

Mécanique et Ingénierie des Matériaux

Comportement mécanique du béton



sous la direction de
Jean-Marie Reynouard
Gilles Pijaudier-Cabot

Hermès

Lavoisier

Table des matières

Avant-propos	17
Jean-Marie REYNOUARD et Gilles PIJAUDIER-CABOT	
Chapitre 1. Introduction : modélisation et règlements	21
Bernard FOURÉ	
1.1. Généralités	21
1.1.1. Nature du matériau	21
1.1.2. Panorama des propriétés du béton	21
1.1.3. Notions d'échelles	23
1.1.4. Besoins de modèles de comportement.	23
1.2. Comportement en compression uniaxiale	25
1.2.1. Résistance	25
1.2.1.1. Résistance « instantanée » f_{cj}	25
1.2.1.2. Evolution avec l'âge j	26
1.2.1.3. Résistance sous contraintes permanentes et variables	28
1.2.1.4. Cas de la compression non uniforme	31
1.2.2. Loi de comportement « instantané »	32
1.2.2.1. L'essai classique de compression	32
1.2.2.2. Caractères essentiels du comportement.	34
1.2.2.3. Transposition au cas de la compression non uniforme	35
1.2.2.4. Modélisation unidimensionnelle.	37
1.2.2.5. Règlements	39
1.2.3. Le paramètre « temps »	41
1.2.3.1. Vitesse de chargement.	41
1.2.3.2. Fluage	43
1.2.3.3. Retrait	46
1.3. Comportement en traction uniaxiale	47
1.3.1. Résistance f_{tj}	47
1.3.2. Loi de comportement du béton non armé	49

1.3.2.1. Comportement en traction directe	49
1.3.2.2. Cas de la flexion – Loi σ, ε fictive	50
1.3.3. Comportement du béton armé.	51
1.3.3.1. Contribution du béton en traction selon les règlements	51
1.3.3.2. Comportement en traction simple	53
1.3.3.3. Comportement en flexion	55
1.4. Comportement en chargement multiaxial	55
1.4.1. Observations générales.	55
1.4.2. Critères de rupture et règlements	56
1.4.2.1. Fretage et forces localisées.	56
1.4.2.2. Contraintes biaxiales σ, τ	57
1.4.2.3. Critères plus généraux	59
1.4.3. Fluage.	59
1.4.4. Autres questions.	61
1.5. Bibliographie	61

Chapitre 2. Technique d'essais et caractérisation expérimentale. 65

Nicolas BURLION

2.1. Introduction.	65
2.2. Spécificités expérimentales liées au matériau béton	67
2.2.1. Composition et variabilité du matériau	67
2.2.2. Confection et mise en œuvre	68
2.2.2.1. Caractéristiques des éprouvettes	68
2.2.2.2. Obtention des éprouvettes.	69
2.2.2.3. Anisotropie initiale.	70
2.2.3. Conservation et conditions de cure.	73
2.2.4. Effet d'échelle	74
2.3. Métrologie et conditions expérimentales	75
2.3.1. Métrologie classique sur éprouvette de béton	75
2.3.1.1. Jauges de déformations	76
2.3.1.2. Capteurs de déplacements.	77
2.3.1.3. Capteurs composites	78
2.3.1.4. Capteurs d'effort	80
2.3.2. Conditions aux limites imposées	81
2.4. Comportement du béton sous sollicitation uniaxiale :	
essais classiques.	87
2.4.1. Traction uniaxiale directe	87
2.4.2. Traction uniaxiale indirecte	90
2.4.3. Essai de traction diffuse	92
2.4.4. Essai de traction bitube.	94

