

M E M E N T O T E C H N I Q U E

16x26

VICTOR DAVIDOVICI

# FORMULAIRE 1 DU BÉTON ARMÉ

ÉLÉMENTS DE CALCUL  
INTERFACE BÉTON ARMÉ/CHARPENTES MÉTALLIQUES

Règles BAEL 91

Eurocode 2

Règles parasismiques 92

L'auteur tient à exprimer ses remerciements aux personnes suivantes pour le soutien qu'elles lui ont apporté lors de la préparation de cet ouvrage :

M. Jean-Pierre Boutin et l'ensemble du Département « Structures Béton » de la SOCOTEC, ainsi qu'à M. Claude Saintjean, M. Jean-Marie Paillé, M. Cuong Tran-Thang et M. Richard Jouanne.

*L'auteur dédie son livre à ses filles Myriam et Diane.*

|   |    |
|---|----|
| <b>Tableau de correspondance BAEL 91 - Formulaire</b> .....                         | 13 |
| <b>I. Données</b> .....   | 17 |
| I. 1 — <b>Notations</b> .....   | 17 |
| I. 2 — <b>Unités de mesure</b> .....  | 18 |
| I. 3 — <b>Charges (actions)</b> .....   | 20 |
| I. 3.1 — Charges permanentes (actions permanentes) .....                            | 20 |
| I. 3.2 — Charges variables (d'exploitation) .....                                   | 23 |
| I. 3.3 — Charges accidentelles .....  | 30 |
| I. 4 — <b>Sollicitations de calcul (combinaison d'action)</b> .....                 | 31 |
| I. 4.1 — Sollicitations de calcul vis-à-vis des états limites ultimes, ELU.....     | 32 |
| I. 4.1.1 — <i>Combinaisons fondamentales</i> .....                                  | 32 |
| — Ponts-routes .....  | 33 |
| — Bâtiments .....   | 34 |
| I. 4.1.2 — <i>Combinaisons accidentelles</i> .....                                  | 36 |
| I. 4.2 — Sollicitations de calcul vis-à-vis des états limites de service, ELS ..... | 36 |
| I. 4.2.1 — <i>Ponts-routes</i> .....  | 37 |
| I. 4.2.2 — <i>Bâtiments</i> .....   | 37 |
| I. 5 — <b>Caractéristiques du béton</b> .....                                       | 38 |
| I. 5.1 — Résistances caractéristiques .....   | 38 |
| I. 5.2 — Diagramme contraintes-déformations .....                                   | 39 |
| I. 5.3 — Modules de déformation longitudinale .....                                 | 42 |
| I. 5.4 — Module de déformation transversale coefficient de Poisson .....            | 43 |
| I. 5.5 — Bétons à hautes performances (BHP) .....                                   | 44 |
| I. 6 — <b>Caractéristiques des aciers</b> .....                                     | 45 |
| I. 6.1 — Résistances caractéristiques .....   | 47 |
| I. 6.2 — Diagramme contraintes-déformations .....                                   | 48 |
| I. 6.3 — Module d'élasticité .....  | 48 |
| <b>II. Calcul du béton armé</b> .....   | 49 |
| II. 1 — <b>Hypothèses de calcul</b> .....   | 49 |
| II. 1.1 — État limite ultime de résistance .....                                    | 49 |
| II. 1.2 — États limites de service vis-à-vis de la durabilité de la structure ..... | 50 |
| II. 1.2.1 — <i>État limite de compression du béton</i> .....                        | 51 |
| II. 1.2.2 — <i>État limite d'ouverture des fissures</i> .....                       | 51 |
| II. 2 — <b>Diagramme des déformations de la section : pivots</b> .....              | 54 |
| II. 3 — <b>Calcul des sections en traction simple</b> .....                         | 57 |
| II. 3.1 — Condition de non-fragilité .....  | 57 |
| II. 3.2 — Détermination des armatures longitudinales .....                          | 57 |
| II. 3.2.1 — <i>Cas où la fissuration est peu préjudiciable</i> .....                | 57 |
| II. 3.2.2 — <i>Cas où la fissuration est préjudiciable</i> .....                    | 58 |



