

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



**Université 8 Mai 1945 de Guelma**  
**Faculté des Sciences et de la Technologie**  
Département de : **Génie Civil & Hydraulique**

***Polycopié de cours destiné aux étudiants en Master Génie Civil***

Option : **Matériaux en Génie Civil**

---

---

## ***Technologie du béton***

---

---

**Elaboré par : Dr NIGRI Ghania (MCB)**

**2020**

---

---

## AVANT-PROPOS

Ce support de cours répond au canevas ministériel portant sur le cours de **‘Technologie du béton’** enseigné en première année S1 Master option Matériaux en Génie Civil.

Le but visé étant de décrire les constituants du béton, les principales méthodes de formulation et les solutions technologiques en termes de mélange, de mise en place, d’ajouts, additions et adjuvants ainsi que sa mise en œuvre et son contrôle. Le béton aussi à connu récemment des progrès importants se qui a élargir son emploi et son importance.

Le document, se compose de huit chapitres. Dans le premier chapitre, on expose d’une manière générale le matériau «béton». Dans le second chapitre nous présentons les différents ajouts susceptible d’être introduits dans le béton afin d’améliorer certaines de ses performances. Le troisième chapitre est consacré à une exposition sommaire des adjuvants commercialisé dans la filière du béton. Dans le quatrième chapitre on s’intéresse aux méthodes de formulation du béton. Les propriétés du béton à l’état frais et à l’état durci sont traitées avec détail dans le cinquième chapitre. La mise en œuvre ainsi que le contrôle de la qualité du béton sont présentés dans le sixième et le septième chapitre respectivement. Dans le huitième et dernier chapitre, on présente quelques informations progrès récents dans la technologie du béton. Enfin le document est clos par une liste des références bibliographiques utilisées pour la rédaction du support de cours.

Mes sincères remerciements aux lecteurs qui partageront avec nous leurs remarques et critiques de ce modeste travail et de l’enrichir de leurs suggestions Enfin, nous souhaitons que ce document soit un support utile pour nos étudiants.

Dr. NIGRI GHANIA

## Sommaire

### Avant propos

<b>Introduction générale</b>	1-2
------------------------------	-----

### Chapitre 1: Définition et constituants du béton

1.1. Introduction	3
1.2. Constituants du béton	4
1.2.1. Le Ciment	4
1.2.1.1. Procédé de fabrication du ciment	5
1.2.1.2. Classification des ciments	5
1.2.1.3. Critères de choix du ciment	6
1.2.2. L'eau de gâchage	9
1.2.2.1. Actions de l'eau	9
1.2.2.2. Exigences requises pour les eaux de gâchage : NF EN 1008	9
1.2.3. Les granulats	10
1.2.3.1. Granularité	11
1.2.3.2. Classifications normalisées des granulats	11
a) Classification selon la provenance	11
b) Classification selon la masse volumique	14
c) Classification des granulats selon leur taille	15
1.2.3.3. Propriétés mécaniques	17
a) Essai micro Deval	17
b) Essai Los Angeles	17
1.2.4. Les adjuvants chimiques	18

### Chapitre 2: Les ajouts

1.2. Introduction	19
2.2. Classification des ajouts	19
2.2.1. Les additions actives	19
2.2.1.1. Le laitier de haut fourneau (S)	19
2.2.1.2. La fumée de silice (F)	20
2.2.1.3. Les cendres volantes (C)	20
2.2.1.4. Le sulfate de calcium	22
2.2.1.5. La pouzzolane naturelle	22
2.2.1.6. La pouzzolane artificielle	23
2.2.2. Les additions minérales inertes	23
2.2.2.1. Les fillers (F)	23
2.2.2.2. Les schistes calcinés (T)	23
2.2.2.3. Les calcaires (L)	23
2.3. Bénéfices de l'utilisation des ajouts minéraux	24
2.3.1. Bénéfices fonctionnels	24
2.3.2. Bénéfices écologiques et environnementaux	24
2.3.3. Bénéfices économiques	24

### Chapitre 3: Les adjuvants du béton

3.1. Introduction	25
3.2. Historique	25
3.3. Classification des adjuvants	25
3.3.1. Adjuvants modifiant l'ouvrabilité et la rhéologie du béton	25
3.3.1.1. Plastifiants-réducteurs d'eau	26

## Sommaire

3.3.1.2.	Les fluidifiants	26
3.3.2.	Adjuvants modifiant la prise et le durcissement	28
3.3.2.1.	Les accélérateurs de prise	28
3.3.2.2.	Accélérateurs de durcissement	29
3.3.2.3.	Les retardateurs de prise	29
3.3.3.	Adjuvants modifiant des propriétés particulières, On distingue notamment	30
3.3.3.1.	Les entraîneurs d'air	30
3.3.3.2.	Les hydrofuges de masse	32
3.4.	Stockage des adjuvants	34
3.5.	Exemples d'adjuvants fabriqués en Algérie	35

### Chapitre 4: Formulation des bétons

4.1.	Introduction	37
4.2.	Méthodes de compositions des bétons	37
4.2.	Méthodes de compositions des bétons	37
4.2.1.	Méthode de Faury	37
	Application	39
4.2.2.	Méthode de Dreux	43
	Application	47

### Chapitre 5: Propriétés du béton à l'état frais et durci

5.1.	Introduction	55
5.2.	Caractéristiques du béton	55
5.2.1.	Caractéristiques à l'état frais	55
5.2.1.1.	Ouvrabilité	55
a)	Affaissement au cône d'Abram's	56
b)	Étalement sur table (flow-test)	58
c)	Essai au maniabilimètre (LCL)	59
5.2.1.2.	Résistance du béton frais	61
5.2.1.3.	Masse volumique apparente du béton frais	61
5.2.1.4.	Teneur en air (Air occlus)	62
5.2.2.	Caractéristiques du béton à l'état durci	62
5.2.2.1.	Résistance caractéristique à la compression selon le C.B.A 93 (A.2.1.1.1)	63
5.2.2.2.	Résistance du béton à la traction	65
a)	Essai de traction directe	66
b)	Essai de traction par flexion	66
c)	Essai de fendage (Essai Brésilien)	67
d)	Résistance caractéristique à la traction selon le C.B.A.93 (A.2.1.1.2)	67
5.2.2.3.	Modules de déformation longitudinale du béton selon le C.B.A 93 (A.2.1.2)	67
5.2.2.4.	Coefficient de dilatation thermique	68

### Chapitre 6: Mise en œuvre du béton

6.1.	Problématique	69
6.2.	Stockage des constituants	69
6.2.1.	Les granulats	69
6.2.2.	Le ciment	69
6.2.3.	Eau de gâchage	70
6.3.	Transport du béton	70

## Sommaire

6.4.	Mise en œuvre du béton	71
6.4.1.	Coffrage	71
6.4.2.	Malaxage	72
6.4.2.1.	Les malaxeurs à axe vertical	73
6.4.2.2.	Les malaxeurs à axe horizontal	73
6.4.3.	Le pompage du béton	74
6.4.4.	Vibration du béton	75
6.4.4.1.	Le piquage	75
6.4.4.2.	Le damage	75
6.4.4.3.	Les vibrations	75
6.5.	Bétonnage	77
6.6.	Interruption et reprise de bétonnage	77
6.7.	Cure du béton	78

### Chapitre 7: Control et qualité du béton

7.1.	Introduction	79
7.2.	Les étapes du contrôle	79
7.2.1.	Contrôle des Matériaux, produits et composants de construction livrés sur chantier (Etude de formulation)	79
7.2.2.	L'épreuve de convenance (vérification que le béton formulé est fabricable en centrale)	79
7.2.3.	Le contrôle de fabrication du béton (Contrôle des produits fabriqués ou ouvrages réalisés)	79
7.3.	Essais de contrôle	79
7.3.1.	Essai sur béton frais	79
7.3.2.	Essais sur béton durci	80
7.3.2.1.	Essais destructifs	80
7.3.2.2.	Essais non destructifs	80

### Chapitre 8: Progrès récents dans la technologie du béton

8.1.	Introduction	91
8.2.	Les bétons auto plaçant (BAP)	91
8.2.1.	Définition	91
8.2.2.	Historique du BAP	91
8.2.3.	Formulation des BAP	92
8.2.4.	Mise en œuvre des bétons auto-plaçant	93
8.2.5.	Spécifications des BAP à l'état frais	94
8.2.6.	Essais sur les bétons auto – plaçant à l'état frais	94
8.2.6.1.	Mesure de l'ouvrabilité	95
8.2.6.2.	Essai de stabilité au tamis	96
8.2.6.3.	Essai de ressuage	97
8.2.6.3.	Essai de boîte en L	98
8.2.7.	Propriétés du béton durci	99
8.2.8.	Exemples de compositions types pour BAP	101
8.3.	Les bétons à hautes performances (BHP)	102
8.3.1.	Définition des BHP	102
8.3.2.	Historique des BHP	103
8.3.3.	Classification des BHP	103
8.3.4.	Composition des BHP	104
8.3.4.1.	Choix du ciment	104
8.3.4.2.	Choix des granulats (phase inerte)	104
8.3.4.3.	Les ultrafines (principalement de la fumée de silice)	104

---

## Sommaire

8.3.4.4.	Eau de gâchage	104
8.3.4.5.	Les adjuvants	104
8.3.5.	Contrôle des BHP	105
8.3.6.	Augmentation de chaleur des BHP	105
8.3.7.	Propriétés des BHP	106
8.3.8.	Domaines d'utilisation	106
8.3.9.	Exemples de compositions de BHP	107
8.3.9.1.	Exemple d'ouvrage réalisé en BHP : L'édifice Scotia Plaza	107
8.3.9.2.	Exemple d'ouvrage réalisé en BHP : Cas de deux 2 ponts	107
8.3.9.3.	Autres Exemple d'ouvrage réalisé en BHP	108
	<b>Bibliographie et références</b>	<b>109</b>

## Introduction générale

Le béton de ciment est actuellement le matériau de construction le plus utilisé et le plus connu, en raison de son faible coût, sa facilité de mise en œuvre, sa disponibilité de ses constituants et de ses performances mécaniques et de durabilité qu'il assure. C'est un matériau composite aggloméré, dont les granulats constituent l'ossature et représentant, environ 80% de son poids. Selon les statistiques, le bâtiment et les travaux publics ont besoin chaque année de 560 millions de tonnes de granulats et de matériaux assimilés. Ces granulats sont collés entre eux par une pâte généralement de ciment et d'eau. En présence d'eau, le béton ainsi formulé, conserve son ouvrabilité pendant un temps suffisamment long et doit, après des périodes déterminées, atteindre des niveaux de résistance. Pour modifier certaines propriétés du béton à l'état frais et /ou à l'état durci, l'incorporation d'adjuvants en faible dose et/ ou d'ajouts cimentaires avec un certain taux est fortement souhaitée.

Les propriétés du béton sont caractérisées par des essais dont le mode opératoire est cerné par des normes et selon des protocoles bien déterminés. Une fois formulé, les moyens de confection du béton doivent être tels que le produit obtenu soit homogène, que les granulats soient bien enrobés de liant, et qu'il peut être transporté dans des conditions ne donnant lieu ni à ségrégation ni à un début de prise avant mise en œuvre. Néanmoins, des problèmes de qualité peuvent être rencontrés. Ces derniers apparaissent à différentes phases de la réalisation des ouvrages, depuis le choix des constituants (ciment et granulats), jusqu'au béton durci, pour cette raison que depuis longtemps il y a une demande accrue pour des méthodes plus précises et, en même temps, plus souples d'évaluation de la qualité du béton. Le contrôle de la qualité du béton peut être effectué à partir des essais sur béton frais ou durci par des essais destructifs ou non destructifs. Ces derniers peuvent jouer un rôle exceptionnel dans la garantie de la qualité du béton et dans le développement ultérieur de la technologie de construction.

Depuis sa découverte, le béton a connu, pour des raisons économiques, rhéologiques, environnementales, et technologiques, d'important progrès. Nous parlons aujourd'hui des bétons auto-plaçant (BAP), des bétons à haute et à très haute performance (BHP et BHTP) et dernièrement des bétons de fibres à ultra hautes performances (BFUP). Ces progrès ont permis la réalisation des grands ouvrages et des infrastructures puissantes.

Le présent cours, destinés aux étudiants en génie civil, se compose de huit chapitres. Dans le premier chapitre, on expose d'une manière générale le matériau « béton » (définitions, constituants et leurs propriétés), Dans le second chapitre nous présentons les ajouts susceptibles d'être introduits dans le béton (définitions, origines, effets). Le troisième chapitre est consacré à une exposition sommaire des adjuvants commercialisés dans la filière du béton (produits, caractéristiques et effets sur le comportement du béton). Dans le quatrième chapitre on s'intéresse aux méthodes de formulation du béton et plus particulièrement à celle de Faury et de Dreux-Gorisse on donnant une application détaillée de ces deux méthodes très

utilisées en pratique. Les propriétés du béton à l'état frais et à l'état durci sont traitées avec détail dans le cinquième chapitre. La mise en œuvre ainsi que le contrôle de la qualité du béton sont présentés dans le sixième et le septième chapitre respectivement. Enfin le document est clos par une présentation de quelques progrès récents dans la technologie du béton et plus particulièrement ceux des bétons auto-plaçant et les bétons à haute performance.

# Chapitre 1

## Définition et constituants du béton

### 1.1. Introduction

Avec une consommation estimée à environ 6 milliards de mètre par année, le béton est le matériau manufacturé le plus utilisé au monde. Il est constitué de granulats gros et fins (gravier ou pierre concassée, sable), de ciment et d'eau. Le mélange entre le ciment et l'eau forme une pâte qui durcit. La pâte de ciment hydraté et le sable constituent le mortier. Celui-ci a pour rôle de se lier avec les gros granulats pour former un conglomérat solide. Les adjuvants et les additions servent à améliorer certaines caractéristiques du béton frais ou durci.

Historiquement, le béton est né du besoin d'avoir un matériau de construction bon marché, malléable au moment de le mettre en place et résistant ensuite. La forme la plus ancienne du béton remonte à 7000 ans avant Jésus Christ. Un matériau similaire était connu des égyptiens et des Romains, mais l'essor réel du béton tel qu'on le connaît aujourd'hui est dû à l'anglais Joseph Aspdin qui en 1824 fait breveter le ciment Portland.

#### Pourquoi le béton est le matériau le plus utiliser?

**Disponibilité** : Matières premières partout dans le monde, faible coût énergétique

**Transportable** : poudre grise en sac ou en vrac

**Constructible** : adjoindre l'eau et malaxer

**Flexible** : remplir toutes les formes avec une différence de volume très faible

**Durable** : pour les siècles surtout résistant à l'eau, barrages, tuyaux, etc.

**Economique** : bas prix

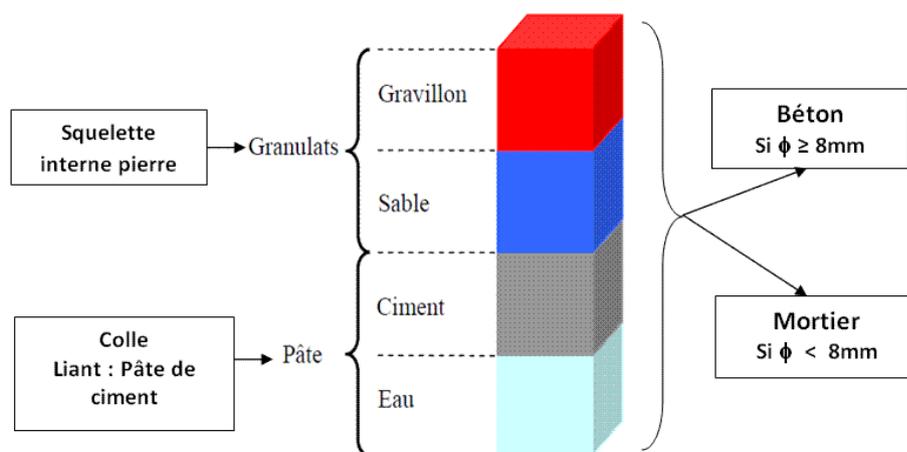


Fig.1.1. Constituants du béton

**Pâte de ciment = eau + ciment**  
**Mortier = eau + ciment + sable**  
**Béton = eau + ciment + granulats (sable + gravier).**

## 1.2. Constituants du béton

### 1.2.1. Le Ciment

Selon la norme NA442 le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire un matériau minéral finement moulu qui, gâché avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit par suite de réactions et de processus d'hydratation et qui, après durcissement, conserve sa Résistance et sa stabilité même sous l'eau. Le ciment conforme à la norme NA442/2013, appelé ciment CEM, mélangé avec des granulats et gâché avec de l'eau de façon appropriée, doit être capable de produire un mortier ou un béton qui conserve son ouvrabilité pendant un temps suffisamment long et doit, après des périodes déterminées, atteindre des niveaux de résistance prescrits et aussi présenter une stabilité de volume à long terme. Le durcissement hydraulique du ciment CEM est principalement dû à l'hydratation des silicates de calcium, mais d'autres composés chimiques peuvent également intervenir dans le processus de durcissement, tel que, par exemple, les aluminates.

#### **Le ciment Portland :**

- Est une poudre sèche ayant des particules très fines
- forme une pâte au contact de l'eau (liant hydraulique)
- Réagit pour former des produits d'hydratation
- Colle
- Enrobe les granulats ensemble
- Durci pour former une masse solide.

1.2.1.1. Procédé de fabrication du ciment

Le ciment est obtenu par le broyage du clinker et de sulfate de calcium. Le clinker est issu de la cuisson à haute température (de l'ordre de 1450°C) d'un mélange composé de 20% d'argile et de 80% de calcaire. Au besoin, le minerai de fer, la bauxite et le sable sont ajoutés à ce mélange afin d'obtenir la composition désirée. A l'issue de cette cuisson, le clinker est rapidement refroidi puis broyé avec environ 5% de sulfate de calcium et d'éventuels minéraux complémentaires pour constituer le ciment.

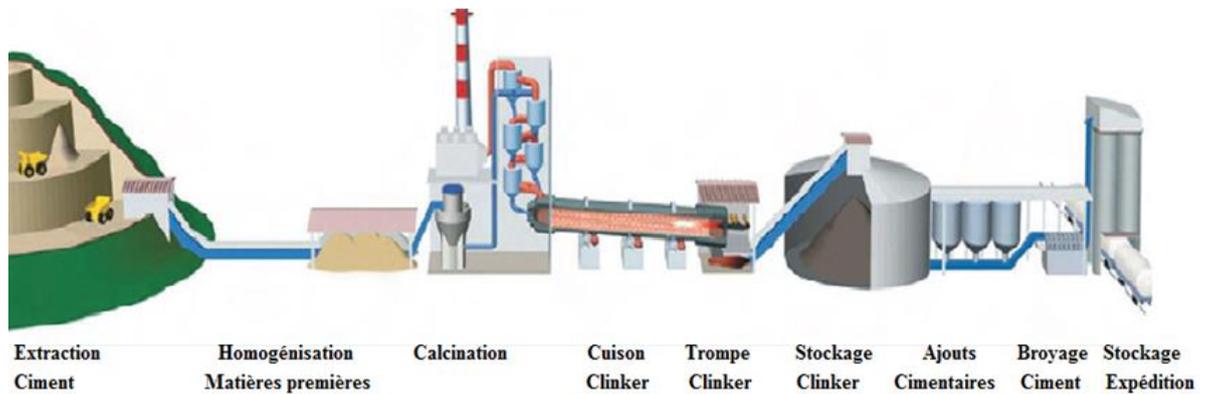


Fig.1.2. Procédé de fabrication du ciment.

1.2.1.2. Classification des ciments

a) Classification en fonction de leur résistance normale

Trois classes sont définies en fonction de la résistance normale à 28 jours ; des sous-classes «R» sont associées à ces 3 classes principales pour désigner des ciments dont les résistances au jeune âge sont élevées. Ces classes sont notées classe 32,5, classe 42,5 et classe 52,5. Elles doivent respecter les spécifications et valeurs garanties du tableau 1.1.

Tableau 1.1. Spécification mécaniques et physiques des ciments

Classe	Résistance à la compression (MPa)				Retrait à 28 jours (µm/m)	Début de prise (min)	Stabilité (mm)
	Au jeune âge		à 28 jours				
	2 Jours	7 Jours	Min	Max			
32,5	-	-	≥ 32.5	≤ 52.5	≤ 800	≥ 90	≤ 10
32,5R	≥ 13,5	-					
42,5	≥ 12.5	-	≥ 42.5	≤ 62.5	≤ 1000	≥ 60	
42,5R	≥ 20	-					
52,5	≥ 20	-	≥ 52.5	-	-		
52,5R	≥ 30	-					

b) Classification en fonction de leur composition

Les ciments sont classés, en fonction de leur composition, en cinq types principaux selon la norme Algérienne NA442. Ils sont notés CEM et numérotés de 1 à 5 en chiffres romains. Ils sont regroupés dans le tableau 1.2.

**Tableau 1.2.** Types de ciment et composition.

Ciment % en masse	Notation	K	S	D	Z	Cendres volantes		T	L	C.S
						V	W			
Portland	CPA-CEM I	95-100	-	-	-	-	-	-	-	0 – 5
Portland compose	CPJ-CEM II/A	80 – 94	6 - 20							
	CPJ-CEM II/B	65-79	21 – 35							
De haut fourneau	CHF-CEM III/A	35-64	36-65	-	-	-	-	-	-	0 – 5
	CHF-CEM III/B	20-34	66-80	-	-	-	-	-	-	0 – 5
	CLK-CEM III/C	5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	0 – 5
Pouzolanique	CPZ-CEM IV/A	65-90	-	10 - 35		-		-	-	0 – 5
	CPZ-CEM IVI/B	45-64	-	36-55		-		-	-	0 – 5
Au laitier et aux cendres	CLC-CEM V/A	40-64	18-30	-	18-30		-		-	0 – 5
	CLC-CEM V/B	20-39	31-50	-	31-50		-		-	0 – 5

1.2.1.3. Critères de choix du ciment

Les critères de choix peuvent être résumés en trois classes :

1. la résistance souhaitée du béton
2. les impératifs de mise en œuvre
3. l'environnement de l'ouvrage.

- Critère I : Choix de la classe de résistance du ciment en fonction de la résistance du béton à 28 jours.

La relation de Bolomey permet de déterminer la résistance normale du ciment en fonction de la résistance de béton souhaitée.

$$R_{c28} = G \cdot R_{nc} \left( \frac{C}{E} - 0.5 \right) \quad (1-1)$$

avec :

- $R_{c28}$  : résistance souhaitée du béton à 28 jours (MPa)
- $G$  : coefficient granulaire fonction de la nature du granulat et du  $D_{max}$  ( $0,45 < G < 0,65$ )
- $R_{nc}$ : classe vraie (résistance nominale) du ciment à 28 jours exprimée en MPa
- $C$  : dosage en liant équivalent ( $\text{kg/m}^3$ )
- $E$  : quantité d'eau de gâchage exprimée en litres.

➤ Critère II : Impératifs de mise en œuvre

- Un décoffrage rapide, une mise en précontrainte précoce orientent vers des ciments dont la classe de résistance au jeune âge est élevée. Mais une résistance qui augmente vite suppose des réactions d'hydratations rapides qui, parce qu'elles sont exothermiques, peuvent provoquer un échauffement notable des pièces en béton.
- Pour un bétonnage par temps froid, le béton reste plus longtemps mou et déformable, et le développement des résistances est retardé, on cherchera à bénéficier de ce dégagement de chaleur en choisissant des ciments de classe. On raisonnera à l'inverse pour le bétonnage par temps chaud.

➤ Critère III : Environnement de l'ouvrage

Le béton doit dans sa formulation et ses caractéristiques, être adapté à l'environnement. La norme française NF18-011 classe l'environnement en 5 classes qui sont illustrées dans le tableau 1.3

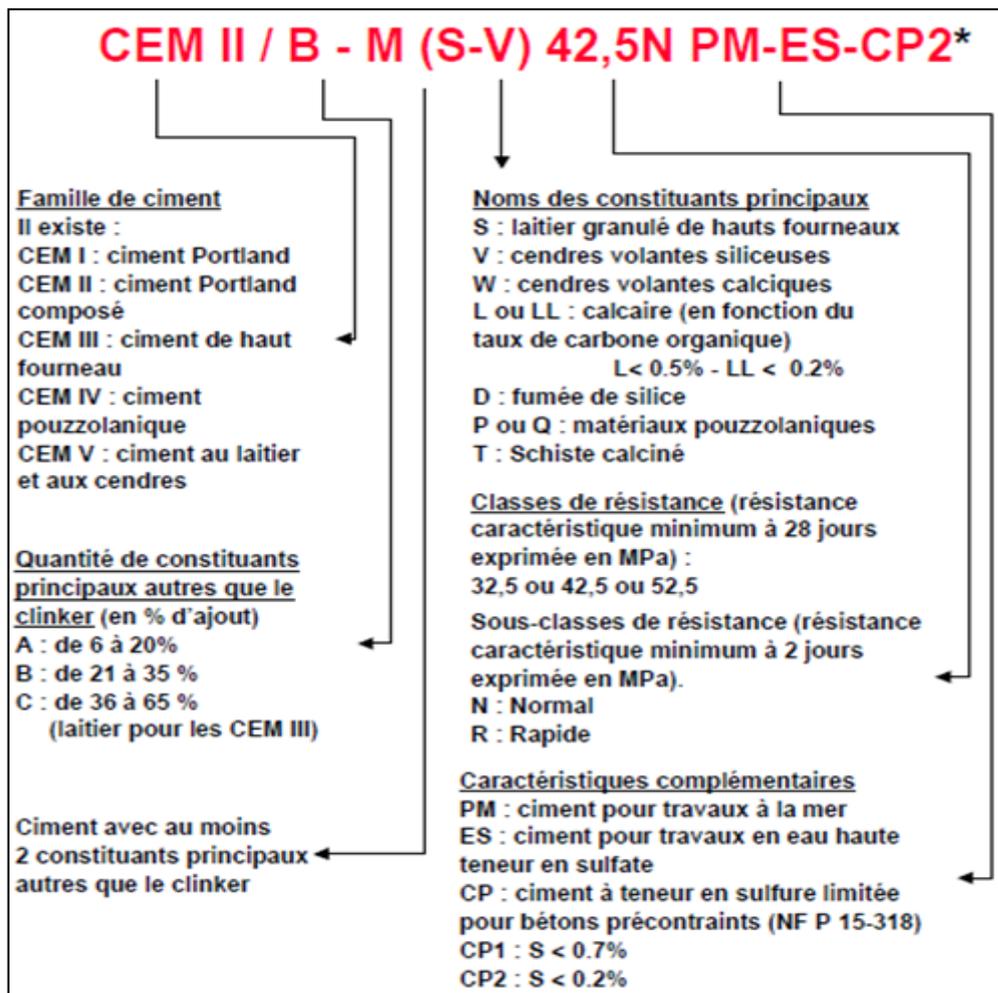
Les recommandations pour le choix du liant sont les suivantes :

- Pour les classes 1, 2, tous les types de ciments conviennent.
- Pour la classe 3, tous les ciments conviennent, à moins qu'il y ait un risque de mise en contact avec des sels fondants contenant des sulfates. Dans ce cas, certains maîtres d'œuvre demandent un ciment à caractéristiques complémentaires.
- Pour la classe 4, il faut choisir un ciment à caractéristique «prise mer».
- Pour l'environnement 5, cela dépend de l'agent agressif : Si ce sont les ions sulfate, il faut choisir un ciment de caractéristique complémentaire ; s'il s'agit d'eau douce ou acide, il faut choisir parmi les ciments courants, les (CHF-CEMIII/B) , les (CLK-CEMIII/C) et les (CLC-CEMV/A et B), soit parmi les autres, le ciment alumineux fondu et le ciment prompt naturel.

**Tableau 1.3.** Classes d'environnement selon la norme française NF18-011.

Classe 1	Les environnements secs
Classe 2	Les environnements humides sans gel ou avec un gel faible ; Les environnements humides avec gel modéré ; Les environnements humides avec un gel sévère.
Classe 3	Les environnements humides avec gel modéré ou sévère et produits dégivrant.
Classe 4	Les environnements marins immergés (sans gel ou avec un gel faible) ; Les environnements marins avec gel modéré ou sévère.
Classe 5	Les environnements faiblement agressifs chimiquement ; Les environnements moyennement agressifs chimiquement ; Les environnements fortement agressifs chimiquement.

**Marque du ciment**



### 1.2.2. Eau de gâchage

L'eau utilisée pour la fabrication des mélanges de béton doit être de l'eau potable dépourvue de toutes impuretés et odeurs. En général toutes les eaux potables peuvent être utilisées pour la production du béton; l'eau de mer, même si elle est agressive vis-à-vis du ciment durci, peut être utilisée pour la fabrication d'un béton non armé.

L'eau a essentiellement deux fonctions:

- ✓ Une **fonction physique**, qui confère au béton frais les propriétés rhéologiques d'un liquide (permettant donc son écoulement et le moulage),
- ✓ Et une **fonction chimique** tant que liant de la poudre de ciment. Elle sert aussi à mouiller les agrégats, et donc à assurer un bon lien avec la pâte de ciment.

L'eau dans la pâte de ciment hydraté est contenue sous différentes formes, notamment sous forme d'eau libre, adsorbée et liée. Elle est nécessaire non seulement pour l'hydratation du ciment mais aussi de donner au béton une consistance suffisamment fluide pour qu'il puisse être utilisé.

#### 1.2.2.1. Actions de l'eau :

- Pour hydrater 100kg de ciment, 25 litres d'eau sont nécessaires ( $E/C=0,25$ ) or  $E/C$  mis en œuvre pour des bétons classiques classiquement  $>> 0,5$  (0,6-0,7) : la quantité d'eau ajoutée est toujours très supérieure à la quantité nécessaire à l'hydratation du ciment. Un excès d'eau provoque :
  - Des déformations : Retrait, gonflement.
  - création de réseaux capillaires augmentation de la porosité, baisse de la compacité et ségrégation
  - Une diminution des performances mécaniques : baisse de la résistance à la compression / flexion
  - augmentation de la perméabilité (plus grande pénétration des agents extérieurs).
- Des défauts de parements et une sensibilité à l'évaporation.
- Elle rend le béton sensible au gel : expansion lorsque transformation en glace
- Elle favorise les réactions électrochimiques (carbonatation, corrosion, alcali réaction).
- Elle favorise les moisissures et le développement de matières organiques.
- Elle dissout : gypse, plâtre, chlorure et Elle transporte : chlorure, sulfates, gaz carbonique.
- Elle chemine : par gravité, par capillarité, en vapeur

#### 1.2.2.2. Exigences requises pour les eaux de gâchage : NF EN 1008

- Eau potable : aucun essai
- Eaux usées : non
- Eau récupérée de la fabrication des bétons

- Eaux d'origine souterraine
- Eaux naturelles de surface ou de rejets industrielles
- Eau de mer : peut être utilisée pour la production de béton non armé mais pas pour le béton armé (BA) ou le béton précontraint (BP).

