



Faculté : TECHNOLOGIE  
Département : GENIE CIVIL  
Domaine : SCIENCES ET TECHNOLOGIES  
Filière : GENIE CIVIL  
Spécialité : MATERIAUX EN GENIE CIVIL

## Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème:

**FORMULATION D'UN BETON PRET A L'EMPLOI POMPABLE  
: EXIGENCES TECHNIQUES ET NORMATIVES**

Présenté par : *Ouledmeriem Fateh*

Encadrant : *Behim Mourad* Grade : *Pr.* Université *Badji Mokhtar*

### Jury de Soutenance :

Khelifi Walid	MCA	<i>Université Badji Mokhtar - Annaba</i>	Président
Behim Mourad	Pr.	<i>Université Badji Mokhtar - Annaba</i>	Encadrant
Kebaili Bachir	MCA	<i>Université Badji Mokhtar - Annaba</i>	Co-encadrant
Ali-Boucetta Tahar	MCA	<i>Université Badji Mokhtar - Annaba</i>	Examineur

Année Universitaire : 2022/2023

## *Remerciements*

*Tout d'abord, je remercie Dieu, le Tout Puissant, de m'avoir donné la volonté et le courage afin d'arriver à la finalité de ce modeste travail.*

*Un très grand Merci à toute ma famille, et particulièrement mes parents **Ouled Meriem Abd EL Hafid ET Lahlah Djennet**. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma profonde reconnaissance pour le soutien qu'ils m'ont apporté en toute circonstance, ainsi que pour leur patience et leur amour qui sont la ressource de ma réussite et qui m'ont toujours soutenu et encouragé dans mes différents choix*

*J'adresse mes sincères remerciements aux responsables de la SARL Diabi Ali et Mr. Malik GHAZI de m'avoir accueilli en stage dans la centrale à béton*

*Je voudrais exprimer toute ma reconnaissance à mon directeur de mémoire, Professeur **Behim Mourad** qui a supervisé mon encadrement du début à la fin, et pour sa grande disponibilité, et je prie Dieu qu'il soit couvert par la santé et le bien-être*

*Je remercie également mon Coencadreur Docteur **Kebaili Bachir** qui m'a apporté son soutien, son aide et ses conseils au cours de ce travail*

*Je remercie l'ensemble des membres du jury d'avoir accepté d'examiner mon travail : Docteur **Ali Boucetta Tahar** et Docteur **Khelifi Walid**.*

*Je remercie tous les enseignants qui ont assuré ma formation en Master Matériaux de Génie Civil*

*Je tiens également à remercier Messieurs KHOUALDI Khair-Eddine et AKROUM Kamel ingénieurs de laboratoire au département de génie civil pour leurs aides durant les manipulations, pour leur disponibilité, leur conseil et leur assistance ainsi que les nombreuses explications qu'ils nous ont patiemment données.*

*Merci à toute l'équipe du département de Génie Civil : enseignants, personnels administratifs et techniques*

## RESUME

Le béton prêt à l'emploi est fabriqué selon des conditions contrôlées et régies par la norme NA 16002. En effet les centrales à béton sont équipées de matériels permettant la production de béton conforme aux spécifications réglementaires ou complémentaires. C'est dans ce contexte que s'inscrit notre travail notamment la formulation d'un béton prêt à l'emploi (BPE) pompable à partir de matériaux disponibles au niveau de la centrale à béton. Le but est d'améliorer certaines de ses propriétés en particulier la fluidité et l'homogénéité pour garantir sa pompabilité d'une part et sa résistance en compression d'autre part en garantissant un coût de fabrication minimum.

Les résultats obtenus ont permis de dégager un certain nombre de recommandations, par rapport à la qualité des gros granulats et vis-à-vis des procédures de commande et de livraison du béton aux clients pour une conformité relative à la norme NA 16002.

