

Christian **Lemaitre**

Mise en œuvre et emploi des

matériaux de construction



Sols | Pierres | Terres cuites | Liants hydrauliques |
Bétons | Métaux & alliages métalliques | Bois |
Verre & vitrages | Dégradations, protection,
maintenance | Préoccupations sociétales

EYROLLES

Mise en œuvre et emploi des

matériaux de construction



Voici un **panorama des principaux types de matériaux**, depuis la caractérisation et l'adaptation des sols jusqu'aux vitrages, en passant par les matériaux de structure, d'isolation et d'enveloppe. Ce manuel enseigne comment il convient de les employer dans le domaine de la construction, tant pour la structure que pour le second œuvre.

Pour chacun de ces matériaux, l'auteur décrit son mode d'élaboration, ses propriétés fonctionnelles, les usages qui en découlent, ainsi que le mode de mise en œuvre de ses produits dérivés. En étudiant de surcroît l'usure et la durée des matériaux ainsi que les méthodes qui permettent de prolonger la vie des ouvrages, l'auteur évoque les questions soulevées par les conséquences sociétales de leur usage dans la **perspective du développement durable**.

Enfin, à la description de chacun des matériaux sont associées les **normes** et la **réglementation** dont, naturellement, la réglementation thermique.

SOMMAIRE

- sols
- pierres
- terres cuites
- liants hydrauliques
- bétons
- métaux & alliages métalliques
- bois
- verre et vitrages
- dégradations, protection, maintenance
- préoccupations sociétales

Dans une pagination réduite cette initiation moderne à l'indispensable connaissance des matériaux de construction et de leurs fonctionnalités s'adresse en priorité aux élèves et aux étudiants en génie civil abordant pour la première fois les matériaux de construction dans les IUT, dans les licences de matériaux, dans les Masters pro et dans les écoles d'ingénieurs orientées BTP (UT, ESITC, ESTP, INSA, etc.).

Les formateurs et les stagiaires de la formation continue y trouveront l'essentiel de ce qu'il faut savoir.

Professeur des Universités, **Christian Lemaitre** enseigne à l'**Université de Technologie de Compiègne**. Son cours, destiné aux élèves ingénieurs en systèmes urbains porte sur les matériaux de construction. Il est notamment titulaire d'un doctorat traitant de la tenue à la corrosion des métaux, sujet sur lequel il délivre également un cours destiné aux élèves ingénieurs en mécanique.

Du même auteur
dans la même collection

**Les propriétés
physico-chimiques
des matériaux
de construction**



www.editions-eyrolles.com

Mise en œuvre et emploi des matériaux de construction

Christian Lemaitre

Mise en œuvre et emploi des matériaux de construction

Sols | Pierres | Terres cuites | Liants hydrauliques |
Bétons | Métaux & alliages métalliques | Bois |
Verre & vitrages | Dégradations, protection,
maintenance | Préoccupations sociétales

EYROLLES

The logo graphic for EYROLLES, featuring a horizontal line with a small circle in the center.

ÉDITIONS EYROLLES
61, bd Saint-Germain
75240 Paris Cedex 05
www.editions-eyrolles.com

Du même auteur, chez le même éditeur :

Les propriétés physico-chimiques des matériaux de construction, 144 pages, 2012

**et des dizaines de livres de construction, de génie civil et d'architecture
dans le catalogue en ligne des éditions Eyrolles :
www.editions-eyrolles.com**

En application de la loi du 11 mars 1957, il est interdit de reproduire intégralement ou partiellement le présent ouvrage, sur quelque support que ce soit, sans l'autorisation de l'Éditeur ou du Centre Français d'exploitation du droit de copie, 20, rue des Grands Augustins, 75006 Paris.

© Groupe Eyrolles, 2012, ISBN : 978-2-212-13393-6

Table des matières

CHAPITRE 1. Les sols	3
1.1 Introduction	3
1.2 Les roches en géologie	3
1.2.1 Roches magmatiques	4
1.2.2 Roches sédimentaires	5
1.2.3 Roches métamorphiques	6
1.3 Les sols en géotechnique	6
1.3.1 Le squelette solide	7
1.3.2 Gaz dans les sols	7
1.3.3 L'eau dans les sols	7
1.3.4 Pondération des sols	8
1.3.5 Sols cohérents ou pulvérulents	9
1.3.5.1 <i>Comportement des sols cohérents</i>	9
1.3.5.2 <i>Limites d'Atterberg</i>	10
1.3.6 Argilosité et propreté du sol	11
1.3.6.1 <i>La VBS</i>	11
1.3.6.2 <i>Propreté</i>	11
1.4 Granulométrie et classification des sols	12
1.4.1 Courbe de granulométrie	12
1.4.2 Abaque de Taylor.....	13
1.4.3 Abaque de Casagrande	13
1.4.4 Classification normalisée	15
1.5 Hydraulique des sols	16
1.5.1 Charge hydraulique dans un sol saturé	16
1.5.2 Gradient hydraulique	17
1.5.3 Loi de Darcy, perméabilité des sols	17

1.6 Propriétés mécaniques des sols et cohésion	18
1.6.1 Compressibilité	18
1.6.2 Cisaillement par compression	18
1.6.3 Contraintes admissibles	20
1.7 Techniques de renforcement des sols meubles	20
1.7.1 Le drainage.....	20
1.7.1.1 <i>Le drainage vertical</i>	20
1.7.1.2 <i>Le drainage sous vide</i>	21
1.7.2 La congélation	21
1.7.2.1 <i>La méthode ouverte</i>	22
1.7.2.2 <i>La méthode fermée</i>	22
1.7.3 Le compactage.....	23
1.7.3.1 <i>Le compactage dynamique</i>	23
1.7.3.2 <i>Le vibro-compactage</i>	23
1.7.4 La consolidation par colonnes	24
1.7.4.1 <i>Les plots et colonnes ballastés</i>	24
1.7.4.2 <i>Le jet de coulis</i>	24
1.7.5 La consolidation chimique	25
 CHAPITRE 2. Les pierres	 27
2.1 Introduction	27
2.2 Nature des pierres à bâtir.....	28
2.2.1 Basalte	28
2.2.2 Granite	29
2.2.3 Calcaire	29
2.2.4 Meulière	30
2.2.5 Grès	30
2.2.6 Gneiss	31
2.2.7 Schistes	31
2.2.8 Marbres	31
2.3 Extraction et conservation	32
2.3.1 Extraction	32
2.3.2 Conservation	32
2.4 Examens minéralogiques	33
2.4.1 Examen visuel et à la loupe.....	33
2.4.2 Examen au microscope optique ou électronique	33
2.5 Caractérisation et propriétés	34
2.5.1 Caractéristiques normalisées	34

