

# Béton armé. Règles BAEL

## Caractères des matériaux Actions et sollicitations

par **Jean PERCHAT**

*Ingénieur des Arts et Manufactures*

*Professeur honoraire à l'École Spéciale des Travaux Publics, du Bâtiment et de l'Industrie*

*Professeur au Centre des Hautes Études de la Construction*

<b>1. Caractères des matériaux.....</b>	<b>C 2 304 - 2</b>
1.1 Béton.....	— 2
1.1.1 Résistances mécaniques .....	— 2
1.1.2 Déformations longitudinales .....	— 3
1.1.3 Déformations transversales. Coefficient de Poisson .....	— 3
1.2 Acier.....	— 3
1.2.1 Types d'armatures utilisées .....	— 3
1.2.2 Caractères géométriques .....	— 4
1.2.3 Caractères mécaniques .....	— 5
1.2.4 Caractères technologiques .....	— 6
<b>2. Actions et sollicitations.....</b>	<b>— 6</b>
2.1 Terminologie .....	— 6
2.2 Actions.....	— 7
2.2.1 Actions permanentes .....	— 7
2.2.2 Actions variables .....	— 7
2.2.3 Actions accidentelles.....	— 8
2.3 Calcul des sollicitations.....	— 8
2.3.1 Simplifications admises dans l'application des méthodes de la Résistance des Matériaux.....	— 8
2.3.2 Redistributions d'efforts.....	— 8
2.3.3 Cas des ouvrages construits en plusieurs phases .....	— 8
2.3.4 Cas des dalles .....	— 8
2.4 Combinaisons d'actions et sollicitations de calcul .....	— 9
2.4.1 Sollicitations de calcul pour les ponts-routes .....	— 9
2.4.2 Sollicitations de calcul dans les structures de bâtiment .....	— 10
2.4.3 Combinaisons accidentelles .....	— 10
2.4.4 Justification de l'équilibre statique.....	— 10
<b>Pour en savoir plus.....</b>	<b>Doc. C 2 320</b>

**D**ans cet article, nous traiterons des différentes caractéristiques du béton et de l'acier ainsi que des actions appliquées à une construction et des sollicitations en découlant.

La série « Béton armé » fait l'objet de plusieurs articles :

- Béton armé [C 2 300]
- Généralités [C 2 301]
- Évolution des méthodes de calcul [C 2 302]
- Règles BAEL.
  - Caractères des matériaux [C 2 304]
  - Actions et sollicitations [C 2 306]
- Règles BAEL. Sollicitations normales [C 2 306]

— Règles BAEL.	
Sollicitations tangentes	
Sollicitations d'adhérence	[C 2 308]
— Règles BAEL.	
Dispositions constructives	
Dispositions particulières	[C 2 310]
— Règles BAEL. Établissement des projets	[C 2 312]
— Règles BAEL. Ossatures et éléments courants	[C 2 314]
— Règles BAEL. Ouvrages particuliers	[C 2 315]
— Règles BAEL. Exécution et estimation des travaux	[C 2 316]
— Règles BAEL. Pathologie et réparation des ouvrages	[C 2 317]
— Règles BAEL. Béton de granulats légers artificiel	[C 2 318]
— Règles BAEL. Comportement expérimental	[C 2 319]
— Pour en savoir plus	[C 2 320]

# 1. Caractères des matériaux

## 1.1 Béton

L'ensemble de la présente rubrique concerne essentiellement les ouvrages dont le béton est constitué de granulats naturels normaux avec un dosage en ciment au moins égal à 300 kg/m<sup>3</sup> de béton mis en œuvre.

Pour les questions relatives aux constituants, à la fabrication, à la mise en œuvre et au contrôle du béton, on consultera les articles spécialisés de la rubrique *Béton hydraulique*.

Il est rappelé que les *classes de résistance* des ciments sont définies par les nombres 35, 45 et 55, qui représentent les *résistances moyennes*, exprimées en MPa, à l'âge de 28 jours ; les limites inférieures nominales correspondantes sont respectivement 25, 35 et 45 MPa, et les limites supérieures 45, 55 et 65 MPa, soit, dans chaque classe, une fourchette de  $\pm 10$  MPa par rapport à la résistance moyenne. Pour certains ciments, le nombre exprimant la classe de résistance est suivi de la lettre R ; la résistance à court terme, alors plus élevée et garantie, permet un décoffrage rapide.

Les ciments THR (résistance nominale à 2 jours supérieure à 30 MPa, et à 28 jours supérieure à 55 MPa) sont en principe réservés à des ouvrages exceptionnels exigeant des résistances très élevées. Dans les ouvrages en béton armé, on utilise normalement des *ciments de classes 45 et 55*.

Le cas des structures en béton léger fait l'objet d'un article particulier [C 2 318].

### 1.1.1 Résistances mécaniques

La *valeur caractéristique* d'une résistance du béton est définie comme correspondant à une probabilité au plus égale à 0,10 de ne pas être atteinte, sauf pour la résistance à la compression si la valeur caractéristique est au moins égale à 25 MPa, où la probabilité de ne pas être atteinte est réduite à 0,05.

■ Dans les cas courants, pour l'établissement des projets, le béton est défini par sa **résistance caractéristique** requise (ou spécifiée) à la **compression** à l'âge de 28 jours, notée  $f_{c28}$ .

La résistance à la compression est mesurée par compression axiale de cylindres droits de révolution de 200 cm<sup>2</sup> de section (grosseur du granulat au plus égale à 31,5 mm) et d'une hauteur double de leur diamètre, suivant le mode opératoire du Laboratoire central des Ponts et Chaussées [C 2 319].

Lorsque des sollicitations s'exercent sur le béton à un âge de  $j$  jours inférieur à 28, il y a lieu de se référer à la résistance caractéristique  $f_{cj}$  obtenue au jour considéré, laquelle peut être évaluée, pour un béton non traité thermiquement, par la formule :

$$f_{cj} = \frac{j}{a + bj} f_{c28}$$

avec :

— pour  $f_{c28} \leq 40$  MPa :

$$a = 4,76 \text{ et } b = 0,83$$

— pour  $40 < f_{c28} \leq 60$  MPa :

$$a = 1,40 \text{ et } b = 0,95$$

Pour un béton âgé de plus de 28 jours ( $j \geq 28$ ), lorsque l'on doit justifier la résistance des sections, on conserve  $f_{cj} = f_{c28}$ .

■ La **résistance caractéristique à la traction** du béton à 28 jours, notée  $f_{t28}$ , est *conventionnellement* définie par la relation :

$$f_{t28} = 0,6 + 0,06 f_{c28}$$

avec  $f_{t28}$  et  $f_{c28}$  en mégapascals.

Cette relation n'est valable que pour des bétons courants dont la résistance caractéristique à la compression ne dépasse pas 60 MPa.

#### ■ Choix des valeurs des résistances caractéristiques

Les Règles BAEL stipulent (art. A. 2.1,1) que les projets doivent être établis en fonction d'une résistance caractéristique spécifiée, qu'il y a lieu d'obtenir lors de l'exécution. Les compositions des bétons ne sont donc normalement définies au niveau du projet qu'à titre indicatif, à moins qu'on ne dispose soit de références précises, soit de garanties comme c'est le cas pour la résistance caractéristique des bétons prêts à l'emploi, à caractéristiques normalisées (BCN).

Le commentaire de l'article A. 2.1,13 donne pour le choix des valeurs de  $f_{c28}$  les indications suivantes :

- une résistance de 20 MPa est facilement atteinte sur les chantiers convenablement outillés ;
- on obtient facilement 25 MPa sur les chantiers faisant l'objet d'un contrôle régulier ;
- on peut obtenir 30 MPa dans toutes les régions, à condition, en outre, de choisir convenablement les matériaux et d'étudier la composition du béton ;

— des résistances supérieures peuvent être atteintes, moyennant une sélection rigoureuse des matériaux utilisés. Ainsi, depuis l'apparition des adjuvants fluidifiants (superplastifiants) qui permettent de réduire le dosage en eau et, plus récemment, des fumées de silice, il est à présent possible de fabriquer à peu près partout en France des **bétons à hautes performances** correspondant à des résistances pouvant atteindre 60, voire 80 MPa et même davantage. Le domaine d'application des Règles BAEL a donc été étendu, mais en le limitant toutefois à 60 MPa (au lieu de 40 MPa antérieurement).

Ces indications sont plutôt applicables à des travaux pour lesquels on dispose de références au départ et qui font l'objet d'un contrôle suivi en cours d'exécution.

Sur les *chantiers courants de bâtiments*, il est souvent difficile de disposer d'informations préalables précises sur les bétons réalisables au lieu de l'exécution. Par ailleurs, on met fréquemment en œuvre des bétons ayant, au *slump test*, un affaissement d'environ 10 cm.

Les règles applicables aux ouvrages et éléments courants de structures en béton armé fournissent les indications complémentaires résumées dans le tableau 1 qui donne, pour les ciments des classes 45 (ou 45 R) et 55 (ou 55 R), les *dosages en ciment* (en kg/m<sup>3</sup>) permettant l'obtention des *valeurs caractéristiques normalisées* de  $f_{c28}$  (en MPa).

Tableau 1 – Dosages en ciment (en kg/m <sup>3</sup> )				
Classe de ciment	45 et 45 R		55 et 55 R	
Conditions de fabrication du béton	CC	AS	CC	AS
$f_{c28} = 16$ MPa	300			
$f_{c28} = 20$ MPa	350	325	325	300
$f_{c28} = 25$ MPa	(1)	400	375	350
$f_{c28} = 30$ MPa	non admis	(1)	(1)	(1)

CC conditions courantes de fabrication du béton.  
AS avec auto-contrôle surveillé.  
(1) cas à justifier par une étude appropriée.

**Nota :** il est évidemment possible d'adopter pour les mêmes compositions des résistances supérieures à celles du tableau lorsque les conditions requises sont remplies.

**Remarque :** la fixation des résistances des bétons à partir du seul critère du dosage a fait l'objet de critiques justifiées ; il est bien évident que le dosage n'est qu'un élément du problème et l'utilisation qui en a été faite par application des règlements antérieurs a été quelquefois abusive. C'est la raison pour laquelle les Règles BAEL ont adopté en la matière une position plus nuancée. Elles rappellent par ailleurs qu'une bonne résistance est généralement liée à une bonne compacité, ce qui est favorable à la durabilité.

Le fait que les Règles BAEL donnent de la résistance caractéristique à la traction une valeur conventionnelle en fonction de  $f_{c28}$  ne doit pas inciter à négliger de faire, en cours de travaux, un contrôle des résistances à la traction soit par essais de fendage d'éprouvettes cylindriques, soit par essais de flexion d'éprouvettes prismatiques [C 2 319].

La résistance à la traction du béton a une influence notable sur le comportement des ouvrages (fissuration, déformations), et des bétons ayant des résistances élevées à la compression peuvent avoir des résistances assez faibles à la traction, tandis que l'inverse ne se produit pas.

### 1.1.2 Déformations longitudinales

Dans sa déformation longitudinale, le béton ne suit pas la loi de Hooke (proportionnalité des contraintes et des déformations, [C 2 302]). Le diagramme contraintes-raccourcissements admis dans les Règles BAEL pour les vérifications des états-limites ultimes est donné en [C 2 306].

Ces Règles définissent de plus les valeurs des modules de déformation instantanée et différée, nécessaires dans certains calculs (notamment état-limite de déformation).

■ Sous des contraintes normales d'une durée d'application inférieure à 24 h, on admet, à défaut de mesures directes, qu'à l'âge de  $j$  jours le **module de déformation longitudinale instantanée** du béton  $E_{ij}$  est égal à :

$$E_{ij} = 11\,000 f_{cj}^{1/3}$$

avec  $E_{ij}$  et  $f_{cj}$  en mégapascals.

■ Sous des contraintes de longue durée d'application, les **déformations longitudinales complémentaires** dues au fluage du béton sont doubles de celles dues aux mêmes contraintes supposées de courte durée et appliquées au même âge.

