

RECOMMANDATIONS PROVISOIRES
ELATIVES À LA MODIFICATION DES
ÈGLES DE PRISE EN COMPTE DE LA
FISSURATION
ET À L'EMPLOI DES
BÉTONS À HAUTES PERFORMANCES



Page laissée blanche intentionnellement

RECOMMANDATIONS PROVISOIRES
RELATIVES À LA MODIFICATION DES
RÈGLES DE PRISE EN COMPTE DE LA
FISSURATION
ET À L'EMPLOI DES
BÉTONS À HAUTES PERFORMANCES

JUIN 1997



Document réalisé et diffusé par le



SERVICE D'ÉTUDES TECHNIQUES DES ROUTES ET AUTOROUTES
Centre des Techniques d'Ouvrages d'Art - Cellule Équipement des ponts
46, avenue Aristide Briand - B.P. 100 - 92223 Bagneux Cedex - FRANCE
Tél. : 01 46 11 31 31 - Télécopieur : 01 46 11 31 69 - Télex : 260763 F

À cette occasion, la commission assurant le suivi des Règles BAEL et BPEL a souhaité encourager l'emploi du béton de résistance élevée en raison de sa plus grande compacité et de la meilleure protection ainsi offerte aux armatures vis-à-vis de la corrosion. Pour cela, elle a introduit la valeur de la résistance du béton dans les limites de contraintes des aciers, les valeurs de 150η et 110η devenant respectivement $110 \sqrt{\eta f_{tj}}$ et $90 \sqrt{\eta f_{tj}}$ pour les cas de fissuration préjudiciable et très préjudiciable, f_{tj} désignant la résistance caractéristique du béton en traction.

Les coefficients numériques de ces formules ont été calibrés de façon telle que les limites de contrainte de l'acier soient sensiblement inchangées pour un béton de 40 MPa, valeur devenue courante pour les ouvrages d'art ; mais en revanche, dans les bâtiments, les valeurs usuelles de la résistance du béton sont généralement plus faibles, et dans de telles conditions, il s'est avéré que les nouvelles formules conduisaient à des quantités d'acier prohibitives, notamment dans le cas de fissuration très préjudiciable.

Aussi, à de nombreuses occasions, surpris par une quantité d'armatures nettement supérieure aux prévisions, le Maître d'Œuvre a-t-il été amené en cours de chantier à modifier les clauses du C.C.T.P. en décidant que dorénavant la fissuration serait moins préjudiciable.

Au vu de cette situation, un groupe de travail restreint formé au sein de la commission BAEL-BPEL-Eurocode 2 a réexaminé les diverses possibilités et, adoptant les règles déjà en usage dans les services de la SNCF, il a proposé à la commission, qui les a approuvées, de nouvelles limites de contraintes données dans les présentes recommandations provisoires.

Le béton à hautes performances

Comme indiqué plus haut, les éditions de 1980 et 1983 des Règles BAEL, de même que les règles BPEL 83, n'envisageaient que des bétons de résistance caractéristique inférieure ou égale à 40 MPa.

Cependant, au cours des années 80, grâce en particulier à l'impulsion donnée par le Projet National VNB (les Voies Nouvelles du matériau Béton), les bétons à hautes performances ont connu en France un développement rapide, et ceci pour trois raisons principales :

- amélioration du comportement mécanique en service de certains grands ouvrages très sollicités,
- accélération du durcissement permettant de réduire la durée des cycles de rotation des moules en préfabrication,
- amélioration de la durabilité grâce à la plus grande compacité qui accompagne en général les résistances élevées.

À cette époque, compte tenu de l'expérience acquise, la limite de 60 MPa a semblé satisfaisante car elle couvrait la plupart des applications et, de plus, vérifications faites, les formules numériques reliant les différentes propriétés du béton à sa résistance à la compression restaient admissibles et pouvaient être conservées malgré de légères distorsions sans conséquences majeures. L'extension des règles jusqu'à 60 MPa fut la principale novation apportée par le millésime 91 des deux règlements.

Mais les dernières années ont vu l'apparition de deux faits nouveaux : ce furent d'une part le développement de bétons de plus en plus résistants, jusqu'à 80 MPa ou davantage, et d'autre part la remise en cause des formules des Règles BPEL concernant les déformations différées du béton par retrait et fluage dans le cas des bétons de résistance élevée. En effet, les valeurs du retrait et du fluage résultant de l'application des Règles BPEL s'avéraient trop faibles dans certains cas, avec comme conséquences une sous-évaluation des pertes de précontrainte et des déformations excessives des ouvrages en service.

Dans ces conditions, un groupe de travail de l'AFREM a établi de nouvelles propositions basées sur un examen approfondi des règlements étrangers, sur les résultats d'essais conduits en laboratoire et sur l'observation du comportement d'ouvrages réels. Ces propositions concernent les bétons de résistance caractéristique comprise entre 40 et 80 MPa. Discutées et amendées par la commission BAEL-BPEL, elles présentent le double avantage d'élargir la gamme des résistances du béton armé ou précontraint et de refléter de manière plus exacte le comportement du béton de résistance supérieure ou égale à 40 MPa.

Préface

En effet, comme dit plus haut, l'extension initiale de 40 à 60 MPa de la résistance du béton avait été introduite sans modification des formules existantes ; cette extrapolation était admissible mais au prix d'une approximation croissante avec la résistance si bien que le raccordement avec des résistances supérieures devenait impossible. C'est la raison pour laquelle les présentes recommandations proposent des règles alternatives aux règles BAEL et BPEL dans la gamme de résistance 40 à 80 MPa et non de 60 à 80 MPa, de façon à rétablir ainsi la continuité des propriétés mécaniques des bétons en fonction de leur résistance à la compression.

Usage des présentes recommandations

Les présentes recommandations sont éditées, en attendant leur publication au journal officiel sous une forme identique, pour offrir aux maîtres d'ouvrages un texte contractualisable dans les marchés publics de travaux.

En ce qui concerne l'emploi de bétons à hautes performances, il est clair que les règles proposées, issues des résultats des recherches les plus avancées, ne sont pas équivalentes aux règles actuelles, issues d'une extrapolation sans fondement scientifique, dans la gamme de résistances caractéristiques du béton allant de 40 à 60 MPa, notamment pour ce qui est du fluage (développement dans le temps, effets dans les structures hyperstatiques). Lorsque le marché prévoit l'emploi de tels bétons, le choix est laissé entre les règles BAEL91 ou BPEL91 et les règles objet des présentes recommandations. Toutefois, nous conseillons fortement l'abandon des textes actuels au profit des nouvelles annexes.

De même, les règles proposées ne traitent pas du cas de pièces réalisées en plusieurs phases de bétons différents. L'adjacence de bétons aux caractéristiques mécaniques très éloignées peut impliquer l'étude des effets dus aux comportements différentiels non traités dans ces règles qui se limitent aux caractéristiques du matériau lui-même.

Enfin, nous attirons l'attention des maîtres d'ouvrages et maîtres d'œuvres sur le fait que les règles relatives aux bétons à hautes performances sont généralement exprimées en fonction de la résistance en compression f_{cj} même si les phénomènes visés mettent plutôt en jeu la résistance en traction f_{jt} . Or, il a été constaté que la résistance en traction présentait un caractère plus aléatoire que la résistance en compression. La validité des présentes recommandations ne peut être garantie que pour des bétons offrant une résistance en traction au moins égale à la résistance calculable selon les articles A.2.1,12 du BAEL ou 2.1.3 du BPEL.

Roger Lacroix

**Président de la
commission BAEL-
BPEL-Eurocode 2**

**Christian Binet-Tarbé
de Vauxelairs**

**Chef du Centre des
Techniques d'Ouvrages
d'Art du SETRA**

Robert Chaussin

**Directeur Technique
Laboratoire Central des
Ponts et Chaussées**

Charles Baloche

**Chef du Service
des Structures
Centre Scientifique et
Technique du Bâtiment**

Sommaire

Préface	3
---------------	---

Section I : BÉTON ARMÉ **Modifications des règles de calcul** **Fascicule 62 Titre I du CCTG-Travaux**

Présentation	7
Table des matières	8
• MODIFICATION DE L'ARTICLE A.4.5.3. - La Fissuration	10
• ANNEXE F : Règles relatives à l'emploi des bétons à hautes performances ...	11
- Modifications relatives à la partie A	12
- Modifications relatives à la partie B	18
- Modifications relatives à l'annexe E	19

Section II : BÉTON PRÉCONTRAINTE **Modifications des règles de calcul** **Fascicule 62 Titre II du CCTG-Travaux**

Présentation	21
Table des matières	22
• ANNEXE 14 : Modifications relatives aux chapitres 1 à 9	25
- Annexe 1 modifiée - Déformations du béton	32
- Modifications relatives à l'annexe 4 - Zones d'application des forces concentrées ...	41
- Modifications relatives à l'annexe 5 - Ouvrages en béton de granulats légers	42
- Modifications relatives à l'annexe 6 - Les traitements thermiques des bétons	43
- Modifications relatives à l'annexe 9 - Dalles de bâtiment précontraintes par post-tension	44

Modification des règles de calcul du béton armé

Fascicule 62 Titre I du CCTG-Travaux (Section I : BÉTON ARMÉ)

Présentation

Le Fascicule 62 Titre I^{er}, relatif aux règles de conception et de calcul des ouvrages en béton armé (section I ou BAEL), a été révisé en 1989, révision approuvée par le décret n° 92-72 du 16 Janvier 1992.

Ce texte, dit " règles BAEL 91 ", introduisait notamment la prise en compte des bétons de haute performance (BHP), présentant une résistance caractéristique en compression allant jusqu'à 60 mégapascal (60 MPa).

L'expérience acquise depuis conduit la commission de suivi des règles BAEL-BPEL à proposer deux types de modifications.

1) En ce qui concerne la fissuration du béton armé.

Le recalibrage des formules relatives à l'état-limite d'ouverture des fissures, pour prendre en compte les avantages du BHP en résistance et en compacité (assurant une meilleure durabilité) a été étudié pour ne pas apporter de modification sensible pour les bétons de 40 MPa (résistance caractéristique courante pour des bétons d'ouvrages de génie civil).

Mais ce recalibrage a eu pour effet non recherché de pénaliser les bétons courants de bâtiment (de résistance plus faible), exigeant pour ceux-ci des quantités d'acier prohibitives pour les structures exposées à des ambiances agressives (cas dit " fissuration très préjudiciable¹ "). De ce fait, des maîtres d'œuvre ont fait une application biaisée des catégories prévues par le BAEL 91, et classé " fissuration préjudiciable " des cas qui seraient normalement " fissuration très préjudiciable ".

La commission a donc étudié de nouvelles formules qui couvrent mieux l'ensemble des bétons, en vue de faire revenir les utilisateurs à une appréciation normale des facteurs d'environnement et de risques liés à la fissuration. Elle propose de les introduire dans les règles BAEL 91 en modifiant l'article A.4.5.3.

2) En ce qui concerne le développement de bétons à haute performance de résistance caractéristique dépassant 60 MPa.

La commission a analysé l'expérience acquise depuis 1989 sur le comportement de ces bétons, et en a tiré des règles de dimensionnement valables pour 40 à 80 MPa de résistance caractéristique. Elle propose d'introduire des règles constituant une nouvelle annexe F aux règles BAEL, contenant des clauses modifiées par rapport aux parties A, B de ces règles et à leur annexe E.

Lorsque le marché rendra applicable cette annexe F, les clauses qu'elle contient se substitueront aux clauses homologues des Règles BAEL 91.

1 - Pour des risques moindres de détérioration du fait de la fissuration, sont aussi définis les cas " fissuration préjudiciable " et " fissuration peu préjudiciable ".

