

Pierre-Claude Aïtcin  
Sidney Mindess

# ÉCOSTRUCTURES EN BÉTON

Comment diminuer  
l'empreinte carbone  
des structures en béton

Version française établie par P.-C. Aïtcin  
avec le concours de Jean-Louis Granju  
et de Gilles Escadeillas



EYROLLES

# Table des matières

<b>CHAPITRE 1. Soutenabilité</b> .....	
1.1 Introduction .....	1
1.2 Étapes vers la soutenabilité .....	5
1.2.1 Fabrication plus efficace du ciment Portland .....	5
1.2.2 Utilisation de combustibles alternatifs .....	5
1.2.3 Utilisation d'ajouts cimentaires .....	6
1.2.4 Fillers .....	7
1.2.5 Les poussières de four .....	7
1.2.6 Fabrication de béton plus durable .....	8
1.2.7 Utilisation de bétons à haute performance .....	8
1.2.8 Granulats recyclés .....	8
1.2.9 Séquestration (captage et stockage) des émissions de CO <sub>2</sub> .....	8
1.2.10 Utilisation de moins d'eau .....	9
1.2.11 Amélioration des méthodes de calcul et des codes de construction .....	9
<b>CHAPITRE 2. Terminologie et définitions</b> .....	11
2.1 Introduction .....	11
2.2 Ciment, ajout cimentaire, ciment composé, filler, ajout et liant .....	12
2.3 Ciments ou liants binaires, ternaires et quaternaires .....	13
2.4 Contenu en ajouts cimentaires .....	13
2.5 Surface spécifique .....	13
2.6 Alite et bélite .....	13
2.7 Semihydrate .....	14
2.8 Rapports eau-ciment, eau-ajouts cimentaires et eau-liant .....	14
2.8.1 Rapport eau-ciment .....	14
2.8.2 Rapports eau-ajouts cimentaires et eau-liant .....	14
2.9 Granulat saturé surface sèche (SSS) .....	14
2.10 Teneur en eau, absorption et humidité d'un granulat .....	15
2.11 Eau de malaxage et eau de gâchage .....	15
2.12 Densité .....	15
2.13 Dosage en superplastifiant .....	16

<b>CHAPITRE 3. Les rapports eau-ciment et eau-liant</b> .....	17
3.1 Introduction .....	17
3.2 Rappel historique .....	18
3.3 Le rapport eau-ciment : le cheminement personnel de P.C. Aïtcin ..	18
3.4 L'industrie du béton et le rapport E/C .....	20
3.5 Rapport eau-ciment ou eau-liant .....	21
3.6 Comment transformer le rapport E/L en MPa .....	22
3.7 La soutenabilité des bétons de faible rapport E/L .....	23
3.8 Conclusion .....	25
<b>CHAPITRE 4. Durabilité, soutenabilité et profitabilité</b> .....	27
4.1 Introduction .....	27
4.2 Durabilité : le leitmotiv de l'industrie de la construction au XXI <sup>e</sup> siècle .....	29
4.2.1 Durabilité et profitabilité .....	29
4.2.2 Durabilité et soutenabilité .....	30
4.3 Soutenabilité .....	31
4.3.1 Comment fabriquer plus de clinker avec moins de calcaire et moins de combustible? .....	32
4.3.2 Plus de ciment avec moins de clinker .....	35
4.3.3 Comment faire plus de béton avec moins de ciment .....	37
4.3.4 Comment supporter des charges plus importantes avec moins de ciment et de granulats .....	39
4.3.5 Comment construire des structures plus durables avec une plus grande durée de vie utile? .....	39
4.4 Et la profitabilité? .....	40
4.5 Conclusion .....	41
<b>CHAPITRE 5. Les liants modernes</b> .....	43
5.1 Introduction .....	43
5.2 Production des ciments Portland et des liants .....	46
5.2.1 Amérique du Nord .....	47
5.2.2 Europe .....	48
5.3 Fabrication des liants modernes dans une perspective de développement durable .....	49
5.3.1 Fabrication du clinker de ciment Portland .....	49
5.3.2 Ajouts cimentaires .....	60
5.3.3 Fillers .....	76
5.4 Liants sans clinker .....	77