La norme préconise 3 types d'exigences :

- Exigences sensoriels :
  - traces visibles d'huile, de mousse, (les organiques en général réduisent la résistance des bétons)...
  - matières en suspension importantes,
  - couleur,
  - odeur.
- Exigences chimiques :
  - Teneurs limitées pour certains éléments indésirables :
    - les chlorures (incompatibles avec la confection de BA car amorce la corrosion des armatures),
    - les sulfates (risque de formation d'ettringite secondaire gonflante),
    - les alcalins (risques d'alcali-réaction)
    - les sels de plomb et de zinc,
    - les phosphates et les nitrates.
- Exigences mécaniques :
  - Temps de début de prise : ne doit pas être < de 1h et ne doit pas s'écarter de + de 25% par rapport au même essai avec de l'eau distillée.
  - Temps de fin de prise : ne doit pas être > de 12h et ne doit pas s'écarter de + de 25% par rapport au même essai avec de l'eau distillée.
  - Résistance en compression à 7j (béton ou mortier): doit atteindre au moins 90% des résistances obtenues avec de l'eau distillée.

### ***1.2.3. Les granulats***

Les granulats, mélange de sable et de graviers constituent la phase inerte du béton. Son rôle dans un mélange de béton est de permettre de produire un matériau ayant une résistance et une durabilité appropriées avec le moindre coût possible. Ils contribuent à l'amélioration de la compacité, de l'homogénéité, de l'ouvrabilité et de la résistance du béton. Leur choix doit être judicieux et doit s'orienter vers des granulats durs, propres, de granulométrie continue, chimiquement inerte, et ne contenant pas certaines impuretés. Pour la formulation du béton, deux facteurs ont longtemps été considérés comme ayant une influence sur les propriétés du béton :

- la proportion relative gravillons/sable traduite par le facteur G/S que les études récentes ont fait apparaître comme moins importante qu'on ne le pensait auparavant, dans la mesure où ce facteur reste inférieur à 2 ;
- la granulométrie du sable caractérisée, par exemple, par son module de finesse. Le module de finesse d'un sable pour béton est généralement compris entre 2,2 et 2,8.

#### 1.2.3.1. Granularité

La granularité des granulats concerne la distribution dimensionnelle des grains. Normalement, la courbe granulométrique des granulats doit être continue en sorte que les petits grains puissent bien remplir les vides créés par les grains ayant un aille plus grande. Par ailleurs, un rapport optimal de Gravillon/Sable permet d'obtenir une meilleure compacité des granulats.

#### 1. 2.3.2. Classifications normalisées des granulats

Les granulats utilisés pour le béton sont d'origine naturelle, artificielle ou recyclée :

- ✓ «Naturels», lorsqu'ils sont issus de roches meubles ou massives et qu'ils subissent aucun traitement autre que mécanique (réduction de dimensions) ;
- ✓ «Artificiels», lorsqu'ils proviennent de la transformation à la fois thermique et mécanique de roches ou de minerais ;
- ✓ «Recyclés», lorsqu'ils proviennent de la démolition d'ouvrages ou lorsqu'ils sont réutilisés.

##### a) Classification selon la provenance

En fonction de leur provenance, On distingue quatre catégories:

- Les granulats d'origine alluvionnaire ; ils sont considérés comme roulés, ou semi concassés.
- Les granulats de roches massives; appelés aussi granulats concassés .
- Les granulats de transformation ayant subis des transformations physico-chimiques.
- Les granulats de recyclage.



**Figure 1.3.** Exemples de granulats de différentes origines.

a1) Granulats alluvionnaires : Les gisements les plus habituels sont les lits de rivières déposés par les cours d'eau et les fonds marins. En fonction de la situation du gisement par rapport à la hauteur du cours d'eau ou de la nappe phréatique de l'endroit, l'exploitation a lieu soit à sec ou dans l'eau. La forme de ces granulats est roulée. Cette forme est acquise par l'érosion. Ces granulats sont criblés (séparés) en différentes classes granulaires. On peut distinguer :

- Sables et graviers alluvionnaires fluviaux : siliceux ou silico-calcaires déposés par les cours d'eau pendant l'ère quaternaire. Ils sont exploités tout au long du réseau hydrographique.
- Alluvions marines : exploitées entre 10 et 30 mètres de profondeur sur le plateau continental. Ces granulats ne sont immergés que depuis quelques milliers d'années par suite de la remontée du niveau marin après la dernière glaciation (époque actuelle). En réalité, il s'agit d'anciennes alluvions fluviales et littorales.
- Couches de sables ou de sablons, roches sédimentaires non consolidées : déposées il y a des millions d'années.

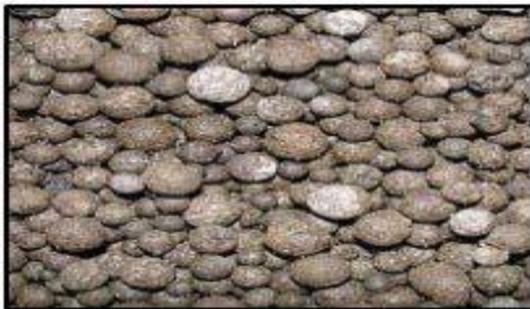
a2) Granulats de roches massives : Les gisements de roches massives (carrières) correspondent à une multitude de situations géologiques (couches plus ou moins épaisses, filons, épanchements volcaniques, massifs de granite...) et à des localisations géographiques très différentes. La carrière peut être implantée en plaine sur un plateau ou en montagne au bord d'une falaise. L'exploitation s'effectue à flanc de coteau

ou en puits, en fonction de la situation du niveau géologique utile. On peut ainsi extraire et produire des granulats avec des roches éruptives, des roches métamorphiques et des roches sédimentaires consolidées (calcaires).

Ces granulats sont obtenus par abattage et concassage, ce qui leur donne des formes angulaires. Une phase de pré-criblage est indispensable à l'obtention de granulats propres. Différentes phases de concassage aboutissent à l'obtention des classes granulaires souhaitées. Les granulats concassés présentent des caractéristiques qui dépendent de l'origine de la roche, régularité du banc, degré de concassage. On peut distinguer :

- Roches sédimentaires consolidées telles que les calcaires ou les degrés. On les exploite dans les bassins sédimentaires et dans les régions montagneuses.
- Roches métamorphiques dures telles que les quartzites ou les gneiss. Elles affleurent plus particulièrement dans les massifs montagneux anciens.
- Roches éruptives anciennes. Il s'agit de roches plutoniques à cristaux plus ou moins développés (granites, diorites, micro-diorites, gabbros...) ou de roches volcaniques (rhyolites...), exploitées dans les massifs montagneux anciens avec une répartition géographique analogue à celle des roches.
- Roches volcaniques récentes telles que le basalte, le trachyte ou l'andésite ; roches épanchées par le volcanisme récent du massif Central.

a3) Granulats de transformation : Les granulats de transformation sont souvent d'origine minérale résultant d'un procédé de transformation industriel comprenant des modifications thermiques (cuisson) ou chimiques. Dans cette catégorie se rangent les granulats légers transformés, comme l'argile expansée (Figure 1.4. a), le schiste expansé (Figure 1.4. b).



(a)



(b)

**Figure 1.4.** Granulats expansés : (a) Bille d'argile expansé; (b) Schiste expansé

La cuisson à des températures allant de 1000 à 1200 °C, dans un four rotatif, de nodules d'argile ou de schiste produit d'une part un dégagement gazeux au sein de chaque nodule sous l'effet de réactions chimiques, ce qui entraîne l'expansion du nodule, d'autre part une vitrification de la couche externe. On obtient alors un granulat plus gros, avec une grande porosité, donc plus léger.

a4) Granulats de recyclage : L'emploi des déchets et des sous-produits industriels dans le secteur du bâtiment répond simultanément au souci d'économie des ressources naturelles en granulats.

b) Classification selon la masse volumique

Le classement des granulats en fonction de leur masse volumique est illustré dans le tableau suivant :

**Tableau 1.4.** Classification des granulats selon leur masse volumique

Classification	Masse volumique ( $t/m^3$ )
Granulat léger	$\varphi < 2$
Granulat courant	$2 \leq \varphi \leq 3$
Granulat lourd	$\varphi > 3$

b1) Les granulats lourds

Ils sont essentiellement utilisés dans la confection des bétons lourds, matériaux utilisés dans la construction d'ouvrages nécessitant une protection biologique contre les rayonnements produits dans les accélérateurs et autres piles atomiques. Ces granulats se caractérisent essentiellement par une densité très élevée. En pratique on utilise les granulats suivants :

**Tableau 1.5** Densités de quelques granulats lourds

Nature du granulat	Caractéristiques	Densité
Barytine	Il s'agit d'un sulfate de baryum.	(4,2 ÷ 4,7)
Magnétite	Il s'agit d'un oxyde de fer.	(4,5 ÷ 5,1)
Ribbons	Il s'agit de déchets de ferraille.	(7,6 ÷ 7,8)
Grenaille de fer	Il s'agit de la fonte.	(7,6 ÷ 7,8)

b2) Les granulats légers

Ce sont des granulats utilisés dans la confection de bétons légers. Ils seront développés un peu plus loin. Le tableau suivant présente l'élaboration, l'origine, les matières premières et les produits finis des principaux granulats légers utilisés en construction.

**Tableau 1.6** Types de granulats légers

	Elaboration	Origine	Matières premières	Produits finis
Matières premières naturelles	sans traitement thermique	Volcanique	Ponces Pouzzolanes Tufs volcaniques Cinérites	Ponces Pouzzolanes Tufs volcaniques Cinérites
		Sédimentaire	Calcaire poreux Calcaire coquillier Tufs calcaires Dialomites Spongolites	Diatomite Diatomite calcinée
	avec traitement thermique	Volcanique	Perlites	Perlite expansée
		Altération	Vermiculites	Vermiculite exfoliée
		Sédimentaire	Argiles Schistes Ardoise	Argile expansée Schistes expansés Ardoise expansée gravillons
	Matières premières artificielles	sans traitement thermique	Démolition	Décombres, cendres de foyers
avec traitement thermique		sous-produits industriels	Cendres volantes Laitiers Calcine	Mâchefers frittés Cendres volantes Laitier expansé Verre expansé

c ) Classification des granulats selon leur taille

Les granulats sont classés en fonction de leur granularité déterminée par analyse granulométrique sur des tamis de contrôle à mailles carrées dans une série normalisée. La norme Algérienne NA/452 classe les granulats en trois catégories suivant leurs dimensions, qui vont de 0,08 mm à 80 mm . Nous trouverons les sables, les graviers ou gravillons, et les cailloux. Au-delà des limites indiquées c’est le domaine des

fines et des moellons. Le tableau 1.7 indique le classement normalisé des granulats en fonction de leur taille.

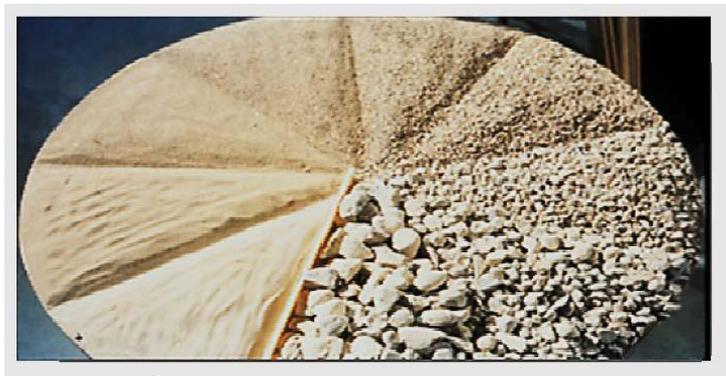
**Tableau 1.7.** Classification normalisée des granulats

Granulat		Ecartement des Mailles des tamis	Diamètre des trous des passoirs (mm)
<i>Fines</i>		< 0,08	
<i>Sables</i>	Fins	0,08 ÷ 0,315	
	Moyens	0,315 ÷ 1,25	
	Gros	1,25 ÷ 5	
<i>Graviers</i>	Fins		6,3 ÷ 10
	Moyens		10 ÷ 16
	Gros		16 ÷ 25
<i>Cailloux</i>	Petits		25 ÷ 40
	Moyens		40 ÷ 63
	Gros		63 ÷ 80
<i>Moellons</i>			> 80

Ainsi tout granulat est désigné par deux nombres (d/D) représentant respectivement la plus petite (d) et la plus grande dimension (D) de ses grains. Tout intervalle (d/D) ainsi défini est également appelé classe granulaire.

Les dimensions (d) et (D) sont choisies dans la série suivante :

0 – 0,063 – 0,08 – 0,1 – 0,125 – 0,16 – 0,2 – 0,25 – 0,315 – 0,4 – 0,5 – 0,63 – 0,8 – 1 – 1,25 – 1,6 – 2 – 2,5 – 3,15 – 4 – 5 – 6,3 – 8 – 10 – 12,5 – 14 – 16 – 20 – 25 – 31,5 – 40 – 50 – 63 – 80 – 100 – 125 mm, correspondant à des tamis normalisés dont les ouvertures varient en progression géométrique de raison  $10^{1/10}$ .



**Figure 1.7.** Éventail de grosseurs de granulats utilisés dans le béton.

### 1.2.3.3. Propriétés mécaniques

La première propriété mécanique des granulats est la dureté qui est définie comme étant la résistance d'un échantillon de roche à se briser sous un choc. On distingue :

a) L'essai Micro Deval (NA 457)

L'essai se pratique sur des gravillons 4/6.3 ou 6.3/10 ou 10/14. 500 grammes de gravillon sont placés avec une charge de 2 à 5kg de billes d'acier de 10mm de diamètre dans une jarre cylindrique remplie d'eau. On fait tourner 15 minutes et on récupère le passant au tamis de 2mm ( $P$ ).



**Fig.1.8.** Appareil micro-Deval

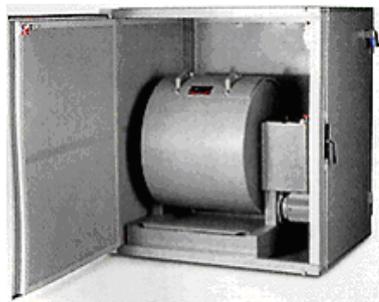
Le coefficient micro Deval est défini par :

$$M_{DE} = 100 \left( \frac{P}{500} \right) \quad (1 - 2)$$

Le coefficient micro Deval est d'autant plus élevé que le granulat est moins bon.

b) Essai Los Angeles (NA/455)

C'est un essai qui estime la résistance à la fragmentation par chocs et à l'usure par frottements réciproques. Il se pratique sur les classes granulaires [(4/6,3); (6,3/10); (10/14)]. Le tambour de la machine (figure 1.9) est entraîné en rotation, à une vitesse entre 31 et 33 tr/min, par un moteur électrique. La machine est équipée d'un compteur de tours permettant l'arrêt automatique du moteur une fois le nombre de tours requis (500 tours pour les granulats) effectué. La charge est constituée de 7 à 11 boulets en acier de 417grammes. Les modèles récents sont équipés d'une cabine de protection et d'isolation.



**Fig.1.9.** Photo du Los Angeles

Pour un granulat donné, cette résistance est mesurée par le coefficient Los Angeles ( $L_A$ ), rapport de la masse des fragments passant au tamis de 1,6 mm mesurée en fin d'essai à la masse de l'échantillon.

$$L = 100 \left( \frac{\text{Passant au tamis de 1,6 mm}}{\text{Masse de l'échantillon}} \right) \quad (1 - 3)$$

Le coefficient Los Angeles est d'autant plus élevé que le granulat est moins bon. La norme limite ce coefficient à 40% (cette valeur est réduite à 25% dans certains cas particuliers). Le tableau suivant donne des valeurs de résistance mécanique de certaines roches, en signalant qu'elles ne sont que des valeurs indicatives ; en effet ces valeurs dépendent fortement de la composition minéralogique, de la porosité et du degré d'altération de la roche.

**Tableau 1.8.** Résistances mécaniques moyennes de certaines roches

Nature de la roche	Micro-Deval en présence d'eau	Los Angeles $L_A$
Microgranite	5 à 10	15 à 25
Granite	10 à 15	15 à 20
Diorite	8 à 25	10 à 30
Basalte	à 25	18 à 28
Calcaire	15 à 80	20 à 80

#### 1.2.4. Les adjuvants chimiques

Afin d'améliorer certaines propriétés des bétons, on a recours parfois à des adjuvants chimiques. Les adjuvants sont des produits organiques et inorganiques qui, quand ils sont ajoutés en petite quantité, modifient certaines propriétés des bétons. Les plus connus sont: Entraîneur d'air, Réducteur d'eau à moyen ou à forte action, accélérateur ou retardateur de prise.

L'addition de ces produits dans le béton engendre des phénomènes physico-chimiques très complexes.

On utilise les adjuvants surtout pour :

1. Diminuer le coût des constructions en béton
2. Donner au béton certaines caractéristiques plus efficacement que par d'autres moyens
3. Assurer la qualité du béton durant le malaxage, le transport, la mise en place et la cure dans des conditions météorologiques défavorables
4. Obéir à certaines urgences durant le bétonnage.

## Chapitre 2 Les Ajouts du béton

### 2.1. Introduction

Les additions minérales sont des matériaux minéraux pouvant être partiellement substituées au béton pour améliorer certaines de ses propriétés ou pour lui conférer des propriétés particulières. Les additions peuvent être réactives ou inertes.

### 2.2. Classification des ajouts

Les ajouts peuvent être naturels ou artificiels, inertes ou actifs. Les ajouts peuvent réagir en tant que matériau hydraulique, hydraulique latent ou pouzzolanique, ou encore sous forme de fillers. Ils se divisent selon leur réactivité comme suit :

#### 2.2.1. Les additions actives

##### 2.2.1.1. Le laitier de haut fourneau (S)

Dans le procédé de production de fonte dans les hauts fourneaux, le laitier qui surnage au dessus de la fonte est tout de suite refroidi après la coulée et par conséquent rapidement vitrifié. La majorité des éléments tels que: Ca, Mg, Si, et Al sont sous forme de phase non cristalline. Une fois broyé à environ 400 à 500m<sup>2</sup>/kg, ce produit développe de bonnes propriétés cimentaires.

La composition minéralogique d'un laitier dépend de son mode de refroidissement. Plus le refroidissement est rapide, plus le laitier est vitreux. Le laitier se refroidit sous forme de granules ou boulettes et nécessite un broyage pour être utilisé comme ajout minéral. Les particules de laitier dont la taille est inférieure à 10µm contribuent à la résistance au jeune âge (jusqu'à 28 jours), tandis que les particules dont le diamètre est compris entre 10 et 45µm contribuent au développement des résistances ultérieures. Les particules > 45µm ont de la difficulté à s'hydrater.

**Tableau 2.1.** Composition chimique moyenne d'un laitier granulé

Eléments	Pourcentage (%)
<b>CaO</b>	40 ÷ 50
<b>SiO<sub>2</sub></b>	26 ÷ 32
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	12 ÷ 20
<b>MgO</b>	2 ÷ 6

La composition du laitier granulé doit être constituée d'au moins deux tiers, en masse, de la somme (CaO, MgO, SiO<sub>2</sub>).

$$\text{Le rapport en masse } \frac{(\text{CaO} + \text{MgO})}{(\text{SiO}_2)} \text{ doit dépasser } 1 \quad (2-1)$$

#### 2.2.1.2. La fumée de silice (F)

Les fumées de silice sont un sous-produit de la fabrication du silicium ou de différents alliages de ferrosilicium. Elles sont produites lors de la réduction d'un quartz très pur par du charbon dans un four à arc, à la température de 2000°C.



**Figure 2.1.** *Fumée de silice*

Les fumées de silice se présentent sous forme de fines particules sphériques d'un diamètre moyen d'environ 0,1µm. Leur surface spécifique est de l'ordre de 20 à 25m<sup>2</sup>/g. Leur teneur en silice vitreuse varie de 75 à 95%. La finesse et la forme vitreuse des fumées de silice leur donnent des propriétés pouzzolaniques. En plus cette grande finesse leur permet, lors du malaxage du béton, de s'insérer entre les grains de ciment, ce qui diminue le dosage en eau. Enfin en s'hydratant les fumées de silice entraîne la formation d'hydrates contribuant ainsi à une augmentation des résistances mécaniques. Leur couleur est le plus souvent gris clair.

#### 2.2.1.3. Les cendres volantes (C)

Lors de sa combustion dans les centrales thermiques, le charbon pulvérisé passe à travers une zone de très haute température dans le four. Les composants volatiles et le carbone sont brûlés, tandis que les impuretés minérales tel que l'argile, le quartz et les feldspaths passent en fusion.



**Fig. 2.2.** *Cendre volante.*

Les produits en fusion sont rapidement entraînés vers la zone froide où ils se solidifient en de petites sphères de verre de diamètre allant de 1 à 100 $\mu\text{m}$  ( $50\% < 20\mu\text{m}$ ). La forme et la granulométrie des cendres volantes ont un effet important sur l'ouvrabilité et la demande en eau des bétons frais. La majorité de ces sphères sont emportées par le courant gazeux vers l'extérieur. Les cendres volantes peuvent avoir différentes compositions chimiques et phasiques dépendant des impuretés contenues dans le charbon utilisé.

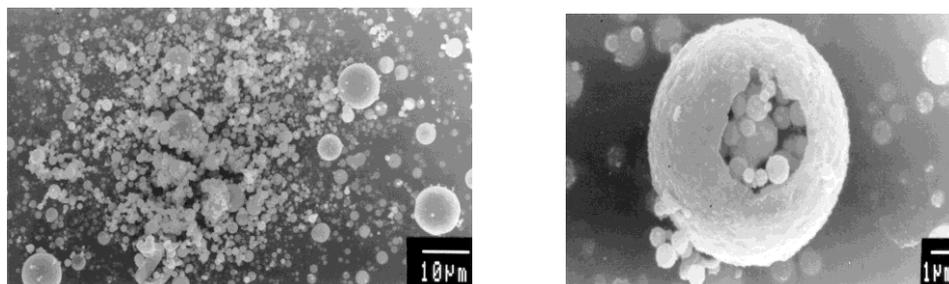
Du point de vue minéralogique, les cendres volantes se divisent, selon la norme Américaine ASTM C-61894-a en deux classes, qui diffèrent l'une de l'autre par leur teneur en CaO.

a- Classe F: Contenant moins de 10% de CaO produit de la combustion de l'antracite et du charbon bitumineux,

b- Classe C: Contenant entre 15 et 35% de CaO produit de la combustion du lignite.

La majorité des cendres volantes (classes F et C) contiennent approximativement 60 à 85% de verre, 10 à 30% de phases cristallines et 10% de carbone non calciné. Elles ont une grande proportion de silice et d'alumine. C'est un verre d'aluminosilicate. Sa vitrification est souvent partielle.

La présence de cristaux de mullite ( $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ), de quartz, d'hématite et de magnétite diminue la réactivité de cette cendre volante. Les cendres volantes de la classe "C" sont plus réactives que celles de la classe "F", car tout le Ca est sous forme de phases cristallines réactives ( $\text{C}_3\text{A}$ , CS et  $\text{C}_4\text{A}_3\text{S}$ ). Par ailleurs, la phase amorphe principale contient suffisamment de Ca pour accélérer la réactivité de l'aluminosilicate. La figure 2.3 expose deux images au microscope électronique à balayage de la cendre volante classe "F".



**Fig. 2.3.** *Cendre volante classe F (microscope électronique à balayage)*

#### 2.2.1.4. Le sulfate de calcium

Le gypse est une roche sédimentaire dissoute à l'origine dans l'eau de mer. Le sulfate de calcium est ajouté en faible quantité aux autres constituants du ciment au cours de sa fabrication pour retarder suffisamment la prise et assurer ainsi la mise en place convenable du mortier ou du béton.

Le sulfate de calcium peut se présenter sous forme de:

- Gypse ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) ou sulfate de calcium déshydraté.
- D'hémihydrate ( $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ ).
- De l'anhydrite ( $\text{CaSO}_4$ ) ou sulfate de calcium anhydre.



**Fig.2.4.** *Sulfate calcium*

Ces formes de sulfate de calcium présentent toutes la même solubilité finale quand elles se trouvent dissoutes dans l'eau, mais leur vitesse de dissolution peut être différente. Il est composé de 92 à 94% de ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), 2 à 3% de ( $\text{CaCO}_3$ ), et 2 à 4% d'autres éléments tels que les ( $\text{SiO}_2, \text{MgO}, \text{R}_2\text{O}$ ). Le sulfate de calcium peut être du gypse (sulfate de calcium dihydraté ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), de l'hémihydrate ( $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ ), de l'anhydrite (sulfate de calcium anhydre ( $\text{CaSO}_4$ ) ou un mélange de ceux-ci. Ces formes de sulfate de calcium présentent toutes la même solubilité finale quand elles se trouvent dissoutes dans l'eau, mais leurs vitesses de dissolution peuvent être différentes.

Le pourcentage optimal de gypse croît en fonction:

- de la teneur en alcalis, car l'addition du gypse neutralise l'action des alcalis,
- de la teneur en  $\text{C}_3\text{A}$  et de sa réactivité,
- de la finesse de mouture.

#### 2.2.1.5. La pouzzolane naturelle

La pouzzolane est une roche naturelle correspondante à des projections volcaniques, essentiellement basiques. Sa couleur est généralement noire ou rouge selon le degré d'oxydation du fer. Elle est composée de silice ( $\text{SiO}_2$ ), d'alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) et d'oxyde de fer ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). La somme des trois oxydes ( $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ) doit être supérieure à 70% selon la norme Américaine ASTM C-618.

### 2.2.1.6. La pouzzolane artificielle

Les pouzzolanes artificielles sont toute matière essentiellement composés de silice, d'alumine et d'oxyde de fer ayant subi un traitement thermique pour lui assurer des propriétés pouzzolaniques. Elles sont des déchets des différentes industries. On distingue: soit des résidus de fabrication industrielle (tel que les machfers, cendre de bois ou d'houille), soit des débris de brique et de tuile fabriqués avec des argile pures calcinés à des températures modérées. On distingue aussi le schiste cuit, et les déchets de l'industrie à base de métakaolinite.

### 2.2.2. Les additions minérales inertes

Ce sont des matériaux quasiment inertes, naturels ou synthétiques spécialement sélectionnés et qui par leur composition granulométrique, améliorent les propriétés physiques du ciment portland: l'ouvrabilité, le pouvoir de rétention d'eau. Parmi ces additifs on distingue les fillers calcaires et les schistes calcinés.

#### 2.2.2.1. Les fillers (F)

Les fillers sont des matières inorganiques minérales, naturelles ou artificielles spécialement sélectionnés. Ils peuvent être inertes ou présenter des propriétés faiblement hydrauliques. Les fillers sont obtenus par broyage fin ou par pulvérisation de certaines roches (calcaire, basalte, laitier, bentonite, cendres volantes). L'introduction de ces matières dans la composition du ciment, avec une granulométrie et préparation appropriée améliorent les propriétés physiques des ciments, telles que l'ouvrabilité ou le pouvoir de rétention d'eau.

#### 2.2.2.2. Les schistes calcinés (T)

Sont des schistes produits dans un four à 800°C, ils contiennent des phases de clinker, des petites quantités de chaux libre CaO, de sulfates de calcium, ainsi que des oxydes en quantités plus importantes. Finement broyés, ils présentent de fortes propriétés hydrauliques et aussi pouzzolaniques..

#### 2.2.2.3. Les calcaires (L)

Lorsqu'ils sont utilisés dans une proportion excèdent 5% en masse (constituant principal), le calcaire doit satisfaire aux exigences suivantes.

- teneur en calcaire:  $\text{CaCO}_3 \geq 75\%$  en masse.
- teneur en argile: Adsorption de bleu de méthylène  $\leq 1.20$  g/100g.
- teneur en matières organiques: (TOC)  $\leq 0.50\%$  en masse.

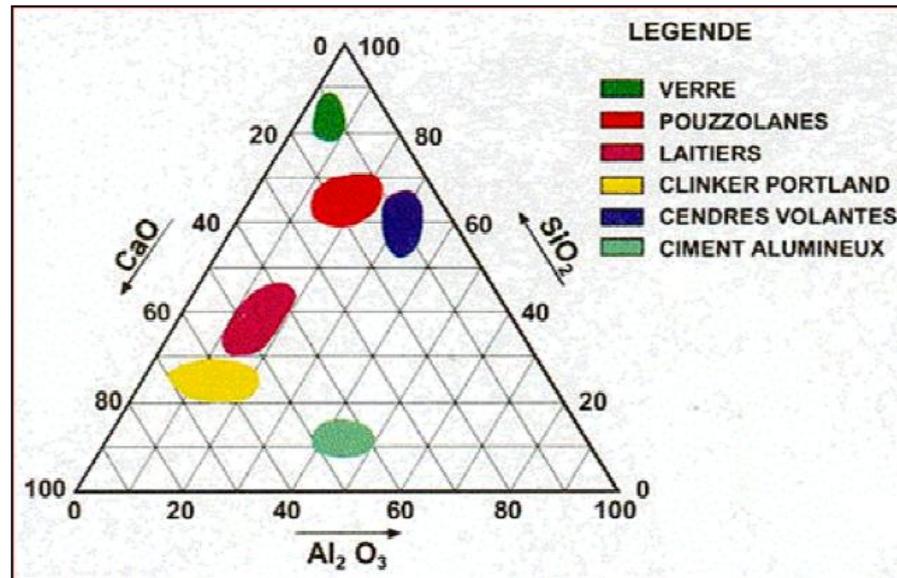


Fig.2.5. Le diagramme de Rankin.

### 2.3. Bénéfices de l'utilisation des ajouts minéraux

#### 2.3.1. Bénéfices fonctionnels

- Incorporation des particules fines améliore la maniabilité et réduit la demande en eau (à l'exception des ajouts d'une grande finesse)
- Il y a une amélioration des propriétés mécaniques et de la durabilité du béton
- Il y a une diminution de la chaleur d'hydratation dégagée du béton, ce qui diminue la fissuration d'origine thermique.

#### 2.3.2. Bénéfices écologiques et environnementaux

- Diminution de l'émission du CO<sub>2</sub> par l'industrie cimentière
- Elimination des sous-produits de la nature.

#### 2.3.3. Bénéfices économiques

- la plupart des ajouts minéraux sont des sous-produits de différentes industries et leur coût est souvent égal au coût du transport et de la manipulation donc leurs utilisations contribuent à la diminution du prix de revient du béton.

## Chapitre 3

### Les adjuvants du béton

#### 3.1. Introduction

Les adjuvants sont des produits (liquides ou poudres) qui ajoutés au béton en faible quantité (moins de 5 %) permettent d'améliorer certaines propriétés : maniabilité et imperméabilité, ou qualités : compacité et résistance au gel, souhaitées soit sur béton frais soit sur béton durci. Les adjuvants sont toujours incorporés dans la masse du béton frais. Chaque adjuvant est défini par une fonction principale et une seule.

Le mode d'action des adjuvants est soit mécanique (changement de la consistance du béton ou du mortier), soit physique, soit chimique (dans ce cas c'est la vitesse de prise et la réaction d'hydratation du ciment qui est visée).

Il s'agit donc de matières possédant des propriétés chimiques ou physico-chimiques appropriées au rôle assigné. Un adjuvant a en général une action principale d'après laquelle il se trouve défini et classé.

#### 3.2. Historique

- 1910 – 1920 Apparition des HYDROFUGES et ACCÉLÉRATEURS à base de chlorure de calcium.
- 1932-1934 Apparition des PLASTIFIANTS.
- 1950 Apparition des RÉDUCTEURS D'EAU.
- 1989 Apparition des SUPERPLASTIFIANTS.

#### 3.3. Classification des adjuvants

Les Adjuvants pour béton, mortier et coulis sont classés selon 3 grandes catégories :

##### 3.3.1. Adjuvants modifiant l'ouvrabilité et la rhéologie du béton.

Cette catégorie comprend les produits suivants :

- 1) Plastifiant / Réducteur d'eau,
- 2) Super plastifiant / Haut réducteur d'eau.
- 3) Fluidifiants.

