

SOMMAIRE

Cet ouvrage est né de la volonté de R. Lanchon d'actualiser son Cours de laboratoire, qui traitait des granulats, bétons et sols (1^{re} édition 1978) ; R. Dupain s'est chargé de la partie concernant les granulats et les sols ; J.-C. Saint Arroman a traité la partie concernant les ciments et bétons.

Première partie - Granulats

<i>1 - Présentation générale</i>	3
<i>2 - Échantillonnage</i>	5
<i>3 - Analyse granulométrique</i>	8
Analyse granulométrique par voie sèche	8
Granulats impropres au séchage en étuve	13
<i>4 - Coefficient d'aplatissement des granulats</i>	16
<i>5 - Mesure de la propreté des granulats</i>	20
Essai d'équivalent de sable	20
Essai au bleu de méthylène	23
<i>6 - Détermination de la masse volumique réelle et de la masse volumique absolue</i>	27
<i>7 - Essais de résistance à l'usure et au choc des granulats</i>	33
<i>8 - Fiche technique produit</i>	37

Deuxième partie - Sols

<i>1 - Présentation générale</i>	43
<i>2 - Paramètres de nature du sol</i>	45
Paramètres de granularité	45
Limites d'Atterberg et indice de plasticité	45
Essai au bleu de méthylène dit essai à la tache	52
Équivalent de sable	56
<i>3 - Paramètres d'état : teneur en eau du sol, compactage, portance</i>	57
Contexte	57
Détermination de la teneur en eau d'un sol	57
Essai Proctor : compactage des sols	58
Essai C.B.R. : détermination de la portance du sol compacté	65
<i>4 - Analyse granulométrique par sédimentométrie</i>	72

Troisième partie - Ciments et bétons

<i>1 - Constituants des bétons</i>	83
Bétons, mortiers et pâtes pures	83
Ciments	83
Granulats	86

Adjuvants	86
Eau	89
2 - Particularités des essais concernant les liants hydrauliques	93
3 - Essais sur le ciment anhydre	96
Masse volumique absolue	96
Mesure de la finesse	99
4 - Essais sur la pâte de ciment durcissante	103
Essais de consistance	103
Essai de prise	112
Détermination de la stabilité	117
Bilans volumiques de la réaction d'hydratation	119
5 - Essais sur les mortiers	126
Mortier normal	126
Mesure de la consistance des mortiers	127
Mesure du temps de prise sur mortier	130
Mesure des résistances à la compression et à la traction	131
Durcissement	134
Porosité et résistance	138
Évaluation de la masse volumique des éprouvettes de mortier par pesée hydrostatique	141
Retraits et gonflements	141
6 - Classification des ciments	151
Classification des ciments en fonction de leur composition	151
Classification des ciments en fonction de leur résistance normale	152
Désignation normalisée des ciments	153
Autres liants hydrauliques	153
Ciments présentant des spécifications particulières	155
7- Essais sur les bétons	156
Définitions	156
Gâchée d'essai	156
Essais de consistance	157
Résistance	165
Déformation des bétons	174
Essais pouvant être pratiqués sur le béton de l'ouvrage	183
8 - Durabilité des bétons	186
Résistance aux agents agressifs	186
Résistance aux ambiances hivernales	190
Alcali-réaction	194
Prescriptions normalisées concernant la durabilité	195
9 - Formulation des bétons	199
Objectifs d'une formulation	199
Paramètres influant sur la résistance	199
Moyens de diminuer la porosité de la pâte liante à consistance maintenue	203
Composition du squelette granulaire	207
Bétons optimisés	212
Méthode de formulation des bétons optimisés	215
Exemples de formulation	218
Vérification et ajustement des formulations par les essais	228
Sensibilité d'une formulation aux variations de dosage	234
Lexique	235
Index	239

2 - ÉCHANTILLONNAGE

2-1. But et principe de l'échantillonnage

Les essais effectués en laboratoire portent nécessairement sur des quantités réduites de matériaux qui doivent cependant permettre de mesurer des paramètres caractéristiques de l'ensemble du matériau dans lequel on a fait le prélèvement. Pour cela, il faut que l'échantillon utilisé au laboratoire soit représentatif de l'ensemble. Ce problème est complexe à résoudre mais il conditionne en grande partie la fiabilité des résultats obtenus au cours des essais de laboratoire.