- **MODIFICATION DE L'ARTICLE A.4.5.3** 10
- **ANNEXE F : Règles relatives à l'emploi des bétons à hautes performances** 11

Modifications relatives à la partie A

A.1.1.- Domaine d'application.	12
A.2.1.- Béton.	12
A.4.3.- État limite ultime de résistance.	12
A.4.3.2.- Hypothèses de calcul.	12
A.4.3.3.- Diagramme des déformations limites de la section.	13
A.4.3.4.- Diagrammes déformations-contraintes du béton.	13
A.4.3.5.- Cas de la flexion composée avec compression.	13
A.4.4.3.- Sollicitations et hypothèses de calcul.	14
A.4.5.1.- Règles de calcul en section courante.	14
A.4.6.1.- Calcul des déformations.	14
A.5.1.- Justification des poutres sous sollicitations d'effort tranchant.	15
A.5.1.1.- Généralités.	15
A.5.1.2.- Justification d'une section courante.	15
A.5.1.22.-Section minimale d'armatures d'âmes.	15
A.5.1.23.-État limite ultime des armatures d'âme.	15
A.5.1.31.-Appui simple d'about.	16
A.5.2.- Justification des dalles et poutres-dalles sous sollicitation d'effort tranchant.	16
A.5.2.2.- Justification des armatures d'effort tranchant.	16
A.5.2.4.- Forces localisées - Poinçonnement.	16
A.5.3.- Actions tangentes exercées sur les éléments autres que les âmes : contures d'attache.	16
A.5.3.3.- Surfaces de reprise.	16
A.6.1.- Adhérence des aciers en barres.	17
A.6.1.25.- Ancrage par courbure de barres tendues.	17
A.8.4.2.- Frettage.	17
A.8.4.3.- Articulations en béton.	17

Modifications relatives à la partie B

B.6.4.- Condition de non-fragilité.	18
B.6.5.2.- Évaluation des flèches.	18
B.6.7.2.- Liaison des membrures d'une poutre avec son âme.	18
B.6.8, 42.- Règles particulières à certains planchers avec hourdis sur entrevous de terre cuite ou béton.	18

Table des matières

B.7.4.- Condition de non-fragilité et section minimale d'armatures.	18
B.8.4.- Justification des poteaux.	18
<i>Modifications relatives à l'annexe E</i>	19
E.4.3.- Vérification des conditions de résistance de la dalle aux efforts tranchants.	19
E.4.8.32.- Vérification des conditions de résistance aux efforts tranchants.	19
E.5.3.- Épaisseur minimale.	19
E.6.2.2.- Limitation de la contrainte tangente conventionnelle.	19
E.6.2.4.- Armatures réparties.	19
E.7.1.2.- Principe des tables.	19

concernant LA FISSURATION

A.4.5.3. - État-limite d'ouverture des fissures.

Dans les sous-articles A.4.5.33 et A.4.5.34 remplacer les limites de contraintes de traction dans les armatures par les limites suivantes :

- La plus grande des deux valeurs 240 et $110 \sqrt{\eta f_{tj}}$ (MPa), dans le cas où la fissuration est considérée comme préjudiciable,
- et la plus grande des deux valeurs 200 et $90 \sqrt{\eta f_{tj}}$ (MPa), dans le cas où la fissuration est considérée comme très préjudiciable.

Annexe F

Règles relatives à l'emploi de bétons à hautes performances

Le fascicule approuvé par décret n° 92-72 du 16 Janvier 1992, transmis par la circulaire n° 92-75 du 1er décembre 1992 sans la présente annexe, était prévu pour des bétons de résistance caractéristique comprise entre 40 et 60 MPa, les dispositions de la présente annexe bénéficient de l'expérience acquise depuis sur le comportement des BHP et sont de nature à offrir plus de fiabilité et de durabilité.

Par convention, on distingue par le vocable BHP avec fumée de silice les bétons dont le rapport pondéral fumée de silice/ciment est au moins égal à 5 %.

La résistance élevée des BHP s'accompagne d'une amélioration de la plupart de leurs propriétés d'usage, amélioration que prévoit d'ailleurs l'extrapolation des lois décrivant ces propriétés, lorsqu'elles sont indexées par la résistance du béton. La présente annexe s'applique aux BHP, dont elle prend en compte les caractères spécifiques :

- leur comportement à la rupture en compression diffère de celui des bétons classiques ;
- leur résistance en traction augmente moins vite que ce que laisse prévoir la loi affine reliant résistance en traction et en compression des bétons ordinaires ;
- leur résistance aux contraintes tangentes est modifiée par suite de la disparition progressive de l'effet d'engrènement ;
- leur retrait est moins dépendant de l'humidité et de la taille des pièces ;
- leur fluage est plus faible en valeur finale que celui des bétons ordinaires, particulièrement lorsqu'ils contiennent de la fumée de silice ;
- la formulation des BHP obéit à des règles précises, et leur contrôle de qualité exige une rigueur accrue ;
- enfin, les BHP exposés à l'incendie présentent un risque d'éclatement superficiel supérieur à celui des bétons de structure classiques. Cet aspect n'est pas traité dans le présent texte.

On donne ci-après la liste des articles appelant des modifications pour leur application aux BHP, avec les changements correspondants. Les alinéas ou formules non commentées dans cette annexe sont inchangés. **Dans toutes les formules qui suivent, les contraintes, les résistances et les modules de déformation des matériaux sont exprimées en MPa, et les temps en jours.**

Les règles d'application sont généralement exprimées en fonction de la résistance en compression $f_{c,j}$. Elles ne s'appliquent qu'aux bétons dont la résistance à la traction $f_{t,j}$ est au moins égale à la valeur calculable selon l'article A.2.1.12.

Lorsque le marché le prévoit, les dispositions de la présente annexe se substituent aux dispositions homologues du présent fascicule (1^e partie : Règles générales ; 2^e partie : Règles applicables aux ossatures et éléments courants des structures en béton armé ; annexe E : méthodes de calcul).

Les bétons à hautes performances (BHP) considérés dans cette annexe ont une résistance caractéristique en compression à 28 jours comprise entre 40 et 80 MPa.

A.1.1.- Domaine d'application.**A.1.1.- Domaine d'application.**

Les bétons de résistance caractéristique à 28 jours comprise entre 40 et 80 MPa sont couverts par la présente annexe. Cependant, pour les bétons dont la proportion volumique de granulats est inférieure à 66 %, les modèles de prédiction proposés pour le module élastique, le retrait et le fluage ne peuvent être appliqués sans vérification préalable de leur validité.

A.2.1.- Béton.**A.2.1.- Béton.****A.2.1,12.****A.2.1,12.**

Pour $f_{cj} \geq 60$ MPa, la résistance caractéristique à la traction s'exprime par :

$$f_{tj} = 0,275 f_{cj}^{2/3}$$

Pour $40 \leq f_{cj} < 60$ MPa, la loi usuelle s'applique :

$$f_{tj} = 0,6 + 0,06 f_{cj}$$

A.2.1,13.

L'obtention de BHP exige l'emploi de matériaux appropriés (granulats de qualité, ciment de classe 42,5 - anciennement 55 - ou plus, présentant une compatibilité satisfaisante avec les adjuvants) et d'une installation de fabrication précise et fiable. En outre, les résistances les plus élevées (B70/B80) exigent le plus souvent l'utilisation d'additions minérales particulières telles que la fumée de silice.

A.2.1,13.**A.2.1,22.**

L'expression du module de déformation différée est alors :

- $E_{vj} = 4400 f_{cj}^{1/3}$ sans fumée de silice ;
- $E_{vj} = 6100 f_{cj}^{1/3}$ avec fumée de silice.

A.2.1,22.

Pour les BHP sans ou avec fumée de silice, avec $f_{c28} \geq 60$ MPa, les déformations complémentaires dues au fluage du béton sont égales à 1,5 fois ou 0,8 fois les déformations instantanées, respectivement

A.4.3.- État limite ultime de résistance.**A.4.3.- État limite ultime de résistance.****A.4.3,2.- Hypothèses de calcul.****A.4.3,2.- Hypothèses de calcul.**

Les valeurs numériques correspondantes sont données dans le tableau suivant:

L'alinéa concernant les déformations des sections est à remplacer par le suivant :

f_{cj}	40	50	60	70	80
$\varepsilon_{bc2}(10^{-3})$	3,5	3,25	3	2,75	2,5

Les déformations des sections sont limitées, pour l'allongement unitaire de l'acier, à $10 \cdot 10^{-3}$, pour le

Règles relatives à l'emploi de bétons à hautes performances

raccourcissement unitaire du béton à $\epsilon_{bc1} = 2.10^{-3}$ en compression simple et à ϵ_{bc2} en flexion. Le raccourcissement relatif ϵ_{bc2} est fonction de la résistance du béton selon la relation**** :

$$\epsilon_{bc2} = (4,5 - 0,025 f_{cj}) 10^{-3}$$

A.4.3,3.- Diagramme des déformations limites de la section.

A.4.3,3.- Diagramme des déformations limites de la section.

La valeur fixe $3,5.10^{-3}$ du raccourcissement relatif au pivot B est à remplacer par ϵ_{bc2} (donné en A.4.3,2). L'ordonnée du pivot C est alors fonction de la résistance du béton.

A.4.3,4.- Diagrammes déformations - contraintes du béton.

A.4.3,4.- Diagrammes déformations - contraintes du béton.

A.4.3,41.

A.4.3,41.- Pour les bétons à haute performance, remplacer " Ce segment s'étend entre les valeurs 0,2 % et 0,35 % de la déformation ϵ_{bc} " par " Ce segment de droite s'étend entre les valeurs $\epsilon_{bc1} = 2.10^{-3}$ et ϵ_{bc2} de la déformation ".

Le diagramme déformations-contraintes du béton est représenté sur la figure 1.

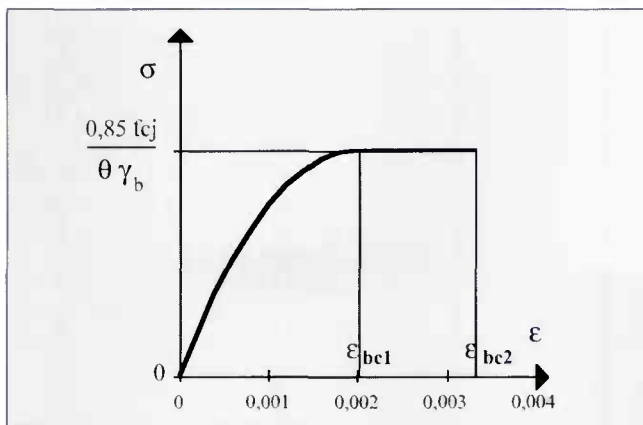


Fig. 1

A.4.3,42.

A.4.3,42.

** Les valeurs numériques correspondantes sont données dans le tableau suivant :

La hauteur $0,8 y_u$ du diagramme rectangulaire simplifié est remplacée par λy_u , le coefficient λ étant fonction de la résistance selon la relation** :

f_{cj}	40	50	60	70	80
λ	0,8	0,78	0,77	0,75	0,72

$$\lambda = 1 - \frac{0,7}{4,5 - 0,025 f_{cj}}$$

A.4.3,5.- Cas de la flexion composée avec compression.

A.4.3,5.- Cas de la flexion composée avec compression.

Dans la formule donnant e_2 , lorsque $f_{c28} \geq 60$ MPa, le rapport ϕ prend la valeur :

Règles relatives à l'emploi de bétons à hautes performances

A.4.4.3.- Sollicitations et hypothèses de calcul.

A.4.4.32.

1) 3^e alinéa. On peut prendre dans le diagramme contrainte-déformation $E_{ij0} = E_{ij}$ (sans majoration de 10 %, car les modules tangents et sécants tendent à se confondre).

Il convient de prendre pour ϕ , la valeur du coefficient de fluage définie par l'annexe 14 des règles BPEL, relative aux bétons à hautes performances.

La loi de Sargin est définie sur la figure 2 et par les expressions suivantes :

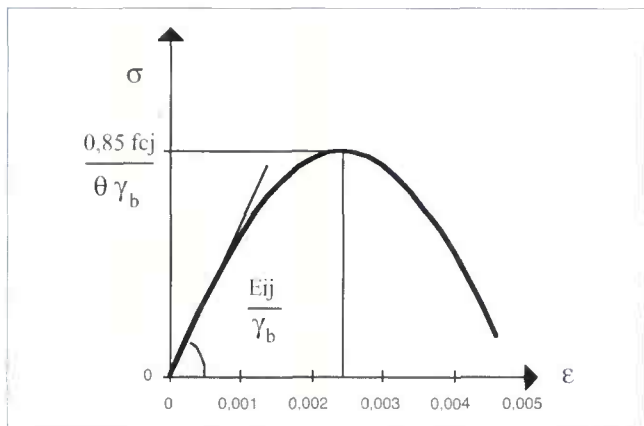


Fig. 2 - Loi de Sargin

$$\sigma_b = f_{bu} \frac{k \left(\frac{\epsilon_b}{\epsilon_{b0}} \right) + (k' - 1) \left(\frac{\epsilon_b}{\epsilon_{b0}} \right)^2}{1 + (k - 2) \left(\frac{\epsilon_b}{\epsilon_{b0}} \right) + k' \left(\frac{\epsilon_b}{\epsilon_{b0}} \right)^2}$$

$$f_{bu} = \frac{0,85}{\theta \gamma_b} f_{cj} \quad k = \frac{\theta E_{ij} \epsilon_{b0}}{0,85 f_{cj}} \quad k' = -\frac{k}{1,65} + \frac{f_{cj} - 30}{f_{cj} - 36}$$

A.4.5.1.- Règles de calcul en section courante.