2.5.2	Masse volumique.....	34
2.5.3	Absorption d'eau.....	35
2.5.4	Résistance mécanique.....	36
2.5.5	Autres caractéristiques	38
2.5.5.1	<i>Propagation du son</i>	38
2.5.5.2	<i>Résistance à l'usure</i>	38
2.5.5.3	<i>Propriétés thermiques</i>	39
2.5.5.4	<i>Géivité</i>	39
2.5.5.5	<i>Résistance au feu</i>	40
2.6	Utilisations et critères de choix	40
2.6.1	Éléments de structure	40
2.6.2	Éléments d'enveloppe.....	40
2.6.2.1	<i>Toitures : lauzes et ardoises</i>	40
2.6.2.2	<i>Murs extérieurs : parements et bardages</i>	42
2.7	La laine de roche	43
CHAPITRE 3.	Les terres cuites	45
3.1	Introduction	45
3.2	Production et mise en forme	46
3.2.1	Les matières premières	46
3.2.1.1	La terre crue	46
3.2.1.2	La terre cuite	47
3.2.2	La mise en forme	47
3.2.3	La cuisson	48
3.2.4	La finition	49
3.2.5	Production	49
3.3	La brique : propriétés	50
3.3.1	Premier examen	50
3.3.2	Dimensions	50
3.3.3	Spécifications	51
3.3.3.1	<i>Résistance mécanique</i>	51
3.3.3.2	<i>Coefficient d'absorption d'eau par remontée capillaire</i>	52
3.3.3.3	<i>Résistance au gel, durabilité</i>	52
3.3.3.4	<i>Dilatation à l'humidité</i>	52
3.3.3.5	<i>Éclatement</i>	52
3.3.3.6	<i>Adhérence au mortier</i>	53
3.3.3.7	<i>Réaction au feu</i>	53
3.3.4	Propriétés thermiques et hydriques	54
3.3.5	Propriétés acoustiques	54
3.3.6	Salubrité	55

3.4 Les murs de brique	55
3.4.1 Les briques HD et LD	55
3.4.2 Stabilité d'un mur	58
3.5 Structures horizontales en briques	59
3.5.1 Planchers	59
3.5.1.1 <i>Planchers à poutrelles métalliques préenrobées</i>	59
3.5.1.2 <i>Planchers à poutrelles précontraintes</i>	59
3.5.1.3 <i>Plafonds suspendus</i>	59
3.5.2 Entrevous	60
3.6 Les toitures : fonctions et caractéristiques	60
3.6.1 Définitions, terminologie	60
3.6.2 Fonctions d'une toiture	62
3.6.3 Toitures chaudes, toitures froides : ventilations sous toitures	64
3.6.4 Choix de matériaux et poids de couverture	65
3.6.5 Pente minimale d'une toiture	66
3.7 Les tuiles en terre cuite : typologies et spécificités	67
3.7.1 Caractéristiques des tuiles	67
3.7.1.1 <i>Les tuiles canal</i>	68
3.7.1.2 <i>Les tuiles plates</i>	69
3.7.1.3 <i>Les tuiles à emboîtement</i>	70
3.7.2 Choix du type de tuiles	70
3.8 Autres applications de la terre cuite	71
3.8.1 Boisseaux pour conduits de cheminée	71
3.8.2 Tuyaux de drainage	71
3.8.3 Briques décoratives	72
3.8.4 Pavés autobloquants	72
3.8.5 Granulats d'argile et schiste expansés (structure alvéolaire), mousse d'argile	72
3.9 Les carrelages	72
CHAPITRE 4. Les liants hydrauliques	75
4.1 Introduction	75
4.2 La chaux	76
4.2.1 Éléments historiques	76
4.2.2 Fabrication de la chaux aérienne	77
4.2.3 Caractérisation et utilisation des chaux aériennes	79
4.2.4 Les chaux hydrauliques	80
4.2.5 Cycle de la chaux hydraulique	81
4.2.6 Propriétés et utilisations des chaux hydrauliques	82

4.3	Les silico-calcaires	83
4.4	Le plâtre	83
4.4.1	Fabrication	83
4.4.2	Propriétés du plâtre	85
4.4.2.1	<i>Thermo-hygrométrie</i>	85
4.4.2.2	<i>Propriétés acoustiques</i>	86
4.4.2.3	<i>Ténue au feu</i>	86
4.4.2.4	<i>Plâtre et environnement</i>	86
4.5	Le clinker	86
4.5.1	Formulation du clinker	86
4.5.2	Fabrication du clinker	87
4.6	Les ciments	88
4.6.1	Composition des ciments courants	88
4.6.2	Résistance mécanique des ciments courants	89
4.6.3	Ciments spéciaux	90
4.6.4	Propriétés de ciments	91
4.6.4.1	<i>Surface spécifique de la poudre de ciment</i>	91
4.6.4.2	<i>Masse volumique de la poudre de ciment</i>	91
4.6.4.3	<i>Début de prise de la pâte</i>	91
4.6.4.4	<i>Retrait</i>	91
4.6.4.5	<i>Épaisseur minimale</i>	92
4.7	Comparaison des propriétés des chaux et ciments	92
CHAPITRE 5. Les bétons		93
5.1	Introduction	93
5.2	Les différents bétons : compositions, caractéristiques	95
5.2.1	Généralités	95
5.2.2	Les granulats	95
5.2.3	Optimum granulaire d'un mélange	96
5.2.4	Les adjuvants	98
5.3	Le béton frais	98
5.3.1	Comportement rhéologique du béton frais	99
5.3.2	Le vibrage des bétons	99
5.3.3	Caractérisation de la plasticité d'un béton frais	101
5.3.3.1	<i>Méthode d'Abrams</i>	102
5.3.3.2	<i>Méthode Vèbé</i>	102

