

Conclusion

La modélisation en bielles tirants proposée par l'Eurocode 2 permet un dimensionnement optimisé des structures courantes présentant des régions de discontinuité. De plus, elle fonde certaines clauses du code de calcul européen et en précise leurs limites d'application.

La méthode des bielles et tirants éclaire les prescriptions de l'Eurocode 2 pour la justification des poutres fléchies vis à vis de l'effort tranchant.

L'originalité de cette méthode tient à la prise en compte de nœuds de connexion, ignorés dans la théorie des bielles de Lebellet et de Blévoet. Cela a pour conséquence de réduire le bras de levier dans le calcul des semelles de fondation et d'augmenter, logiquement, la section de leurs armatures principales. Il s'avère, toutefois, que la modélisation en bielles et tirants a un effet quasi nul sur la quantité des aciers obtenue :

- pour les *semelles rigides* sur pieux, compte tenu de la majoration empirique des aciers introduite dans les règles françaises à la suite des essais effectués ;
- pour les *semelles superficielles semi-rigides*, courantes en France, en raison de la combinaison des méthodes des bielles-tirants et de flexion qui conduit sensiblement au même résultat pour les aciers.

Ainsi, la méthode des bielles et tirants, en s'appuyant sur une analyse plus fine du comportement des semelles superficielles, sous charge centrée, permet de retrouver les résultats issus des règles françaises validés par une longue pratique. De plus, elle offre la possibilité de réaliser une économie d'aciers pour les semelles soumises à une charge excentrée.

Les modèles bielles et tirants sont particulièrement adaptés au comportement des parois fléchies : poutres-voiles et voiles en console. Ils permettent d'optimiser le dimensionnement et la disposition des armatures dans ces structures par rapport aux prescriptions empiriques, nécessairement enveloppes, des règles françaises. Ces structures très rigides possèdent une grande sensibilité aux déformations et tassements d'appui lorsqu'elles sont hyperstatiques. Des études particulières doivent être menées pour définir les modèles adéquats prenant en compte les réactions d'appui qui en découlent.

L'étude des voiles en console et des corbeaux montre que la modélisation en bielles et tirants complète de la liaison avec leur support est nécessaire pour leur di-

mensionnement. De façon générale, ces éléments de structure ne peuvent pas être considérés de manière indépendante, comme dans la réglementation française.

De façon globale, cette méthode, par rapport aux règles françaises, conduit à :
 – des dispositions d'armatures sensiblement analogues (sauf les parois fléchies) ;
 – des quantités d'acier, qui selon les ouvrages, sont quasi identiques (semelles et corbeaux), ou plus faibles, dans des proportions variables (âme des poutres, poutres-voiles et voiles en console).

Pour les structures usuelles, des logiciels de calcul fondés sur cette méthode devraient permettre, à terme, de faciliter la justification des bielles, tirants et nœuds. En revanche, cette modélisation apporte, dès à présent, une aide utile à la recherche des mécanismes internes pour dimensionner les ouvrages complexes ou soumis à des conditions particulières de chargement.

En pratique, la mise en œuvre de cette méthode réclame un peu d'expérience et d'approfondissement pour identifier clairement le modèle le plus approprié. Il est souvent utile de partir de cas types (comme ceux rassemblés dans cet ouvrage) pour définir progressivement le modèle adapté, en tenant compte des singularités de la structure (ouvertures, géométrie et chargement particuliers). Pour une structure complexe, il peut être nécessaire de faire appel à un calcul automatisé du tracé assurant l'équilibre d'un modèle initial de principe.

En donnant plus de responsabilité dans le choix de méthodes « adéquates », la démarche de l'Eurocode 2 implique un engagement encore plus important de la part de l'ingénieur. Elle peut réclamer un accompagnement initial de formation au sein des entreprises et des bureaux d'études.