<b>5.5</b>	<b>Essais sur les ciments et les liants</b> .....	77
5.5.1	Priorisation de la résistance sur la rhéologie .....	78
5.5.2	Priorisation de la rhéologie .....	79
5.5.3	Suivi de la rhéologie jusqu'à la prise initiale .....	81
5.5.4	Suivi de la perte d'affaissement .....	82
5.5.5	Autres considérations .....	82
<b>5.6</b>	<b>Introduction des ajouts cimentaires et des fillers</b> .....	83
5.6.1	Introduction à la centrale à béton .....	83
5.6.2	Introduction à la cimenterie .....	83
<b>5.7</b>	<b>Bétonnage avec des ciments composés</b> .....	84
5.7.1	Cas où les ajouts cimentaires sont introduits à la cimenterie .....	84
5.7.2	Cas où les ajouts cimentaires sont introduits dans la centrale à béton .....	84
5.7.3	Propriétés du béton frais .....	85
5.7.4	Mûrissement .....	85
5.7.5	Propriétés du béton durci .....	85
5.7.6	Augmentation de la résistance en compression .....	86
5.7.7	Durabilité .....	87
<b>5.8</b>	<b>Comment mesurer les caractéristiques des bétons contenant des ajouts cimentaires</b> .....	88
<b>5.9</b>	<b>Conclusion</b> .....	89
<b>CHAPITRE 6.</b>	<b>L'eau</b> .....	91
6.1	Introduction .....	91
6.2	Le rôle crucial de l'eau .....	92
6.3	Influence de l'eau sur la rhéologie du béton frais .....	93
6.4	L'eau et l'hydratation du ciment .....	94
6.5	L'eau et le retrait .....	95
6.6	L'eau et la réaction alcalis-granulats .....	97
6.7	Mûrissement interne .....	97
6.8	Utilisation d'eaux spéciales .....	98
6.8.1	L'eau de mer .....	98
6.8.2	Utilisation des eaux de lavage des centrales à béton .....	98
<b>CHAPITRE 7.</b>	<b>Les superplastifiants</b> .....	99
7.1	Introduction .....	99
7.2	Définition .....	101
7.2.1	Compatibilité .....	101
7.2.2	Robustesse .....	101

<b>7.3</b>	<b>Dispersion des particules de ciment</b> .....	102
7.3.1	Les raisons de la floculation des particules de ciment .....	103
7.3.2	Les raisons de la charge électrique des particules de ciment .....	104
7.3.3	Façons d'éliminer la floculation .....	105
<b>7.4</b>	<b>Compatibilité et robustesse</b> .....	106
7.4.1	Pourquoi certaines combinaisons ciment/superplastifiants sont compatibles et robustes et d'autres non? .....	106
7.4.2	Comment évaluer la compatibilité et la robustesse d'une combinaison ciment/superplastifiant? .....	108
<b>7.5</b>	<b>Utilisation des superplastifiants</b> .....	110
<b>7.6</b>	<b>Superplastifiants commerciaux</b> .....	110
<b>7.7</b>	<b>Les polysulfonates</b> .....	111
7.7.1	Les lignosulfonates .....	112
7.7.2	Les polynaphtalènes sulfonates .....	113
7.7.3	Les polymélamines sulfonates .....	114
7.7.4	La compatibilité et la robustesse des polysulfonates .....	114
7.7.5	Les polysulfonates commerciaux .....	116
<b>7.8</b>	<b>Les polycarboxylates</b> .....	117
<b>7.9</b>	<b>Utilisation pratique des superplastifiants</b> .....	118
7.9.1	L'expression du dosage en superplastifiant .....	118
7.9.2	La densité des superplastifiants .....	119
7.9.3	Le contenu en solides .....	119
7.9.4	La masse d'eau contenue dans un volume donné de superplastifiant ..	120
7.9.5	Autres formules utiles .....	120
7.9.6	Masse des solides et du volume requis .....	121
7.9.7	Volume de particules solides contenues dans $V_{liq}$ .....	121
7.9.8	Exemples .....	122
<b>7.10</b>	<b>Conclusion</b> .....	123
<b>CHAPITRE 8.</b>	<b>Les granulats naturels</b> .....	125
<b>8.1</b>	<b>Introduction</b> .....	125
<b>8.2</b>	<b>L'état SSS: l'état de référence pour les granulats</b> .....	126
8.2.1	Détermination des caractéristiques d'un granulat dans son état SSS ...	126
8.2.2	Expression des caractéristiques SSS des granulats .....	128
<b>8.3</b>	<b>Influence des propriétés mécaniques des gros granulats sur les propriétés correspondantes du béton</b> .....	130
8.3.1	La résistance en compression .....	131
8.3.2	Module élastique .....	132
8.3.3	Courbes effort-déformation .....	136
<b>8.4</b>	<b>Substitution partielle d'un granulat ordinaire par un granulat léger saturé</b> .....	139
<b>8.5</b>	<b>Conclusion</b> .....	141