A.4.6.1.- Calcul des déformations.

$\phi \equiv 1,5$ pour les BHP sans fumée de silice ;
 $\phi = 0,8$ pour les BHP avec fumée de silice.

A.4.4.3.- Sollicitations et hypothèses de calcul.

A.4.4.32.

L'alinéa " On adopte, pour le béton comprimé... qu'en A.4.3.5 " est remplacé par le suivant :

" On adopte, pour le béton comprimé, la loi contrainte-déformation dit loi de Sargin. Cependant, pour le calcul des poteaux d'élançement mécanique λ inférieur à 50, il est loisible d'utiliser le diagramme de l'article A.4.3.41. Dans tous les cas, est appliquée une affinité parallèle à l'axe des déformations, de rapport $(1 + \alpha \phi)$, expression dans laquelle les coefficients α et ϕ gardent la même signification qu'en A.4.3.5 ".

A.4.5.1.- Règle de calcul en section courante.

Quand $f_{c28} \geq 60$ MPa, le coefficient d'équivalence prend la valeur $n = 9$, que le béton contienne ou non de la fumée de silice.

A.4.6.1.- Calcul des déformations.

Règles relatives à l'emploi
de bétons à hautes performances

A.4.6,12.

* Dans le commentaire noté ****, remplacer $n = 15$ par $n = 9$.

**A.5.1.- Justification des poutres
sous sollicitations d'effort tranchant.**

A.5.1,1.- Généralités.

* La borne forfaitaire, égale à 1,5 MPa, est sans objet.

A.5.1,2.- Justification d'une section courante.

A.5.1,211.

* La borne forfaitaire, égale à 5 MPa, est sans objet.

** La borne forfaitaire, égale à 4 MPa, est sans objet.

A.5.1,212

* La borne forfaitaire, égale à 7 MPa, est sans objet.

**A.5.1,22.- Section minimale d'armatures
d'âmes.**

**A.5.1,23.- État limite ultime des armatures
d'âme.**

* Le remplacement de $0,3 f_{tj}$ par $0,14 f_{cj}^{1/2}$ rend compte de la diminution de l'influence du terme fixe lorsque la résistance du béton s'accroît.

A.4.6,12.

Quand $f_{c28} \geq 60$ MPa, la valeur conventionnelle du coefficient d'équivalence est $n = 9$.

**A.5.1.- Justification des poutres
sous sollicitations d'effort tranchant.**

A.5.1,1.- Généralités

Pour les pièces dont toutes les sections droites sont entièrement comprimées, les valeurs limites de τ_u sont remplacées par la limite ci -après* :

$$\frac{1}{\gamma_b} 0,19 f_{cj}^{2/3}$$

A.5.1,2.- Justification d'une section courante.

A.5.1,211.

Dans le cas où les armatures d'âme sont droites, la contrainte τ_u doit être au plus égale à* :

$$\frac{1}{\gamma_b} 0,64 f_{cj}^{2/3}$$

Lorsque la fissuration est préjudiciable ou très préjudiciable, la contrainte τ_u doit être au plus égale** à :

$$\frac{1}{\gamma_b} 0,51 f_{cj}^{2/3}$$

A.5.1,212.

La contrainte τ_u doit être au plus égale* à :

$$\frac{1}{\gamma_b} 0,90 f_{cj}^{2/3}$$

**A.5.1,22.- Section minimale d'armatures
d'âmes.**

La quantité $\frac{A_t f_c}{b_0 s_t}$ doit être au moins égale à $0,13 f_{tj}$.

**A.5.1,23.- État limite ultime des armatures
d'âme.**

La justification des armatures d'âme s'écrit comme suit :

$$\frac{A_t}{b_0 s_t} \geq \frac{\gamma_s (\tau_u - 0,14 k f_{cj}^{1/2})}{0,9 f_c (\cos \alpha + \sin \alpha)}$$

Règles relatives à l'emploi de bétons à hautes performances

** En flexion simple, et pour $\alpha = 90^\circ$, la relation s'écrit :

$$\frac{A_t}{b_0 s_t} \geq \frac{\gamma_s (\tau_u - 0,14 f_{cj}^{1/2})}{0,9 f_c}$$

*** Dans le cas de la flexion composée avec traction le coefficient k doit être pris avec sa valeur algébrique qui est négative dès que $\sigma_m > 1,33 f_{tj}$.

A.5.1,31.- Appui simple d'about.

A.5.1,313.

A.5.2.- Justification des dalles et poutres-dalles sous sollicitation d'effort tranchant.

A.5.2,2.- Justification des armatures d'effort tranchant.

A.5.2,4.- Forces localisées - Poinçonnement.

A.5.2,42.

* L'effet favorable des armatures est pris en compte en prenant pour valeur limite :

$$Q_u = \frac{1}{\gamma_b} (0,32 + 6,6 \rho_l) d u_c f_{cj}^{1,2}$$

avec ρ_l toujours borné supérieurement à 0,015.

A.5.3.- Actions tangentes exercées sur les éléments autres que les âmes : coutures d'attache.

A.5.3,3.- Surfaces de reprise.

Pour la flexion composée avec traction, le coefficient k prend la valeur

$$1 - \frac{0,75 \sigma_{tm}}{f_{tj}} \text{ au lieu de } 1 - \frac{10 \sigma_{tm}}{f_{cj}}$$

A.5.1,31.- Appui simple d'about.

A.5.1,313.

La condition devient $\frac{2 V_u}{b_0 a} \leq \frac{1}{\gamma_b} 0,8 \times 3,4 f_{cj}^{2/3}$

A.5.2.- Justification des dalles et poutres-dalles sous sollicitation d'effort tranchant.

A.5.2,2.- Justification des armatures d'effort tranchant.

La valeur limite $\frac{1}{\gamma_b} 0,07 f_{cj}$ de la contrainte tangente τ_u est remplacée par $\frac{1}{\gamma_b} 0,44 f_{cj}^{1,2}$

A.5.2,4.- Forces localisées - Poinçonnement.

A.5.2,42.

Aucune armature d'effort tranchant n'est requise si la condition suivante est satisfaite* :

$$Q_u \leq \frac{1}{\gamma_b} 0,28 u_c h f_{cj}^{1,2}$$

A.5.3.- Actions tangentes exercées sur les éléments autres que les âmes : coutures d'attache.

A.5.3,3.- Surfaces de reprise.

La contrainte tangente limite sous sollicitation ultime devient $0,055 f_{cj}^{1,2}$

*Règles relatives à l'emploi
de bétons à hautes performances*

A.6.1.- Adhérence des aciers en barres.

A.6.1,25.- Ancrage par courbure de barres tendues.

A.6.1,252.

A.8.4,2.- Frettage.

A.8.4,23.

* Les faibles déformations latérales des BHP rendent difficile la mobilisation de valeurs plus élevées de la contrainte de l'acier.

A.8.4,3.- Articulations en béton.

A.6.1.- Adhérence des aciers en barres.

A.6.1,25.- Ancrage par courbure de barres tendues.

A.6.1,252.

La condition de non-écrasement du béton devient :

$$\frac{r}{\varnothing} \geq 0,032 \left(1 + \frac{\varnothing}{e_r} \right) v \frac{\sigma_s}{f_{cj}^{1/2}}$$

Quand l'armature de traction est entièrement courbe, ou dans les boucles de jonction des barres tendues d'une poutre, la condition devient :

$$\frac{r}{\varnothing} \geq 0,055 \left(1 + \frac{2n\varnothing}{b} \right) v \frac{f_c}{f_{cj}^{1/2}}$$

A.8.4,2.- Frettage.

A.8.4,23.

Dans l'évaluation du coefficient de frettage du béton, la limite élastique de l'armature est prise au maximum égale à $f_c = 500$ MPa *

A.8.4,3.- Articulations en béton.

En l'absence de résultats expérimentaux, il est déconseillé de réaliser des articulations en BHP de résistance supérieure ou égale à 60 MPa.

B.6.4.- Condition de non-fragilité.**B.6.5,2.- Évaluation des flèches.**

Si $f_{c28} \geq 60$ MPa, on prend pour les bétons sans fumée de silice $E_v = \frac{1}{2,5} E_i$ et pour les bétons avec fumée de silice $E_v = \frac{1}{1,8} E_i$

B.6.7,2.- Liaison des membrures d'une poutre avec son âme.**B.6.8,42.- Règles particulières à certains planchers avec hourdis sur entrevous de terre cuite ou béton.****B.6.8,421. alinéa e)****B.7.4.- Condition de non-fragilité et section minimale d'armatures.****B.8.4.- Justification des poteaux.****B.8.4,1.****B.6.4.- Condition de non-fragilité.**

Les valeurs de 0,001 et 0,002 sont remplacées respectivement par $0,00033 f_{ij}$ et $0,00067 f_{ij}$.

B.6.5,2.- Évaluation des flèches.**B.6.7,2.- Liaison des membrures d'une poutre avec son âme.**

Les limitations de la contrainte tangente à $0,025 f_{c28}$, $0,05 f_{c28}$, $0,10 f_{c28}$ sont remplacées par $0,16 f_{c28}^{1,2}$, $0,32 f_{c28}^{1,2}$, $0,64 f_{c28}^{1,2}$ respectivement.

B.6.8,42.- Règles particulières à certains planchers avec hourdis sur entrevous de terre cuite ou béton.**B.6.8,421. alinéa e)**

La valeur limite de $0,02 f_{c28}$ pour τ_u est remplacée par $0,13 f_{c28}^{1,2}$

B.7.4.- Condition de non-fragilité et section minimale d'armatures.

La quantité ρ_0 prend pour les BHP les valeurs suivantes :

- $0,0004 f_{ij}$ s'il s'agit de ronds lisses (Fe E 215 ou Fe E 235) ;
- $0,0003 f_{ij}$ s'il s'agit de barres ou fils à haute adhérence de classe Fe E 400 ou de treillis soudés à fils lisses de diamètre supérieur à 6 mm ;
- $0,0002 f_{ij}$ s'il s'agit de barres ou fils à haute adhérence de classe Fe E 500 ou de treillis soudés à fils lisses de diamètre supérieur à 6 mm.

B.8.4.- Justification des poteaux.**B.8.4,1.**

Pour les bétons sans fumée de silice de résistance supérieure à 40 MPa, et en fonction de l'âge auquel la majorité des charges est appliquée, les valeurs de α sont à diviser par :

- 1,05 (au lieu de 1,1)
- 1,10 (au lieu de 1,2)

Pour les bétons avec fumée de silice, la valeur de α ne subit aucune réduction.

E.4.3.- Vérification des conditions de résistance de la dalle aux efforts tranchants.

La valeur $\frac{0,05 f_{c28}}{\gamma_b}$ dans les expressions de V_{oxu}^{II} , V_{oyu}^{II} , V_{oxu}^{IV} est remplacée par $0,32 \frac{f_{cj}^{1/2}}{\gamma_b}$

E.4.8,32.- Vérification des conditions de résistance aux efforts tranchants.

La valeur $\frac{0,05 f_{c28}}{\gamma_b}$ dans les expressions de V_{ou}^{II} et V_{ou}^{IV} est remplacée par $0,32 \frac{f_{cj}^{1/2}}{\gamma_b}$

E.5.3.- Épaisseur minimale.

La première condition est remplacée par la suivante : $b_o \geq 1,1 \frac{p}{f_{c28}^{2/3}} \frac{1}{h}$ [ou $1,1 \frac{p}{f_{c28}^{2/3}}$ si $h > 1$]

* La première condition est déterminante si $\frac{p^2}{f_{c28} h^2} \geq \frac{1}{485}$. Elle correspond à la limitation de τ_{oi} à la même valeur que τ_u dans l'article A.5.1,211 dans le cas des armatures d'âmes droites, sans fissuration préjudiciable. La seconde condition correspond à une vérification élastique au déversement d'une paroi dont la fixité des sections d'appui est seule assurée.