5.4 Hydratation des bétons de ciment	103
5.4.1 Durcissement	103
5.4.2 Échauffement	104
5.4.3 Retrait endogène	105
5.5 Le béton durci	105
5.5.1 Retrait des bétons	105
5.5.2 Caractéristiques mécaniques	105
5.5.2.1 <i>Rôle de la composition sur la résistance</i>	105
5.5.2.2 <i>Désignation normalisée</i>	106
5.5.2.3 <i>Élasticité (déformation instantanée)</i>	106
5.5.2.4 <i>Fluage (déformation différée)</i>	106
5.5.3 Propriétés thermiques	107
5.5.3.1 <i>Dilatation thermique</i>	107
5.5.3.2 <i>Conductivité</i>	107
5.5.3.3 <i>Capacité calorifique</i>	108
5.5.3.4 <i>Tenue au feu</i>	108
5.5.4 Propriétés acoustiques	109
5.5.5 Résistance aux expositions agressives	109
5.5.6 Formulation d'un béton à partir du cahier des charges	111
5.6 Le béton armé	112
5.6.1 Généralités	112
5.6.2 Les différents types d'armatures	113
5.6.3 Adhésion des armatures	115
5.6.4 Enrobages des armatures	117
5.7 Le béton précontraint	118
5.7.1 Généralités	118
5.7.2 Principe	118
5.7.3 Mode opératoire	118
5.7.4 Positionnement des câbles	120
5.7.4.1 <i>Précontrainte centrée</i>	120
5.7.4.2 <i>Précontrainte excentrée</i>	121
5.8 Le béton cellulaire	122
5.8.1 Généralités	122
5.8.2 Fabrication	122
5.8.3 Propriétés	123
5.8.4 Produits	124
5.8.4.1 <i>Les blocs</i>	124
5.8.4.2 <i>Les panneaux</i>	124
5.8.4.3 <i>Autres produits</i>	124
5.9 Les éléments préfabriqués en béton	124
5.9.1 Généralités	124

5.9.2	Les blocs traditionnels en béton	125
5.9.2.1	<i>Formes et dimensions</i>	125
5.9.2.2	<i>Caractérisation mécanique</i>	126
5.9.3	Les panneaux	127
5.9.4	Systèmes de plancher	127
5.9.5	Autres produits	128
5.10	Les bétons hautes performances (BHP et BTHP)	130
5.10.1	Généralités	130
5.10.1.1	<i>Rôle de l'eau</i>	130
5.10.1.2	<i>Rôle de la granulométrie</i>	130
5.10.2	Actions du superplastifiant	130
5.10.3	Performances des BHP	132
5.11	Les bétons autoplaçants (BAP)	132
5.11.1	Principe.....	132
5.11.2	Formulation	133
5.11.3	Validation de la formule	133
5.11.4	Classification des BAP	134
5.12	Les bétons fibrés et les BFUP	135
5.12.1	Généralités	135
5.12.2	Principe	136
5.12.3	Propriétés et utilisations	136
5.12.3.1	<i>Fibres organiques : polypropylène</i>	137
5.12.3.2	<i>Fibres minérales : verre</i>	137
5.12.3.3	<i>Fibres métalliques : acier</i>	137
5.12.4	Les bétons fibrés à ultra hautes performances (BFUP)	137
CHAPITRE 6.	Les métaux et alliages métalliques	139
6.1	Introduction	139
6.2	Avantages et inconvénients des métaux	140
6.2.1	Une résistance à la traction et une élasticité que n'a pas le béton	141
6.2.2	Un ratio résistance/poids intéressant	141
6.2.3	Une mise en œuvre simplifiée	142
6.2.4	Une bonne conductivité thermique et électrique	143
6.2.5	Incombustibilité et tenue au feu	143
6.2.6	Transmission et réverbération acoustique	144
6.2.7	Tenue dans la durée et résistance à la corrosion	144
6.3	Les alliages métalliques	144
6.3.1	Mélanges et combinaisons	144
6.3.2	Les composés définis	145

6.3.3	Les solutions solides	145
6.3.4	Diagrammes de phases	146
6.4	Les fontes et les aciers	147
6.4.1	Le fer, généralités	147
6.4.2	Le fer et le carbone	148
6.4.3	Élaboration des fontes et des aciers : la sidérurgie	150
6.4.3.1	<i>Réduction des oxydes dans le haut-fourneau</i>	150
6.4.3.2	<i>Affinage de la fonte</i>	151
6.4.4	Microstructures des fontes et des aciers	152
6.4.5	Demi-produits	153
6.4.6	Traitements thermiques	154
6.4.7	Les différents types d'aciers	154
6.4.8	Les produits finis	155
6.4.9	Les poutrelles métalliques	158
6.4.10	Les câbles	159
6.5	L'aluminium et ses alliages	160
6.5.1	Généralités	160
6.5.2	Obtention de l'aluminium	160
6.5.3	Propriétés mécaniques et physiques	161
6.5.4	Les alliages d'aluminium	161
6.5.5	Tenue aux milieux agressifs des alliages d'aluminium	162
6.5.6	Usages des alliages d'aluminium	162
6.6	Le cuivre et ses alliages	163
6.6.1	Généralités	163
6.6.2	Obtention du cuivre	164
6.6.3	Propriétés du cuivre	165
6.6.4	Les alliages de cuivre	165
6.6.5	Les usages du cuivre	166
6.7	Le zinc	166
6.7.1	Généralités	166
6.7.2	Obtention du zinc	167
6.7.2.1	<i>Voie pyrométallurgique</i>	167
6.7.2.2	<i>Voie hydrométallurgique</i>	168
6.7.3	Propriétés du zinc	168
6.7.4	Les alliages de zinc	169
6.7.5	La galvanisation	169
6.7.6	Les usages du zinc dans le bâtiment	170
6.8	Le plomb	171
6.8.1	Généralités	171
6.8.2	Quelques usages particuliers du plomb	171

