

Table des matières

Préface de Franz-Josef Ulm	1
Préface de Pierre Labbé	5
Introduction	9
Chapitre 1. Mécanismes de déformation et de rupture des bétons .	13
1.1. Le béton : matériau à la fois répandu et méconnu	13
1.2. La composition et le comportement du béton au jeune âge.	16
1.2.1. La maturation du béton.	17
1.2.2. Conséquences de la maturation et phénomènes liés au vieillissement du béton.	20
1.3. Principaux aspects du comportement mécanique du béton	23
1.3.1. Le béton sous chargement uniaxial.	23
1.3.1.1. Compression uniaxiale	23
1.3.1.2. Traction uniaxiale	26
1.3.2. Le béton sous chargement multiaxial	31
1.3.2.1. Comportement sous chargement biaxial	33
1.3.2.2. Comportement sous chargement triaxial de compression . .	34
Chapitre 2. Concept d'endommagement et son applicabilité au béton.	41
2.1. Concept d'endommagement	41
2.1.1. Loi d'endommagement cumulatif de Miner	43

2.1.2. Loi d'endommagement progressif de Katchanov	44
2.1.3. Couplage élasticité-endommagement	47
2.1.3.1. Analyse du cas 1D	47
2.1.3.2. Généralisation au cas 3D	48
2.2. Bases théoriques de la mécanique de l'endommagement	50
2.2.1. Couplage élasticité-endommagement	50
2.2.1.1. Application à l'élasticité linéaire.	52
2.2.2. Théorie de l'endommagement isotrope	53
2.2.3. Seuil d'endommagement et notion de surface de charge	55
Chapitre 3. Modélisation de l'endommagement	57
3.1. Modèle dit Mazars, pour les chargements monotones	57
3.1.1. Équations constitutives.	57
3.1.2. Utilisation du modèle (cas uniaxial)	61
3.1.3. Forces et faiblesses du modèle Mazars	64
3.2. Modèle pour les chargements cycliques : le μ modèle.	66
3.2.1. Concept de variable d'endommagement effectif.	66
3.2.2. Équations constitutives.	67
3.2.2.1. Évolution des endommagements.	68
3.2.2.2. Inscription du μ modèle dans le cadre thermodynamique	70
3.2.3. Réponse du μ modèle sous divers types de chargement	71
3.2.3.1. Chargement uniaxial.	71
3.2.3.2. Chargement biaxial.	75
3.2.4. Adaptation du μ modèle au cas de chargements confinés	78
3.2.4.1. Faibles confinements	79
3.2.4.2. Moyens et forts confinements	80
Chapitre 4. Numérisation de l'endommagement.	83
4.1. Rappels sur les concepts présidant à l'usage des éléments finis	83
4.2. Organigrammes de principe	85
4.2.1. Organigramme pour le modèle Mazars	85
4.2.2. Organigramme pour le μ modèle	86
4.3. Préparation des données	87
4.3.1. Identification des paramètres de modélisation	88
4.3.1.1. $E, \nu, \varepsilon_{c0}, A_c, B_c$ identifiables à partir d'essais de compression	88
4.3.1.2. $E, \varepsilon_{t0} (\varepsilon_t)$ identifiables à partir d'essais de traction (directs ou indirects)	89

4.4. Énergie de fracturation du béton	92
4.4.1. Énergies intrinsèque et extrinsèque	93
4.4.1.1. Utilisation de l'énergie de fracturation pour l'identification de A_f et B_f	94
4.4.2. Notion de <i>crack band</i> , régularisation énergétique de Hillerborg . .	96
4.5. Concept d'endommagement non local	96

Chapitre 5. Applications aux cas courants d'éléments de structures en béton armé

101

5.1. Calculs par éléments finis 2D	101
5.1.1. Détails du programme expérimental	102
5.1.2. Numérisation du problème	103
5.1.3. Résultats	105
5.1.3.1. À l'échelle globale	105
5.1.3.2. À l'échelle locale	106
5.2. Calculs par éléments poutres Timoshenko enrichis	108
5.2.1. Forces et faiblesses de la description par poutres multifibres . . .	109
5.2.2. Biais de résultats provenant du choix des paramètres matériaux . .	110
5.2.3. Poutres multifibres et localisation des déformations	111
5.2.4. Description multifibre enrichie et utilisation de paramètres adaptés	114
5.2.4.1. Processus de fissuration	114
5.2.4.2. Comportement cyclique enrichi du béton	116
5.2.5. Simulations basées sur la description multifibre enrichie	119
5.3. Calculs multifibres et accès aux indicateurs de fissuration	122
5.3.1. Champs d'endommagement	122
5.3.2. Ouverture des fissures	123