E.6.2,2.- Limitation de la contrainte tangente conventionnelle.

La contrainte tangente est au plus égale à la valeur suivante :

- si $1 \leq \delta \leq 2,44$, $\tau_u = 0,077 (2 + \delta) f_{cj}^{2/3}$
- si $2,44 \leq \delta \leq 4$, $\tau_u = 0,077 (2 + \delta) f_{cj}^{2/3} - 0,9 (\delta - 2,44)$

E.6.2,4.- Armatures réparties.

L'expression de λ est remplacée par $\lambda = \frac{1}{4} (\delta + 1,9 \frac{\tau_u}{f_{cj}^{1/2}} - 1)$ avec une valeur minimum de 1/10 pour λ , δ étant plafonné à 4.

E.7.1,2.- Principe des tables.**E.7.1,2,2.**

L'alinéa " On adopte pour le béton comprimé ... " est remplacé par le suivant :

" On adopte, pour le béton comprimé, la loi contrainte-déformation dite de Sargin. Cependant, pour le calcul des poteaux d'élançement mécanique λ inférieur à 50, il est loisible d'utiliser la loi simplifiée définie en A.4.3,41 de cette annexe.

Les lois retenues doivent subir une affinité horizontale de rapport $(1 + \alpha \phi)$; les coefficients α et ϕ prennent les valeurs indiquées en A.4.3,5 modifié.

Présentation

Le Fascicule 62 Titre II, relatif aux règles de conception et de calcul des ouvrages en béton précontraint (section II ou BPEL) a été révisé en 1989, révision approuvée par le décret n° 92-72 du 16 Janvier 1992.

Ce texte, dit " Règles BPEL 91 ", introduisait notamment la prise en compte des bétons de haute performance (BHP), présentant une résistance caractéristique en compression allant jusqu'à 60 mégapascal (60 MPa).

L'expérience acquise depuis conduit la commission de suivi des règles BAEL-BPEL à proposer une modification des dites règles BPEL 91. Après avoir analysé l'expérience acquise depuis 1989 sur le comportement des bétons de haute performance, et en avoir tiré des règles de dimensionnement valables pour 40 à 80 MPa de résistance caractéristique, elle propose d'introduire des règles constituant la nouvelle annexe 14 aux règles BPEL, contenant des clauses modifiées par rapport aux chapitres 1 à 9 et aux annexes 1, 4, 5, 6 et 9.

Lorsque le marché rendra applicables cette annexe, les clauses qu'elle contient se substitueront aux clauses homologues des Règles BPEL 91.

● ANNEXE 14 : Modifications relatives aux chapitres 1 à 9	25
1.1.- Domaine d'application	26
2.1.- Béton	26
2.1.2.- Résistance à la compression	26
2.1.3.- Résistance à la traction	26
2.1.4.- Déformations longitudinales instantanées	26
2.1, 51.- Retrait	26
2.1,52.- Fluage	27
3.3,21.- Perte de tension due au retrait du béton	27
3.3,22.- Perte de tension due au fluage du béton	27
3.4,13.- Perte à la mise en précontrainte de l'élément	28
5.2,13.- Intervention des aciers passifs	28
5.2,2.- Sections fissurées	28
6.1,11.- Précontrainte adhérente	28
6.2,23.- Calcul des déformations des pièces justifiées en classe I ou en classe II	28
6.3,1.- Sollicitations de calcul	28
6.3,311.- Distribution des déformations limites	28
6.3,312.- Diagramme contraintes-déformations du béton	29
6.4,4.- Hypothèses de calcul dans le cas général	29
7.3,2.- Justification des armatures transversales	30
7.3,3.- Justification du béton	30
7.6,53.- Justification du béton des bielles de compression	31
8.6,2.- Détermination des armatures passives	31
8.7,2.- Détermination des armatures passives	31
9.6,41.- Justification des armatures d'effort tranchant	31

Annexe 1 modifiée
Déformations du béton

1.- Domaine d'application	32
2.- Déformations instantanées	32
2.1.- Calculs à l'état limite de service	32

2.2.- Calculs à l'état limite ultime	32
2.2.1.- Généralités	32
2.2.2.- Modèles de calcul	33
3.- Retrait	34
3.1.- Définitions	34
3.2.- Retrait endogène	34
3.3.- Retrait de dessiccation (ou de séchage)	35
3.4.- Retrait total d'un élément de structure	35
4.- Fluage	36
4.1.- Généralités	36
4.2.- Fluage sous contrainte constante	36
4.2.1.- Fluage propre	36
4.2.2.- Fluage de dessiccation	36
4.2.3.- Fluage total d'un élément de structure	37
4.3.- Méthode de superposition	37
4.3.1.- Succession d'accroissements de contrainte	37
4.3.2.- Diminution de contrainte - retour de fluage	37
4.3.3.- Rechargement	38
4.4.- Méthode incrémentale	39
4.4.1.- Principe général de mise en œuvre	39
4.4.2.- Donnée de la fonction $\phi(t, r_m, \rho_h, \rho_s, C)$	39
4.4.3.- Cas d'un déchargement total	39
 Modifications relatives à l'annexe 4	
Zones d'application des forces concentrées	
<i>Première partie - Zone d'introduction de la précontrainte</i>	
1.3.2.- Justification vis-à-vis de l'équilibre général de diffusion pure - annatures d'équilibre général	41
 <i>Deuxième partie - Zone d'appui simple d'about</i>	
2.1.- Bielle d'about - conditions générales d'équilibre	41
3.1.- Équilibre du coin - principe	41
 Modifications relatives à l'annexe 5	
Ouvrages en béton de granulats légers	42

Modifications relatives à l'annexe 6 ***Les traitements thermiques des bétons***

3.1.- Résistance à la compression à 28 jours	43
3.3.- Résistance à la traction	43
3.5.- Déformations différées du béton	43

Modifications relatives à l'annexe 9 ***Dalles de bâtiment précontraintes par post-tension***

3.4.- Possibilité de négliger les effets de portique	44
5.2.3.- Justification des armatures d'effort tranchant	44
5.2.4.- Justification du béton	44
6.1.- Ferrailage minimal - armatures des zones tendues	44
6.2.- Règle particulière sur appuis ponctuels	44
7.- Utilisation de prédalles	44

Annexe 14

Règles relatives à l'emploi de bétons à hautes performances

Le fascicule approuvé par décret n° 92-72 du 16 Janvier 1992, transmis par la circulaire n° 92-57 du 30 Septembre 1992, sans la présente annexe, était prévu pour des bétons de résistance caractéristique comprise entre 40 et 60 MPa, les dispositions de la présente annexe bénéficient de l'expérience acquise depuis sur le comportement des BHP et sont de nature à offrir plus de fiabilité et de durabilité.

Les bétons à hautes performances (BHP) considérés dans cette annexe ont une résistance caractéristique en compression à 28 jours comprise entre 40 et 80 MPa. Par convention, on distingue par le vocable BHP avec fumée de silice les bétons dont le rapport pondéral fumée de silice/ciment est au moins égal à 5 %.

La résistance élevée des BHP s'accompagne d'une amélioration de la plupart de leurs propriétés d'usage, amélioration que prévoit d'ailleurs l'extrapolation des lois décrivant ces propriétés, lorsqu'elles sont indexées par la résistance du béton. La présente annexe s'applique aux BHP, dont elle prend en compte les caractères spécifiques :

- leur comportement à la rupture en compression diffère de celui des bétons classiques ;
- leur résistance en traction augmente moins vite que ce que laisse prévoir la loi affine reliant résistance en traction et en compression des bétons ordinaires ;
- leur résistance aux contraintes tangentes est modifiée par suite de la disparition progressive de l'effet d'engrènement ;
- leur retrait est moins dépendant de l'humidité et de la taille des pièces ;
- leur fluage est plus faible en valeur finale que celui des bétons ordinaires, particulièrement lorsqu'ils contiennent de la fumée de silice ;
- la formulation des BHP obéit à des règles précises, et leur contrôle de qualité exige une rigueur accrue ;
- enfin, les BHP exposés à l'incendie présentent un risque d'éclatement superficiel supérieur à celui des bétons de structure classiques. Cet aspect n'est pas traité dans le présent texte.

On donne ci-après la liste des articles appelant des modifications pour leur application aux BHP, avec les changements correspondants. Les alinéas ou formules non commentées dans cette annexe sont inchangés. Dans toutes les formules qui suivent, les contraintes, les résistances et les modules de déformation des matériaux sont exprimées en MPa, et les temps en jours.

Les règles d'application sont généralement exprimées en fonction de la résistance en compression f_{cj} . Elles ne s'appliquent qu'aux bétons dont la résistance en traction f_{jt} est au moins égale à la valeur calculable selon l'article 2.1.3.

Lorsque le marché le prévoit, les dispositions de la présente annexe se substituent aux dispositions homologues des chapitres 1 à 9 et des annexes 1, 4, 5, 6 et 9 du présent fascicule.

1.1.- Domaine d'application.

2.1.- Béton.

2.1.2.- Résistance à la compression.

La série des valeurs de résistance à la compression du béton, parmi lesquelles doit être de préférence choisie la valeur fixée par le marché, est complétée par les valeurs suivantes : 70, 80 MPa.

2.1.3.- Résistance à la traction.

2.1.4.- Déformations longitudinales instantanées.

2.1.43.

2.1, 51.- Retrait.

1.1.- Domaine d'application.

Les bétons de résistance caractéristique à 28 jours comprise entre 40 et 80 MPa sont couverts par la présente annexe. Cependant, pour les bétons dont la proportion volumique de granulats est inférieure à 66 %, les modèles de prédiction proposés pour le module élastique, le retrait et le fluage ne peuvent être appliqués sans vérification préalable de leur validité.

2.1.- Béton.

La présente annexe s'applique aux bétons à hautes performances.

2.1.2.- Résistance à la compression.

2.1.3.- Résistance à la traction.

Pour $f_{cj} \geq 60$ MPa, la résistance caractéristique à la traction s'exprime par $f_{tj} = 0,275 f_{cj}^{2/3}$

Pour $40 \leq f_{cj} < 60$ MPa, la loi usuelle s'applique :
 $f_{tj} = 0,6 + 0,06 f_{cj}$

2.1.4.- Déformations longitudinales instantanées.

2.1.43.

Dans les cas courants, lorsque l'évaluation précise des déformations n'est pas nécessaire, on peut adopter un diagramme parabole-rectangle, dont la partie horizontale s'étend entre les abscisses ε_{bc1} et ε_{bc2} , avec :

$$\varepsilon_{bc1} = 2 \cdot 10^{-3}$$
$$\varepsilon_{bc2} = (4,5 - 0,025 f_{cj}) \cdot 10^{-3}$$

Lorsque l'évaluation des déformations doit être faite avec précision, le calcul est mené selon les indications de l'annexe I ci-après.

2.1, 51.- Retrait.

Pour une évaluation forfaitaire du retrait final, les valeurs usuelles s'appliquent :

- $1,5 \times 10^{-4}$ dans les climats très humides,

Annexe 14

Règles relatives à l'emploi de bétons à hautes performances

- $2,0 \times 10^{-4}$ en climat humide, ce qui est le cas en France, sauf dans le quart Sud-Est,
- $3,0 \times 10^{-4}$ en climat tempéré sec, comme dans le quart sud-est de la France,
- $4,0 \times 10^{-4}$ en climat chaud et sec,
- $5,0 \times 10^{-4}$ en climat très sec ou désertique.

Dans les cas où

- la cinétique du phénomène intervient,
- le retrait au jeune âge a des effets mécaniques importants,
- ou lorsqu'une plus grande précision est demandée, le calcul est mené selon les indications de l'annexe 1 à la présente annexe 14.

2.1.52.- Fluage.

2.1.52.- Fluage.

Dans les cas où les déformations finales de fluage sont évaluées à l'aide d'un module de déformations à long terme incluant les déformations instantanées et différées le coefficient Φ prend les valeurs suivantes :

- si $40 \leq f_{c28} < 60$ MPa : $\Phi = 2$
- si $60 \leq f_{c28} < 80$ MPa et pour un BHP sans fumée de silice : $\Phi = 1,5$
- si $60 \leq f_{c28} < 80$ MPa et pour un BHP avec fumée de silice : $\Phi = 0,8$.