La déformation *totale* du béton sous charge de longue durée est donc triple de la déformation instantanée sous même contrainte ; il y correspond un module de déformation  $E_{vj}$  donné par la formule :

$$E_{vj} = 3\,700 f_{cj}^{1/3}$$

avec  $E_{vj}$  et  $f_{cj}$  en mégapascals.

■ Sous l'effet du *retrait*, le **raccourcissement unitaire**, dans le cas de pièces non massives à l'air libre, comportant un pourcentage moyen d'armatures, est normalement pris égal à :

- $1,5 \times 10^{-4}$  dans les climats très humides ;
- $2 \times 10^{-4}$  en climat humide, ce qui est le cas de la France, sauf son quart sud-est ;
- $3 \times 10^{-4}$  en climat tempéré sec, tel que le quart sud-est de la France ;
- $4 \times 10^{-4}$  en climat chaud et sec ;
- $5 \times 10^{-4}$  en climat très sec ou désertique.

■ Des indications plus précises, rarement utiles dans les applications courantes du béton armé, sur les **déformations de retrait et de fluage** sont données à l'annexe 1 des Règles BPEL [32].

■ L'effet des **variations de température** est évoqué au paragraphe 2.2.2.4.

### 1.1.3 Déformations transversales. Coefficient de Poisson

Le coefficient de Poisson (article *Béton hydraulique. Variétés de bétons et constituants* [C 2 210]) est pris égal à 0 pour le calcul des sollicitations et à 0,2 pour le calcul des déformations.

## 1.2 Acier

### 1.2.1 Types d'armatures utilisées

Les produits sidérurgiques les plus utilisés pour constituer les armatures des constructions en béton armé sont :

- les ronds lisses (diamètres de 6 à 40 mm) qui peuvent provenir :
  - soit de ronds laminés à chaud,
  - soit de *fil machine* redressé ;
- les barres à haute adhérence (barres HA) laminées à chaud ;

- les fils machine à haute adhérence (diamètres de 3 à 16 mm) laminés à chaud ;
- les fils à haute adhérence (diamètres de 3 à 16 mm) tréfilés et/ou laminés à froid à partir de fil machine ;
- les *treillis soudés* obtenus en assemblant rigidement par soudure effectuée en usine, en chaque point où ils se croisent :
  - soit des fils lisses, tréfilés à partir de fil machine (TSL),
  - soit des fils ou barres à haute adhérence (TSHA).

Les barres ou fils machine à haute adhérence, les fils à haute adhérence et les treillis soudés doivent être *homologués* ou bénéficier d'une autorisation de fourniture ou d'une autorisation d'emploi.

Chaque armature bénéficiant d'une homologation fait l'objet d'une **fiche d'homologation** délivrée par le ministre de l'Équipement, du Logement, des Transports et de l'Espace. Les autorisations de fourniture ou d'emploi sont accordées par le président de la Commission d'homologation.

Tous les produits homologués reçoivent un marquage permettant leur identification. Pour les barres laminées à haute adhérence, les marques sont obtenues au laminage et sont donc indélébiles ; grâce à elles, il est possible de connaître sans ambiguïté l'origine (pays, usine) de l'acier, sa nuance et son aptitude éventuelle au soudage (§ 1.2.4.3).

### 1.2.1.1 Barres

Si la section transversale d'une barre est constante et sensiblement circulaire, on a un *rond lisse* qui est toujours brut de laminage.

Si la surface latérale d'une barre est munie de nervures (ou *verrous*) en saillie, celles-ci améliorent la liaison avec le béton et la barre est dite à *haute adhérence* (barre HA).

Le profil d'une barre HA peut être obtenu :

- soit directement, à la passe finisseuse du laminage à chaud : la barre se présente alors généralement sous la forme d'un rond muni de deux nervures longitudinales, diamétralement opposées, entre lesquelles sont disposées des nervures droites (c'est-à-dire normales à l'axe) ou obliques, régulièrement espacées ;
- soit par torsion à froid d'une ébauche en acier doux à section non circulaire, laminée à chaud : la barre se présente alors sous la forme d'un rond muni de deux ou plusieurs nervures hélicoïdales continues, entre lesquelles sont disposés des *verrous* obliques, régulièrement espacés.

La diversité des paramètres (hauteur, épaisseur, équidistance, angle d'inclinaison sur l'axe, etc.) définissant les verrous fait qu'il existe de nombreux types de barres HA.

L'acier constitutif d'une barre peut être :

a) soit en **acier naturel**, c'est-à-dire un acier brut de laminage, sans traitement mécanique ultérieur, dont les propriétés viennent alors d'une composition chimique appropriée et principalement de la teneur en carbone ; une teneur inférieure à 0,2 % environ correspond à un *acier doux* (cas général des ronds lisses) ; une teneur de l'ordre de 0,30 à 0,40 % correspond à un *acier naturellement dur* (cas de la plupart des types de barres HA) ;

b) soit un **acier**, généralement **doux**, dont les limites d'élasticité en traction et en compression ont été relevées :

- soit par un traitement mécanique approprié (torsion à froid ou traction à froid) ; il s'agit alors d'un acier écroui (cas de quelques types de barres HA) ;
- soit par un traitement thermique de trempe superficielle à l'eau.

Il convient de rappeler ici qu'en raison du coût élevé du traitement mécanique visé ci-avant, les sidérurgistes préfèrent maintenant produire essentiellement des barres HA en acier naturel avec traitement thermique éventuel, plutôt que de fabriquer des aciers écrouis, dont les tonnages sont désormais très réduits.

### 1.2.1.2 Fils

Les fils sont obtenus en écrouissant fortement un *fil machine* brut de laminage par tréfilage ou laminage à froid. Comme les barres, les fils peuvent être soit lisses, soit à haute adhérence.

Dans le cas du tréfilage, la haute adhérence s'obtient en faisant suivre cette opération d'un passage à froid entre des galets qui impriment sur le fil des nervures ou des empreintes.

Les *fils lisses*, dont l'adhérence est très faible, ne peuvent être utilisés que sous forme de *treillis soudés* (la soudure créant un ancrage mécanique du fil).

Les *fils à haute adhérence* (fils HA) peuvent être utilisés :

- soit tels quels ;
- soit sous forme de treillis soudés ou préassemblés.

### 1.2.1.3 Treillis soudés ou préassemblés

De façon générale, on appelle *treillis* un réseau d'armatures plan, à mailles le plus souvent rectangulaires.

La résistance au cisaillement de l'assemblage au point de croisement peut, ou non, être prise en compte dans les calculs, ce qui amène à différencier deux types de treillis :

- les *treillis soudés*, pour lesquels cette résistance est garantie car elle est mise en jeu dans la liaison de l'armature avec le béton ; ces treillis, généralement formés de fils lisses, sont fabriqués en usine sur des machines spéciales automatiques ; ils sont livrés en panneaux plans ou en rouleaux ;
- les *treillis préassemblés* par un procédé quelconque (ligatures, soudures à résistance non garantie, nœud plastique, etc.), pour lesquels la résistance de l'assemblage n'intervient pas dans la liaison des armatures avec le béton, laquelle n'est alors assurée que par l'adhérence propre des barres constitutives (ronds lisses, barres HA ou fils HA) ; ce type de treillis ne fait pas l'objet d'une homologation.

## 1.2.2 Caractères géométriques

Une barre (lisse ou HA) ou un fil (lisse ou HA) est caractérisé par un *diamètre nominal* noté  $\varnothing$ .

Les diamètres nominaux (en millimètres) normalement utilisés appartiennent à la gamme suivante :

- ronds lisses : 6 8 10 12 14 16 20 25 32 40 ;
- barres HA : 6 7 8 9 10 12 14 16 20 25 32 40 ;
- fils HA : 4 5 6 8 10 12 14 16 (plus 7 et 9 mm en nuance Fe E 500) ;
- treillis soudés lisses : de 3 à 12 mm par pas de 0,5 mm ;
- treillis soudés HA : de 4 à 12 mm, par pas de 0,5 mm, plus 14 et 16 mm.

Au diamètre nominal correspondent une *section nominale* et un *périmètre nominal* (section et périmètre d'un rond lisse de diamètre égal au diamètre nominal).

Le tableau 2 donne la section nominale, le périmètre nominal et la masse linéique correspondant aux différents diamètres nominaux.

Des tableaux plus complets, contenant les sections pour un nombre de barres donné (ou le nombre de fils par mètre de largeur pour les treillis soudés), peuvent être trouvés dans le *Formulaire du béton armé* [12] ou dans la documentation de l'Association technique pour le développement de l'emploi du treillis soudé (ADETS) [188].

Une tendance se manifeste actuellement pour la production de barres à haute adhérence de gros diamètre (50, 56 et même, au Japon, 64 mm). Ces barres nécessitent des précautions particulières et leur domaine d'emploi demeure extrêmement limité (très gros ouvrages).

Tableau 2 – Caractères géométriques des armatures

Diamètre nominal (1) (mm)	(3)	(3,5)	(4)	(4,5)	(5)	(5,5)	6	(6,5)	(7)
Section nominale ..... cm <sup>2</sup>	0,071	0,096	0,126	0,159	0,196	0,238	0,283	0,332	0,385
Périmètre nominal ..... cm	0,942	1,100	1,257	1,414	1,571	1,728	1,885	2,042	2,199
Masse linéique ..... kg/m	0,056	0,075	0,099	0,125	0,154	0,187	0,222	0,260	0,302
Diamètre nominal (1) (mm)	(7,5)	(8)	(8,5)	(9)	9,5	10	(10,5)	(11)	(11,5)
Section nominale ..... cm <sup>2</sup>	0,441	0,503	0,567	0,636	0,709	0,785	0,866	0,950	1,04
Périmètre nominal ..... cm	2,356	2,513	2,670	2,827	2,984	3,142	3,298	3,456	3,613
Masse linéique ..... kg/m	0,347	0,395	0,445	0,499	0,556	0,616	0,679	0,746	0,815
Diamètre nominal (mm)	12	14	16	20	25	32	40		
Section nominale ..... cm <sup>2</sup>	1,131	1,539	2,011	3,142	4,909	8,042	12,566		
Périmètre nominal ..... cm	3,770	4,398	5,027	6,283	7,854	10,053	12,566		
Masse linéique ..... kg/m	0,888	1,208	1,579	2,466	3,854	6,313	9,864		

(1) Les diamètres entre parenthèses n'existent pas pour les ronds lisses. Il en est de même pour les barres HA, à l'exception des diamètres 7 et 9 mm.

### 1.2.3 Caractères mécaniques

Les caractères mécaniques auxquels les normes font référence sont :

- la limite d'élasticité en traction (apparente dans le cas des aciers naturels, conventionnelle dans le cas des aciers écrouis) ;
- la contrainte de rupture par traction ;
- l'allongement sous charge maximale ;
- l'allongement de rupture par traction (base de la mesure : 5 Ø).

La limite d'élasticité et la contrainte de rupture par traction sont conventionnellement rapportées à la section nominale d'une barre et non à sa section réelle. Pour les treillis soudés, ces deux caractères, ainsi que l'allongement de rupture, sont mesurés sur des constituants comportant, en leur milieu, un élément transversal soudé. Les modes opératoires sont ceux décrits dans les normes particulières relatives aux éléments constitutifs.

Seuls la limite d'élasticité, l'allongement sous charge maximale et la forme du diagramme contraintes-déformations intéressent directement le calculateur.

#### 1.2.3.1 Limite d'élasticité garantie (en traction)

Le caractère mécanique servant de base aux justifications est la limite d'élasticité.

La valeur garantie notée  $f_e$  fait l'objet d'un contrôle permanent en usine.

Les désignations conventionnelles, les nuances et les limites d'élasticité garanties correspondantes des produits actuellement sur le marché sont données par le tableau 3.

#### 1.2.3.2 Diagramme contraintes-déformations

Le diagramme contraintes ( $\sigma_s$ ) - déformations ( $\epsilon_s$ ) à considérer dans les vérifications des sections est **conventionnellement** défini par la figure 1 ; il se compose :

- de la droite de Hooke, de pente  $E_s = 200\,000$  MPa, indépendante de la nuance de l'acier ;
- d'un palier horizontal d'ordonnée  $f_e$ , limité à  $\epsilon_s = 10\text{‰}$ .

