

# Béton armé : Règles BAEL

## Bétons de granulats légers artificiels

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. Granulats légers artificiels .....</b>	C 2 318 - 2
<b>2. Réalisations passées et présentes.....</b>	— 2
<b>3. Domaines d'application des bétons légers.....</b>	— 3
<b>4. Réglementation .....</b>	— 3
<b>5. Données concernant le béton léger .....</b>	— 3
5.1 Masses volumiques.....	— 3
5.2 Résistance à la compression du béton léger.....	— 4
5.3 Résistance à la traction .....	— 4
5.4 Module de déformation longitudinale instantanée .....	— 4
5.5 Déformations différées.....	— 4
<b>6. Pièces soumises à des sollicitations normales .....</b>	— 5
6.1 État-limite ultime de résistance.....	— 5
6.2 États-limites de service .....	— 7
6.3 État-limite ultime de stabilité de forme .....	— 7
<b>7. Pièces soumises à des sollicitations tangentes .....</b>	— 7
7.1 Effort tranchant.....	— 7
7.2 Poinçonnement.....	— 7
<b>8. Sollicitations d'adhérence.....</b>	— 7
<b>9. Problèmes particuliers .....</b>	— 8
9.1 Pressions localisées et frettage .....	— 8
9.2 Fabrication et mise en œuvre des bétons légers .....	— 8
<b>Pour en savoir plus .....</b>	Doc. C 2320

**D**ans le domaine des bâtiments, le béton léger trouve des applications relativement courantes pour la confection de formes isolantes sur terre-plein (bétons caverneux), de murs banchés, de produits manufacturés (blocs de maçonnerie, poutrelles de planchers préfabriquées, panneaux de façade préfabriqués). Les bétons de granulats légers sont très fréquemment employés dans les opérations de réhabilitation de l'habitat existant. Mais, dans notre pays du moins, il existe peu de bâtiments d'une certaine importance pour la construction desquels il a été fait appel, totalement ou partiellement, au béton léger.

**Dans le domaine des ouvrages d'art, la réduction du poids propre que procure le béton léger peut, le cas échéant, se révéler techniquement et économiquement intéressante, aussi bien pour la restauration d'ouvrages anciens que pour la construction d'ouvrages nouveaux.**

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	
Actions et sollicitations	[C 2 304]
— 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. Granulats légers artificiels

Les granulats couramment utilisés pour la confection du béton **traditionnel** proviennent de matériaux naturels alluvionnaires, sables et graviers, ou de concassage de roches éruptives ou sédimentaires. Leur masse volumique est normalement comprise entre 2 500 et 3 000 kg/m<sup>3</sup>.

Il existe cependant des granulats légers **naturels** comme ceux que l'on peut obtenir par concassage de la lave volcanique (pierre ponce) et dont la masse volumique varie de 500 à 800 kg/m<sup>3</sup>.

Mais l'on peut aussi avoir recours à des granulats légers **artificiels**. Ceux que l'on utilise pour réaliser des bétons légers de structure sont obtenus par cuisson à haute température (1 000 à 1 200 °C), dans un four rotatif, de nodules d'argile ou de schiste. À cette température, il se produit d'une part un dégagement gazeux au sein de chaque nodule sous l'effet de réactions chimiques internes, ce qui entraîne l'expansion du nodule, d'autre part une vitrification de la couche externe.

Après refroidissement, on obtient soit des grains légers et durs de forme généralement arrondie et à peau brun-rouge vitrifiée, soit des grains de forme scoriacée. La texture cellulaire est très marquée et la masse volumique réelle varie de 750 à 1 200 kg/m<sup>3</sup>.

Après concassage éventuel et criblage, les masses volumiques apparentes varient de 300 à 1 000 kg/m<sup>3</sup> suivant la granularité.

## 2. Réalisations passées et présentes

L'idée d'utiliser, pour la confection du béton, des granulats légers en vue d'obtenir une réduction du poids propre des structures, et une meilleure isolation thermique ou acoustique, est assez ancienne.

Le premier granulat léger fabriqué industriellement (Kansas-City, 1917) fut la *Haydite*, une argile expansée à laquelle son inventeur, l'Américain S.J. Hayde, donna son nom.

La véritable production commerciale ne débute vraiment que vers 1928. Depuis, de nombreuses usines se sont multipliées un peu partout dans le monde et l'emploi de bétons légers, aussi bien pour la fabrication de blocs de maçonnerie que pour la réalisation de structures monolithes (béton léger *structural*), a connu un large développement aux États-Unis, au Japon, en URSS, en Pologne et en divers pays d'Europe occidentale, notamment en République fédérale d'Allemagne, en Grande-Bretagne, aux Pays-Bas et en Belgique. Les premiers immeubles de grande hauteur construits aux Etats-Unis l'ont été entre 1920 et 1930. Les réalisations qui ont suivi, dans les différents pays énumérés ci-dessus, sont très diverses : IGH (immeubles de grande hauteur), églises, hôtels, couvertures de hangars d'aviation, de patinoires, de tribunes de stades, ouvrages d'art : grands ponts, tremplins de saut à ski, docks flottants, restauroutes, etc. [186].

