énoncé–	49
	–Corrigé–	49
3	Béton armé – Généralités	53
I.	RAPPELS THÉORIQUES	53
1.	Actions et sollicitations	53
1.1	Terminologie	53
1.2	Actions	53
1.3	Combinaisons d'actions	56
1.3.1	Généralités	56
1.3.2	Notations	57
1.3.3	Sollicitations de calcul vis-à-vis des états limites ultimes	57
1.3.4	Sollicitations de calcul vis-à-vis des états limites de service	59
1.3.5	Simplifications pour les dispositions de chargement pour les bâtiments	59
1.3.6	Remarques importantes	60
2.	Hypothèses et données pour le calcul du béton armé	61
2.1	Introduction	61
2.2	Hypothèses générales valables pour tous les états limites	63
2.3	Hypothèses supplémentaires pour les états limites de service (ELS)	64
2.3.1	Hypothèses supplémentaires	64
2.3.2	Sections homogènes et sections homogènes réduites	64
2.3.3	Coefficient d'équivalence	65
2.3.4	Limitation de la contrainte de compression du béton	65
2.3.5	Limitation de la contrainte de traction de l'acier	66
2.3.6	Calcul des contraintes	66
2.3.7	États limites de fissuration	67

2.4	Hypothèses supplémentaires pour l'état limite ultime de résistance (ELU)	67
2.4.1	Hypothèses supplémentaires	67
2.4.2	Diagrammes contraintes-déformations de calcul	69
4	Dispositions constructives	75
I.	RAPPELS THÉORIQUES	75
1.	Généralités	75
1.1	Définitions	75
1.2	Classes d'exposition en fonction des conditions d'environnement	75
2.	Disposition des armatures	76
2.1	Enrobage	76
2.2	Enrobage minimal	76
2.2.1	Enrobage minimal $c_{\min, b}$ requis vis-à-vis de l'adhérence ..	77
2.2.2	Enrobage minimal $c_{\min, dur}$ vis-à-vis des conditions d'environnement	77
2.2.3	Marge de sécurité $\Delta c_{dur, y}$	78
2.2.4	Réduction $\Delta c_{dur, st}$ de l'enrobage minimal dans le cas d'acier inoxydable	78
2.2.5	Réduction $\Delta c_{dur, add}$ de l'enrobage minimal dans le cas de protection supplémentaire	78
2.2.6	Prise en compte des tolérances d'exécution	79
2.3	Distances entre barres	79
3.	Contrainte d'adhérence	81
3.1	Adhérence des barres droites	81
3.1.1	Définition	81
3.1.2	Faits expérimentaux – Théorie de M. Caquot	81
3.1.3	Facteurs dont dépend l'adhérence	82
3.2	Conditions d'adhérence	83
3.3	Contrainte d'adhérence moyenne	84
3.4	Contrainte ultime d'adhérence	85
3.5	Ancrage des barres droites tendues isolées	86
3.6	Longueur « de scellement droit »	87
3.7	Longueur d'ancrage « de référence »	87
3.8	Longueur d'ancrage « de calcul »	88
3.9	Adhérence des barres courbes	91
3.9.1	Introduction	91
3.9.2	Hypothèses	91
3.9.3	Adhérence des barres courbes	91
4.	Ancrage des barres	94
4.1	Types d'ancrages d'extrémité	94
4.2	Rayons de courbure de l'axe des barres	96
4.3	Ancrage total des cadres, étriers et épingles	97
5.	Ancrages au moyen de barres soudées	99
5.1	Cas d'une barre transversale de diamètre $14 \text{ mm} \leq \phi_t \leq 32 \text{ mm}$	99
5.2	Cas d'une barre transversale de diamètre $\phi_t \leq 12 \text{ mm}$	100