### 3.3.1.1. Plastifiants-réducteurs d'eau

#### a) Définition

Les plastifiants permettent de modifier la consistance, de réduire la teneur en eau du béton donné (Réducteur d'eau), ou, sans modifier la teneur en eau, d'augmenter l'affaissement / l'étalement ou de produire les deux effets à la fois. Les Plastifiants sont normés selon la NF EN 934-2 d'avril 1998.

Ce sont des produits d'additions pulvérulents extrêmement fins qui, ajoutés au béton lui confèrent une meilleure plasticité améliorant ainsi ses qualités de maniabilité et d'ouvrabilité.

#### b) Mode d'emploi

Produits introduits dans l'eau de gâchage.

Dosage indicatif : 0,15 à 0,4% selon le but recherché. 0,6 à 1,2% pour les «multi-dosages»

#### c) Effets sur le béton frais

- Amélioration de l'ouvrabilité.
- Maintien dans le temps
- Diminution du ressuage.
- Diminution de la ségrégation.
- Amélioration de la pompabilité des bétons.
- Réduction du retrait hydraulique.

#### d) Effets sur le Béton durci

- Amélioration des performances mécaniques à court et à long terme.
- Diminution de la porosité.
- Augmentation de la durabilité.
- Amélioration de la cohésion ciment/granulats.
- Amélioration de l'adhérence acier/béton.

#### e) Domaines d'emploi

- Tous les bétons courants jusqu'à 30MPa
- Le béton prêt à l'emploi.
- Le béton de préfabrication légère (blocs, pavés, dalles, etc.).
- Les bétons d'ouvrages d'art.
- Les bétons routiers.

### 3.3.1.2. Les fluidifiants

#### a) Définition

Adjuvants qui, sans modifier la consistance, permettent de réduire fortement la teneur en eau du béton Super plastifiants Haut réducteurs d'eau Définition fortement la teneur en eau du béton donné, ou qui, sans modifier la teneur en eau, fait augmenter considérablement l'affaissement ou l'étalement, ou les deux effets à la fois.

Afin d'obtenir le maximum d'efficacité des fluidifiants, il serait judicieux d'introduire l'adjuvant en deux fois : une première dose dans l'eau de gâchage afin d'assurer le rôle de séparation des grains; et une deuxième dose après l'introduction de l'ensemble des constituants pour permettre la fluidification du mélange. Mais l'idéal serait d'introduire une troisième dose juste avant la mise en œuvre; malheureusement, dans la plupart des cas les opérations de mise en œuvre sur chantier ne sont pas compatibles avec de telles procédures.



**Figure 3.1** Fluidifiant conditionné sous forme de bidon

b) Mode d'emploi

- Produits introduits soit dans l'eau de gâchage, soit en cours
- de malaxage.
- Dosage indicatif : 0,6 à 5% selon le but recherché.

c) Effets sur le béton frais

- Diminution de la teneur en eau.
- Amélioration de l'ouvrabilité.
- Maintien de l'ouvrabilité dans le temps (jusqu'à 2h30 – 3h00)
- Maintien de l'ouvrabilité dans le temps (jusqu'à 2h30 – 3h00 à 20°C).
- Diminution du ressuage. Diminution de la ségrégation.
- Amélioration de la pompabilité des bétons.
- Réduction du retrait hydraulique.

d) Effets sur le béton durci

- Amélioration des résistances mécaniques à court et long terme.
- Diminution du retrait (due à la réduction du rapport E/C et à l'augmentation du rapport Granulat/Ciment)
- Amélioration de la compacité.

- Amélioration de la liaison béton / acier.
- Réduction de la porosité capillaire de la pâte de ciment.
- Diminution du coefficient de la perméabilité

e) Domaines d'utilisation

- Les bétons de préfabrication.
- Les bétons prêts à l'emploi.
- Les bétons lourds et légers.
- Les bétons d'ouvrages d'art.
- Les bétons de dallages industriels.
- Les bétons pompés
- Les bétons pour fondations profondes.
- Les bétons pour ouvrages fortement ferrillés.
- Les bétons soumis à des milieux agressifs.
- Les BHP, et les BTHP.
- Les bétons autonivelants - bétons autoplaçants.
- Les bétons architectoniques.

3.3.2. *Adjuvants modifiant la prise et le durcissement.*

Ce sont notamment :

- 1) Accélérateur de prise,
- 2) Accélérateur de durcissement,
- 3) Retardateur de prise.

3.3.2.1. Les accélérateurs de prise

a) Définition

Adjuvants qui diminuent le temps de début de transition du mélange pour passer de l'état plastique à l'état rigide

b) Mode d'emploi

- Produit introduit dans l'eau de gâchage.
- Dosage indicatif : de 1 à 3% du poids du ciment Accélérateurs de prise
- Possibilité de l'employer sur site après transport moyennant une homogénéisation soignée du béton.

c) Effets sur le béton

Les accélérateurs seront donc tout particulièrement employés pour :

- Les bétonnages par temps froids ;
- Des travaux nécessitant, pour des raisons économiques ou autres, un décoffrage rapide ;

- Des travaux nécessitant la préfabrication de certains éléments de structure ;
- Du traitement des dégâts qui peuvent toucher les travaux urgents.

### 3.3.2.2. Accélérateurs de durcissement

#### a) Définition:

Adjuvants qui augmentent la vitesse de développement des résistances initiales du béton, avec ou sans modification du temps de prise.

#### b) Mode d'emploi

- Produit introduit dans l'eau de gâchage.
- Dosage indicatif : de 0,8 à 2% du poids du ciment

#### c) Effets sur le béton

- Accroissement de la vitesse de montée en résistance du béton.
- Amélioration des résistances à court terme.

#### d) Domaines d'utilisation

- Tous les bétons nécessitant une résistance à court terme.
- Les bétons pour décoffrages rapides.
- Les bétons précontraints.

### 3.3.2.3. Les retardateurs de prise

#### a) Définition

Ils agissent chimiquement comme les accélérateurs en retardant plus ou moins longtemps l'hydratation et le début de prise du ciment. Ces produits sont employés en particulier :

- Pour les bétonnages par temps très chaud ;
- Pour les transports de béton sur grande distance ;
- Pour des reprises de bétonnage.



**Figure 3.2.** Retardateur de prise conditionné sous forme de bidon

Dans d'autres cas, un retardateur de prise peut être utile: il peut éliminer les joints indésirables entre les coulées, en assurant que le béton de la coulée précédente demeure assez longtemps plastique pour que la coulée suivante s'y joigne bien. Il peut contribuer à réduire les températures maximales dans le béton de masse en répartissant le dégagement de chaleur de réaction sur une période plus longue. On s'en sert aussi dans les coulis d'injection, le béton pompé ou placé selon d'autres procédés.

b) Mode d'emploi

- Produit introduit dans l'eau de gâchage.
- Dosage indicatif : de 0,2 à 0,5% du poids du ciment.

c) Effets sur le béton

- Augmentation du temps de début et fin de prise.
- Maintien de l'ouvrabilité du béton.
- Régulation de la chaleur d'hydratation.
- Amélioration des résistances à long terme

d) Domaines d'utilisation

- Le bétonnage par temps chaud.
- Le transport sur longues distances.
- Les bétons pompés.
- Les bétons pour ouvrages de masse.
- Le coulage du béton en continu.

3.3.3. *Adjuvants modifiant des propriétés particulières*, On distingue notamment :

- 1) Les Entraîneur d'air,
- 2) Les Hydrofuges de masse,
- 3) Les Rétenteur d'eau.

La classification des adjuvants repose essentiellement sur les propriétés qu'ils confèrent au béton frais ou durci.

3.3.3.1. Les entraîneurs d'air

a) Définition

Adjuvants qui permettent d'incorporer pendant le malaxage une quantité contrôlée de fines bulles d'air entraîné uniformément réparties et qui subsistent après durcissement.

b) Mode d'emploi

- Produit introduit dans l'eau de gâchage.

- Possibilité de le verser sur le sable humide à l'entrée du malaxeur.
- Dosage indicatif : de 0,05 à 0,2% du poids du ciment.
- Pour les bétons devant résister aux cycles de gel / dégel, la teneur en air entraîné doit se situer entre 4 et 6%. Leur utilisation doit être contrôlée régulièrement à l'aide d'un aéromètre et l'espacement entre les bulles doit être régulier et faible.

c) Effets sur le béton

- Protection contre les cycles de gel/dégel, sel de déverglaçage.
- Les bulles d'air améliorent l'ouvrabilité.
- Diminution de la ségrégation (moins de ressuage).
- Mise en place facilitée.
- Amélioration de l'aspect du béton au décoffrage.
- Amélioration de la cohésion du béton.

d) Domaines d'applications

- Les bétons d'ouvrages d'art exposés aux cycles gel/dégel (de préférence associés à un super plastifiant).
- Les bétons extrudés.
- Les bétons routiers.
- Les bétons manufacturés exposés au gel (dalles, pavés).

Les cycles de gel et de dégel des hivers rugeux peuvent endommager le béton ordinaire en un temps relativement court, particulièrement s'il est exposé aux sels de déglçage qu'on répand habituellement sur les chaussées et les trottoirs. Le béton qui renferme de petites bulles d'air entraînées par un adjuvant entraîneur d'air résistera à ces conditions rigoureuses. Etant donné qu'il n'y a pas d'autres solutions et que l'amélioration de la durabilité est si marquée, toutes les normes de béton exigent maintenant l'air occlus, lorsque le béton doit être exposé à un mouillage continu ou fréquent.

L'entraîneur d'air est un adjuvant qui, introduit dans l'eau de gâchage, a pour fonction principale d'entraîner la formation dans le béton, de micro bulles d'air ( $\varphi \leq 100$  microns) restant uniformément réparties dans la masse. Il améliore essentiellement :

- La plasticité et l'ouvrabilité du béton : l'air occlus dans les constituants du béton ne s'échappe plus lors du malaxage et de la mise en œuvre, mais se divise en pores qui se fixent autour des grains de sable, ce qui rend le béton plus maniable ;
- Les bulles d'air s'intercalent dans les réseaux capillaires créant des tensions superficielles diminuant ainsi le risque de ségrégation ;
- L'effet mouillant : ils permettent la réduction de l'eau de gâchage (4 à 12 %) ;

- La résistance au gel du béton durci : la présence de l'air finement réparti dans la masse permet au béton de résister au gel sans se fissurer : l'air compressible permet à l'eau de s'expanser en glace sans faire éclater le béton.

Pour des quantités d'air de l'ordre de 4 à 6%, la diminution des résistances reste habituellement inférieure à 20 %, comme on peut le voir sur la Figure 3.2.

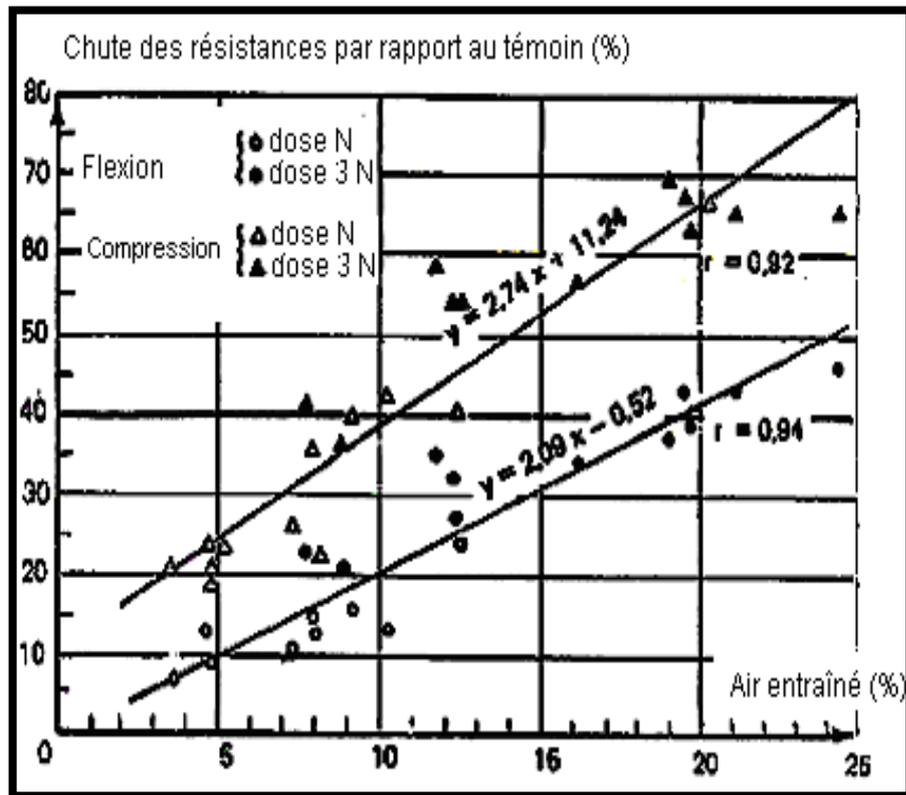


Fig.3.2. Chutes des résistances en fonction du % d'air entraîné.

Enfin la détermination du réseau de bulles d'air dans la pâte nécessite un examen microscopique ce qui n'est pas pratique.

### 3.3.3.2. Les hydrofuges de masse

#### a) Définition

Adjuvants qui permettent de limiter la pénétration de l'eau dans les pores et les capillaires du béton, sans altérer ses qualités plastiques et esthétiques. Il faut distinguer :

1. Les hydrofuges de surface, qui s'appliquent en traitement de surface à la brosse sur le béton durci. Ils ne sont en fait que des imperméabilisants ;
2. Les hydrofuges de masse qui s'ajoutent sous forme de liquide ou de poudre à l'eau de gâchage.



**Fig.3.3.** Exemple d'un hydrofuge commercialisé par la firme SIKA

b) Mode d'emploi

- Produit introduit dans l'eau de gâchage.
- Dosage indicatif : de 0,5 à 2% du poids du ciment.

c) Effets sur le béton

- Obturation du réseau capillaire du béton.
- Limitation de la pénétration de l'eau.
- Augmentation de la durabilité.

Domaines d'applications :

- Les bétons de fondation.
- Les bétons de radier.
- Les bétons de réservoir.
- Les bétons manufacturés : bordures, pavés

Le tableau 3.1 présente la synoptique des principaux adjuvants.

**Tableau 3.1.** *Synoptique des principaux adjuvants*

	Utilisation
Accélérateur	Décoffrage rapide ; Temps froid ; Préfabrication ; Travaux d'étanchement, cachetage, travaux à la mer ; Réparations rapides, pistes d'aérodromes, routes, scellements.
Retardateur	Temps chaud ; Injection à grande profondeur ; Voile d'étanchéité ; Transport de béton sur grande distance ; Reprise de bétonnage – confection de béton avec granulats apparents ; Parois moulées dans le sol.
Plastifiant	Transports pneumatiques du béton (béton pompé) ; Béton coulé sous l'eau ; Béton maigre ; Sables manquant de fines ; Béton très ferraillé ; Injection.
Antige l	Bétonnage jusqu'à $-10^{\circ}\text{C}$ (temps très froid) sous réserve de précautions particulières.
e Hydrofug	Mortiers d'enduit , Enduit et chapes d'étanchéité pour cuvelage – Citernes – Réservoirs – Piscines – Galeries – Tunnels – Travaux souterrains (murs de cave, fondations) et maritimes. Toitures, terrasses.
Fluidifiant	Nécessité d'une bonne ouvrabilité ; Préfabrication ; Bétons à haute résistance.

### 3.4. Stockage des adjuvants

L'utilisateur des adjuvants doit nécessairement respecter les indications fournies par le fabricant relatif aux dosages et autres contre-indications, ainsi qu'une bonne conservation de celui-ci. Un dosage excessif d'adjuvant ou un emploi non contrôlé peut conduire à des chutes importantes de résistance (chutes qui interviennent souvent dans le temps ce qui rend difficile leurs détections), à un retrait accru, et à une corrosion des armatures. En général, les adjuvants sont livrés dans des fûts hermétiques donc directement stockables sur chantier.

### 3.5. Exemples d'adjuvants fabriqués en Algérie

La société Granitex implanté dans la commune de Oued-Smar produits quelques types d'adjuvants dont nous présentons ci-après quelques exemples :

**Tableau 3.2.** Produits de la firme Granitex

Nom	Type	Présentation	Domaine d'utilisation
Médaplast :	Super fluidifiant	Solution liquide de couleur marron.	Maniabilité prolongée ; Augmentation des résistances mécaniques ; Amélioration de l'aspect des surfaces décoffrées.
Médafuid	Fluidifiant	Solution liquide de couleur brune, sans chlore.	Amélioration de l'ouvrabilité ; Diminution de l'absorption capillaire ; Augmentation des résistances mécaniques ; Amélioration de l'adhérence.
Médafuge P	Hydrofuge	Il se présente sous forme de poudre.	Amélioration de l'étanchéité à l'eau ; Protection contre l'humidité.

Ces produits sont utilisés en très faibles quantités, de l'ordre de 1,5 à 8% par rapport au poids des particules fines inférieures à 0,1mm.

**Tableau 3.3.** Normes Algériennes sur les adjuvants

Références	Intitule
NA 774	Adjuvants pour bétons, mortiers et coulis. – fluidifiants.
NA 775	Adjuvants pour bétons, mortiers et coulis. Fluidifiants – Définitions et Classifications.
NA 776	Adjuvants pour bétons, mortiers et coulis. – Accélérateurs de durcissements sans chlore.
NA 777	Adjuvants pour bétons, mortiers et coulis. Hydrofuges de masse.
NA 815	Adjuvants pour bétons, mortiers et coulis. Bétons normaux pour adjuvants.
NA 816	Adjuvants pour bétons, mortiers et coulis. Adjuvants non expansifs pour coulis courant d'injection pour précontrainte.
NA 817	Adjuvants pour bétons, mortiers et coulis. Plastifiants.
NA 818	Détermination de la quantité d'eau de gâchage des bétons et mortiers. Adjuvants soumis aux essais d'efficacité à maniabilité constante.
NA 819	Adjuvants pour bétons, mortiers et coulis. Réducteurs d'eau. Plastifiants.
NA 820	Adjuvants pour bétons, mortiers et coulis. Retardateurs de prise.
NA 821	Adjuvants pour bétons, mortiers et coulis. Entraîneurs d'air.
NA 1942	Adjuvants pour bétons, mortiers et coulis. Ciments de référence.
NA 1943	Adjuvants pour bétons, mortiers et coulis. Accélérateurs de prise sans chlore.
NA 1944	Adjuvants pour bétons, mortiers et coulis. Reconnaissance chimique des adjuvants.
NA 1945	Adjuvants pour bétons, mortiers et coulis. Dosage des chlorures dans les adjuvants.
NA 1946	Adjuvants pour bétons, mortiers et coulis. Mesure du pourcentage d'air occlus dans un béton frais à l'aéromètre à béton.
NA 5005	Adjuvants pour bétons, mortiers et coulis. Coulis courants d'injection pour précontrainte.

## Chapitre 4

### Formulation des bétons

#### 4.1. Introduction

La composition d'un béton consiste dans la détermination des diverses quantités de granulats (sable, gravier, cailloux), de ciment et d'eau qu'il est nécessaire de mettre en présence pour obtenir un mètre cube de béton. Deux critères essentiels doivent guider cette étude : la résistance à obtenir et l'ouvrabilité c'est-à-dire la facilité de mise en œuvre. Ces critères sont fonction de la nature de l'ouvrage ou des parties des ouvrages à réaliser.

De nombreuses méthodes existent pour composer un béton à partir des granulats dont on dispose, néanmoins aucune d'entre elles n'aboutit à coup sûr à une formulation exacte directement applicable aux chantiers. Ceci est dû à ce que les paramètres influant sur la composition d'un béton sont très nombreux et difficilement appréciables. Particulièrement en ce qui concerne la détermination de la quantité d'eau de gâchage, où l'on devrait tenir compte :

- En ce qui concerne le ciment : la quantité d'eau nécessaire à l'hydratation, le dosage, la finesse de mouture des grains ;
- En ce qui concerne le béton lui-même, la plasticité désirée.

#### 4.2. Méthodes de compositions des bétons

Deux théories sont actuellement en présence. Celle qui préconise un béton dit continu, la courbe granulométrique du mélange ne présentant pas alors de discontinuité. Celle qui préconise un mélange dit discontinu ou l'on admet une discontinuité dans la courbe granulométrique du mélange, c'est-à-dire que l'on admet l'absence d'une certaine gamme de granulats. On se limitera à la présentation de deux méthodes très utilisées en pratique, à savoir la méthode de **Faury** et la méthode de **Dreux-Gorisse**.

##### 4.2.1. Méthode de Faury

La méthode de Faury est un perfectionnement de la méthode de Bolomey : elle tient compte en effet des travaux de Caquot relatifs à l'effet de paroi d'une part, aux vides laissés par les granulats d'une grosseur donnée d'autre part; elle tient compte également du mode de serrage, c'est-à-dire de la consistance du béton.

La granulométrie optimale résulte du choix des proportions d'un mélange de deux classes de grains. La courbe de référence du mélange (ciment + granulats) est continue et donne le pourcentage en volume absolu (ciment + granulats), en fonction du diamètre des grains.

Selon la méthode de Faury la quantité d'eau de gâchage à prévoir pour un mètre cube de béton est égale

au volume théorique des vides :

$$I = \frac{1000K}{\sqrt[5]{D}} + \frac{1000K'}{\frac{R}{D} - 0,75} \quad (4-1)$$

Cette expression tient compte de l'effet de paroi et donne la valeur théorique minimale des vides d'un béton.

La compacité d'un tel béton sera alors égale à :

$$\gamma = 1 - \left[ \frac{K}{\sqrt[5]{D}} + \frac{K'}{\frac{R}{D} - 0,75} \right] \quad (4-2)$$

Généralement le dosage en ciment est imposé, il ne reste donc plus qu'à déterminer les proportions des granulats pour que la courbe du mélange solide soit la plus proche de la courbe de référence.

- Détermination de la courbe de référence

Elle comporte deux tronçons de droites. Le premier, AB, donne la granulométrie des grains fins et moyens dont les dimensions sont comprises entre 0 et  $(D/2)$ , il coupe l'axe des abscisses en un point A d'abscisse fixe  $d_0 = 0,0065$  ; Le deuxième, BC, donne la granulométrie des gros grains dont les dimensions sont comprises entre  $D$  et  $(D/2)$ .

L'ordonnée Y du point de brisure B indique le pourcentage en volume des grains supérieures à  $(D/2)$ , elle est donnée par la formule :

$$Y = A + 17\sqrt[5]{D} + \frac{B}{\frac{R}{D} - 0,75} \quad (4-3)$$

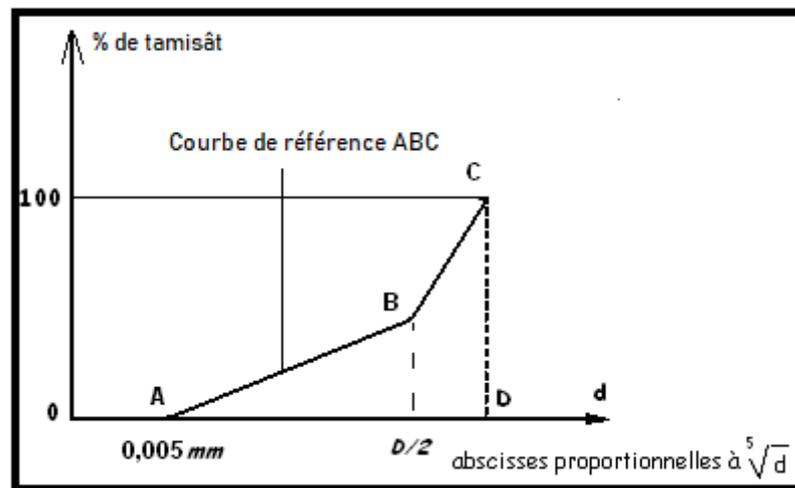


Fig.4.1. Courbe de référence du mélange optimal selon la méthode de Faury.

avec :

R = rayon moyen du moule

B = coefficient qui est égal à l'unité pour tous les types de bétons, sauf pour les bétons mis en place par piquage pour lesquels il prend la valeur de 1,5

A = coefficient qui dépend de la nature des granulats, et des moyens de serrage du béton.

**Tableau 4.1.** Valeurs du coefficient A

Mise en place du béton	Matériaux utilisés		
	Sable roulé Gravier roulé	Sable roulé gravier concassé	Sable concassé Gravier concassé
Par piquage	28	30	32
Vibrations moyennes	24 – 25	27 – 28	28 – 29
Vibration poussée	23 – 24	23 - 24	23 – 24
Vibration puissante	19 – 20	19 - 21	19 – 22

Les valeurs du coefficient K sont données par le tableau 4.2.

**Tableau 4.2.** Valeurs du coefficient K

Mise en place du béton	Matériaux utilisés		
	Sable roulé Gravier roulé	Sable roulé Gravier concassé	Sable concassé Gravier concassé
Par piquage	0,345	0,345	0,350
Vibration moyenne	0,265 – 0,285	0,285 – 0,350	0,300 – 0,335
Vibration poussée	0,255 – 0,280	0,260 – 0,285	0,265 – 0,295
Vibration puissante	0,245 – 0,246	0,250 – 0,280	0,255 – 0,295

### **Application**

But : détermination de la composition d'un béton par la méthode de Faury.

- Ciment CEM1 avec un dosage de  $400\text{kg/m}^3$
- Granulats d'origines concassés dont les résultats des analyses granulométriques sont reproduites sur le tableau 4.3.

**Tableau 4.3.** Analyse granulométrique du sable et du gravier.

Sable		Gravier (5/15)	
Tamis (mm)	Tamisât (%)	Tamis (mm)	Tamisât (%)
5.00	100	20	100
3,35	98,5	14	80
2.00	83,5	11,2	38
1,18	63,3	10	23,7
0,60	42,8	8	5,8
0,30	26,5	6,3	1,4
0,15	13	5	0
0,063	4,4	-	-
< 0,063	0	-	-

**Tableau 4.4.** Masses volumiques absolues des composants

Composant	Masse volumique absolue (kg/m <sup>3</sup> )
Ciment (CPJ)	3,10
Sable (0/5)	2,53
Gravier (5/15)	2,77

La courbe de référence de Faury est constituée de deux segments de droites, formant une ligne brisée.

On a d'après l'équation :

$$D = 17.32$$

L'origine de coordonnées : (0.005; 0)

L'extrémité de coordonnées : (17.32; 100)

Point de brisure de coordonnée : (8.66;  $Y_{D/2}$ )

Calcul de  $Y_{D/2}$

Nous avons vu que :

$$Y_{D/2} = A + 17,8 \sqrt[5]{D} + \frac{B}{\frac{R}{1,25D} - 0,75}$$

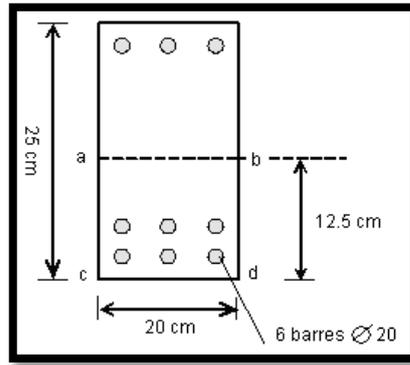
Nous avons un squelette inerte (sable + gravier) d'origine industrielle, dont la taille maximale est

$D < 25 \text{ mm}$ , le béton est de consistance plastique, d'où :

$$A = 32; B = 1,5$$

Détermination du rayon moyen R

Pour la détermination du rayon moyen, on admettra que le béton est destiné au coulage d'une poutre dont le schéma de ferrailage est présenté sur la figure suivante :



**Fig.4.2.** Section et ferrailage de la poutre

Le volume du béton à considérer correspond aux parties les plus ferrillées (partie abcd).

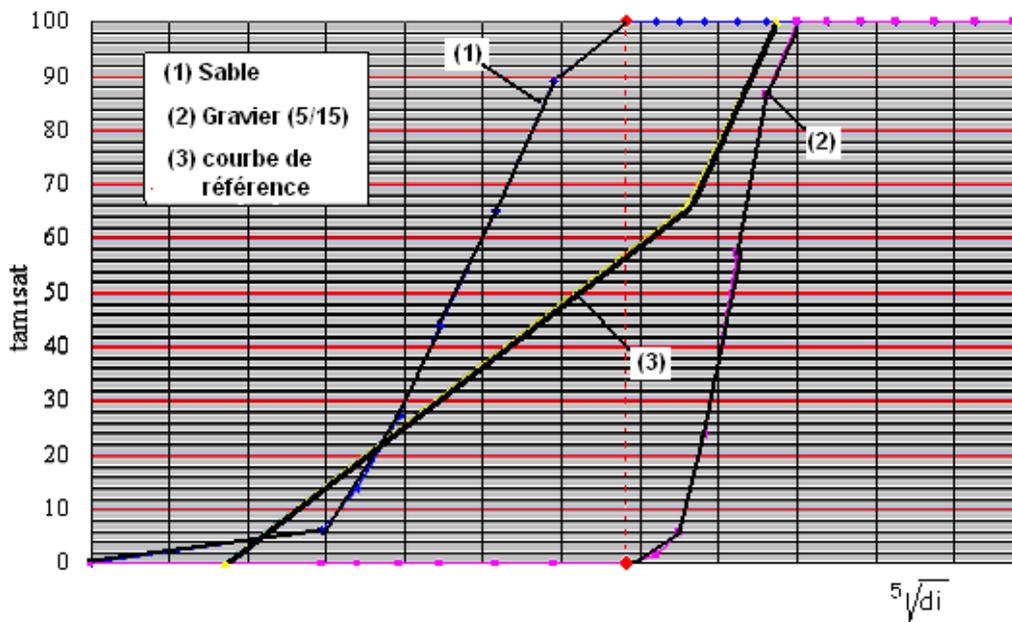
Le ferrailage est composé de 6 barres HA20.

Le volume du béton =  $231,15\text{cm}^3$  (pour 1cm de longueur)

La surface de ce qui au contact du béton =  $82,7\text{cm}^2$

D'où :  $R = \frac{231,15}{82,7} = 2,79\text{ cm}$

Les courbes granulométriques du sable et du gravier ainsi que la courbe optimale du béton sont représentées sur la figure suivante :



**Fig.4.3.** Composition optimale du béton selon la méthode de Faury

En appliquant la méthode graphique de Joisel, on trouve :

$$\left\{ \begin{array}{l} \% \text{ du sable (S) + Ciment (C)} = 57,5\% \\ \% \text{ Ciment} = 18,2\% \\ \% \text{ Sable} = 57,5 - 18,2 = 39,3\% \\ \% \text{ Gravier} = 100 - 57,5 = 42,5\% \end{array} \right.$$

Donc la composition optimale selon Faury devrait contenir :

- 18,2% de ciment
- 39,3% de sable
- 42,5% de gravier.

