

# Comportement du béton au jeune âge



*sous la direction de*  
Paul Acker  
Jean-Michel Torrenti  
Franz-Josef Ulm

# Table des matières

<b>Chapitre 1. Introduction : position du problème industriel</b> .....	13
Paul ACKER	
<b>Chapitre 2. Les paramètres influents</b> .....	19
Vincent WALLER et Buqan MIAO	
2.1. Introduction. ....	19
2.2. Influence de la composition du matériau .....	20
2.2.1. Caractéristiques touchant la température du béton. ....	20
2.2.1.1. Dégagement de chaleur. ....	22
2.2.1.1.1. Degrés d'hydratation des liants .....	24
2.2.1.1.2. Chaleurs massiques d'hydratation ou de réaction .....	26
2.2.1.1.3. Cinétique. ....	27
2.2.1.2. Capacité thermique. ....	31
2.2.1.3. Coefficient de dilatation thermique .....	33
2.2.2. Caractéristiques mécaniques .....	33
2.2.2.1. Résistance en compression au jeune âge. ....	33
2.2.2.2. Résistance en traction au jeune âge .....	35
2.2.2.3. Module d'élasticité et coefficient de Poisson .....	35
2.2.2.4. Retrait. ....	36
2.2.2.5. Fluage propre. ....	38
2.3. Effets des conditions aux limites .....	39
2.3.1. Effets des conditions aux limites thermiques .....	40
2.3.2. Effets des conditions aux limites hygrométriques .....	44
2.3.3. Effets des conditions aux limites de type mécanique .....	48
2.3.4. Conclusion .....	49
2.4. Bibliographie. ....	51

**Chapitre 3. Eléments de modélisation – identification et caractérisation expérimentale.**

Franz-Josef ULM, Jean-Michel TORRENTI, Benoît BISSONNETTE, Jacques MARCHAND

3.1. Introduction	63
3.2. Le problème thermo-chemo-mecanique couplé	63
3.2.1. Modélisation macroscopique de la réaction d'hydratation	63
3.2.1.1. Le degré d'hydratation	64
3.2.1.2. Chémoélasticité : élasticité vieillissante et retrait endogène	65
3.2.1.3. Couplage thermochimique	67
3.2.1.4. Ecrouissage chémo-plastique	68
3.2.1.5. Fluage au jeune âge	72
3.2.1.5.1. Fluage à court terme	73
3.2.1.5.2. Fluage à long terme	74
3.2.2. Identification de la cinétique d'hydratation	76
3.2.3. Identification de l'affinité normalisée	78
3.3. Obtention des données, méthodes expérimentales	80
3.3.1. Degré d'hydratation	81
3.3.1.1. Evaluation de la quantité de ciment hydraté	81
3.3.1.2. Mesure de la quantité de chaleur dégagée	83
3.3.2. Variations volumétriques	84
3.3.2.1. Le retrait chimique	85
3.3.2.1.1. La contraction Le Chatelier	85
3.3.2.1.2. Le retrait d'autodessiccation	87
3.3.2.1.3. Mesure combinée des retraits d'autodessiccation <i>externe et interne</i>	91
3.3.2.2. Le retrait thermique	92
3.3.3. Comportement mécanique	94
3.3.3.1. Résistances mécaniques	94
3.3.3.2. Propriétés viscoélastiques	95
3.3.3.2.1. Essais de fluage sur béton durci	95
3.3.3.2.2. Essais de fluage sur béton durcissant	97
3.4. Conclusion	102
3.5. Bibliographie	114

**Chapitre 4. Exemples d'application** 127

Jean-Luc CLÉMENT et Jean-Louis TAILHAN

4.1. Introduction	127
4.2. Aide à la conception d'ouvrage : étude en deux dimensions	129
4.2.1. Position du problème	129
4.2.2. Modèle et conditions aux limites	129
4.2.3. Principaux résultats	130
4.2.4. Apport de l'étude effectuée	132