5.3	Cas de deux barres transversales soudées	101
5.3.1	Cas où $14 \text{ mm} \leq \phi_t \leq 32 \text{ mm}$	101
5.3.2	Cas où $\phi_t \leq 12 \text{ mm}$	101
6.	Efforts exercés par une barre courbe sur le béton	101
6.1	Introduction	101
6.2	Risque de poussée au vide	102
6.3	Risque d'écrasement du béton	103
7.	Jonctions par recouvrement	103
7.1	Recouvrement des barres	103
7.1.1	Transmission des efforts	103
7.1.2	Longueur de recouvrement l_0	104
7.1.3	Couture des recouvrements	106
7.1.4	Barres couvre-joints – Jonctions par chaînage	107
7.2	Ancrages et recouvrement des treillis soudés	108
7.2.1	Définition	108
7.2.2	Dispositions des recouvrements	109
8.	Paquets de barres	111
8.1	Généralités	111
8.2	Ancrages des paquets de barres	111
8.3	Recouvrement des paquets de barres	112
8.3.1	Cas des paquets de deux barres avec $\phi_n < 32 \text{ mm}$	112
8.3.2	Autres cas	112
9.	Règles supplémentaires pour les barres de gros diamètre	113
10.	Armatures de peau	114
10.1	Utilité	114
10.2	Constitution	114
10.3	Sections et tracés	114
II.	APPLICATIONS	116
	Application n° 1 : enrobages	116
	–Énoncé–	116
	–Corrigé–	116
	Application n° 2 : longueur d'ancrage	119
	–Énoncé–	119
	–Corrigé–	119
	Application n° 3 : longueur de recouvrement	124
	–Énoncé–	124
	–Corrigé–	124
5	Traction simple	129
I.	RAPPELS THÉORIQUES	129
1.	Introduction	129
2.	Dimensionnement des armatures	129
2.1	Énoncé du problème	129
2.2	Dimensionnement à l'ELU	130
2.3	Dimensionnement à l'ELS	130
2.3.1	Contraintes-limites des aciers tendus	130

2.3.2	Section d'armatures	131
2.3.3	Remarque – État limite déterminant pour le calcul des armatures	131
3.	Vérification des contraintes	132
3.1	Données	132
3.2	Vérification	132
4.	Détermination du coffrage	133
5.	Maîtrise de la fissuration	133
5.1	Cas où la maîtrise de la fissuration n'est pas requise	133
5.2	Cas où la maîtrise de la fissuration est requise	134
6.	Armatures transversales	134
6.1	En zone courante	134
6.2	En zone de recouvrement	134
6.2.1	Contrainte ultime d'adhérence	134
6.2.2	Longueurs d'ancrage	135
6.2.3	Longueur de recouvrement	135
6.2.4	Armatures transversales	137
II.	APPLICATIONS	138
	Application n° 1 : tirant – armatures	138
	–Énoncé–	138
	–Corrigé–	139
	Application n° 2 : tirant – armatures et coffrage	146
	–Énoncé–	146
	–Corrigé–	146
6	Compression centrée	151
I.	RAPPELS THÉORIQUES	151
1.	Hypothèses	151
2.	Élancement	154
2.1	Longueur efficace l_0	154
2.2	Élancement	156
2.2.1	Cas général	157
2.2.2	Cas particuliers	157
3.	Armatures longitudinales	158
3.1	Force portante	158
3.2	Armatures longitudinales	159
3.2.1	Armatures calculées	159
3.2.2	Sections extrêmes	159
3.2.3	Dispositions constructives	160
4.	Armatures transversales	161
4.1	Diamètres	162
4.2	Espacements	162
4.2.1	En zone courante	162
4.2.2	En zone de recouvrement ou de liaison avec d'autres éléments	162
5.	Coffrage	166