Détermination de la quantité d'eau :

**Tableau 4.5.**

Constituants	%	0,063	0,15	0,3	0,6	1,18	2	3,35
Ciment	18,2	18,2	18,2	18,2	18,2	18,2	18,2	18,2
Sable	39,3	1,7	5,1	10,4	16,8	24,9	32,8	38,7
gravier	42,5							
Totaux (%)	100,0	19,9	23,3	28,6	35	43,1	51	56,9
Constituants	%	5	6,3	8	10	11,2	14	20
Ciment	18,2	18,2	18,2	18,2	18,2	18,2	18,2	18,2
Sable	39,3	39,3	39,3	39,3	39,3	39,3	39,3	39,3
gravier	42,5		0,6	2,5	10,1	16,2	34	42,5
Totaux (%)	100	57,5	56,1	60,0	67,6	73,7	91,5	100

$D < 0,16 \text{ mm}$

Ciment = 400 kg

Sable fin ( $D < 0,16 \text{ mm}$ ) = 5.1% (2200) = 112,2 kg

Total à mouiller :  $P = 400 + 112,2 = 512,2 \text{ kg}$

Soit une quantité d'eau de :  $\text{Eau} = (0,23 \cdot P) = (0,23 \cdot 512,2) = 117,8 \text{ kg}$

$D \geq 0,16 \text{ mm}$

Masse à mouiller = Masse totale – Masse des éléments fins

$2200 - 512,2 = 1687,8 \text{ kg}$

$d_1 = 0,16 \text{ mm}$      $d_2 = 17,3 \text{ mm}$ ;     $K = 0,10$

$$\text{Eau} = \frac{0,10 \cdot 1687,8}{1,17 \sqrt[3]{0,16 \cdot 17,3}} = 102,7\text{kg}$$

Soit donc une quantité d'eau totale à prévoir de :

$$117,8 + 102,7 = 220,5\text{kg}$$

Pourcentage d'eau

Il se déduit à partir de la masse des éléments secs :

$$E = \left( \frac{220,5}{2200} \right) \times 100 = 10,02 \%$$

$$\text{Soit un rapport } \frac{E}{C} = \frac{220,5}{400} = 0,55$$

Composition d'un mètre cube de béton

La composition de (100 + E)% :

$$\begin{cases} C = 18,2 \\ S = 39,3 \\ g = 42,5 \\ E = 10,02 \end{cases} \Rightarrow \text{un total de} = 110,02 \%$$

**Tableau 4.6**

Composant	Composant en poids	Masse Volumique	Composant en volume	% en poids	Composition en poids
Ciment	18,2	3,1	5,87	16.54	389
Sable	39.3	2.53	15.53	35.72	840
Gravie	42,5	2.77	15.34	38.62	909
Eau	10,02	1.0	10,02		220
TOTAUX	110.02		46.76	100	2358

Ainsi la composition optimale selon Faury doit contenir, pour 1 m<sup>3</sup> (en kg) les masses suivantes:

$$\begin{bmatrix} \text{Ciment} = 400 \\ \text{Sable} = 840 \\ \text{Gravier} = 909 \\ \text{eau} = 220 \end{bmatrix}$$

#### 4.2.2. Méthode de Dreux

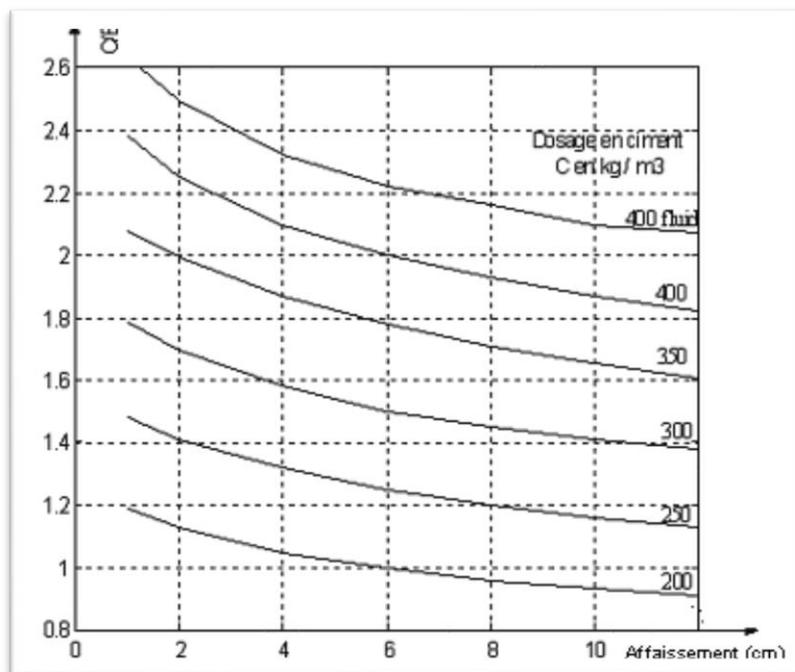
La méthode de Dreux-Gorisse, est une synthèse des diverses théories existantes sur la composition des bétons, appuyée sur un examen statistique de nombreux chantiers sérieusement contrôlés. Son but est de définir d'une manière simple et rapide une première formulation de béton en fonction de deux paramètres principaux du béton: résistance et ouvrabilité.

La formulation définitive étant obtenue par quelques gâchées d'essais permettant d'ajuster au mieux la formule théorique du béton en fonction des qualités désirées et des matériaux réellement employés.

Comme il a été vu précédemment le dosage en ciment est généralement imposé. Si tel n'est pas le cas l'application de la formule de Bolomey :

$$\sigma'_{28} = G \sigma'_c \left( \frac{C}{E} - 0,50 \right) \quad (4-4)$$

permet la détermination du rapport  $(C/E)$  et devient ainsi une donnée du problème. Par l'intermédiaire de l'abaque illustré dans la Fig.4.2, le dosage en ciment  $(C)$  sera déterminé en fonction du rapport  $(C/E)$  et la plasticité recherchée.



**Fig.4.4.** Valeur de  $(C/E)$  en fonction de la plasticité et du dosage en ciment

La qualité d'eau de gâchage s'en déduit alors immédiatement. Il convient néanmoins d'effectuer une correction sur cette quantité lorsque la dimension maximale des granulats est différente de 25. Pour des valeurs inférieures à 25, il convient d'ajouter un peu d'eau, et inversement pour des valeurs de  $D$  supérieures à rechercher.

La courbe granulométrique du mélange de référence est comme celle de Faury, composée de deux droites avec comme échelle des abscisses une fonction linéaire du module ou logarithmique par rapport au diamètre des grains.

La deuxième différence avec la courbe de référence de Faury est que dans cette dernière méthode on ne tient pas compte du ciment, la courbe de référence est donc celle des granulats uniquement.

Le point de brisure est en abscisse :

$$\frac{D}{2}, \quad \text{si } D < 25 \text{ mm} \quad (4-5)$$

Milieu du segment  $d=5 \text{ mm}$ , si  $D \geq 25 \text{ mm}$

En ordonnée :

$$Y = 50 - \sqrt{D} + K + K_s + K_p \quad (4-6)$$

Les valeurs du coefficient.74.sont données par le tableau (K)

**Tableau 4.7.** Valeurs du coefficient K.

Vibration	Faible		Normale		Puissante	
	Roulé	Concassé	Roulé	Concassé	Roulé	Concassé
400 + adjuvant	- 2	0	- 4	- 2	- 6	- 4
400	0	+ 2	- 2	0	- 4	- 2
350	+ 2	+ 4	0	+ 2	- 2	0
300	+ 4	+ 6	+ 2	+ 4	0	+ 2
250	+ 6	+ 8	+ 4	+ 6	+ 2	+ 4
200	+ 8	+ 10	+ 6	+ 8	+ 4	+ 6

Le coefficient  $K_s$  est un terme correcteur qui tient compte du module de finesse du sable. Il a pour expression :

$$K_s = 6 M_f - 15 \quad (4-7)$$

relation dans laquelle  $M_f$  représente le module de finesse, module qui varie entre 2 et 3 généralement.

Le coefficient  $K_p$  n'est à appliquer que lorsque le béton doit présenter un maximum de plasticité, (cas des bétons pompables). On adoptera une valeur de ce coefficient entre 5 et 10 selon la plasticité désirée.

Le volume absolu de l'ensemble ciment et granulats étant donné par l'intermédiaire du coefficient de compacité fonction du diamètre maximal des granulats et de la plasticité désirée. Le tableau suivant donne la valeur du coefficient de compacité.

**Tableau 4.8.** Valeurs du coefficient de compacité

Consistance	Serrage	Coefficient de compacité				
		D = 5	D = 10	D = 16	D = 25	D = 40
Molle	Piquage	0,750	0,780	0,795	0,805	0,815
	Vibration faible	0,755	0,785	0,800	0,810	0,820
	Vibration normale	0,760	0,790	0,805	0,815	0,825
Plastique	Piquage	0,760	0,790	0,805	0,815	0,820
	Vibration faible	0,765	0,795	0,810	0,820	0,825
	Vibration normale	0,770	0,800	0,815	0,825	0,830
	Vibration puissante	0,775	0,805	0,820	0,830	0,835
Ferme	Vibration faible	0,775	0,805	0,820	0,830	0,835
	Vibration normale	0,780	0,810	0,835	0,835	0,840
	Vibration puissante	0,785	0,815	0,840	0,840	0,845

#### - Dosage des granulats

La courbe granulométrique de référence sera tracée sur le même graphique que les courbes granulométriques des granulats. On trace ensuite les lignes de partage entre chacun des granulats en joignant le point à 95% de la courbe granulométrique du premier granulat au point 5% de la courbe granulométrique du second, et ainsi de suite. On lira alors sur la courbe de référence au point d'intersection avec la ou les droites de partage en volume absolu de chacun des granulats ( $v'_1, v'_2, v'_3$ ) par exemple.

Si  $C$  est le dosage en ciment, le volume absolu de celui-ci est :  $v_c = \frac{C}{\varphi_c}$  (4-8)

$\varphi_c$  : la masse volumique absolue du ciment.

Le volume absolu de l'ensemble des granulats est :  $V = 1000\gamma - v_c$

avec  $\gamma$  coefficient de compacité.

Le volume absolu de chacun des granulats sera :

$$\begin{cases} v_1 = v'_1 V \\ v_2 = v'_2 V \\ v_3 = v'_3 V \end{cases}$$

Si ces trois granulats ont, pour masses volumiques absolues,  $\varphi$  les poids de ces granulats seront :

$$\begin{cases} P_1 = v'_1 \varphi \\ P_2 = v'_2 \varphi \\ P_3 = v'_3 \varphi \end{cases}$$

La densité théorique du matériau sera :  $D = \frac{P_1 + P_2 + P_3 + C + E}{1000}$

### **Application**

But : détermination de la composition d'un béton par la méthode de Dreux-Gorisse avec comme objectifs de l'étude :

- 1) Une résistance caractéristique à la compression  $f_{c28} = 30\text{MPa}$
- 2) Un affaissement au cône d'Abrams entre 6 et 9cm.

### **Données sur les matériaux utilisés :**

Un ciment de classe CEMI 42, dosage =  $350\text{kg/m}^3$ .

- un sable concassé de classe 0/5
- un gravillon concassé 3/8
- un gravier concassé 8/16.
- Le tableau 4.9 présente les résultats du tamisage des trois granulats de l'étude.
- Le tableau 4.10 présente les masses volumiques des granulats utilisés.

**Tableau 4.9.** Résultats des analyses granulométriques.

Diamètre tamis (mm)	Module tamis	Tamisât (%)		
		Sable (0/5)	Gravillon (3/8)	Gravier (8/16)
16	43			100
12.5	42			99.5
10	41			86
8	40		100	31
6.3	39		77	12.5
5	38	100	58	4
4	37	99	28	0
2.5	35	85	11	
1.25	32	36	0	
0.63	29	22		
0.315	26	5		
0.16	23	3		
0.08	20	0		
Fond				

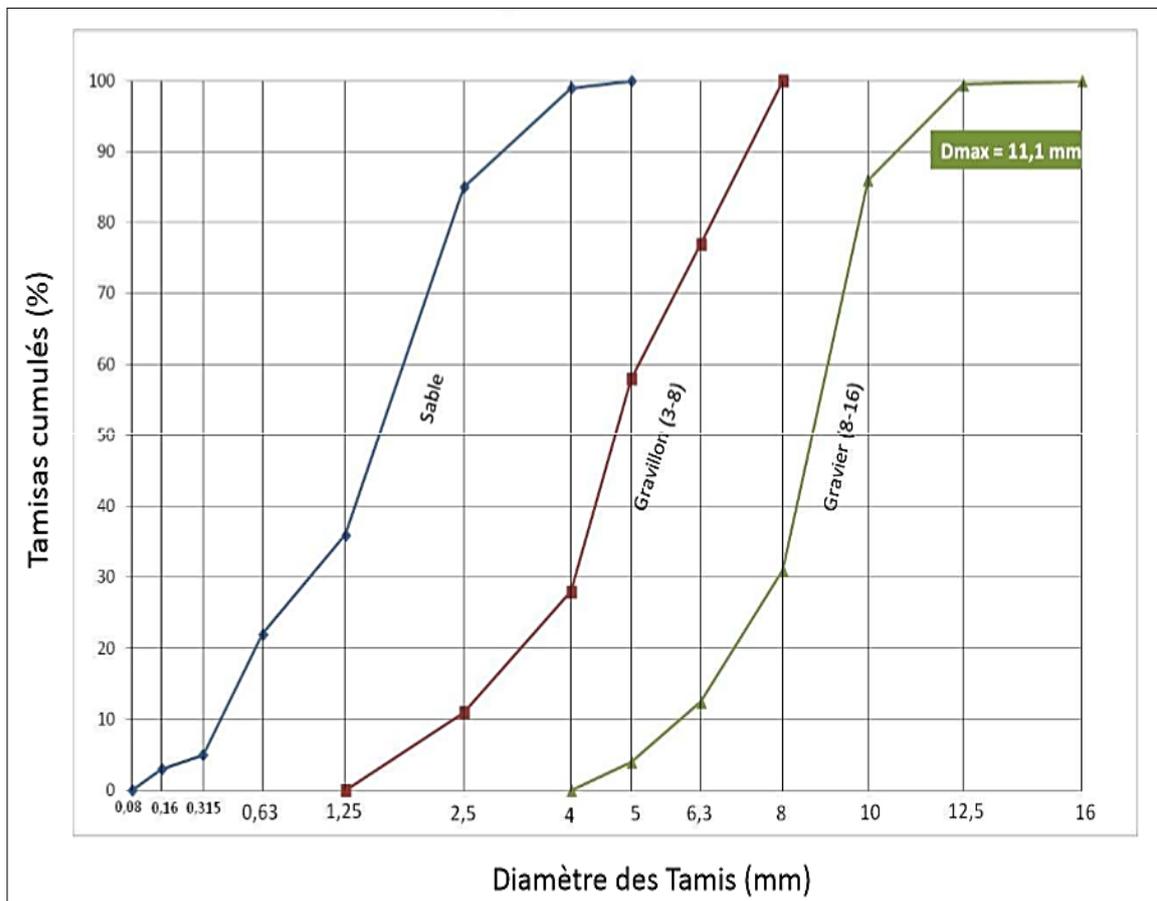
**Tableau 4.10.** *Masses volumiques des composants*

Constituants	Masse volumique absolue (kg/m <sup>3</sup> )	Masse volumique apparente (kg/m <sup>3</sup> )
Ciment	3100	
Sable 0/5	2650	1500
Gravillon 3/8	2600	1450
Gravier 8/16	2600	1400

**Courbes granulométriques des granulats :**

Le tracé des courbes granulométriques permet de déterminer le diamètre maximal  $D_{max}$ . La détermination de ce dernier se fait en passant par le tracé de courbe suivante et la vérification vis-à-vis la section du béton :

$$D_{max} = 11,17\text{mm}$$



**Fig.4.5.** *Courbes granulométriques des trois granulats.*

Pour la section de béton armé, nous allons prendre comme exemple les poutres en admettant qu'elles seront ferrillées selon le schéma suivant :

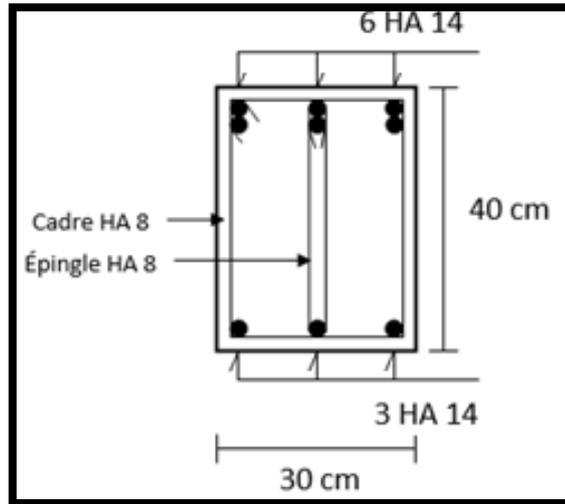


Fig.4.6. Section en béton armé à bétonner.

Tableau 4.11. Caractéristiques de la section en béton armé et exigences sur  $D_{max}$ .

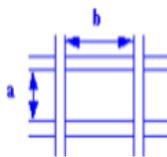
Caractéristique de la pièce à bétonner granulats concassés		$D_{max}$
$e_h$	Espacement horizontal entre armatures horizontales	$< e_h/1.5$
$e_v$	Espacement vertical entre lits d'armatures horizontales	$< e_v$
C	Enrobage des armatures	$< d$
R	<p>Rayon moyen du ferrailage</p>  $r = \frac{a \times b}{2 \times (a + b)}$ <p>Granulats roulés Granulats concassés</p>	$< 1.4 r$ $< 1.2 r$
$h_m$	Hauteur ou épaisseur minimale	$< h_m/5$

Tableau 4.12. Vérification des exigences du  $D_{max}$ .

Caractéristique de la section du béton		$D_{max}$
$e_h/1.5$	$40/1.5 = 36\text{mm}$	11.1mm
c	20mm	11.1mm
$e_v$	35mm	11.1mm
1.2 r	$1.2 \times r = 11.2\text{mm}$	11.1mm
$h_m/5$	$300/5 = 60\text{mm}$	11.1mm

Ainsi on constate que toutes les conditions sont vérifiées.

#### Détermination du dosage en ciment «d» :

Le dosage en ciment est défini par l'équation suivante :

$$d = \frac{C}{E} = \frac{f_{cm}}{G \times \sigma_{c28}} + G$$

avec :

$f_{cm}$  : résistance au niveau de l'étude. Elle se calcule à partir de la résistance fixée à 28 jours selon l'expression suivante :

$$f_{cm} = 1,15f_{c28} = 1,15 \times 30 = 34,5MPa$$

$\sigma_{c28}$  : résistance nominale du ciment utilisé.

Pour le CEM1 42,5 ►  $\sigma_{c28} = 45MPa$ .

#### Détermination du coefficient granulaire «G» :

Le coefficient  $G$  est déterminé en fonction de la qualité des granulats et leurs diamètres, comme le montre le tableau suivant :

**Tableau 4.13.** Détermination du coefficient granulaire «G».

Qualité des granulats	Dimension D des granulats		
	Fins $D \leq 12,5mm$	Moyens $20 \leq D \leq 31,5mm$	Gros $D \geq 50mm$
Excellente	0.55	0.60	0.65
Bonne, Courante	0.45	0.50	0.55
Passable	0.35	0.40	0.45

Le diamètre maximal  $D_{max} = 11,1mm < 12,5mm$  et pour des granulats de qualité courante ►  $G = 0,45$ .

Le dosage en ciment sera donc de :

$$d = \frac{C}{E} = \frac{f_{cm}}{G \times \sigma_{c28}} + G = \frac{34,5}{0,45 \times 45} + 0,45 = 2,15$$

#### Détermination du dosage en eau «E» :

$$\frac{C}{E} = 2,15 \rightarrow E = \frac{350}{2,15} = 162,7 \rightarrow E \cong 163l$$

Le dosage en eau trouvé doit subir une correction en fonction du diamètre maximal des granulats comme il est illustré dans le tableau suivant :

**Tableau 4.14.** Correction sur le dosage en eau en fonction de D.

Dimension maximale des granulats D en mm	4	8	12.5	20	31.5	50	80
Correction sur le dosage en eau	+15	+9	+4	0	-4	-8	-12

Le diamètre maximal  $D_{max} = 11.1mm \approx 12.5 mm \rightarrow$  la correction à apporter sur la quantité d'eau sera de + 4%.

d'où :

$$E_c = E = 163 \times 1,04 \text{ l/m}^3 = 169.5 \text{ l/m}^3 \approx 170 \text{ l/m}^3$$

#### Tracé de la courbe de référence :

La courbe granulométrique du mélange de référence est composée de deux droites avec comme échelle des abscisses une fonction linéaire du module ou logarithmique par rapport au diamètre des grains.

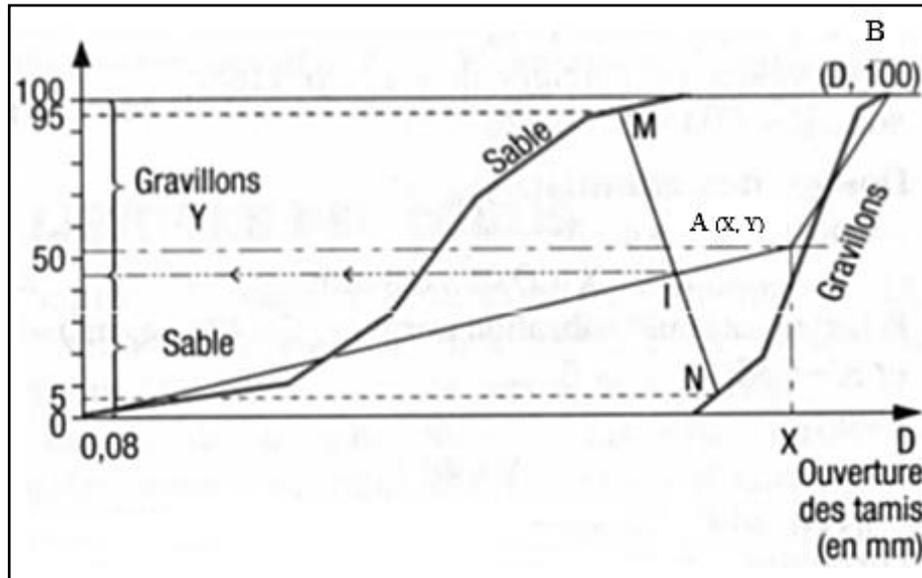


Fig.4.7. Courbe de référence du mélange.

Caractéristiques de la courbe de référence (OAB) :

- coordonnées du point de départ O : (0 ; 0)
- coordonnées du point d'arrivée B : (D ; 100)
- coordonnées du point de brisure A : ( $X_A$  ;  $Y_A$ ).

L'abscisse de A est prise égale à :

$$X_A = D/2 \text{ si } D \leq 20mm$$

Sinon  $X_A$  est le milieu du segment limité par les tamis de 5mm et D.

Calcul de la coordonnée «  $Y_A$  » :

$$Y_A = 50 - \sqrt{D} + K + K_s + K_p$$

$K, K_s$  et  $K_p$  sont des coefficients dont les valeurs sont présentées ci-après :

Pour un dosage en ciment  $C = 350 \text{ kg/m}^3$  et des granulats normaux concassés  $\rightarrow K = +2$ .

Coefficient correcteur  $K_s$  :

Si le module de finesse du sable est fort (sable grossier), une correction supplémentaire sera apportée de façon à relever le point A, ce qui correspond à majorer le dosage en sable. La correction

supplémentaire sur  $K_s$  peut être effectuée en ajoutant la valeur  $K_s = 6 \times M_f - 15$  ( $M_f$  étant le module de finesse du sable qui peut varier de 2 à 3 avec une valeur optimale de l'ordre de 2.5).

$$M_f = \frac{\sum R_i}{100}$$

avec :

- $R_i$  : refus cumulés en (%).

$$K_s = 6 \times M_f - 15$$

$$K_s = 6 \times 2.49 - 15 = -0.06$$

Coefficient correcteur  $K_p$  :

Si la qualité du béton désiré doit être mise en place par pompe, il convient de lui conférer le maximum de plasticité et de l'enrichir en sable par rapport à un béton courant. On pourra pour cela majorer le terme correcteur K de la valeur  $K_p = +5$  à  $+10$  selon le degré de plasticité désiré  $\rightarrow K_p = 0$ .

Finalement l'ordonnée du point de brisure sera de :

$$Y_A = 50 - \sqrt{11,11} + 2 - 0.06 = 47,7$$

Coordonnées de A  $\rightarrow (5,55 ; 47,7)$ .

Détermination des pourcentages des granulats :

La détermination des pourcentages granulaire se fait à travers la courbe de référence 'OAB'.

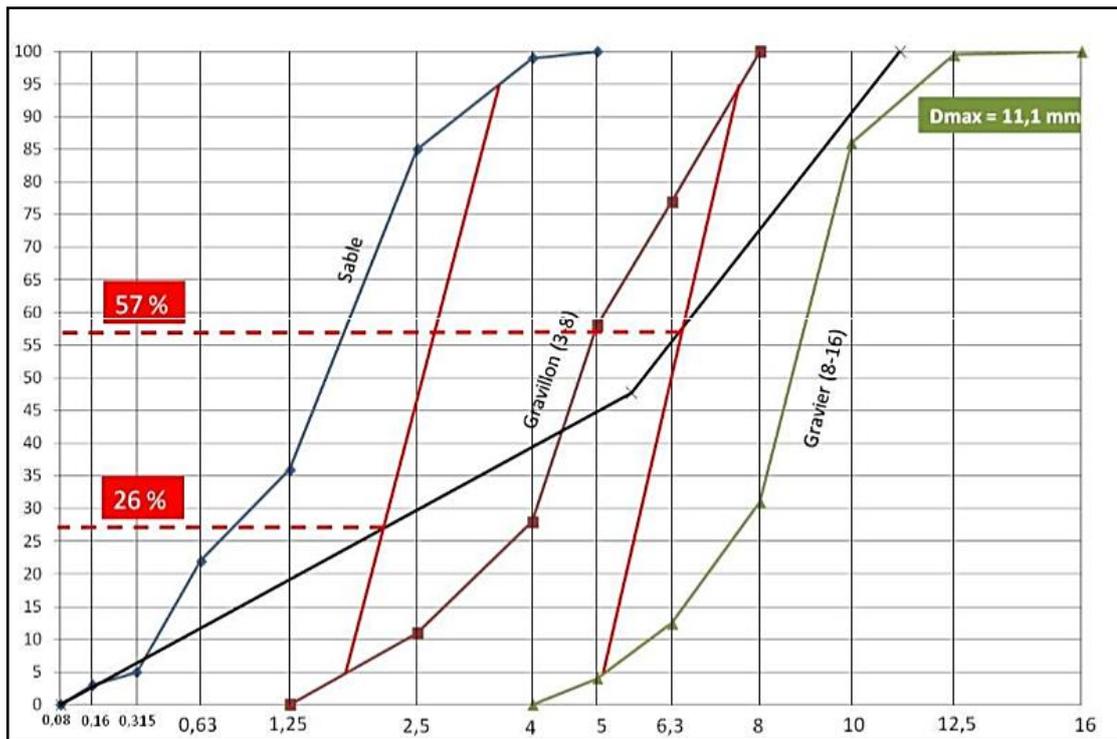


Fig.4.8. Tracé de la courbe de référence du béton.

La lecture des résultats de la figure précédente permet de déduire les pourcentages suivants :

- Pourcentage du sable  $\rightarrow 26\%$
- Pourcentage du gravillon  $\rightarrow 31\%$

- Pourcentage du gravier → 43%.

$A = 7\text{cm}$  → Béton plastique.

donc :

Béton plastique ; vibration normale ;  $D_{max} = 11.1\text{mm} \approx 12,5\text{mm}$  d'où : →  $\gamma = 0,815$

Ces valeurs sont convenables pour des granulats roulés, sinon il conviendra d'apporter les corrections suivantes :

- Sable roulé et gravier concassé = -0,01
- Sable et gravier concassé = -0,03

Pour des granulats légers on pourra diminuer de 0,03 les valeurs de  $\gamma$  qui correspondent dans ce tableau à des granulats denses ordinaires. Comme les granulats utilisés sont des granulats concassés ceci implique une diminution de 0,03 :

$$\gamma_{\text{corrigé}} = 0.815 - 0.03 = 0,785$$

#### Détermination des volumes des granulats

Volume absolu du ciment «C» :

$$c = \frac{C}{3,1} = \frac{350}{3,1} = 112,90 \text{ l/m}^3$$

Volume absolu des granulats «V» :

V : sable + gravillon + gravier.

$$V = 1000 \times \gamma_{\text{corrigé}} - c \qquad V = 1000 \times 0,785 - 112,9 = 672,1/\text{m}^3$$

Volume absolu du sable «V<sub>1</sub>» :

$$V_1 = V \times \text{pourcentage du sable (\%)}$$

$$V_1 = 672,1 \times \frac{26}{100} = 174,7 \text{ l/m}^3$$

Volume absolu du gravillon «V<sub>2</sub>» :

$$V_2 = V \times \text{pourcentage du gravillon (\%)}$$

$$V_2 = 672,1 \times \frac{31}{100} = 208,3 \text{ l/m}^3$$

Volume absolu du gravier «V<sub>3</sub>» :

$$V_3 = V \times \text{pourcentage du gravier (\%)}$$

$$V_3 = 672,1 \times \frac{43}{100} = 289 \text{ l/m}^3$$

Dosage pondéral des granulats pour 1m<sup>3</sup> de béton :

Sable →  $S = V_1 \times \text{masse volumique absolue} = 174,7 \times 2,65 = 463\text{kg}$

Gravillon →  $G_1 = V_2 \times \text{masse volumique absolue} = 208,3 \times 2,6 = 542\text{kg}$

Gravier →  $G_2 = V_3 \times \text{masse volumique absolue} = 289 \times 2,6 = 751\text{kg}$ .

En récapitulant le travail les dosages nécessaires des matériaux pour la formulation  $1\text{m}^3$  d'un béton de résistance caractéristique à la compression de 30MPa sont données par le tableau suivant :

Tableau 4.15. *Dosages des matériaux pour  $1\text{m}^3$  de béton*

Matériaux	Ciment	Sable	Gravillon	Gravier	Eau
Dosage ( <b>kg/m<sup>3</sup></b> )	350	463	542	751	170

Ce qui correspond à un béton de masse volumique de  $2276\text{ kg/m}^3$ .

## Chapitre 5

### Propriétés du béton à l'état frais et durci

#### 5.1. Introduction

Le béton est un matériau composite aggloméré, constitué de granulats durs de diverses dimensions collés entre eux par un liant. Les composants sont très différents: leurs masses volumiques vont, dans les bétons courants de 1 pour l'eau à plus de 3 pour le ciment (en  $t/m^3$ ). Si le type de liant utilisé n'est pas un ciment, on parle alors, soit de liant composé binaire, ternaire ou quaternaire. Le béton est un mélange de granulats (mélange de sable et de graviers) et d'une pâte composée de ciment, d'eau et éventuellement d'adjuvants et d'ajouts cimentaires. Les proportions moyennes des constituants du béton sont les suivantes :

- pâte entre 30 à 40%
- Ciment portland entre 7 et 15% du volume
- Eau de gâchage entre 14 et 21%
- Granulats entre 60 et 80%
- Adjuvants chimiques.