<b>CHAPITRE 9. Granulats recyclés</b> .....	143
9.1 Introduction .....	143
9.2 Recyclage du béton .....	144
9.2.1 Granulats fins recyclés .....	146
9.2.2 Considérations pratiques .....	147
9.3 Autres déchets industriels utilisés comme granulats .....	147
9.3.1 Recyclage des pneus .....	147
9.3.2 Le verre .....	148
9.3.3 Les mâchefers .....	149
9.4 Autres déchets .....	150
<b>CHAPITRE 10. L'air entraîné</b> .....	151
10.1 Introduction .....	151
10.2 Les mythes de l'air entraîné .....	151
10.2.1 L'air piégé et l'air entraîné .....	151
10.2.2 Les effets bénéfiques de l'entraînement d'air .....	152
10.2.3 L'air entraîné et la soutenabilité .....	153
10.3 L'action bénéfique sur la maniabilité du béton frais .....	153
10.4 L'action bénéfique contre la fissuration .....	154
10.5 L'action bénéfique sur la perméabilité et l'absorptivité .....	154
10.6 L'action bénéfique contre les réactions d'expansion .....	154
10.7 L'effet bénéfique sur la résistance du béton aux cycles de gel et dégel .....	155
10.8 L'air entraîné et les ajouts cimentaires .....	156
<b>CHAPITRE 11. Les réactions d'hydratation</b> .....	159
11.1 Introduction .....	159
11.2 Les résultats paradoxaux de l'expérience de Le Chatelier .....	160
11.3 Powers et l'hydratation du ciment Portland .....	164
11.4 Représentation schématique de la réaction d'hydratation d'après Jensen et Hansen .....	165
11.4.1 Hydratation d'une pâte de rapport eau-ciment égale à 0,60 dans un système fermé .....	166
11.4.2 Hydratation d'une pâte de ciment ayant un rapport eau-ciment de 0,42 dans un système fermé .....	167
11.4.3 Hydratation d'une pâte de ciment ayant un rapport eau-ciment de 0,42 en présence d'une source d'eau extérieure .....	167
11.4.4 Hydratation d'une pâte de ciment ayant un rapport eau-ciment de 0,36 en présence d'une source d'eau extérieure .....	168

11.4.5 Hydratation d'une pâte de ciment de rapport eau-ciment < 0,36 dans un système fermé .....	169
11.4.6 Conclusions .....	169
<b>11.5 Composition du «solid gel» .....</b>	<b>171</b>
11.5.1 Produits d'hydratation .....	171
11.5.2 Pourquoi est-il nécessaire d'ajouter du sulfate de calcium quand on produit du ciment Portland? .....	175
11.5.3 Pourquoi y a-t-il des alcalis dans le ciment Portland? .....	177
<b>11.6 Chaleur d'hydratation .....</b>	<b>178</b>
<b>Annexe – Modélisation de l'acquisition et du développement de la résistance dans les pâtes pures de ciment</b>	
D'après les travaux de Granju (1984, 1989) .....	181
11.A.1 Apports de Powers (1947, 1958, 1961, 1962, 1964) .....	181
11.A.2 Résultats complémentaires obtenus par Granju .....	182
<b>CHAPITRE 12. Retrait .....</b>	<b>185</b>
12.1 Introduction .....	185
12.2 Les différents types de retrait .....	186
12.3 Retrait plastique .....	187
12.3.1 Pourquoi le retrait plastique devient-il maintenant plus critique? .....	187
12.3.2 Comment éviter la fissuration causée par le retrait plastique? .....	188
12.4 Le retrait endogène et le mûrissement .....	188
12.4.1 L'origine du retrait endogène .....	189
12.4.2 Le mûrissement externe .....	189
12.4.3 Le mûrissement interne .....	190
12.5 Le retrait thermique .....	190
12.6 Comment limiter les risques de fissuration dus aux gradients thermiques? .....	191
12.7 Les granulats et le retrait .....	192
12.8 Conclusion .....	192
<b>CHAPITRE 13. Le mûrissement .....</b>	<b>193</b>
13.1 Introduction .....	193
13.2 Le mûrissement du béton en fonction de son rapport eau-ciment ..	194
13.2.1 Les bétons ayant un rapport E/C supérieur à 0,42 .....	194
13.2.2 Les bétons ayant un rapport E/C compris entre 0,36 et 0,42 .....	195
13.2.3 Les bétons ayant un rapport E/C inférieur à 0,36 .....	195
13.2.4 Le développement d'une stratégie de mûrissement sur chantier selon le rapport E/C .....	196