Bibliographie

- ADEBAR P., KUCHMA D., COLLINS M.P. – “Strut and Tie Models for the Design of Pile caps”. *ACI Structural Journal*, vol. 87. n° 1, 1990, p. 81-92.
- ADEBAR P., ZHOU Z. – “Bearing Strength of compressive Struts Confined by Plain Concrete”. *ACI Structural Journal*, vol. 90, 1993, p. 534-541.
- AFNOR – Annexe nationale de l'Eurocode 2, P18-711-1-1/NA, octobre 2005.
- ALBIGES, MINGASSON – *Théorie et pratique du béton armé aux états limites*, Eyrolles 1981.
- BLÉVOT J., FRÉMY R. – « Semelles sur pieux. Méthode de calcul, compte rendu d'essais, dispositions constructives ». *Annales de l'ITBTP*, février 1967.
- BOSC J.-L. – « La méthode des bielles et tirants selon l'Eurocode 2 ». *Annales du bâtiment et des travaux publics*, février 2004.
- BOSC J.-L. – « Calcul des semelles sur pieux par la méthode des bielles et tirants selon l'Eurocode 2 ». *Annales du bâtiment et des travaux publics*, décembre 2004.
- BOSC J.-L. – « Calcul des corbeaux par la méthode des bielles et tirants selon l'Eurocode 2 ». *Annales du bâtiment et des travaux publics*, août 2005.
- BOSC J.-L. – « Calcul des poutres-voiles et voiles en console par la méthode des bielles et tirants selon l'Eurocode 2 ». *Annales du bâtiment et des travaux publics*, août 2007.
- BOSC J.-L. – « Méthode des bielles et tirants » dans *Applications de l'Eurocode 2. Calcul des bâtiments en béton conforme aux normes NF EN 1992-1-1, 1-2 et 1992-3 et à leurs annexes nationales*, sous la dir. de J.-A. Calgaro et J. Cortade, Presses des Ponts et Chaussées, 2008, p. 177-211.
- DTU 13.12 – *Règles pour le calcul des fondations superficielles*, Annexe 2 « Méthode des bielles », 1988.
- EUROCODE 2 (EN 1992-1-1) – Calcul des structures en béton, Partie 1-1 « Règles générales et règles pour les bâtiments » - AFNOR P18711-1-1, octobre 2005.
- FIP – *Practical design of structural concrete*, septembre 1999.
- LEBELLE P. – *Semelles de béton armé*. Mémoires de l'Association internationale des ponts et charpentes, vol. 4, Zurich, 1934.
- LEONHARDT F. – “Reducing the Shear reinforcement in reinforced concrete beams and slabs”. *Magazine of concrete research*, vol. 17, n° 53, décembre 1965.
- LEONHARDT F. – I. « Poutres-cloisons structures planes chargées parallèlement à leur plan moyen » ; II. « Recommandations internationales du CEB pour le calcul et l'exécution des poutres-cloisons ». *Annales de l'ITBTP* n° 265, 1970, p. 115-172.
- MÖRSCH E. – *Construction en béton armé. Théorie et applications (DerEisenbetonbau, Seine Theorie und Anwendung)*. Verlag von Konrad Wittwer, Stuttgart, 1912.
- PERCHAT J., ROUX J. – *Maîtrise du BAEL 91 et DTU associés*, Eyrolles, 1994.

- PERCHAT J., ROUX J. (1993) – *Pratique du BAEI 91*, chap.7, Eyrolles, 1993.
- RITTER W. – « La méthode de construction de Hennebique » (Die Bauweise Hennebique). *Schweizerische Bauzeitung*, vol. 17, Zurich, 1899.
- SCHÄFER K. – “Deep beams and discontinuity regions”. *Structural concrete, Textbook on behaviour, design and performance*, 7.3, vol. 3, FIB, décembre 1999.
- SCHÄFER K. – “Nodes”. *Structural concrete, Textbook on behaviour, design and performance*, vol. 3, FIB, décembre 1999.
- SCHLAICH J., SCHÄFER K., JENNEWEIN M. – “Toward a consistent design of structural concrete”. *Journal of the Prestressed Concrete Institut*, vol. 32, n° 3, mai-juin 1987.
- SCHLAICH J., SCHÄFER K. – “Design and detailing of structural concrete using strut-and-tie models”. *The Structural Engineer* vol. 69, n° 6, Mars 1991.
- SCHLAICH J., SCHÄFER K. – „Konstruieren im stahlbetonbau“. *Beton kalender* 1998, Ernst-Sohn, Berlin.
- THONIER H. – *Conception et calcul des structures de bâtiments*, Tome 2, Presses des Ponts et Chaussées, 1993.
- THONIER H. – *Conception et calcul des structures de bâtiments*, Tome 3, Presses des Ponts et Chaussées 1995.
- THONIER H. (1996) – *Conception et calcul des structures de bâtiments*, Tome 4, Presses des Ponts et Chaussées 1996.
- THONIER H. – « Semelles de fondations, méthodes de calcul des aciers inférieurs selon l'Eurocode 2 ». *Annales du bâtiment et des travaux publics*, juin 2006.
- THÜRLIMANN B., MARTI P., PRALONG J., RITZ P., ZIMMERLI B. – *Vorlesung zum Fortbildungskurs für Bauingenieure* (Advanced lecture for civil engineers), Institut für Baustatik und Konstruktion, ETH Zürich, 1983.
- WALTHER R. – *Construire en béton*, EPFL, 1993.