CHAPITRE 7. Le bois et ses dérivés	173
7.1 Introduction	173
7.2 Les arbres et les forêts	174
7.2.1 Les arbres	174
7.2.2 Les forêts	176
7.2.3 Gestion durable des forêts	178
7.3 Structure et composition du bois	178
7.3.1 Croissance de l'arbre	178
7.3.2 Microstructure du bois	179
7.3.3 Composition chimique	181
7.4 Propriétés physiques du bois	182
7.4.1 Masse volumique	183
7.4.2 Hygroscopie du bois	184
7.4.2.1 <i>Fixation et retrait de l'eau</i>	184
7.4.2.2 <i>Taux d'humidité du bois</i>	184
7.4.2.3 <i>Séchage du bois</i>	186
7.4.3 Propriétés mécaniques	187
7.4.4 Propriétés thermiques	188
7.4.4.1 <i>Dilatation thermique</i>	188
7.4.4.2 <i>Conductivité thermique</i>	188
7.4.5 Comportement au feu	189
7.4.5.1 <i>Réaction au feu</i>	189
7.4.5.2 <i>Résistance au feu</i>	189
7.4.5.3 <i>Ignifugation du bois</i>	190
7.4.6 Propriétés acoustiques	191
7.5 Classification du bois de construction	191
7.5.1 Classification visuelle	191
7.5.2 Classification mécanique	192
7.5.3 Dimensions	193
7.6 Produits dérivés du bois	193
7.6.1 Généralités	193
7.6.2 Les liants	194
7.6.2.1 <i>Aspects normatifs</i>	194
7.6.2.2 <i>Adhésifs thermodurcissables</i>	195
7.6.2.3 <i>Adhésifs thermoplastiques</i>	195
7.6.2.4 <i>Colles naturelles</i>	195
7.6.2.5 <i>Liants hydrauliques</i>	195
7.6.3 Les panneaux	196
7.6.3.1 <i>Panneaux de particules</i>	196

7.6.3.2	Panneaux de lamelles orientés (OSB).....	196
7.6.3.3	Panneaux de fibres, panneaux moyenne densité (MDF)	197
7.6.4	Les plaques et lamelles.....	197
7.6.4.1	Le contreplaqué	197
7.6.4.2	Le lamibois (LVL)	198
7.6.4.3	Le déroulé-découpé lamelles longues (PSL)	199
7.6.4.4	Le tranché-découpé lamelles minces orientées (LSL)	199
7.6.5	Les dérivés du bois scié.....	199
7.6.5.1	Le lamellé-collé	199
7.6.5.2	Le contrecollé	201
7.6.5.3	Les panneautés	202
7.6.5.4	Les lamellés-collés aboutés	202

CHAPITRE 8. Le verre et les vitrages..... 203

8.1 Introduction 203

8.2 Élaboration des verres 205

8.2.1	Composition des verres	205
8.2.2	Verre soufflé	205
8.2.3	Verre coulé	206
8.2.4	Verre étiré	207
8.2.5	Procédé de la « glace flottée » (« float-glass »)	207
8.2.6	Verres thermoformés	208
8.2.7	Verres trempés	209
8.2.8	Verres feuilletés	209
8.2.9	Traitements de surface	210
8.2.10	La laine de verre	211

8.3 L'état vitreux 212

8.3.1	Structure des verres	212
8.3.2	Transition vitreuse	212

8.4 Propriétés du verre 214

8.4.1	Propriétés mécaniques	214
8.4.2	Propriétés optiques et thermiques, vitrages isolants	215
8.4.2.1	Facteur solaire (FS)	216
8.4.2.2	Coefficient de transmission lumineuse (TL)	216
8.4.2.3	Coefficient de réflexion lumineuse (RL)	216
8.4.2.4	Propriétés des vitrages	217
8.4.3	Propriétés acoustiques	219
8.4.4	Tenue au feu	220
8.4.5	Stabilité chimique	221

8.5 Les vitres extérieures : calcul des vitrages	221
8.5.1 Les trois types de vitrages extérieurs	221
8.5.2 Bases du calcul	222
8.5.3 Pression du vent sur les vitrages verticaux	223
8.5.4 Déformations admissibles	224
8.6 Les menuiseries pour les vitrages	225
8.6.1 Fonctionnalités des feuillures	225
8.6.2 Classement AEV	226
8.6.3 Réglementation thermique (RT) pour les vitrages	227
 CHAPITRE 9. Les matériaux dans la durée : dégradations, protection, maintenance	 229
9.1 Introduction	229
9.2 Paramètres physico-chimiques des détériorations	230
9.2.1 Rôle de l'eau	230
9.2.2 Rôle de l'atmosphère	233
9.2.3 Rôle de la température	234
9.2.4 Rôle du rayonnement lumineux	234
9.3 Dégradations et protection des bétons	234
9.3.1 Carbonatation	234
9.3.2 Action des chlorures	235
9.3.3 Action des sulfates	236
9.3.4 Rôle du gel-dégel	236
9.3.5 Alkali-réactions	236
9.3.6 Attaque chimique	237
9.3.7 Retrait du béton	237
9.4 Corrosion aqueuse et atmosphérique des métaux, protection	238
9.4.1 Corrosion atmosphérique	238
9.4.2 Conditions de la corrosion aqueuse, diagrammes E-pH	240
9.4.3 Couplages de métaux, série galvanique	242
9.4.4 Corrosion du fer dans les bétons	242
9.4.5 Corrosions localisées : piqûres, cavernes, fissures	243
9.4.6 Protection par passivation des métaux	243
9.4.7 Prévention : aciers inoxydables et aciers patinables	244
9.4.8 Protection cathodique du fer et des aciers	245
9.4.9 Biodétérioration des métaux	246
9.4.10 Protection contre la corrosion par traitement des surfaces	246

9.5 Dégénération et protection du bois 246

9.5.1 L'eau dans le bois 246

9.5.2 Les déformations du bois : anisotropie de retrait, prévention 247

9.5.3 Action des champignons, remèdes 248

9.5.4 Action des insectes, prévention 249

CHAPITRE 10. Matériaux de construction

et préoccupations sociétales 253

10.1 Introduction 253

10.2 Toujours plus de résistance 253

10.3 Augmenter la durée de vie des constructions 254

10.4 Diminuer la consommation énergétique 255

10.5 Améliorer le confort des usagers 256

10.6 Santé et sûreté de fonctionnement 256

10.7 Développement durable 257

Bibliographie 259

Index 263

Avant-propos

Très souvent appréhendés de façon intuitive, les matériaux de construction sont parfois mis en œuvre avec l'idée que les bonnes pratiques seront acquises sur le terrain. Un professionnel ne peut pas avoir pareille approche, car il lui faut garantir à ses clients une durée de vie satisfaisante des ouvrages et des fonctions qu'on en attend. C'est pourquoi il est indispensable qu'un technicien ou un ingénieur intervenant dans le domaine du BTP acquière des connaissances de base sur les matériaux à mettre en œuvre et puisse les confronter aux normes et réglementations en vigueur.