Le prélèvement d'échantillons se fait en deux temps :

1. Prélèvement sur le chantier, la carrière ou l'usine d'une quantité de matériaux nettement plus grande que celle qui sera utilisée pour l'essai proprement dit. Cette étape de l'échantillonnage fait l'objet de la norme EN 932-1.
2. Au laboratoire, prélèvement sur l'échantillon de la quantité nécessaire à l'essai que l'on appelle prise d'essai. Cette étape fait l'objet de la norme EN 932-2.

2-2. Prélèvement sur le tas (sables et gravillons)

Lorsqu'un matériau granulaire est mis en stock, les gros éléments ont tendance à rouler en bas du tas tandis que le haut est plus riche en éléments de faibles diamètres. On prélèvera donc les matériaux en haut, en bas, au milieu et à l'intérieur du tas de granulats, afin d'avoir un échantillon aussi représentatif que possible de l'ensemble. Ces diverses fractions seront mélangées avec soin.

Dans le cas des matériaux de carrière, il faudra également prendre en compte l'hétérogénéité des différents bancs rocheux exploités.

2-3. Échantillonnage en laboratoire

Le passage de l'échantillon total prélevé sur le tas à l'échantillon réduit, nécessaire à l'essai, peut se faire par quartage ou à l'aide d'un échantillonneur.

L'échantillon doit être séché à l'étuve à 105 °C s'il est exempt de minéraux argileux, ce qui est rare, ou à 60 °C dans le cas contraire.

2-3.1 Quartage

L'échantillon est divisé en quatre parties égales dont on ne retient que la moitié en réunissant deux quarts opposés. Cette sélection est homogénéisée et un nouveau quartage est effectué, l'opération pouvant se répéter trois ou quatre fois. On obtient ainsi un échantillon représentatif du matériau initial (voir fig. 2.1).

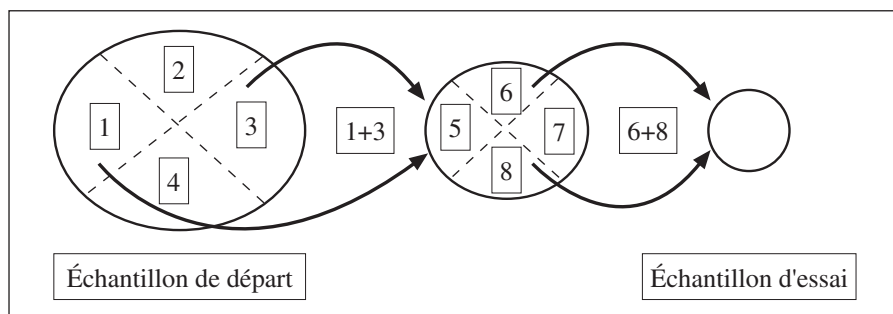


Fig. 2.1 : Opération de quartage

2-3.2 Échantillonneur



Fig. 2.2 :
Échantillonneur
pour graviers

© Ph. Gaucher/
Demi-jour/ SCREG-Ouest

Cet appareil de laboratoire permet de diviser facilement en deux parties représentatives la totalité d'un échantillon initial, chaque moitié étant recueillie dans un bac de manière séparée.

La répétition en cascade de cette opération, en retenant à chaque opération le contenu de l'un des bacs, permet d'obtenir, après trois ou quatre opérations identiques, la quantité de matériaux représentative et nécessaire à l'essai envisagé (fig. 2.2 ci-contre).

Le procédé peut être résumé par la figure 2.3 ci-dessous. Celle-ci permet de sélectionner une masse m à partir d'un prélèvement de masse $3m$.