4.3. Estimation des risques de fissuration de pièces massives : approche en trois dimensions. . . . .	133
4.3.1. Position du problème et objectifs des études. . . . .	133
4.3.2. L'ouvrage et les éléments concernés . . . . .	134
4.3.3. Les objectifs visés et les études réalisées . . . . .	134
4.4. La démarche employée. . . . .	137
4.4.1. Les études prévisionnelles. . . . .	137
4.4.1.1. Données disponibles et données estimées . . . . .	137
4.4.1.2. Résultats des calculs thermiques et mécaniques . . . . .	140
4.4.1.3. Comparaison avec les mesures et précision des résultats . . . . .	143
4.4.2. Recalages . . . . .	144
4.4.2.1. Nouvelles données disponibles . . . . .	145
4.4.2.2. Comparaison calculs recalés / mesures. . . . .	146
4.4.3. Analyse. . . . .	147
4.4.3.1. Les limites d'un calcul thermique et les paramètres essentiels . . . . .	147
4.4.3.2. Les limites d'un calcul mécanique . . . . .	149
4.5. Bibliographie. . . . .	150
<b>Chapitre 5. La prévision des résistances au jeune âge . . . . .</b>	<b>153</b>
Laetitia D'ALOIA SCHWARTZENTRUBER	
5.1. Introduction. . . . .	153
5.2. La maturométrie ou « méthode de l'âge équivalent ». . . . .	154
5.2.1. Principes de la méthode . . . . .	154
5.2.2. Fondements scientifiques . . . . .	155
5.2.2.1. Préambule . . . . .	155
5.2.2.2. Définition de la maturité . . . . .	155
5.2.2.3. Définition de l'âge équivalent . . . . .	156
5.2.2.4. Introduction de la loi d'Arrhenius . . . . .	157
5.2.2.5. Principe général d'application . . . . .	159
5.2.3. Les limites de la méthode . . . . .	160
5.2.4. Positionnement de la méthode . . . . .	162
5.3. L'étalonnage de la méthode . . . . .	163
5.3.1. Approches expérimentales et numériques. . . . .	164
5.3.1.1. Approches expérimentales mécanique et calorimétrique . . . . .	164
5.3.1.2. Approches numériques . . . . .	166
5.3.2. Détermination de l'énergie d'activation apparente du béton : $Ea$ . . . . .	167
5.3.2.1. Méthode des vitesses . . . . .	167
5.3.2.2. Méthode de superposition . . . . .	170
5.3.3. Détermination de la courbe d'étalonnage . . . . .	171
5.3.4. Cas des bétons à période dormante longue . . . . .	173
5.3.4.1. Définition du temps caractéristique $t^*$ . . . . .	173

5.3.4.1.1. Modélisation de $t^*$ par la loi d'Arrhenius : détermination de $Ea_0$ . . . . .	174
5.3.4.1.2. Prédiction de $t^*$ sur chantier . . . . .	174
5.3.4.2. Détermination de la courbe d'étalonnage et de $Ea$ au-delà de $t^*$ . . . . .	175
5.3.4.2.1. Cas de la méthode des vitesses . . . . .	175
5.3.4.2.2. Cas de la méthode de superposition . . . . .	176
5.4. La mise en place de la méthode sur chantier . . . . .	176
5.4.1. La fabrication du béton . . . . .	176
5.4.2. La définition des points critiques de l'ouvrage et l'instrumentation. . . . .	177
5.4.2.1. Les points critiques. . . . .	177
5.4.2.2. L'instrumentation. . . . .	177
5.4.3. L'étalonnage au laboratoire et sur chantier . . . . .	178
5.4.4. La mise en place des contrôles de conformité . . . . .	179
5.5. Conclusion . . . . .	180
5.6. Bibliographie. . . . .	180
<b>Principales notations</b> . . . . .	<b>185</b>
<b>Index</b> . . . . .	<b>187</b>