**Remarque :** dans l'édition initiale des Règles BAEL étaient donnés pour les armatures en acier écroui :

- un diagramme contraintes-déformations comportant une partie rectiligne (droite de Hooke) suivie d'une partie courbe définie par une équation du 5<sup>e</sup> degré :  $\epsilon_s = g(\sigma_s^5)$  ;

- un diagramme simplifié composé de deux parties linéaires.

L'utilisation systématique du diagramme de la figure 1 présente le double avantage de simplifier notablement les calculs des sections et d'éviter des erreurs provenant de l'emploi sur le chantier d'armatures différentes de celles prévues à l'élaboration du projet.

Tableau 3 – Caractères mécaniques et armatures

Type	Désignation (nuance)	Limite d'élasticité garantie $f_e$ (MPa)	Emploi
Ronds lisses	Fe E 215	215	emploi courant
	Fe E 235	235	{ épingles de levage des pièces préfabriquées
Barres HA (1)	Fe E 400	400	emploi courant autrefois tend à supplanter la nuance Fe E 400
	Fe E 500	500	
Fils tréfilés HA (2)	Fe TE 400 Fe TE 500	400 500	{ emploi sous forme de barres droites ou de treillis soudés (TSHA)
Fils tréfilés lisses	TL 500	500	treillis soudés uniquement : emploi de moins en moins fréquent

(1) Des marques de laminage appropriées permettent de distinguer les aciers de la nuance Fe E 400 de ceux de la nuance Fe E 500 (§ 1.2.1).

(2) La nuance Fe TE 500 est la plus courante.

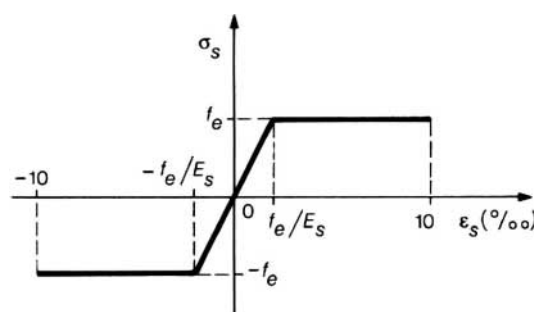


Figure 1 – Diagramme conventionnel contraintes-déformations des armatures de tous types

#### 1.2.3.3 Allongement sous charge maximale

Certaines méthodes de calcul font systématiquement appel à l'adaptation plastique des matériaux. De même, dans le cas de structures soumises à des sollicitations accidentelles telles que séismes, chocs, etc. ou exposées à des situations accidentelles, telles qu'un incendie, il peut se produire, localement, des redistributions



d’efforts : la sécurité de la structure dépend alors de la capacité de déformation que présentent les matériaux dans leur domaine plastique.

Pour l’acier cette capacité de déformation est caractérisée par l’allongement total pour cent sous charge maximale, dont la détermination est définie par la norme expérimentale NF A 03-162 de février 1983, où il est désigné par  $A_{gt}$ . Il s’agit de l’allongement maximal pris par une éprouvette au cours d’un essai de traction, avant que n’apparaisse l’amorce d’un phénomène de striction en une section quelconque de celle-ci.

Les Règles BAEL, aux commentaires de l’article A 2.2.2, fixent la valeur garantie de l’allongement  $A_{gt}$  à :

- 5 % pour les barres HA ;
- 2 % pour les treillis soudés.

**Nota** : la norme européenne EN 10 080, relative aux aciers HA soudables de 500 MPa de limite d’élasticité, définit deux classes de ductilité, H (haute) et N (normale), correspondant aux mêmes valeurs de l’allongement sous charge maximale que les Règles BAEL, mais associées respectivement à des rapports minimaux de la contrainte de rupture à la limite d’élasticité de 1,08 ou 1,03.

1.2.4 Caractères technologiques

1.2.4.1 Caractères d’adhérence

L’aptitude d’une armature à rester solidaire du béton qui l’enrobe, en dépit des forces qui tendent à la faire glisser dans le sens de son axe, est caractérisée par deux coefficients sans dimension :

- l’un, qui intervient dans les calculs relatifs à la fissuration, est appelé *coefficient de fissuration*  $\eta$  ;
- l’autre, utilisé dans les calculs relatifs aux ancrages, est appelé *coefficient de scellement*  $\psi_s$ .

Les caractères d’adhérence dépendent des formes géométriques et des conditions de fabrication des armatures. Les normes définissent, pour les barres ou les fils à haute adhérence, certains profils types assortis de valeurs numériques minimales (ou maximales) des paramètres géométriques de forme ; si ces valeurs sont respectées, les coefficients de fissuration et de scellement sont réputés avoir les valeurs indiquées dans le tableau 4. Sinon, ces coefficients doivent être déterminés expérimentalement.

Tableau 4 – Coefficients de fissuration et de scellement des armatures		
Type	$\eta$	$\psi_s$
Ronds lisses .....	1	1
Barres HA .....	1,6	1,5
Fils HA {	$\varnothing < 6$ .....	1,3
	$\varnothing \geq 6$ .....	1,6
Treillis soudés formés de fils lisses .....	1	(sans objet)

1.2.4.2 Aptitude au façonnage

Dans de nombreux cas, les armatures des pièces en béton armé doivent être façonnées avant leur mise en place (crochets d’extrémité, cadres, étriers, etc.) ; l’acier ne doit donc pas être fragile. Pour apprécier l’aptitude au façonnage et la non-fragilité de l’acier, on effectue respectivement des essais de pliage et des essais de pliage suivi de dépliage, suivant des modalités (rayons de cintrage notamment) plus ou moins sévères.

Pour éviter des ruptures au façonnage sur le chantier, le CCTG (Cahier des clauses techniques générales) fascicule 65 A [189] donne, en ses articles 62.2 et 62.3, les diamètres minimaux  $D$  des mandrins de cintrage qui doivent être adoptés, indépendamment de la condition de non-écrasement du béton [C 2 308] :

- a) ronds lisses :  $D \geq 5 \varnothing$  (avec  $\varnothing$  diamètre nominal de la barre) ;
- pour les cadres, épingles ou étriers, avec  $\varnothing \leq 16 \text{ mm}$  :  $D \geq 3 \varnothing$  ;
- b) barres à haute adhérence : les valeurs de  $D$  sont données par le tableau 5 ; elles ne sont en principe applicables que pour des barres dont la température est au moins égale à + 5 °C ;
- c) treillis soudés : les valeurs de  $D$  dépendent de la présence ou de l’absence d’un nœud de soudure dans la zone de courbure ; on se reportera à l’article 62.4 du fascicule 65 A précité.

Tableau 5 – Diamètres minimaux des mandrins de cintrage des barres à haute adhérence (en mm)												
Diamètre nominal de l’armature (en mm)	4	5	6	8	10	12	14	16	20	25	32	40
Étriers et cadres	20	30	30	40	50	60	90	100	Sans objet			
Ancrages	40	50	70	70	100	100	150	150	200	250	320	400
Coudes	Sans objet			150	200	200	250	300	400	500	500	

1.2.4.3 Soudabilité

Il n’est pas très courant d’assembler des aciers à béton par soudage effectué sur le chantier lui-même. Ce mode d’assemblage est, en revanche, très fréquent dans les usines qui préfabriquent des armatures.

Seuls les aciers dont la composition chimique satisfait aux conditions définies par la norme NF A 35-01 [36] bis) sont considérés comme aptes au soudage et leur fiche d’homologation fait mention de cette aptitude. Pour les aciers qui ne bénéficient pas de cette mention, le soudage est à proscrire totalement.

Les premiers se distinguent des seconds par l’espacement de leurs verrous transversaux, qui n’est pas le même sur les deux chants de la barre.

2. Actions et sollicitations

2.1 Terminologie

On appelle *actions* les forces appliquées à une construction soit directement (charges permanentes, d’exploitation, climatiques, etc.), soit indirectement, et résultant alors de déformations imposées (retrait, fluage, variations de température, tassements, etc.).

On appelle *sollicitations* les efforts (effort normal, effort tranchant) et les moments (moment de flexion, moment de torsion) calculés à partir des actions par des méthodes appropriées.

En ce qui concerne les actions et les sollicitations, les Règles BAEL se sont inspirées d’un document de caractère général : les *Directives communes relatives au calcul des constructions*, dont le texte initial en date du 13. 12. 1971 a été révisé dans le courant de l’année 1979 [37]. Les Règles BAEL comportent une annexe D donnant des *Règles transitoires relatives à la définition des valeurs représentatives des actions et des combinaisons d’actions dans les cas courants*. L’essentiel des prescriptions de cette annexe et du chapitre des Règles qui s’y rapporte est résumé ci-après.

2.2 Actions

Les Règles BAEL distinguent (art. A. 3.1,1) :

— les actions *permanentes*, notées  $G$ , dont l'intensité est constante ou très peu variable dans le temps, ou varie toujours dans le même sens en tendant vers une limite comme, par exemple, les actions dues aux déformations différées du béton (retrait, fluage) ;  
 — les actions *variables*, notées  $Q_i$ , dont l'intensité varie fréquemment et de façon importante dans le temps ;  
 — les actions *accidentelles*, notées  $F_A$ , provenant de phénomènes rares (séisme, chocs, etc.).

Les valeurs des actions à introduire dans les calculs ont généralement un caractère nominal ; celles visées ci-après sont des valeurs forfaitaires et simplifiées, qui tiennent lieu de *valeurs caractéristiques* ou de *valeurs représentatives* telles qu'elles sont définies dans les Directives communes.

## 2.2.1 Actions permanentes

Elles correspondent notamment au poids propre de la structure, à celui des équipements fixes (par exemple revêtements de sols et de plafonds, cloisons dans les bâtiments), aux efforts (poids, poussées, pressions) exercés par des terres ou par des liquides dont les niveaux varient peu, aux efforts dus aux déformations imposées en permanence à la construction.

En général, on introduit dans les calculs, en tant qu'actions de longue durée, les valeurs moyennes des charges permanentes (par exemple, pour le poids propre, le volume évalué d'après les dimensions prévues aux dessins d'exécution et la masse volumique du béton armé prise égale à  $2,5 \text{ t/m}^3$ ).

Il est cependant des cas où il convient de tenir compte des écarts d'une charge permanente par rapport à sa valeur moyenne, lorsque ces écarts peuvent être sensibles ; ce peut être le cas, à titre d'exemple :

- du poids propre d'éléments minces, où les imprécisions d'exécution peuvent conduire à des variations d'épaisseur relativement importantes ( $\pm 1 \text{ cm}$  pour des voûtes de faible épaisseur) ;
- du poids des revêtements de chaussée, susceptible de variations notables ( $\pm 20 \%$ , ou éventuellement  $+ 40 \%$  et  $- 20 \%$ ).

Lorsque les superstructures ne sont pas complètement définies au moment de l'élaboration du projet, le maître d'œuvre doit fixer les valeurs nominales (maximale et minimale) à prendre en compte.

Ce peut être, par exemple, le cas des canalisations empruntant un pont, des cloisons de distribution dans certains bâtiments, des charges de terre sur des planchers-terrasses.

Par ailleurs, dans les cas où la méthode de calcul utilisée ne traduit que très imparfaitement la réalité des phénomènes physiques (application des théories sur la poussée et la butée des terres, par exemple), il convient de tenir compte des hypothèses plausibles les plus défavorables et d'introduire ainsi des valeurs maximale et minimale, dont on peut légitimement supposer qu'elles *encadrent* la réalité.

## 2.2.2 Actions variables

### 2.2.2.1 Charges d'exploitation

Ces charges sont normalement définies par les textes réglementaires ou normatifs en vigueur, et notamment :

- pour les ponts, par les titres I, II, III du fascicule 61 du Cahier des prescriptions communes (CPC) du ministère de l'Équipement [38] [39] ; les valeurs représentatives s'obtiennent en multipliant celles du CPC (ou du CCTG) par les coefficients suivants :

- pour les vérifications aux états-limites ultimes : 1,07 pour les charges de chaussée et sur trottoirs et les passerelles-piétons et 1,00 pour les charges exceptionnelles et les convois militaires,
- pour les vérifications aux états-limites de service : 1,2 pour les charges de chaussée et 1,0 dans les autres cas ;

- pour les bâtiments, par la norme NF P 06-001 [40].