|   |     |
|---|-----|
| II. 3.2.3 — <i>Cas où la fissuration est très préjudiciable</i> .....   | 58  |
| II. 3.3 — <i>Détermination de la section du béton</i> .....   | 59  |
| II. 4 — <b>Calcul des sections en flexion simple</b> .....  | 59  |
| II. 4.1 — <i>Sections rectangulaires, ELU</i> .....   | 59  |
| II. 4.1.1 — <i>Efforts équilibrés par le béton</i> .....  | 60  |
| II. 4.1.2 — <i>Calcul de la section des armatures</i> .....   | 61  |
| II. 4.1.3 — <i>Méthode pratique de calcul</i> .....   | 63  |
| — <i>Section sans armature comprimée</i> .....  | 63  |
| — <i>Section avec armature comprimée</i> .....  | 65  |
| II. 4.1.4 — <i>Méthode approchée pour la détermination<br/>                    des armatures</i> .....  | 66  |
| II. 4.2 — <i>Sections rectangulaires – ELS</i> .....  | 68  |
| II. 4.2.1 — <i>Sections sans armature comprimée</i> .....   | 68  |
| II. 4.2.2 — <i>Sections avec armatures comprimées</i> .....   | 70  |
| II. 4.3 — <i>Sections en T. ELU</i> .....   | 80  |
| II. 4.3.1 — <i>Efforts équilibrés par le béton. Section<br/>                    des armatures</i> .....   | 80  |
| II. 4.3.2 — <i>Méthode approchée pour la détermination<br/>                    des armatures</i> .....  | 82  |
| II. 4.4 — <i>Sections en T. ELS</i> .....   | 83  |
| II. 5 — <b>Calcul des sections rectangulaires en flexion composée</b> .....   | 86  |
| II. 5.1 — <i>Calcul ELU</i> .....   | 86  |
| II. 5.1.1 — <i>Sections entièrement tendues</i> .....   | 86  |
| II. 5.1.2 — <i>Sections partiellement comprimées</i> .....  | 87  |
| II. 5.1.3 — <i>Sections entièrement comprimées</i> .....  | 91  |
| II. 5.1.4 — <i>ELU. Abaques pour le calcul des sections<br/>                    rectangulaires en flexion simple ou composée.<br/>                    Abaques d'interaction</i> ..... | 94  |
| II. 5.2 — <i>Calcul ELS</i> .....   | 105 |
| II. 5.2.1 — <i>Sections entièrement comprimées</i> .....  | 105 |
| II. 5.2.2 — <i>Sections partiellement comprimées</i> .....  | 106 |
| II. 5.2.3 — <i>Sections entièrement tendues</i> .....   | 107 |
| II. 5.2.4 — <i>ELS. Tableaux pour le calcul des sections<br/>                    rectangulaires en flexion composée</i> .....   | 108 |
| II. 6 — <b>Calcul des sections circulaires pleines en flexion<br/>composée</b> .....  | 125 |
| II. 6.1 — <i>Calcul ELU, abaques d'interaction</i> .....  | 125 |
| II. 6.2 — <i>Calcul ELS, emploi des tableaux</i> .....  | 132 |
| II. 7 — <b>Flambement – État limite de stabilité de forme</b> .....   | 137 |
| II. 7.1 — <i>Combinaisons d'actions</i> .....   | 137 |
| II. 7.2 — <i>Longueur de flambement. Élançement</i> .....   | 137 |
| II. 7.2.1 — <i>Longueur de flambement</i> .....   | 137 |
| II. 7.2.2 — <i>Élançement</i> .....   | 138 |
| II. 7.2.3 — <i>Vérification des liaisons</i> .....  | 138 |
| II. 7.2.4 — <i>Cas des bâtiments courants</i> .....   | 139 |
| II. 7.3 — <i>Cas des poteaux peu élançés</i> .....  | 139 |
| II. 7.4 — <i>Méthode générale de calcul</i> .....   | 141 |
| II. 7.4.1 — <i>Hypothèses de calcul</i> .....   | 141 |
| — <i>Imperfection géométrique</i> .....   | 141 |
| — <i>Calcul des sections</i> .....  | 142 |
| II. 7.4.2 — <i>Méthode de calcul</i> .....  | 143 |
| II. 7.4.3 — <i>Utilisation des abaques CAPRA</i> .....  | 144 |
| II. 7.5 — <i>Programmes de calcul au flambement</i> .....   | 145 |