13.3 Le mûrissement du béton pour éviter le retrait plastique .....	197
13.3.1 Les brumisateurs .....	197
13.3.2 Les films et les membranes imperméables .....	197
13.4 Le mûrissement du béton pour éviter le retrait endogène .....	199
13.4.1 Le mûrissement externe .....	199
13.4.2 Le mûrissement interne .....	199
13.4.3 L'utilisation d'un agent expansif .....	201
13.5 Le mûrissement du béton pour contrer le retrait de séchage .....	201
13.6 La mise en application du mûrissement en chantier .....	202
13.7 Conclusion .....	203
<b>CHAPITRE 14. La spécification d'un béton durable et soutenable .....</b>	<b>205</b>
14.1 Introduction .....	205
14.2 Le contrôle de la température initiale du béton .....	206
14.2.1 L'augmentation de la température initiale du béton .....	207
14.2.2 Les bétons ayant un rapport E/C supérieur à 0,42 .....	208
14.2.3 La diminution de la température initiale du béton .....	208
14.3 L'entraînement d'air .....	210
14.4 Le mûrissement externe .....	211
14.4.1 Les brumisateurs .....	211
14.4.2 Le mûrissement direct à l'eau .....	212
14.4.3 Les retardateurs d'évaporation .....	212
14.4.4 Les spécifications de mûrissement de la Ville de Montréal .....	212
14.5 Le mûrissement interne .....	213
14.6 Les adjuvants expansifs .....	213
14.7 Les adjuvants réducteurs de retrait .....	213
14.8 Les coffrages glissants .....	214
14.9 La spécification des conditions des essais .....	215
14.10 Le contrôle de la qualité .....	215
<b>CHAPITRE 15. Spécification de performance .....</b>	<b>219</b>
15.1 Introduction .....	219
15.2 La spécification de performance .....	220
15.3 Passage à des spécifications de performance .....	221
15.4 La soutenabilité et les spécifications .....	222
15.4.1 Les spécifications et l'utilisation des ajouts cimentaires .....	223
15.4.2 L'établissement de spécifications de performance .....	225
15.4.3 Des exemples de spécifications de performance .....	227



<b>CHAPITRE 16. L'évaluation statistique de la qualité du béton</b> .....	229
16.1 Introduction .....	229
16.2 La variabilité des propriétés du béton .....	230
16.2.1 La courbe de fréquence normale .....	230
16.2.2 L'expression mathématique de la courbe de fréquence normale .....	230
16.2.3 Quelques propriétés de la courbe en cloche normale .....	231
16.2.4 Les aires remarquables sous la courbe de fréquence normale .....	232
16.2.5 Le coefficient de variation .....	233
16.3 Le contrôle de la qualité d'une production de béton .....	233
16.3.1 La caractérisation de la variabilité de la production .....	234
16.3.2 Le contrôle de la procédure d'essai .....	234
16.3.3 Suivi de l'évolution des résultats bruts : moyenne des cinq derniers échantillonnages consécutifs .....	237
16.3.4 Suivi de la procédure d'essai : moyenne des dispersions des dix derniers essais consécutifs .....	237
16.3.5 Exemple .....	237
16.3.6 Discussion des résultats .....	238
16.4 La spécification de la résistance en compression du béton .....	245
16.5 Les limites de l'analyse statistique .....	245
16.5.1 Le cas d'un bon producteur de béton qui n'a pas de chance .....	246
16.5.2 Le cas d'un mauvais producteur qui a de la chance .....	246
16.5.3 Le risque du producteur et le risque du client .....	246
16.6 Conclusion .....	246
<b>CHAPITRE 17. Production d'un béton soutenable ayant un minimum d'impact environnemental</b> .....	249
17.1 Introduction .....	249
17.2 Le transport des matériaux .....	250
17.3 Exemples de centrales à béton modernes .....	252
17.3.1 La centrale à béton CEMEX d'Ivry .....	252
17.3.2 La centrale ITALCIMENTI à Biarritz .....	257
17.3.3 La centrale DEMIX BÉTON près de Montréal .....	261
17.3.4 La centrale BÉTON MEMPHRÉ de Magog .....	265
17.4 Conclusion .....	266
<b>Bibliographie</b> .....	267
<b>Index</b> .....	273