Index

A

- About de poutre de hauteur réduite 18, (131)
- Ancrage des armatures
poutres 55
semelles 99
- Applications numériques
poutres-âme 50
semelles sur pieux 68, 76
semelles superficielles 96, 103, 108
poutres-voiles 137
voiles en console 149
corbeaux 168, 175
- Armatures d'effort tranchant 48, 53
- Armatures principales 49, 55
- Armatures secondaires contrôlant le fendage 20, 64, 72, 82, 142, 143, 154, 158, 164, 166, 174, 180
- Arrêt des armatures longitudinales 35, 39-41, 55, 56

B

- Bielles 19, 22-24
- Bon ou mauvais modèle B-T 16, 131

C

- Charge près d'un appui 32, 41
- Combinaison de modèles B-T 17, 32, 41, 88, 98, 105, 112, 131
- Comparaison des résultats avec ceux des règles françaises
poutres-âme 53, 55
semelles sur pieux 70, 73, 82
semelles superficielles 98, 105, 107, 112, 113
poutres-voiles 139-1453
voiles en console 154-156
corbeaux 170, 174

Confinement du béton

- bielles 23, 63, 96
nœuds 27, 47, 95, 140, 167, 179
- Corbeaux ou consoles courtes
corbeau seul 163-175
ensemble corbeau-poteau 162, 168, 175-181

D

- Décalage des efforts dans les armatures tendues 34, 39-41, 56
- Dispositions des aciers 54, 56, 74, 84, 91, 93, 122, 130, 133, 145, 159, 166, 180
- Distribution des armatures d'âme 35, 37, 54

E

- Effort tranchant réduit de calcul 31, 32, 41 44, 48, 50
- Effort tranchant résistant, 48, 52
- Économie d'armatures
poutres-âme 54, 55
semelles superficielles 112
poutres-voiles 143-1435
voiles en console 154, 155
- Engrènement des granulats 29

F

- Fendage des bielles 22, 23, 60, 125, 131, 134, 153, 162
- Ferraillage (voir dispositions des aciers)

I

- Identification des modèles bielles-tirants 14-18
poutres-âme 30-32, 34-39, 42-46
semelles sur pieux 59-63, 65
semelles superficielles 88-94