#### 5.2. Caractéristiques du béton

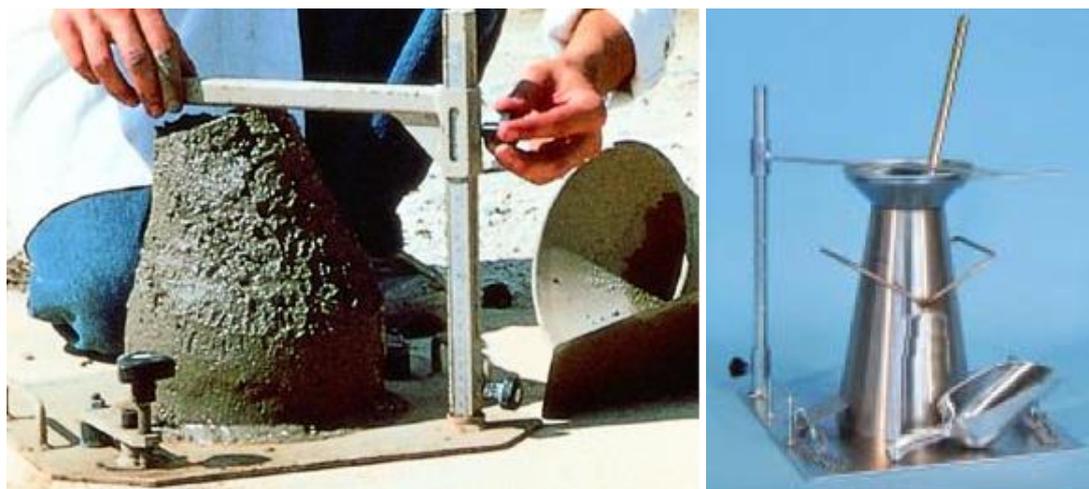
Les principales caractéristiques des bétons sont les propriétés à l'état frais et durci.

##### 5.2.1. Caractéristiques à l'état frais

###### 5.2.1.1. Ouvrabilité

L'ouvrabilité caractérise l'aptitude d'un béton (frais) à remplir les coffrages, et à enrober convenablement les armatures. Elle représente aussi la consistance du béton frais. Donc le béton doit être maniable et conserve son homogénéité pendant la mise en œuvre. La maniabilité (l'ouvrabilité) des bétons est principalement influencée par:

- Le dosage en eau (E/C).
- La nature et le dosage du liant (ciment);
- La forme des granulats, la granulométrie;
- la résistance mécanique (compression, traction et module d'élasticité)
- l'absorption, la porosité et la teneur en humidité
- la présence de matières nuisibles.

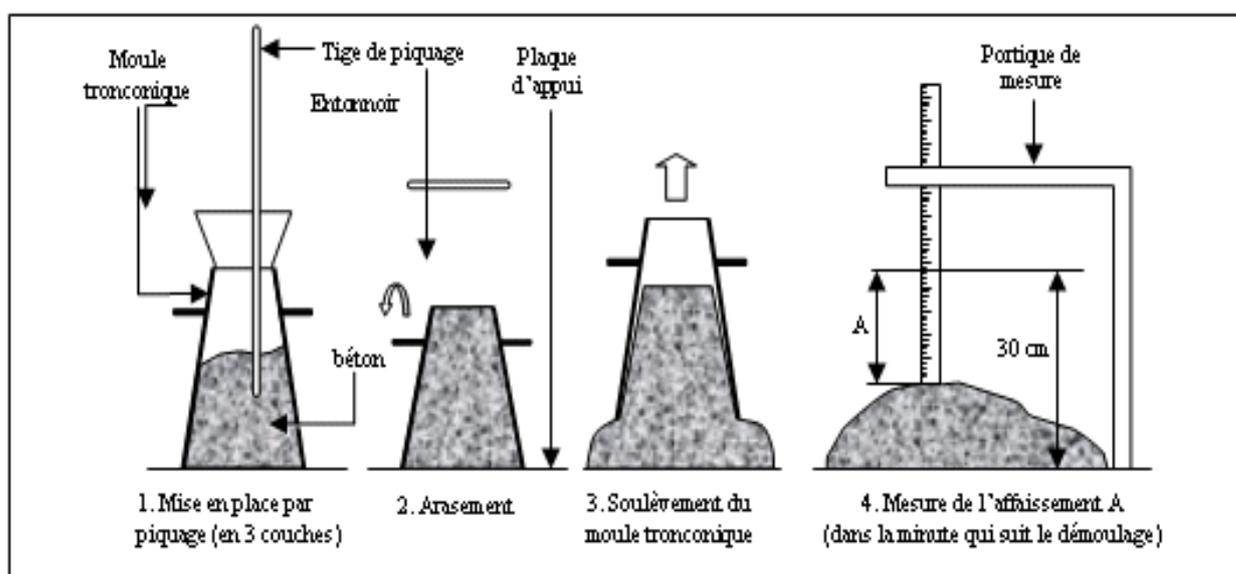


**Fig.5. 1.** Mesure de la maniabilité à l'aide du cône d'Abrams.

Il existe de nombreux essais et tests permettant la mesure de l'ouvrabilité. On ne citera que quelques-uns qui sont les plus couramment utilisés dans la pratique.

a) Affaissement au cône d'Abrams (ou Slump-test).

L'affaissement est mesuré par la différence de hauteur entre le moule et le niveau supérieur du béton après démoulage (mesurer la hauteur d'affaissement d'un volume tronconique du béton frais). Le résultat obtenu permet ainsi de classer les bétons. Cependant, il est évident qu'il ne peut concerner les bétons trop fermes dont l'affaissement n'est plus mesurable. L'essai au cône d'Abrams est simple à réaliser et nécessite un cône et une tige (Fig.5.2). Le moule tronconique sans fond est de 30cm de haut, de 20 cm de diamètre en sa partie inférieure et de 10cm de diamètre en sa partie supérieure.



**Fig.5.2** Test d'affaissement au cône d'Abram's

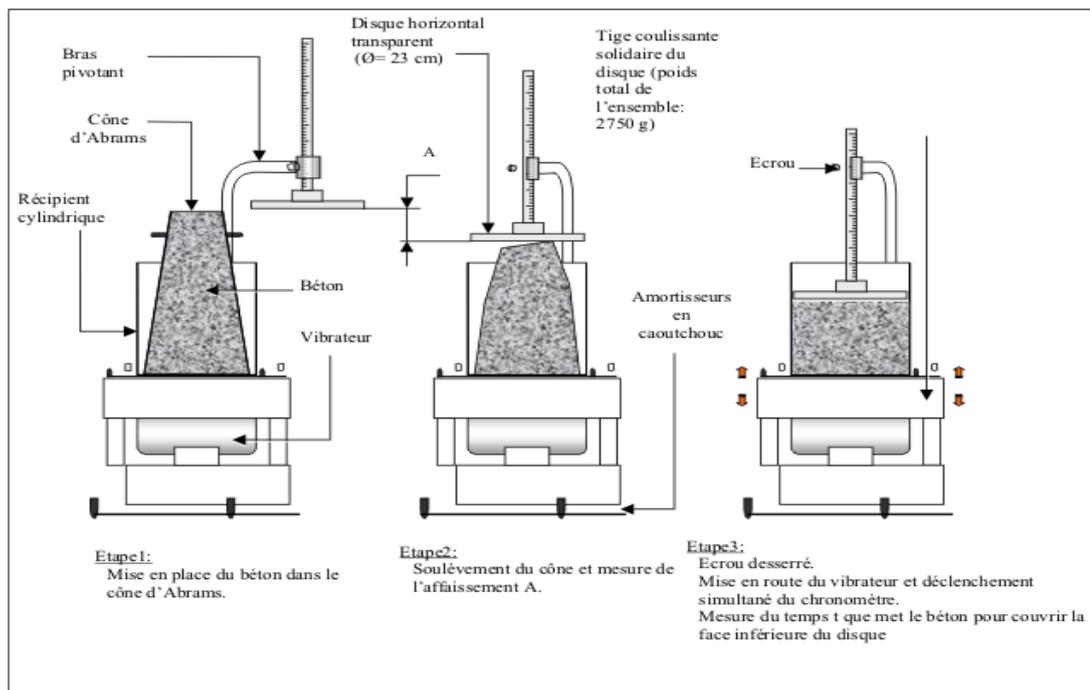
L'essai d'affaissement au cône caractérise bien la consistance d'un béton ce qui permet le classement approximatif indiqué au tableau 5.1.

**Tableau 5.1.** *Appréciation de la consistance en fonction de l'affaissement au cône.*

Plasticité	Serrage	Affaissement A en (cm)	Nombre de chocs test
Béton très ferme	Vibration puissante	0 à 2	>60
Béton ferme	Bonne vibration	3 à 5	30 à 50
Béton plastique	Vibration courante	6 à 9	15 à 25
Béton mou	Piquage	10 à 13	10 à 15
Béton liquide	Léger piquage	≥14	<10

**Essai Vébé**

Cet essai est particulièrement utile pour tester les bétons de faible ouvrabilité. La dimension maximale des granulats ne doit pas dépasser 40 mm. Le cône d'Abrams est fixé à l'intérieur du récipient cylindrique (figure 5.3). Le béton est mis en place dans ce cône. Le cône d'Abrams est alors soulevé et, à ce stade de l'essai, il est donc possible de mesurer l'affaissement au cône comme indiqué précédemment. L'essai se poursuit ensuite par la mise en vibration de la table durant un temps t tel que la face supérieure du béton soit entièrement aplanie et au contact du disque transparent qui accompagne la descente du béton pendant le compactage. Le temps t exprimé en secondes définit la consistance Vébé.



**Fig.5.3.** *Test d'affaissement (consistance Vébé)*

## b) Étalement sur table (flow-test)

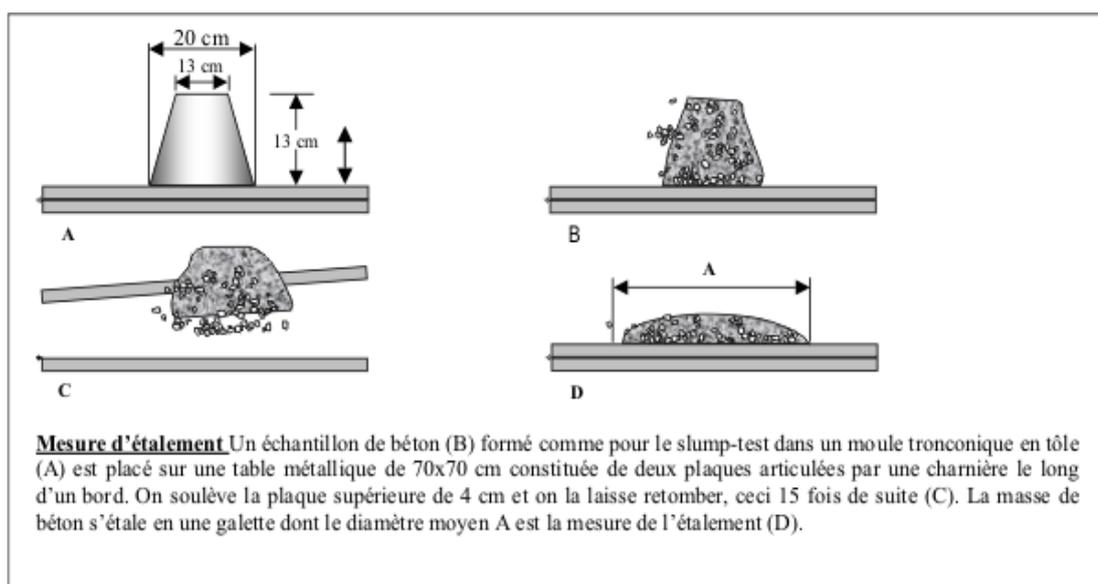
L'essai d'étalement sur table (Flow-test) consiste à utiliser une table à chocs Figure.5.4 comprenant un plateau métallique animé d'un mouvement vertical. Un moule tronconique disposé sur cette table et du matériau à étudier (mortier ou béton). Après arasement et démoulage (en soulevant le moule), on donne à la table, à l'aide d'une manivelle, quinze chocs en quinze secondes (hauteur de chute = 12,5 mm). Le matériau s'étale sous forme d'une galette dont on mesure les deux diamètres perpendiculaires. L'étalement (en%) est donné par la formule:

$$\text{Étalement} = \frac{D - D1}{D} \quad (5 - 1)$$

avec :

D1: diamètre inférieur du moule;

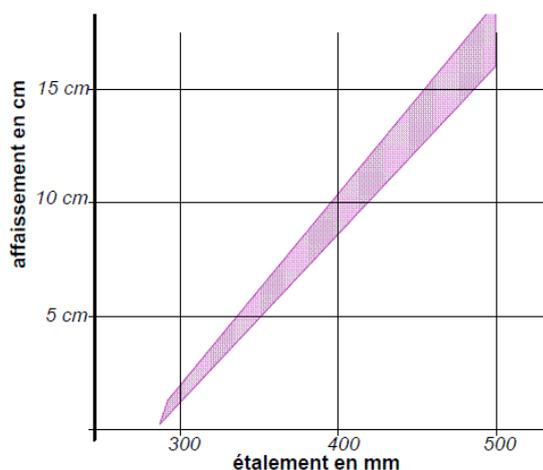
D: diamètre moyen de la galette après étalement.



**Fig.5.4.** Mesure de l'affaissement sur table à secousses.

**Tableau 5.2.** Classification de l'ouvrabilité en fonction de l'étalement à la table.

Ouvrabilité	Étalement à la table (%)
Très ferme	10 – 30
Ferme	30 – 60
Normal	60 – 80
Mou	80 – 100
Très mou à liquide	> 100



**Fig.5.5.** Relation entre l'affaissement et l'étalement au cône.

c) Essai au maniabilimètre LCL

Il s'agit d'une méthode de remoulage utilisant le maniabilimètre Lesage mis au point au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. Son principe est très simple et veut simuler l'écoulement du béton dans un coffrage sous l'effet de vibrations. Cette aptitude à l'écoulement est repérée par le temps que met le béton pour atteindre un certain niveau.

L'appareil est constitué d'un moule en forme de parallélépipède, ouvert sur sa face supérieure, et portant un vibreur sur son petit côté.

Ce moule repose sur 4 amortisseurs. Son poids, vibreur compris, est d'environ 117kg.

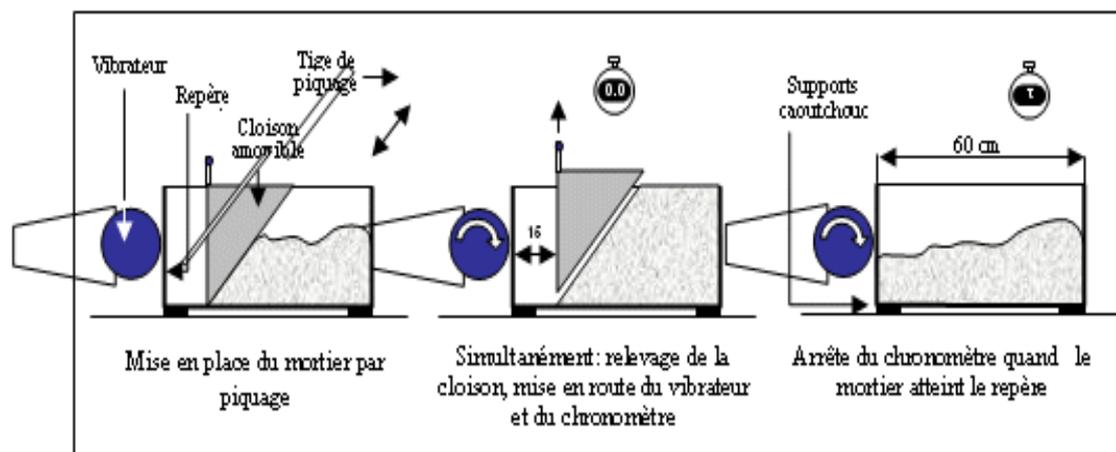
Le moule reçoit une paroi inclinée et amovible.



**Fig.5.6.** Photo d'un maniabilimètre LCL

Après avoir rempli le moule par le béton, enlever la cloison amovible et déclencher le chronomètre. Un contact électrique met en marche le vibreur, dès que l'on ôte la cloison ;

On note le temps, au bout duquel le béton atteint des repères gravés sur la face intérieure du moule ; Le temps fournit un indice d'aptitude à la mise en place.



**Fig.5.7.** Principe de fonctionnement du maniabilimètre LCL.

En fonction du temps au maniabilimètre, on peut classer les bétons comme suit:

**Tableau 5.3:** Consistance en fonction de temps (essai au maniabilimètre LCL)

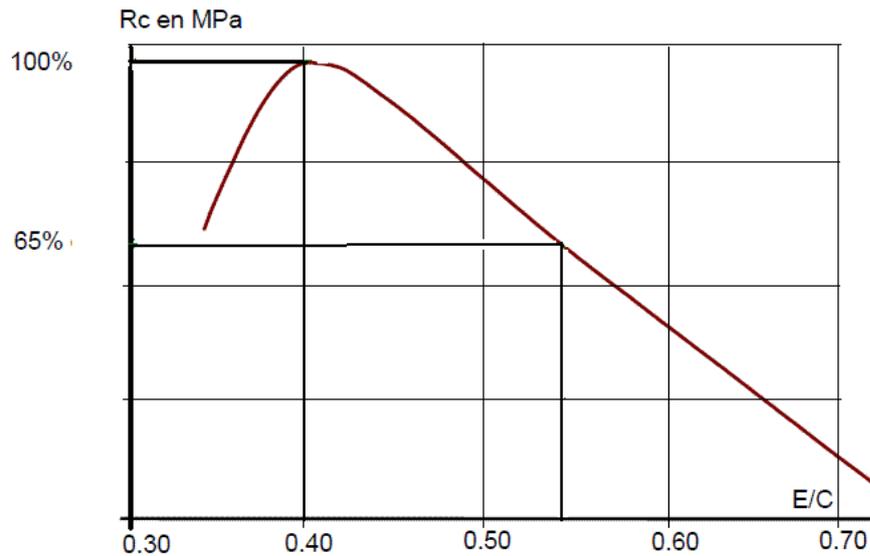
Type de béton	Temps maniabilimètre
Béton très fluide	$t \leq 10$ secondes
Béton très plastique	$t \cong 15$ secondes
Béton de bonne ouvrabilité	$20 \leq t \leq 30$ secondes
Béton secs, peu maniables	$t \geq 40$ secondes

Rôle de l'eau (E/C): Le rôle de l'eau ou le rapport eau/ciment(E/C), est le facteur le plus prépondérant pour l'ouvrabilité du béton frais et sur les propriétés du béton durci:

- L'eau donne au béton sa maniabilité: Son action lubrifiante sur les différents granulats
- La cohésion entre granulats par la pâte;
- L'eau permet l'hydratation du ciment et donc le durcissement du béton; un ciment portland demande environ 25% de son poids en eau pour s'hydrater complètement.

Donc toute variation du rapport E/C entraîne des modifications des propriétés du béton à l'état frais et durci. Les conséquences d'un excès d'eau sont généralement:

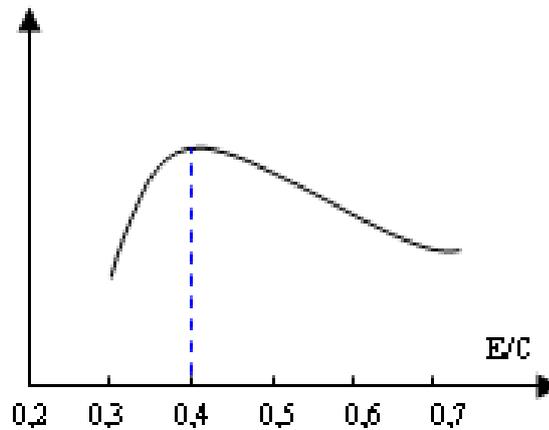
- Risque de ressuage;
- Augmentation de la porosité risque de ségrégation des constituants du béton;
- Diminution de la compacité du béton;
- Diminution des performances mécaniques du béton;
- Augmentation du retrait.



**Fig.5.8.** Résistance à la compression  $R_c$  du béton en fonction du rapport eau/ciment ( $E/C$ )

#### 5.2.1.2. Résistance du béton frais

La résistance du béton frais est faible, mais elle intéresse plus particulièrement les fabricants pour le démoulage immédiat (avant prise du ciment) d'éléments de grande série.



**Fig.5.9.** Résistance du béton frais

- le rapport optimal  $E/C$  est voisin de 0,40 (béton plutôt sec);
- le pourcentage optimal  $S/G$  est d'environ 0,38 (soit:  $G/S=2,6$  valeur élevée);
- les granulats concassés donnent des résistances plus élevées que les granulats roulés.

#### 5.2.1.3. Masse volumique apparente du béton frais

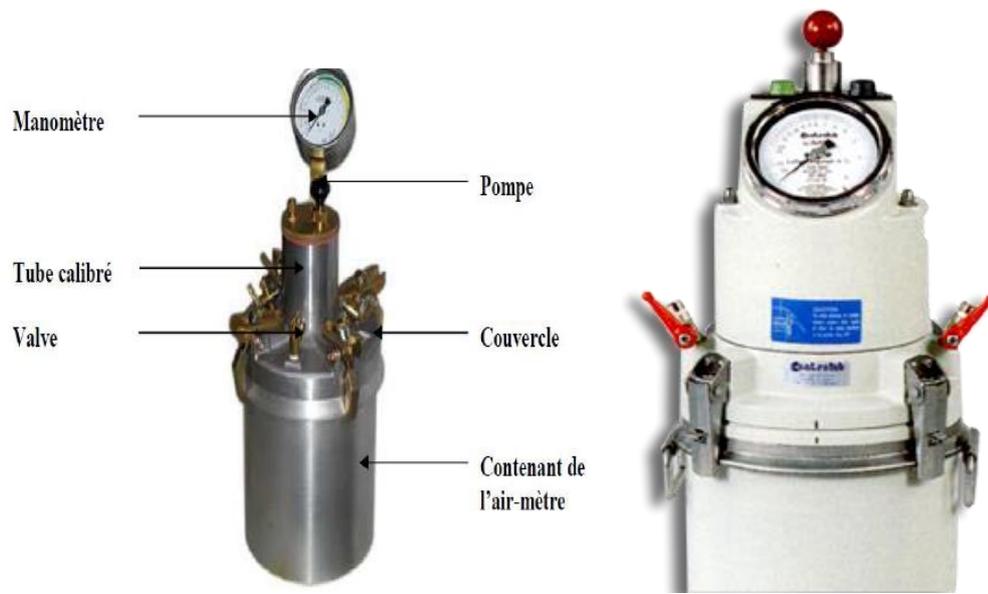
La masse volumique est la masse par unité de volume d'un béton. L'essai est effectué conformément à la norme CSA A23.2-4C ou ASTM C231. L'appareillage utilisé est un air-mètre. Le béton est placé en 3 couches consolidées avec 25 coups de pilon. La surface supérieure du béton est ensuite arasée à l'aide de

la règle. La masse du contenant rempli de béton – la tare divisée par le volume du contenant donne la masse volumique du béton.

#### 5.2.1.4. Teneur en air (Air occlus)

À l'aide de l'aéromètre on mesure le volume d'air occlus ou entraîné du béton.

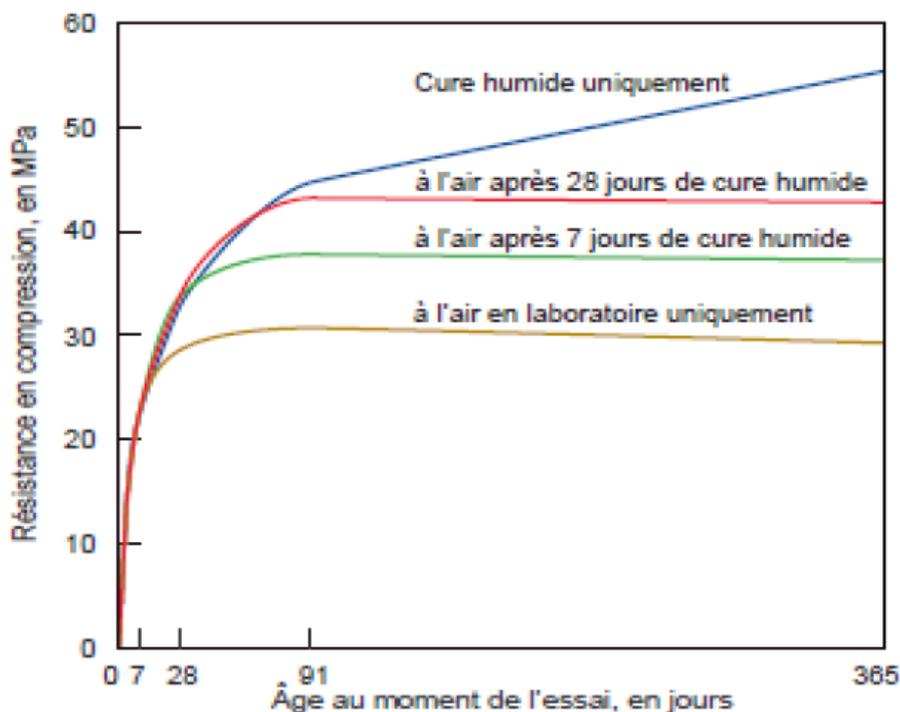
Le taux en air occlus ne doit pas dépasser les 3%.



**Fig.5.10.** Photo d'un aéromètre à béton.

#### 5.2.2. Caractéristiques du béton à l'état durci

Le béton est un matériau travaillant bien en compression, dont la connaissance de ses propriétés mécaniques est indispensable pour le calcul du dimensionnement des ouvrages. En présence d'une humidité relative (HR)  $\geq 80\%$  et tant qu'il y a des grains de ciment non encore hydratés, le béton continuera à durcir dans le temps. Lorsque  $HR < 80\%$ , l'hydratation peut s'arrêter (figure). Si par contre, on sature le béton de nouveau, l'hydratation reprendra. Il est toutefois conseillé d'assurer un bon murissement du béton dès le jeune âge d'une manière continue jusqu'à atteindre les performances voulues.



**Fig.5.11.** Résistance en fonction de la cure et le temps.

#### 5.2.2.1. Résistance caractéristique à la compression selon le C.B.A 93 (A.2.1.1.1)

Pour l'établissement des projets, dans les cas courants, un béton est défini par une valeur de sa résistance à la compression à l'âge de 28 jours, dite valeur caractéristique requise. Celle-ci, notée  $f_{c28}$  est choisie a priori, compte tenu des possibilités locale et des régies de contrôle qui permettent de vérifier qu'elle est atteinte. Des exemples de valeurs usuelles de résistance en compression du béton proposé par le C.B.A. 93 sont exposés dans le tableau suivant :

**Tableau 5.4.** Valeurs de  $f_{c28}$  en fonction du dosage et de la classe du ciment.

Classes du ciment		CPA 325	
Conditions de fabrication du béton		AS	CC
$f_{c28}$	16		
	20	325	300
	25	375	350
	30	(1)	(1)

Dans le tableau précédent :

- CC, désigne les conditions courantes de fabrication des bétons.
- AS, signifie avec autocontrôle surveillé.
- (1), cas à justifier par une étude appropriée.

Règlementairement (A.2.1.1.1) et pour les sollicitations qui s'exercent sur un béton âgé de moins de 28 jours, les règles C.B.A. 93 se réfèrent à la résistance caractéristique  $f_{cj}$  obtenue au jour considéré selon les approximations suivantes :

- Pour :  $f_{c28} \leq 40\text{MPa}$

$$f_{cj} = \left( \frac{j}{4,76 + 0,83j} \right) f_{c28} \quad (5 - 2)$$

Pour les bétons non traités thermiquement les règles C.B.A 93 donnent pour les bétons de résistance au plus égale à 40MPa , les taux de croissance reportés dans le tableau 5.5.

**Tableau 5.5 :** Evolution de la résistance en compression dans le temps pour  $f_{c28} \leq 40\text{MPa}$

Age du béton (jours)	3	7	14	21	28
$\frac{f_{cj}}{f_{c28}}$ (%)	41,4	66,2	85,5	94,6	100

- Pour :  $f_{c28} > 40\text{MPa}$

$$f_{cj} = \left( \frac{j}{1,40 + 0,95j} \right) f_{c28} \quad (5 - 3)$$

Pour les bétons qui n'ont fait l'objet d'aucun traitement thermique, les règles C.B.A 93 donnent pour les bétons de résistance caractéristique supérieure à 40MPa , les taux de croissance reportés dans le tableau 5.6.

**Tableau 5.6.** Evolution de la résistance dans le temps pour  $f_{c28} > 40\text{MPa}$ .

Age du béton (jours)	3	7	14	21	28
$\frac{f_{cj}}{f_{c28}}$ (%)	70,6	86,9	95,2	98,4	100

On peut constater à partir des valeurs du tableau 5.6 que pour cette catégorie de bétons l'accroissement de la résistance en compression au jeune âge (jusqu'à 7 jours) est nettement plus prononcé que pour le cas précédent.

Lorsque l'âge du béton dépasse 28 jours, la valeur de  $f_{cj}$  est conventionnellement bornée supérieurement à  $f_{c28}$  pour justifier la résistance des sections.

Pour d'autres types de vérifications, on peut évaluer la valeur de  $f_{cj}$ , à condition que le béton ne soit pas traité thermiquement, par les formules suivantes :

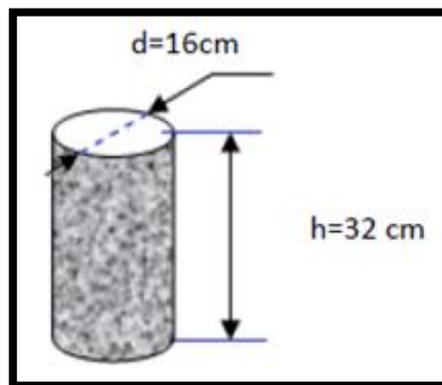
$$f_{c\infty} = 1,1f_{c28} \quad \text{si : } f_{c28} \leq 40\text{MPa} \quad (5 - 4)$$

$$f_{c\infty} = f_{c28} \quad \text{si : } f_{c28} > 40\text{MPa} \quad (5 - 5)$$

Dans tous les cas la résistance à la compression est mesurée par compression axiale de cylindres droits de révolution de  $200\text{cm}^2$  de section et d'une hauteur double de leur diamètre ( $16 \times 32$ ) $\text{cm}^2$ .



**Fig.5.12.** Ecrasement d'éprouvettes cylindriques de béton avec une presse hydraulique.



**Fig.5.13.** Eprouvette cylindrique (diamètre 16cm, hauteur 32cm)

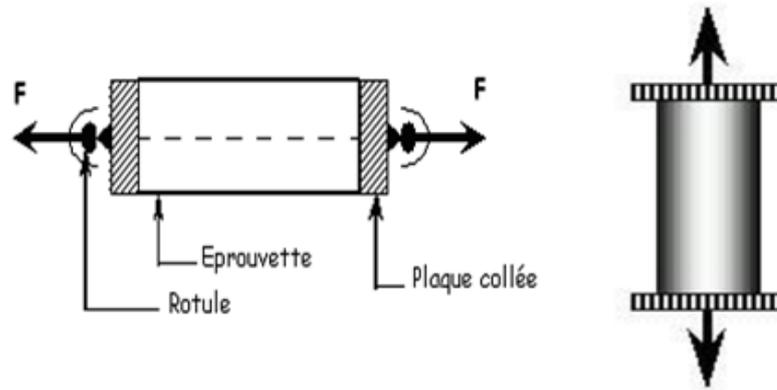
#### 5.2.2.2. Résistance du béton à la traction

Le béton classique possède une faible résistance à la traction. Elle est déterminée à l'aide des essais directe ou indirecte. La résistance à la traction bien que négligée, joue cependant un rôle important dans le problème de la fissuration et le comportement au cisaillement du béton.