En comparaison, l'utilisation de bétons de granulats artificiels en France n'a connu qu'un développement relativement faible. Cela tient en grande partie à l'abondance relative des granulats naturels dans la plupart de nos régions et à leur prix modique par rapport à ceux pratiqués dans d'autres pays. Les granulats légers en revanche sont d'un coût élevé par suite, d'une part de leur mode de fabrication par cuisson dans un four, ce qui consomme beaucoup d'énergie, d'autre part de l'éloignement fréquent des centres de production par rapport aux lieux d'utilisation, ce qui entraîne des frais de transport importants.

C'est pourquoi l'emploi de bétons structuraux de granulats légers, qui avait suscité dans notre pays un vif intérêt vers 1973, n'y a pas connu un développement aussi important que chez certains de nos voisins.

Quelques réalisations remarquables ont cependant été faites en France métropolitaine tant en ce qui concerne des bâtiments que des ouvrages d'art. Elles restent toutefois en nombre assez limité.

En ce qui concerne les bâtiments, on peut citer comme exemples la réalisation de planchers (ambassade d'Australie à Paris, poutrelles préfabriquées ; immeuble de bureaux à Évry, dalles constituées



### 5.1.2 Masse volumique de calcul

Le poids propre des éléments de structure doit être évalué à partir d'une masse volumique de calcul.

Lorsque la proportion des armatures n'est pas anormalement faible ou anormalement forte, et lorsque les conditions de conservation sont telles que la teneur en eau d'équilibre avoisine 50 litres par mètre cube, la masse volumique de calcul peut, **conventionnellement**, être prise égale à :

$$\rho_{bc} = \rho_{bs} + 0,15 \text{ (t/m}^3\text{)}$$

Lorsque les conditions énoncées ci-avant ne sont pas remplies (conservation dans l'eau ou à l'air sec) une estimation plus précise est généralement nécessaire (voir Règles BPEL 91). Normalement,  $\rho_{bc}$  est comprise entre 1,55 et 1,90 t/m<sup>3</sup>.

### 5.2 Résistance à la compression du béton léger

La résistance à la compression d'un béton léger est d'autant plus élevée que la résistance spécifique des granulats légers utilisés et leur masse volumique sont elles-mêmes plus grandes.

La résistance caractéristique à la compression requise à 28 jours a la même définition que pour un béton normal. Moyennant un certain soin à la fabrication (classe de ciment appropriée, utilisation de granulats résistants et de sable naturel, étude de la composition granulaire) et à condition que  $1,5 \leq \rho_{bs} \leq 1,75 \text{ t/m}^3$ , on peut escompter atteindre une résistance caractéristique à 28 jours égale à :

$$f_{c28} = 30 + 50 (\rho_{bs} - 1,70) \text{ en MPa}$$

En ce qui concerne l'influence de l'âge, à condition que le béton ne fasse pas l'objet d'un traitement thermique, on peut admettre (annexe 5 des Règles BPEL) :

— pour  $1 \leq j < 7$  jours :

$$f_{cj} = f_{c28} [0,680 \lg (2j+1)]$$

— pour  $7 \leq j < 28$  jours :

$$f_{cj} = (0,519 + 0,332 \lg j) f_{c28}$$

— pour  $j \geq 28$  jours :

$$f_{cj} = f_{c28}$$

### 5.3 Résistance à la traction

La valeur caractéristique de la résistance à la traction, à l'âge  $j$  jours, est conventionnellement définie par :

$$f_{tj} = 0,55 + 0,055 f_{cj} \text{ en MPa}$$

En comparant avec la formule du paragraphe 1.1.1 en [C 2 304], on voit que la résistance à la traction d'un béton léger n'est donc que les 92/100 environ d'un béton normal de même résistance à la compression.

### 5.4 Module de déformation longitudinale instantanée

Selon l'annexe 5 des Règles BPEL, sous des contraintes normales d'une durée d'application inférieure à 24 h et d'amplitude inférieure à 0,70  $f_{cj}$ , on peut admettre que le module de déformation longitudinal instantanée du béton à l'âge de  $j$  jours est donné par :

$$E_{ij} = 1650 \sqrt{\rho_{bs}^3 \cdot f_{cj}}$$

Un béton léger est plus déformable qu'un béton traditionnel de même résistance à la compression.

Par exemple, pour  $\rho_{bs} = 1,55 \text{ t/m}^3$  et  $f_{cj} = 25 \text{ MPa}$ , la déformation instantanée est sensiblement le double de celle ( $\varepsilon_i$ ) du béton normal de même résistance.