II. APPLICATION	166
Application : poteau – coffrage et armatures	166
–Énoncé–	166
–Corrigé–	167

7 Flexion simple 175

I. RAPPELS THÉORIQUES	175
1. Introduction	175
1.1 Définitions	175
1.2 Données générales	176
1.2.1 Notations et terminologie	176
1.2.2 Principes généraux de calcul	177
1.2.3 Équations générales	178
2. Section rectangulaire sans aciers comprimés	180
2.1 Dimensionnement à l'état limite ultime	180
2.1.1 Coefficients de remplissage et de centre de gravité	180
2.1.2 Diagramme parabole-rectangle et rectangulaire simplifié	181
2.1.3 Moment frontière M_{AB}	185
2.1.4 Dimensionnement de $A_{s1,u}$ à l'ELU	187
2.1.5 Méthode de calcul dans le cas d'un diagramme d'acier à palier incliné	187
2.1.6 Méthode de calcul dans le cas d'un diagramme d'acier à palier horizontal	189
2.2 Dimensionnement à l'état limite de service par compression du béton	190
2.2.1 Hypothèses	190
2.2.2 Dimensionnement de $A_{s1,ser}$ à l'ELS	190
2.3 Notion de moment limite	192
2.3.1 Cas où la contrainte de compression du béton est limitée	192
2.3.2 Cas où la contrainte de compression du béton n'est pas limitée	196
2.4 Conclusion	197
3. Section rectangulaire avec aciers comprimés	198
3.1 Cas où la contrainte de compression du béton est limitée	198
3.1.1 Préambule	198
3.1.2 Hypothèses	198
3.1.3 Remarques préliminaires importantes	200
3.1.4 Calcul des aciers comprimés dans le cas où ceux-ci ne sont pas imposés	201
3.1.5 Calcul des aciers tendus	202
3.2 Cas où la contrainte de compression du béton n'est pas limitée	205
3.2.1 Calcul des aciers comprimés dans le cas où ceux-ci ne sont pas imposés	205
3.2.2 Calcul des aciers tendus	206
3.3 Formules approchées pour l'ELU	208
3.3.1 Bras de levier z_c à l'ELU	208

3.3.2	Moment limite μ_{lu} lorsque la contrainte de compression du béton est limitée	209
3.3.3	Contrainte équivalente des aciers comprimés à l'ELU lorsque la contrainte de compression du béton est limitée	210
3.3.4	Contrainte équivalente des aciers tendus A1 lorsque la contrainte de compression du béton est limitée	213
4.	Section rectangulaire dimensionnée à l'état limite de service par limitation des contraintes	214
4.1	État limite de service par limitation des contraintes	214
4.2	Notion de moment résistant béton : M_{rc}	215
4.3	Calcul des armatures	215
4.3.1	Cas où $M_{ser} \leq M_{rc}$	215
4.3.2	Cas où $M_{ser} > M_{rc}$ et où A_{s2} n'est pas imposée	218
4.3.3	Calcul des aciers tendus lorsque A_{s2} est imposée	219
4.4	Conclusion	220
5.	Coffrage des sections rectangulaires	220
6.	Sections en T	221
6.1	Introduction	221
6.2	Largeur de table à prendre en compte	221
6.3	Dimensionnement à l'ELU	221
6.3.1	Moment de référence	221
6.3.2	Calcul des armatures	222
6.4	Dimensionnement à l'ELS	224
6.4.1	Moment de référence	224
6.4.2	Calcul de $A_{s1, ser}$	225
7.	Pourcentage minimal d'armatures	226
8.	Vérification des contraintes à l'ELS	227
8.1	Introduction	227
8.2	Contraintes dans la section non fissurée	227
8.2.1	Cas des sections en T	227
8.2.2	Cas des sections rectangulaires	228
8.3	Contraintes dans la section fissurée	229
8.3.1	Position de l'axe neutre	229
8.3.2	Calcul des contraintes	230
9.	Organigrammes récapitulatifs pour les sections rectangulaires ou en T	232
9.1.	Dimensionnement des armatures à l'ELU	232
9.1.1.	Cas où la contrainte de compression du béton est limitée à l'ELS	232
9.1.2.	Cas où la contrainte de compression du béton n'est pas limitée à l'ELS	239
9.2.	Dimensionnement des armatures à l'ELS	242
9.3.	Vérification des contraintes à l'ELS	243