|   |     |
|---|-----|
| II. 7.5.1 — Programme TIGE .....  | 146 |
| II. 7.5.2 — Programme STABOS .....  | 146 |
| II. 8 — <b>Calcul des poteaux en compression « centrée »</b><br><b>bâtiments courants</b> ..... | 147 |
| II. 8.1 — Domaine d'application .....   | 147 |
| II. 8.2 — Méthode de calcul .....   | 148 |
| II. 9 — <b>Calcul des sections à l'effort tranchant</b> .....                                   | 153 |
| II. 9.1 — Calcul des poutres à l'effort tranchant .....   | 153 |
| II. 9.1.1 — <i>Contrainte tangente ultime</i> .....   | 154 |
| II. 9.1.2 — <i>État limite ultime des armatures d'âme</i> .....                                 | 155 |
| II. 9.1.3 — <i>Tableaux pour le calcul de la section</i><br><i>des armatures d'âme</i> .....    | 156 |
| II. 9.2 — Règle des coutures généralisée .....  | 177 |
| II. 10 — <b>Calcul des sections à la torsion</b> .....  | 178 |
| II. 10.1 — Contraintes tangentes de torsion .....   | 179 |
| II. 10.2 — Vérification des contraintes tangentes .....   | 179 |
| II. 10.3 — Détermination des armatures .....  | 180 |
| II. 11 — <b>Calcul des flèches, déformations</b> .....  | 184 |
| II. 11.1 — Calcul des sollicitations .....  | 185 |
| II. 11.2 — Calcul des courbures. Rigidité à la flexion .....                                    | 185 |
| II. 11.2.1 — <i>Hypothèses de calcul</i> .....  | 185 |
| II. 11.2.2 — <i>Méthode de calcul</i> .....   | 186 |
| II. 11.3 — Méthodes applicables aux planchers des bâtiments<br>courants .....                   | 188 |
| II. 11.3.1 — <i>Cas où la vérification de la flèche n'est</i><br><i>pas nécessaire</i> .....    | 188 |
| II. 11.3.2 — <i>Évaluation des flèches</i> .....  | 189 |
| II. 11.3.3 — <i>Vérification d'un plancher supportant</i><br><i>des cloisons</i> .....          | 197 |
| II. 11.3.4 — <i>Valeurs limites des flèches</i> .....   | 198 |
| II. 12 — <b>Effets des variations linéaires</b> .....   | 198 |
| II. 12.1 — Effets dans le sens horizontal .....   | 200 |
| II. 12.2 — Effets dans le sens vertical .....   | 204 |
| <b>III. Association acier-béton</b> .....   | 205 |
| III. 1 — <b>Adhérence</b> .....   | 205 |
| III. 2 — <b>Ancrage et recouvrement des barres</b> .....  | 206 |
| III. 2.1 — Contrainte d'adhérence .....   | 206 |
| III. 2.2 — Ancrages droits .....  | 207 |
| III. 2.2.1 — <i>Longueur de scellement droit</i> .....  | 207 |
| III. 2.2.2 — <i>Recouvrement des barres tendues</i> .....                                       | 209 |
| III. 2.2.3 — <i>Recouvrement des barres comprimées</i> .....                                    | 210 |
| III. 2.2.4 — <i>Armatures de couture</i> .....  | 210 |
| III. 2.3 — Ancrages courbes .....   | 213 |
| III. 2.3.1 — <i>Calcul des ancrages courbes</i> .....   | 213 |
| III. 2.3.2 — <i>Crochets normaux</i> .....  | 216 |
| III. 2.3.3 — <i>Jonction de barres munies de crochets</i> .....                                 | 217 |
| III. 2.3.4 — <i>Armatures de couture</i> .....  | 217 |
| III. 2.3.5 — <i>Dispositions constructives</i> .....  | 217 |
| III. 3 — <b>Entraînement des barres</b> .....   | 221 |

