
collection génie civil dirigée par Jacky Mazars

Propriétés physiques du béton et de ses constituants

Jean-Pierre Ollivier
Jean-Michel Torrenti
Myriam Carcassès

 hermes

Lavoisier

Propriétés physiques du béton et de ses constituants

A Jean-Claude Maso

© LAVOISIER, 2012

LAVOISIER

14, rue de Provigny

94230 Cachan

www.hermes-science.com

www.lavoisier.fr

ISBN 978-2-7462-3833-6

ISSN 1771-9011

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, d'une part, que les "copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective" et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, "toute représentation ou reproduction intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause, est illicite" (article L. 122-4). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

Tous les noms de sociétés ou de produits cités dans cet ouvrage sont utilisés à des fins d'identification et sont des marques de leurs détenteurs respectifs.

Propriétés physiques du béton et de ses constituants

Jean-Pierre Ollivier
Jean-Michel Torrenti
Myriam Carcassès

Hermès
Science
— publications —

Lavoisier

DIRECTION ÉDITORIALE FÉLIX DARVE

Collection dirigée par JACKY MAZARS

Christian CREMONA – Approche probabiliste de la performance des structures, 2010

Denys BREYSSE – Maîtrise des risques en génie civil 1, 2 et 3, 2009

Maurice LEMAIRE *et al.* – Fiabilité des structures : couplage mécano-fiabiliste statique, 2005

Roberto NOVA – Fondements de la mécanique des sols, 2005

Patrick PAULTRE – Dynamique des structures, 2005

Table des matières

| | |
|--|----|
| Introduction | 11 |
| Chapitre 1. Présentation des matériaux granulaires, définitions | 13 |
| 1.1. Introduction. | 13 |
| 1.2. Masses volumiques | 14 |
| 1.2.1. A l'échelle des grains. | 14 |
| 1.2.2. A l'échelle du matériau granulaire | 16 |
| 1.3. Porosité du matériau granulaire | 16 |
| 1.4. Compacité. | 16 |
| 1.5. Indice des vides | 16 |
| 1.6. Compacité relative. | 17 |
| 1.7. Degré de saturation | 18 |
| 1.8. Teneur en eau | 18 |
| 1.8.1. Mesure de la teneur en eau | 19 |
| 1.8.1.1. Méthode gravimétrique | 19 |
| 1.8.1.2. Méthode chimique | 20 |
| 1.8.1.3. Méthodes électriques | 20 |
| 1.8.1.4. Méthode basée sur l'absorption des neutrons lents | 20 |
| 1.8.1.5. Méthode basée sur la réflexion d'un rayon infrarouge | 21 |
| 1.8.2. Comparaison des méthodes de mesure | 22 |
| 1.9. Relation entre les différentes masses volumiques | 22 |
| 1.10. Absorption d'eau. | 25 |
| 1.11. Bibliographie | 25 |
| 1.12. Exercices | 25 |

- Chapitre 2. Granulométrie 31**
 - 2.1. Introduction. 31
 - 2.2. Caractérisation de la forme des grains 33
 - 2.3. Méthodes d’analyses granulométriques 34
 - 2.3.1. Le tamisage 34
 - 2.3.1.1. Principe du tamisage. 34
 - 2.3.1.2. Présentation des résultats du tamisage 36
 - 2.3.1.3. Efficacité du tamisage 37
 - 2.3.2. Les méthodes granulométriques basées sur la sédimentation 40
 - 2.3.2.1. Principe du tri granulométrique par sédimentation 40
 - 2.3.2.2. Pipette d’Andreasen 43
 - 2.3.2.3. Densimètre (ou hydromètre) de Bouyoucos 44
 - 2.3.2.4. Balance de sédimentation 45
 - 2.3.2.5. Autres méthodes basées sur la sédimentation 46
 - 2.3.3. Le compteur Coulter 46
 - 2.3.4. Le granulomètre à laser (NF ISO 13320-1). 48
 - 2.3.5. L’analyse d’images couplée
aux observations microscopiques 49
 - 2.4. La granularité, présentation des résultats 49
 - 2.4.1. Les courbes granulaires cumulatives. 49
 - 2.4.1.1. Diamètre efficace. 50
 - 2.4.1.2. Forme des courbes granulaires cumulatives 51
 - 2.4.2. Les courbes de fréquence granulaires 52
 - 2.4.3. Les autres présentations de la granularité. 53
 - 2.4.3.1. Module de finesse d’un sable à béton. 53
 - 2.5. Granularité d’un mélange de granulat 55
 - 2.6. Bibliographie. 56
 - 2.7. Exercices 56