À défaut de tels textes, c'est le maître d'œuvre qui doit fixer les charges à prendre en compte ; c'est notamment le cas des bâtiments

industriels, pour lesquels la norme NF P 06-001 ne donne que des principes d'évaluation des charges.

### 2.2.2.2 Charges climatiques

#### 2.2.2.2.1 Vent

Les actions du vent sont en principe définies par les textes réglementaires en vigueur :

- pour les ponts, par les titres I, II et III du fascicule 61 du CPC (article 14 du titre II pour les ponts-routes) [38] [39] ;
- pour les autres ouvrages, en attendant la parution de la section I du titre IV du fascicule 61 concernant les actions du vent, il convient de se référer aux Règles NV 65, révisées depuis à plusieurs reprises [41], mais les valeurs représentatives à prendre en compte à l'état-limite ultime sont 1,2 fois les valeurs correspondant au vent normal des Règles NV. En revanche, dans les vérifications aux états-limites de service, les valeurs à prendre en compte sont celles correspondant au vent normal des Règles NV, sans majoration. Il est même possible de réduire ces dernières valeurs dans certains cas ne mettant pas en cause la durabilité de la construction ou en phase d'exécution.

#### 2.2.2.2.2 Neige

L'action de la neige ainsi que la situation de compatibilité des actions de la neige et du vent sont définies par le fascicule 61, titre IV, section II du CCTG dit Règles N 84 [39] bis).

### 2.2.2.3 Charges appliquées en cours d'exécution

Il doit en être tenu compte à partir d'évaluations aussi exactes que possible, en prenant en considération *ce qui est raisonnablement envisageable*.

L'annexe D distingue, en ce domaine, les charges connues en grandeur et en position et les charges de caractère aléatoire. Les premières, si elles sont peu variables, sont assimilées, dans les calculs, à des charges permanentes, les secondes, au contraire, à des charges d'exploitation.

#### 2.2.2.4 Température

Pour un ouvrage à l'air libre en zone de climat tempéré, à défaut de justifications plus précises, les actions dues à la température sont déterminées en supposant que les variations de température sont comprises entre  $-40^\circ\text{C}$  et  $+30^\circ\text{C}$ , et en admettant forfaitairement un coefficient de dilatation du béton armé égal à  $10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ .

Ces variations ont été fixées en supposant une température initiale comprise entre  $5^\circ\text{C}$  et  $15^\circ\text{C}$  environ. Il convient d'évaluer les actions réellement subies par l'ouvrage en tenant compte de l'inertie thermique des pièces le constituant et de leur isolation éventuelle.

Les sollicitations correspondantes, qui ne sont pratiquement prises en compte que pour les structures particulièrement sensibles aux effets thermiques, sont évaluées en introduisant pour le béton un module de déformation longitudinale dépendant de la durée d'application des actions : en principe, une variation de température de  $\pm 10^\circ\text{C}$  avec le module  $E_j$  et le complément avec le module  $E_v$ .

Dans certains cas (cheminées par exemple), il est nécessaire de tenir compte des effets d'un gradient thermique. Les valeurs représentatives de cette action sont introduites conformément aux textes spécifiques en vigueur ou, à défaut, aux stipulations du marché.

### 2.2.2.5 Autres actions variables

Les actions variables autres que celles visées aux paragraphes 2.2.2.1, 2.2.2.2, 2.2.2.3 et 2.2.2.4, qui pourraient éventuellement être appliquées à la construction sont évaluées en s'appuyant sur la notion de la valeur représentative définie dans les Directives communes.

### 2.2.3 Actions accidentelles

Ce sont, par exemple, les chocs de véhicules ou de bateaux sur les appuis des ouvrages d'art, et les séismes.

Pour les chocs accidentels sur appuis des ouvrages d'art, on se reportera à l'annexe D des Règles BAEL qui définit les valeurs représentatives des actions (chocs frontaux ou latéraux).

Pour les effets des séismes, on se référera aux Règles parasismiques [42] ; l'application de ces Règles est imposée dans le calcul des structures des immeubles de grande hauteur (IGH) [127].

## 2.3 Calcul des sollicitations

En règle générale, les sollicitations sont calculées en utilisant pour la structure un *modèle élastique et linéaire* et en appliquant les procédés de la Résistance des Matériaux dans la mesure où la forme des pièces le permet.

Dans les cas où cette dernière condition n'est pas remplie, on peut :

- soit adopter des schémas se rapprochant de structures connues ;

- soit avoir recours à des modèles de calcul plus élaborés (méthode des éléments finis, application du principe des équivalences, etc.) ;

- soit procéder à une expérimentation sur modèle réduit ou en vraie grandeur.

### 2.3.1 Simplifications admises dans l'application des méthodes de la Résistance des Matériaux

Dans l'application des méthodes de la Résistance des Matériaux, les simplifications suivantes sont admises.

■ Lorsque les inconnues hyperstatiques ne dépendent pas de la valeur du module de déformation longitudinale, il est loisible d'introduire, dans les équations servant à leur détermination, les constantes mécaniques, *aires et moments d'inertie*, calculées sur les *sections du béton seul* des pièces supposées non fissurées et en négligeant leurs armatures.

Cette approximation n'est toutefois valable que dans la mesure où les rapports des déformabilités des différentes pièces ne sont pas, de ce fait, fondamentalement changés, comme par exemple dans le cas d'un arc sous-tendu par un tirant de section relativement réduite dont la déformabilité peut être voisine de celles des aciers nus.

■ Dans le cas très fréquent d'une **poutre en T** formée d'une nervure associée à un hourdis, on attribue une largeur constante au hourdis associé à la nervure, cette largeur étant égale à celle susceptible d'être prise en compte en travée dans les calculs de résistance [C 2 306].

■ Les **sollicitations du second ordre** sont, le plus souvent, négligées, sauf dans les vérifications d'état-limite ultime de stabilité de forme [C 2 306].

■ Pour les éléments dont les conditions d'encastrement aux appuis ne peuvent être définies avec précision, on peut évaluer les moments d'encastrement à des fractions, choisies forfaitairement, des moments maximaux qui seraient supportés par la pièce reposant sur appuis simples. C'est notamment le cas des dalles [C 2 310] et des poutres courantes de structures de bâtiments [C 2 314].

### 2.3.2 Redistributions d'efforts

Dans certains cas, il convient de tenir compte des redistributions d'efforts dues à la non-concordance du comportement des matériaux avec le modèle théorique adopté. Celle-ci a le plus souvent pour cause les phénomènes de fissuration et de plasticité du béton.

Pour la prise en compte de ces redistributions, il convient de s'appuyer, dans la mesure du possible, sur des bases expérimentales probantes ou sur des méthodes justifiées par une longue expérience des constructeurs comme cela est le cas, par exemple, pour :

- le dernier alinéa du paragraphe 2.3.1 ci-avant ;
- le paragraphe 2.3.4 ci-après relatif au calcul des dalles ;
- de très nombreux exemples de l'article [C 2 314] relatifs aux structures de bâtiments.

Vis-à-vis de l'état-limite ultime, ces phénomènes se traduisent généralement par une atténuation des efforts en certaines sections, mais les Règles BAEL insistent sur les deux points suivants :

- il est déconseillé de prendre en compte des redistributions théoriques non vérifiées par l'expérience ;
- les déformations résultant de ces redistributions doivent être compatibles avec l'état-limite considéré.

### 2.3.3 Cas des ouvrages construits en plusieurs phases

Dans les ouvrages construits en plusieurs phases, il convient de tenir compte de celles-ci dans l'évaluation des sollicitations, aussi bien en cours d'exécution qu'en phase définitive.

C'est le cas notamment :

- des travées indépendantes à poutres (ou poutrelles) préfabriquées comportant un hourdis de liaison entre poutres coulé après mise en œuvre de ces dernières ;
- des travées continues construites travée par travée à l'avancement, ou des poutres (ou poutrelles) indépendantes dont la continuité est réalisée par la suite.

Ces cas se rencontrent aussi bien dans le domaine des ponts que dans celui du bâtiment.

L'évaluation des efforts pour chaque élément doit tenir compte du fait que les déformations successives s'additionnent.

Des redistributions de sollicitations et de contraintes peuvent se produire sous l'effet de déformations différées résultant des diverses phases de construction, lesquelles peuvent être gênées par les liaisons établies au cours des phases suivantes (§ 2.3.2).

### 2.3.4 Cas des dalles

En règle générale, les dalles sont calculées en utilisant un modèle élastique et linéaire (théorie des plaques [63] [64] ; il est toutefois loisible d'avoir recours à la *méthode des lignes de rupture*, sous réserve de satisfaire aux conditions de validité qui lui sont propres [65] [66] [67] [68] et aux règles qui sont énoncées au commentaire de l'article A. 3.2,5 des Règles BAEL.

On admet qu'une force appliquée sur une aire à contour convexe à la surface d'une dalle agit uniformément au niveau du feuillet moyen sur une aire dont le contour est parallèle à la projection du contour d'application de la charge sur ce feuillet et distant de la demi-épaisseur de la dalle.

Si la force est appliquée à la surface d'un revêtement de la dalle, on applique la même règle, la distance entre contours parallèles étant augmentée de l'épaisseur du revêtement, si ce dernier est constitué de béton ou d'un matériau analogue, et des trois quarts de l'épaisseur de ce revêtement, s'il est moins résistant (asphalte, béton bitumineux, enrobés, par exemple) [C 2 308].



## 2.4 Combinaisons d'actions et sollicitations de calcul

**Remarque préliminaire :** une construction pouvant être soumise à un grand nombre de *combinaisons d'actions* complexes et variées, on est amené à faire un choix, en s'efforçant de couvrir avec une forte probabilité les circonstances les plus défavorables susceptibles de se présenter au cours de la vie de la construction.

Pour chacune des combinaisons d'actions retenues, on doit rechercher les *cas de charge* les plus défavorables vis-à-vis de l'état-limite étudié et de la sollicitation étudiée, soit pour l'ensemble de la pièce, soit pour la section considérée.

Il importe de ne pas confondre *combinaisons d'actions* et *cas de charge*, qui constituent deux notions distinctes.

### ■ Principe de justifications

Les justifications doivent montrer, pour les divers éléments d'une structure et pour l'ensemble de celle-ci, que les sollicitations de calcul définies ci-après ne provoquent pas le phénomène que l'on veut éviter.

On est généralement conduit à considérer, en dehors des charges permanentes :

- une action variable dite *de base*, notée  $Q_1$  ;
- des actions variables dites *d'accompagnement*, notées  $Q_i$  avec  $i \geq 2$  ( $Q_2, Q_3, \dots$ ).

Ces actions variables sont affectées, dans les calculs, de divers coefficients  $\psi$  :

- $\psi_0$  (valeur de combinaison) intervient dans les combinaisons fondamentales aux états-limites ultimes ou aux états-limites de service ;
- $\psi_1$  (valeur fréquente) n'intervient que dans les combinaisons accidentelles ;
- $\psi_2$  (valeur quasi permanente) intervient dans les combinaisons accidentelles et pour la vérification de la stabilité de forme.

Les valeurs de ces coefficients sont données tant pour les ponts-routes que pour les bâtiments dans l'annexe D des Règles BAEL à laquelle il convient de se référer. Notons seulement que, dans les bâtiments, la valeur de  $\psi_0$  est égale à 0,77 pour tous les locaux à l'exception des archives et des parcs de stationnement pour lesquels sa valeur est de 0,9. Lorsque l'action de base est la neige, pour une altitude supérieure à 500 m, la valeur 0,77 doit être portée à 0,85.