II. APPLICATIONS	246
Application n° 1 : section rectangulaire sans aciers comprimés – Calcul des armatures à l'ELU et à l'ELS	246
–Énoncé–	246
–Corrigé–	247
Application n° 2 : section rectangulaire sans aciers comprimés – Notion de moment limite ultime	253
–Énoncé–	253
–Corrigé–	253
Application n° 3 : section rectangulaire sans aciers comprimés – Vérification des contraintes à l'ELS	260
–Énoncé–	260
–Corrigé–	260
Application n° 4 : section rectangulaire avec aciers comprimés ...	266
–Énoncé–	266
–Corrigé–	267
Application n° 5 : section à table de compression	275
–Énoncé–	275
–Corrigé–	276
Application n° 6 : poutre à talon	283
–Énoncé–	283
–Corrigé–	284

8 Effort tranchant 293

I. RAPPELS THÉORIQUES	293
1. Contraintes engendrées par l'effort tranchant	293
1.1 Introduction	293
1.1.1 Effort de glissement	293
1.1.2 Contraintes tangentes	294
1.1.3 Bras de levier des forces élastiques	295
1.2 Contraintes tangentes sur un plan perpendiculaire au plan moyen	295
1.3 Effet des contraintes tangentes	297
2. Équations pour le calcul des armatures d'effort tranchant	299
2.1 Théorie du treillis de Morsch	299
2.1.1 Introduction	299
2.1.2 Règle des coutures généralisée	299
2.1.3 État limite ultime par écrasement des bielles de béton	301
2.1.4 État limite ultime par traction excessive des armatures d'âme	302
2.1.5 Règle du décalage	304
2.2 Efforts tranchants de référence	306
2.3 Prise en compte des phénomènes de transmission directe des charges aux appuis	307
2.3.1 Cas des charges réparties	307
2.3.2 Cas des charges concentrées	308

3. Éléments pour lesquels aucune armature d'effort tranchant n'est requise	309
3.1 Éléments non concernés	309
3.2 Valeur des efforts tranchants de référence	309
3.2.1 Calcul de $V_{Rd,c}$	309
3.2.2 Calcul de $V_{Rd,max}$ lorsque les armatures d'effort tranchant ne sont pas requises	311
3.2.3 Force de traction dans l'armature longitudinale	312
3.3 Vérifications	312
3.3.1 Nécessité de prévoir des armatures d'effort tranchant	312
3.3.2 Vérification de la compression des bielles de béton	313
3.4 Pourcentage minimal d'armatures transversales	313
4. Éléments de hauteur constante nécessitant des armatures d'effort tranchant	314
4.1 Valeur de $V_{Rd,c}$ lorsque les armatures d'âme sont nécessaires	314
4.2 Vérification	314
4.3 Principe de la méthode de calcul	315
4.4 Méthode de l'inclinaison variable des bielles	315
4.4.1 Introduction	315
4.4.2 Vérification de la compression des bielles de béton	315
4.4.3 Armatures d'effort tranchant	316
4.4.4 Pourcentage minimal d'armatures transversales	317
4.4.5 Vérification complémentaire pour les charges concentrées au voisinage des appuis	318
4.4.6 Force de traction dans l'armature longitudinale	318
4.4.7 Marche à suivre	319
4.5 Méthode standard – Bielles inclinées à 45°	320
4.5.1 Vérification de la compression des bielles de béton	320
4.5.2 Armatures d'effort tranchant	320
4.5.3 Force de traction dans l'armature longitudinale	322
4.6 Comparaison des deux méthodes	322
5. Éléments de hauteur variable	323
6. Dispositions constructives	324
6.1 Inclinaison des armatures d'effort tranchant	324
6.2 Tracé des armatures d'âme	324
6.3 Espacements	325
6.3.1 Espacement longitudinal maximal	325
6.3.2 Espacement transversal maximal	325
7. Barres relevées à 45°	326
7.1 Vérification de la compression des bielles de béton	326
7.2 Armatures calculées	327
8. Répartition des armatures transversales (méthode Caquot)	329
8.1 Hypothèses	329
8.2 Notations	329
8.3 Méthode Caquot	330
8.4 Cas des travées continues	331
8.4.1 Rappels de résistance des matériaux	331