Pour des calculs plus précis, il faut se reporter à l'annexe 1 à la présente annexe 14.

3.3.21.- Perte de tension due au retrait du béton

3.3.21.- Perte de tension due au retrait du béton.

La perte finale de tension due au retrait du béton est égale à $\Delta\sigma_r = \Delta\varepsilon_{ret}(t_1, t') E_p$, où $\Delta\varepsilon_{ret}(t_1, t')$ est le retrait s'effectuant entre l'âge t_1 du béton à la mise en tension et la durée de vie escomptée de la structure t' , évalué selon l'annexe 1 à la présente annexe 14.

Pour une évaluation plus sommaire de la perte finale de tension due au retrait du béton, il est loisible, à titre de simplification, de prendre en compte les valeurs forfaitaires du retrait données en 2.1.51 de la présente annexe.

3.3.22.- Perte de tension due au fluage du béton

3.3.22.- Perte de tension due au fluage du béton.

Pour les BHP de résistance supérieure ou égale à 60 MPa, la perte finale due au fluage du béton est prise égale aux valeurs suivantes :

- bétons sans fumée de silice $\Delta\sigma_{fl} = \frac{3}{4}(\sigma_b + \sigma_M) \frac{E_p}{E_{ij}}$
- bétons avec fumée de silice $\Delta\sigma_{fl} = \frac{2}{5}(\sigma_b + \sigma_M) \frac{E_p}{E_{ij}}$

Annexe 14

Règles relatives à l'emploi de bétons à hautes performances

3.4,13.- Perte à la mise en précontrainte de l'élément.

5.2,13.- Intervention des aciers passifs.

5.2,2.- Sections fissurées.

6.1,11.- Précontrainte adhérente.

b) Calcul en section fissurée.

6.2,23.- Calcul des déformations des pièces justifiées en classe I ou en classe II.

La variation de courbure est donnée par l'équation suivante :

$$\Delta\chi = \frac{\Delta M}{I} \left\{ \frac{1}{E_{ij}} + \frac{\varepsilon_{flu}(t, t_0, t_j, f_{c28}, f_c(t_j), \sigma, r_m, \rho_h, \rho_s)}{\sigma} \right\}$$

où ε_{flu}/σ est défini au paragraphe 4.2,3 de l'annexe I à la présente annexe 14.

6.3,1.- Sollicitations de calcul.

6.3,311.- Distribution des déformations limites.

Si $\sigma_M \leq 1,5 \sigma_b$, ces valeurs deviennent respectivement

$$\Delta\sigma_{fl} = \frac{15}{8} \sigma_b \frac{E_p}{E_{ij}} \quad \text{et} \quad \Delta\sigma_{fl} = \sigma_b \frac{E_p}{E_{ij}}$$

3.4,13 Perte à la mise en précontrainte de l'élément.

Pour les bétons de résistance supérieure à 40 MPa, le coefficient k_p , dans l'expression de la perte à la mise en précontrainte de l'élément, prend la valeur $k_p = 0$.

5.2,13.- Intervention des aciers passifs.

Pour les BHP de résistance supérieure ou égale à 60 MPa, le coefficient d'équivalence prend la valeur $n_s = 9$.

5.2,2.- Sections fissurées.

Pour les BHP de résistance supérieure ou égale à 60 MPa, le coefficient d'équivalence prend la valeur $n_s = 9$.

6.1,11.- Précontrainte adhérente.

b) Calcul en section fissurée.

Pour les BHP de résistance supérieure ou égale à 60 MPa, le coefficient d'équivalence prend la valeur $n_s = 9$.

6.2,23.- Calcul des déformations des pièces justifiées en classe I ou en classe II.

6.3,1.- Sollicitations de calcul.

La courbure limite $\chi_{lm u}$ est évaluée à partir des valeurs de déformations indiquées en 6.3,311.

6.3,311.- Distribution des déformations limites.

La déformation correspondant au pivot B s'écrit :

$$\varepsilon_{bc2} = (4,5 - 0,025 f_{c,j}) \cdot 10^{-3}$$

La distance du pivot C à la fibre la plus comprimée devient

$$\left(1 - \frac{2 \cdot 10^{-3}}{\varepsilon_{bc2}} \right) h$$

Annexe 14

Règles relatives à l'emploi de bétons à hautes performances

6.3,312.- Diagramme contraintes-déformations du béton.

**** La valeur de 0,35 % est remplacée par ε_{bc2} .

6.3,312.- Diagramme contraintes-déformations du béton.

Le diagramme contrainte-déformation du béton pouvant être utilisé dans tous les cas est le diagramme parabole-rectangle schématisé ci-dessous, dont la partie horizontale s'étend entre les abscisses ε_{bc1} et ε_{bc2} , avec :

$$\varepsilon_{bc1} = 2 \cdot 10^{-3}$$

$$\varepsilon_{bc2} = (4,5 - 0,025 f_{cj}) \cdot 10^{-3}$$

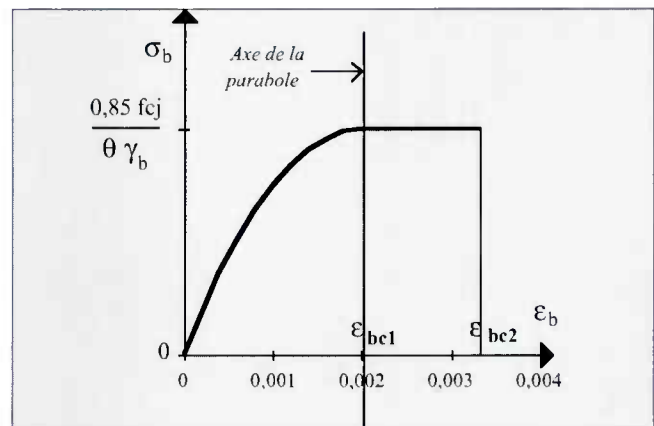


Fig. 4

La hauteur 0,8 y du diagramme rectangulaire simplifié est remplacée par λy , le coefficient λ étant fonction de la résistance selon la relation $\lambda = 1 - \frac{0,7}{4,5 - 0,025 f_{cj}}$

6.4,4.- Hypothèses de calcul dans le cas général.

* Le premier commentaire de l'article n'est plus applicable pour les BHP.

**** Le rapport d'affinité devient :

$$1 + \frac{E_{i28}}{\sigma} \sum \alpha_j \varepsilon_{flu}(t, t_0, t_j, f_{c28}, f_c(t_j), \sigma, r_m, \rho_h, \rho_s)$$

où :

- E_{i28} est le module élastique du béton à 28 jours ;
- α_j est le rapport du moment du premier ordre dû à l'action appliquée au temps t_j , au moment total du premier ordre ;

ε_{flu} la déformation de fluage donnée dans le paragraphe 4.2,3 de l'annexe I ci-après.

6.4,4.- Hypothèses de calcul dans le cas général.

L'alinéa " On adopte pour le béton comprimé... et de rapport $1 + \alpha \Phi$ " est remplacé par le suivant :

" On adopte pour le béton comprimé le deuxième type de diagramme contrainte-déformation défini en 2.1,43 de la présente annexe 14 et précisé dans l'annexe 1 à la présente annexe 14 (loi de Sargin). Cependant, pour les éléments d'élanement mécanique λ inférieur ou égal à 50, il est loisible d'utiliser le premier type de diagramme (parabole-rectangle). L'élanement est calculé avec la longueur fictive de flambement de l'article 6.4.5. Dans tous les cas, outre l'application des coefficients de sécurité à la résistance f_{cj} et au module E_{ij} (selon l'annexe 1 à la présente annexe 14) ou à la résistance seule (selon 6.3,312 modifié), est appliquée une affinité parallèle à l'axe des déformations, de rapport $(1 + \alpha \Phi)$ ".

Le coefficient Φ , rapport de la déformation finale de fluage à la déformation instantanée, s'écrit :

$$\Phi = \frac{E_i(t_1)}{\sigma} \cdot \varepsilon_{flu}(t, t_0, t_1, f_{c28}, f_c(t_1), \sigma, r_m, \rho_h, \rho_s)$$

Annexe 14

Règles relatives à l'emploi de bétons à hautes performances

7.3.2.- Justification des armatures transversales.

7.3.21.

7.3.22.

7.3.23.

7.3.24.

7.3.3.- Justification du béton.

La contrainte ultime limite des bielles n'est plus proportionnelle à f_{cj} pour les bétons de résistance supérieure à

40 MPa. Elle est voisine de $2,28 \frac{0,85}{\gamma_b} f_{cj}^{2,3}$ au lieu de $\frac{2}{3} \frac{0,85}{\gamma_b} f_{cj}$

Pour $\beta_u = 30^\circ$, la condition ci-dessus est voisine de

$$\tau_{\text{rédu}} \leq \frac{f_{cj}^{2,3}}{1,2 \gamma_b}$$

où

- t est l'âge du béton pour lequel on calcule la déformation finale ;
- $\sigma = 1$ est la contrainte unité ;
- $E_i(t_i)$ est le module élastique du béton à l'âge t_i de mise en charge ;
- ϵ_{flu} la déformation de fluage donnée dans le paragraphe 4.2 de l'annexe 1 à la présente annexe 14.

Dans les cas courants, on peut prendre, pour $t = \infty$:

- si $40 \leq f_{c28} < 60$ MPa : $\Phi = 2$
- si $60 \leq f_{c28} < 80$ MPa et pour un BHP sans fumée de silice : $\Phi = 1,5$
- si $60 \leq f_{c28} < 80$ MPa et pour un BHP avec fumée de silice : $\Phi = 0,8$.

7.3.2.- Justification des armatures transversales.

7.3.21.

Le terme $f_{ij}/3$, qu'il est loisible d'ajouter au terme τ_{lim} , dans le cas d'une section non entièrement tendue, est remplacé par $0,16 f_{cj}^{1,2}$

7.3.22.

Dans la première équation, le terme $f_{ij}/3$ est remplacé par $0,16 f_{cj}^{1,2}$

Dans la condition définissant le minimum exigé d'armatures d'âme, 0,4 MPa est remplacé par $0,13 f_{ij}$.

7.3.23.

Le terme $f_{ij}/3$ est remplacé par $0,16 f_{cj}^{1,2}$

7.3.24.

Le terme $f_{ij}/3$ est remplacé par $0,16 f_{cj}^{1,2}$

7.3.3.- Justification du béton.

On doit vérifier que $\tau_{\text{rédu}} \leq \frac{0,85}{\gamma_b} 1,14 f_{cj}^{2,3} \sin 2\beta_u$

Annexe 14

Règles relatives à l'emploi de bétons à hautes performances

7.6,53.- Justification du béton des bielles de compression.

7.6,53.- Justification du béton des bielles de compression.

La condition à respecter est la suivante :

$$\tau_{Vu}^2 + \tau_{Tu}^2 \leq \left(0,86 \frac{f_{cj}^{2/3}}{\gamma_b} \right)^2$$

8.6,2.- Détermination des armatures passives.

8.6,2.- Détermination des armatures passives.

b) Pourcentage minimal.

b) Pourcentage minimal.

La valeur 0,3 du pourcentage minimal d'armatures transversales est remplacé par $0,1 f_{tj}$.

8.7,2.- Détermination des armatures passives.

8.7,2.- Détermination des armatures passives.

b) Pourcentage minimal.

b) Pourcentage minimal.

La valeur du pourcentage minimal d'armatures transversales est remplacée par $0,1 f_{tj}$.

Dans le cas de pièces préfabriquées précontraintes par pré-tension munies de blochets d'extrémité, ce pourcentage minimal peut être réduit à $0,07 f_{tj}$ sur la longueur de ces derniers ; cette valeur réduite peut être également retenue pour les poutres à section rectangulaire.

9.6,41.- Justification des armatures d'effort tranchant.

9.6,41.- Justification des armatures d'effort tranchant.