Chapitre 6. Modélisations de situations liées à des chargements particuliers

127

6.1. Simulation des effets de vitesse	127
6.1.1. Analyse issue de l'expérimentation	127
6.1.2. Chargement à haute vitesse : application au <i>spalling test</i>	132
6.1.3. Chargement à vitesse moyenne : impact sur une poutre en BA . .	134
6.2. Simulation des effets de la maturation du béton	137
6.2.1. Problèmes posés par le comportement du béton au jeune âge . . .	138
6.2.2. Cas d'une poutre en situation de retrait gêné	138
6.2.2.1. Détails de l'essai RG8 du programme CEOS.fr	138
6.2.2.2. Principes retenus pour la simulation	140

6.2.3. Modèle thermomécanique du béton au jeune âge	140
6.2.3.1. Évolutions thermiques	141
6.2.3.2. Couplages thermo-chémo-mécaniques	143
6.2.3.3. Effet d'échelle	145
6.2.3.4. Fluage-dilatation-retrait : description globale du problème	145
6.2.4. Test RG8 : application et résultats	149
6.2.4.1. Chargement thermique, couplages, chargement mécanique	149
6.2.4.2. Principales conclusions issues de cette étude	160

Chapitre 7. Cas mixant éléments poutres et éléments plans 163

7.1. Simulation du comportement d'un voile en béton armé.	163
7.1.1. Modèle pour les murs structuraux : béton armé équivalent (BAE).	164
7.1.2. Application au cas du <i>shear wall</i> de l'expérimentation SAFE. . .	166
7.1.2.1. Comportement cyclique global.	168
7.1.2.2. Comportement cyclique local	169
7.2. Application à une structure combinant murs, poutres et poteaux	170
7.2.1. Modélisation BAE enrichie	172
7.2.2. Modélisation de la réponse de la maquette SMART	174
7.3. Calcul couplant éléments finis 2D et poutres multifibres	176
7.3.1. Étude de cas : perte de portance d'un poteau dans une structure.	177
7.3.2. Résultats comparatifs calcul-expérience	179
7.4. Conclusion	183

Chapitre 8. L'évaluation de la fissuration par l'analyse limite 185

8.1. Caractérisation de la fissuration : cas de champs homogènes d'éléments en traction	185
8.1.1. Sur l'analyse limite et le calcul à la rupture.	185
8.1.2. Cas de poutres en béton armé en flexion	187
8.2. Fissuration d'un tirant.	190
8.2.1. Fissuration localisée et endommagement diffus	190
8.2.1.1. Mise en correspondance des schémas diffus et localisé . . .	193
8.2.2. Loi de comportement $\sigma - \varepsilon$ pour le béton dans le schéma diffus .	196
8.2.3. Application à une expérimentation sur tirants réalisée à l'EPFL . .	198

8.3. Champ homogène créé par la maturation du béton au sein d'une paroi cylindrique	202
8.3.1. Le programme et la maquette VeRCoRs	202
8.3.2. Maillage du gousset et conditions de température	205
8.3.3. Fluage, retrait et propriétés mécaniques	207
8.3.4. Calcul mécanique	208
8.3.5. Principaux résultats et comparaisons avec les mesures <i>in situ</i>	209
8.3.5.1. Déformations	209
8.3.5.2. Endommagements	210
8.3.5.3. Indicateurs de fissuration	212
8.4. Conclusion	214

Chapitre 9. Exercices et compléments 215

9.1. Détermination des caractéristiques mécaniques à partir de courbes expérimentales	215
9.2. Modèle Mazars : chargement triaxial axisymétrique en compression	217
9.3. Endommagements local et non local	219
9.3.1. Exemple d'un barreau de béton en traction directe	219
9.3.2. Réponse du modèle local : incidence du nombre d'éléments	219
9.3.3. Modèle d'endommagement non local	221
9.3.4. Calcul objectif avec un modèle local : méthode de Hillerborg	223
9.3.5. Conclusion	227
9.4. Sur le μ modèle	228
9.4.1. Atteinte du seuil d'endommagement, critère de charge-décharge	228
9.4.2. Sur le facteur de triaxialité des contraintes	229
9.4.3. Réponse à un chargement triaxial axisymétrique en compression	230
9.4.3.1. Activation de l'endommagement de <i>crushing</i>	231
9.4.3.2. Activation de l'endommagement de « consolidation »	232
9.5. Sur le coefficient de bridage R dans les situations de retrait gêné	236
9.6. Résolution d'une structure simple en utilisant le PPV*	239
9.6.1. Position du problème	239
9.6.2. Utilisation du PPV* (assemblage des contributions des éléments) : remarques préliminaires pour la résolution	239
9.6.2.1. Écriture des termes du PPV*	240
9.6.2.2. Application du PPV* à la structure dans un champ de vitesse virtuel	240

Annexe. Prérequis en mécanique des solides et éléments finis . . .	243
Liste des notations	275
Bibliographie	281
Index	291