8.4.2	Répartition des armatures d'âme	331
9.	Zones d'application des efforts	332
9.1	Armatures inférieures tendues sur appui simple d'about	332
9.1.1	Section d'armatures inférieures	332
9.1.2	Ancrage de l'armature inférieure sur un appui simple d'about	334
9.2	Équilibre de la bielle de béton sur appui simple d'about	334
9.3	Armature inférieure tendue sur appui intermédiaire	335
10.	Jonction hourdis-nervure	336
10.1	Introduction	336
10.2	Vérification de la compression des bielles de béton	339
10.3	Armatures de couture	340
10.4	Ancrage des armatures longitudinales supérieures tendues	342
10.5	Interaction entre effort tranchant et flexion transversale pour les ponts	343
11.	Poutres à talon	344
12.	Organigramme récapitulatif pour le calcul des armatures d'âme ..	345
II.	APPLICATIONS	352
	Application n° 1 : armatures d'effort tranchant – charges réparties	352
	–Énoncé–	352
	–Corrigé–	353
	Application n° 2 : armatures d'effort tranchant – Méthode de l'inclinaison variable des bielles	369
	–Énoncé–	369
	–Corrigé–	370
	Application n° 3 : poutre à talon	380
	–Énoncé–	380
	–Corrigé–	381
9	Torsion	393
I.	RAPPELS THÉORIQUES	393
1.	Rappels de résistance des matériaux	393
1.1	Contraintes engendrées par un couple de torsion	393
1.2	Torsion des profils creux	394
1.2.1	Flux du vecteur contrainte	394
1.2.2	Valeur de la contrainte tangente	395
1.2.3	Rigidité à la torsion d'un profil creux	395
1.3	Torsion d'équilibre et torsion de compatibilité	396
2.	Sections à considérer	397
2.1	Cas des sections creuses	397
2.2	Cas des sections pleines	397
2.3	Cas des sections de forme complexe	398
3.	Principes de la justification à la torsion	399
3.1	Couples de torsion résistants	399
3.2	Principe de la justification	400

4. Vérification de la compression des bielles de béton	401
5. Armatures	402
5.1 Armatures transversales	402
5.1.1 Calcul des armatures	402
5.1.2 Dispositions constructives	403
5.2 Armatures longitudinales	404
5.2.1 Calcul des armatures	404
5.2.2 Dispositions constructives	405
5.2.3 Remarque – Torsion combinée à une flexion simple ou composée	405
6. Sollicitations combinées	406
6.1 Cas général	407
6.2 Cas des sections pleines quasi rectangulaires	407
6.3 Remarque	408
II. APPLICATIONS	409
Application n° 1 : poutre supportant un auvent	409
–Enoncé–	409
–Corrigé–	410
Application n° 2 : torsion dans un tablier de pont courbe	421
–Enoncé–	421
–Corrigé–	422

10 Épure de répartition des armatures longitudinales
et des armatures d'âme

I. RAPPELS THÉORIQUES	431
1. Introduction	431
2. Répartition des armatures longitudinales	431
2.1 Moment maximal admissible d'un groupe de barres longitudinales	431
2.1.1 État limite ultime	432
2.1.2 État limite de service par limitation des contraintes	432
2.2 Arrêt des barres	432
2.3 Diagramme des moments admissibles	433
2.4 Règle du décalage	435
2.5 Épure d'arrêt des armatures longitudinales	436
2.5.1 Principes	436
2.5.2 Arrêt des armatures inférieures	436
2.5.3 Arrêt des armatures supérieures	437
2.5.4 Remarques	437
2.5.5 Exemple de diagramme de type I	438
2.5.6 Remarques complémentaires	438
3. Répartition des armatures d'âme	440
3.1 Cas des poutres de section constante soumises à des charges uniformes	440
3.2 Cas général	440