- Chapitre 3. Surface spécifique des matériaux. 63**
 - 3.1. Définition 63
 - 3.1.1. Intérêt d’une telle grandeur : cas de l’hydratation
du ciment Portland 64
 - 3.2. Méthode de calcul de la surface spécifique
d’un matériau granulaire. 65
 - 3.2.1. Poudre formée de grains identiques de forme déterminée 65
 - 3.2.2. Poudre homogène de dimensions non uniformes 66
 - 3.3. Méthodes basées sur des mesures de perméabilité et de porosité 67
 - 3.3.1. Equation de Carman-Kozeny 67

| | |
|---|----|
| 3.3.2. Appareil de Lea et Nurse | 72 |
| 3.3.3. Appareil de Blaine | 73 |
| 3.4. Méthode basée sur l'adsorption d'un gaz | 76 |
| 3.4.1. Cinétique de l'adsorption | 76 |
| 3.4.2. Les isothermes d'adsorption. | 77 |
| 3.4.3. Détermination de la surface spécifique à partir de l'isotherme d'adsorption | 80 |
| 3.4.4. Détermination de la surface spécifique à partir d'un point de l'isotherme | 83 |
| 3.4.5. Comparaison des techniques | 83 |
| 3.5. Essai au bleu de méthylène pour la caractérisation des fines. | 83 |
| 3.6. Bibliographie. | 84 |
| 3.7. Exercices | 84 |

Chapitre 4. Les vides dans les matériaux granulaires et les arrangements de grains

| | |
|---|-----|
| 4.1. Introduction. | 91 |
| 4.2. Empilements de sphères (monodimensionnelles : $\Phi = 2R$), approche théorique et données expérimentales. | 92 |
| 4.2.1. Empilements 3D à base de couches carrées. | 92 |
| 4.2.2. Empilements 3D à base de couches rhombiques. | 93 |
| 4.2.3. Porosité des empilements de sphères identiques | 94 |
| 4.2.3.1. Calcul de la porosité par une méthode directe | 94 |
| 4.2.3.2. Calcul de la porosité basé sur l'étude de la variation de la section des vides. | 97 |
| 4.2.3.3. Bilan des résultats | 98 |
| 4.3. Données expérimentales | 99 |
| 4.4. Influence de la forme des grains | 101 |
| 4.5. Recherche d'une compacité maximale. | 101 |
| 4.5.1. Mélanges de deux granulats monodimensionnels | 103 |
| 4.5.2. Analyse théorique de la variation de la compacité avec les fractions volumiques de grains de tailles différentes. | 105 |
| 4.5.2.1. Cas des gros dominants : l'empilement des gros grains n'est pas perturbé par les petits | 105 |
| 4.5.2.2. Cas des petits dominants : l'empilement des petits grains n'est pas perturbé par les gros | 106 |
| 4.5.2.3. Généralisation du modèle linéaire sans interaction | 107 |
| 4.5.3. Modèle avec interaction | 108 |
| 4.5.3.1. Cas des petits dominants | 108 |
| 4.5.3.2. Cas des gros dominants | 109 |

| | |
|--|------------|
| 4.5.4. Prise en compte de la vibration, modèle d'empilement compressible (d'après de Larrard) | 111 |
| 4.5.4.1. Application au mélange R8R1 | 113 |
| 4.5.5. Mélanges de trois granulats monodimensionnels | 114 |
| 4.5.5.1. Mélanges de granulats élémentaires, résultats de Caquot | 115 |
| 4.5.5.2. Influence de l'eau sur la porosité des mélanges granulaires | 116 |
| 4.5.5.3. Intérêt de la défloculation des grains de ciment, vers les bétons de hautes et très hautes performances | 119 |
| 4.6. Bibliographie | 121 |
| 4.7. Exercices | 121 |
| | |
| Chapitre 5. Les vides dans les bétons | 127 |
| 5.1. Définitions | 127 |
| 5.2. La caractérisation des matériaux hétérogènes | 130 |
| 5.3. La surface spécifique des solides poreux | 133 |
| 5.4. Mesures de la porosité des matériaux consolidés | 136 |
| 5.4.1. Mesure de la porosité totale | 136 |
| 5.4.1.1. Première méthode : par broyage | 136 |
| 5.4.1.2. Deuxième méthode : par analyse d'images | 136 |
| 5.4.2. Mesure de la porosité ouverte | 138 |
| 5.4.2.1. Méthode d'imprégnation par l'eau : porosité accessible à l'eau | 138 |
| 5.4.2.2. Pycnomètre à gaz | 139 |
| 5.4.2.3. Méthode par intrusion de mercure | 140 |
| 5.4.3. Détermination de la porosité fermée | 141 |
| 5.5. Porométrie | 141 |
| 5.5.1. Le porosimètre au mercure (ou porosimètre Purcell) | 141 |
| 5.5.1.1. Les bases de la capillarité | 142 |
| 5.5.1.2. Loi de Laplace | 144 |
| 5.5.1.3. Equilibre d'une arête de raccordement. Loi de Young, mouillage des surfaces | 145 |
| 5.5.1.4. Ascension et descente capillaire : lois de Jurin | 148 |
| 5.5.1.5. Imbibition et drainage | 151 |
| 5.5.1.6. Principe du porosimètre à mercure | 152 |
| 5.5.2. L'analyse d'images | 157 |
| 5.5.3. Méthode basée sur l'adsorption d'un gaz | 158 |
| 5.5.3.1. Loi de Kelvin | 159 |
| 5.5.3.2. Loi de Kelvin-Laplace | 160 |