## ملخص

يتم تصنيع الخرسانة الجاهزة في ظل ظروف يتم التحكم فيها ويحكمها معيار NA 16002. بالفعل مصانع الخرسانة مجهزة بمعدات تسمح بإنتاج الخرسانة التي تتوافق مع المواصفات التنظيمية أو الإضافية. في هذا السياق ، يتم عملنا ، ولا سيما صياغة الخرسانة الجاهزة (BPE) التي يمكن ضخها باستعمال المواد المتوفرة في مصنع الخرسانة. والهدف من ذلك هو تحسين بعض خصائصه ، لا سيما السيولة والتجانس ، لضمان قدرته على الضخ من جهة، مع ضمان الحد الأدنى من تكلفة التصنيع من جهة أخرى.

أتاحت النتائج التي تم الحصول عليها تحديد عدد معين من التوصيات ، فيما يتعلق بجودة الركاب الكبير الذي يجب تغييره وفيما يتعلق بإجراءات طلب الخرسانة وتسليمها للعملاء للامتثال لمعيار NA 16002

## ABSTRACT

Ready-mixed concrete is manufactured under conditions controlled and governed by the NA 16002 standard. Indeed, concrete plants are equipped with materials allowing the production of concrete that complies with regulatory or additional specifications. It is in this context that our work takes place, in particular the formulation of ready-mixed concrete (BPE) that can be pumped from materials available at the concrete plant. The aim is to improve some of its properties, in particular fluidity and homogeneity, to guarantee its pumpability on the one hand and its compressive strength on the other, while guaranteeing a minimum manufacturing cost.

The results obtained made it possible to identify a certain number of recommendations, in relation to the quality of large aggregates and with regard to the procedures for ordering and delivering concrete to customers for compliance with the NA 16002 standard.

# TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS .....	I
RESUME.....	III
ملخص.....	IV
ABSTRACT.....	V
TABLE DES MATIERES.....	VI
LISTE DES TABLEAUX .....	X
LISTE DES FIGURES ET DES PHOTOS.....	XI

## CHAPITRE 1 – ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

1. INTRODUCTION.....	2
2. TYPES DE BETON AU SENS DE LA NORME EN 206 + A2 / CN.....	2
2.1. Les Bétons à Propriétés Spécifiées (BPS) .....	2
2.2. Les bétons à Composition Prescrite (BCP) .....	3
2.3. Les Bétons à Composition Prescrite dans une Norme (BCPN) .....	3
3. BETON PRET A L'EMPLOI (BPE).....	3
4. LES CONSTITUANTS DES BPE.....	4
4.1. Le ciment.....	5
4.2. Les granulats.....	6
4.2.1. Selon leur provenance.....	6
4.2.2. Selon la forme.....	6
4.2.3. Selon les dimensions.....	6
4.3. Les adjuvants.....	7
4.4. L'eau de gâchage.....	8
4.5. Additions pour béton.....	8
5. SPECIFICATIONS DES BETONS PRETS A L'EMPLOI (BPE) .....	9
5.1. Classes de masse volumique.....	9
5.2. Classes de résistance à la compression.....	9
5.3. Classes de consistance.....	10
6. EXIGENCES SUR LES CONSTITUANTS.....	10
6.1. Choix du ciment.....	10
6.2. Choix des granulats.....	11
6.3. Valeurs limites spécifiées applicables à la composition et aux propriétés des bétons.....	11

7.	CENTRALE A BETON.....	12
7.1.	Les principaux équipements d'une centrale à béton .....	12
7.2.	Phases de fabrication de BPE.....	14
7.2.1.	Réception et stockage des matières premières.....	14
7.2.2.	Pesée des différents constituants.....	15
7.2.3.	Malaxage.....	15
7.2.4.	Contrôle de la plasticité du béton frais.....	15
7.2.5.	Déchargement du malaxeur.....	15
7.2.6.	Contrôle de la résistance .....	15
8.	TRANSPORT DU BPE .....	16
9.	MISE EN ŒUVRE .....	16
10.	COULAGE DU BETON PAR POMPAGE .....	16
11.	FORMULATION DES BPE POMPABLES.....	16
12.	CONCLUSION.....	17