Expérimentalement, la résistance à la traction d'un béton peut se mesurer grâce à l'une des trois méthodes suivantes :

- L'essai de flexion 3 points
  - Essai de fendage (ou essai brésilien)
  - Essai de traction directe
- a) Essai de traction directe

La mesure se fait par mise en traction de cylindres identiques aux précédents mais l'essai est assez délicat à réaliser car il nécessite, après sciage des extrémités, le collage des têtes de traction parfaitement centrées, l'opération devant avoir lieu sans aucun effort de flexion parasite (voir figure 5.14). Pour cette raison, on procède aux essais suivants :



**Fig.5.14.** Essais de traction directe.

- b) Essai de traction par flexion

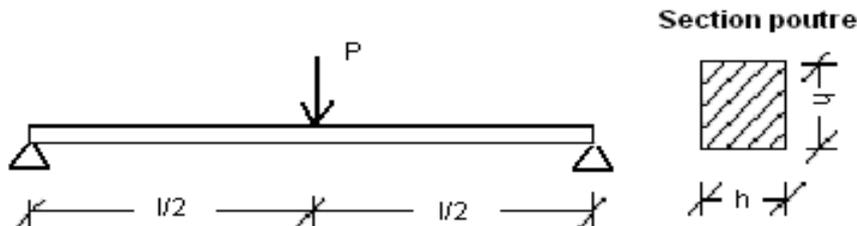
Cet essai est réalisé sur des éprouvettes prismatiques (7.7.28)cm<sup>3</sup>. La résistance à la traction (par flexion) correspond à la contrainte maximale calculée par la formule suivante :

$$f_t = \frac{1,8P}{a^2} \tag{5 - 4}$$

Où:

P : La charge appliqué,

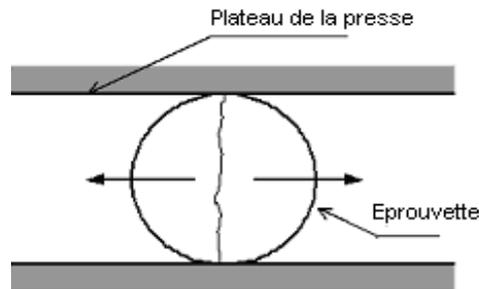
a : Le coté de l'éprouvette prismatique.



**Fig.5.15.** Essai de traction par flexion.

## c) Essai de fendage (ou essai brésilien)

Il consiste à soumettre une éprouvette cylindrique à un effort de fendage, par application de forces de compression radiales suivant deux génératrices diamétralement opposées. La résistance à la traction du béton se déduit de la force appliquée par la formule empirique suivante:



**Fig.5.16.** Essai de traction par fendage.

$$\sigma = \frac{0,55F}{dl} \quad (5 - 7)$$

## d) Résistance caractéristique à la traction selon le C.B.A 93 (A.2.1.1.2)

La résistance caractéristique à la traction, à l'âge  $j$  jours, notée  $f_{tj}$  est conventionnellement définie selon le C.B.A 93 par la relation suivante :

- Pour :  $f_{c28} \leq 60\text{MPa}$

$$f_{tj} = 0.06f_{cj} + 0.6 \quad (5 - 8)$$

- Exemple :

$$f_{c28} = 25\text{MPa}, \rightarrow f_{t28} = 0.06 \times 25 + 0.6 = 2.1\text{MPa}.$$

Bien que dans la plupart des calculs réglementaires des pièces soumises à des contraintes normales, la résistance mécanique du béton tendu sera négligée, elle joue cependant un rôle fondamental dans le processus de la fissuration du béton et le comportement au cisaillement.

## 5.2.2.3. Modules de déformation longitudinale du béton selon le C.B.A 93 (A.2.1.2)

## a) déformation longitudinale instantanée

Sous des contraintes normales d'une durée d'application inférieure à 24 heures, on admet, à défaut de mesures, qu'à l'âge de  $j$  jours le module de déformation longitudinale instantanée du béton  $E_{ij}$  est égal à :

$$E_{ij} = 11000 \sqrt[3]{f_{cj}} \quad (5 - 9)$$

$f_{cj}$  (exprimée enMPa) désignant la résistance caractéristique du béton à la compression à  $j$  jours.

Nous avons reporté sur le tableau suivant les valeurs du module de Young du béton pour des résistances variant entre 16 et 40MPa.

**Tableau 5.8.** Valeurs du module de Young en fonction de la résistance en compression selon le C.BA 93

Résistance (MPa)	16	20	25	30	35	40
Module d'élasticité (MPa)	27718	29859	32164	34180	35982	37619

b) Déformation longitudinale différée

Pour des chargements de longue durée on utilisera le module différé  $E_{iv}$ , qui prend en compte artificiellement les déformations de fluage du béton. Celles-ci représentant approximativement deux fois les déformations instantanées, cette approche simplificatrice, permet d'estimer les déformations cumulées dues à la déformation instantanée élastique et au fluage à un temps infini.

Le C.B.A 93 propose la formule suivante pour la détermination du module de Young différé du béton, au temps  $t = \infty$  en fonction de sa résistance caractéristique à la compression.

$$E_{iv} = 3700 \sqrt[3]{f_{cj}} \quad (5 - 10)$$

c) Coefficient de poisson ( $\nu$ )

Le coefficient de poisson est le rapport entre la déformation relative transversale et la déformation relative longitudinale.

$$\nu = - \left( \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_l} \right) \quad (5 - 11)$$

Selon le CBA/93 (A.2.1.3) le coefficient de poisson est pris égal à :

- 0,2 pour le calcul des déformations
- 0 pour le calcul des sollicitations.

#### 5.2.2.4. Coefficient de dilatation thermique

La dilatation thermique est la tendance de la matière à changer en volume lorsque la température change. Lorsqu'une substance est chauffée, ses particules commencent à se déplacer plus rapidement ; par conséquent, ils maintiennent généralement une séparation moyenne plus grande. Selon le CBA/93 (A.3.1.3.3) le coefficient de dilatation du béton armé est égal à  $10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ .

## Chapitre 6

### Mise en œuvre du béton

#### 6.1. Problématique

Les moyens de confection du béton doivent être tels que le produit obtenu soit homogène et que les granulats soient bien enrobés de liant. Et le béton doit être transporté dans des conditions ne donnant lieu ni à ségrégation ni à un début de prise avant mise en œuvre.

#### 6.2. Stockage des constituants

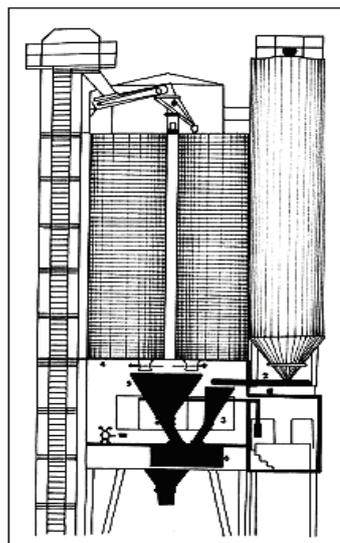
##### 6.2.1. Les granulats

Les granulats sont classés par catégories (nature) et grosseur (tailles) et stockés. Une aire, légèrement inclinée (pour permettre l'écoulement des eaux de pluies) doit être aménagée. En pourra le cas échéant doter cette aire, d'un système de canalisations de distribution de vapeur permettant le préchauffage des granulats.

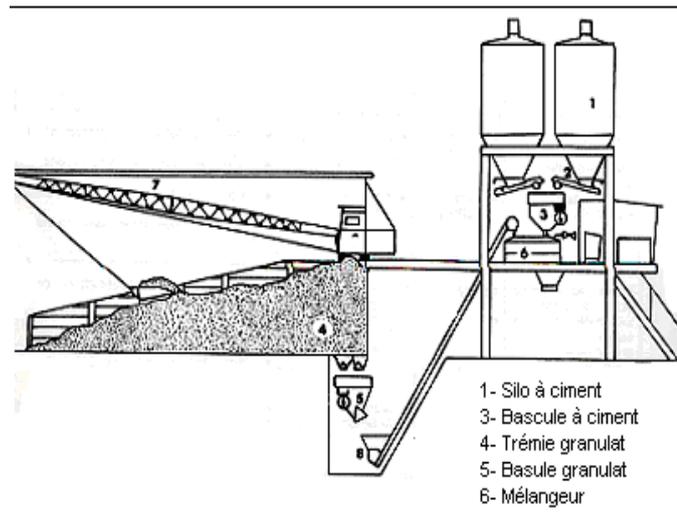
##### 6.2.2. Le ciment

Pour les petits chantiers, le ciment doit être conservé sur des palettes (généralement en bois) disposées sur un sol plat et sec. Les sacs seront protégés de la pluie, des remontées de l'humidité, et contre tout choc susceptible de les déchirer. Si le chantier utilise plusieurs types de ciments à la fois, il est impératif de les séparer afin d'éviter tout risque d'erreur.

Pour les chantiers de grande importance le ciment est livré par des camions cocottes puis déchargé et stockés sur des silos verticaux (Figure 6.1) dont la capacité peut dépasser les 300 tonnes.



**Fig.6.1.** Silo vertical pour ciment



**Fig.6.2.** Photo d'une centrale à béton

### 6.2.3. Eau de gâchage

La bétonnière comporte en général un réservoir doseur d'eau. Une partie de l'eau est souvent introduite avant chargement pour rincer la cuve et le reste de l'eau est ajoutée au début du malaxage.

Jadis, il était très difficile de régler le doseur d'eau définitivement en raison des variations de la teneur en eau du sable qui peut être nulle par grande sécheresse et atteindre 10% par temps pluvieux, ce pourcentage représentant 60 litres pour un béton dosé à 600 litres de sable par mètre cube en œuvre. De plus, dans le tas de sable, la teneur en eau varie lorsque l'on s'écarte de la surface.

De nos jours les grandes centrales à béton sont équipées d'hygromètre capable de mesurer avec précision la teneur en eau et un dispositif permet de corriger automatiquement, en fonction de cette teneur en eau, l'apport d'eau extérieure.

### 6.3. Transport du béton

Le délai séparant la fabrication de la mise en place complète du béton transporté ne doit pas excéder le début de prise estimé suivant les cas de figure de 1 h à 1 h30mn. Le temps de transport doit être limité à 45 mn environ, surtout par temps chaud. Le risque rencontré dans le transport du béton est la chute de sa maniabilité. L'emploi de retardateurs de prise et de plastifiants a néanmoins permis de résoudre en grande partie ce type de difficultés.

Pour transporter le béton, on utilise des camions qui assurent le malaxage pendant le transport :

- **Le camion benne** : permet de transporter à moindre coût des « bétons fermes » (graves, sables stabilisés...).

- **Le camion-Toupie (malaxeur)** : La capacité de ces bétonnières portées varie de 4 à 10m<sup>3</sup>, par sa cuve rotative et sa vis-sans-fin formée d'une cloison hélicoïdale il permet de brasser le béton et éviter la ségrégation, à l'aide de ses goulottes il peut déverser le contenu de façon précise mais à distance limitée.



**Fig.6.3.** Photo d'un camion toupie malaxeur.

- **Le camion-Tapis** : malaxeur qui se dote d'un tapis qui permet d'acheminer le matériau sur une portée horizontale de 15 mètres et 5 mètres en vertical.

- **Le camion-Pompe** : malaxeur doté d'une pompe qui permettra au client d'atteindre le lieu de coulage à accès difficile (banche en hauteur, cible très éloignée, etc.) par sa portée verticale et horizontale de près de 20 mètres.

#### **6.4. Mise en œuvre du béton**

##### **6.4.1. Coffrage**

Le coffrage dans ses méthodes traditionnelles, appliquées à des formes complexes, dans des conditions de travail difficiles, représente le coût prépondérant dans le gros-œuvre de l'ouvrage. Ces méthodes s'appliquent le plus facilement à des éléments prismatiques ou de section peu variable.

Le coffrage glissant monte de façon continue, jour et nuit, de la base au sommet. Quelques jours suffisent pour atteindre une hauteur de plusieurs dizaines de mètres (permettant ainsi une économie de temps considérable). Leur avantage est cependant réduit du fait qu'elles n'évitent pas, dans la plupart des cas, la construction d'un échafaudage.



**Fig.6.4.** Mise en place de l'échafaudage

Le coffrage grimpant permet la réalisation, par tranches verticales successives. Il comporte les passerelles de travail nécessaires et prend appui sur la structure même.



**Fig.6.5.** Coffrage grimpant

#### 6.4.2. Malaxage

Le malaxage est une phase importante de la fabrication du béton, car il va conditionner la qualité de son homogénéité. Pour assurer la réussite de cette opération, il faut choisir un matériel adapté et déterminer un temps de malaxage suffisant. Le choix d'un appareil (bétonnière ou malaxeur) dépend de sa capacité de production, de son aptitude à malaxer différents types de mélanges (secs, pleins, plastiques) pour donner des bétons réguliers. Le béton doit être mis en place avant tout commencement de prise par des procédés lui conservant son homogénéité, particulièrement dans le cas de béton pompé.

Si le ferrailage est dense sur une hauteur importante, il faut prévoir des goulottes pour conduire le béton jusqu'au fond de moule et éviter ainsi qu'il "cascade" à travers les armatures (risque grave de ségrégation). Le bétonnage ne doit pas se faire à partir d'une hauteur supérieure à 3mètre.

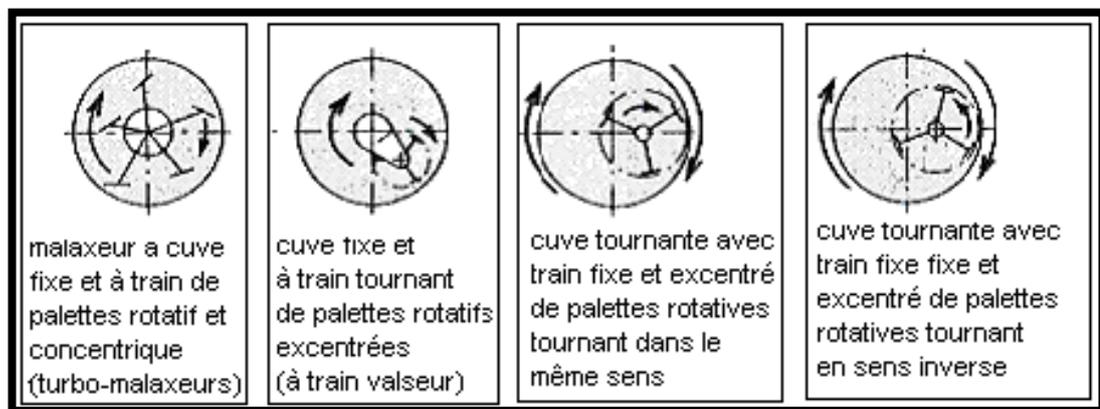
Dans le cas des éléments horizontaux de grandes surfaces (planchers radier. etc.), il est recommandé à ce que la hauteur de chute ne dépasse pas 80cm.

Pour la mise en place du béton par déversement de benne dans les murs et les poteaux de plus de 3mètre de hauteur, la benne doit être prolongée par un tube afin de limiter la chute libre du béton.

Il existe plusieurs types de malaxeurs : les malaxeurs à axe vertical et malaxeurs à axe horizontal.

#### 6.4.2.1. Les malaxeurs à axe vertical

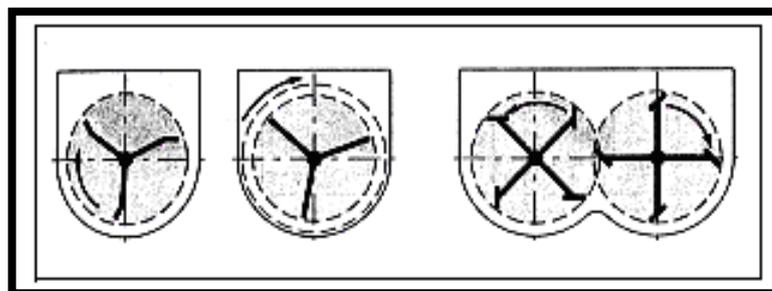
La plupart des malaxeurs sont à axes verticaux (Fig.6.6) et les déplacements sont essentiellement horizontaux.



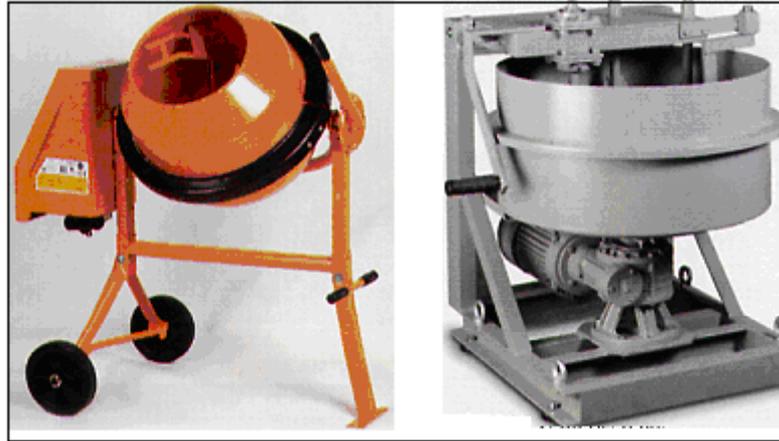
**Fig.6.6.** Types de malaxeurs

#### 6.4.2.2. Les malaxeurs à axe horizontal

Les malaxeurs à axes horizontaux (Fig.6.7) sont munis de palettes hélicoïdales dont les formes permettent un brassage intense de béton.



**Fig.6.7.** Malaxeurs à axe horizontal



**Fig.6.8.** Photos de bétonnières

#### 6.4.3. Pompage du béton

Le pompage du béton est une technique qui se développe rapidement car il permet une importante productivité (le pompage du béton présente l'avantage d'être économique, même sur petits chantiers, par le gain de temps qu'il procure au client), la limitation du temps d'attente avant la mise en place du béton, la possibilité d'assurer l'approvisionnement sur des sites difficiles d'accès, la mise en place de quantités importantes en une seule coulée. Le camion pompe équipé de flèches allant jusqu'à 60m, peut envoyer le béton directement de la toupie au lieu de coulage.

L'évolution rapide des bétons pompés permet ainsi d'atteindre des longueurs de transport de 300 à 400m, jusqu'à 100m et plus en hauteur. Le béton est envoyé dans des tubes de 150 à 200mm de diamètre, sous une pression pouvant dépasser 10MPa. Les débits courants sont de 15 à 20m<sup>3</sup>/h; ils peuvent atteindre 100m<sup>3</sup>/h pour les matériels les plus efficaces. Les progrès atteints avec les plastifiants permettent d'obtenir ces résultats et notamment avec les bétons de hautes performances. Les règles à respecter lors du transport.



**Fig.6.9.** Mise en œuvre du béton pompé

#### 6.4.4. Vibration du béton

Sauf justification spéciale. Tous les bétons doivent être mis en place par vibration. La vibration doit se poursuivre jusqu'à la cessation de l'apparition des bulles d'air. Le béton doit être vibré par couches successives d'épaisseur maximum de 50cm. Dès son arrivée sur site, le béton doit être mis en place et compacté convenablement dans les moules ou dans les coffrages. Le compactage, opération qui permet l'élimination de l'air présent dans le béton est une opération qui demande le plus de main d'œuvre.

Pour effectuer le compactage, on dispose de plusieurs techniques dont notamment :

##### 6.4.4.1. Le piquage

C'est le moyen le plus ancien, et consiste à bourrer le béton dans le moule à l'aide de tiges. Le serrage reste médiocre, sauf pour les bétons plastiques, riches en sable et en eau conviennent. Bien que ce procédé soit complètement délaissé ailleurs, il reste largement utilisé par les artisans bâtisseurs chez nous, qui ont recours aux chutes de ferrailles pour compacter le béton.

##### 6.4.4.2. Le damage

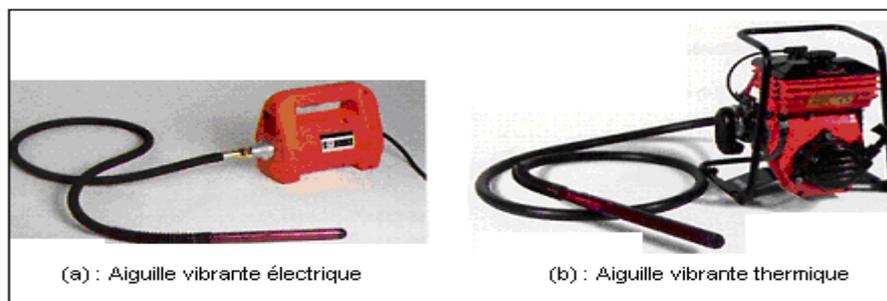
Cette technique consiste à damer les surfaces horizontales du béton frais : il en résulte un serrage efficace sur une épaisseur de trois fois la dimension du plus gros granulat. C'est un procédé fréquemment utilisé pour la mise en place des dalles par exemple.

##### 6.4.4.3. Les vibrations

La vibration constitue sans aucun doute le procédé le plus efficace et le plus répandu. Le degré de compactage d'un béton frais dépend de la fréquence et de l'amplitude des oscillations, ainsi que de la durée de vibration. Elle peut être interne (on parle alors de pervibration) ou externe.

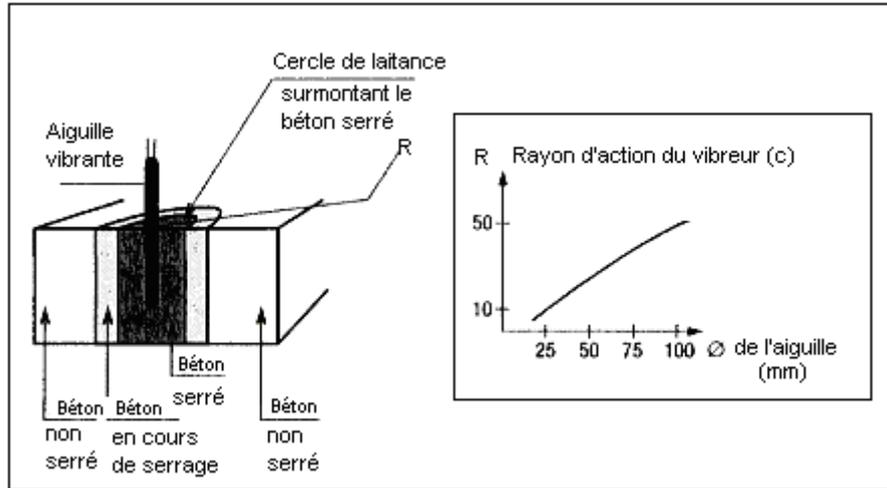
###### a) Vibration interne

On utilise une aiguille vibrante qui est constituée d'un cylindre métallique dans lequel tourne dans une masselotte excentrée. Cette masse est mise en rotation par l'intermédiaire d'un système mécanique, thermique, pneumatique ou électrique. Une aiguille vibrante est toujours équipée d'un tuyau flexible.



**Fig.6.10.** Aiguilles vibrantes pour béton

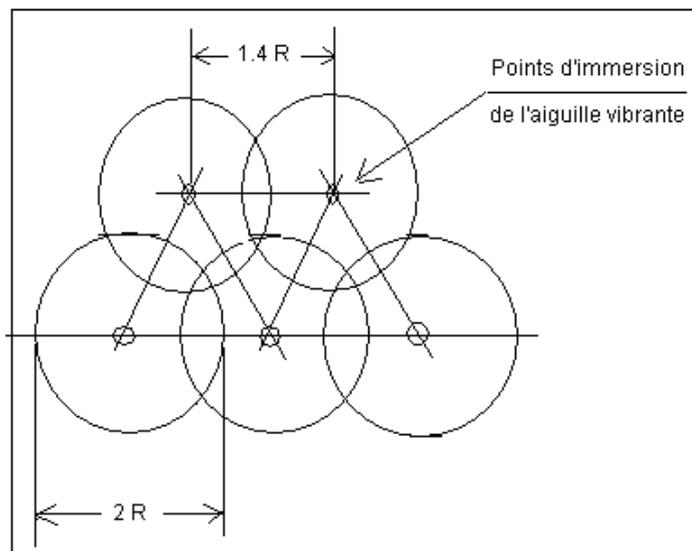
L'aiguille vibrante doit être plongée verticalement dans le béton. Les vibrations émises vont serrer une partie uniquement du béton, cette partie appelée «rayon d'action de l'aiguille» dépend essentiellement du diamètre de l'aiguille vibrante utilisée (Fig.6.11).



**Fig.6.11.** Rayon d'action d'une aiguille vibrante

Pour utiliser au mieux les performances des aiguilles vibrantes, on doit appliquer les recommandations générales suivantes :

- Munir les armatures de cales et éviter de les vibrer ;
- Eviter de vibrer près du coffrage ;
- Vibrer par couches successives de 40 à 50cm d'épaisseur ;
- Pénétrer à chaque fois le vibreur de 10cm dans la couche inférieure ;
- Respecter la distance entre points de vibration conformément à la figure suivante :



**Fig.6.12.** Distance entre points de vibrations successifs

Une aiguille vibrante de 50cm de diamètre permet de traiter de 2 à 3m<sup>3</sup> de béton par heure.

b) Vibration de surface

Pour les dalles, et planchers on utilise souvent des règles vibrantes, règles constituées d'une ou de deux profilés métalliques rigides dotés d'un vibreur. Ces règles permettent de compacter des épaisseurs de 10 à 20cm de béton, avec une très bonne finition.



**Fig.6.13.** Photo d'une règle vibrante pour dallage et planchers.

c) Vibration par table vibrante

Il suffit de placer le moule en béton sur un socle robuste appelée table vibrante. Le socle est équipé d'une pédale de commande qui pilote l'intensité des vibrations. Le socle est doté de brides pour une fixation solide des éprouvettes.

### 6.5. Bétonnage

Pour le bétonnage par temps froid (ambiance < 5°C), on doit tenir compte des principales recommandations. Pour des températures atteignant - 5°C, il est prudent d'arrêter tout bétonnage. Par temps chaud, il faut éviter le bétonnage (ambiance supérieure à 30°C) et sec (ambiance inférieure à 55% d'humidité), que le béton ne perde, du fait de l'évaporation, une proportion trop importante de son eau. Il est préférable par temps très chaud (entre 30 et 40°C) de bétonner l'après-midi ou en fin de journée.

### 6.6. Interruption et reprise de bétonnage

Les interruptions de bétonnages d'un élément de structure doivent être évitées autant que possible. S'il ne peut en être ainsi, des précautions doivent être prises pour assurer une bonne adhérence du béton nouveau sur le béton ancien ; il faut notamment repiquer et nettoyer à vif la surface de reprise pour y faire saillir les graviers, mouiller longuement et abondamment cette surface afin de saturer d'eau le béton ancien et,

enfin éliminer l'eau en excès à l'air comprimé avant de reprendre le bétonnage. Il est contre indiqué de couler préalablement sur la surface de reprise, une barbotine de ciment.

### ***6.7. Cure de béton***

La cure doit commencer dès le début de la prise du béton, elle doit être poursuivie pendant une semaine dans les cas normaux et pendant dix jours en cas de temps très sec et chaud. La cure peut être effectuée, soit par humidification soit par enduit temporaire imperméable.

## Chapitre 7

### Contrôle et qualité du béton

#### 7.1. Introduction

Les problèmes de qualité rencontrés dans les structures en béton apparaissent à différentes phases de la réalisation des ouvrages, depuis le choix des constituants (ciment et granulats), la jusqu'au béton durci, pour cette raison que depuis longtemps il y a une demande accrue pour des méthodes plus précises et, en même temps, plus souples d'évaluation de la qualité du béton. Le contrôle de la qualité du béton peut être effectué à partir des essais sur béton frais ou durci par des essais destructifs ou non destructifs. Ces derniers peuvent jouer un rôle exceptionnel dans la garantie de la qualité du béton et dans le développement ultérieur de la technologie de construction.

#### 7.2. Les étapes du contrôle

Le contrôle sur béton comprend plusieurs étapes notamment :

##### 7.2.1. Contrôle des Matériaux, produits et composants de construction livrés sur chantier (Etude de formulation)

L'objectif de ces contrôles consiste à s'assurer que les produits ou les matériaux commandés et livrés sur le chantier sont bien conformes aux normes et spécifications recherchées. Des échantillons peuvent être prélevés lors de chaque livraison afin de vérifier leurs caractéristiques. Dans le cas où les résultats d'essais ne sont pas conformes aux spécifications, l'ensemble de la livraison doit pouvoir être refusée.

Ces essais et contrôles peuvent être réalisés sur le chantier ou le lieu de livraison, mais également dans un laboratoire ou aux usines du fabricant. Dans ce dernier cas, la livraison est alors souvent accompagnée d'un document tel qu'un certificat de conformité, un procès-verbal d'essais, etc.

##### 7.2.2. L'épreuve de convenance (vérification que le béton formulé est fabricable en centrale).

##### 7.2.3. Le contrôle de fabrication du béton (Contrôle des produits fabriqués ou ouvrages réalisés)

L'objectif de ces contrôles consiste à vérifier la qualité des produits fabriqués et la qualité des ouvrages réalisés en fonction des prescriptions du maître d'œuvre. Dans le cas d'une construction en béton, des essais et contrôles doivent être effectués sur le béton frais ainsi que sur le béton durci.

#### 7.3. Essais de contrôle

##### 7.3.1. Essai sur béton frais

Les essais qui peuvent être réalisés à cet état sont :

- Mesure de la mass volumique
- Mesure de l'air occlue (Aéromètre)
- Mesure de la consistance (affaissement au cône d'Abrams)
- Prélèvement par carottage (Enfoncement d'un carottier cylindrique dans le béton frais et son retrait à l'approche du jour j envisagé).

### 7.3.2. Essais sur béton durci

#### 7.3.2.1. Essais destructifs

Ces essais sont pratiqués en laboratoire sur des éprouvettes confectionnées à partir du béton frais prélevé sur la gâchée et conservés dans des conditions proches de celles de l'ouvrage. Ou procédé à un forage du béton durci de l'ouvrage à l'aide de couronne diamantée et injection d'eau. La résistance doit être égale ou supérieure aux spécifications exigées pour le type de béton correspondant. Les essais de résistance à la compression se font généralement aux échéances de 7 et 28 jours.



**Fig.7.1.** Prélèvement des éprouvettes par carottage.

#### 7.3.2.2. Essais non destructifs

Les problèmes de qualité rencontrés dans les structures en béton apparaissent à différentes phases de la réalisation des ouvrages, c'est pour cette raison que depuis longtemps il y a une demande accrue pour des méthodes plus précises et, en même temps, plus souples d'évaluation de la qualité du béton.

Pour cela on a recourt aux essais non destructifs (END) du béton. Les avantages de ces essais par rapport aux autres peuvent être résumés comme suit :

- 1) Essai d'une construction sans la détruire, ni nuire à sa capacité de service,
- 2) Possibilité d'obtenir des informations dans des domaines inaccessibles aux méthodes classiques (par exemple : observation in situ du durcissement du béton dans l'ouvrage, détermination et observation dans le temps du degré de corrosion des ouvrages),

- 3) Supplément d'informations de caractère local, sous forme de données se rapportant à un grand volume de matériau, donc possibilité d'obtenir un tableau plus complet de l'homogénéité du matériau dans l'ouvrage,
- 4) Economie de matériaux, de temps et d'outillages d'essai par la possibilité de faire les essais sur le matériau dans l'ouvrage même ou sur une seule éprouvette un nombre pratiquement infini de fois, due à la rapidité de l'exécution de ce type d'essais et aussi au fait qu'on peut remplacer certains outillages coûteux et dont la manipulation est délicate par des appareils simples et transportables.