|   |     |
|---|-----|
| III. 4 — <b>Ancrage et entraînement des treillis soudés</b> .....                 | 222 |
| III. 4.1 — Ancrages des treillis soudés .....                                     | 223 |
| III. 4.2 — Jonction par recouvrement .....  | 223 |
| III. 4.3 — Entraînement des treillis soudés .....                                 | 224 |
| III. 5 — <b>Protection des armatures — Possibilité de bétonnage correct</b> ..... | 224 |
| III. 5.1 — Protection des armatures .....   | 225 |
| III. 5.2 — Possibilité de bétonnage correct .....                                 | 225 |
| III. 5.2.1 — <i>Enrobage des armatures</i> .....                                  | 225 |
| III. 5.2.2 — <i>Distance verticale entre deux armatures</i> .....                 | 225 |
| III. 5.2.3 — <i>Distance horizontale entre deux armatures</i> .....               | 225 |
| III. 5.2.4 — <i>Dispositions diverses</i> .....                                   | 227 |
| III. 6 — <b>Scellements des barres dans le béton existant</b> .....               | 232 |
| III. 6.1 — Domaine d'application .....  | 232 |
| III. 6.2 — Dimensionnement des trous .....  | 232 |
| III. 6.3 — Réalisation des scellements .....                                      | 235 |

## IV. Dispositions particulières à certains éléments .....

|  |     |
|--|-----|
| IV. 1 — <b>Poteaux</b> .....   | 237 |
| IV. 1.1 — Justification des poteaux .....                                  | 237 |
| IV. 1.1.1 — <i>Cas général des structures. Calcul sur ordinateur</i> ..... | 237 |
| IV. 1.1.2 — <i>Bâtiments courants</i> .....                                | 238 |
| — Domaine d'application .....  | 238 |
| — Détermination des efforts verticaux .....                                | 239 |
| — Détermination des efforts horizontaux. Cas des portiques ...             | 240 |
| IV. 1.1.3 — <i>Détermination des armatures</i> .....                       | 240 |
| IV. 1.2 — Dimensions minimales .....                                       | 241 |
| IV. 1.3 — Armatures longitudinales .....                                   | 241 |
| IV. 1.4 — Armatures transversales .....                                    | 243 |
| IV. 1.5 — Détails de ferrailage .....                                      | 244 |
| IV. 2 — <b>Poutres</b> .....   | 249 |
| IV. 2.1 — Calcul des sollicitations .....                                  | 249 |
| IV. 2.1.1 — <i>Cas général des structures. Calcul sur ordinateur</i> ..... | 249 |
| IV. 2.1.2 — <i>Méthode forfaitaire</i> .....                               | 249 |
| IV. 2.1.3 — <i>Méthode CAQUOT</i> .....                                    | 252 |
| IV. 2.2 — Définition des portées .....                                     | 254 |
| IV. 2.3 — Définition des sections .....                                    | 256 |
| IV. 2.4 — Armatures longitudinales .....                                   | 258 |
| IV. 2.4.1 — <i>Calcul et dispositions des armatures</i> .....              | 258 |
| IV. 2.4.2 — <i>Condition de non-fragilité</i> .....                        | 259 |
| IV. 2.4.3 — <i>Pourcentage minimal, cas des bâtiments courants</i> .....   | 259 |
| IV. 2.4.4 — <i>Dispositions constructives</i> .....                        | 260 |
| IV. 2.5 — Armatures transversales .....                                    | 261 |
| IV. 2.5.1 — <i>Justifications au voisinage des appuis</i> .....            | 261 |
| IV. 2.5.2 — <i>Disposition des armatures transversales</i> .....           | 263 |
| IV. 2.6 — Vérifications au droit des appuis .....                          | 264 |
| IV. 2.6.1 — <i>Appui simple d'about</i> .....                              | 264 |
| IV. 2.6.2 — <i>Appui intermédiaire</i> .....                               | 267 |
| IV. 2.7 — Dispositions diverses .....                                      | 268 |
| IV. 2.7.1 — <i>Poutres en T, liaison table-nervure</i> .....               | 268 |
| IV. 2.7.2 — <i>Poutres à talon</i> .....                                   | 270 |
| IV. 2.7.3 — <i>Poutre sur un poteau large</i> .....                        | 270 |
| IV. 2.7.4 — <i>Croisement de poutres</i> .....                             | 272 |