## CHAPITRE 2

### LES METHODES EXPERIMENTALES ET LES CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX

1.	LES METHODES EXPERIMENTALES .....	19
1.1.	Essais sur les granulats .....	19
1.1.1.	La masse volumique apparente .....	19
1.1.2.	Masse volumique réelle par la méthode de l'éprouvette graduée .....	20
1.1.3.	Equivalent de sable .....	20
1.1.4.	Propreté des graviers .....	22
1.1.5.	Analyse granulométrique .....	22
1.1.6.	Essai Micro Deval .....	23
1.1.7.	Essai Los Angeles : Essai de dureté .....	25
1.1.8.	Coefficient d'aplatissement .....	26
1.1.9.	Coefficient d'absorption d'eau .....	28
1.2.	Essais sur le ciment .....	29
1.2.1.	Masse volumique apparente .....	29
1.2.2.	Masse volumique absolue (Méthode du densimètre le Chatelier) .....	29
1.2.3.	Détermination de la finesse par tamisage .....	30
1.2.4.	Détermination de la consistance normale du Ciment .....	31
1.2.5.	Détermination des délais de prise du Ciment .....	32
1.2.6.	Détermination des résistances mécaniques en compression et en flexion du ciment .....	34
1.3.	Essais sur béton.....	37
1.3.1.	Essai de consistance du béton au cône d'Abrams .....	36
1.3.2.	Essai de résistance en compression sur béton .....	37
2.	LES MATERIAUX.....	38
2.1.	Le ciment .....	38

2.2.	L'adjuvant .....	39
2.3.	Les granulats .....	39
2.3.1.	Analyses granulométriques .....	40
2.3.2.	Caractéristiques physiques des granulats .....	40
2.4.	L'eau .....	40
3.	CONCLUSION .....	41

### CHAPITRE 3 - FORMULATION ET CARACTERISATION DES BETONS

1.	INTRODUCTION.....	43
2.	FORMULATION DU BETON D'ETUDE.....	43
3.	EXEMPLE DE FORMULATION DU BETON.....	44
3.1	Première composition .....	44
3.2.	Critères imposés par les clients de la centrale à béton.....	44
3.3.	Les étapes de calcul.....	44
3.3.1.	Détermination du rapport C/E.....	45
3.3.2.	Détermination des dosages en ciment (C) et en eau (E)...	46
3.3.3.	Détermination des pourcentages des granulats.....	47
3.3.4.	Estimation du coefficient de compacité $\gamma$ .....	49
3.3.5.	Détermination des volumes des granulats .....	51
3.3.6.	Détermination des masses de chaque granulat .....	52
3.3.7.	Correction de la formulation .....	53
4.	OPTIMISATION DES FORMULATIONS.....	55
4.1.	Première phase de formulation du béton.....	55
4.2.	Deuxième phase de formulation du béton.....	56
5.	CARACTERISATION DES BETONS ET DISCUSSION DES RESULTAT.....	56
5.1.	La première formulation (B.I).....	56
5.2.	La deuxième formulation (B.II).....	57
5.3.	Troisième formulation (B.III).....	57
5.4.	Quatrième formulation (B.IV).....	58
6.	SYNTHESE DES RESULTATS .....	58
6.1.	Sur l'affaissement.....	58
6.2.	Sur la résistance en compression.....	59
6.3.	Sur le prix de production.....	60
7.	CONCLUSION .....	61