Dans un ouvrage précédent, nous avons présenté les différentes fonctionnalités attendues des matériaux employés dans le domaine de la construction, évoqué la façon dont on mesure leur efficacité, et décrit les grands principes qui sous-tendent les réglementations qu'on doit appliquer pour garantir la sécurité, la pérennité, le confort et la santé des bâtiments.

Ce manuel en est le complément. Les différents types de matériaux utilisés tant pour la structure que pour le second œuvre y sont abordés un par un, depuis la caractérisation et l'adaptation des sols jusqu'aux vitrages, en passant par les matériaux de structure, d'isolation et d'enveloppe. Pour chacun de ces matériaux, ses modes d'élaboration sont décrits, ses différentes propriétés fonctionnelles sont évoquées, sa mise en œuvre liée à ses modes d'utilisation est détaillée et ses principales déclinaisons (systèmes multi-matériaux, produits dérivés) sont exposées.

L'ouvrage se termine sur les phénomènes qui entrent en jeu sur la durée de vie ou d'usage des matériaux, en évoquant les méthodes qui permettent d'augmenter la pérennité des ouvrages. Le dernier chapitre est un retour sur les questions d'actualité soulevées par les conséquences sociétales de l'usage des différents matériaux, liées aux perspectives de développement durable.

Ce livre s'adresse à des lecteurs ayant un niveau d'études scientifiques équivalent à celui que l'on acquiert à l'université après un bac + 2. Il ne constitue toutefois qu'une introduction aux matériaux de construction car les questions traitées ne font que survoler cette vaste discipline. Les étudiants en DUT Génie civil ou en début de formation d'ingénieur dans ce secteur devraient pouvoir en tirer profit, comme les étudiants des écoles d'architecture.

Remerciements

Ce travail est le reflet et l'approfondissement du cours que, depuis 2005, je donne à des élèves ingénieurs qui entament à l'Université de technologie de Compiègne leur cycle de formation en systèmes urbains (GSU) ; au départ, les deux notions de matériau et de construction sont étrangères à la plupart d'entre eux.

Dans ce rôle d'enseignant, j'ai succédé à Mathieu Chazelle qui avait mis en place ce module de cours en 2000. J'ai profité de son expertise et de la précieuse documentation qu'il m'a laissée ; je le remercie amicalement et chaleureusement pour sa contribution aussi involontaire que déterminante à la rédaction de cet ouvrage. Enfin, ces remerciements seraient incomplets si je n'y associais pas mes collègues du département GSU à l'Université car je les ai plus d'une fois bousculés pour obtenir d'indispensables informations !

Et, bien sûr, je dédie ce travail à ma famille : Josette, Cécile, Christine, Lucille, Helena, Jérôme, Benoît et Arthur.

L'auteur et l'éditeur remercient pour les documents d'illustration qu'ils ont bien voulu mettre gracieusement à leur disposition : les organismes et les entreprises cités en source et, tout particulièrement, Cimbéton, le CNDB, FCBA en la personne de Didier Luro, et Saint-Gobain.

CHAPITRE 1

Les sols

1.1 Introduction

Avant toute construction (route, immeuble, ouvrage d'art, monument, aménagement), on doit s'assurer que le sol sur lequel on souhaite construire est apte à supporter durablement les charges qui vont lui incombent. Outre la résistance mécanique, il faut s'assurer de la qualité dans le temps des matériaux qui le composent, ainsi que du rôle que le climat peut jouer sur les caractéristiques du sol, notamment avec les variations dues aux périodes de sécheresses et/ou de fortes pluies.

Cela nous amènera ci-après à développer trois approches :

- *géologique* : une bonne connaissance des différentes roches et de leurs caractéristiques est indispensable pour identifier les matériaux constitutifs des sols et en déduire ses caractères physico-chimiques et mécaniques généraux ;
- *géotechnique* : une étude des propriétés plus spécifiques du sol d'un point de vue physique, mécanique et hydrologique permet de prévoir le comportement du sol sous l'action des charges et de l'eau ;
- *mécanique* : une recherche des propriétés des matériaux permet d'en déduire les déformations du sol sous charge, et de tenir compte des résistances à la rupture.

1.2 Les roches en géologie

Le géologue ne distingue pas, contrairement, au géotechnicien, entre les roches (dures et compactes) et les sols (meubles et friables). Il utilise le vocable de « roche » dans tous les cas de figure.

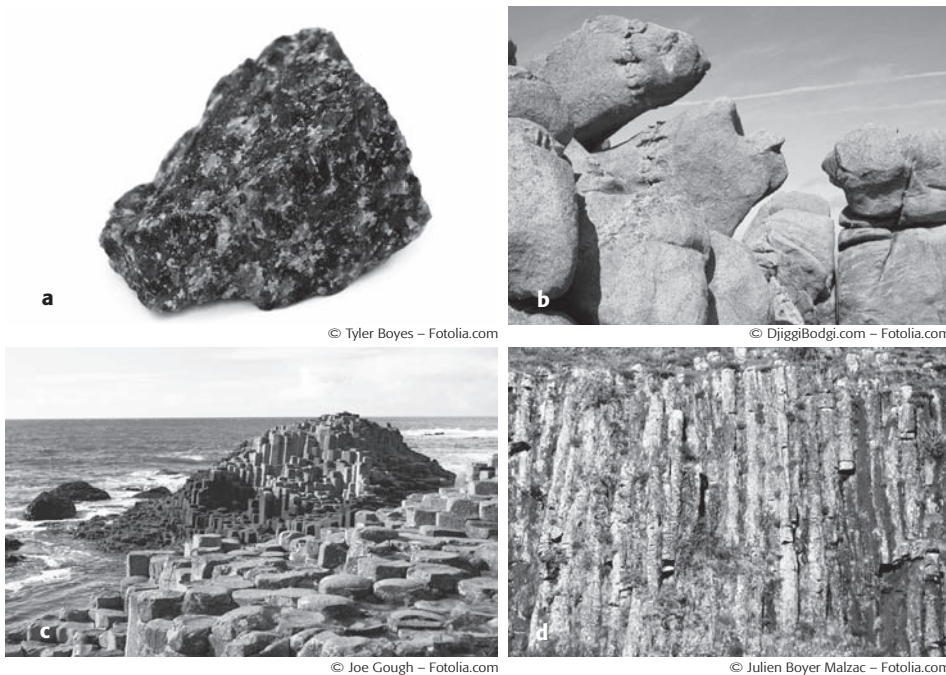
1.2.1 Roches magmatiques

Le magma qui se trouve sous la croûte terrestre est un mélange de roches en fusion sous des fortes températures et des pressions élevées. Ces roches fluides sont mélangées à des gaz. Lors d'éruptions volcaniques ou sous l'effet de pressions tectoniques, ces roches traversent la lithosphère (l'enveloppe solide de la croûte terrestre) et se retrouvent en surface :

- soit elles cristallisent dans la lithosphère puis arrivent en surface après leur solidification : ce sont des *roches plutoniques* ;
- soit elles cristallisent lors de leur refroidissement à la surface après une remontée rapide : ce sont les *roches volcaniques*.