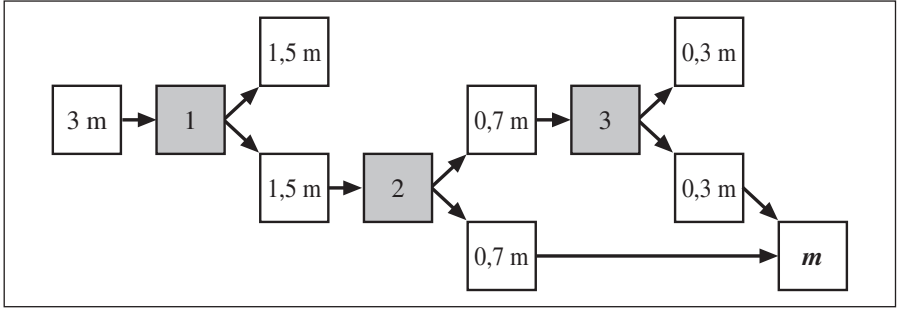


Fig. 2.3 :
Schéma d'une opération
de quartage

2-4. Choix du procédé

Ces deux procédés peuvent être utilisés séparément ou conjointement, en fonction de la quantité nécessaire à l'essai et de la grosseur maximale des grains. Si l'échantillon de départ est d'un volume très important, une ou deux opérations de quartage permettent de diminuer rapidement le volume des matériaux traités ensuite à l'aide de l'échantillonneur. Celui-ci sera choisi de telle manière que son ouverture soit de dimension compatible avec celle des plus gros grains du matériau traité.

6 - CLASSIFICATION DES CIMENTS

6-1. Classification des ciments en fonction de leur composition

Les ciments constitués de clinker et des constituants énumérés au § 1-1.3 sont classés, en fonction de leur composition, en cinq types principaux par les normes NF P15-301 et EN 197-1. Ils sont notés CEM et numérotés de 1 à 5 en chiffres romains dans leur notation européenne (l'ancienne notation française est indiquée entre parenthèses) :

- CEM I : ciment Portland (CPA dans l'ancienne notation française),
- CEM II : ciment Portland composé (CPJ),
- CEM III : ciment de haut-fourneau (CHF),
- CEM IV : ciment pouzzolanique (CPZ),
- CEM V : ciment composé (ou ciment au laitier et aux cendres : CLC).

La proportion (en masse) des différents constituants est indiquée dans le tableau 6.1. Les constituants marqués d'une étoile (*) sont considérés

	Cim. Portland	Ciment Portland composé		Ciment de haut-fourneau			Ciment pouzzolanique		Ciment composé	
	CPA-CEM I	CPJ-CEM II/A	CPJ-CEM II/B	CHF-CEM III/A	CHF-CEM III/B	CLK-CEM III/C	CPZ-CEM IV/A	CPZ-CEM IV/B	CLC-CEM V/A	CLC-CEM V/B
Clinker (K)	≥ 95 %	≥ 80 % ≤ 94 %	≥ 65 % ≤ 79 %	≥ 35 % ≤ 64 %	≥ 20 % ≤ 34 %	≥ 5 % ≤ 19 %	≥ 65 % ≤ 89 %	≥ 45 % ≤ 64 %	≥ 40 % ≤ 64 %	≥ 20 % ≤ 38 %
Laitier (S)	*	6 % ≤	6 % ≤	≥ 36 % ≤ 65 %	≥ 66 % ≤ 80 %	≥ 81 % ≤ 95 %	*	*	≥ 18 % ≤ 30 %	≥ 31 % ≤ 50 %
Pouzzolanes (P ou Q)	*	total	total	*	*	*	11 % ≤ total	36 % ≤ total	18 % ≤ total	31 % ≤ total
Cendres siliceuses (V)	*	≤ 20 %	≤ 35 %	*	*	*	≤ 35 % (fumée)	≤ 55 % (fumée)	≤ 30 %	≤ 50 %
Fumée de silice (D)	*	(fumée)	(fumée)	*	*	*	≤ 10 %	≤ 10 %	*	*
Cendres calciques (W)	*	de	de	*	*	*	*	*	*	*
Schistes (T)	*	silice	silice	*	*	*	*	*	*	*
Calcaires (L ou LL)	*	≤ 10 %	≤ 10 %	*	*	*	*	*	*	*
Fillers	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

Tableau 6.1 : Désignation des différents types de ciment en fonction de leur composition

comme constituants secondaires pour le type de ciment concerné ; leur total ne doit pas dépasser 5 %. (Les fillers sont toujours considérés comme des constituants secondaires.)

6-2. Classification des ciments en fonction de leur résistance normale

Trois classes sont définies en fonction de la *résistance normale* à 28 jours. Elles sont appelées « classe 32,5 », « classe 42,5 » et « classe 52,5 ». Chacune d'entre elles se divise en deux sous-classes « N » et « R ». La sous-classe « R » désigne des ciments dont les résistances au jeune âge sont élevées. Elles doivent respecter les spécifications et valeurs garanties du tableau 6.2.