La valeur limite de la contrainte tangente, pour laquelle aucune armature d'effort tranchant n'est requise dans une

dalle est : $0,57 \frac{f_{cj}^{1/2}}{\gamma_b}$

Pour les poutres-dalles, le volume relatif minimum d'armatures verticales est donné par la règle de l'article 7.3,22 modifié, avec une valeur minimale de

- $0,13 f_{tj}$ sur les largeurs égales à $0,5 h$ à partir des bords libres éventuels ;
- $0,03 f_{tj}$ sur le reste de la dalle.

Dans les autres cas, les armatures verticales d'effort tranchant dans les dalles sont dimensionnées conformément à la règle donnée pour les poutres en 7.3,22 modifié, en remplaçant le terme $0,16 f_{cj}^{1/2}$ par $0,24 f_{cj}^{1/2}$ dans le second membre.

Annexe 1 modifiée

Déformations du béton

Cette annexe se substitue à l'annexe 1 correspondante du BPEL 91, pour son application aux BHP.

1.- DOMAINE D'APPLICATION.

La présente annexe concerne l'estimation des déformations instantanées et différées par retrait et fluage des bétons à hautes performances de résistance caractéristique en compression comprise entre 40 et 80 MPa. Elle reflète l'état actuel des connaissances. Elle est modifiée ou complétée par l'annexe 6 pour les bétons traités thermiquement.

2.- DÉFORMATIONS INSTANTANÉES.

2.1.- Calculs à l'état limite de service.

Dans le cas des calculs à l'état limite de service, il est généralement suffisant d'adopter un modèle linéaire et élastique. Pour les bétons à hautes performances, le module sécant et le module tangent peuvent être considérés comme identiques, et la part de déformation non-recouvrable comme négligeable.

2.2.- Calculs à l'état limite ultime.

2.2,1.- Généralités.

Lorsqu'on impose au béton une déformation croissante, la contrainte qu'il supporte passe par un maximum correspondant à la résistance en compression du béton, puis décroît jusqu'à la rupture qui dépend du gradient de déformations, et de la présence d'armatures transversales. En effet, à partir du pic d'effort, le champ de déformation n'est plus homogène ; la surface du béton s'écaille du côté des déformations maximales, et la rupture survient par localisation des déformations dans des surfaces de glissement. Au stade ultime, la capacité portante de la structure ne dépend plus de la résistance initiale du béton. Il s'ensuit que le comportement d'ensemble est d'autant plus fragile que la résistance du béton est élevée (fig. 1).

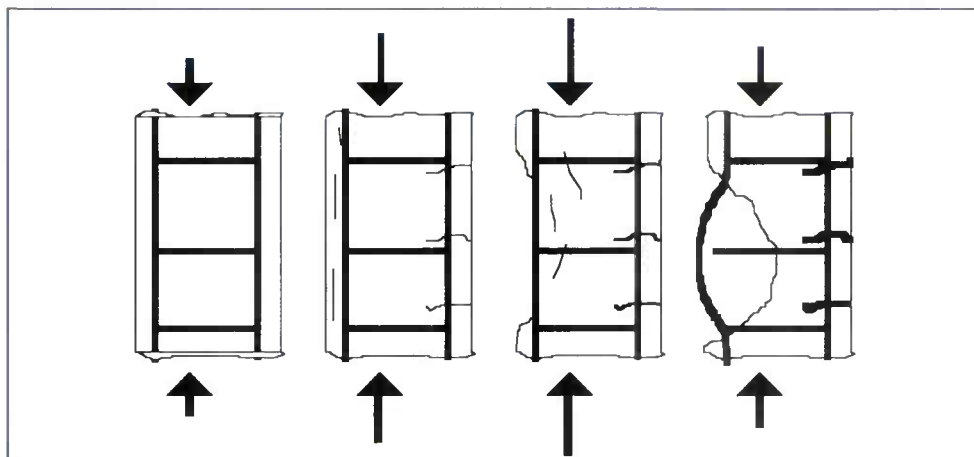


Fig. 1

Déformations du béton

Ce comportement sous déformation monotone croissante correspond à l'enveloppe de la relation déformation-contrainte, lorsque le matériau est soumis à des cycles de déformation imposée en compression répétée.

2.2.2.- Modèles de calcul.

Par commodité, on considère que le comportement du matériau peut être décrit par une relation contrainte-déformation, même après le pic d'effort. Dans les cas courants, lorsque l'évaluation précise des déformations n'est pas nécessaire, on adopte un diagramme parabole-rectangle, dont la partie horizontale s'étend entre les abscisses ε_{bc1} et ε_{bc2} , avec :

$$\varepsilon_{bc1} = 2 \cdot 10^{-3}$$

$$\varepsilon_{bc2} = (4,5 - 0,025 f_{cj}) \cdot 10^{-3}$$

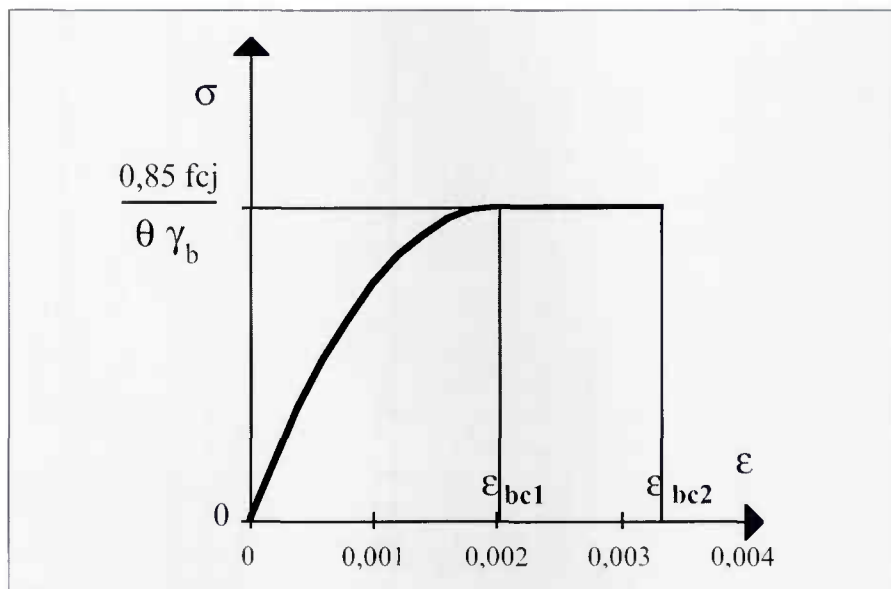


Fig. 2

Lorsqu'il est nécessaire d'évaluer les déformations avec une plus grande précision, et notamment dans les calculs de stabilité de forme, le modèle parabole-rectangle n'est généralement pas suffisant. Pour représenter la branche ascendante de la courbe, la loi adoptée doit tenir compte des caractéristiques suivantes :

- la résistance à la compression du béton f_{cj} , frappée du coefficient de sécurité usuel $\frac{0,85}{\theta \gamma_b}$
- le module tangent à l'origine, qui peut être évalué au moyen de la formule $E_{ij0} = 11000 f_{cj}^{1/3}$ frappée du coefficient de sécurité $1/\gamma_b$,
- et la déformation au pic de contrainte, qui peut être évaluée au moyen de la formule $\varepsilon_{b0} = 0,62 \cdot 10^{-3} f_{cj}^{1/3}$

On peut alors utiliser la formule de Sargin :
$$\sigma_b = f_{bu} \frac{k \left(\frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_{b0}} \right) + (k'-1) \left(\frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_{b0}} \right)^2}{1 + (k-2) \left(\frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_{b0}} \right) + k' \left(\frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_{b0}} \right)^2}$$

où : $f_{bu} = \frac{0,85}{\theta \gamma_b} f_{cj}$ $k = \frac{\theta}{0,85} \frac{E_{ij} \varepsilon_{b0}}{f_{cj}}$ $k' = -\frac{k}{1,65} + \frac{f_{cj} - 30}{f_{cj} - 36}$

Les coefficients θ et γ_b sont définis à l'article 6.3.312 modifié. La loi de Sargin est représentée en figure 3.

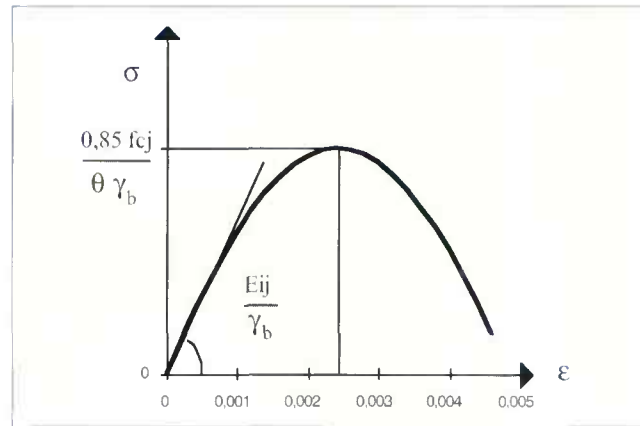


Fig. 3

3.- RETRAIT.

3.1.- Définitions.

À partir de la prise du béton, le retrait est le raccourcissement spontané du matériau non chargé. Il se décompose en deux parties :

- le retrait endogène, ou d'autodessiccation, provoqué par le durcissement du béton ;
- le retrait de dessiccation, lié à des échanges hydriques entre le matériau et le milieu extérieur. Notons que le retrait de dessiccation peut être négatif (dans ce cas, c'est un gonflement).

Le retrait total est la somme algébrique des deux types de retraits.

Dans le cas des pièces massives, un retrait thermique non négligeable peut se superposer aux retraits endogène et de dessiccation. Il se produit dans un temps qui dépend de l'épaisseur de la pièce, et peut être évalué, si besoin est, au moyen d'une simulation numérique aux éléments finis.

3.2.- Retrait endogène.

La cinétique de retrait endogène dépend de la vitesse de la réaction d'hydratation. On la quantifie, dans un premier temps, en prenant en compte la vitesse de durcissement du matériau, ce qui permet de tenir compte des spécificités de chaque béton. Le rapport $f_c(t)/f_{c28}$, *maturité* du béton jeune, est pris alors comme variable de contrôle avant 28 jours. Ainsi, pour les pièces massives, dont le durcissement est plus rapide, une part plus importante du retrait endogène s'effectuera au jeune âge. L'évolution du retrait endogène au-delà de 28 jours est décrite en fonction du temps.

On adopte les formules suivantes :

- Pour $t < 28$ jours :

- si $f_c(t)/f_{c28} < 0,1$, alors $\varepsilon_{re}(t, f_{c28}) = 0$
- si $f_c(t)/f_{c28} \geq 0,1$, alors $\varepsilon_{re}(t, f_{c28}) = (f_{c28} - 20) \left(2,2 \frac{f_c(t)}{f_{c28}} - 0,2 \right) \cdot 10^{-6}$

où ε_{re} est le retrait endogène effectué entre la prise du béton et l'instant t (exprimé en jours), et $f_c(t)$ la résistance caractéristique au même instant. Dans le cas où cette résistance n'est pas connue, on peut l'évaluer en utilisant la loi de durcissement fournie dans le commentaire de l'article 2.1,2 du texte. Pour une description plus fine de la cinétique de retrait endogène avant 28 jours, on pourra adopter une loi hyperbolique de durcissement calibrée sur les données expérimentales de résistance disponibles.

Déformations du béton

- Pour $t \geq 28$ jours, $\varepsilon_{re}(t, f_{c28}) = (f_{c28} - 20) \left[2,8 - 1,1 e^{-t/96} \right] 10^{-6}$

On notera que, dans les cas où la résistance à 28 jours du béton serait notablement supérieure à la résistance caractéristique requise, la prise en compte de cette dernière donnée conduirait à une sous-estimation du retrait endogène.

3.3.- Retrait de dessiccation (ou de séchage).

Le béton à hautes performances étant sujet à l'auto-dessiccation, son hygrométrie interne, en l'absence d'échange d'eau avec le milieu extérieur, diminue dans le temps et se stabilise en quelques semaines à une valeur d'autant plus basse que sa résistance à 28 jours est élevée. Le retrait de dessiccation, dont la cinétique est généralement plus lente, dépend ainsi de la différence entre l'hygrométrie interne et l'humidité du milieu environnant ρ_h . Le séchage étant un phénomène *diffusif*, l'avancement du processus varie avec la quantité $(t - t_0) / r_m^2$, où t est l'âge du béton à l'instant considéré, t_0 l'âge à partir duquel la dessiccation commence, et r_m le rayon moyen de la pièce (défini en 2.1,5 et exprimé en cm). Enfin, l'expérience montre que le retrait de dessiccation est plus rapide pour les bétons avec fumée de silice.