Les roches plutoniques sont massives. On y trouve *le granit*, ayant un caractère acide, tandis que *le gabbro* a un caractère alcalin (figure 1.1 a et b).

Les roches volcaniques sont stratifiées ou en colonnes. On y retrouve *les trachytes* (caractère acide) et *les basaltes* (caractère alcalin) (figure 1.1 c, d et e).



a : gabbro ; b : granit rose ; c : trachytes ; d : basaltes

Figure 1.1. Roches magmatiques.

La finesse des structures est liée à la vitesse de refroidissement du magma :

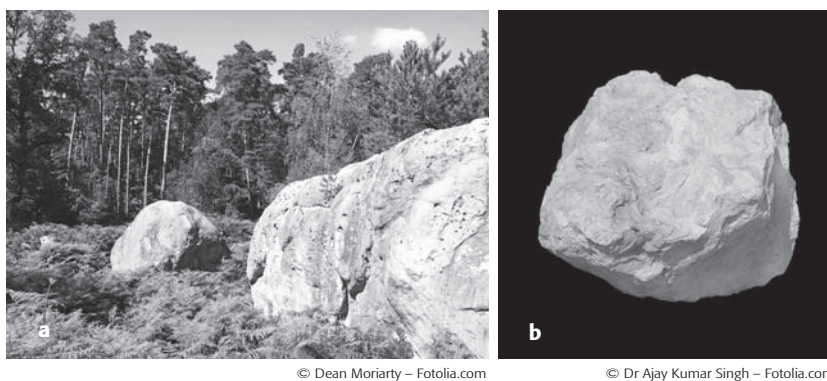
- si le refroidissement est rapide, le matériau est vitreux (cas de l'obsidienne) ;
- si le refroidissement est moyennement lent, le matériau est microcristallin, et les cristaux sont le plus souvent invisibles à l'œil nu (cas du granit) ;
- si le refroidissement est très lent, les cristaux sont visibles à l'œil nu, avec des dimensions pouvant atteindre plusieurs centimètres (cas des trachytes et des basaltes).

1.2.2 Roches sédimentaires

Comme l'indique leur nom, ces roches sont formées à partir des dépôts (les sédiments) laissés par les eaux qui les ont transportés dissouts puis décantés. Cette formation se déroule donc en trois étapes : la dissolution (à partir soit de roches solubles, soit de décompositions organiques), le transport et le dépôt appelé *sédimentation*. Une transformation en roche s'opère ensuite sur des longues durées (compaction, cimentation) : la *diagenèse*.

Cette catégorie de roches présente une diversité très importante. En fonction de leur origine, on peut distinguer :

- celles qui proviennent de la dissolution de débris de roches : les *roches détritiques*. On y trouve des roches meubles comme le sable, les limons et les argiles, et des roches plus compactes comme le grès ou la pélite (figure 1.2) ;

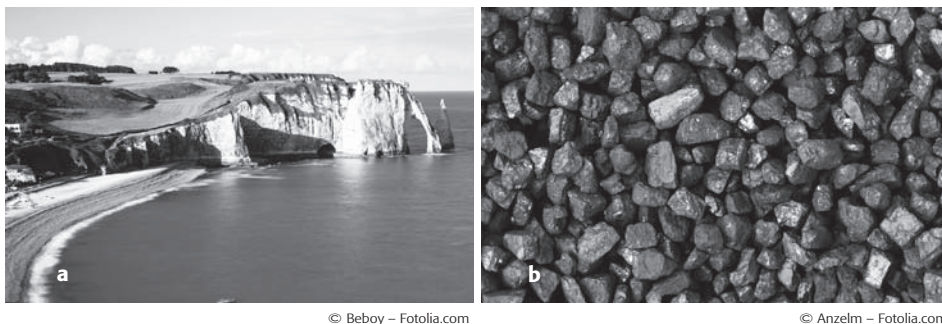


a : grès en exploitation

b : cailloux de pélite

Figure 1.2. Roches détritiques.

- celles qui sont à base de calcaire : les *roches carbonatées*. Ce sont des roches poreuses et facilement solubles dans l'eau. Il y a une importante quantité à la surface du globe. Ce sont essentiellement les calcaires (figure 1. 3) et les marnes (parfois argileuses) ;
- celles issues de précipitations des sels suite à leur concentration dans une eau qui s'évapore : les *évaporites*. Ce sont des roches facilement solubles, comme le sel gemme, l'anhydrite et le gypse (sulfates de calcium) ;



a : falaise calcaire (Étretat)

b : morceau de houille

Figure 1.3. Roches carbonatées.

- celles qui proviennent de la décomposition de débris végétaux, transformés avec le temps en sous-sol par la température et la pression : les *roches combustibles*. Ce sont des roches carbonées, comme la tourbe, les lignites, la houille (figure 1.3) et les anthracites. La dolomite est aussi une roche carbonatée.

1.2.3 Roches métamorphiques

Les roches métamorphiques sont dérivées des roches déjà évoquées, mais elles se sont transformées avec le temps sous l'action de la température et de la pression lors de mouvements tectoniques. Leur structure a donc été modifiée, et si leur environnement chimique s'est modifié, elles ont pu se transformer en composition.