### ■ Notations

On désigne par :

- $G_{max}$  l'ensemble des actions permanentes défavorables (par rapport à l'action de base) ;
- $G_{min}$  l'ensemble des actions permanentes favorables (par rapport à l'action de base) ;
- $G$  l'ensemble des actions permanentes (définies au paragraphe 2.2.1) ;
- $Q_{prc}$  les charges d'exécution connues (en grandeur et position) ;
- $Q_{pra}$  les charges d'exécution de caractère aléatoire ;
- $Q_r$  les charges d'exploitation des ponts-routes sans caractère particulier (systèmes A et B et charges sur trottoirs) ;
- $Q_{rp}$  les charges d'exploitation des ponts-routes de caractère particulier (convois militaires ou exceptionnels) ;
- $Q_B$  les charges d'exploitation des bâtiments ;
- $W$  l'action du vent évaluée comme indiqué au paragraphe 2.2.2.1 ;
- $S_n$  la charge de neige évaluée comme indiqué au paragraphe 2.2.2.2 ;

- $T$  les variations uniformes de la température 2.2.2.4 ;
- $\Delta\theta$  le gradient thermique (éventuel) ;
- $F_A$  la valeur représentative d'une action accidentelle.

### Remarques importantes :

a) dans une combinaison donnée,  $G_{max}$  et  $G_{min}$  désignent des actions d'origine et de nature différentes, ce qui exclut de partager une même action permanente en deux parties : en particulier, le poids propre d'une poutre continue est introduit, d'une part, avec la même valeur ( $G_{max}$  ou  $G_{min}$ ) et, d'autre part, avec le même coefficient (1,35 ou 1, ci-après) sur toute sa longueur ;

b) les actions variables doivent être considérées, les unes après les autres, comme actions de base ; elles sont toujours introduites de la manière la plus défavorable, soit avec la valeur de combinaison indiquée ci-après, soit avec leur valeur minimale, qui est toujours nulle (absence d'action).

### 2.4.1 Sollicitations de calcul pour les ponts-routes

Les combinaisons d'actions à considérer sont les suivantes.

#### 2.4.1.1 Vérification des états-limites ultimes de résistance (ou de stabilité de forme)

Situation	Actions permanentes ou assimilées $1,35 G_{max} + G_{min}$	Actions variables	
		de base $\gamma_{Q1} Q_1$	d'accompagnement $1,3 \psi_{02} Q_2$
d'exécution	$1,35 G$ ou $G$ + $1,35 Q_{prc}$ ou $Q_{prc}$	$1,5 Q_{pra}$	0 ou $1,3 W$
		$1,5 W$	0 ou $1,3 Q_{pra}$
d'exploitation	$1,35 G$ ou $G$	$1,5 Q_r$	0
		$1,35 Q_{rp}$	0
		$1,5 W$	0

La température ne figure pas dans ce tableau, car elle n'est généralement pas à prendre en compte dans les états-limites ultimes.

#### 2.4.1.2 Vérification des états-limites ultimes de services

Situation	Actions permanentes ou assimilées $G_{max} + G_{min}$	Actions variables	
		de base $Q_1$	d'accompagnement $\psi_{02} Q_2$
d'exécution	$G + Q_{prc}$	$Q_{pra}$	0 ou $W$
		$W$	0 ou $Q_{pra}$
		$T$ ou $\Delta\theta$	0 ou $Q_{pra}$
d'exploitation	$G$	$Q_r$	0 ou $0,5 \Delta\theta$ ou $0,6 T$
		$Q_{rp}$	0
		$\Delta\theta$ ou $T$	0
		$W$	0

## 2.4.2 Sollicitations de calcul dans les structures de bâtiment

Les combinaisons d'actions à considérer dans les cas les plus courants sont les suivantes.

### 2.4.2.1 Vérification des états-limites ultimes de résistance

Actions permanentes $1,35 G_{max} + G_{min}$	de base $\gamma_{Q1} Q_1$	Actions variables d'accompagnement $1,3 \psi_{02} Q_2$
$1,35 G$ ou $G$	$1,5 Q_B$	0 ou $W$ ou $S_n$ ou $W + S_n$
	$1,5 W$	0 ou $1,3 \psi_0 Q_B$ ou $S_n$ ou $1,3 \psi_0 Q_B + S_n$
	$1,5 S_n$	0 ou $1,3 \psi_0 Q_B$ ou $W$ ou $1,3 \psi_0 Q_B + W$

#### Remarques :

a) en situation d'exécution, on peut se reporter aux dispositions indiquées pour les ponts-routes ;

b) les combinaisons faisant intervenir la neige et le vent dépendent des conditions de compatibilité évoquées au paragraphe 2.2.2.2.2 ;

c) les effets de la température ne sont généralement pas pris en compte ([C 2 314] les conditions pour qu'il en soit ainsi) ; s'ils doivent intervenir en tant qu'action de base, ils sont introduits avec le coefficient 1,35 ; s'ils interviennent en tant que seconde action d'accompagnement, ils sont introduits avec les coefficients 0 ou 0,8 ;

d) pour les halles équipées de ponts roulants, les actions variables de base et d'accompagnement sont déterminées en tenant compte des conditions de service simultanées de ces ponts.

### 2.4.2.2 Vérification des états-limites de service

Actions permanentes $G_{max} + G_{min}$	de base $Q_1$	Actions variables d'accompagnement $\psi_{02} Q_2$
$G$	$Q_B$	0 ou $0,77 W$ ou $0,77 S_n$
	$W$	0 ou $\psi_0 Q_B$
	$S_n$	0 ou $\psi_0 Q_B$

#### Remarques :

a) en général, les actions de base sont seules à intervenir pour les états-limites de déformation ;

b) il est rappelé que l'action  $W$  n'est pas évaluée sur les mêmes bases dans les vérifications aux états-limites ultimes et dans celles aux états-limites de service (§ 2.2.2.2.1).

### 2.4.2.3 Modalités d'application aux ossatures et éléments courants des structures en béton armé

Dans les règles applicables à ces ossatures et éléments, des indications sont données sur les différentes combinaisons d'actions à prendre en compte dans les *cas les plus usuels* (y compris ceux de l'équilibre statique), afin de *simplifier* la tâche des projeteurs.

### 2.4.3 Combinaisons accidentelles

Elles s'écrivent symboliquement :

$$G_{max} + G_{min} + F_A + \psi_{11} Q_1 + \sum \psi_{2i} Q_i$$

avec  $F_A$  valeur représentative de l'action accidentelle (§ 2.2.3).

Pour les ponts-routes  $\psi_{2i} = 0$  ; il convient de se reporter à l'annexe D pour les valeurs des coefficients  $\psi_{11}$  applicables aux différentes actions en fonction notamment de la classe de l'ouvrage. Dans les structures de bâtiment, on se réfère aux textes spécifiques : Règles PS pour les séismes [42], DTU Cuvelages pour l'action des crues [96].

### 2.4.4 Justification de l'équilibre statique

Les Règles BAEL renvoient aux Directives communes qui distinguent :

a) l'ensemble des actions permanentes, y compris les parties du poids propre, qui ont un *effet stabilisateur* ;

b) l'ensemble des actions permanentes et quasi permanentes, ainsi qu'éventuellement les charges non permanentes appliquées en cours d'exécution, qui ont l'*effet inverse* ;

c) la valeur caractéristique de l'action de base, qui a un effet déstabilisant ;

d) l'ensemble des valeurs de combinaison des actions d'accompagnement éventuelles.

En principe, les valeurs des coefficients définies dans les Directives communes, à faire intervenir dans une combinaison fondamentale, sont respectivement 0,9 pour  $a$  ; 1,1 pour  $b$  ; 1,5 pour  $c$  et 1,3 pour  $d$ .

Le problème peut être relativement complexe dans l'étude de certains ouvrages d'art ; il fait alors l'objet de prescriptions, soit de documents spécifiques, soit du Cahier des Clauses Techniques Particulières (CTP). Pour certains ouvrages de génie civil (cheminées, réservoirs, cuvelages), des textes réglementaires particuliers existent.

# Béton armé : Règles BAEL

par **Jean PERCHAT**

Ingénieur des Arts et Manufactures

Professeur honoraire à l'École spéciale des travaux publics, du bâtiment et de l'industrie

Professeur honoraire au Centre des hautes études de la construction

## Références bibliographiques

### Traité généraux, formulaires et guides d'emploi

#### Traité généraux

Les cours de béton armé des écoles ENPC, ECP, ETP de même que le cours de béton armé de J. PERCHAT au CHEC ne sont pas en vente. Ces documents peuvent être consultés dans les bibliothèques spécialisées.

- [1] Cent ans de béton armé. 1949, Éd. Science et Industrie.
- [4] GUERRIN (A.) et LAFAUR (R.C.). – *Traité de béton armé. Tome I : Généralités. Propriétés générales. Mécanique expérimentale du béton armé.* 356 p., 16 × 25, 4<sup>e</sup> éd., 1973, Dunod.
- [5] GUERRIN (A.). – *Traité de béton armé. Tome II : Le calcul du béton armé.* 1973, Dunod.
- [9] MONTOYA (P.J.), MESEGUER (A.G.) et MORAN CABRE (F.). – *Hormigon armado.* 1973, Gustavo Gili, Barcelone.
- [11] FAUCHART (J.). – *Initiation au calcul des structures. Béton et acier.* 312 p., 16 × 25, 433 fig., 3<sup>e</sup> tirage, 1981, Eyrolles.

#### Formulaires et guides d'emploi

- [12] CHAMBAUD (R.) et LEBELLE (P.). – *Formulaire du béton armé. Tome I : 589 p., 17 × 25, 288 fig., 49 tabl., 72 abaques.* 3<sup>e</sup> éd., 1967, Eyrolles (épuisé).
- [13] COURTAND (M.) et LEBELLE (P.). – *Formulaire du béton armé. Tome II : Application de la Résistance des Matériaux au calcul des structures en béton armé.* 760 p., 14 × 23, 223 fig., 102 tabl., 2<sup>e</sup> éd. complétée et refondue par (W.A.) JALIL, 1976, Eyrolles (épuisé).
- [14] JALIL (W.A.), BOUTIN (J.P.) et MICHOT (S.). – *Application des Règles BAEL 91 au cas des bâtiments courants.* Ann. ITBTP, janv. 1992.
- [15] *Guide d'emploi du règlement français de béton armé aux états-limites. BAEL 83.* 1985, 21 × 29,7, 219 p. SETRA (ouvrage complété par un document de synthèse BAEL 91 – BPEL 91, 20 p., 21 × 29,7, 1993, SETRA).
- [16] CAPRA (A.) et DAVIDOVICI (V.). – *Guide pratique d'utilisation des Règles BAEL 80.* 272 p., 21,5 × 30,5, 99 fig., 38 tabl., 145 abaques, 2<sup>e</sup> tirage, 1981, Eyrolles (épuisé).
- [17] ISSABRÉ (O.) et KALIPÉ (N.). – *Memento Règles BAEL. Calcul rapide du béton armé.* 160 p., 14,5 × 21, 1982, Éd. Moniteur.
- [18] GUERRIN (A.), LAFAUR (R.C.) et LECROQ (Ph.). – *Guide de béton armé.* 396 p., 16 × 25, 1970, Dunod.
- [19] *Beton Kalender.* Éd. annuelle, Verlag W. Ernst und Sohn.

- [20] DAVIDOVICI (V.). – *Aide-mémoire du béton armé.* 192 p., 13 × 18, 178 fig., 1974, Dunod.

#### Méthodes de calcul.

##### Règlements et recommandations

##### Méthode aux contraintes admissibles

Les références [21] [22] [23] [24] [25] [26] [27] [28] sont anciennes et ne sont citées que pour mémoire.