### 5.5 Déformations différées

#### 5.5.1 Retrait hydraulique

Le retrait du béton léger au cours d'un intervalle de temps ( $t_1, t$ ) est donné par :

$$\varepsilon_r(t_1, t) = \varepsilon_r [r(t) - r(t_1)]$$

$\varepsilon_r$  est le retrait **final** du béton dont les valeurs sont :

- soit connues par expérience ;
- soit prises forfaitairement égales à une fois et demie celles du béton normal, c'est-à-dire :

- $4,5 \cdot 10^{-4}$  dans le quart Sud-Est de la France métropolitaine,
- $3 \cdot 10^{-4}$  dans le reste de la France métropolitaine.

$r(t)$  est une fonction du temps qui varie de 0 à 1 quand  $t$  varie de 0 (bétonnage) à  $\infty$ .

Normalement, la loi  $r(t)$  doit être tirée de l'expérience. Lorsque cette loi n'est pas expérimentalement connue, il convient de se reporter à l'annexe 5 des Règles BPEL qui donne une formule conventionnelle permettant le calcul de  $r(t)$  ainsi qu'une formule permettant une meilleure estimation du retrait final  $\varepsilon_r$ .

#### 5.5.2 Fluage

Pour  $\sigma_{bc} \leq 0,66 f_{cj}$  la déformation de fluage du béton léger dans l'intervalle de temps ( $t_1, t$ ) est donnée par :

$$\varepsilon_{fl}(t_1, t) = \varepsilon_{ic} K_{fl}(t_1) f(t - t_1)$$

avec  $\varepsilon_{ic}$  déformation instantanée *conventionnelle* du béton léger :

$$\varepsilon_{ic} = \sigma_{bc}/E_{i28},$$

$K_{fl}(t_1)$  coefficient de fluage du béton, pris égal à 1 lorsqu'on n'a pas besoin d'une estimation précise ; en cas contraire, ce coefficient doit être tiré de l'expérience ou évalué conventionnellement (se reporter à l'annexe 5 des Règles BPEL),

$f(t - t_1)$  fonction de la durée d'application du chargement, qui varie de 0 à 1 lorsque ce temps varie de 0 à  $\infty$

Les Règles BPEL proposent la loi :

$$f(t-t_1) = \frac{\sqrt{t-t_1}}{\sqrt{t-t_1} + \frac{9\sqrt{t_1}}{2\sqrt{t_1+1}}\sqrt{r_m}}$$

avec  $r_m$  rayon fictif de la pièce (quotient de l'aire de la section droite par le demi-périmètre), exprimé en cm,  
 $t - t_1$  exprimé en jours

La déformation finale par fluage d'un béton léger est donc égale à sa déformation instantanée  $\varepsilon_{ic}$  [puisque  $K_{fl}(t_1) \approx 1$ ], alors qu'elle est le double de cette dernière pour un béton normal, c'est-à-dire que les déformations **totales** finales après fluage sont respectivement :

$$\begin{aligned}\varepsilon_{tot} &= 2 \varepsilon_{ic} \text{ pour le béton léger,} \\ \varepsilon_{tot} &= 3 \varepsilon_i \text{ pour le béton normal.}\end{aligned}$$

On a montré au paragraphe 5.4 que pour des bétons de même résistance à la compression, avec un béton léger tel que  $\rho_{bs} = 1,55 \text{ t/m}^3$ , on avait sensiblement :

$$\varepsilon_{ic} = 2 \varepsilon_i$$

Il en résulte que la déformation **totale** finale après fluage d'un béton léger n'est supérieure à celle du béton normal de même résistance à la compression que de 33 % environ (rapport 4/3).

### 5.5.3 Coefficient de Poisson

À défaut de valeur tirée de l'expérience, on attribue au coefficient de Poisson du béton léger les mêmes valeurs que pour le béton normal [C 2 304, § 1.1.3].

## 6. Pièces soumises à des sollicitations normales

Au-delà des données ci-avant, et de la définition du diagramme parabolique conventionnel (cf. figure 2), l'annexe 5 aux Règles BPEL ne fournit aucune indication sur les hypothèses à prendre en compte dans les calculs. Dans les paragraphes 6, 7, 8, 9 suivants, nous nous sommes bornés à adapter les modes de calcul qui figuraient dans les anciennes Recommandations provisoires de 1976. Les méthodes indiquées n'ont donc aucun caractère réglementaire. Elles devront être révisées lorsque l'Eurocode 2 se sera substitué aux Règles BAEL et BPEL 91, et que sa partie 4, qui ne peut en être dissociée, sera de ce fait elle aussi en vigueur.

### 6.1 État-limite ultime de résistance

#### 6.1.1 Loi de comportement ( $\sigma_{bc}$ , $\hat{A}_{bc}$ ) du béton léger

La loi de comportement du béton léger s'éloigne notablement de celle du béton normal de même résistance à la compression (figure 1). Plus la résistance à la compression du béton léger augmente, plus son comportement se rapproche d'un comportement fragile, la branche ascendante étant presque rectiligne, et la branche descendante n'existant plus ou se rapprochant de la verticale.