© ste72 – Fotolia.com

a : quartz



© Tyler Boyes – Fotolia.com

b : schiste

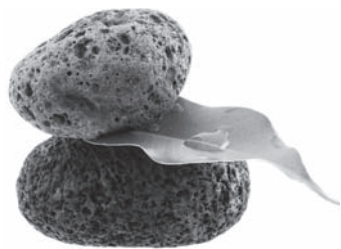
Figure 1.4. Roches métamorphiques.

On trouve dans cette catégorie quatre types de roches (figure 1.4) :

- le gneiss (un mélange de quartz, de feldspath et de mica) ;
- les quartzites (transformation du mica) ;
- les schistes (transformés en feuillets, fabrication d'ardoises) ;
- les marbres (calcaires ou dolomites transformés).

1.3 Les sols en géotechnique

Selon le pédologue Albert Demolon, le sol est « la formation naturelle de surface, à structure meuble et d'épaisseur variable, résultant de la transformation de la roche mère sous-jacente sous l'influence de divers processus, physiques, chimiques et biologiques, au contact de l'atmosphère et des êtres vivants ». Ainsi, la tourbe par exemple est une *roche* en géologie, mais un *sol* en géotechnique.



© Unclesam – Fotolia.com

Figure 1.5. Exemple d'un grain de sol.

La décomposition de la roche mère pour aboutir à un sol meuble signifie que cette roche s'est transformée en grains de dimension inférieure à quelques centimètres. L'ensemble du sol est alors composé de ces grains solides – plus ou moins poreux – qui forment son squelette (figure 1.5), mais il comporte aussi du gaz (le plus souvent de l'air, avec ou sans vapeur d'eau) et de l'eau.

1.3.1 Le squelette solide

La transformation de la roche peut se faire selon un processus physico-mécanique (broyage) suivi ou non d'une attaque chimique. S'il n'y a pas eu d'attaque chimique, les grains du sol sont de taille généralement supérieure à $2\ \mu\text{m}$; dans le cas où une attaque s'est produite, les particules du sol sont plus fines. Pour les grains les plus fins, le squelette est composé d'argile, et le sol a un comportement complexe. En effet, les particules de petites tailles ($d < 1\ \mu\text{m}$) développent une grande surface spécifique qui engendre des forces importantes d'interaction superficielle entre particules.

Selon les diamètres d des particules, une première classification des sols peut être proposée. On la retrouve dans le tableau 1.1.

Tableau 1.1. Appellation des squelettes solides du sol

Blocs rocheux	$d > 200\ \text{mm}$
Cailloux	$20 < d < 200\ \text{mm}$
Graviers	$2 < d < 20\ \text{mm}$
Sables grossiers	$0,2 < d < 2\ \text{mm}$
Sables fins	$20\ \mu\text{m} < d < 0,2\ \text{mm}$
Limons	$2\ \mu\text{m} < d < 20\ \mu\text{m}$
Argiles	$d < 2\ \mu\text{m}$

1.3.2 Gaz dans les sols

Si le sol est sec, le gaz du sol est de l'air. Il est contenu dans les interstices entre les particules et dans les pores présents dans les grains eux-mêmes. Si le sol est humide, le gaz est un air humide, contenant donc une certaine quantité de vapeur d'eau.

Lorsque tous les vides sont remplis d'eau, le sol est saturé. C'est le cas général dans nos climats tempérés à quelques mètres de profondeur (en dessous du niveau de la nappe phréatique).

1.3.3 L'eau dans les sols

Si les grains ont un diamètre supérieur à $2\ \mu\text{m}$, on ne tient compte généralement que de l'eau libre, celle qui peut circuler entre les grains et qui s'évapore complètement dans le cas d'une ambiance de sécheresse (en tout cas si la température dépasse 100°C).

Si on est en présence de limons ou d'argile, il y a une certaine quantité d'eau qui reste adsorbée sur la surface des grains, et qui est importante du fait de la superficie développée des grains qui est élevée. Le film d'eau formé autour de chaque grain a un double rôle :

- il joue le rôle d'un lubrifiant entre les grains ;
- il participe aux forces de cohésion capillaires (voir plus loin : « Comportement des sols cohérents » au § 1.3.5.1).

1.3.4 Pondération des sols

Un certain nombre de paramètres pondéraux permettent une première caractérisation des sols. Ils sont basés sur des mesures de masses et de volumes (figure 1.6), et tiennent compte de la présence des phases solide (squelette), liquide (eau) et gazeuse (air et vapeur d'eau).

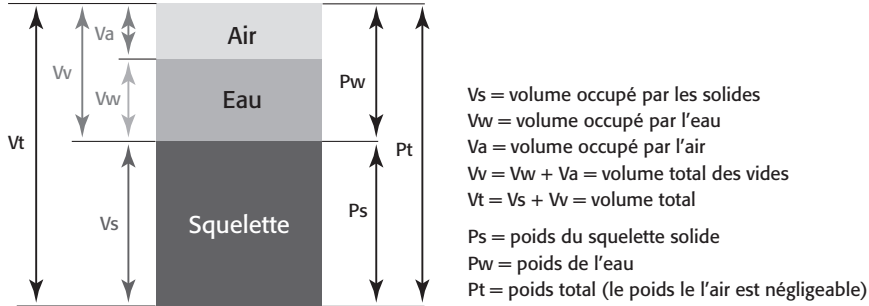


Figure 1.6. Paramètres de pondération des sols.

À partir de ces informations, on peut déterminer divers paramètres tels que ceux qui sont mentionnés ci-après (ceux avec un astérisque sont calculés au laboratoire et les autres s'en déduisent) :

- les masses volumiques :
 - masse volumique sèche : $\gamma_d \text{ (kN/m}^3\text{)} = P_s/V_t$;
 - masse volumique apparente (*) : $\gamma \text{ (kN/m}^3\text{)} = P_t/V_t$;
 - masse volumique des grains solides (*) : $\gamma_s \text{ (kN/m}^3\text{)} = P_s/V_s$;
- les indices liés à l'eau :
 - teneur en eau (*) : $w \text{ (}\%\text{)} = 100 \times P_w/P_s$;
 - degré de saturation : $S_r \text{ (}\%\text{)} = 100 \times V_w/V_v$;
 - sols saturés (vides remplis d'eau) pour $V_a = 0$, alors $S_r = 100 \text{ }\%$ et $w = W_{\text{sat}}$;
 - masse volumique saturée : $\gamma_{\text{sat}} \text{ (kN/m}^3\text{)} = P_t/V_t$ avec $V_a = 0$;
 - masse volumique immergée : $\gamma' \text{ (kN/m}^3\text{)} = \gamma_{\text{sat}} - \gamma_w$,
avec $\gamma_w = 10$ (densité de l'eau) ;
- les indices des vides :
 - porosité : $n = V_v/V_t$;
 - indice des vides : $e = V_v/V_s$;
 - indice de compacité (pour les sables) : $I_d \text{ (}\%\text{)} = 100 \times (e_{\text{max}} - e)/(e_{\text{max}} - e_{\text{min}})$,
 e_{max} et e_{min} indices e maxi et mini selon un essai normalisé.

