

PIERRE-CLAUDE AÏTCIN

Bétons

**HAUTE
PERFORMANCE**



Sommaire

Préface par Adam Neville	3
Note aux lecteurs	5
Remerciements.....	11
Chapitre 1 Terminologie : quelques choix personnels	15
1.1 Au sujet du titre de ce livre	16
1.2 Rapport eau/ciment, rapport eau/matériaux cimentaires ou rapport eau/liant	16
1.3 Béton de résistance normale, béton ordinaire, béton usuel	17
1.4 Haute résistance ou haute performance.....	18
Références.....	19
Chapitre 2 Introduction.....	21
Chapitre 3 Perspectives historiques	37
3.1 Les précurseurs et les pionniers	37
3.2 Des réducteurs d'eau aux superplastifiants.....	41
3.3 L'arrivée de la fumée de silice.....	44
3.4 Statut actuel.....	45
3.5 Le développement des BHP en France	46

3.6	Conclusion	48
	Références.....	51
Chapitre 4	Utilisation des bétons à haute performance.....	55
4.1	Introduction.....	55
4.2	Avantages d'utiliser un BHP pour un propriétaire	56
4.3	Avantages d'utiliser un BHP pour un concepteur.....	57
4.4	Avantages d'utiliser un BHP pour un entrepreneur.....	58
4.5	Avantages d'utiliser un BHP pour un producteur.....	59
4.6	Avantages pour l'environnement d'utiliser un BHP.....	60
4.7	Études de cas.....	61
4.7.1	L'édifice Water Tower Place	61
4.7.2	Les plates-formes pétrolières Gullfaks	63
4.7.3	Les viaducs de Sylans et Glacières	68
4.7.4	L'édifice Scotia Plaza	72
4.7.5	Le pont de l'Île de Ré.....	75
4.7.6	L'édifice Two Union Square	79
4.7.7	Le pont de Joigny	82
4.7.8	Le viaduc de la montée Saint-Rémi	85
4.7.9	Le pont de Normandie	88
4.7.10	La plate-forme pétrolière Hibernia	92
4.7.11	Le pont de la Confédération.....	98
4.7.12	Ouvrages types en BHP (rédigé par Didier Brazillier)	102
	Références	106
Chapitre 5	Les principes des BHP	113
5.1	Introduction.....	113
5.2	Destruction d'un béton sous un effort de compression.....	114
5.3	Amélioration de la résistance de la pâte de ciment hydraté.....	117
5.3.1	Porosité	118
5.3.2	Diminution de la taille des grains des produits d'hydratation	122
5.3.3	Réduction des hétérogénéités.....	122
5.4	Amélioration de la résistance de la zone de transition.....	122
5.5	Recherche de granulats résistants	124

5.6	Rhéologie des bétons à faible rapport eau/liant	125
5.6.1	Optimisation de la distribution granulométrique des granulats.....	125
5.6.2	Optimisation de la distribution granulométrique des particules de ciment	126
5.6.3	Utilisation d'ajouts cimentaires.....	126
5.6.4	Comportement rhéologique des bétons de faible rapport eau/liant à l'état frais	127
5.7	Loi du rapport eau/liant.....	128
5.8	Conclusion	129
	Références.....	130

Chapitre 6 Revue des propriétés les plus importantes de quelques constituants des BHP 133