Dans ces conditions, si l'idéalisation **parabole-rectangle** [C 2 306, § 2.4.2.1] constitue une bonne représentation pour le béton normal, elle ne convient plus pour le béton léger : on lui substitue une **loi parabolique** (figure 2). L'annexe 5 des Règles BPEL admet comme valeur limite du raccourcissement relatif du béton comprimé la valeur 2,5 %.

Le coefficient de remplissage  $\gamma$  et le coefficient de centre de gravité  $\delta_G$  [C 2 306, § 5.1.2.3.1] d'un tel diagramme parabolique sont respectivement égaux à 2/3 et à 3/8. Le coefficient  $\theta$  a été défini en [C 2 306, § 2.4.2.1].

Lorsque la section étudiée n'est pas entièrement comprimée, c'est-à-dire lorsque l'axe neutre est à l'intérieur de la section, il est possible d'utiliser un diagramme rectangulaire simplifié, comme dans le cas du béton normal [C 2 306, § 2.4.2.2]. Dans la définition d'un tel diagramme, on cherche à obtenir :

a) la même aire que le diagramme réel idéalisé (parabolique, dans ce cas) ce qui, en section rectangulaire, correspond à la même résultante des forces de compression dans le béton comprimé ;

b) la même position du centre de gravité, ce qui donne le même moment de la résultante des contraintes de compression du béton par rapport aux aciers tendus.

Le diagramme défini par la figure 3 remplit sensiblement ces deux conditions. Toutefois, sauf pour les sections de forme compliquée, l'utilisation d'un tel diagramme ne présente pas le même intérêt que dans le cas des bétons normaux, le diagramme parabolique (figure 2) étant déjà lui-même beaucoup plus simple d'emploi que le diagramme parabole-rectangle.

#### 6.1.2 Hypothèses et méthode de calcul à l'état-limite ultime

Les hypothèses sont les mêmes que pour le béton armé normal, sauf en ce qui concerne les différentes positions que peut occuper le diagramme des déformations de la section. En effet, la **règle des trois pivots** [C 2 306, § 2.3.2] est remplacée par la **règle des deux pivots** (figure 4) : A correspondant à l'allongement limite de 10 % pour l'acier tendu, B correspondant au raccourcissement limite de 2,5 % pour le béton comprimé.

Compte tenu de l'état-limite de compression du béton en service (§ 6.2), on peut, comme pour le béton traditionnel [C 2 306, § 5.1.2.2], déterminer le moment « réduit »  $\mu_{eu}$  au-delà duquel, pour une section rectangulaire, il devient nécessaire de prévoir des aciers comprimés.

Le tableau suivant donne les valeurs de  $\mu_{eu}$  pour les valeurs les plus courantes de  $f_{c28}/\theta$  et de  $\theta\gamma$  (avec  $\gamma = M_u/M_{ser}$ ) lorsque l'on emploie des aciers Fe E 500 :

$\theta\gamma$	$\frac{f_{c28}}{\theta}$ (MPa)			
	25	30	35	40
1,35	0,1924	0,2115	0,2275	0,2412
1,40	0,2041	0,2241	0,2408	0,2549
1,45	0,2161	0,2369	0,2542	0,2688
1,50	0,2285	0,2500	0,2680	0,2830 (1)

(1) En tout état de cause,  $\mu_{eu}$  est plafonné à 0,2851.

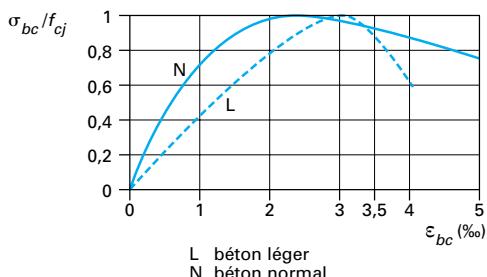


Figure 1 – Courbes réelles de comportement des bétons

(d'après [185])