poutres-voiles 119-133	Poutre-voile hyperstatique 120-123
voiles en console 147, 149	Poinçonnement des semelles
corbeaux 161-163	sous charge centrée 106-108
	sous charge excentrée 114-116
J	Principes de la méthode des bielles et tirants 13-18
Justifications à l'ELU des éléments	
des modèles 18-27	Q
bielles 22, 47, 52, 67, 136, 156, 170	Quantités d'acier 55, 74, 84, 99, 106, 139, 143, 144, 152, 170, 174
tirants 19, 48, 53-55, 64, 95, 136, 154, 164	
nœuds 24, 46, 51, 66, 94, 135, 150, 167	R
Justification à l'ELS 18, 113	Raideurs des modèles 16-18, 87, 125
L	Régions de continuité 13, 34, 37
Largeur efficace des bielles 20-22, 60, 75, 134, 142, 155, 168, 175	Régions de discontinuité 13, 30, 41
Lignes de charge 15, 16, (121, 123, 126)	
M	S
Membrure comprimée de l'about d'une poutre 31, 44	Semelles superficielles
Méthode « adéquate » 59, 65, 87, 88, 95	rigides 88-94
Modèles bielles-tirants 14-19	semi-rigide 87, 98, 106
Modèles B-T affinés 19, 45, 60, 139, 163	sous charge centrée 88, 89, 96-108
	sous charge excentrée 90-94, 108-116
N	Semelles sur deux pieux
Nœuds 24-27	rigides 59-63
Nœuds diffus 14, 19-22, 60	semi-rigides 65
	sous charge centrée 59, 60, 68-75
O	sous charge excentrée 60-63, 76-84
Optimisation des modèles 16, 62, 63, 132	Semelles sur plus de deux pieux 63
Ouverture : poutre-voile 130-133	Suspentes 123, 124, 128-130, 143, 144, 155, 156
P	T
Poutres fléchies 29	Tirants 19-22
sous charge ponctuelle 29-35	Trajectoires et distribution des contraintes
sous charge uniforme 36-44, 50	15, 30, 37, 120-123, 125, 127, 128, 130, 148, 162
Poutres-voiles isostatiques	
sous charge ponctuelle 125	V
en partie supérieure 125-128	Voiles en consoles
en partie inférieure 128-130	voile seul 150-156
avec une ouverture 130-133	ensemble voile-console 147-149, 151, 156-159
sous charge uniforme 119	
en partie supérieure 120-123	
en partie inférieure 123, 124	

Table des matières

Préface.....	7
Sommaire	9
Avant-propos	11

Chapitre 1

MÉTHODE DES BIELLES ET TIRANTS SELON L'EUROCODE 2

Introduction	13
1. Modélisation en bielles et tirants.....	13
1.1. Justification à l'ELU	13
1.1.1. Identification des modèles	14
1.1.2. Optimisation des modèles	16
1.1.3. La combinaison de modèles B-T simples	17
1.2. Vérifications à l'ELS.....	18
2. Justification des tirants, bielles et nœuds	18
2.1. Généralités [clause 6.5.1].....	18
2.2. Justification des tirants en acier [clause 6.5.3].....	19
2.3. Justification des bielles de béton [clause 6.5.2]	22
2.3.1. Bielle identifiable avec ou sans compression transversale [clause 6.5.2 (1)]	22
2.3.2. Bielle fictive avec traction transversale [clause 6.5.2 (2)].....	23
2.4. Justification des nœuds [clause 6.5.4].....	24
2.4.1. Forces nodales.....	24
2.4.2. Valeurs de calcul des contraintes de compression dans les nœuds..	24
Conclusion.....	27

Chapitre 2

ÂME DES POUTRES

Introduction	29
1. Modélisation en bielles et tirants.....	29
1.1. Poutre chargée ponctuellement	29
1.1.1. Régions de discontinuité	30
1.1.2. Régions de continuité.....	34

1.2. Poutre chargée uniformément.....	36
1.2.1. Région de continuité.....	37
1.2.2. Régions de discontinuité.....	41
2. Justification des tirants, bielles et nœuds : poutre continue.....	45
2.1. Modélisation B-T affinée au voisinage des appuis.....	45
2.2. Vérification des contraintes dans les nœuds d'appui [clause 6.5.4].....	47
2.2.1. Nœud sur appui de rive.....	46
2.2.2. Nœud sur appui intermédiaire.....	47
2.3. Vérification des contraintes dans les bielles.....	47
2.3.1. Bielles d'appui.....	47
2.3.2. Bielles au voisinage de l'appui.....	48
2.4. Détermination des armatures.....	48
2.4.1. Armatures d'âme.....	48
2.4.2. Armatures longitudinales tendues.....	49
3. Application : poutre sous charge uniforme.....	50
3.1. Sollicitations d'effort tranchant à l'ELU.....	50
3.2. Vérification des contraintes dans le nœud d'appui.....	51
3.3. Vérification de la contrainte dans les bielles.....	52
3.4. Détermination des armatures.....	53
3.4.1. Armatures transversales.....	53
3.4.2. Armatures longitudinales.....	55
Conclusion.....	56

