

Conception des réparations structurales et des renforcements des ouvrages d'art

Annexe A-4
Evolution des caractéristiques du matériau béton





Rédaction

Daniel POINEAU

Ex-Sétra

Jean-Michel LACOMBE

Cerema Infrastructures de transport et matériaux

Éric LOZINGUEZ

Cerema Infrastructures de transport et matériaux

Relecteurs

Laurent LABOURIE

Cerema Nord Picardie

Jean-Christophe CARLES

Cerema Méditerranée



Préambule

Ce document constitue une annexe électronique au guide Cerema de 2015

« Conception des réparations structurales et des renforcements des ouvrages d'art ».



Sommaire

Préambule	3
Sommaire	4
Introduction.....	6
1 - Historique des bétons pour bétons armés et bétons précontraints	8
1.1 - <i>Évolution des caractéristiques mécaniques des bétons</i>	9
1.2 - <i>Évolution des méthodes de contrôle des bétons</i>	9
2 - Caractéristiques des bétons à prendre dans un recalcul	10
2.1 - <i>Résistance des bétons</i>	10
2.2 - <i>Masse volumique des bétons</i>	12



Page laissée blanche intentionnellement





Introduction

L'évaluation structurale d'un ouvrage nécessite de connaître les caractéristiques mécaniques des différents matériaux utilisés pour sa construction. Les développements et les références ci-après fournissent des informations sur les évolutions des propriétés mécaniques et des modalités de caractérisation et de contrôle du matériau béton et ce depuis le milieu du 19^{ème} siècle.



Page laissée blanche intentionnellement



1 - Historique des bétons pour bétons armés et bétons précontraints

La fabrication industrielle des ciments commence au milieu du 19^{ème} siècle en même temps que les premières structures en béton armé (barque de Lambot en 1848, caisses à fleurs de Monnier, passerelle du château de Chazelet dans l'Indre par Monnier en 1875, etc.). Il faut attendre la fin du 19^{ème} siècle pour voir apparaître les premiers ponts en béton armé (Pont de la rue Vallette à Perpignan, pont de Châtellerault, etc.).



Pont de Châtellerault 1898

Les ponts en béton armé les plus anciens sont maintenant centenaires.

Les premiers ponts en béton précontraint ne seront construits que quelques années avant le début de la seconde guerre mondiale (pont sur l'Oued Fodda en Algérie et pont d'Oelle en Wesphalie, etc.).



Pont de Luzancy terminé en 1947

Les conditions de formulation, de fabrication et de mise en œuvre des bétons ont considérablement évoluées au cours du siècle dernier. Les bétons anciens ne peuvent donc être comparés aux bétons actuels, or il est nécessaire lors d'un recalcul d'estimer au plus juste les caractéristiques mécaniques et les propriétés du béton afin de pouvoir calculer avec le minimum d'incertitudes la force portante de la structure. Le problème se complique d'autant que le béton est un matériau qui vieillit au cours du temps.

1.1 - Évolution des caractéristiques mécaniques des bétons

Le tableau ci-après donne les caractéristiques mécaniques des bétons courants (bétons pour bétons armés) prises en compte dans les notes de calculs des années 1900 aux années 1960. Cela ne veut pas dire que les caractéristiques des bétons d'un ouvrage donné sont conformes à ces valeurs.

Les bétons des ponts exceptionnels pouvaient présenter des résistances plus élevées (près de 500 kg/cm² à 90 jours pour les bétons des arcs du pont Albert Louppe à Brest).

Périodes	Valeur de la résistance	Type d'essai	Notations	Dosage en ciment exprimé en kg/m ³		
				300	350	400
1906	Moyenne	Cubes 20x20	R ₉₀ ou N ₉₀	160 kg/cm ²	180 kg/cm ²	200 kg/cm ²
			R ₂₈	107 kg/cm ²	120 kg/cm ²	133 kg/cm ²
1920	Moyenne	Cubes 20x20	R ₉₀ ou N ₉₀	160 kg/cm ²	180 kg/cm ²	200 kg/cm ²
1934	Moyenne	Cubes 20x20	R ₉₀	215 kg/cm ²	235 kg/cm ²	250 kg/cm ²
1945	Moyenne sur 6 éprouvettes	Prismes à base carrée bxb et de 4b de longueur ou cubes de 10 à 20 cm en fonction grosseur du granulats	n ₉₀	230 kg/cm ²	255 kg/cm ²	285 kg/cm ²
1960	Nominale	Cylindres 16x32 plus de 12 essais	σ' ₂₈	230 bars	270 bars	300 bars
1980	Caractéristique	Cylindres 16x32 nombre d'échantillons variable	f _{ck}	25MPa	30MPa	35MPa

En ce qui concerne les bétons pour les ponts en béton précontraints, ils sont soumis au jeune âge à des efforts importants de compression lors des mises en tension.