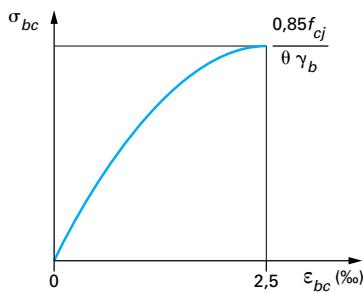


Figure 2 – Diagramme parabolique conventionnel

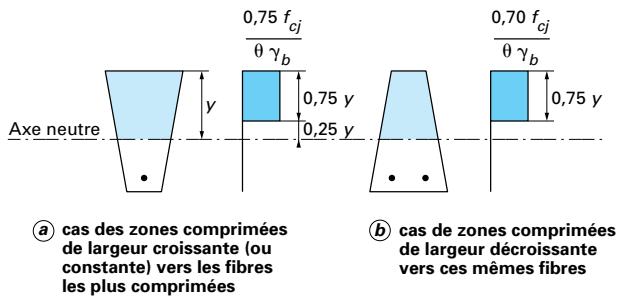


Figure 3 – Diagramme rectangulaire simplifié pour le béton léger

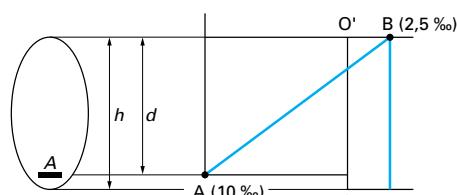


Figure 4 – Règle des deux pivots pour le béton léger

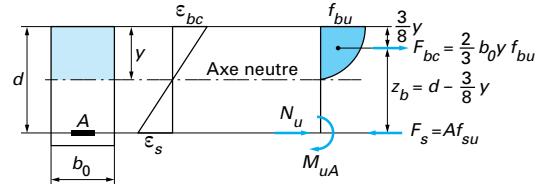


Figure 5 – Section rectangulaire. Distribution des contraintes du béton léger comprimé

Les formules données en [C 2 306, § 5.1.2.3.3 et 5.1.5.1.1] pour les calculs en flexion simple ou en flexion composée d'une section rectangulaire  $b_0 d$  (figure 5) de même que les organigrammes de calcul donnés en [C 2 306, figures 22 et 26] sont applicables, moyennant les adaptations suivantes :

— hauteur relative de l'axe neutre :

$$\alpha = \frac{y}{d} = \frac{4}{3} (1 - \sqrt{1 - 2,25 \mu_{bu}})$$

— valeur exacte du bras de levier :

$$z_b = d \left( 1 - \frac{3}{8} \alpha \right) = 0,5d (1 + \sqrt{1 - 2,25 \mu_{bu}})$$

— valeur approchée du bras de levier :

$$z_b = d(1 - 0,68 \mu_{bu})$$

— contrainte « équivalente » pour le calcul des aciers comprimés :

$$\sigma_{sce} = 7,5 \gamma f_{c28} - \frac{d'}{d} (14 f_{c28} + 460) \geq 435 \text{ MPa}$$

— excentricité due aux effets du second ordre [C 2 306, § 4.20] :

$$e_2 = \frac{3 \ell_f^2}{10^4 h} (2 + \alpha)$$

Pour les sections en T, les équations données en [C 2 306, § 5.1.4 et 5.1.5.1.2] doivent être adaptées aux valeurs particulières de  $\psi$ ,  $\delta_G$  et  $\varepsilon_{bc}$ . (Si l'on utilise le diagramme rectangulaire, on a  $\psi = 0,75$  et  $\delta_G = 0,375$ , la valeur de  $f_{bu}$  étant celle indiquée figure 3).

### 6.1.3 Utilisation des tableaux et abaques établis pour le béton normal

La règle des deux pivots et le diagramme parabolique ont l'inconvénient de ne plus permettre théoriquement d'utiliser les tableaux et les abaques de calcul établis, pour le béton normal, à partir de la règle des trois pivots et du diagramme parabole-rectangle. Si l'on n'a pas besoin d'une très grande précision, il est possible de recourir à un artifice dans lequel on conserve la méthode en usage avec le béton traditionnel, mais en remplaçant la résistance du béton léger par une résistance fictive correspondant à la plus grande des deux quantités :

$$\begin{cases} 0,80 f_{cj} \\ f_{cj} \left( 1 - \frac{e_0}{h} \right) \end{cases}$$

avec	$e_0$	excentricité de l'effort appliquée par rapport au centre de gravité du béton seul,
	$h$	hauteur de la section dans la direction où est mesurée $e_0$

On obtient ainsi une section d'armatures par léger défaut, mais l'écart en moins est normalement inférieur à 3 %.

## 6.2 États-limites de service

Pour le calcul des caractères mécaniques d'une section (aire homogène, moment statique et moment d'inertie) et pour le calcul des contraintes, les hypothèses sont les mêmes que pour le béton normal [C 2 306, § 4.2.1 et 4.3.1].

En particulier, le coefficient d'équivalence peut, conventionnellement, être pris égal à 15. Dans le cas où il serait nécessaire de séparer l'effet des actions de courte durée de celui des actions de longue durée d'application, il conviendrait d'adopter respectivement pour le coefficient d'équivalence les valeurs 10 et 20.

En ce qui concerne l'état-limite de compression du béton [C 2 306, § 4.2.2] dont ne parle pas l'annexe 5 des Règles BPEL, la limite de contrainte du béton de  $0,6 f_{cj}$  admise par les Règles BAEL doit être ramenée à  $0,5 f_{cj}$  (l'explication en est donnée dans [144, p. 79 et figure 20]).