6.1	Introduction.....	134
6.2	Ciment Portland	134
6.2.1	Composition	134
6.2.2	Fabrication du clinker	137
6.2.3	Microstructure du clinker.....	140
6.2.4	Fabrication du ciment Portland	145
6.2.5	Essais d'acceptation sur le ciment Portland.....	147
6.2.6	Hydratation du ciment Portland	149
6.2.7	Conclusion sur l'hydratation du ciment Portland dans un BHP.....	154
6.3	Ciment Portland et eau	155
6.3.1	Réducteurs d'eau et superplastifiants.....	156
6.3.2	Différents types de superplastifiant.....	161
6.3.3	Fabrication des superplastifiants.....	161
6.3.4	Hydratation du ciment Portland en présence d'un superplastifiant.....	165
6.3.5	Rôle crucial du sulfate de calcium	171
6.3.6	Essais d'acceptation des superplastifiants.....	172
6.3.7	Conclusion.....	174
6.4	Ajouts cimentaires.....	175
6.4.1	Introduction	175
6.4.2	Fumée de silice.....	177
6.4.3	Laitier de haut fourneau	184
6.4.4	Cendres volantes	191
6.4.5	Conclusion.....	194
	Références	195

Chapitre 7	Sélection des matériaux	205
7.1	Introduction.....	205
7.2	Différentes classes de BHP	206
7.3	Sélection des matériaux	206
7.3.1	Sélection du ciment.....	207
7.3.2	Sélection du superplastifiant.....	213
7.3.3	Compatibilité ciment/superplastifiant.....	218
7.3.4	La méthode AFREM.....	235
7.3.5	Dosage en superplastifiant	236
7.3.6	Sélection du liant.....	238
7.3.7	Sélection de la fumée de silice.....	239
7.3.7	Sélection d'une cendre volante	242
7.3.8	Sélection du laitier de haut fourneau	244
7.3.9	Limites d'utilisation des laitiers et des cendres volantes dans les BHP.....	245
7.3.10	Sélection des granulats.....	247
7.4	Plan d'expérience factoriel pour optimiser la composition de BHP.....	251
7.4.1	Introduction.....	251
7.4.2	Sélection d'un plan factoriel	252
7.4.3	Exemple de calcul	254
7.5	Conclusion	260
	Références	260
Chapitre 8	Composition des BHP	267
8.1	Introduction.....	267
8.2	La méthode formulation ACI 211 pour un béton usuel, un béton lourd ou un béton de masse.....	268
8.3	Définitions et formules	272
8.3.1	Granulats à l'état saturé superficiellement sec.....	272
8.3.2	Humidité et teneur en eau	275
8.3.3	Densité	277
8.3.4	Teneur en ajout cimentaire.....	277
8.3.5	Teneur en superplastifiant.....	278
8.3.6	Teneur en réducteur d'eau et en agent entraîneur d'air	283
8.3.7	Résistance à la compression requise	284
8.4	La méthode de formulation de l'Université de Sherbrooke	286
8.4.1	Feuille de calcul	290

8.4.2	Calcul de la composition de 1 m ³ de béton à partir des proportions d'une gâchée d'essai (état SSS)	299
8.4.3	Calcul d'une gâchée	305
8.4.4	Limites de la méthode proposée.....	309
8.5	Autres méthodes de formulation	310
8.5.1	Méthode suggérée par le comité ACI 363 sur les bétons à haute résistance.....	311
8.5.2	Méthode des coulis du LCPC.....	312
8.5.3	La méthode simplifiée de Mehta et Aïtcin.....	314
8.6	Conclusion	316
	Références.....	316

Chapitre 9 Production des BHP..... 319

9.1	Introduction.....	319
9.2	Comment se préparer avant le malaxage	321
9.3	Malaxage.....	323
9.4	Contrôle de la maniabilité des BHP	325
9.5	Ségrégation.....	326
9.6	Contrôle de la température du béton frais	327
9.6.1	Augmentation de la température d'un béton frais trop froid.....	328
9.6.2	Refroidissement d'un béton frais lorsque sa température initiale est trop élevée	329
9.7	La production d'un BHP à air entraîné	330
9.8	Études de cas	332
9.8.1	Production du béton utilisé pour reconstruire le tablier du pont Jacques-Cartier à Sherbrooke ..	332
9.8.2	Production d'un BHP dans une centrale doseuse	335
9.9	Conclusion	337
	Références.....	338