Aussi, dès les débuts de la précontrainte, les bétons furent fortement dosés en ciment (400kg/m³) pour obtenir des bétons de résistance élevée (350 à 400 kg/cm²).

1.2 - Évolution des méthodes de contrôle des bétons

Il y a lieu de noter dans ce tableau, que la méthodologie de mesure de la résistance des bétons a évolué au cours du temps : ¹

Dès les débuts du béton armé aux années 1960, la résistance a été mesurée sur des éprouvettes cubiques (20 cm x 20 cm) et à 90 jours d'âge (les ciments durcissaient relativement lentement). Pour le béton précontraint, la situation a perduré jusqu'en 1965. La résistance des éprouvettes devait atteindre la valeur fixée par les exigences du marché ;

A partir des années 1960, la résistance a été mesurée sur des éprouvettes cylindriques (16 cm de diamètre x 32 cm de hauteur) et à 28 jours d'âge en se référant soit à la résistance nominale (environ 20 % des éprouvettes pouvaient ne pas atteindre la résistance fixée) soit à la résistance caractéristique qui est en vigueur actuellement (environ 5 ou 10 % des éprouvettes peuvent ne pas atteindre la résistance fixée).

Dans un recalcul, il faut pouvoir estimer la résistance caractéristique du béton à partir des informations trouvées du dossier de l'ouvrage comme les résultats des mesures sur éprouvettes opérées lors des

¹ Chapitre 4 de l'ouvrage Maintenance et réparation des ponts paru aux Presses de l'ENPC en 1997.



contrôles sur le chantier. Les formules développées ci-après permettent de passer de la résistance moyenne à la résistance nominale et à la résistance caractéristique.

Résistance moyenne :

$$f_{cm} = \frac{\sum f_{ci}}{n} \text{ avec } f_{ci} \text{ le résultat d'un essai et } n \text{ le nombre d'essais.}$$

Résistance nominale si le nombre des essais est grand (>30) :

$$f_{cn} = f_{cm} - 0,8s_n \text{ avec } s_n \text{ l'écart quadratique moyen } s_n = \sqrt{\frac{\sum (f_{ci} - f_{cm})^2}{n}}$$

Résistance caractéristique : (se reporter à la circulaire 73.153 du 13 août 1973 dite IP2)

$$f_{ck} = \min i(\sigma_{k1}; \sigma_{k2}) \text{ avec } \sigma_{k1} = f_{cm} (1 - 0,07k_n) \text{ et } \sigma_{k2} = (f_{cm} - k_n s_n)$$

Avec :
$$k_n = 1,28 + \frac{3,87}{(n-1)^{\frac{2}{3}}}$$

le coefficient k_n dépend du nombre d'essais voir le tableau suivant.

n	15	30	50	100
k_n	1,94	1,69	1,57	1,46

Pour passer de la résistance sur cube à 90 jours à la résistance sur cylindre à 28 jours, il est possible d'appliquer la relation suivante :

$$f_{c28,cylindre} \sim 0,78 f_{c90,cube}$$

Pour passer de la résistance moyenne (f_{cm}) à la résistance nominale (f_{cn}) et à la résistance caractéristique (f_{ck}), il est possible d'appliquer les relations suivantes :

$$f_{ck} \sim 0,85 \text{ à } 0,9 f_{cn} ;$$

$$f_{cn} \sim 0,7 \text{ à } 0,85 f_{cm}$$

2 - Caractéristiques des bétons à prendre dans un recalcul

2.1 - Résistance des bétons

A partir des résultats des essais d'écrasement sur éprouvettes quand ils sont disponibles dans le dossier de l'ouvrage, il est possible d'estimer la résistance nominale ou caractéristique du béton de la structure, le module de déformation du béton, etc. Toutes ces caractéristiques permettront d'entreprendre un recalcul.

Il est aussi possible de tenir compte que le béton continu à durcir en vieillissant (ceci est surtout valable pour les bétons anciens à grains de ciment grossier et qui peuvent conserver des réserves de chaux disponibles).

Si aucun résultat ne figure dans le dossier de l'ouvrage, il est possible d'envisager de faire une campagne de carottages suivie d'une auscultation sonique du béton de l'ensemble de la structure (détermination des zones d'isovitesse si les bétons ne sont pas trop fissurés).

De plus avant les essais d'écrasement des éprouvettes, la vitesse du son devra être contrôlée. Cet ensemble de mesures permettra de relier la résistance du béton et la vitesse du son et donc à partir de la carte des zones d'isovitesse d'affecter une résistance par zone.