## 6.3 État-limite ultime de stabilité de forme

Les hypothèses et la procédure de calcul sont les mêmes que celles du béton normal [C 2 306, § 3.2.2 et 5.2]. Toutefois, le coefficient de fluage du béton léger étant plus faible que celui du béton normal, l'effet de la superposition d'actions permanentes ou quasi permanentes à des actions de courte durée (selon [C 2 306, § 3.2.2 h et figure 8]) doit être prise en compte par une affinité effectuée sur le *diagramme parabolique* (défini au § 6.1.1) parallèlement à l'axe des abscisses et de rapport  $(1 + \alpha)$ ,  $\alpha$  étant le rapport des moments défini en [C 2 306, § 4.20].

Le Code-Modèle CEB/FIP conseille de ne pas adopter, pour les poteaux en béton léger, des élancements supérieurs à 70.

Cette règle de prudence doit être suivie. Nous estimons qu'il convient en outre de diviser systématiquement par  $\sqrt{2}$  les valeurs numériques d'élancement bornant le domaine d'application de certaines formules des Règles BAEL 91 ([C 2 306, § 5.3.2] par exemple).

## 7. Pièces soumises à des sollicitations tangentes

Les calculs vis-à-vis des sollicitations tangentes appellent une remarque générale : dans les Règles BAEL 91, pour faciliter la tâche du projecteur, il a été systématiquement fait référence à la résistance à la compression, même lorsque le phénomène physique en cause met en jeu la résistance à la traction du béton.

Dans le cas du béton léger, il faut avoir présent à l'esprit que la résistance à la traction n'est que les 92 % environ de celle du béton normal de même résistance à la compression (§ 5.3) et tenir compte de ce fait pour réduire certaines valeurs numériques des Règles BAEL 91 issues de formules où cette résistance intervient.

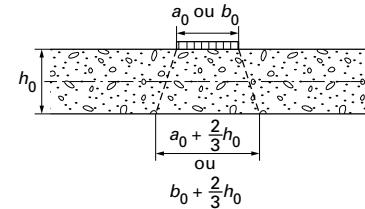


Figure 6 – Diffusion d'une charge localisée dans l'épaisseur d'une dalle en béton léger

## 7.1 Effort tranchant

La contrainte tangente conventionnelle  $\tau_u$  doit être limitée à des valeurs inférieures à celles admises pour le béton normal. Pour ce dernier on trouve en [C 2 308, § 5.1.4.1] des valeurs limites de :

$$\frac{0,20 f_{cj}}{\gamma_b}, \quad \frac{0,15 f_{cj}}{\gamma_b} \text{ et } \frac{0,27 f_{cj}}{\gamma_b}$$

auxquelles il faut, pour le béton léger, substituer respectivement les valeurs de :

$$\frac{0,185 f_{cj}}{\gamma_b}, \quad \frac{0,140 f_{cj}}{\gamma_b} \text{ et } \frac{0,25 f_{cj}}{\gamma_b}$$

ainsi que les valeurs de 5, 4 et 7 MPa, à remplacer respectivement par 4,6, 3,7 et 6,4 MPa.

## 7.2 Poinçonnement

On ne dispose pas d'essais sur dalles soumises à des charges concentrées. Il est donc prudent de ne pas admettre pour le béton léger le même angle de diffusion dans l'épaisseur que pour le béton normal, et de supposer que l'augmentation des dimensions du rectangle d'impact au niveau du feuillet moyen [C 2 308, § 1.2.4] ne correspond qu'au tiers de l'épaisseur (figure 6).

Ceci a une conséquence immédiate sur la vérification au poinçonnement ; en outre, le coefficient 0,045 qui intervient dans les formules données en [C 2 308, § 1.2.4] doit être remplacé par 0,04.

## 8. Sollicitations d'adhérence

De façon générale les enrobages minimaux doivent être augmentés de 5 mm.

La contrainte de rupture d'adhérence du béton léger est plus faible que celle du béton normal, mais la différence est moins nette pour des barres HA que pour des ronds lisses et pour des armatures de petit diamètre que pour des barres de gros diamètre.

Certaines règles étrangères limitent à 20 ou 22 mm le diamètre maximal des barres.

Plutôt que de limiter les diamètres, il est préférable de réduire, pour les diamètres élevés, la valeur ultime de la contrainte d'adhérence. Celle-ci, exprimée en fonction du coefficient de scellement  $\psi_s$

des barres et de la résistance caractéristique  $f_{t28}$  du béton à la traction, est de la forme :

$$\tau_{su} = k \psi_s^2 f_{t28}$$

le coefficient  $k$  ayant la valeur 0,6 dans le cas du béton normal [C 2 308, § 6.1.1.0].