Les valeurs que peuvent prendre ces paramètres sont les suivantes (voir le tableau 1.2) :

- γ_{sat} est compris entre 19 et 22 sauf pour les tourbes et les vases ;
- γ' est compris entre 9 et 12 sauf pour les tourbes et les vases ;
- I_d est compris entre 0 (sable très lâche) et 100 (sable très serré).

Tableau 1.2. Valeurs prises par les paramètres pondéraux

	Teneur en eau	Masse apparente	Masse sèche	Masse solide	Indice des vides
Unité	w (%)	γ (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)	γ_s (kN/m ³)	e
Sable	2 à 15	17-20	14-18	26-30	0,5 à 1
Limon	10 à 30			26-30	0,4 à 1
Argile moyenne	20 à 50	16-22	10-20	26-30	0,5 à 1
Argile molle	50 à 100	16-22	10-20	26-30	10 à 4
Tourbe	80 à 300	3-10	3-10		

1.3.5 Sols cohérents ou pulvérulents

Les forces qui relient les grains du sol entre eux et apportent une certaine cohérence sont des forces de faible ampleur. Ce sont généralement des forces électrostatiques ou de Van der Waals qui diminuent très vite quand les grains s'écartent les uns des autres. Plus les particules sont petites, plus ces forces sont donc importantes, et plus le sol est cohérent : il résiste à des pressions courantes sans se désagréger.

On peut ainsi distinguer deux types de sols :

- les sols cohérents ou sols fins ($d < 20 \mu\text{m}$), avec des interactions fortes entre les particules qui sont maintenues en contact. Ce sont les limons et les argiles ;
- les sols pulvérulents ou sols grenus ($d > 20 \mu\text{m}$), où ce sont les caractéristiques volumiques qui prédominent, sans lien entre les grains. Ce sont les sables et les graviers.

1.3.5.1 Comportement des sols cohérents

La surface spécifique d'un sol correspond à la surface développée de tous les grains du squelette pour une masse donnée du sol. Elle s'exprime en m²/g. Plus les grains du sol sont fins, plus cette surface spécifique est importante.

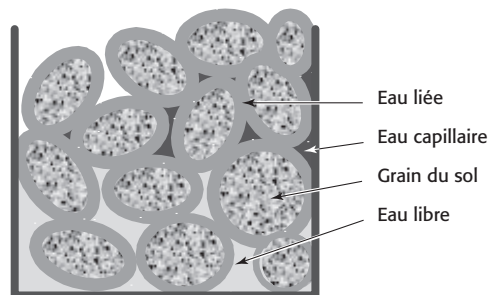


Figure 1.7. L'eau dans les sols.

Quand il n'y a pas d'eau dans un sol :

- soit le sol est grenu et les grains n'adhèrent pas entre eux, et le sol est pulvérulent ;
- soit le sol est fin et les grains sont adhérent entre eux par frottement : le sol se comporte comme un solide. Sous un effort, il se déforme modérément.

Quand il y a de l'eau dans le sol, les grains du sol sont humidifiés. Cette eau se comporte comme un lubrifiant qui diminue les frottements, mais comme les grains sont fins, les interstices entre grains sont fins aussi, et de l'eau peut monter par capillarité bien au-dessus du niveau de l'eau libre (figure 1.7). Cette eau capillaire humidifie aussi les grains qui s'enrobert tous d'un film d'eau par adsorption (film d'eau liée). La stabilité de ce film est assurée par différences de tensions superficielles entre le grain de sol et l'eau.

Alors, si deux grains sont en contact, les deux films d'eau liée interfèrent comme sur la figure 1.8 et les forces de tension superficielles t_1 de chaque grain donnent une résultante R_i qui tend à rapprocher les grains, ce qui assure leur maintien réciproque, et rend le sol cohérent. Cependant, cette cohérence n'est pas celle du solide : le sol se déforme de façon importante, et de façon irréversible sous l'action d'un effort moyen : il est devenu plastique.

Quand il y a un grand excès d'eau dans le sol, sa consistance tend vers celle d'un liquide par dilution.

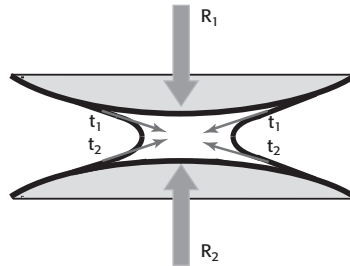


Figure 1.8. Forces de cohésion capillaires entre les grains.

On définit ainsi pour les sols trois états possibles :

- l'état solide quand il y a peu ou pas d'eau ;
- l'état plastique pour des quantités d'eau intermédiaires ;
- l'état liquide quand il y a beaucoup d'eau.

1.3.5.2 Limites d'Atterberg

Les limites d'Atterberg sont les teneurs pondérales en eau par masse de sol sec qui correspondent aux transitions entre les trois états définis ci-dessus, exprimées en grammes d'eau par gramme de sol sec (figure 1.9) :

- entre l'état solide et l'état plastique, elle est notée W_p , c'est la limite de plasticité ;
- entre l'état plastique et l'état liquide, elle est notée W_L , c'est la limite de liquidité.

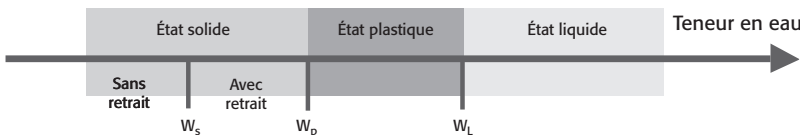


Figure 1.9. Limites d'Atterberg.

Il en existe une troisième, qui correspond – lorsqu'on assèche progressivement un sol solide – à une diminution du volume correspondant à une perte en eau (retrait du solide), suivie d'un