Chapitre 10 Travaux préparatoires avant le bétonnage : que faire, quand le faire et comment le faire	341
10.1 Introduction.....	341
10.2 Réunion préparatoire.....	344
10.3 Préqualification.....	345
10.3.1 Préqualification pour la construction du Centre Bay-Adelaide à Toronto, Canada.....	346
10.3.2 Préqualification du BHP à air entraîné pour la construction d'un pont sur l'autoroute transcanadienne dans la région de Toronto (Bickley, 1996)	347
10.3.3 Essai pilote.....	348
10.4 Contrôle de la qualité à la centrale à béton.....	349
10.5 Contrôle de la qualité sur le chantier	350
10.6 Essais.....	351
10.6.1 Échantillonnage.....	352
10.7 Évaluation du contrôle de la qualité.....	353
10.8 Conclusions.....	354
Références.....	355
Chapitre 11 La livraison, la mise en place et le contrôle des BHP	357
11.1 Livraison des BHP	357
11.2 Ajustement final de l'affaissement avant la mise en place du béton.....	358
11.3 Mise en place du BHP.....	359
11.3.1 Pompage.....	359
11.3.2 Vibration	361
11.3.3 Finition des dalles en BHP.....	362
11.4 Détails et méthodes de construction spécifiques aux BHP.....	364
11.4.1 Méthode du « chapeau » (mushrooming) dans la construction de colonnes.....	364
11.4.2 Coffrages grimpants.....	365
11.4.3 Coffrages coulissants	366
11.4.4 BHP compactés au rouleau	367
11.5 Conclusion	367
Références.....	368

Chapitre 12 Le mûrissement des BHP	371
12.1 Introduction.....	371
12.2 Importance d'un mûrissement approprié	372
12.3 Différents types de retrait.....	373
12.4 Réaction d'hydratation et ses conséquences	373
12.4.1 Résistance.....	376
12.4.2 Chaleur	377
12.4.3 Contraction volumétrique.....	378
12.5 Retrait du béton.....	383
12.5.1 Retrait d'origine thermique.....	383
12.5.2 Comment réduire le retrait endogène et le retrait de séchage d'un BHP et leurs effets par un mûrissement à l'eau approprié ?	384
12.6 Pourquoi le retrait endogène est-il plus important dans les BHP que dans les bétons usuels ?	386
12.7 L'application d'une membrane de mûrissement est-elle suffisante pour minimiser ou atténuer le retrait d'un béton ?	388
12.8 Le mûrissement des BHP.....	389
12.8.1 Colonnes de grande dimension	390
12.8.2 Cas de poutres de grande dimension.....	393
12.8.3 Cas de poutres de petite dimension.....	394
12.8.4 Cas de dalles de faible épaisseur.....	394
12.8.5 Cas des dalles épaisses.....	395
12.8.6 Autres cas.....	396
12.9 Comment assurer un mûrissement adéquat en chantier ?	396
12.10 Conclusion	397
Références.....	398
 Chapitre 13 Les propriétés du béton frais.....	 403
13.1 Introduction.....	403
13.2 Contrôle de la masse volumique	405
13.3 Contrôle de l'affaissement	405
13.3.1 Mesure.....	405
13.3.2 Facteurs influençant l'affaissement.....	406
13.3.3 Amélioration de la rhéologie du béton frais.....	407
13.3.4 Perte d'affaissement	408

13.4	Teneur en air	409
13.4.1	BHP sans air entraîné.....	409
13.4.2	BHP à air entraîné.....	410
13.5	Retard de prise	410
13.6	Conclusion	412
	Références.....	413