Dans le cas du béton léger, on peut retenir pour ce coefficient les valeurs suivantes :

- barres HA,  $\emptyset \leq 25$  mm :  $k = 0,6$  ;
- barres HA,  $\emptyset > 25$  mm :  $k = 0,5$  ;
- barres lisses,  $\emptyset \leq 12$  mm :  $k = 0,5$  ;
- barres lisses,  $\emptyset > 12$  mm :  $k = 0,4$ .

À la minoration sur le coefficient  $k$  vient s'ajouter la réduction de résistance à la traction du béton léger par rapport au béton normal. Il en résulte que, pour le béton léger, les valeurs ultimes de la contrainte d'adhérence sont plus faibles que pour le béton normal et que la longueur de scellement droit ne peut être évaluée forfaitairement : elle doit être calculée au moyen de l'expression :

$$\ell_s = \frac{\emptyset}{4} \frac{f_e}{\tau_{su}}$$

De même, la longueur d'ancrage d'une barre HA munie d'un crocheton normal ne peut être prise forfaitairement égale à 0,4  $\ell_s$  [C 2 308, § 2.1.1.2.3 et figure 29]. Elle doit être calculée par l'expression :

$$\ell_a = \ell_s - 24 \emptyset$$

( $\ell_a = \ell_s - 20 \emptyset$  pour un rond lisse).

Pour des barres comprimées qui ne risquent pas d'être soumises à des chocs axiaux, les Règles BAEL 91 autorisent de prendre pour la longueur minimale de recouvrement les 6/10 de la longueur de scellement droit. Cette réduction trouve son origine dans deux phénomènes :

a) le gonflement transversal par effet Poisson, qui vient plaquer la barre comprimée contre la gaine de béton qui l'entoure, ce qui accroît l'adhérence ;

b) l'appui que vient prendre l'extrémité de la barre sur le béton situé devant elle, ce qui s'oppose au glissement de la barre.

La résistance du béton léger aux pressions localisées étant plutôt médiocre ([§ 9.1](#)), il est préférable de ne pas trop compter sur ce dernier phénomène et il est raisonnable d'adopter, en ce cas, la même longueur de recouvrement pour les barres comprimées et pour les barres tendues.

## 9. Problèmes particuliers

### 9.1 Pressions localisées et fretteage

a) Sous une force concentrée sur une faible surface, l'effet de fretteage par le béton léger est moindre que pour le béton normal.

Selon J. Trinh [[208](#)], le coefficient  $K$  qui intervient dans le calcul de l'effort de compression limite [C 2 310, § 2.4.1] doit, pour les bétons légers être pris égal à :

$$K = 1 + \frac{1}{2} \left( 3 - \frac{3a_0}{2a} - \frac{3b_0}{2b} \right) \sqrt{\left( 1 - \frac{3a_0}{2a} \right) \left( 1 - \frac{3b_0}{2b} \right)} \leq 2,2$$

les notations étant celles définies en [C 2 310, § 2.4.1].

b) Le fretteage du béton léger n'apporte pas les mêmes avantages que pour le béton normal. Il semble prudent de n'escamper qu'un gain de résistance égal au quart de celui obtenu avec le béton normal, ce qui revient, dans la formule de l'article A 8.3.2.3 des Règles BAEL 91 [C 2 310, § 2.5.1], à remplacer le coefficient 2 par le coefficient 1/2.

### 9.2 Fabrication et mise en œuvre des bétons légers

a) La fabrication du béton léger ne peut être envisagée sans une mise au point préalable aussi bien du matériel que du personnel.

Les deux points délicats sont la masse volumique et la maniabilité :

— l'obtention de la masse volumique souhaitée nécessite de procéder à un contrôle régulier de la masse volumique des granulats légers et de leur teneur en eau interne et externe, et de corriger en conséquence la composition du béton ; il est pratiquement impossible d'avoir une variation de masse volumique inférieure à la fourchette  $\pm 30$  kg/m<sup>3</sup> ;

— l'obtention d'une bonne maniabilité exige un *pré mouillage* des granulats légers de manière à limiter leur absorption d'eau au cours du malaxage et du transport du béton.

b) L'épandage et le serrage du béton léger ne demandent pas de précautions particulières, si ce n'est que les aiguilles vibrantes doivent être déplacées continuellement. La pratique a montré que les équipes de mise en œuvre s'adaptent rapidement.

À condition de prendre un certain nombre de mesures (emploi d'adjutants spécifiques, augmentation du dosage en ciment), le béton léger peut même être mis en place par pompage.

# 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

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

#### Traités 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 LAVAUR (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, Eyrrolles.

#### 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, Eyrrolles (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, Eyrrolles (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, Eyrrolles (épuisé).
- [17] ISSABRÉ (O.) et KALIPÉ (N.). – *Memento Règles BAEL. Calcul rapide du béton armé.* 160 p., 14,5 × 21, 1982, Ed. Moniteur.
- [18] GUERRIN (A.), LAVAUR (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° 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, Eyrrolles.
- [28] *Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton armé.* Circulaire MEL n° 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° 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, Eyrrolles (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, Eyrrolles (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, Eyrrolles (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, Eyrrolles (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° 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° 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° 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° 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° 71-155 du 29 déc. 1971 et n° 75-156 du 30 déc. 1971. BOMET Fasc. Spéc. n° 72-21 bis.