### CHAPITRE IV CONFORMITE DE LA CENTRALE A BETON ETB/TCE – ANNABA PAR RAPPORT A LA NORME NA 16002

1.	INTRODUCTION.....	63
----	-------------------	----

3.	DESCRIPTION DE LA CENTRALE E.T.B/T.C.E.....	63
4.	CONTROLE DE LA CONFORMITE DES BPS.....	65
4.1.	Contrôle de conformité .....	65
4.2.	L'échantillonnage .....	65
4.3.	Evaluation de la conformité .....	66
4.4.	Contrôle de la conformité de la consistance à la livraison .....	66
4.5.	Contrôle de la conformité de la résistance à la compression.....	67
4.6.	Contrôle de conformité pour autres propriétés.....	69
5.	DOCUMENTS TECHNIQUES.....	70
5.1.	Bon de livraison pour un béton prêt a l emploi (BPS).....	70
5.2.	Bon de commande établi par la centrale .....	71
5.2.1.	Exemple de bon de commande pour un BPS.....	72
5.2.2.	Exemple de bon de commande pour un BCP.....	73
5.2.3.	Exemple de bon de livraison pour un BPS.....	74
5.2.4.	Exemple de bon de livraison pour un BCP.....	75
6.	CONCLUSION .....	76
	CONCLUSION GENERALE.....	78
	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	80

# LISTE DES TABLEAUX

## Chapitre I

Tableau 1.1 - Valeurs limites de la résistance en compression des ciments.....	5
Tableau 1.2 - Type de béton en fonction de la masse volumique.....	9
Tableau 1.3 - Classe de résistance à la compression.....	9
Tableau 1.4 - Classes de consistance.....	10
Tableau 1.5 - Types d'ouvrages et classe de consistance correspondante.....	10
Tableau 1.6 - valeurs limites spécifiées applicables à la composition et aux propriétés du béton.....	11

## Chapitre II

Tableau 2.1 - Valeurs préconisées pour l'équivalent de sable.....	21
Tableau 2.2 - Classification des sables en fonction du module de finesse.....	23
Tableau 2.3 - Masse de la charge abrasive en fonction de la fraction de granulats.....	24
Tableau 2.4 - Nombre de boulets en fonction de la fraction granulaire.....	26
Tableau 2.5 - Correspondance entre les classes granulométriques et d/D et l'écartement des fentes.....	27
Tableau 2.6 - Composition Chimique du Ciment .....	39
Tableau 2.7 - Composition Minéralogique du Ciment .....	39
Tableau 2.8 - Caractéristiques Physico - Mécaniques du Ciment.....	39
Tableau 2.9 - Caractéristiques Physiques et Mécaniques des granulats.....	40
Tableau 2.10 - Classification des granulats selon leur résistance à la fragmentation par chocs et par frottements réciproques.....	41

## Chapitre III

Tableau 3.1 - Coefficient qui tient compte de la qualité des granulats.....	45
Tableau 3.2 - Correction du dosage en eau en fonction de Dmax.....	47
Tableau 3.3 - Valeurs du coefficient Kc en fonction de la forme des granulats, du mode de vibration et du dosage en ciment.....	47
Tableau 3.4 - Valeurs du coefficient de compacité $\gamma$ .....	50
Tableau 3.5 - Récapitulatif des dosages des constituants pour 1m <sup>3</sup> de béton.....	53
Tableau 3.6 - Récapitulatif des corrections effectuées sur les dosages en granulats....	54
Tableau 3.7 - Récapitulatif des dosages des constituants après correction.....	55
Tableau 3.8 - Compositions préliminaires du béton.....	55
Tableau 3.9 - Compositions finales du béton.....	56

## Chapitre IV

	67
Tableau 4.1 - Critères de conformité applicables à la consistance du béton.....	67
Tableau 4.2 - Fréquence minimale d'échantillonnage pour l'évaluation de la conformité .....	68
Tableau 4.3 - Critères de conformité pour les résultats d'essai de résistance à la compression.....	68
	69
Tableau 4.4 - Critères de confirmation pour les formules individuelles.....	69
Tableau 4.5 - Critères de conformité pour les propriétés autres que la résistance.....	72
Tableau 4.6 - Exemple de bon de commande d'un BPS.....	73
Tableau 4.7 - Exemple de bon de commande d'un BCP.....	