- [21] *Instructions relatives à l'emploi du béton armé.* Circulaire du 20 oct. 1906, Imprimerie Centrale Administrative.
  - [22] *Règlement sur les constructions en béton armé établi par la Commission d'Études Techniques de la Chambre Syndicale des Constructeurs en Ciment Armé de France.* 1931, Gauthier-Villars.
  - [23] *Instructions relatives à l'emploi du béton armé dans les ouvrages dépendant du ministère des Travaux Publics et commentaires explicatifs.* Circulaire du 19 juil. 1934, Imprimerie Centrale Administrative.
  - [24] *Règles d'utilisation du béton armé applicables aux travaux dépendant du ministère de la Reconstruction et de l'Urbanisme et aux travaux privés. Règles BA 1945, modifiées en mars 1948.* Documentation Techn. Bât.
  - [25] *Règles d'utilisation des ronds crénelés et lisses pour béton armé de limite élastique supérieure ou égale à 40 kg/mm<sup>2</sup>.* Règles 1948, ronds n<sup>o</sup> 40-60. Inst. Techn. Bât.
  - [26] *Règles pour le calcul et l'exécution des constructions en béton armé* (Document Technique Unifié) Règles BA 1960. Documentation Techn. Bât. mars 1961.
  - [27] *Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton armé (dites Règles CCBA 1968, révisées 1970).* 240 p., 16 × 25, 51 fig., 5<sup>e</sup> tirage, 1975, Eyrolles.
  - [28] *Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton armé.* Circulaire MEL n<sup>o</sup> 70-115 du 27 oct. 1970. Fasc. 61 titre VI modifié du CPC. (Le texte de ce document est le même que celui des Règles CCBA 1968, il tient compte des modifications de juil. 1970). BOMET Fasc. Spéc. n<sup>o</sup> 70-93 bis.
- Méthodes de calcul à la rupture**
- Ces méthodes n'ont jamais fait, en France, l'objet de textes réglementaires.
- [29] CHAMBAUD (R.). – *Le calcul du béton armé à la rupture.* 1965, Eyrolles (épuisé).
- Méthodes de calcul aux états-limites**
- [30] Recommandations internationales pour le calcul et l'exécution des ouvrages en béton. (Comité Européen du Béton et la Fédération

Internationale de la Précontrainte.) Tome I : *Principes et recommandations.* 91 p., 21 × 29,5, 1970 ; Tome II : *Fascicules annexes. Propositions.* 49 p. 21 × 29,5, 1970, Eyrolles (épuisé).

- [32] *Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton précontraint suivant la méthode des états-limites* (Règles BPEL 91). 15,5 × 24, 328 p., 1993, Eyrolles (également CSTB, avr. 1992).
- [33] *Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton armé suivant la méthode des états-limites* (Règles BAEL 91). 15,5 × 24, 320 p., 1996, Eyrolles (également CSTB, mars 1992 et J.O. 1994).
- [33bis] *Eurocode 2 « Calcul des structures en béton »* et Document d'Application Nationale, Norme NF P 18-711-0 (ENV 1992-1-1), AFNOR 1992.

#### Matériaux

##### Béton

Se reporter à la bibliographie des articles de la rubrique Béton hydraulique.

##### Acier

- [34] *Armatures pour béton armé.* Titre I<sup>er</sup> du fascicule 4 du CCTG n<sup>o</sup> spécial 83-14 bis du BOUL T. et E.
- [35] Liste des armatures bénéficiant du droit d'usage de la marque NF « Armatures pour béton armé ». AFCAB.
- [36] Collection des normes A35-015 à A35-030 « Armatures pour béton armé » (pour connaître le titre et la dernière édition de chacune d'elles, se reporter au Catalogue des normes AFNOR, mis à jour chaque année).
- [36bis] Norme NF A 35-018 *Armatures pour béton armé – Aptitude au soudage*, AFNOR, juil. 1984.

#### Actions et sollicitations

- [37] *Instructions techniques sur les directives communes de 1979 relatives au calcul des constructions.* Circulaire n<sup>o</sup> 79-25 du 13 mars 1979. BOMET Fasc. Spéc. 79-12 bis.
- [38] *Conception, calcul et épreuves des ouvrages d'art, titres I et III du fascicule 61 du CPC.* Circulaire n<sup>o</sup> 65 du 19 août 1960. Titre I : *Programmes de surcharges et épreuves des ponts rails.* Titre III : *Programme de charge et épreuve des ponts canaux.* BOMET Fasc. Spéc. n<sup>o</sup> 60-17 bis.
- [39] *Conception, calcul et épreuves des ouvrages d'art, titre II du fascicule 61 du CPC. (Programme de charges et épreuves des ponts routiers).* Circulaires n<sup>o</sup> 71-155 du 29 déc. 1971 et n<sup>o</sup> 75-156 du 30 déc. 1971. BOMET Fasc. Spéc. n<sup>o</sup> 72-21 bis.

## BÉTON ARMÉ : RÈGLES BAEL

- [39bis] Règles N 84 – Actions de la neige sur les constructions (DTU P06-006), août 1987. CSTB.
- [40] Bases de calcul des constructions – Charges d'exploitation des bâtiments. NF P06-001, AFNOR, juin 1986.
- [41] Règles définissant les effets de la neige et du vent sur les constructions et annexes (Règles NV 65 révisées), 15 × 24, 392 p., 1994, Eyrolles (contient aussi les Règles N 84 [39bis]).
- [42] Règles parasismiques 1969, révisées 1982 dites Règles PS 69/82 et annexes (janv. 1984), 15,5 × 24, 272 p., 1995, Eyrolles.
- [42bis] Règles PS applicables aux bâtiments (Règles PS 92), 17 × 24, 288 p., 1996, Eyrolles.

## Solicitations normales

## État-limite ultime de résistance

- [43] RÜSCH (H.), GRASSER (E.) et RAO (P.S.). – Principes de calcul du béton armé sous des états de contraintes monoaxiaux. Bull. Information CEB n° 36, juin 1962.
- [44] Manuel de calcul CEB-FIP Bending and Compression. 111 p., 21,5 × 30,5, nombreux abaques, 1982, Construction Press.
- [45] GRASSER (E.). – Bemessung der Stahlbetonbauteile, Beton-Kalender. 1975, Verlag W. Ernst und Sohn.
- [46] JALIL (W.A.), MORISSET (A.) et PERCHAT (J.). – Calcul du béton armé à l'état-limite ultime. Abaques en flexion simple et composée conformes aux Règles BAEL 412 p., 16 × 25, 305 fig., 22 tabl., 1976, Eyrolles (épuisé).
- [47] JALIL (W.A.) et PERCHAT (J.). – Calcul pratique du béton armé à l'état-limite ultime (BAEL). Ann. ITBTP, janv. 1977.

Voir également [147] [148] [149] et [167] [168].

## État-limite ultime de stabilité de forme

- Voir également références [73] [74] [75] [76] [77] [78] [79] [80].
- [48] Manuel de calcul CEB-FIP Flambement-instabilité. Bull. Information CEB n° 103, juil. 1975.
- [49] MORISSET (A.). – Stabilité des piles et des pylônes. Ann. ITBTP, janv. 1976.

## États-limites de service

- [50] Manuel de calcul CEB-FIP Fissuration et déformation. Bull. Information CEB n° 143, déc. 1981 (en anglais).
- [51] JACCOUD (J.P.) et FAVRE (R.). – Flèche des structures en béton armé. Vérification expérimentale d'une méthode de calcul. Ann. ITBTP, juil.-août 1982.
- Voir également [164].

## Solicitations tangentées

## Effort tranchant

- [52] Manuel de calcul CEB-FIP Effort tranchant-Torsion. Bull. Information CEB n° 92, juin 1973.
- Voir également [165] [166].

## Torsion

- Voir également [52].
- [53] ROBINSON (J.R.). – Éléments constructifs spéciaux du béton armé. (Poutres soumises à la torsion, poutres-cloisons, consoles courtes, semelles de fondations, articulations). 1975, Eyrolles
- [54] FAUCHART (J.). – Rupture des poutres de section rectangulaire en béton armé ou précontraint, par torsion et flexion circulaire combinées. Ann. ITBTP, janv. 1973.

## Solicitations d'adhérence

- [55] ROBINSON (J.R.), ZSUTTY (T.C.), GUIORGADZÉ (G.), LIMA (L.J.), HOANG LONG HUNG et VILLATOUX (J.P.). – La couture des jonctions par adhérence. Ann. ITBTP, juin 1974.

- [56] Bond action and bond behaviour of reinforcement. Bull. Information CEB n° 151, déc. 1981.
- [57] FAUCHART (J.) et HOANG LONG HUNG. – Ancrage des treillis soudés formés de fils bruts de tréfilage de forme cylindrique. Ann. ITBTP, avr. 1973.

## Dispositions constructives

- [58] Manuel : Technology of reinforcement. Bull. Information CEB n° 140.

Voir également références [167] [168].

## Ossatures des bâtiments

## Ouvrages généraux

- [59] COIN (A.). – Ossatures des bâtiments. (Bases de la conception. Différentes catégories d'ouvrages élémentaires. Annexes sur l'isolation et la sécurité). 256 p., 15,4 × 24,3, nombreux abaques, tabl., fig., 4<sup>e</sup> éd., 1981, Eyrolles (épuisé).
- [60] FUENTES (A.). – Béton armé. Calcul des ossatures (Torsion - Flambement - Oscillations - Déformations plastiques), 15,5 × 24, 232 p., 1987, Eyrolles.
- [61] GUERRIN (A.). – Traité de béton armé. Tome IV : Ossatures d'immeubles et d'usines. Planchers. Escaliers. Encorbellements. Ouvrages divers du bâtiment. 1973, Dunod.
- [62] FUENTES (A.). – Comportement post-élastique des structures en béton armé, 15,5 × 24, 136 p., 1988, Eyrolles.

Voir également [158].

## Dalles

- [63] LHEUREUX (P.). – Calcul des plaques rectangulaires minces au moyen des abaques de M. l'Inspecteur Général Pigeaud. 1957, Gauthier-Villars.
- [64] PÜCHER (A.). – Einflussfelder elastischer Platten. 1973, Springer Verlag.
- [65] LEBELLE (P.). – Calcul à rupture des hourdis et plaques en béton armé. Ann. ITBTP, janv. 1955.
- [66] ALBIGÈS (M.) et FREDERIKSEN (M.). – Calcul à la rupture des dalles par la théorie de Johansen. Ann. ITBTP, janv. 1960.
- [67] BERNAERT (S.), HAAS (A.M.) et STEINMANN (G.A.). – Calcul des dalles et structures planes aux états-limites. Ann. ITBTP, mai 1969.
- [68] COMITÉ EUROPÉEN DU BÉTON. – Annexes aux recommandations internationales pour le calcul et l'exécution des ouvrages en béton. Tome III. Annexe 5 : Dalles et structures planes. 1972, Eyrolles.

## Poutres de planchers

- [69] REIMBERT (M. et A.). – Calcul rapide des poutres continues par la méthode de M. Caquot. Applications pratiques. Calculs d'avant-projets. Formulaire. 1960, Eyrolles.

Voir également [150].

## Parois fléchies. Consoles courtes

- Voir également [53].
- [70] LEONHARDT (F.) et ALBIGÈS (M.). – Poutres-cloisons et recommandations internationales du CEB pour le calcul des poutres-cloisons. Ann. ITBTP, janv. 1970.
- [71] Recommandations provisoires du Bureau Securitatis concernant les parois fléchies, les consoles courtes, le pourcentage minimal des armatures longitudinales dans les éléments de béton armé extérieurs aux bâtiments. Ann. ITBTP, mai 1974.

## Planchers-champignons et planchers-dalles

- [72] DAVIDOVICI (V.) et JALIL (W.A.). – Planchers-dalles. Étude comparative des diverses méthodes de calcul. Ann. ITBTP, déc. 1969.

## Poteaux

- [73] ROBINSON (J.R.) et MODJABI (S.S.). – La prévision des charges de flambement des poteaux en béton armé par la méthode de M. P. Faessel. Ann. ITBTP, sept. 1968.

- [74] FAESSEL (P.), MORISSET (A.) et FOURÉ (B.). – Le flambement des poteaux en béton armé. Ann. ITBTP, mai 1973.

- [75] FAESSEL (P.), ROBINSON (J.R.) et MORISSET (A.). – Tables d'états-limites ultimes des poteaux en béton armé. 1971, Eyrolles (épuisé).

- [76] CAPRA (A.). – Flambement des poteaux en béton armé soumis à des forces horizontales. Abaques de calcul. Ann. ITBTP, janv. 1975.