Chapitre 14 Augmentation de la température des BHP 417

14.1	Introduction.....	417
14.2	Comparaison de l'augmentation de température entre un béton usuel et deux BHP.....	419
14.3	Conséquences de l'augmentation de la température du béton dans un élément structural.....	420
14.3.1	Effet de l'augmentation de température sur la résistance à la compression d'un BHP.....	420
14.3.2	Différences d'augmentation de la température dans un élément structural en BHP.....	421
14.3.3	Influence des gradients thermiques durant le refroidissement du BHP.....	422
14.3.4	Influence de l'augmentation de la température sur la microstructure du béton.....	422
14.4	Influence de différents paramètres sur l'augmentation de la température.....	425
14.4.1	Influence du dosage en ciment.....	425
14.4.2	Influence de la température ambiante.....	429
14.4.3	Influence de la géométrie de l'élément structural	430
14.4.4	Influence de la nature des coffrages.....	432
14.4.5	Influence simultanée de la température du béton frais et de la température ambiante.....	433
14.4.6	Remarques.....	435
14.5	Comment contrôler la température maximale d'un BHP ?.....	435
14.5.1	Diminution de la température du béton au moment de sa livraison.....	436
14.5.2	Utilisation d'un retardateur.....	437
14.5.3	Utilisation d'ajouts cimentaires.....	438
14.5.4	Utilisation d'un ciment à faible chaleur d'hydratation.....	438
14.5.5	Protection du BHP en conditions hivernales	438

14.6	Comment contrôler l'apparition de gradients thermiques	439
14.7	Conclusion	439
	Références.....	440

Chapitre 15 Essais sur les BHP..... 443

15.1	Introduction	443
15.2	Mesure de la résistance à la compression	444
15.2.1	Influence de la capacité de la presse	445
15.2.2	Influence des méthodes d'essai	452
15.2.3	Influence de l'éprouvette.....	461
15.2.4	Influence du mûrissement	465
15.2.5	Résistance des carottes et résistance des éprouvettes normalisées	467
15.3	Courbes contrainte/déformation.....	468
15.4	Mesure du retrait	471
15.4.1	Procédure actuelle	471
15.4.2	Développement du retrait dans un béton de rapport eau/liant élevé	473
15.4.3	Développement du retrait dans un béton de rapport eau/liant faible.....	473
15.4.4	Augmentation de la masse initiale du béton et autodessiccation	474
15.4.5	Résistance à la compression initiale et autodessiccation	475
15.4.6	Nouvelle procédure pour mesurer le retrait de séchage	475
15.5	Mesure de fluage.....	477
15.5.1	Préparation des éprouvettes.....	477
15.5.2	Développement des différentes déformations produites dans le béton durant les 28 premiers jours	478
15.5.3	Déformations produites dans un béton de rapport eau/liant élevé soumis à un essai de fluage à jeune âge.....	479
15.5.4	Déformations produites dans un béton de faible rapport eau/liant soumis à un essai de chargement à jeune âge	480
15.5.5	Proposition d'une procédure de mûrissement avant le premier chargement d'une éprouvette de béton soumise à un essai de fluage.....	482

15.6	Remarques sur les essais de retrait et de fluage.....	483
15.7	Mesure de la perméabilité.....	483
15.8	Mesure du module élastique	487
15.9	Conclusion	490
	Références.....	491
Chapitre 16	Propriétés mécaniques des BHP	497
16.1	Introduction.....	497
16.2	Résistance à la compression.....	499
16.2.1	Résistance à la compression des BHP au jeune âge.....	500
16.2.2	Influence de l'élévation de la température initiale sur la résistance à la compression des BHP	501
16.2.3	Influence de la teneur en air sur la résistance à la compression.....	502
16.2.4	Résistance à la compression à long terme.....	503
16.3	Module de rupture et résistance au fendage.....	504
16.4	Module d'élasticité.....	507
16.4.1	Approche théorique.....	507
16.4.2	Approche empirique.....	511
16.4.3	Conclusion sur l'évaluation du module élastique ..	515
16.5	Coefficient de Poisson	516
16.6	Courbe contrainte/déformation	516
16.7	Retrait et fluage.....	519
16.8	Résistance à la fatigue des BHP.....	524
16.8.1	Introduction.....	524
16.8.2	Définitions.....	525
16.8.3	Résistance à la fatigue des structures en béton	527
16.9	Conclusion	528
	Références.....	528
Chapitre 17	La durabilité du BHP	535
17.1	Introduction.....	535
17.2	Durabilité des bétons usuels : un sujet de préoccupation majeure.....	537
17.2.1	Durabilité : la clé d'une bonne conception	537