Chapitre 3 SEMELLES SUR PIEUX

Introduction.....	59
1. Modélisation en bielles et tirants.....	59
1.1. Semelle rigide sur deux pieux sous poteau en compression centrée.....	59
1.2. Semelle rigide sur deux pieux sous poteau en flexion composée.....	60
2. Justification des tirants, bielles et nœuds : semelles sur deux pieux sous poteau en compression centrée.....	63
2.1. Sections d'armatures [clause 6.5.3].....	64
2.1.1. Armatures principales (tirant AD).....	64
2.1.2. Armatures secondaires (tirants EF et GH).....	64
2.2. Vérification des contraintes du béton aux nœuds [EC2-1-1, 6.5.4].....	66
2.2.1. Nœud sur appui.....	66
2.2.2. Nœud sous le poteau.....	66
2.3. Vérification des bielles [clause 6.5.2].....	67
2.4. Dispositions constructives.....	67

3. Applications : semelles sur deux pieux sous poteau soumis à une compression centrée et à une flexion composée.....	68
3.1. Semelle sur deux pieux sous poteau soumis à une compression centrée.....	68
3.1.1. Tirant principal.....	69
3.1.2. Bielle primaire.....	70
3.1.3. Vérification des contraintes dans les nœuds.....	70
3.1.4. Tirants secondaires (CD-EF).....	72
3.1.5. Vérification des contraintes dans la bielle.....	75
3.2. Semelle sur deux pieux sous poteau soumis à une flexion composée.....	76
3.2.1. Modèle de bielles et tirants.....	77
3.2.2. Réactions dans les pieux.....	77
3.2.3. Justification des contraintes dans les nœuds.....	78
3.2.4. Dimensionnement des armatures.....	81
3.2.5. Vérification des contraintes dans la bielle BC.....	84
Conclusion.....	85

Chapitre 4 SEMELLES SUPERFICIELLES

Introduction.....	87
1. Identification des modèles bielles et tirants.....	87
1.1. Semelle rigide sous mur ou sous poteau en compression centrée (charge centrée).....	88
1.2. Semelle rigide sous poteau en flexion composée (charge excentrée).....	90
1.2.1. Section du poteau partiellement comprimée avec aciers tendus.....	90
1.2.2. Section du poteau entièrement ou partiellement comprimée sans aciers tendus.....	92
2. Justification des tirants, bielles et nœuds : semelles rigides soumises à une compression centrée.....	94
2.1. Justification du nœud sous la charge.....	94
2.1.1. Semelle sous mur.....	94
2.1.2. Semelle sous poteau.....	95
2.2. Armatures inférieures.....	95
2.3. Justification des bielles.....	96
2.4. Justifications complémentaires.....	96
3. Applications : semelles usuelles sous charge centrée ou excentrée.....	96
3.1. Semelle usuelle sous mur avec charge centrée.....	96
3.1.1. Justification du nœud sous le mur.....	97

3.1.2. Armatures inférieures transversales	98
3.1.3. Justification des bielles	99
3.1.4. Ancrage des armatures	99
3.1.5. Influence d'un effort tangent	101
3.2. Semelle sous poteau avec charge centrée	103
3.2.1. Justification du nœud sous poteau	104
3.2.2. Armatures inférieures	105
3.2.3. Justification des bielles	106
3.2.4. Vérification du poinçonnement	106
3.3. Semelle sous poteau avec charge excentrée	109
3.3.1. Modélisation B-T de la semelle, dans le plan de flexion	110
3.3.2. Armatures dans la semelle	111
3.3.3. Justification du nœud sous poteau	114
3.3.4. Vérification du poinçonnement	114
Conclusion	116