Williams en 1936 a lancé le premier essai non destructif. Après et pendant le développement de domaine de la construction, une gamme d'essais non destructifs in-situ, a été développée, par d'autres chercheurs dans ce domaine comme : Ernest Schmilt (1948), Jones (1962), Whitehurst (1966), et Malhotra (1976). En 1982 Bungey a présenté une enquête complète de littérature sur les méthodes non destructives utilisées pour l'évaluation du béton. Au milieu des années soixante Skramtaev et Leshchinsky (1966) ont proposé pour la première fois l'utilisation de deux méthodes non destructifs ensemble. En 1991 Leshchinsky a récapitulé les avantages des essais non destructifs comme la réduction de la consommation de travail de l'essai, une diminution de la consommation de travail des travaux préparatoires, peu de dommages structuraux, l'utilisation d'équipement d'essai moins cher, par rapport à l'essai destructif.

Il existe deux genres de méthodes pour l'estimation de la résistance de compression du béton. Les premiers, englobent les méthodes qui ne mesurent pas directement la résistance mais d'autres propriétés du béton, à partir, desquels, une estimation de la résistance peut être obtenue. Ces méthodes incluent les tests tel que

- Méthode de dureté superficielle ou essai au scléromètre,
- Méthode ultra son.

Les seconds types de tests sont ceux qui mesurent quelques propriétés de résistance, à partir desquels on peut faire une estimation de résistance du béton. Ces méthodes englobent des tests tels que l'essai d'arrachement.

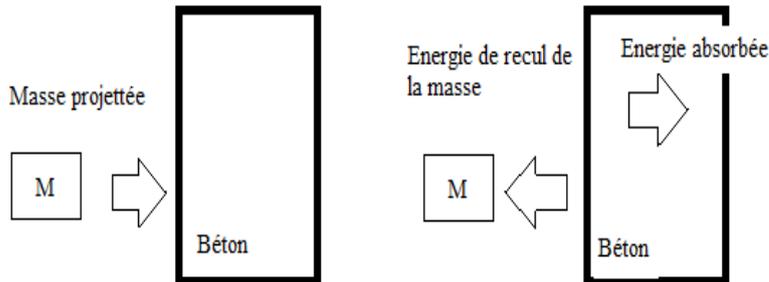
#### a) Essai au scléromètre

La méthode de dureté superficielle consiste essentiellement à une auscultation du béton par une manière standard, en utilisant une masse donnée activée par une certaine énergie puis mesurer ensuite le rebondissement. Cette méthode est connue sous le nom de scléromètre Schmidt. Cet essai est l'un des plus vieux essais non destructif et il est encore très largement utilisé de nos jours. Il a été développé par Ernst Schmidt en 1948 et est connu sous le nom l'essai au marteau Schmidt ou essai au scléromètre. Le scléromètre (figure1) est resté le seul instrument connu qui utilise le principe de rebondissement pour les essais sur le béton selon R.F Feldman (1977).



**Fig.7.2.** Photo d'un scléromètre digital.

Le principe de base de l'essai au scléromètre est que le rebond d'une masse élastique dépend de la dureté de la surface sur laquelle frappe la masse, comme présenté sur la Fig.7.3. Dans l'essai au scléromètre une masse approximative de 1,8kg montée sur un ressort a une quantité potentielle fixe d'énergie qui lui est transmise par un ressort tendu a partir d'une position fixe, ce que l'on obtient en pressant la tête du marteau contre la surface du béton mis à l'essai. Lors de son relâchement, la masse rebondit depuis la tête, toujours en contact avec la surface du béton et la distance qu'elle parcourt, exprimée en pourcentage de l'extension initiale du ressort est appelée l'indice de rebondissement. Cet indice est indiqué par un curseur qui se déplace le long d'une règle graduée.



**Fig.7.3** Principe du Scléromètre.



**Fig.7.4.** Essai sclérométrique sur une éprouvette cubique (10.10.10)cm<sup>3</sup>.

Il faut signaler que l'emploi du scléromètre convient aux essais en laboratoire comme aux essais sur chantier.

#### a1) Aantages de l'essai sclérométrique

C'est une méthode peu coûteuse, simple et rapide. L'essai au scléromètre est comparatif, il est utile pour évaluer l'homogénéité du béton dans une structure ou lors de la fabrication d'éléments semblables des éléments préfabriqués. L'essai peut aussi être utilisé pour vérifier si la valeur de l'indice de rebondissement a atteint la valeur désirée correspondant à la résistance du béton, ce qui peut aider à décider du moment où l'on peut mettre la structure en service. Une autre utilisation de cet essai est de

pouvoir vérifier si le développement de la résistance d'un béton a été affecté par le gel au jeune âge. Selon la norme ASTM C 805-85 un béton encore gelé peut donner un indice de rebondissement très élevé.

#### a2) Inconvénients de l'essai sclérométrique

Une précision entre  $\pm 15$  et  $\pm 20\%$  n'est possible qu'avec des éprouvettes qui ont été coulées et soumises à un traitement de cure et à des essais dans les conditions pour lesquelles les courbes d'étalonnage ont été établies. Les résultats sont influencés par des facteurs tels que l'égalité de la surface, la grosseur et la forme de l'éprouvette, le degré d'humidité du béton, le type de ciment et de gros granulats W.E.Grieb (1958) et le degré de carbonatation de la surface. La résistance obtenue n'est que celle de la peau de béton, elle ne renseigne pas sur le béton à l'intérieur de la masse de l'ouvrage. Selon la norme BS 1881, l'épaisseur concernée par cet essai est d'environ 30mm.

En première approximation, pour les granulats siliceux de qualité courante ( $D_{\max} = 16\text{mm}$ ), et pour un béton de résistance inférieure à 30MPa, on peut considérer que :

$$R_c = \frac{l_s^2}{37} - 0,3l_s \quad (7.1)$$

avec :

$l_s$  : indice sclérométrique,

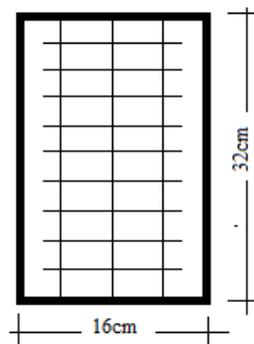
$R_c$  : résistance à la compression.

#### Aspect réglementaire

Norme Algérienne NA2786: **Bétons** - Mesure de la dureté de surface par rebondissement à l'aide d'un scléromètre (Equivalent norme française NFP 18-417).

#### - Mesures sur éprouvette (16×32)cm<sup>2</sup>

Les éprouvettes préalablement rectifiées conformément aux prescriptions de la norme NFP 18-416 sont maintenues entre les plateaux d'une presse sous une contrainte de 0,5MPa. Le scléromètre étant placé perpendiculairement à l'axe de l'éprouvette, on relève 27 mesures réparties sur trois génératrices en 27 points distincts et distantes entre eux de 30mm. Aucune mesure ne doit être située à moins de 40mm.

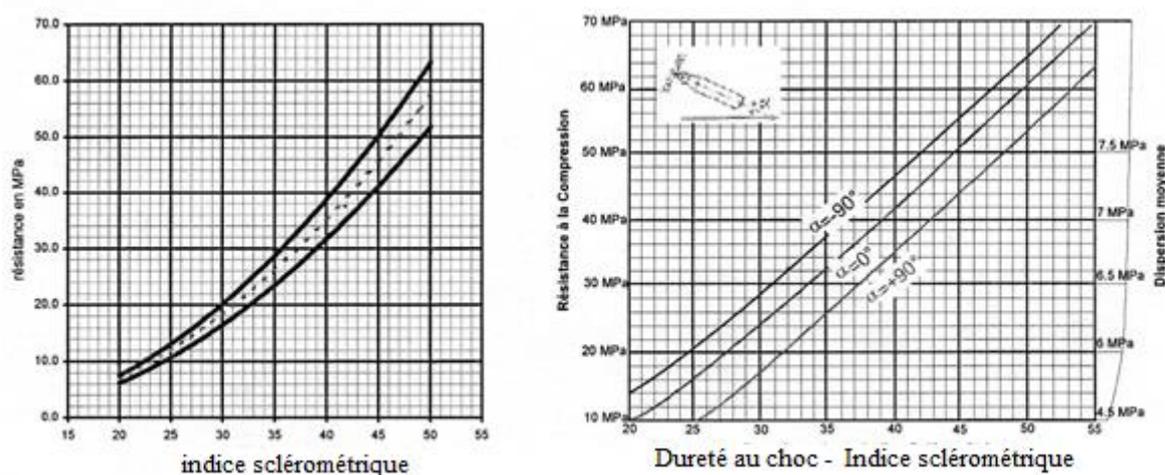


**Fig.7.5** Repérage des points sur éprouvette (16 × 32)cm<sup>2</sup>.

L'appareil peut être utilisé sur des positions autres qu'horizontale, il faudrait effectués simplement des corrections fournies avec l'appareil. Lors du calcul de la résistance moyenne du béton, on doit éliminer les valeurs trop faibles ou trop fortes. Le scléromètre constitue donc un essai très rapide d'exécution, d'un coût réduit, avec possibilité à l'utilisateur de travailler sans source d'alimentation électrique. Ces avantages ont fait du scléromètre un appareil fréquemment utilisé pour l'expertise des ouvrages. Cependant cet appareil ne fournit que des renseignements locaux et superficiels pour une couche de deux centimètres au plus à la surface de l'éprouvette soumise à l'essai.

#### - Mesures sur ouvrages

La surface testée est divisée en zones d'au moins 400cm<sup>2</sup> (25.25cm). La tige de percussion du scléromètre étant perpendiculaire à la surface essayée, on prend 27 mesures sur chaque zone d'essai. La distance entre 2 points de mesure est d'au moins 30mm et aucun point ne doit se situer à moins de 30mm de l'un des bords de la surface testée.



**Fig.7.6.** *Interprétation de l'essai sclérométrique.*

- b) Les ultra-sons (Norme NA 5027: Béton - Auscultation sonore - Mesure du temps de propagation d'ondes soniques dans le béton)

Le principe de la méthode des ultra-sons consiste à mesurer le temps de propagation des impulsions ultrasoniques traversant le béton à l'aide d'un générateur et d'un récepteur. Les principales caractéristiques de tous les appareils disponibles sur le marché comprennent un générateur d'impulsion et un récepteur d'impulsions comme le montre la Fig.7.7.



**Fig.7.7.** Appareillage ultrasonique.

Les ultrasons sont des ondes sonores de fréquence supérieure à 20kHz, correspondant à des sons inaudibles pour l'homme. Le principe de la méthode consiste à mesurer le temps mis par une onde, d'où le nom de la méthode (essai de vitesse de propagation d'ondes sonores) à parcourir une distance connue. Les principales caractéristiques de tous les appareils comprennent un générateur d'impulsions et un récepteur d'impulsions. Les impulsions sont produites par des cristaux piézo-électriques à excitation par choc des cristaux semblables, elles sont utilisées dans le récepteur. La fréquence de générateur d'ondes est comprise entre 10 et 150 HZ, le temps de propagation des ondes dans le béton est mesuré par des circuits de mesure électroniques. Les normes ASTM C 97-83 et BS 1881 décrivent la méthode d'essai. En Algérie, la norme NA/5027 spécifie la méthodologie de la mesure du temps de propagation d'ondes soniques dans le béton. L'essai ultrasonique peut être effectué sur des éprouvettes de laboratoires, comme sur des ouvrages en béton terminés. Cependant certains paramètres peuvent influencer la prise de mesures :

- Le parcours doit être, de préférence, d'au moins de 30 centimètres de façon à prévenir toute erreur occasionnée par l'hétérogénéité du béton ;
- Une augmentation de la vitesse des impulsions se produit à des températures sous le point de congélation à cause du gel de l'eau ; entre 5 et 30°C, la vitesse des impulsions n'est pas subordonnée à la température ;
- La présence d'armatures dans le béton a un effet appréciable sur la vitesse des impulsions. Il est par conséquent souhaitable et souvent indispensable de choisir des parcours d'impulsions qui ne sont pas influencées par la présence d'armatures ou d'effectuer des corrections si le parcours de l'impulsion rencontre une armature.

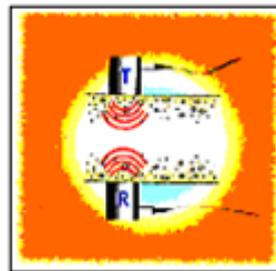


**Fig.7.8.** Conduite d'un essai ultrasonique.

La détermination de la vitesse de propagation des ultrasons se fait de trois manières, suivant le type de l'élément à tester :

a - Mesures en transparence (Directe)

Les mesures en transparence sont utilisées dans le cas des éprouvettes, des poteaux ou de certaines poutres. Les transducteurs sont appliqués sur les deux faces de l'élément à tester (Fig.7.9).

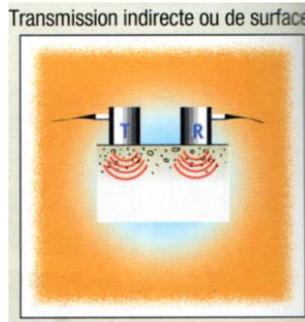


*A : Transmission directe*

**Fig.7.9.** Transmission directe des ondes ultra-soniques

b - Mesures en surface (indirecte)

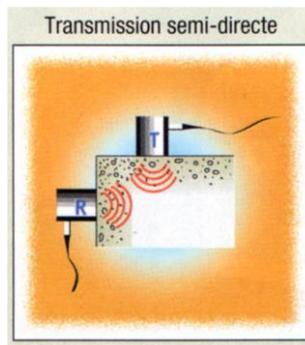
Elles sont utilisées sur tous les éléments de structure et sur les éprouvettes, mais plus particulièrement sur les dalles et éléments en longueur, montré sur la Fig.7.10. L'émetteur est maintenu en un point fixe, le récepteur est déplacé successivement à des distances marquées à l'avance. Après avoir relevé le temps correspondant à un point considéré, on passe au point suivant.



**Fig.7.10.** *Transmission indirecte (ou de surface) des ondes ultra-soniques.*

c – Mesures semi-directe :

Elles sont utilisées sur tous les éléments de structure et sur les éprouvettes, mais plus particulièrement sur les éléments de structure où l'on ne peut pas utiliser les deux autres manières.



**Fig.7.11.** *Transmission semi-directe des ondes ultra-soniques.*

b1) Les avantages

C'est une méthode idéale pour déterminer l'homogénéité du béton. L'essai peut être utilisé autant sur les ouvrages complétés que sur ceux en construction. La mesure des ondes sonores présente l'énorme avantage de donner des informations sur l'intérieur d'un élément de béton. Selon Chung et Law (1983) l'essai de propagation des ultrasons peut être utilisé pour détecter la fissuration (mais les fissures parallèles au déplacement de l'onde), les vides, les détériorations dues au gel ou de feu et l'uniformité du béton dans des éléments semblables. L'essai de propagation des ultrasons peut être utilisé pour suivre les changements microstructuraux dans un élément par exemple à la suite de cycles répétés de gel/dégel.

b2) Les inconvénients

Ces essais ne sont toutefois pas aussi efficaces pour évaluer la résistance à cause du grand nombre de variables influençant la relation entre la résistance et la vitesse de propagation des impulsions.

- La précision des résultats est fonction de la précision de l'étalonnage et de l'uniformité de la composition du béton de l'ouvrage et du béton des éprouvettes utilisées pour l'étalonnage.

- Dans l'essai de propagation des ultrasons la propriété du béton que l'on mesure est affectée par divers facteurs dont l'influence est différente de ce qu'elle est dans la résistance effective du béton.
- L'utilisation de cette méthode, si elle a bénéficié de grandes simplifications n'est donc justifiée que pour les personnes compétentes en matière d'appareillage et de connaissance du matériau de béton et aussi au courant des précautions à prendre.

### b3) Classification des bétons selon la vitesse de propagation des ondes

Des travaux effectués montrent qu'il y a une relation directe entre la vitesse de propagation des ondes dans un béton et sa qualité. Le tableau 7.1 donne un classement.

**Tableau 7.1.** *Qualité du béton en fonction de la vitesse de propagation des impulsions.*

Qualité du béton	Vitesse de propagation (m/s)
Excellente	Supérieure à 4000
Bonne	3200 - 4000
Douteuse	2500 - 3200
Mauvaise	1700 - 2500
Très mauvaise	Inférieure à 1700

En première approximation, pour les granulats siliceux de qualité courante ( $D_{\max} = 16\text{mm}$ ), et pour un béton de résistance inférieure à 30MPa, on peut considérer que :

$$R_c = 0,08177 \times e^{(0,00147 \times V)} \quad (7 - 2)$$

avec :

$V$ : vitesse de propagation(m/s),

$R_c$  : résistance en compression exprimée en MPa.

La méthode de mesure de la vitesse de propagation d'ondes ultrasoniques à travers le béton peut nous renseigner sur l'homogénéité du béton, l'estimation du module élastique et même la profondeur des fissures.

- Présence de fissures, vides et zones dégradées

Lorsqu'une onde ultrasonique rencontre une interface béton – air, il y a diffraction et une réflexion qui vont atténuer la vitesse allongeant ainsi le temps de propagation. En utilisant ce phénomène, il est possible de localiser les défauts, vides, zones dégradées et fissures.

### b4) Corrélation entre vitesse de propagation et module d'élasticité

A partir de la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques, il est possible de calculer le module d'élasticité dynamique ( $E_d$ ) selon l'expression suivante :

$$E_d = V^2 \times \gamma \frac{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}{(1 - \nu)} \quad (7 - 3)$$

dans laquelle :

$V$  : représente la vitesse des ondes, exprimée en km/s ;

$\gamma$  : la masse volumique du béton, exprimée en  $\text{kg/m}^3$  ;

$\nu$  : coefficient de poisson du béton, dont la valeur est de 0,15 pour un béton de haute résistance et de 0,30 pour un béton de faible résistance ;

$E_d$  : module d'élasticité dynamique, exprimé en MPa.

A partir de la valeur du module d'élasticité dynamique ( $E_d$ ), il est possible de déduire la valeur du module d'élasticité statique.

Le tableau suivant présente des valeurs des constantes élasto-plastiques de quelques matériaux usuels.

**Tableau 7.2.** Valeurs des constantes élasto-plastiques de quelques matériaux usuels.

Matériau	$\gamma$ ( $\text{kg/m}^3$ )	$\nu$	$E_d$ (MPa)
Fer	7800	0,28	210000
Aluminium	2700	0,34	71000
Béton jeune	2400	0,25 ÷ 0,30	10000 ÷ 20000
Béton de plus de 28j	2350	0,20 ÷ 0,24	30000 ÷ 40000

#### b5) Relation vitesse du son – résistance du béton

D'une façon générale, la résistance augmente avec la vitesse de propagation des impulsions. Mais il n'existe pas encore de relation unique valable pour tous les bétons. En effet pour un béton à très haute résistance, la vitesse du son n'augmente plus au-delà de 35MPa environ car elle est principalement fonction de la compacité du béton, étant donné qu'un béton de classe supérieure à 35MPa est pratiquement toujours très compact. Pour les bétons courants, on pourra admettre que la résistance et le module d'élasticité dynamique sont liés par la relation :

$$\text{Résistance} = 16,7 \text{Exp}^{\left(\frac{E_d}{122500}\right)} \quad (7 - 4)$$

En conclusion, les essais d'auscultation dynamique sont très efficaces pour le contrôle de la qualité du béton, et particulièrement pour évaluer l'homogénéité et détecter les fissures ou les imperfections intérieures. Cependant leur utilisation pour une évaluation de la résistance reste tributaire de beaucoup de

paramètres, et l'on estime que l'écart entre résistance réelle et résistance estimée par cette technique est de l'ordre de 40%, ce qui tout de même assez considérable.

- Exemple. Des essais de mesures de résistances comparatives «Scléromètre, ultra-son et presse mécanique» ont été effectués au niveau du laboratoire de génie civil et d'hydraulique (LGCH) de l'université de Guelma et ont donné les résultats suivants:

**Tableau 7.3.** Valeurs des résistances d'un béton obtenues par trois techniques différentes

Technique utilisée	Temps de l'essai (en jours)		
	7	14	28
Scléromètre	13,88MPa	14,23MPa	23,37MPa
Ultrason	17,55MPa	19,44MPa	22,66MPa
Presse mécanique	22,16MPa	22,79MPa	23,94MPa

Ces techniques peuvent, par leur simplicité, rendre beaucoup de services aux laboratoires de contrôles et autres bureaux d'études. Ils sont simples d'utilisation, nécessitant cependant un personnel très qualifié. Leur estimation de la résistance reste cependant contestée par beaucoup d'ingénieurs, la différence entre résistance réelle et résistance déduites de ces techniques est de l'ordre de 30 à 40%.

#### Méthodes combinées

Il est possible de combiner deux ou plusieurs méthodes non destructives à la fois et dont les résultats, introduits dans un traitement unique garantissent au résultat final obtenu une précision supérieure. A titre d'exemple Mamillan et Bouineau (1980) ont déduit de leur recherche sur ce sujet une méthode combinée qui permet une appréciation de la résistance de béton in situ en relation avec l'indice sclérométrique et la vitesse de son. Indépendamment du type d'essai non destructif utilisé, les données proportionnées et fiables de corrélation avec des données standard de la résistance à la compression en 28 jours sont habituellement nécessaires pour évaluer l'exactitude de la méthode non destructive. En outre, la corrélation avec des résistances à la compression en place employant des carottes de un ou deux endroits peut fournir des conseils en interprétant des résultats d'essai non destructifs; ceux-ci peuvent alors être employés pour examiner de plus grandes parties de la structure. Le soin devrait être pris pour considérer l'influence des tailles et des endroits variables des éléments structuraux. Cette solution est particulièrement avantageuse lorsque des variations des propriétés du béton conduisent à des résultats contradictoires.

## Chapitre 8

### Progrès récents dans la technologie du béton

#### 8.1. Introduction

Le béton a connu ses dernières décennies un développement considérable. Nous allons dans les paragraphes suivants, présenter des aperçus sur 3 bétons innovants à savoir, les bétons auto-plaçant (BAP), les bétons à haute et à très haute performance (BHP et BHTP) et les bétons de fibres à ultra hautes performances (BFUP).

#### 8.2. Les bétons auto plaçant (BAP)

##### 8.2.1. Définition

Les bétons auto-plaçant (ou BAP) sont des bétons qui s'écoulent et se compactent par seul effet gravitaire, capable de remplir entièrement le coffrage avec son ferrailage, ses gaines, réservation tout en conservant leur homogénéités. Les BAP sont donc très fluides, mis en place sans vibration : le compactage se faisant uniquement par le poids du béton, et conférant à la structure une qualité au moins équivalente à celle correspondant aux bétons classiques mis en œuvre par vibration. Ainsi la technologie des BAP se veut innovante et remplacera à terme la technique classique des bétons vibrés dans bon nombre d'applications.

Le béton auto plaçant a été mis au point au Japon dans les années 1980. Depuis cette technique n'a cessée de se développer notamment en Europe et aux Etats-Unis. Ces bétons se distinguent des bétons ordinaires par leurs propriétés à l'état frais, notamment par :

- Une très grande maniabilité, évaluer à l'aide du cône d'Abram's (avec cependant une démarche différentes).
- Une grande stabilité vis-à-vis de la ségrégation (essai de stabilité au tamis) et du ressuage (essai de ressuage) ;
- Une grande maniabilité en milieu confiné (essai de boîte en L).

Ainsi ces propriétés doivent être étudiées et évaluer avec beaucoup de soins, dans la mesure où ils représentent les principales caractéristiques des BAP.

##### 8.2.2. Historique du BAP

Le premier prototype d'un tel béton fut développé en 1988 par le professeur OKAMURA de l'université de Kōchi au Japon. Sa première utilisation pratique intervient deux années plus tard pour la construction d'un pont. Cette découverte en matière technologique du béton suscita un énorme intérêt au niveau mondial. A la fin des années 90 on vit apparaître les premières applications en Suède, en France, aux Pays bas et en Suisse. Depuis son utilisation ne cesse de croître.

8.2.3. Formulation des BAP

Des méthodes sont proposées pour formuler les BAP. Nous citerons simplement les particularités, d'un point de vue composition, de ces bétons :

- Un volume de pâte élevé

Les frottements entre les granulats limitent l'étalement au remplissage des bétons. C'est pourquoi, les bétons auto-plaçant contiennent un volume de pâte (ciment + additions + eau efficace + air) important, typiquement de 330 à 400 litres/m<sup>3</sup>, dont le rôle est d'écarter les granulats les uns des autres.

- Une quantité de fines (< 80µm) élevée

Pour leur assurer une maniabilité suffisante tout en limitant les risques de ségrégation et de ressuage, les bétons auto-plaçant contiennent une quantité de fines (de l'ordre de 500kg/m<sup>3</sup>) supérieure à celle des bétons conventionnels. Toutefois, pour éviter des problèmes d'élévation excessive de la température lors de l'hydratation, le liant est souvent un composé binaire voire ternaire : ciment portland mélangé avec des cendres volantes, du laitier de haut fourneau et des fillers calcaires.

- L'utilisation de super plastifiants

Les bétons auto-plaçant contiennent des super-plastifiants permettant d'obtenir la fluidité souhaitée. Ils peuvent également contenir des agents de viscosité (utilisés pour améliorer la cohésion du béton).

- Un faible volume de gravillon

Il faut limiter le volume des gravillons, car ils sont la cause de blocage du béton dans les zones confinées. Par ailleurs la présence de gravillons permet d'augmenter la compacité du squelette granulaire du béton est donc de limiter la quantité de liant nécessaire pour obtenir l'ouvrabilité et la résistance souhaitée. En général, le rapport (gravillon/sable) à adopter pour les bétons auto-plaçant est de l'ordre de 1. Enfin la taille du plus gros granulats varie de 10 à 20mm. Enfin, la fabrication des bétons auto-plaçant nécessite d'avantages de soins qu'un béton ordinaire.

Ainsi en terme de constituants, la aussi on constate une différence entre le béton traditionnel (BO) et le BAP, en effet celui contient plus comme le montre la figure suivante :

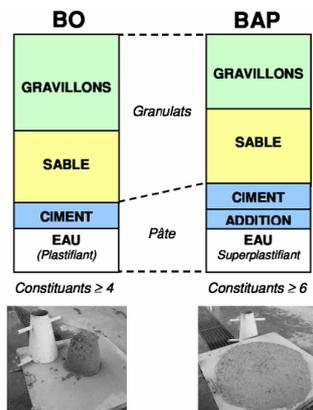


Fig.8.1. Composition d'un béton ordinaire (BO) et d'un BAP. Aspect à l'état frais d'un BO plastique et d'un BAP.

#### 8.2.4. Mise en œuvre des bétons auto-plaçant

Il existe plusieurs méthodes permettant de mettre en œuvre les bétons auto-plaçant :

- Faire couler le béton par le haut du coffrage (à l'instar des bétons traditionnels), cependant cette technique présente un inconvénient majeur : elle aggrave le phénomène de la ségrégation du béton frais, et bien que les bétons auto-plaçant soient moins sensibles que les bétons ordinaires, il est fortement conseillé de limiter au maximum la hauteur de chute du béton. La RILEM préconise une hauteur maximale de chute du béton à 5 mètres.
- Une seconde méthode, couramment utilisée pour le coulage des pieux de fondations, consiste à introduire un tube plongeur par lequel arrive le béton. Cette technique est très recommandée pour les éléments verticaux (les poteaux) et présente l'avantage d'éviter la chute du béton et donc de réduire considérablement les phénomènes de ségrégation.
- La troisième méthode, très utilisée actuellement en Algérie, consiste à placer le béton par le biais d'une pompe : c'est une technique qui évite d'une part les phénomènes de ségrégation, et d'autre part permet de couler le béton sur de grandes profondeurs. Enfin cette technique permet la réduction du nombre d'ouvriers intervenants dans l'opération de mise en place du béton, d'où gain économique non négligeable.



**Fig.8.2.** Coulage d'une dalle en BAP.



**Fig.8.3.** Exemples de mise en œuvre des BAP.

L'innovation principale BAP réside essentiellement dans la phase du compactage, dont l'élimination présente plusieurs avantages dont notamment :

- ✓ Diminution du bruit (pour la mise en place traditionnel par vibration, nous avons recours à des compresseurs qui fonctionnent avec des sons sonores très élevés qui portent préjudice aux ouvriers et aux riverains)
- ✓ rendements améliorés et exécution plus rapide
- ✓ liberté accrue des formes de coffrage
- ✓ facilité de bétonnage d'éléments exigus
- ✓ qualité accrue des surfaces de béton
- ✓ réduction/suppression des travaux de ragréage
- ✓ facilité de bétonnage d'éléments avec une armature dense ou importante
- ✓ remplissage de parties difficilement accessibles
- ✓ diminution de la pénibilité du travail et suppression de l'apparition du syndrome du vibreur.



**Fig.8.4.** *Eléments préfabriqués en BAP à haute résistance.*

#### 8.2.5. *Spécifications des BAP à l'état frais*

Elles comprennent les 4 essais suivants :

- 1) la mobilité et la capacité de remplissage : Etalement au cône d'Abrams SF
- 2) la viscosité apparente : Viscosité VS (t500) ou VF (entonnoir en V)
- 3) l'aptitude à l'écoulement : Aptitude à l'écoulement PL (boite en L)
- 4) la résistance à la ségrégation : Stabilité au tamis SR.

Il convient de sélectionner les caractéristiques du béton auto plaçant appropriées à une application donnée à partir de ces paramètres, puis de les spécifier par classe ou valeur cible.

#### 8.2.6. *Essais sur les bétons auto – plaçant à l'état frais*

La norme NF EN 206-9 s'applique au BAP. Elle est destinée pour les bâtiments et ouvrages de Génie Civil, et elle définit les exigences relatives suivantes :

- aux structures coulées en place

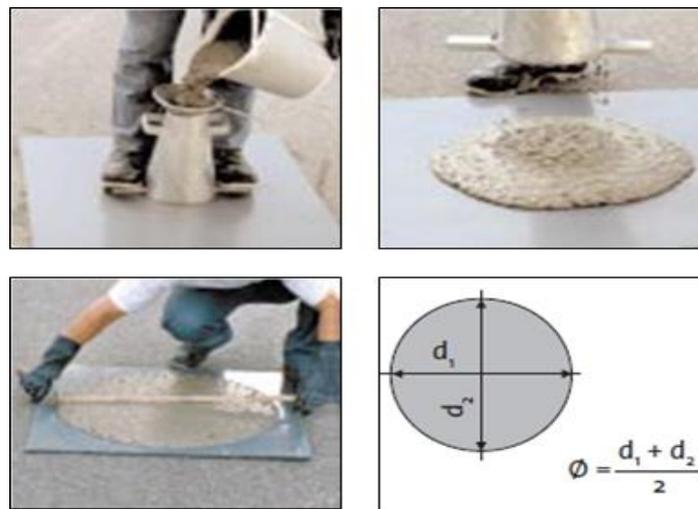
- aux structures préfabriquées
- aux constituants du BAP
- aux propriétés du BAP à l'état frais et à l'état durci
- aux procédures de contrôle de la production
- aux critères de conformité.

#### 8.2.6.1. Mesure de l'ouvrabilité

C'est l'une des plus importantes propriétés des bétons auto-plaçant. Elle permet de tester l'aptitude du béton à se mettre en place sans aucune vibration. Pour évaluer cette aptitude, on utilise le traditionnel Slump-test, sauf au lieu de mesurer le tassement vertical, on mesurera cette fois l'étalement horizontal.

L'essai complet est décrit ci-après:

- Humidifier la surface de la plaque
- Placer le cône au centre de la plaque
- Remplir le cône à l'aide d'un entonnoir, et araser (si nécessaire)
- Soulever le cône verticalement
- Mesurer l'étalement moyen du béton à 1cm près.