|         |   |     |
|---------|---|-----|
|         | IV. 2.7.5 — <i>Nœuds poutre-poteau</i> .....  | 274 |
|         | IV. 2.7.6 — <i>Poutres continues de hauteurs différentes</i> .....                              | 275 |
|         | IV. 2.7.7 — <i>Poutres à niveaux différents</i> .....   | 275 |
|         | IV. 2.7.8 — <i>Poutres non alignées</i> .....   | 276 |
|         | IV. 2.7.9 — <i>Réservations dans les poutres</i> .....  | 277 |
| IV. 3 — | <b>Dalles</b> .....   | 280 |
|         | IV. 3.1 — <b>Calcul des sollicitations</b> .....  | 281 |
|         | IV. 3.1.1 — <i>Dalles portant dans une direction</i> .....                                      | 281 |
|         | IV. 3.1.2 — <i>Dalles portant dans deux directions</i> .....                                    | 282 |
|         | IV. 3.2 — <b>État limite de déformation. Épaisseur minimale</b> .....                           | 282 |
|         | IV. 3.3 — <b>Armatures longitudinales</b> .....   | 284 |
|         | IV. 3.3.1 — <i>Condition de non-fragilité. Pourcentage minimal</i> .....                        | 284 |
|         | IV. 3.3.2 — <i>Calcul direct de la section des armatures principales. Tableaux</i> .....        | 284 |
|         | IV. 3.4 — <b>Calcul des dalles et poutres-dalles à l'effort tranchant</b> .....                 | 289 |
|         | IV. 3.5 — <b>Dispositions des armatures</b> .....   | 291 |
|         | IV. 3.6 — <b>Forces localisées (condition de non-poinçonnement)</b> .....                       | 291 |
| IV. 4 — | <b>Planchers à prédalles</b> .....  | 294 |
|         | IV. 4.1 — <b>Généralités</b> .....  | 294 |
|         | IV. 4.2 — <b>Calcul en flexion, prédalles sur 2 appuis</b> .....                                | 295 |
|         | IV. 4.3 — <b>Calcul en flexion, prédalles sur 3 ou 4 appuis</b> .....                           | 296 |
|         | IV. 4.3.1 — <i>Planchers avec prédalles uniques ou sans joints</i> .....                        | 297 |
|         | IV. 4.3.2 — <i>Planchers avec joints entre prédalles</i> .....                                  | 298 |
|         | IV. 4.3.3 — <i>Dalles avec armatures de répartition disposées dans les prédalles</i> .....      | 298 |
|         | IV. 4.3.4 — <i>Dalles avec armatures de répartition disposées au-dessus des prédalles</i> ..... | 300 |
|         | IV. 4.3.5 — <i>Prédalles sur 3 appuis porteurs</i> .....  | 301 |
|         | IV. 4.4 — <b>Calculs à l'effort tranchant</b> .....   | 301 |
|         | IV. 4.4.1 — <i>Justifications sous sollicitations tangentes</i> .....                           | 301 |
|         | IV. 4.4.2 — <i>Transmission des charges aux appuis</i> .....                                    | 302 |
|         | IV. 4.5 — <b>Dispositions diverses</b> .....  | 307 |
|         | IV. 4.5.1 — <i>Déformations</i> .....   | 307 |
|         | IV. 4.5.2 — <i>Poinçonnement</i> .....  | 308 |
|         | IV. 4.5.3 — <i>Encorbellements</i> .....  | 308 |
|         | IV. 4.5.4 — <i>Bords libres</i> .....   | 309 |
|         | IV. 4.5.5 — <i>Trémies</i> .....  | 309 |
|         | IV. 4.6 — <b>Dispositions parasismiques</b> .....   | 310 |
|         | IV. 4.6.1 — <i>Fonction diaphragme / poutre-au-vent</i> .....                                   | 311 |
|         | IV. 4.6.2 — <i>Fonction liaison</i> .....   | 313 |
| IV. 5 — | <b>Planchers à poutrelles préfabriquées</b> .....   | 315 |
|         | IV. 5.1 — <b>Généralités</b> .....  | 315 |
|         | IV. 5.1.1 — <i>Domaine d'application</i> .....  | 315 |
|         | IV. 5.1.2 — <i>Types des planchers</i> .....  | 315 |
|         | IV. 5.2 — <b>Calcul en flexion</b> .....  | 318 |
|         | IV. 5.2.1 — <i>Planchers</i> .....  | 318 |
|         | IV. 5.2.2 — <i>Hourdis</i> .....  | 322 |
|         | IV. 5.3 — <b>Calcul à l'effort tranchant</b> .....  | 322 |
|         | IV. 5.3.1 — <i>Liaison entre poutrelles préfabriquées et béton coulé en place</i> .....         | 322 |
|         | IV. 5.3.2 — <i>Vérification à l'effort tranchant de la nervure rendue monolithe</i> .....       | 324 |
|         | IV. 5.3.3 — <i>Vérification des conditions d'appui des planchers</i> .....                      | 324 |