Les formules permettant d'évaluer le retrait de dessiccation sont les suivantes.

- bétons sans fumées de silice : $\varepsilon_{rd}(t, t_0, f_{c28}, r_m, \rho_h) = \frac{K(f_{c28}) \left[72 e^{-0,046 f_{c28}} + 75 - \rho_h \right]}{1 + 8,4 \frac{r_m^2}{(t - t_0)}} \cdot 10^{-6}$
- bétons avec fumées de silice : $\varepsilon_{rd}(t, t_0, f_{c28}, r_m, \rho_h) = \frac{K(f_{c28}) \left[72 e^{-0,046 f_{c28}} + 75 - \rho_h \right]}{1 + 2,8 \frac{r_m^2}{(t - t_0)}} \cdot 10^{-6}$

avec : $K(f_{c28}) = 18$ si $40 \leq f_{c28} \leq 57$ MPa
 $K(f_{c28}) = 30 - 0,21 f_{c28}$ si $f_{c28} \geq 57$ MPa

En l'absence de données plus précises, on peut prendre pour les ouvrages à l'air libre :

- $\rho_h = 55$ dans le quart sud-est de la France
- $\rho_h = 70$ dans le reste du territoire métropolitain.

Dans les cas où l'humidité extérieure est supérieure à l'humidité interne à l'équilibre (représentée par le terme $72 e^{-0,046 f_{c28}} + 75$), le retrait de dessiccation devient un gonflement.

3.4.- Retrait total d'un élément de structure.

Dans les cas courants, on prend en compte la réduction du retrait, due à la présence d'armatures adhérentes (armatures passives ou armatures de précontrainte par prétension), par le taux d'armatures dans la direction considérée ρ_s . Le retrait total qui s'effectue entre la prise du béton et une date donnée devient :

$$\varepsilon_{rel} = \frac{\varepsilon_{re} + \varepsilon_{rd}}{1 + n\rho_s}$$

où $n = 15$ lorsque $40 \leq f_{c28} < 60$ MPa

et $n = 9$ lorsque $60 \leq f_{c28} \leq 80$ MPa.

Cependant, dans les sections dont le ferrailage est très dissymétrique, il peut être nécessaire de calculer le retrait par zones, en tenant compte de la position des armatures.

Déformations du béton

Le retrait s'effectuant entre deux dates t et t' est égal à la différence des retraits totaux calculés à chaque date :

$$\Delta \varepsilon_{\text{ret}}(t, t') = \varepsilon_{\text{ret}}(t') - \varepsilon_{\text{ret}}(t)$$

4.- FLUAGE.

4.1.- Généralités.

Le terme général de fluage désigne les déformations différées du béton sous l'effet des contraintes qui lui sont appliquées, le retrait étant, par convention, déduit des déformations différées totales.

En 4.2, on présente un modèle qui résume les résultats d'essais de fluage disponibles (déformations d'une éprouvette placée dans des conditions de température et d'hygrométrie stationnaires, et soumise à un chargement *constant*). Le paragraphe 4.3 détaille la mise en œuvre de la méthode de superposition, pour évaluer le fluage du béton dans une structure. La méthode incrémentale figure au paragraphe 4.4, et constitue une autre façon de traiter le même problème.

4.2.- Fluage sous contrainte constante.

Si on applique sur un béton non encore chargé, à l'âge t_1 , une contrainte σ que l'on maintient ensuite constante, on peut admettre que la déformation de fluage, à un instant donné, est proportionnelle à la contrainte σ , tant que cette contrainte reste inférieure à environ $0,6 f_{c1}$. Par ailleurs, le fluage peut se décomposer en deux parties :

- le fluage propre, qui apparaît lorsque le béton n'échange pas d'humidité avec le milieu environnant ; ce phénomène est en principe indépendant de la taille des pièces ;
- le fluage de dessiccation, supplément de fluage lié au séchage du béton pendant le chargement, qui dépend des dimensions de la structure.

4.2.1.- Fluage propre.

Il apparaît que l'amplitude finale du fluage propre dépend de la contrainte appliquée σ , du module élastique à 28 jours du béton E_{i28} et, pour les bétons avec fumée de silice, de la résistance du béton au moment du chargement $f_c(t_1)$. La cinétique est d'autant plus rapide que le béton est chargé jeune, et qu'il contient de la fumée de silice. La cinétique est fonction de la maturité du matériau au moment du chargement, exprimée par le rapport $f_c(t_1)/f_{c28}$. La déformation de fluage propre apparaissant dans l'intervalle de temps (t_1, t) , t_1 étant l'âge de chargement, sous une contrainte σ , peut être calculée par les expressions suivantes.

- bétons sans fumée de silice : $\varepsilon_{fp}(t, t_1, f_{c28}, E_{i28}, \sigma) = 1,4 \frac{\sigma}{E_{i28}} \frac{\sqrt{t-t_1}}{\left[\sqrt{t-t_1} + 0,40 e^{3,1 f_c(t_1)/f_{c28}} \right]}$
- bétons avec fumée de silice : $\varepsilon_{fp}(t, t_1, f_{c28}, E_{i28}, \sigma) = \frac{3,6}{f_c(t_1)^{0,37}} \frac{\sigma}{E_{i28}} \frac{\sqrt{t-t_1}}{\left[\sqrt{t-t_1} + 0,37 e^{2,8 f_c(t_1)/f_{c28}} \right]}$

4.2.2.- Fluage de dessiccation.

Le fluage de dessiccation est abordé par référence au retrait de dessiccation qui se produit pendant le chargement. On constate que les BHP avec fumée de silice ont un fluage de dessiccation très faible, voire négligeable. Les expressions sont les suivantes :

- bétons sans fumée de silice : $\varepsilon_{fd}(t, t_0, t_1, f_{c28}, \rho_h, r_m, \sigma) = 3,2 \left[\varepsilon_{rd}(t, \dots) - \varepsilon_{rd}(t_1, \dots) \right] \cdot 10^3 \frac{\sigma}{E_{i28}}$
- bétons avec fumée de silice : $\varepsilon_{fd}(t, t_0, t_1, f_{c28}, \rho_h, r_m, \sigma) = \left[\varepsilon_{rd}(t, \dots) - \varepsilon_{rd}(t_1, \dots) \right] \cdot 10^3 \frac{\sigma}{E_{i28}}$

Déformations du béton

4.2.3.- Fluage total d'un élément de structure.

Comme pour le retrait, le fluage total s'obtient par addition des deux déformations élémentaires, en tenant compte de la gêne apportée par les armatures :

$$\varepsilon_{flu}(t, t_0, t_1, f_{c28}, f_c(t_1), \sigma, r_m, \rho_h, \rho_s) = \frac{\varepsilon_{fp} + \varepsilon_{fd}}{1 + n \rho_s}$$

où $n = 15$ lorsque $40 \leq f_{c28} < 60$ MPa

et $n = 9$ lorsque $60 \leq f_{c28} \leq 80$ MPa.

Cependant, dans les sections où la densité de ferrailage dans les zones extrêmes est très différente, il peut être nécessaire de calculer le fluage zone par zone, en tenant compte de la position des armatures.

4.3.- Méthode de superposition.

La méthode de superposition, qui repose sur la visco-élasticité linéaire, consiste à admettre l'additivité des déformations de fluage par rapport aux contraintes appliquées. Lorsque les contraintes sont croissantes dans le temps, l'expérience montre que les prévisions de cette méthode sont bien vérifiées. Par contre, en cas de diminution de contrainte, le retour de fluage prédit est très supérieur à celui qui est mesuré. Si la diminution de contrainte est faible en valeur absolue ou relative, ou si elle est suivie d'un rechargement significatif, on peut négliger ce phénomène, et utiliser la méthode décrite en 4.3.1. Par contre, en cas de déchargement important et définitif, on doit prendre en compte une modélisation spécifique du retour de fluage, et appliquer les paragraphes 4.3.2 et 4.3.3. Par ailleurs, l'application stricte de la méthode de superposition n'est possible que si l'on suppose l'hygrométrie extérieure constante pendant la durée de chargement du béton.

4.3.1.- Succession d'accroissements de contrainte.

Dans le cas d'une succession d'accroissements de contraintes, on peut admettre de superposer l'effet de chaque variation de contrainte. La déformation de fluage au temps t est donc donnée par $\varepsilon_{fl}(t) = \sum_{j=1}^n \varepsilon_{flu}(t, t_0, t_j, f_{c28}, f_c(t_j), \Delta\sigma_j, r_m, \rho_h, \rho_s)$ où les variations de contrainte $\Delta\sigma_j$ sont appliquées aux temps t_j .

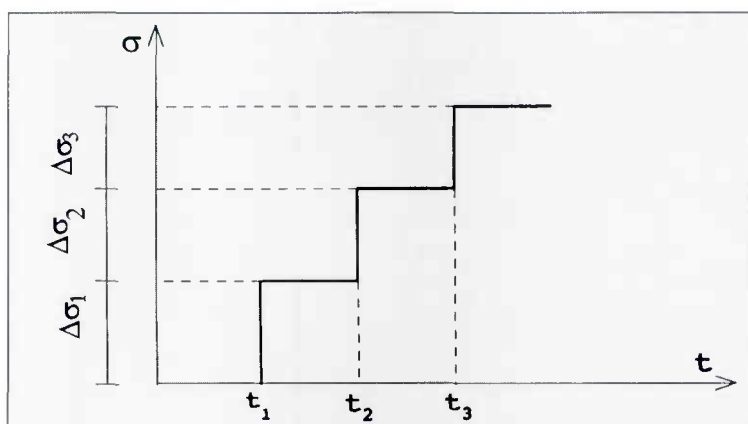


Fig. 4

4.3.2.- Diminution de contrainte - retour de fluage.

On considère le cas où l'on applique d'abord une contrainte σ_1 à l'âge t_1 , puis une décharge partielle, $\Delta\sigma_2$ à l'âge t_2 . Les variations de contrainte étant comptées positivement dans le sens d'un accroissement de contrainte, $\Delta\sigma_2$ est négatif. La contrainte résiduelle est donnée par $\sigma_2 = \sigma_1 + \Delta\sigma_2$

Dans l'intervalle de temps compris entre t_1 et t_2 , la déformation de fluage est donnée par la formule du paragraphe 4.2.3.

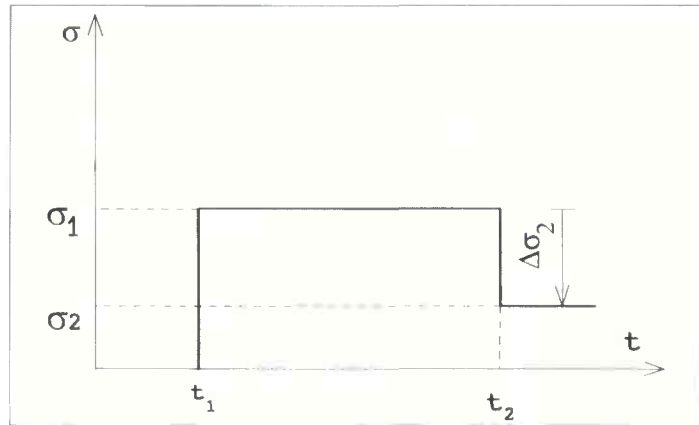


Fig. 5

A un temps t supérieur à t_2 , on peut considérer que la déformation de fluage est la somme de trois termes :

- la déformation de fluage au temps t due à la contrainte résiduelle σ_2 évaluée au moyen de la formule de l'article 4.2,3 :

$$\epsilon_{fl1}(t) = \epsilon_{flu}(t, t_0, t_1, f_{c28}, f_c(t_1), \sigma_2, r_m, \rho_h, \rho_s)$$
- la déformation de fluage au temps t_2 due à l'effet d'une contrainte $(\sigma_1 - \sigma_2)$ appliquée pendant l'intervalle de temps (t_1, t_2) , calculable à l'aide des formules de l'article 4.2,3 :

$$\epsilon_{fl2} = \epsilon_{flu}(t_2, t_0, t_1, f_{c28}, f_c(t_1), \sigma_1 - \sigma_2, r_m, \rho_h, \rho_s)$$
- et la déformation dite de *retour de fluage*, due à l'application de la contrainte $(\Delta\sigma_2 \leq 0)$ à l'instant t_2 qui se produit dans l'intervalle de temps (t_2, t) et qui est négative.