| | |
|---|------------|
| 5.5.3.3. Méthode BJH (Barret, Joyner et Halenda) | 161 |
| 5.5.4. Porosimètre dynamique, porosimètre de Brémond | 163 |
| 5.5.5. Thermoporométrie | 164 |
| 5.5.6. SAXS, SANS | 166 |
| 5.5.7. Techniques innovantes en cours de développement | 166 |
| 5.6. Bibliographie | 167 |
| 5.7. Exercices | 169 |
| | |
| Chapitre 6. La diffusion | 185 |
| 6.1. Les bases de la diffusion | 185 |
| 6.1.1. Approche microscopique de la diffusion | 185 |
| 6.1.1.1. Cas des fluides | 186 |
| 6.1.1.2. Cas des métaux | 189 |
| 6.1.2. Diffusion et transport de matière à l'échelle macroscopique, première loi de Fick | 190 |
| 6.1.3. Approche thermodynamique de la diffusion moléculaire | 192 |
| 6.1.4. La diffusion des ions en solution | 193 |
| 6.1.4.1. Relation de Nernst-Planck | 193 |
| 6.1.4.2. Relation de Nernst-Einstein | 196 |
| 6.1.5. La deuxième loi de Fick | 197 |
| 6.1.6. Profil de concentration des espèces diffusantes | 198 |
| 6.1.6.1. Méthode de réflexion et superposition | 198 |
| 6.1.6.2. Méthode de séparation des variables | 200 |
| 6.1.6.3. Méthode utilisant la transformée de Laplace | 202 |
| 6.2. La diffusion en milieu poreux | 205 |
| 6.2.1. Diffusion moléculaire | 206 |
| 6.2.2. La diffusion ionique | 207 |
| 6.2.3. La cinétique de pénétration d'une espèce par diffusion, deuxième loi de Fick | 208 |
| 6.3. La mesure du coefficient de diffusion effectif dans les matériaux poreux | 213 |
| 6.3.1. Méthode de la cellule de diffusion | 213 |
| 6.3.2. Essais de migration sous champ électrique | 218 |
| 6.3.3. Mesure du coefficient de diffusion apparent par immersion | 224 |
| 6.3.4. Principe des méthodes de mesure du coefficient de diffusion effectif basées sur des mesures de conductivité | 225 |
| 6.3.5. Ordres de grandeur du coefficient de diffusion dans les bétons | 226 |
| 6.4. Relation entre le coefficient de diffusion effectif et la structure poreuse | 228 |

| | |
|---|------------|
| 6.4.1. Les modèles empiriques | 229 |
| 6.4.1.1. La loi d'Archie | 229 |
| 6.4.1.2. Autres relations | 231 |
| 6.4.2. Les modèles polyphasiques | 232 |
| 6.4.2.1. Modèles série et parallèle | 232 |
| 6.4.2.2. Technique d'homogénéisation (modèle à trois phases) . . . | 233 |
| 6.4.2.3. Modèles issus de la théorie des milieux effectifs | 234 |
| 6.4.2.4. Modèle de Garboczi | 236 |
| 6.5. La diffusion gazeuse | 237 |
| 6.5.1. La diffusion d'un gaz en milieu infini | 238 |
| 6.5.2. La diffusion d'un gaz dans un pore | 239 |
| 6.5.3. La diffusion d'un gaz dans un matériau poreux | 240 |
| 6.5.4. La diffusion d'un gaz dans un milieu poreux réactif | 242 |
| 6.6. Bibliographie | 243 |
| 6.7. Exercices | 246 |
| | |
| Chapitre 7. La perméabilité | 257 |
| 7.1. Introduction. | 257 |
| 7.2. Définition de la perméabilité d'un matériau. | 258 |
| 7.3. Mesure de la perméabilité | 260 |
| 7.3.1. Perméamètres à charge constante | 260 |
| 7.3.2. Analyse des résultats, validité de la loi de Darcy | 263 |
| 7.3.3. Méthodes de mesure de la perméabilité au gaz. | 270 |
| 7.3.4. Perméamètres à charge variable | 270 |
| 7.4. Relation entre la perméabilité et la structure poreuse | 272 |
| 7.4.1. Les modèles empiriques | 272 |
| 7.4.2. Les modèles physiques. | 273 |
| 7.4.2.1. Modèle de Carman-Kozeny. | 273 |
| 7.4.2.2. Modèles statistiques simples | 274 |
| 7.4.2.3. Modèles basés sur la théorie de la percolation. | 274 |
| 7.4.2.4. Modèles statistiques introduisant le concept de percolation | 275 |
| 7.5. Le séchage des bétons. | 276 |
| 7.5.1. Les mécanismes physiques | 277 |
| 7.5.2. Modélisation simplifiée du séchage | 278 |
| 7.6. Paramètres physiques et approche performantielle. | 280 |
| 7.7. Bibliographie. | 281 |
| 7.8. Exercices | 284 |
| | |
| Index | 303 |