# LISTE DES FIGURES ET DES PHOTOS

## Chapitre I

Photo 1.1- Pré-stockage des granulats dans des box.....	12
Photo 1.2 - Dosage des granulats par tapis peseur.....	12
Photo 1.3 - Silos à liants.....	13
Photo 1.4 - Local à adjuvant.....	13
Photo 1.5 - Pompes et doseurs à adjuvants.....	13
Photo 1.6 - Bassins de décantation pour l'eau recyclée.....	13
Photo 1.7 - Bloc malaxeur.....	14
Photo 1.8 - Intérieur d'un malaxeur.....	14
Figure 1.9 - Schéma de principe d'une centrale à béton.....	14

## Chapitre II

Figure 2.1 - Essai de l'équivalent de sable.....	21
Photo 2.1 - Appareil Micro-Deval.....	24
Photo 2.2 - Appareil Los Angeles.....	25
Photo 2.3 - Tamis à mailles carrées.....	27
Photo 2.4 - Grilles à fentes.....	27
Photo 2.5 - Densimètre Le Chatelier.....	29
Figure 2.2 - Appareil de Vicat.....	32
Figure 2.3 - Mesure du temps de début de prise.....	33
Figure 2.4 - Mesure du temps de début de prise.....	34
Figure 2.5 - essai de traction par flexion sur éprouvettes en mortier.....	35
Figure 2.6 - Essai de compression sur éprouvettes en mortier.....	36
Photo 2.7 - Matériel requis pour l'essai au cône d'Abrams.....	37
Figure 2.7 - Mesure de la hauteur d'affaissement.....	38
Figure 2.8 - Courbes granulométriques des granulats.....	40

## Chapitre III

Figure 3.1 - Détermination du dosage en ciment en fonction du rapport C/E et de l'affaissement.....	46
Figure 3.2 - Détermination des pourcentages du sable et du gravier par la méthode de Dreux.....	49
Photo 3.1- Affaissement important mesuré sur la composition B.I, (Sans la fraction 15/25) .....	56
Photo 3.2.a - Affaissement faible mesuré avant l'augmentation du dosage en superplastifiant sur la composition B.II (avec la fraction 15/25).....	57
Photo 3.2.b - Affaissement important accompagné de ressuage observé après l'augmentation du dosage en superplastifiant de 0,5 à 0,8 (%) sur la composition B.II (avec la fraction 15/25) .....	57
Photo 3.3 - Affaissement mesuré après réduction du dosage en eau de 200 à 185 kg/m <sup>3</sup> (Absence de ressuage) .....	58
Photo 3.4 - Affaissement mesuré après augmentation du dosage de la fraction 15/25 de 15 à 25 (%).....	58
Figure 3.3 - Influence de la composition sur l'affaissement du béton.....	59
Figure 3.4 - Influence de la composition sur la résistance en compression du béton.....	59
Figure 3.5 - Influence de la composition sur le coût de production d'un m <sup>3</sup> de béton.....	60

## Chapitre IV

Figure 4.1 - Aire de stockage des granulats.....	63
Figure 4.2 - Tapis balance pour granulats.....	63
Figure 4.3 - Futs d'adjuvants.....	64
Figure 4.4 - Silos à ciment.....	64
Figure 4.5 - Réservoirs d'eau.....	64
Figure 4.6 - Panneau de commande de la centrale à béton.....	65

## **INTRODUCTION GENERALE**

## INTRODUCTION GENERALE

Le béton prêt à l'emploi est un matériau de construction largement utilisé dans le secteur de la construction. Il s'agit d'un mélange de ciment, de granulats, d'eau et d'adjuvants chimiques, préparé en usine. Le béton prêt à l'emploi est livré sur le chantier prêt à être utilisé, ce qui en fait une solution pratique et efficace pour de nombreux projets de construction.