**Fig.8.5.** Mesure de l'ouvrabilité pour les bétons auto-plaçant.

**Tableau 8.1.** Classe d'étalement au cône.

Classe	Etalement en (mm)
SF1	550 à 650
SF2	660 à 750
SF3	760 à 850

### 8.2.6.2. Essai de stabilité au tamis

Cet essai vise à étudier le risque de ségrégation des bétons auto-plaçant. Ce phénomène constitue le principal risque pour ce type de béton dans la mesure où le béton se doit être très stable.

Matériel utilisé

- Sceau de 10 litres de volume, équipé d'un couvercle
- Tamis 5mm
- Fond plein
- Balance de précision.

Mode opératoire

- L'échantillon à tester et, après malaxage, versé directement dans le sceau. Le temps entre l'opération de malaxage est de remplissage ne doit en aucun cas dépasser les 30 secondes
- Peser le fond et le tamis à vide
- Poser le tamis + le fond plein sur la balance : faire la tare
- Verser sur le tamis, et à une distance de 50cm (+ 5cm), 4800g de béton
- Attendre deux minutes
- Faire la tare et peser le fond avec la laitance.



**Fig.8.6.** Essai de stabilité au tamis.

Nous avons la relation :

$$P_{\text{laitance}} = P_{\text{fond+laitance}} - P_{\text{fond}} \quad (8 - 1)$$

Calculer le pourcentage en poids par rapport au poids de l'échantillon :

$$\pi = \left( \frac{P_{\text{laitance}}}{P_{\text{échantillon}}} \right) 100 \quad (8 - 2)$$

En fonction du résultat trouvé, on classe les bétons selon le tableau 8.2.

**Tableau 8.2.** Classes de résistance à la ségrégation.

Classes de résistance à la ségrégation	Pourcentage de laitance
SR1	$\leq 20$
SR2	$\leq 15$

Spécifications sur l'essai de ségrégation au tamis:

La valeur de stabilité au tamis, qui décrit la résistance à la ségrégation, est fondamentale pour l'homogénéité et la qualité in situ du BAP.

- Classe SR1 est généralement applicable aux dalles de faible épaisseur et peut également être utilisé dans les applications verticales avec une distance maximale de cheminement de 5 mètres et un intervalle d'écoulement supérieur à 80mm.
- Classe SR2 est mieux adapté dans les applications verticales si la distance de cheminement est supérieure à 5 mètres et si l'intervalle d'écoulement est supérieur à 80mm.

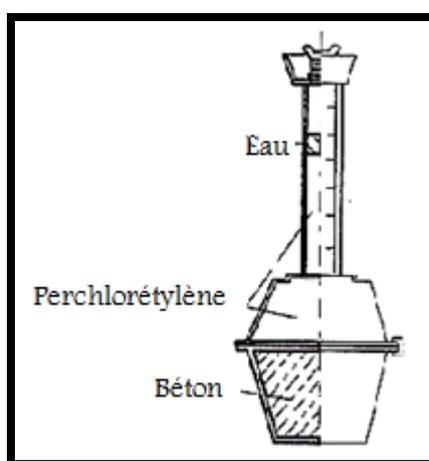
Elle convient également pour les applications verticales avec un intervalle d'écoulement maximum de 80mm, si la hauteur de chute du béton est inférieure à 5 mètres.

#### 8.2.6.3. Essai de ressuage :

Le risque de ressuage se trouve accrue dans les bétons auto-plaçant. Pour en évaluer le risque, un essai a été proposé par Kaplan dont nous reprenons ci-après la démarche.

- Matériel nécessaire

- Aéromètre volumétrique à béton ;
- Un entonnoir et du papier filtre ;
- Du perchloréthylène : il s'agit d'un liquide ayant une densité de 1,59.

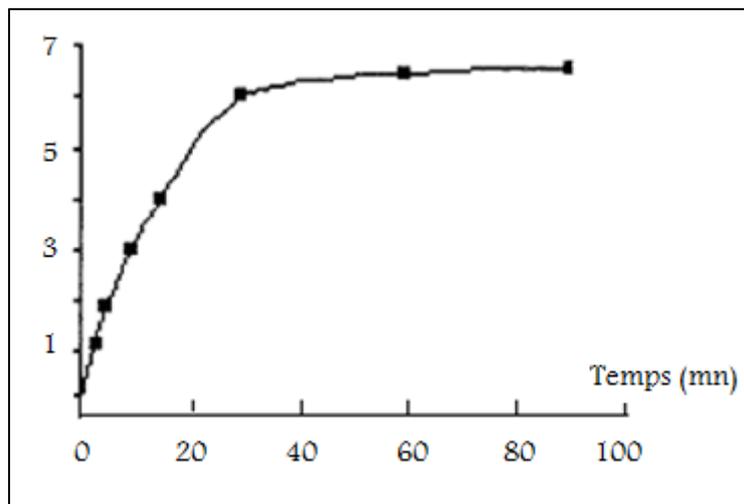


**Fig.8.7.** Aéromètre à béton.

- Mode opératoire

- Humidifier les parois de l'aéromètre ;
- Remplir le moule ;
- Talocher la surface ;
- Nettoyer les bords du moule ;
- Poser le moule sur le plateau ;
- Mettre en place la partie supérieure de l'appareil et serrer la vis ;
- Remplir l'appareil avec du perchloréthylène jusqu'au niveau «zéro» ;
- Fermer toutes les vannes ;
- Noter le niveau total et le niveau d'eau de ressuage surnageant le perchloréthylène à : 3, 5, 10, 15, 30 et 60 minutes puis la stabilisation ;
- Ouvrir les vannes et vider le perchloréthylène sur le plateau ;
- Vider et nettoyer l'appareil ;
- Récupérer le perchloréthylène dans un récipient en le filtrant avec du papier filtre.

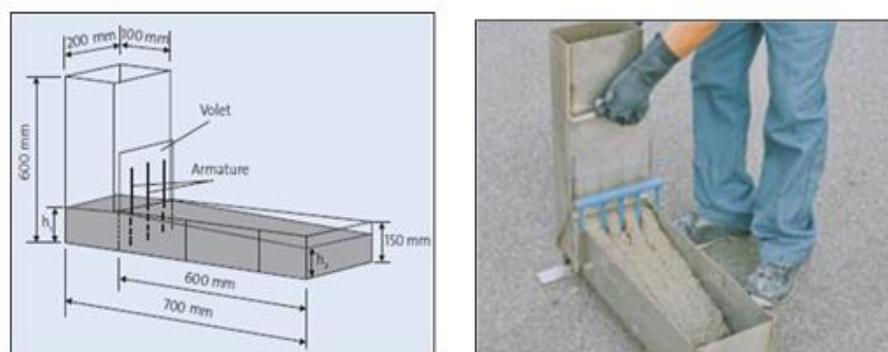
Les résultats du ressuage en fonction du temps sont reportés sur un graphique, dont l'allure générale est reproduite à la figure suivante :



**Fig.8.8.** Courbe typique du ressuage.

#### 8.2.6.3. Essai de boîte en L

Cet essai étudie la mobilité du béton auto-plaçant en milieu confiné, présence d'armatures, cette présence peut gêner la mise en place du béton en bloquant le passage des granulats.



**Fig.8.9.** Boite en L.

**- Mode opératoire**

- L’essai utilise la boîte en L, et consiste à faire les procédures suivantes :
- Remplir la partie verticale de béton (soit un volume d’environ 13 litres) ;
- Araser et laisser reposer le béton pendant une minute ;
- Enlever la trappe et laisser s’écouler le béton dans la partie horizontale de la boîte à travers le ferrailage ;
- Mesurer, lorsqu’il n’y a plus d’écoulement du béton, les hauteurs ( $H_1$ ) et ( $H_2$ )

Le résultat s’exprime sous la forme :

$$\left(\frac{H_1}{H_2}\right) \tag{8-3}$$

**Tableau 8.3.** Classe en fonction du taux de remplissage.

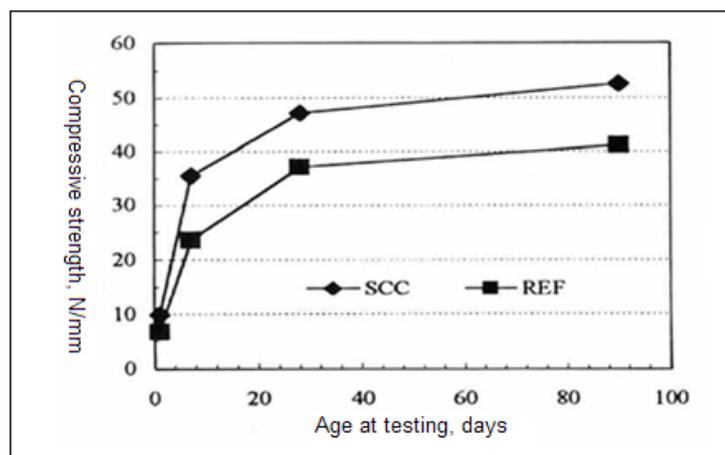
Classe	Taux de remplissage
PL1	$\geq 0,8$ avec 2 armatures
PL2	$\geq 0,8$ avec 2 armatures

*8.2.7. Propriétés du béton durci*

Les particularités de composition des bétons auto-plaçant conduisent à étudier les différentes propriétés mécaniques de ces bétons et plus particulièrement les déformations instantanées et différées, supposées différentes de celles des bétons vibrés. On limitera l’étude uniquement aux propriétés mécaniques.

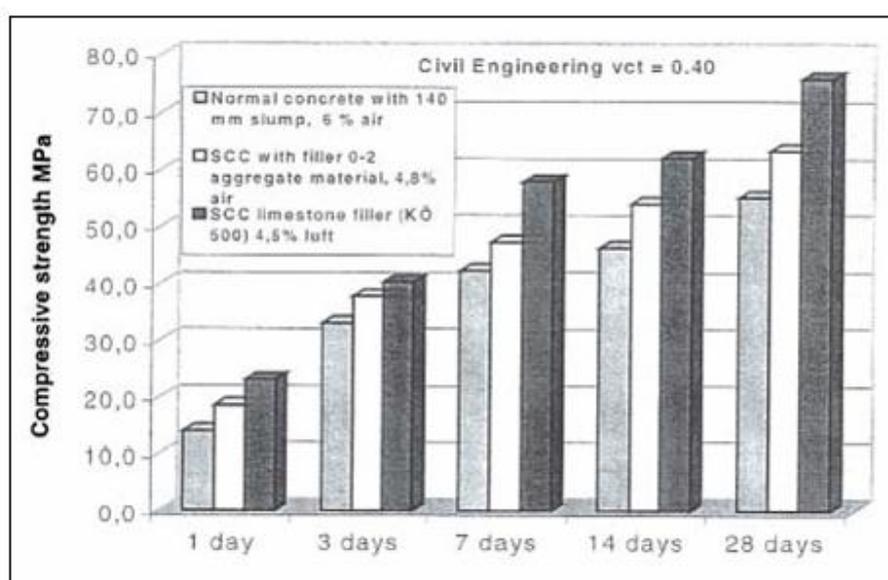
L’utilisation de fillers dans une formulation de béton génère une accélération de sa résistance mécanique aux jeunes âges. Les particules fines du filler, lorsqu’elles sont bien dé floclées par les super plastifiants, favorisent l’hydratation du ciment, principalement par un effet physique, et conduisent à une matrice cimentaire dont la structure est plus dense. Ces effets ont une influence sensible sur la résistance mécanique jusqu’à 28 jours puis deviennent moins significatifs par la suite.

Différentes données ont été publiées sur l'évolution de la résistance mécanique des BAP contenant des fillers calcaires comparée à celle des bétons vibrés et soutiennent les affirmations précédentes.



**Figure 8.10.** Evolution de la résistance mécanique d'un BAP (SCC) et d'un BV (REF) correspondant.

De plus, certains auteurs affirment que cette augmentation de résistance est d'autant plus marquée pour les BAP que la finesse du filler (exprimée en valeur Blaine) est grande. Cet effet tend lui aussi à s'annuler au-delà de 28 jours.



**Fig.8.11.** Résistance mécanique d'un béton vibré et de deux BAP (de formulation différente).

Le dosage plus ou moins important en adjuvants dans les formulations de BAP peut aussi avoir une influence sur l'évolution de la résistance mécanique du béton. Ainsi, l'introduction d'un agent de viscosité peut diminuer sensiblement la résistance mécanique d'un BAP aux jeunes âges. De même, certains supers plastifiants utilisés pour contrôler la fluidité des formulations ont pour effets secondaires de retarder le temps de prise et d'augmenter le développement de la résistance mécanique.

Etant donné la défloculation du liant hydraulique qu'ils engendrent, leur dosage important dans les BAP conduit à considérer que ceux-ci seront plus résistants que des bétons vibrés supposés similaires au départ.

#### 8.2.8. Exemple de compositions types pour BAP

**Tableau 8.4.** Exemples de compositions types pour BAP

Constituants de la recette pour 1 m <sup>3</sup> de béton	Masse volumique [kg/l]	Béton vibré			Béton SCC			Béton SCC avec Flextrema		
		[%]	[kg]	[l]	[%]	[kg]	[l]	[%]	[kg]	[l]
Ciment	Flextrema	2,93	300	98		380	124		440	150
	Fluvia	3,06								
Addition	Cendre volante	2,24				70	31			
Adjuvants	Fluidifiant	1,10			1,6	6,08	5,53			
	Stabilisateur	1,05			0,2	0,76	0,72			
Granulats	Sable 0/4	2,68	687	256	50	849	317	50	864	322
	Grawler 4/8	2,70	95	36	20	339	127	20	346	129
	Grawler 8/16	2,70	458	171	30	509	190	30	518	193
	Grawler 16/32	2,70	668	249						
Masse totale			1908			1697			1728	
Eau		1,00	170	170		185	185		185	185
Air			2	20	2		20	2		20
Rapport E/C <sub>ns</sub>			0,57			0,47			0,42	
Classe de consistance			F3			SCC (F6)			SCC (F6)	
Volume de pâte de ciment				268			346			335

### 8.3. Les bétons à hautes performances (BHP)

#### 8.3.1. Définition des BHP

Les Bétons à Hautes Performances (BHP), sont des matériaux à très haute compacité et haute résistance. Ils présentent une résistance caractéristique à la compression à 28 jours ( $f_{c28}$ ) supérieur à 50MPa pour les bétons à Hautes Performances, plus de 100MPa pour les bétons à très hautes performances, voire plus (150 à 200MPa pour des bétons fibrés à ultra hautes performances, BFUP). Hautes performances signifient aussi facilité de mise en œuvre et souplesse d'adaptation aux contraintes d'exécution des ouvrages.

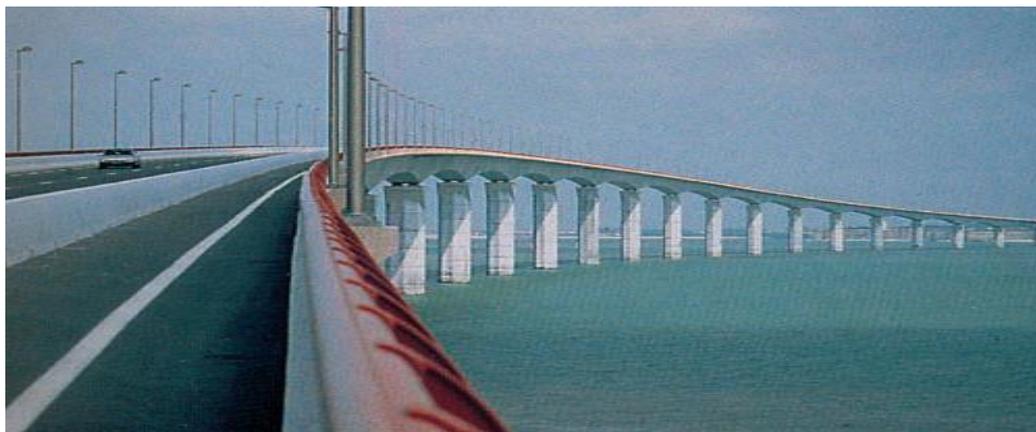
Les Bétons à Hautes Performances (BHP) se caractérisent par :

Les BHP présentent une structure très dense, une faible porosité et une très bonne résistance à la pénétration d'agents agressifs. Ils permettent d'alléger le poids mort des structures, d'augmenter les cadences de pose des éléments préfabriqués et celles de décoffrage des éléments coulés en place, et de minimiser l'entretien. Cependant étant relativement récent, ils nécessitent une étude très fine de la formulation, un contrôle plus strict au niveau de la réalisation et une main d'œuvre plus qualifiée (à l'instar du béton précontraint par exemple). Leur coût est aussi plus élevé : de l'ordre de 15 à 20% pour passer de 35 à 60MPa, selon une estimation française.

Mais les gains de résistance ne sont pas les seuls avantages de ces bétons qui tirent leurs propriétés de leur microstructure très dense, d'une forte réduction de leur porosité et d'un réseau capillaire non connecté. Ces bétons sont, en fait, des matériaux à très haute compacité. Les BHP sont également, du fait de leur porosité extrêmement réduite, plus résistants aux agents agressifs et, de façon générale, présentent une durabilité accrue. Ils permettent d'optimiser les structures, de réaliser des ouvrages soumis à des contraintes élevées ou subissant un environnement sévère (climat rigoureux, agressions marines, effets du gel, etc.).

#### **Nota**

La norme française NF EN 206-1 BÉTONS "spécifications, performances, production et conformité" définit le BETON À HAUTE RÉSISTANCE : "béton appartenant à une classe de résistance à la compression supérieure à C 50/60, s'agissant de béton de masse volumique normale ou de béton lourd, et supérieure à LC 50/55, s'agissant de béton léger".



**Fig.8.12.** Un pont réalisé en béton à haute performance.

### 8.3.2. Historique des BHP

Les bétons à hautes performances ont vu le jour au début des années 1960 dans la région de Chicago (USA). Ils ont été utilisés en quantités non négligeables dans plusieurs structures majeures.

Exemples d'ouvrages réalisés en BHP à Chicago :

- ✚ Lake Point Tower 1965 ( $f_c = 53\text{MPa}$ ).
- ✚ River Plaza 1976 ( $f_c = 77\text{MPa}$ ).

### 8.3.3. Classification des BHP

Les bétons sont classés, en fonction de la résistance caractéristique, en trois catégories :

- ✚ Les bétons hautes performances (BHP).
- ✚ Les bétons très hautes performances (BTHP).
- ✚ Les bétons exceptionnels (BE).

Le tableau 8.4 présente ce classement.

**Tableau 8.5.** Classification des bétons à hautes performances.

	BHP	BTHP	BE
Résistance à 28 jours (MPa)	50 ÷ 100	100 ÷ 150	> 150
Emploi	Très fréquemment en bâtiment	Poutres de grande portée ; Immeubles de grande hauteur.	Réservée actuellement aux laboratoires

#### 8.3.4. Composition des BHP

Pour pouvoir atteindre ces résistances, il est impératif de d'étudier très minutieusement la composition du béton. Les indications suivantes permettent d'avoir une idée sur le choix des constituants :

##### 8.3.4.1. Choix du ciment

Utiliser des ciments à grande résistance (classe 42,5 ou 52,5), ou mieux encore des ciments à grande résistance au jeune âge (classe 42,5R et 52,5R), le dosage varie généralement de 400 à plus de 600kg/m<sup>3</sup>.

##### 8.3.4.2. Choix des granulats (phase inerte)

Le choix des agrégats est très important, comme nous l'avons déjà signalé, il s'agit de bétons de très grande résistance, les granulats vont donc être fortement sollicités, d'où la recherche de granulats issus de roches très dur (granite, calcaires durs, quartzites, porphyre); rugueux (granulats concassés) : cette rugosité contribuera à l'amélioration de l'adhérence liant – granulats; de taille maximale de 10 à 16mm. Le rapport (sable/gravier) doit être plus faible que d'habitude. Le sable doit être choisi avec soin. Parmi les matériaux les plus conseillés on trouve les silico-calcaires.

##### 8.3.4.3. Les ultrafines (principalement de la fumée de silice)

La fumée de silice est un produit minéral amorphe obtenu essentiellement lors de la fabrication du silicium et de ses alliages. Broyée, la fumée de silice présente une étendue granulaire très fine et qui s'étend de  $[0,05 \div 0,5]\mu\text{m}$  (contre une étendue moyenne de  $[0,5 \div 150]\mu\text{m}$  pour un ciment courant). Cette grande finesse leur permet, lors du malaxage du béton, de s'insérer entre les grains de ciment, ce qui diminue le dosage en eau. Enfin en s'hydratant les fumées de silice entraîne la formation d'hydrates contribuant ainsi à une augmentation des résistances mécaniques. Leur couleur est le plus souvent gris clair.

##### 8.3.4.4. Eau de gâchage

Le rapport  $((\text{eau}/\text{ciment}) = [0,26 \div 0,35])$ , donc nettement plus faible que pour les bétons courants. Enfin le recours à des super-fluidifiants est pratiquement systématique.

##### 8.3.4.5. Les adjuvants

C'est grâce à l'élaboration d'adjuvants spécifiques tels que les super plastifiants et les réducteurs d'eaux que les bétons hautes performances ont vu le jour. Leur choix dans l'élaboration de composition de BHP est capital.

### 8.3.5. Contrôle des BHP

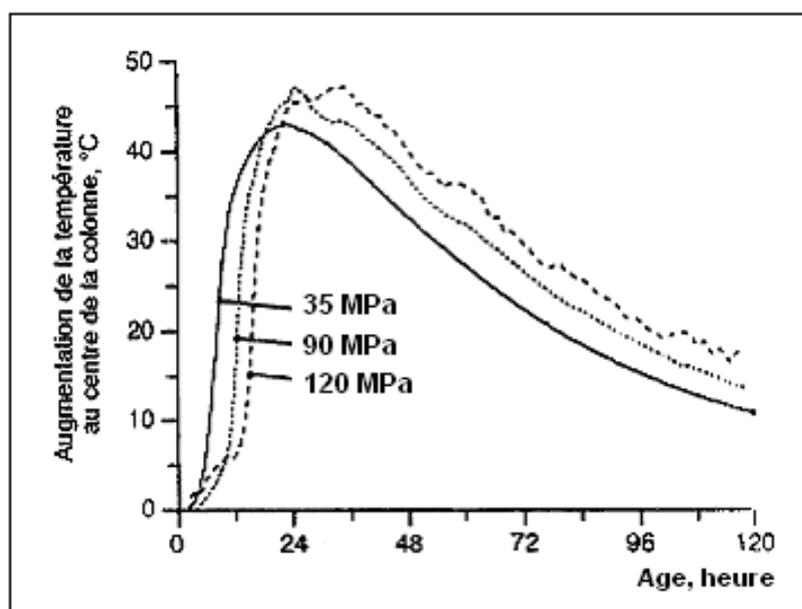
Les BHP sont soumis aux mêmes types d'essais que les bétons traditionnels dans le cadre de leur conformité à la norme NF EN 206-1, par exemple :

- ✚ Consistance mesurée au cône d'Abrams,
- ✚ Résistance à la compression.

**Nota :** Le malaxage d'un BHP doit généralement être prolongé par rapport à celui d'un béton courant. Le BHP requiert un niveau de qualité de fabrication important compte tenu de la sensibilité de son comportement aux variations de proportion des constituants, en particulier du dosage en eau.

### 8.3.6. Augmentation de chaleur des BHP

Ainsi souvent, et bien que cela peut paraître surprenant, les bétons hautes performances présentent un dégagement de chaleur similaire à celui des bétons ordinaires. Ce fait est confirmé par les travaux de Cook et al, qui ont analysés l'élévation de la température au cœur de trois colonnes identiques (dimensions (1x1x2.4) m) coulés à partir de trois bétons dont la résistance à la compression était de 30, 80 et 120MPa. La figure suivante montre l'augmentation de la température au centre de la colonne en fonction de l'âge du béton, exprimé en heures.



**Fig.8.13.** Augmentation de la température en fonction de l'âge du béton, exprimé en heures.

Ainsi la température maximale atteinte par le béton courant est de l'ordre de 43°C, contre 46°C environ pour les deux bétons hautes performances, l'écart est donc insignifiant.

### 8.3.7. Propriétés des BHP

L'incorporation d'adjuvants, d'ultrafines, le choix judicieux du dosage et de la nature du liant et des granulats permettent de conférer au béton de très hautes performances (et non pas uniquement de très hautes résistances):

- Résistance à la compression : Les augmentations de la résistance à la compression se manifestent dès le jeune âge : on atteint aisément les 15MPa au bout de 24 heures ; 40MPa après une semaine et plus de 60MPa après 28 jours.
- Module d'élasticité : Le module d'élasticité des BHP est supérieur à celui des bétons traditionnels.
- Retrait : La différence essentielle au béton traditionnel et un béton haute performance, est que le béton traditionnel ne développe pratiquement pas ou peu de retrait endogène, qu'il ait subi ou pas une maturation à l'eau. Le tableau suivant présente les différences essentielles entre le retrait des bétons ordinaires et des bétons à hautes performances :

**Tableau 8.6.** Différences essentielles entre le retrait d'un béton ordinaire et celui d'un BHP.

Type de Retrait	Béton ordinaire	BHP
Endogène	Peu ou pas du tout	Très élevé
Séchage	Très élevé	faible

- Fluage : Les déformations de fluage pour un béton traditionnel sont de l'ordre du double des déformations instantanées. Pour les bétons à hautes performances elles varient entre 1 et 1,5 pour un béton de 60MPa de classe de résistance. Ainsi le fluage des bétons à hautes performances est plus faible en général.
- Imperméabilité : Leur faible porosité capillaire confère aux BHP une très faible perméabilité.
- Résistance aux agents agressifs : La faible perméabilité des BHP leur confère une bonne résistance à la pénétration et au transfert dans la masse du béton des agents agressifs en phase gazeuse ou liquide (eaux de mer, eaux sulfatées, solutions acides, dioxyde de carbone, etc.).
- Tenue aux attaques gel/dégel : Les BHP, correctement formulés, résistent aux cycles gel/dégel grâce à leur forte compacité et à leur résistance mécanique élevée.
- Durabilité: Elle est améliorée du fait de l'abaissement de la porosité et de la perméabilité. La progression de la carbonatation en profondeur est réduite, ce qui assure une meilleure protection des armatures. On constate également une amélioration palpable aux agressions chimiques, qui se traduit par un bon comportement en milieu marin en présence d'eaux agressives.

### 8.3.8. Domaines d'utilisation

L'apparition des bétons haute performance sur le marché permet d'ouvrir de nouvelles perspectives pour le matériau béton, ainsi:

- ✚ On peut concevoir des poteaux avec des sections convenables pour les immeubles de grande hauteur (IGH).
- ✚ Augmenter considérablement la portée des ponts.
- ✚ Construire des immeubles plus durables, plus économiques et surtout plus écologiques.
- ✚ Des pièces préfabriquées très courtes, (voussoirs pour pont, etc.) dont le délai de décoffrage est très court;
- ✚ Des ouvrages en milieu marin (digues, plates formes pétrolières,).
- ✚ Les ouvrages de génie nucléaire (centrale nucléaire).

8.3.9. Exemples de compositions de BHP

8.3.9.1. Exemple d'ouvrage réalisé en BHP : L'édifice Scotia Plaza

L'édifice Scotia Plaza est un gratte ciel de 68 étages, de 275m de hauteur construit en 1986 et 1987 à Toronto (Canada). Il a été construit entièrement en BHP avec une résistance caractéristique de 70MPa. La composition du béton utilisé est reportée sur le tableau suivant :

**Tableau 8.7.** Composition du béton utilisé pour la réalisation de Scotia Plaza

Matériaux cimentaires				Granulats		Adjuvants	
Eau	Ciment	Fumée de silice	Laitier	Gros	Fin	Réducteur d'eau	Super-plastifiant
145	315	36	135	1130	745	0.835	6.5
Kg/m <sup>3</sup>						l/m <sup>3</sup>	

**Tableau 8.8.** Résistances du béton utilisé pour la réalisation de Scotia Plaza

Age (jour)	2	7	28	56	91
f <sub>c</sub> (MPa)	61.8	67.1	83.7	89.5	93.6
f <sub>t</sub> (MPa)	5.5	4.7	6.1	6.1	6.8

8.3.9.2. Exemple d'ouvrage réalisé en BHP : Cas de deux 2 ponts

**Tableau 8.9.** Composition utilisé pour fabrication du pont de Joigny en France.

B60 Sans fumée de silice	
Ciment CEM1 52.5	450kg
Granulat (6/20)	1027kg
Sable (0/4)	648kg
Sablon	105kg
Eau	160 litres
Super plastifiant	11,25kg
Retardateur	4.5kg

**Tableau 8.10.** Composition utilisé pour fabrication du pont de Jonche

(B80 avec fumée de silice)	
Ciment CEM1 52.5	420kg
Fumée de silice	35kg
Gravillon (6/10)	250kg
Gravillon (10/14)	730kg
Sable (0/4)	660kg
Sablon	140kg
Eau	152litres
Super plastifiant	7.3kg

## 8.3.9.3. Autres Exemple d'ouvrage réalisé en BHP :

- ✚ South Wacker Drive (Chicago 1989)      ► 82.7MPa
- ✚ Trump Palace (New York 1991)      ► 82.7MPa
- ✚ Dain Bosworth tower (Minneapolis 1991)      ► 96.5MPa.

## Bibliographie et références

1. ARNOULD. M., VIRLOGEUX. M., Granulats et bétons légers, Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1986.
2. BARON.J., SAUTEREY.R., Le béton hydraulique, Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1982.
3. BERNARD.F., Eléments de construction, Editions Dunod, 1971.
4. CHERAIT.Y., NAFA.Z., Eléments de matériaux de construction, Editions Direction des publications universitaires de Guelma DPUG, 2007.
5. DIDIER. D., Précis de Chantier : matériel et matériaux, mise en œuvre, normalisation, Editions Nathan.
6. DREUX. D., Nouveau guide du béton, Editions Eyrolles.
7. FERET. R., Compacité des mortiers hydrauliques, Annales des ponts et chaussées, Numéro 7, 1982.
8. LANCHON. R., Cours de laboratoire, Tome I, Edition Desforges, 1983.
9. OIIVIER. E., Technologie des matériaux de construction, Tome I, Entreprise moderne d'Édition, 1973.
10. KOMAR. A., Matériaux et éléments de construction, Edition Mir, 1978.
11. KHELAFI. H., MOKHTARI. AZ., KARAM.M., Etude expérimentale sur les propriétés de la brique silico-calcaire, Revue Algérie Equipement, Avril 2000.
12. MELBOUCI. J., SLIINKI., Influence de certains adjuvants sur les propriétés du béton de terre stabilisée, Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics, numéro 500, Janvier.
13. MORSY. M.S., AISAYED. S.H., SALLOUM. Y.A., Development of eco-friendly binder using metakaolin-fly ash–lime-anhydrous gypsum. Construction and Building Materials. 35, 2012, 772–777. DOI:[10.1016/j.conbuildmat.2012.04.142](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.142)
14. NIGRI. G., Nouvelle élaboration d'un liant hydraulique, Thèse de doctorat, Université 8 Mai 1945, Guelma, Algérie, 2018.
15. NIGRI. G., Etude de l'influence des ajouts minéraux sur la qualité et les propriétés du ciment. Mémoire de Magister, Université 8 Mai 1945, Guelma, Algérie, 2005.
16. NOVERRAZ. M., La technologie du bâtiment, Le gros œuvre, Editions Eyrolles.
17. PIERRE CLAUDE. A., Bétons Haute Performance. Édition Eyrolles, 2001.
18. TAGHIT A., <http://www.civil.usherbrooke.ca/cours/gci712/chap7-modifi.ppt> , 2006.