Introduction

Le béton est fabriqué en usine ou sur le chantier à partir de constituants variés : du ciment, de l'eau et différents matériaux granulaires comme du sable, des gravillons et diverses additions minérales. Il peut aussi contenir des adjuvants destinés à modifier ses propriétés de mise en œuvre à l'état frais (retardateur ou accélérateur de prise, superplastifiant par exemple) ou ses propriétés à l'état durci (entraîneur d'air par exemple). Les propriétés escomptées pour ce matériau sont variées. Elles concernent aussi bien l'état frais à travers son aptitude à être transporté et coulé dans des coffrages plus ou moins ferrailés que l'état durci à travers des performances comme la résistance mécanique, la résistance à des environnements agressifs, l'isolation phonique ou thermique par exemple. La formulation d'un béton consiste à rechercher les constituants et leurs proportions permettant de satisfaire un cahier des charges dont les clauses peuvent être très variées. Tout ceci doit être fait sans perdre de vue que le béton est un matériau de grande diffusion c'est-à-dire que son coût doit rester limité et qu'il faut prendre en considération le fait qu'il est préparé et mis en œuvre sur chantier dans des conditions environnementales variables.

La compréhension des propriétés rhéologiques à l'état frais, des phénomènes d'hydratation du ciment responsables de la structuration, des relations entre les caractéristiques du solide poreux obtenu et ses performances mécaniques ou sa résistance à la pénétration agressifs, fait appel à des connaissances complexes en physico-chimie des matériaux poreux réactifs. L'élaboration de règles de formulation simples passe donc par une assimilation de ces connaissances et par une bonne maîtrise des propriétés de ces matériaux. L'objectif de ce livre est d'apporter au formulateur des connaissances utiles sur les matériaux granulaires et sur les matériaux poreux qui lui permettront de concevoir des bétons de façon innovante. Les sujets abordés portent sur la caractérisation des matériaux granulaires, les notions de porosité et de surface spécifique et les propriétés de transport (diffusion et perméation) des bétons. Certains de ces sujets sont déjà traités dans des livres

généralistes dédiés aux matériaux granulaires ou poreux. L'objectif est ici de les rassembler dans un seul ouvrage en les adaptant à l'usage des spécialistes du béton. Des applications sous forme d'exercices sont proposées en fin de chaque chapitre afin de permettre aux lecteurs d'assimiler les connaissances théoriques et de les appliquer à des problèmes concrets de génie civil.

A l'état durci, le béton est un matériau poreux complexe. Ses propriétés d'usage (performances mécaniques ou thermiques, durabilité...) sont liées à sa structure poreuse qui elle-même dépend de l'arrangement des grains à l'état frais.

Etudiant les propriétés des matériaux granulaires et celles de leurs mélanges, cet ouvrage propose différents outils permettant au formulateur de concevoir des bétons de façon innovante. Afin de décrire les méthodes de caractérisation des matériaux, il analyse les propriétés physiques sur lesquelles elles reposent et établit ainsi leurs limites. Il développe également les notions de porosité et de surface spécifique et présente les propriétés de transport des bétons (diffusion et perméation).

Chaque chapitre se termine par plusieurs exercices permettant d'assimiler les connaissances théoriques présentées et de les appliquer à des problèmes concrets de génie civil.

Les auteurs

Professeur émérite à l'INSA de Toulouse, Jean-Pierre Ollivier est chercheur au laboratoire matériaux et durabilité des constructions, où il étudie la durabilité des bétons.

Professeur à l'Ecole nationale des ponts et chaussées, Jean-Michel Torrenti est responsable du département Matériaux de l'IFSTTAR, où il s'intéresse au comportement des bétons.

Professeur à l'université de Toulouse (IUT département de génie civil), Myriam Carcassès exerce ses activités de recherche au sein du laboratoire matériaux et durabilité des constructions sur le thème de la durabilité des bétons.