

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

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	91
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

10

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

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

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.

hermes
Science
— publications —

www.hermes-science.com

978-2-7462-3833-6



9 782746 238336