- [77] ROBINSON (J.R.), FOURÉ (B.) et SAHEBDJEM (A.). – Flambement des poteaux carrés en béton chargés hors d'un plan de symétrie. Ann. ITBTP, avr. 1975.

- [78] ROBINSON (J.R.), FOURÉ (B.) et BOURGHLI (A.V.). – Le flambement des poteaux en béton armé chargés avec des excentricités différentes à leurs extrémités. Ann. ITBTP, nov. 1975.

- [79] COIN (A.). – États-limites ultimes de poteaux liés. Ann. ITBTP, oct. 1975.

- [80] HINDIÉ (N.). – Méthode pratique de calcul pour ordinateur de poche HP67 des états-limites ultimes au flambement des poteaux rectangulaires en béton armé d'après la méthode de Faessel. Ann. ITBTP, oct. 1977. (Le programme demanderait à être adapté aux outils modernes).

## Murs et contreventements

- [81] DTU 23-1. – Parois et murs en béton banché, fév. 1990. CSTB.
- [82] ALBIGÈS (M.) et GOULET (J.). – Contreventement des bâtiments. Ann. ITBTP, mai 1960.
- [83] DECAUCHY (A.). – Contreventement des bâtiments. Ann. ITBTP, janv. 1964.
- [84] GRINDA (L.). – Calcul des voiles de contreventement des bâtiments à étages. Ann. ITBTP, juil.-août 1967.
- [85] COIN (A.), DECAUCHY (A.) et COLLIGNON (J.P.). – Murs de contreventement à ouvertures multiples. Ann. ITBTP, févr. 1971.
- [86] DESPEYROUX (J.) et GUILLOT (V.). – Problèmes de contreventement. Ann. ITBTP, févr. 1972.
- [87] COIN (A.). – États-limites ultimes des murs porteurs. Ann. ITBTP, janv. 1975.
- [88] BONVALET (C.), GIRARD (J.), ILANTZIS (A.) et WIANECKI (J.). – Influence des remplissages dans les bâtiments à ossature soumis aux efforts horizontaux dus au vent et aux séismes. Ann. ITBTP, déc. 1970.

## Fondations

Voir également [53].

- [89] DTU 13-12. Règles pour la calcul des fondations superficielles, mars 1988 (et erratum, nov. 1988) [AFNOR, DTU P11-711]. CSTB.
- [90] DTU 13-2. Travaux de fondations profondes pour le bâtiment, 1991, CSTB.
- [91] Pieux en béton armé moulés d'avance. Ann. ITBTP, juin 1961.
- [92] LEBELLE (P.). – Semelles de béton armé. 1936, Mémoires Assoc. Intern. Ponts Charpentiers.
- [93] GUERRIN (A.). – Traité de béton armé. Tome III : Les fondations. 1974, Dunod.
- [94] BLÉVOT (J.) et FRÉMY (R.). – Semelles sur pieux. Méthodes de calcul. Compte rendu d'essais. Dispositions constructives. Ann. ITBTP, févr. 1967.
- [95] JALIL (W.A.). – Fondations annulaires et circulaires d'ouvrages de révolution. Ann. ITBTP, juin 1969.

## Cuvelages

- [96] DTU 14-1. Travaux de cuvelage, oct. 1987 et juin 1988, CSTB.

## Constructions particulières

## Charpentes et couvertures

- [97] HAHN (J.). – Voiles minces réglés. Voiles cylindriques, coniques, conoïdes et conoï-



daux. *Méthode de calcul simplifiée*. 1966, Eyrolles.

- [98] DIVER (M.) et FARGETTE (F.). – *Étude des voiles plissées*. Ann. ITBTP, mars-avr. 1968.
- [99] GUERRIN (A.). – *Traité de béton armé*. Tome V : *Toitures, voûtes, coupoles*. 1970, Dunod.
- [100] PADUART (A.). – *Les voiles minces en béton armé*. 1969, Eyrolles.
- [101] COIN (A.) et JOURNET (H.). – *Cours de voiles minces*. 1971, Eyrolles.

### Réservoirs, cuves, châteaux d'eau et piscines

- [102] *Réservoirs et cuves en béton armé*. Ann. ITBTP, févr. 1960.
- [103] *Recommandations professionnelles* (mai 1990) pour le calcul, la réalisation et l'étanchéité des réservoirs, cuves, bassins, châteaux d'eau enterrés, semi-enterrés, aériens, ouverts ou fermés. Ann. ITBTP, sept. 1990.
- [104] GUERRIN (A.). – *Traité de béton armé*. Tome VI : *Réservoirs, châteaux d'eau, piscines*. 1972, Dunod.
- [105] *Cahier des Charges applicable à la construction des bassins de piscine à structure en béton*. Ann. ITBTP, mai 1977 (en révision ; voir [179]).

### Silos

- [106] *Règles professionnelles de conception et de calcul des silos en béton armé ou précontraint*. Ann. ITBTP, juil.-août 1986.
- [107] ALBIGES (M.) et LUMBROSO (A.). – *Silos à cellules principales circulaires et intermédiaires en as de carreau*. Ann. ITBTP, déc. 1964.
- [108] LUMBROSO (A.). – *Détermination numérique des sollicitations exercées par la matière ensilée dans les silos*. Ann. ITBTP, mars-avr. 1970.
- [109] REIMBERT (M. et A.). – *Silos. Traité théorique et pratique*. 1971, Eyrolles.
- [110] LUMBROSO (A.). – *Bases scientifiques du calcul des enceintes renfermant des massifs pulvérulents et du calcul des silos*. Ann. ITBTP, janv. 1977.
- [111] LEBÈGUE (Y.) et BOUDAKIAN (A.). – *Bases des règles « Silos » du SNBATI - Essais sur les produits et principes des formules « Silos »*. Ann. ITBTP, août-sept. 1989.

### Soutènements

- [112] GUERRIN (A.). – *Traité de béton armé*. Tome VII : *Murs de soutènement et murs de quai*. 1972, Dunod.

### Tours et cheminées

Voir également [121].

- [113] *Règles applicables à la construction des cheminées en béton armé*. Ann. ITBTP, avr. 1971.
- [114] *Règles applicables à la construction des tours en béton armé*. Ann. ITBTP, mai 1971.
- [115] DIVER (M.). – *Étude des cheminées en béton armé*. Ann. ITBTP, mai 1966.
- [116] DIVER (M.). – *Calcul pratique des cheminées en béton armé*. Ann. ITBTP, mai 1969.
- [117] JALIL (W.A.), LEJAY (J.), FERBECK (M.) et GROVALET (Y.). – *Problèmes spécifiques concernant le calcul des tours et cheminées en béton armé*. Ann. ITBTP, juin 1973.

### Immeubles de grande hauteur

- Voir également [81] [82] [83] [84] [85] [86] [87] [88] et [127].
- [118] DAVIDOVICI (V.). – *Effets des variations linéaires dans les bâtiments de grande hauteur*. Ann. ITBTP, sept. 1967.
- [119] LAREDO (M.). – *Théorie générale du comportement des grandes structures spatiales*.

*Application par les gros ordinateurs*. Ann. ITBTP, févr. 1969.

- [120] DIVER (M.). – *Calcul pratique des tours en béton armé. Action du vent, bâtiments-tours, tours de section annulaire*. 1972, Dunod.
- [121] CMI. – *Congrès international sur la conception et l'étude des immeubles de grande hauteur. Université de Lehigh (USA), 21-26 août 1972*. (Traduit de l'anglais) (27 fascicules) 1972, Eyrolles.

### Ponts

Voir également [63] [64] [65] [66] [67] [68].

- [122] THÉNOZ (M.). – *Calcul des dalles (hourdis des ponts à poutres)*. Bull. Techn. SETRA n° 1, mai 1972.
- [123] ROBINSON (J.R.). – *Piles, culées et cintres de ponts*. 1958, Dunod.

### Autres constructions ou éléments de constructions

- [124] GUERRIN (A.). – *Traité de béton armé*. Tome IX : *Constructions diverses*. 1969, Dunod.
- [125] FAESSEL (P.). – *Le calcul des réfrigérants à tirage naturel*. Ann. ITBTP, avr. 1971.
- [126] DIVER (M.). – *Considérations sur le calcul des réfrigérants atmosphériques*. Ann. ITBTP, sept. 1977.

### Résistance au feu

- [127] *Sécurité contre l'incendie* (Réglementation) Texte n° 1011. 1974. Direction des Journaux Officiels.
- [128] *Règles FB (DTU 92-701) Méthode de prévision par le calcul du comportement au feu des structures en béton*, oct. 1987, CSTB.
- [129] COIN (A.). – *Rotules plastiques des dalles soumises au feu*. Ann. ITBTP, mars 1978.
- [130] COIN (A.). – *Calcul élastique d'une poutre en béton dans un champ de température*. Ann. ITBTP, juil.-août 1974.

### Préfabrication

- [131] DTU 21.3 *Dalles et volées d'escalier préfabriquées, en béton armé, simplement posées sur appuis sensiblement horizontaux*, CSTB, oct. 1970.
- [132] CEB. – *Recommandations internationales pour les structures en panneaux*. 1969, Eyrolles.

### Exécution des ouvrages

- [133] *Exécution des ouvrages de Génie Civil en béton armé ou précontraint*. Fascicule 65 du CCTG. Fascicule spécial n° 85-30 bis du BOMUL T et E.
- [134] *Recommandations pour la réalisation des étalements*. Ann. ITBTP, avr. 1974.
- [135] *Coffrages glissants*. Ann. ITBTP, juil.-août 1976.
- [136] DINESCO (T.). – *Les coffrages glissants. Technique et utilisation*. 1968, Eyrolles (épuisé).

Voir également [191] [192].

### Pathologie

- [137] CHARON (P.). – *Comment éviter les erreurs dans les études de béton armé*. 1973, Eyrolles (épuisé).
- [138] BLÉVOT (J.). – *Pathologie des constructions en béton armé*. Ann. ITBTP, sept. 1974.
- [139] BLÉVOT (J.). – *Enseignements tirés de la pathologie des constructions en béton armé*. 1975, Eyrolles (épuisé).

### Estimation des ouvrages

- [140] SNBATI. – *Nomenclature codifiée des ouvrages ou tâches élémentaires et temps moyens*. 172 p., 21 × 27.

- [141] MAUVERNAY (J.). – *La détermination des poids d'acier dans le béton armé. Méthode rapide et précise d'avant-métré*. 1973, Eyrolles.

### Béton léger

- [142] *Recommandations provisoires pour l'utilisation des bétons de granulats légers*. Ann. ITBTP, mars 1976.
- [143] *Recommandations provisoires pour l'emploi du béton léger dans les ouvrages dépendant de la Direction des Routes et de la Circulation routière au ministère de l'Équipement*. SETRA-LCPC, déc. 1976.
- [144] BRACHET (M.), ADAM (M.), PERCHAT (J.) et VIRLOGEUX (M.). – *Bilan et perspective d'emploi des bétons légers de structure*. Ann. ITBTP, déc. 1976.
- [145] LEWICKI (B.). – *Dalles de planchers et de toitures en béton léger armé ou précontraint*. (Traduit du polonais), 1968, Eyrolles.

Voir également [186] et [205].