2.4.5. Compression uniaxiale	94
2.4.5.1. Comportement et rupture	94
2.4.5.2. Mesures des paramètres élastiques du matériau	97
2.4.5.3. Caractérisation du comportement post-pic	99
2.4.6. Torsion uniaxiale	101
2.5. Comportement du béton sous sollicitations multiaxiales	101
2.5.1. Sollicitations multiaxiales avec traction appliquée	102
2.5.1.1. Traction biaxiale	102
2.5.1.2. Traction confinée	103
2.5.2. Compression biaxiale	104
2.5.3. Compression triaxiale	105
2.5.3.1. Compression triaxiale axisymétrique	106
2.5.3.2. Compression triaxiale œdométrique	116
2.5.3.3. Compression triaxiale vraie	119
2.6. Conclusions sur la caractérisation expérimentale du comportement multiaxial du béton	126
2.7. Bibliographie	128
Chapitre 3. Modélisation du comportement macroscopique des bétons	135
Jean-François GEORGIN, Khalil HAIDAR, Gilles PIAUDIER-CABOT, Jean-Marie REYNOUARD	
3.1. Introduction	135
3.2. Approche discrète	137
3.2.1. Mécanique de la rupture – Eléments sur l'analyse des milieux fissurés	137
3.2.2. Approche discrète de la fissuration	139
3.2.3. Modèle de fissuration fictive de Hillerborg	141
3.3. Approche continue	143
3.3.1. Mécanique de l'endommagement	143
3.3.1.1. Bases thermodynamiques	144
3.3.1.2. Exemple 1 : le modèle d'endommagement de Mazars	146
3.3.1.3. Prise en compte de la localisation des déformations	150
3.3.1.4. Exemple 2 : le modèle de fissuration diffuse	153
3.3.2. Théorie de la plasticité	157
3.3.2.1. Aspects théoriques	161
3.3.2.2. Approche numérique et résolution	162
3.3.2.3. Détermination du multiplicateur plastique	164
3.3.2.4. Un modèle de comportement mécanique 2D du béton	172
3.4. Conclusion – Couplage endommagement – Plasticité	181
3.5. Bibliographie	189

Chapitre 4. Rupture du béton de structure	193
Khalil HAIDAR et Gilles PJAUDIER-CABOT	
4.1. Changements d'échelles et rupture des structures en béton.	193
4.2. La théorie probabiliste des effets d'échelle	196
4.2.1. Principes de bases du modèle du maillon le plus faible.	196
4.2.2. La loi des effets d'échelle statistique de Weibull	202
4.3. La théorie déterministe des effets d'échelle.	204
4.4. La théorie fractale des effets d'échelle.	210
4.4.1. Les concepts de base de l'approche fractale	210
4.4.2. Le caractère invasif fractal et multifractal pour G_F	212
4.4.3. Le caractère lacunaire fractal et multifractal pour σ_{Nu}	213
4.5. Description des effets d'échelle avec un modèle de comportement . . .	214
4.6. Conclusion	217
4.7. Bibliographie.	217
Chapitre 5. Comportement cyclique du béton et du béton armé	221
Jean-François DUBE	
5.1. Essais de caractérisation du comportement cyclique du béton.	221
5.1.1. Comportement cyclique uniaxial.	222
5.1.2. Essais cycliques sur des éléments de structures	225
5.1.2.1. Essais sur poutres et poteaux	226
5.1.2.2. Essais sur voiles	231
5.1.3. Conclusion	233
5.2. Modélisation du comportement cyclique du béton armé	233
5.2.1. Modèle thermodynamique à comportement unilatéral pour le béton.	234
5.2.2. Modèles de fissuration diffuse <i>smearred crack models</i>	236
5.2.3. Modèles microplans	237
5.3. Modélisation du comportement cyclique du béton.	239
5.3.1. Identification des caractéristiques particulières du comportement cyclique	240
5.3.1.1. Evolution du module d'Young (modèle 1).	241
5.3.1.2. Déformations anélastiques (modèle 2)	243
5.3.1.3. Refermeture des fissures et comportement unilatéral.	245
5.3.1.4. Hystérésis élastique	247
5.3.2. Effet de la vitesse de chargement.	250
5.4. Conclusion	252
5.5. Bibliographie.	252