|  |     |
|--|-----|
| IV. 5.4 — Calcul des déformations .....                            | 325 |
| IV. 5.5 — Dispositions diverses .....                              | 327 |
| IV. 5.5.1 — Charges concentrées. Solidarisation transversale ..... | 327 |
| IV. 5.5.2 — Encorbellement .....                                   | 328 |
| IV. 5.5.3 — Bords libres .....                                     | 330 |
| IV. 5.5.4 — Trémies et chevêtres .....                             | 330 |
| IV. 5.6 — Dispositions parasismiques .....                         | 331 |
| IV. 5.6.1 — Fonction diaphragme / poutre-au-vent .....             | 331 |
| IV. 5.6.2 — Fonction liaison .....                                 | 333 |

## V. Interface béton armé - charpente métallique ou équipement .....

337

### V. 1 — Généralités .....

337

### V. 2 — Pressions localisées .....

338

V. 2.1 — Diffusion des contraintes et principes des dispositions d'armatures .....

339

V. 2.2 — Contraintes limites de compression .....

343

### V. 3 — Interfaces : poteaux métalliques et fondations .....

345

V. 3.1 — Éléments d'ancrage .....

345

V. 3.2 — Ancrages des poteaux .....

351

### V. 4 — Interfaces : pièces métalliques (ou équipement et surfaces verticales) .....

359

V. 4.1 — Éléments d'ancrage .....

359

V. 4.2 — Ancrages des pièces .....

361

### V. 5 — Interfaces : pièces métalliques (ou équipement et sous-faces ou surfaces des planchers) .....

365

V. 5.1 — Éléments d'ancrage .....

365

V. 5.2 — Ancrages des pièces .....

365

### V. 6 — Réservations : réalisation et remplissage .....

365

### V. 7 — Fixations .....

368