### Liste complémentaire

- [146] *Système international de réglementation technique unifiée des structures*. Vol. I : *Règles unifiées communes aux différents types d'ouvrages et de matériaux* ; Vol. II : *Code Modèle CEB-FIP pour les structures en béton*. Bull. Information CEB n° 124/125-F, avr. 1978.
- [147] THONIER (H.). – *Détermination des quantités d'acier pour dalles, poutres, poteaux, semelles et escaliers en béton armé*. Ann. ITBTP, oct. 1985.
- [148] THONIER (H.). – *Portée de calcul des éléments fléchis en béton armé*, Ann. ITBTP, juin 1987.
- [149] THONIER (H.), HACHEMI-SAFI (V.) et RAHIMI-MIAN (M.). – *Béton armé aux états-limites*. Ann. ITBTP, mai 1979.
- [150] THONIER (H.). – *La redistribution des moments d'une poutre continue en béton armé*. Ann. ITBTP, févr. 1982.
- [151] DOUBRÈRE (J.C.). – *Cours pratique de béton armé* (Règles BAEL 83). 15,5 × 24, 168 p., 1988, Eyrolles.
- [152] BOUCHART (J.M.), CIBOIS (G.) et de HARO (G.). – *Initiation au béton armé* (Règles BAEL 83). Eyrolles.
- [153] ALBIGES (M.) et MINGASSON (M.). – *Théorie et pratique du béton armé aux états-limites*. 15,4 × 24,3, 344 p., 1981, Eyrolles (épuisé).
- [154] CHARON (P.). – *Calcul des ouvrages en béton armé suivant les Règles BAEL 83. Théorie et applications*. 15,4 × 24,3, 484 p., 1986, Eyrolles.
- [155] CHARON (P.). – *Exercices de béton armé avec leurs solutions selon les Règles BAEL 83*. 16 × 25, 304 p., 1985, Eyrolles.
- [156] FUENTES (A.). – *Le béton armé après fissuration* (État de service, état-limite ultime, ductilité. Mécanismes de rupture des structures hyperstatiques). 15,5 × 24, 136 p., 1987, Eyrolles.
- [157] FUENTES (A.), LACROIX (R.) et THONIER (H.). – *Traité de béton armé*. 16 × 25,4, 632 p., 1982, Eyrolles (additif Règles BAEL 83).
- [158] FUENTES (A.). – *Béton armé. Calcul des ossatures*. 1978, Eyrolles (épuisé).
- [159] PERCHAT (J.). – *Mémentos Eyrolles : Calcul du béton armé selon les Règles BAEL : BAEL 1. 20 p., 10 × 21, pliage accordéon, 1981, (épuisé) ; BAEL 2. 20 p., 10 × 21, pliage accordéon, 1981.*
- [160] ARTOPOEUS (J.), FOURÉ (B.), HUEBER (J.) et PERCHAT (J.). – *Manuel d'application des Règles BAEL*. 196 p., 15 × 23, 153 fig., 19 tabl.,



- 12 abaques, 1981, Syndicat Nat. Béton Armé et Techn. Industrialisées.
- [161] CAPRA (A.) et HAUTCEUR (M.). – *Calcul en flexion simple ou composée à l'état-limite ultime des sections rectangulaires en béton armé. Abaques d'optimisation*. Ann. ITBTP, sept. 1979.
- [162] ARIBERT (J.M.) et WATTECAMPS (C.). – *Méthode pratique commune de calcul élastique et aux états-limites ultimes des sections de béton armé en flexion simple, composée et déviée*. Ann. ITBTP, juil.-août 1979.
- [163] BLÉVOT (J.). – *Les annexes F des Règles BAEI 80*. Ann. ITBTP, mars 1981.
- [164] FAVRE (R.), KOPRINA (M.) et RADOJICIC (A.). – *Effets différés. Fissuration et déformations des structures en béton*. 191 p., 16,1 x 24, nombreux fig. et abaques, 1980, Georgi Éd.
- [165] *Shear and torsion*. Bull. Information CEB n° 126, juin 1978.
- [166] *Shear, torsion and punching*. Bull. Information CEB n° 146, janv. 1982.
- [167] *Industrialization of reinforcement*. Bull. Information CEB n° 152.
- [168] *Detailing of concrete structures*. Bull. Information CEB n° 150.
- [169] MOUGIN (J.P.). – *Abaques pour le calcul des dalles rectangulaires articulées sur leur contour*. Ann. ITBTP, juil.-août 1985.
- [170] MOUGIN (J.P.). – *Abaques pour la détermination rapide des sections d'armatures dans les sections rectangulaires soumises à la flexion simple*. Ann. ITBTP, nov. 1985.
- [171] MOUGIN (J.P.). – *Béton Armé (BAEI 91 et DTU associés)* 17 x 24, 296 p., 1995, Eyrolles.
- [172] MOUGIN (J.P.). – *Cours de béton armé BAEI 91. Calcul des éléments simples et des structures de bâtiments*. 17 x 24, 288 p., 1992, Eyrolles.
- [173] MOUGIN (J.P.) et PERROTIN (P.). – *Formules simples pour le prédimensionnement des sections de poutres en béton armé compte tenu du règlement BAEI 91*. Ann. ITBTP, nov. 1994.
- [174] NICOT (R.) et RIAUX (H.). – *Abaques et détermination de la longueur des armatures placées « en chapeau » sur les appuis des poutres et des dalles en béton armé*. Ann. ITBTP, janv. 1989.
- [175] BOUTIN (J.P.). – *Pratique du calcul de la résistance au feu des structures*. 14,5 x 21,5, 128 p., 1983, Eyrolles.
- [176] CPT Planchers. – Titre II : *Dalles pleines confectionnées à partir de prédalles préfabriquées et de béton coulé en œuvre*. CSTB.

- [177] *Règles techniques de conception et de calcul des fondations des ouvrages de Génie Civil*, fascicule 62, titre V du CCTG, N° 93-3, TO du BOMELT.
- [178] *Travaux de dallage. Règles professionnelles*. Ann. ITBTP, mars-avr. 1990.
- [179] *Construction des châteaux d'eau en béton armé, en béton précontraint ou en maçonnerie, et des ouvrages annexes*. CCTG, fascicule 74, n° spécial 83-14 sexes du BOUL T et E.
- [180] *Cahier des charges applicable à la construction des cuves à vin en béton armé*. Ann. ITBTP, oct. 1980 (en révision ; voir [179] chapitre D).
- [181] *Ouvrages de soutènement*. Mur 73. Dossier pilote. 21 x 29,7, 285 p., 1988, SETRA, Bagneux.
- [182] *Guide pour l'étude et la réalisation des soutènements*. 15 x 21, 89 p., sept. 1981, SEDIMA.
- [183] *Règles de calcul des soutènements (projet de norme, établi par le BNTEC, 1992, non publié)*.
- [184] LOGEAS (L.). – *Pathologie des murs de soutènement*, Éditions du Moniteur, 1982.
- [185] *Règles professionnelles applicables à la construction des réfrigérants atmosphériques en béton armé* (SNBATI, 1986 ; non publiées).
- [186] *Constructions en béton léger*. AITEC Rome, 1974, CEMBUREAU.
- [187] *CEB-FIP Model Code 1990. Design code*. 21 x 29,7, 437 p., 1993, Thomas Telford Ltd.
- [188] ADETS. – *Le treillis soudé. Calcul et utilisation conformément aux Règles BAEI 91*. 21 x 29,7, 405 p., GIE TS Promotion 1992.
- [189] *Exécution des ouvrages de Génie Civil en béton armé ou précontraint*. Fascicule 65A du CCTG, n°s spéciaux 92-8 et 93-2, TO du BOMELT.
- [190] DTU 21. – *Exécution des travaux en béton (norme NF P18-201) et additif n° 1 relatif aux marches préfabriquées indépendantes en béton armé, pour escaliers*, CSTB, mai 1993.
- [191] PIERRE (F.). – *Les coffrages pour le béton armé*. 15,4 x 24,3, 196 p., 1980, Eyrolles (épuisé).
- [192] *Manuel de technologie « Coffrage »*. Publication 85, CIB (Conseil International du Bâtiment), 1985.
- [193] LORRAIN (M.) et HIMINIZ (A.). – *Incidence de défauts d'exécution sur la résistance et la stabilité d'éléments de structures en béton armé*. Ann. ITBTP, fév. 1982.
- [194] *Renforcement et réparation des structures*. Ann. ITBTP, janv.-fév. 1983.
- [195] *Techniques de réparation et de renforcement des ouvrages en béton* (AFPC-SNBATI-

- STRRES) : 7 fascicules 15 x 21 : 1. *Guide Général* ; 2. *Reprise du béton dégradé* ; 3. *Béton projeté* ; 4. *Traitement des fissures et protection du béton* ; 5. *Précontrainte additionnelle* ; 6. *Armatures passives additionnelles* ; 7. *Réparations et renforcements en fondation*, SEDIMA, 1985.
- [196] POINEAU (D.), THEILLOUT (J.) et CUSIN (F.). – *Réparation et renforcement des structures de bâtiment et d'ouvrages d'art. Application des techniques de tôles collées et de précontrainte additionnelle*, Ann. ITBTP, fév. 1992.
- [197] KAVYRCHINE (M.). – *Quelques aspects du comportement du béton de structure lié à l'influence des zones tendues ou fissurées*. Ann. ITBTP, mai 1980.
- [198] CHARIF (H.) et JACCOUD (J.P.). – *Calcul des déformations des structures en béton et étude de leur réduction grâce à l'utilisation des BHP*. Ann. ITBTP, fév. 1993.
- [199] PERCHAT (J.). – *Règlements étrangers de béton armé. Étude comparative des Codes CEB - BSI - DIN - ACI*. 1982, Eyrolles (épuisé).
- [200] PERCHAT (J.) et ROUX (J.). – *Pratique du BAEI 91*. 17 x 24, 416 p., 1998, Eyrolles.
- [201] PERCHAT (J.) et ROUX (J.). – *Maîtrise du BAEI 91 et des DTU associés*. 17 x 24, 408 p., 1998, Eyrolles.
- [202] SOCOTEC. – *Logiciels de calculs de béton armé (disquette plus manuel d'utilisation) : section rectangulaire ou en T, flèche*. 14,5 x 20, 88 p., 1987, Eyrolles.
- [203] *Présentation et discussion du projet d'Eurocode 2 : Constructions en béton*. Ann. ITBTP, déc. 1990 et janv. 1991.
- [204] LEVI (F.), MARRO (P.) et THONIER (H.). – *La vérification des contraintes tangentielles suivant l'Eurocode 2*, Ann. ITBTP, nov. 1992 (comparaisons) et mars-avr. 1994 (compléments).
- [205] *Bétons de granulats légers. Manuel CEB-FIP*. Ann. ITBTP, janv., mai et déc. 1980.
- [206] *CEB-FIP Model Code 90. Selected justification notes*. 21 x 29,7, 248 p., Bulletin d'information n° 217 du Comité Euro-international du Béton, 1993.
- [207] LUMBROSO (A.). – *Étude d'ensemble des enceintes de stockage renfermant des masses pulvérulentes et calcul des halles et magasins de stockage*, Ann. ITBTP, déc. 1989.
- [208] TRINH (J.). – *Résistances du béton aux forces concentrées. Première partie : cas du béton non armé*, Ann. ITBTP, nov. 1985.
- [209] TOFANI (R.). – *Calcul et contrôle des prix dans les entreprises de bâtiment et de travaux publics*, Éd. du Moniteur, 1980.

## Organismes

### France

Association française pour la certification des armatures.  
Association française pour la construction AFC.  
Association française de normalisation AFNOR.  
Association technique pour le développement de l'emploi du treillis soudé ADETS.  
Bureau Veritas.  
Centre expérimental de recherches et d'études du bâtiment et des travaux publics CEBTP.  
Centre scientifique et technique du bâtiment CSTB.  
Institut technique du bâtiment (ex. ITBTP).  
Laboratoire central des ponts et chaussées LCPC.  
Service d'études techniques des routes et autoroutes SETRA.  
Syndicat national du béton armé et des techniques industrialisées SNBATI.  
Société de contrôle technique SOCOTEC.

### Allemagne (République Fédérale d')

Bundesverband Deutsche Beton- und Fertigteilindustrie e.V.  
Deutscher Betonverein e.V. DBV.

Deutsches Institut für Normung e.V. DIN.  
Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau.

### Belgique

Fédération de l'industrie cimentière FIC.  
Fédération nationale belge du bâtiment et des travaux publics FNBTP.  
Institut belge de normalisation/Belgisch instituut voor normalisatie IBN/BIN.

### États-Unis

American Concrete Institute ACI.  
Prestressed Concrete Institute PCI.

### Grande-Bretagne

British Standards Institution BSI.  
Cement and Concrete Association CCA.

### Organismes internationaux

Association internationale des ponts et charpentes AIPC.  
Fédération internationale du béton FIB (fusion du Comité euro-international du béton, CEB, et de la Fédération internationale de la précontrainte, FIP).