Cette déformation de retour de fluage peut être évaluée au moyen de l'expression :

$$\epsilon_{r1}(t) = \frac{\epsilon_{flu}(t_2 + t_2 - t_1, t_0, t_2, f_{c28}, f_c(t_2), \Delta\sigma_2, r_m, \rho_h, \rho_s)}{k_r(t_2 - t_1)} g(t - t_2)$$

où k_r est une fonction de la durée $t_2 - t_1$ d'application de la contrainte σ_1 , et $g(t - t_2)$ est la loi d'évolution du retour de fluage, qui varie de 0 à 1 lorsque la durée du déchargement $(t - t_2)$ varie de 0 à l'infini.

La fonction de la durée du chargement, $k_r(t)$, peut être évaluée au moyen de l'expression :

- $k_r(t_2 - t_1) = 4 \sqrt{\log(t_2 - t_1)}$ si $t_2 - t_1 \geq 2$ jours
- $k_r(t_2 - t_1) = 1 + 0,6(t_2 - t_1)$ si $t_2 - t_1 < 2$ jours

où la durée d'application du chargement est comptée en jours.

La loi d'évolution du retour de fluage $g(t-t_2)$ peut être évaluée au moyen de l'expression : $g(t-t_2) = 1 - \frac{1}{\sqrt{1+(t-t_2)}}$

4.3.3.- Rechargement.

Au cas où un rechargement significatif succéderait à une décharge, le paragraphe 4.3.2 ne s'applique pas. On doit alors procéder par superposition stricte, comme indiqué en 4.3.1, en ajoutant algébriquement l'effet de chaque incrément de contrainte. Le calcul conduira dans ce cas à sous-estimer le fluage, ou à surestimer la recouvrance consécutive aux déchargements. Si une meilleure précision est recherchée en phase transitoire, i.e. avant stabilisation des déformations, on aura intérêt à utiliser la méthode incrémentale, décrite ci-après.

4.4.- Méthode incrémentale.

La méthode incrémentale de calcul du fluage du béton est fondée sur une relation donnant la vitesse de déformation de fluage en fonction :

- de la valeur de cette déformation déjà apparue ;
- de la contrainte appliquée ;
- et des autres paramètres décrivant l'état du béton, tels que l'hygrométrie ou la résistance en compression.

Cette relation constitue, lorsque la contrainte et l'hygrométrie sont constantes, une équation différentielle du premier ordre, dont la solution est une famille de courbes. Contrairement à la méthode de superposition, la méthode incrémentale permet de prendre en compte des variations d'hygrométrie en cours de chargement.

4.4.1.- Principe général de mise en œuvre.

La description de la mise en œuvre est faite ici pour les cas où les variations de contrainte et d'hygrométrie sont instantanées (comme en 4.3). On fait l'hypothèse de *continuité* des déformations de fluage, et on se donne une famille de fonctions $\phi(t, r_m, \rho_h, \rho_s, C)$, paramétrée par C , décrivant toutes les évolutions de $\varepsilon_{fl}(t)/\sigma$ lorsque la contrainte σ est constante.

On considère ainsi le cas d'une contrainte σ_1 et d'une hygrométrie ρ_{h1} constantes entre les instants t_1 et t_2 , appliquées à un béton dont la déformation de fluage à l'instant t_1 vaut ε_{fl1} . Pour calculer l'évolution de $\varepsilon_{fl}(t)$ entre les instants t_1 et t_2 , on effectue les deux étapes suivantes :

1. on résout l'équation suivante, d'inconnue C_1 : $\varepsilon_{fl1} = \sigma_1 \cdot \phi(t_1, r_m, \rho_{h1}, \rho_s, C_1)$. Cette équation non-linéaire peut être résolue, par exemple, au moyen d'une méthode de dichotomie ;
2. on écrit alors $\varepsilon_{fl}(t) = \sigma_1 \cdot \phi(t, r_m, \rho_{h1}, \rho_s, C_1)$ pour tous les instants t compris entre t_1 et t_2 .

La déformation de fluage est initialisée à 0 avant l'application de tout chargement.

4.4.2.- Donnée de la fonction $\phi(t, r_m, \rho_h, \rho_s, C)$

Une partie de ces courbes est donnée par les fonctions : $\varepsilon_{flu}(t, t_0, C, f_{c28}, f_c(C), l, r_m, \rho_h, \rho_s)$

Ici, le paramètre C correspond à l'âge du béton au moment du chargement (antérieur au temps t considéré). On prendra pour valeur minimale de C la valeur C^* telle que $f_c(C^*) = 10$ MPa.

Les courbes $\varepsilon_{flu}(t, t_0, C, f_{c28}, f_c(C), l, r_m, \rho_h, \rho_s)$ ont alors une limite supérieure égale à $\varepsilon_{flu}(t, t_0, C^*, f_{c28}, 10, l, r_m, \rho_h, \rho_s)$

Dans le domaine non couvert par les courbes $\varepsilon_{flu}(t, t_0, C, f_{c28}, f_c(C), l, r_m, \rho_h, \rho_s)$, les courbes $\phi(t, r_m, \rho_h, \rho_s, C)$ seront prises sous la forme :

$$\left[1 - C + \frac{2}{3} C g(t) \right] \varepsilon_{flu}(t, t_0, C^*, f_{c28}, 10, l, r_m, \rho_h, \rho_s)$$

où la fonction $g(t)$ a été définie en 4.3.2. La grandeur C , qui n'est plus un temps, mais un simple paramètre sans signification physique particulière, est alors négative.

4.4.3.- Cas d'un déchargement total.

Si la contrainte appliquée diminue à l'instant t_1 pour atteindre la valeur σ_1 , supposée petite devant la valeur précédente, l'équation à résoudre pour prédire la déformation de fluage est la suivante :

$$\left[\sigma_1 - \sigma_1 C + \frac{2}{3} \sigma_1 C g(t_1) \right] \varepsilon_{flu}(t_1, t_0, C^*, f_{c28}, 10, l, r_m, \rho_h, \rho_s) = \varepsilon_{fl1}$$

Déformations du béton

Le cas du déchargement total ($\sigma_1 = 0$) est simplement traité en considérant le produit $\sigma_1 C \equiv u_1$ comme nouveau paramètre. On a donc :

$$u_1 = - \frac{\varepsilon_{fl_1}}{\left[1 - \frac{2}{3}g(t_1)\right] \cdot \varepsilon_{flu}(t_1, t_0, C^*, f_{c28}, l_0, l, r_m, \rho_h, \rho_s)}$$

$$\text{et : } \varepsilon_{fl}(t) = -u_1 \left[1 - \frac{2}{3}g(t)\right] \varepsilon_{flu}(t, t_0, C^*, f_{c28}, l_0, l, r_m, \rho_h, \rho_s)$$

pour $t_1 \leq t \leq t_2$.

Modifications relatives à l'annexe 4

Zones d'application des forces concentrées

PREMIÈRE PARTIE - ZONE D'INTRODUCTION DE LA PRÉCONTRAİNTE

1.3.2.- Justification vis-à-vis de l'équilibre général de diffusion pure - armatures d'équilibre général.

L'effort tangent est plafonné à la valeur $V_{xc} = V_x \left[1 - \left(\frac{0,16 f_{cj}^{1/2}}{\tau_d} \right)^2 \right]$

DEUXIÈME PARTIE - ZONE D'APPUI SIMPLE D'ABOUT

2.1.- Bielle d'about - conditions générales d'équilibre.

La quantité $\frac{W}{b_n z}$ doit être inférieure à $0,16 f_{cj}^{1/2}$

3.1.- Équilibre du coin - principe.

L'angle de frottement interne φ peut être pris égal à $\text{Arctg}(0,2 f_{cj}^{1/3})$

Modifications relatives à l'annexe 5

Ouvrages en béton de granulats légers

Bien qu'il soit possible de réaliser des bétons de granulats légers dont la résistance caractéristique atteigne 60 MPa, les connaissances sur ces matériaux sont trop fragmentaires pour pouvoir leur appliquer cette annexe. L'annexe 5 ne s'applique donc qu'aux bétons dont la résistance caractéristique ne dépasse pas 40 MPa.

Modifications relatives à l'annexe 6

Les traitements thermiques des bétons

3.1.- Résistance à la compression à 28 jours.

* Pour les BHP, on peut considérer que cette perte est linéairement liée, dans la gamme de température d'élevage comprise entre 40 et 80°C, à la température maximale d'élevage atteinte θ_{max} selon la formule :

$$f_{c28}(\theta_{max}) = f_{c28} (1 - 0,035 \frac{\theta_{max}}{20})$$

3.3.- Résistance à la traction.

Pour $f_{cj} \geq 60$ MPa, la résistance caractéristique à la traction s'exprime par $f_{tj} = 0,275 f_{cj}^{2/3}$

Pour $40 \leq f_{cj}$ MPa, la loi usuelle s'applique : $f_{tj} = 0,6 + 0,06 f_{cj}$

3.5.- Déformations différées du béton.

Le retrait se développant entre les dates t' et t'' est égal à : $\Delta \varepsilon_{ret}(t', t'') = \varepsilon_{ret}(t'')$ avec les notations de l'article 3.4 de l'annexe 1 relative aux BHP.

Pour un chargement à l'âge t_1 , le fluage effectué à l'âge t est le suivant $\varepsilon_{fl}(t) = \varepsilon_{flu}(t, t_0, t_1, f_{c28}, f_c(t_1), \sigma, r_m, \rho_h, \rho_s)$

avec les notations de l'article 4.2,3 de l'annexe 1 relative aux BHP. L'attention est attirée sur le fait que la résistance aux temps t' ou t_1 doit s'évaluer en tenant compte de l'histoire thermique du matériau dans la structure considérée.

Modifications relatives à l'annexe 9

Dalles de bâtiment précontraintes par post-tension

3.4.- Possibilité de négliger les effets de portique.

Il est loisible de négliger les effets des raccourcissements élastiques et différés dus à la précontrainte si la contrainte moyenne de compression du béton ne dépasse pas la valeur $0,47 f_{cj}^{1/2}$

5.2.3.- Justification des armatures d'effort tranchant.

La valeur limite de $\tau_{red.u}$, pour laquelle aucune armature d'effort tranchant n'est requise, est égale à $\frac{1}{\gamma_b} 0,57 f_{cj}^{1/2}$

Par ailleurs, dans l'équation dimensionnant la section d'armatures $\bar{\omega}_t$, le terme $f_{ty}/2$ est remplacé par $0,24 f_{cj}^{1/2}$

5.2.4.- Justification du béton.

La contrainte $\tau_{red.u}$ doit satisfaire à l'inégalité : $\tau_{red.u} \leq \rho \frac{0,97 f_{cj}^{2/3}}{\gamma_b} \sin 2\beta_u$

6.1.- Ferrailage minimal - armatures des zones tendues.

Dans les zones tendues, et dans les deux directions, le pourcentage d'armatures passives ne doit pas être inférieur à $0,1 f_{ty}$.

6.2.- Règle particulière sur appuis ponctuels.

La section minimale de ferrailage à placer dans cette zone, et dans les deux directions, s'écrit $0,0067 f_{ty} h$

7.- Utilisation de prédalles.

On peut déroger à l'obligation de couture des prédalles à la dalle coulée en place si les contraintes de cisaillement calculées sous sollicitation d'état limite ultime restent inférieures au seuil de $0,055 f_{cj}^{1/2}$

Édition des publications du CTOA : Jacqueline THIRION : 01 46 11 34 82
Cahier de couverture et mise en page : Concept Graphic 45 : 02 38 96 85 63
Impression : Imprimerie de Montligeon : 18613

Ce document est propriété de l'Administration,
il ne pourra être utilisé ou reproduit, même partiellement,
sans l'autorisation du SETRA.

Dépot légal 1997
ISBN 2 - 11085818 4

© 1997 SETRA



Ce document est disponible sous la référence F 9746
au bureau de vente des publications du SETRA
46, avenue Aristide Briand - BP 100 - 92223 Bagneux Cedex - FRANCE
Tél. : (1) 46 11 31 53 - Télécopieur : (1) 46 11 31 69 - Télex : 260763 F

Prix de vente : 50 F