L'expérience montre que les résultats des mesures sont souvent très dispersés et que l'interprétation des mesures est délicate comme le montre l'exemple ci-après.

Éprouvette	Vitesse du son m/s	Résistance à la compression en MPa	Densité en g/cm ³
1	4030	24,6	2,23
2	4390	48,9	2,33
3	3980	28,1	2,25
4	4060	23,5	2,24
5	3930	27,3	2,23
6	4020	16,0	2,13
7	4240	30,2	2,25
8	4000	22,8	2,18
9	4330	38,4	2,29
10	3670	18,2	2,20
11	3370	19,3	2,23
12	4130	31,0	2,28
Moyenne	4010	27,4	2,24
Écart-type	280	9,2	0,05

Les carottages sur une structure sont limités en nombre et en diamètre pour des raisons évidentes de coût mais aussi parce qu'ils sont destructifs. De plus, il n'y a pas de relation normalisée donnant la résistance en compression d'éprouvettes en fonction de leur diamètre.

Cependant l'article de Petersons dans la revue RILEM de 1971 (vol 4 – N°24) indique que la résistance en compression augmente si le diamètre de l'éprouvette diminue. Par ailleurs, le Comité Technique de l'ISO/TC/71 a proposé les facteurs correctifs suivants.

Dimensions de l'éprouvette (ϕ en mm et h en mm)	Facteur de corrélation
100x200	1,02
150x300	1
200x400	0,97
250x500	0,95
300x600	0,91

Pour obtenir la résistance d'un béton, il est possible d'utiliser la formule ci-après qui permet de passer de la résistance de la carotte à celle d'une éprouvette 16x32.

$$\frac{f_{c\phi/h}}{f_{c^{16/32}}}=0,64 + \frac{1}{\frac{h}{\phi} + \frac{\phi}{20}}$$

Avec :

ϕ le diamètre de la carotte en cm,

h la hauteur de l'éprouvette en cm (en principe $h = 2 \phi$)

2.2 - Masse volumique des bétons

Jusque vers les années 1960, la masse volumique du béton pour béton précontraint a été prise égale à 2400 kg/m^3 dans les notes de calcul. Lors d'un recalcul, il y a lieu de s'assurer que cette valeur n'est pas sous-évaluée.

Lors des investigations pour mesurer les caractéristiques des bétons à partir de prélèvements d'éprouvettes, il est également possible de mesurer la masse volumique du béton seul.

La masse volumique du béton armé ou précontraint à introduire dans les calculs exprimés en kg/m^3 peut être estimée par la relation suivante :

$$g = m + 5400\omega = m + 700g_a$$

avec :

m la masse volumique mesurée exprimée en kg/m^3 ;

ω le rapport entre le volume de l'acier et celui du béton ;

g_a la masse en kilogrammes de l'acier par mètre cube de béton.

Pour les bétons courants, il est possible de prendre $m = 2370 \text{ kg/m}^3$:

$$g = 2370 + 5400\omega = 2370 + 700g_a$$

Dans les recalculs courants, il est possible de prendre les masses volumiques suivantes :

Bétons armés ou précontraints	Masse volumiques en kg/m^3
Bétons courants	2500
Bétons légers	1900
Bétons à base de granulats basaltiques...	2550 à 2600
Bétons à haute résistance	2550 à 2650

Résumé

Ce document constitue une annexe électronique au guide Cerema de 2015

« Conception des réparations structurales et des renforcements des ouvrages d'art ».

Il traite de l'évolution des propriétés mécaniques du matériau béton ainsi que de ses modalités de caractérisation et de contrôle.

Aménagement et développement des territoires, égalité des territoires - Villes et stratégies urbaines - Transition énergétique et changement climatique - Gestion des ressources naturelles et respect de l'environnement - Prévention des risques - Bien-être et réduction des nuisances - Mobilité et transport - Gestion, optimisation, modernisation et conception des infrastructures - Habitat et bâtiment

Ce document ne peut être vendu. La reproduction totale du document est libre de droits.

En cas de reproduction partielle, l'accord préalable de l'auteur devra être demandé.

Référence : 1747w – ISRN : CEREMA-DteclTM-2017-047-1-FR

Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement

Direction technique infrastructures de transport et matériaux - 110 rue de Paris, 77171 Sourdun - Tél. : +33 (0)1 60 52 31 31

Siège social : Cité des Mobilités - 25, avenue François Mitterrand - CS 92 803 - F-69674 Bron Cedex - Tél. : +33 (0)4 72 14 30 30

Établissement public - Siret 130 018 310 00016 - www.cerema.fr