- [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, Eyrrolles (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, Eyrrolles.
- [42bis] *Règles PS applicables aux bâtiments (Règles PS 92)*, 17 × 24, 288 p., 1996, Eyrrolles.
- Sollicitations 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.). – *Bremessung 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, Eyrrolles (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].
- Sollicitations tangentes**
- 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, Eyrrolles.
- [54] FAUCHART (J.). – *Rupture des poutres de section rectangulaire en béton armé ou précontraint, par torsion et flexion circulaire combinées*. Ann. ITBTP, janv. 1973.
- Sollicitations 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, Eyrrolles (épuisé).
- [60] FUENTES (A.). – *Béton armé. Calcul des ossatures (Torsion - Flambement - Oscillations - Déformations plastiques)*. 15,5 × 24, 232 p., 1987, Eyrrolles.
- [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, Eyrrolles.
- 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, Eyrrolles.
- 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, Eyrrolles.
- 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 Securitas 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, Eyrrolles (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 SAHEBD-JEM (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 BOURGHILI (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 Charpenets.
- [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, conoides et conoï-*

daux. Méthode de calcul simplifiée. 1966, Eyrolles.

[98] DIVER (M.) et FARGETTE (F.). – Étude des voiles plissés. Ann. ITBTP, mars-avr. 1968.

[99] GUERRIN (A.). – Traité de béton armé. Tome V : Toitures, voûtes, coupole. 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] ALBIGÈS (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] LEBEGUE (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 VIRGOUGE (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-SAFAI (V.) et RAHIMIAN (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] ALBIGÈS (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. 15,4 × 25,304 p., 1985, Eyrolles.

[156] FUENTÈS (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] FUENTÈS (A.), LACROIX (R.) et THONIER (H.). – Traité de béton armé. 16 × 25,4, 632 p., 1982, Eyrolles (additif Règles BAEL 83).

[158] FUENTÈS (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.,

## BÉTON ARMÉ : RÈGLES BAEL

- 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 WATTECAMPUS (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 BAEL 80*. Ann. ITBTP, mars 1981.
- [164] FAUVE (R.), KOPRNA (M.) et RADOJICIC (A.). – *Effets différés. Fissuration et déformations des structures en béton*. 191 p., 16,1 × 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 (BAEL 91 et DTU associés)*. 17 × 24, 296 p., 1995, Eyrrolles.
- [172] MOUGIN (J.P.). – *Cours de béton armé BAEL 91. Calcul des éléments simples et des structures de bâtiments*. 17 × 24, 288 p., 1992, Eyrrolles.
- [173] MOUGIN (J.P.) et PERROTIN (P.). – *Formules simples pour le prédimensionnement des sections de poutres en béton armé compte tenu du règlement BAEL 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 × 21,5, 128 p., 1983, Eyrrolles.
- [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, tome 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 sexies 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 × 29,7, 285 p., 1988, SETRA, Bagneux.
- [182] *Guide pour l'étude et la réalisation des soutènements*. 15 × 21, 89 p., sept. 1981, SEDIMA.
- [183] *Règles de calcul des soutènements* (projet de norme, établi par le BNTEC, 1992, non publié).
- [184] LOGEAIS (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 × 29,7, 437 p., 1993, Thomas Telford Ltd.
- [188] ADETS. – *Le treillis soudé. Calcul et utilisation conformément aux Règles BAEL 91*. 21 × 29,7, 405 p., GIE TS Promotion 1992.
- [189] *Exécution des ouvrages de Génie Civil en béton armé ou précontraint*. Fascicule 65A du CCTG, nos 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 × 24,3, 196 p., 1980, Eyrrolles (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, févr. 1982.
- [194] *Renforcement et réparation des structures*. Ann. ITBTP, janv.-févr. 1983.
- [195] *Techniques de réparation et de renforcement des ouvrages en béton* (AFPC-SNBATI-STRRES) : 7 fascicules 15 × 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, Eyrrolles (épuisé).
- [200] PERCHAT (J.) et ROUX (J.). – *Pratique de BAEL 91*. 17 × 24, 416 p., 1998, Eyrrolles.
- [201] PERCHAT (J.) et ROUX (J.). – *Maîtrise du BAEL 91 et des DTU associés*. 17 × 24, 408 p., 1998, Eyrrolles.
- [202] SOCOTEC. – *Logiciels de calculs de béton armé (disquette plus manuel d'utilisation) : section rectangulaire ou en T, flèche. 14,5 × 20, 88 p.*, 1987, Eyrrolles.
- [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 × 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 massifs pulvérulents 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*, Ed. 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).