Chapitre 5 POUTRES-VOILES

Introduction	119
1. Modélisation en bielles et tirants	119
1.1. Poutre-voile soumise à une charge uniforme	119
1.1.1. Chargement en partie supérieure	120
1.1.2. Chargement en partie inférieure	123
1.2. Poutre-voile soumise à une charge concentrée	125
1.2.1. Chargement en partie supérieure	125
1.2.2. Chargement en partie inférieure	128
1.3. Prise en compte d'une ouverture dans une poutre-voile	130
1.3.1. Modélisation B-T à droite de la charge concentrée	131
1.3.2. Modélisation B-T à gauche de la charge concentrée	131
1.3.3. Modélisation B-T complète de la poutre-voile	133
2. Justification des tirants, bielles et nœuds : poutre-voile à une travée chargée par le haut	133
2.1. Modélisation B-T affinée	134
2.2. Vérification des contraintes dans le nœud d'appui	135
2.3. Vérification des contraintes dans la bielle d'appui	136
2.4. Sections d'armatures [clause 6.5.3]	136
2.4.1. Armatures principales (tirant A A')	136
2.4.2. Armatures secondaires (tirant CB)	136
3. Application : poutre-voile à une travée	137
3.1. Tirant principal	139

3.1.1. Effort de traction	139
3.1.2. Aciers principaux inférieurs	139
3.2. Bielles primaires	140
3.2.1. Effort de compression dans la bielle horizontale	140
3.2.2. Effort de compression dans la bielle inclinée	140
3.3. Vérification des contraintes dans le nœud d'appui	140
3.4. Vérification des contraintes dans la bielle d'appui	142
3.5. Tirant secondaire (CB)	142
3.5.1. Effort de traction [clause 6.5.3 (3)]	142
3.5.2. Armatures secondaires horizontales	143
3.5.3. Armatures secondaires verticales	143
3.6. Disposition des armatures	145
Conclusion	146

Chapitre 6 VOILES EN CONSOLE

Introduction	147
1. Modélisation en bielles et tirants	147
1.1. Voile en console soumis à une charge uniforme	147
1.2. Voile en console soumise à une charge concentrée	149
1.3. Chargement en partie inférieure	149
2. Application : voile en console sous charge uniforme	149
2.1. Modélisation de l'ensemble voile-console	150
2.2. Voile en console	150
2.2.1. Vérification du nœud A	150
2.2.2. Armatures principales	154
2.2.3. Armatures secondaires	155
2.2.4. Vérification des contraintes dans la bielle d'appui	156
2.3. Liaison voile-console	156
2.3.1. Vérification du nœud B	156
2.3.2. Armatures principales	157
2.3.3. Armatures secondaires	158
2.4. Disposition des armatures	156
Conclusion	159

Chapitre 7 CORBEAUX

Introduction	161
1. Modélisation de l'ensemble corbeau-poteau	161
2. Justification des tirants, bielles et nœuds : corbeaux sous charges verticale et horizontale	163

2.1. Définition des corbeaux	163
2.2. Paramètres de calcul	163
2.3. Sections d'armatures et dispositions constructives	164
2.3.1. Armatures principales	164
2.3.2. Armatures secondaires	164
2.3.3. Dispositions constructives	166
2.4. Vérification des contraintes du béton	167
2.4.1. Vérification aux nœuds	167
2.4.2. Vérification de la bielle de béton	168
3. Application : corbeau sur poteau	168
3.1. Modélisation du corbeau	169
3.2. Tirant principal	170
3.2.1. Effort de traction	170
3.2.2. Armatures principales	170
3.3. Bielle primaire (AB)	171
3.4. Vérification des contraintes dans les nœuds	171
3.4.1. Vérification au nœud d'appui (A)	171
3.4.2. Vérification du nœud sous charges (B)	172
3.5. Tirants secondaires	174
3.5.1. Effort de traction [clause 6.5.3 (3)]	174
3.5.2. Armatures horizontales secondaires	174
3.5.3. Armatures verticales secondaires	174
3.6. Vérification des contraintes dans la bielle	175
3.7. Liaison corbeau-poteau	175
3.7.1. Modélisation de la liaison	175
3.7.2. Vérification aux nœuds	179
3.7.3. Tirants secondaires	180
3.7.4. Vérification de la bielle	181
Conclusion	181
Conclusion générale	183
Bibliographie	185
Index	187
Table des matières	189



Imprimerie Vasti-Dumas
N° d'impression : 08-09-0134
Dépôt légal : octobre 2008
Imprimé en France