11	Flexion composée	443
I.	RAPPELS THÉORIQUES	443
1.	Généralités – Introduction	443
1.1	Généralités	443
1.2	Prise en compte des imperfections géométriques et des effets du second ordre en flexion-compression à l'ELU	445
1.2.1	Imperfections géométriques	445
1.2.2	Effets du second ordre	446
2.	Sections partiellement tendues	449
2.1	Domaine d'application	449
2.1.1	À l'ELS	449
2.1.2	À l'ELU	450
2.2	Calcul des armatures	452
2.2.1	Méthode de calcul	452
2.2.2	Technique du calcul	453
2.2.3	Remarques	453
2.2.4	Positions relatives de $A_{s1, G0}$ et C	454
2.2.5	Cas des sections rectangulaires	454
2.2.6	Section en T à l'ELU	456
2.3	Section minimale d'armatures	458
2.3.1	Cas général	458
2.3.2	Cas où la maîtrise de la fissuration est requise – Calcul rigoureux	459
2.4	Calcul des contraintes à l'ELS	463
2.4.1	Introduction	463
2.4.2	Contraintes dans la section non fissurée	463
2.4.3	Contraintes dans la section fissurée	466
3.	Sections entièrement tendues	470
3.1	Domaine d'application	470
3.2	Calcul des armatures	470
3.3	Section minimale	471
3.4	Vérification des contraintes à l'ELS	472
4.	Sections entièrement comprimées	472
4.1	Domaine d'application	472
4.1.1	À l'ELS	472
4.1.2	À l'ELU	473
4.2	Calcul des armatures	473
4.2.1	Dimensionnement à l'ELU	473
4.2.2	Dimensionnement à l'ELS	473
4.3	Sections extrêmes	474
5.	Diagrammes d'interaction	474
5.1	Équations	475
5.2	Discussion	476
5.2.1	Cas où x est égal à moins l'infini	476
5.2.2	Cas où x est égal à plus l'infini	477
5.2.3	Cas où $N_i = 0$	478
5.2.4	Cas de la flexion inverse	478

5.3	Courbe d'interaction	478
5.4	Tracé des diagrammes d'interaction	479
5.5	Propriétés des diagrammes d'interaction	479
5.6	Application à la détermination des armatures pour les sections rectangulaires	481
5.6.1	Données	481
5.6.2	Mode opératoire	482
5.7	Application à la vérification des sections rectangulaires	483
5.7.1	Données	483
5.7.2	Mode opératoire	483
5.8	Exemples de diagrammes d'interaction	485
II.	APPLICATIONS	487
	Application n° 1 : flexion-compression – Section partiellement tendue	487
	–Énoncé–	487
	–Corrigé–	488
	Application n° 2 : flexion-traction – Section partiellement tendue	498
	–Énoncé–	498
	–Corrigé–	499
	Application n° 3 : flexion-traction – Section entièrement tendue	505
	–Énoncé–	505
	–Corrigé–	505

Annexes

A1	Déformations relatives finales de retrait dans le cas courant d'un béton de classe C25/30	511
A2	Flexion simple – Tableaux des moments limites ultimes réduits	513
	1. Diagrammes σ - ϵ d'aciers à palier incliné	514
	2. Diagrammes σ - ϵ d'aciers à palier horizontal	520
A3	Flexion composée – Moment limite ultime	523
	1. Introduction	523
	2. Équations utilisées	524
	2.1 Équilibre des forces à l'ELU	524
	2.2 Effort normal réduit de service	525
	2.3 Équilibre des forces à l'ELS	526
	2.4 Moment réduit de service	527
	2.5 Moment réduit ultime	527
	2.6 Principe du calcul	527
	3. Organigramme de calcul	528
	4. Tableaux des moments limites ultimes en flexion composée	530