Chapitre 6. Fatigue du béton de structure	255
Jean-François DESTREBECQ	
6.1. Introduction.	255
6.2. Mécanismes de la fatigue du béton	256
6.2.1. Nature du phénomène	256
6.2.2. Résistance et durée de vie	258
6.2.3. Déformation et endommagement.	261
6.3. Résistance à la fatigue en compression ou traction uniaxiale.	264
6.3.1. Formule de Aas-Jakobsen	264
6.3.2. Courbes S-N-R	265
6.3.3. Diagramme de Ros	266
6.3.4. Diagramme de Haigh.	267
6.3.5. Diagramme de Goodman-Smith	268
6.4. Extensions de la formule de Aas-Jakobsen	269
6.4.1. Effets de la fréquence et de la forme du cycle	269
6.4.2. Fatigue sous chargement uniaxial alterné	271
6.5. Fatigue sous chargement multiaxial	273
6.5.1. Fatigue en présence d'un confinement passif.	274
6.5.2. Fatigue sous chargement biaxial	276
6.5.3. Fatigue sous sollicitation cyclique triaxiale.	278
6.6. Fatigue sous chargement cyclique de niveau élevé	279
6.6.1. Principes généraux d'analyse	280
6.6.2. Formule de Aas-Jakobsen modifiée	282
6.6.3. Formulations basées sur la théorie de l'endommagement	283
6.7. Résistance à la fatigue sous chargement cyclique de niveau variable.	285
6.7.1. Règle de cumul linéaire	285
6.7.2. Règle de cumul non linéaire.	287
6.7.3. Fatigue sous chargement aléatoire	289
6.8. Bibliographie.	290
 Chapitre 7. Effets différés – Fluage et retrait	 295
Farid BENBOUDJEMA, Fékri MEFTAËH, Grégory HEINFLING, Fabrice LEMAOU, Jean-Michel TORRENTI	
7.1. Introduction.	295
7.2. Définitions et mécanismes	296
7.2.1. Microstructure de la pâte de ciment	296
7.2.2. Le retrait	298
7.2.2.1. Le retrait plastique	298
7.2.2.2. Le retrait chimique.	298
7.2.2.3. Le retrait endogène ou retrait d'autodessiccation	298

7.2.2.4.	Le retrait de dessiccation	300
7.2.2.5.	Le retrait thermique	303
7.2.2.6.	Conclusion.	304
7.2.3.	Le fluage	304
7.2.3.1.	Le fluage propre	306
7.2.3.2.	Le fluage de dessiccation	308
7.3.	Démarche expérimentale.	310
7.3.1.	L'essai	311
7.3.1.1.	Maîtrise des conditions aux limites	313
7.3.1.2.	Conservation des éprouvettes.	313
7.3.2.	Le matériel d'essai	313
7.3.2.1.	Le bâti et les éprouvettes	313
7.3.2.2.	Le chargement et les techniques de mesures.	315
7.3.3.	Traitements des données.	316
7.3.3.1.	Données expérimentales et traitement statistique	316
7.3.3.2.	Détermination du coefficient de fluage	318
7.4.	Modélisation du comportement différé	318
7.4.1.	Modélisation du séchage.	320
7.4.2.	Modélisation du retrait de dessiccation	324
7.4.3.	Modélisation du fluage.	329
7.4.3.1.	Modélisation uniaxiale	329
7.4.3.2.	Modélisation multiaxiale	332
7.4.3.3.	Simulations numériques.	338
7.4.4.	Conclusion	341
7.5.	Les modèles codifiés	341
7.5.1.	Objectifs et limitations de principe.	342
7.5.2.	Recommandations RILEM sur les caractéristiques des modèles codifiés	342
7.5.2.1.	Expression de la déformation totale.	343
7.5.2.2.	Expression de la déformation de retrait.	343
7.5.2.3.	Expression de la déformation de fluage.	344
7.5.3.	Comparaison des performances des principaux modèles actuellement proposés dans le cadre de différentes codifications réglementaires en Europe et aux Etats-Unis	345
7.5.3.1.	Description des modèles étudiés.	346
7.5.3.2.	Analyse comparative de résultats obtenus par la simulation d'essais de laboratoire.	352
7.5.3.3.	Analyse comparative de résultats obtenus sur un cas de structure simple.	358
7.6.	Conclusion	360
7.7.	Bibliographie.	361

Chapitre 8. L'apport des nouveaux bétons	369
Yves MALIER	
8.1. Introduction.	369
8.2. Le premier saut technologique – L'évolution des bétons depuis la décennie 80.	370
8.2.1. Réduire la présence de l'eau.	370
8.2.2. Maîtriser la floculation.	370
8.2.3. Optimiser le mélange granulaire	370
8.2.4. Un matériau aux propriétés gouvernables et donc prescriptibles	371
8.3. La véritable révolution : l'approche globale.	372
8.3.1. A nouveau matériau, nouveaux designs.	372
8.3.2. A nouveaux matériaux, nouveaux process	373
8.3.3. A nouveau matériau, nouveaux « systèmes ».	374
8.3.4. Une meilleure maintenance et une meilleure adaptabilité future	375
8.3.5. Enfin, continuons de militer pour l'environnement	378
8.4. La voie de la réussite, ou du Nobel de physique au Nobel d'économie.	378
8.5. Bibliographie.	380
Index	381