17.2.2	Importance critique de la mise en place et du mûrissement du béton.....	539
17.2.3	Importance de la peau du béton	540
17.2.4	Pourquoi certains bétons anciens sont-ils plus durables que certains bétons modernes ?	543
17.3	Pourquoi les BHP sont-ils plus durables que les bétons usuels ?	544
17.4	Durabilité à l'échelle microscopique	547
17.5	Durabilité à l'échelle macroscopique.....	548
17.6	Résistance à l'abrasion.....	549
17.6.1	Introduction	549
17.6.2	Facteurs affectant la résistance à l'abrasion des BHP.....	550
17.6.3	Résistance à l'abrasion des pavages.....	553
17.6.4	Résistance à l'abrasion des structures hydrauliques	554
17.6.5	Résistance à l'abrasion des structures marines	554
17.7	Résistance aux cycles de gel-dégel	554
17.7.1	Résistance des bétons usuels face aux cycles de gel-dégel	555
17.7.2	Résistance des BHP face aux cycles de gel-dégel	556
17.7.3	Nombre de cycles de gel-dégel	560
17.7.4	Point de vue personnel de l'auteur	561
17.8	Résistance à l'écaillage	562
17.9	Résistance à la pénétration des ions chlore.....	563
17.10	Corrosion des armatures d'acier.....	564
17.10.1	Utilisation d'armatures en acier inoxydable	566
17.10.2	Utilisation d'armatures en acier galvanisé	566
17.10.3	Utilisation d'armatures recouvertes d'époxy	568
17.10.4	Utilisation d'armatures en fibres de verre.....	569
17.10.5	Amélioration de la qualité du béton de recouvrement.....	570
17.10.6	Remarques.....	574
17.11	Résistance à différentes formes d'attaques chimiques.....	574
17.12	Résistance à la carbonatation	575
17.13	Résistance à l'eau de mer.....	575
17.14	Réaction alcalis-granulats dans les BHP.....	576
17.14.1	Introduction	576

17.14.2	Conditions essentielles pour qu'une réaction alcalis-granulats se développe dans un béton	576
17.14.3	Superplastifiant et réaction alcalis-granulats	577
17.14.4	Prévention des réactions alcalis-granulats	577
17.14.5	Extrapolation des résultats obtenus sur les bétons usuels aux BHP	578
17.15	Résistance au feu.....	578
17.15.1	Résistance au feu d'un BHP	579
17.15.2	Incendie dans le tunnel sous la Manche (Acker et coll., 1997 ; Demorieux, 1998)	580
17.16	Conclusion	581
	Références.....	582

Chapitre 18 Les BHP spéciaux 593

18.1	Introduction.....	593
18.2	BHP à air entraîné.....	594
18.2.1	Introduction.....	594
18.2.2	Fabrication d'un BHP à air entraîné	594
18.2.3	Rhéologie des BHP à air entraîné	598
18.2.4	Conclusion	598
18.3	BHP légers	598
18.3.1	Introduction.....	598
18.3.2	Granulats fins	600
18.3.3	Liants.....	600
18.3.4	Propriétés mécaniques	602
18.3.5	Utilisation des BHP légers	604
18.3.6	Masse volumique des BHP légers.....	606
18.3.7	Absorption des granulats légers	606
18.3.8	Quantité d'eau de gâchage nécessaire pour fabriquer un BHP léger.....	607
18.3.9	Conclusion	607
18.4	BHP lourds.....	608
18.5	BHP renforcés de fibres	609
18.6	BHP confinés	612
18.7	BHP compacté au rouleau.....	616
18.8	Conclusion	622
	Références.....	622