Les valeurs en italiques sont les valeurs garanties lorsqu'elles sont inférieures aux valeurs spécifiées. Les valeurs entre parenthèses sont celles indiquées par la norme NF P15-301 lorsqu'elles sont plus exigeantes que les valeurs indiquées par la norme européenne.

Classe	Résistance à la compression (MPa) EN 196-1 (et P15-301)				Retrait à 28 jours (1) P15-433 ($\mu\text{m/m}$)	Début de prise EN 196-3 (min)	Stabilité EN 196-3 (mm)
	au jeune âge		à 28 jours				
	2 jours	7 jours	mini	maxi			
32,5 N		$\geq 16,0$ <i>14</i>	$\geq 32,5$ <i>30</i>	$\leq 52,5$	≤ 800	≥ 75 (90) <i>60</i> (90)	≤ 10
32,5 R	≥ 10 (13,5) <i>8</i> (12)		$\geq 32,5$ <i>30</i>	$\leq 52,5$	$\leq 1\,000$	≥ 75 (90) <i>60</i> (90)	≤ 10
42,5 N	≥ 10 (12,5) <i>10</i>		$\geq 42,5$ <i>40</i>	$\leq 62,5$	$\leq 1\,000$	≥ 60 <i>50</i> (60)	≤ 10
42,5 R	≥ 20 <i>18</i>		$\geq 42,5$ <i>40</i>	$\leq 62,5$	$\leq 1\,000$	≥ 60 <i>50</i> (60)	≤ 10
52,5 N	≥ 20 <i>18</i>		$\geq 52,5$ <i>50</i>			≥ 45 (60) <i>40</i> (60)	≤ 10
52,5 R	≥ 30 <i>28</i>		$\geq 52,5$ <i>50</i>			≥ 45 (60) <i>40</i> (60)	≤ 10

Tableau 6.2 :
Spécification et valeurs
garanties en fonction
de la classe

(1) Le retrait spécifié ne concerne que les CEM I et les CEM II.

rieure (fluage propre) et celui d'éprouvettes non protégées (fluage total). Le fluage de dessiccation se déduit de la différence.

En fait le supplément de fluage dû à la dessiccation est un phénomène qui tient à la fois du fluage et du retrait : le fait que l'éprouvette soit soumise à une compression d'origine externe limite la traction de peau due au retrait (cf. figure 7.21) ; la fissuration de peau est donc moins importante que ce qu'elle serait si le béton n'était pas comprimé ; la peau du béton peut donc exercer sur le cœur de l'éprouvette des contraintes de compression qui n'existeraient pas si le béton était fissuré. Ce supplément de contrainte explique le supplément de fluage ; on peut dire aussi qu'il correspond au retrait que connaîtrait le béton s'il ne fissurait pas.

Si on retire la charge appliquée, on observe la diminution de la déformation, mais sans jamais retrouver la déformation avant fluage ; c'est le phénomène de *recouvrance* appelé aussi *retour de fluage*.

Outre l'hygrométrie, le fluage dépend de nombreux facteurs : résistance du béton, rayon moyen du moule, nature du liant... En particulier, il est notablement influencé par l'âge du béton au moment du chargement.

Dans le cas général où les granulats ne fluent pas pour les contraintes auxquelles sont soumis les bétons, une augmentation de volume du *squelette granulaire* permet la diminution du fluage ; de ce point de vue le choix d'un granulats le plus gros possible est également positif, pour les mêmes raisons que celles évoquées en ce qui concerne le retrait (cf. figure 7.19).

En ce qui concerne la pâte, ce sont celles qui sont les moins dosées en eau, donc les plus résistantes, qui présentent généralement le fluage le plus faible.

7-6. Essais pouvant être pratiqués sur le béton de l'ouvrage

7-6.1 Essai sclérométrique (EN 12504-2)

• Objectif de l'essai

Cet essai permet de tester l'homogénéité du béton in situ et d'obtenir une estimation rapide de la résistance du béton d'un ouvrage, sans procéder à des prélèvements de béton durci par carottage.

• Principe de l'essai

En fait il s'agit de tester la dureté de surface d'un béton durci. Cette dureté étant d'autant plus élevée que le béton est plus résistant, cela permet d'avoir un ordre de grandeur de la résistance atteinte par un béton à un âge donné.