L'un des avantages majeurs du béton prêt à l'emploi est sa commodité. En étant préparé en usine, il permet d'économiser du temps et des efforts sur le chantier, car il élimine la nécessité de mélanger les ingrédients sur place. Il suffit de commander la quantité requise et le béton est livré à l'endroit précis où il est nécessaire. Cela permet de gagner du temps et de réduire les coûts de main-d'œuvre.

Le béton prêt à l'emploi offre également une grande flexibilité en termes de formulations. Il peut être adapté en fonction des exigences du projet, que ce soit en termes de résistance, de mise en œuvre, ou d'autres caractéristiques spécifiques. Cela permet de répondre aux besoins variés des différents types de construction, tels que les fondations, les dalles, les poutres, les colonnes, les murs, etc.

De plus, le béton prêt à l'emploi est fabriqué selon des conditions contrôlées et régies par la norme NA 16002. En effet les centrales à béton sont équipées de matériels permettant la production de béton conforme aux spécifications réglementaires ou complémentaires

C'est dans ce contexte que s'inscrit notre travail notamment la formulation d'un béton prêt à l'emploi (BPE) pompable à partir de matériaux disponibles au niveau de la centrale à béton. Le but est d'améliorer certaines de ses propriétés en particulier la fluidité et l'homogénéité pour garantir sa pompabilité d'une part et sa résistance en compression d'autre part en garantissant un coût de fabrication minimum.

Notre travail est structuré en quatre chapitres :

Le premier chapitre synthétise la revue bibliographique et en particulier la mise en évidence de la norme EN 206 qui définit clairement les types de béton.

Le deuxième chapitre est consacré à l'exposé des méthodes opératoires et à la caractérisation des matériaux

La formulation des bétons et les résultats de caractérisation des bétons sont présentés dans le troisième chapitre

L'expertise des conditions de fonctionnement de la centrale à béton vis-à-vis de la norme NA 16002 est présentée dans le chapitre quatre.

**CHAPITRE 1**  
**ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE**

# CHAPITRE 1 – ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

## 1. INTRODUCTION

Le béton est le matériau de construction le plus utilisé dans le monde pour la réalisation de divers types de construction avec un volume de 6 milliards de m<sup>3</sup> par an [1].

Le béton est un mélange de sable, de gravier, de ciment et d'eau et éventuellement d'additions, d'adjuvants qui peuvent être incorporés pendant le malaxage pour améliorer ou modifier certaines propriétés.

Aujourd'hui le béton est principalement fabriqué dans des centrales de béton prêt à l'emploi (BPE). On compte plus de 2000 [2] centrales, permettant de disposer d'une centrale dans un rayon maximum de moins d'une heure de route de tout chantier en France. Le débit des centrales est compris entre 40 et 150 m<sup>3</sup> par heure [2]. Les centrales BPE livrent sur les chantiers des bétons conformes à la norme NF EN 206 +A2/CN [3], en particulier les bétons à propriétés spécifiques (BPS).

## 2. TYPES DE BETON AU SENS DE LA NORME EN 206 + A2 / CN [3]

La norme EN 206 + A2 / CN [3] classe le béton en trois types de bétons :

- Les Bétons à Propriétés Spécifiées : BPS
- Les Bétons à Composition Prescrite : BCP
- Les Bétons à Composition Prescrite dans une Norme : BCPN

### 2.1. Les Bétons à Propriétés Spécifiées (BPS)

Il s'agit de béton pour lequel les caractéristiques requises et les caractéristiques supplémentaires sont spécifiées par le prescripteur au producteur qui est responsable de fournir un béton satisfaisant à ces exigences.

Les spécifications de base sont les suivantes :

- la conformité à la norme;
- la classe de résistance à la compression ;
- la classe d'exposition ;
- la classe de consistance;
- la classe de teneur en chlorures ;
- la dimension maximale des granulats.

Des caractéristiques complémentaires (type de ciment...) peuvent, le cas échéant, être demandées en plus des spécifications de base, avec des niveaux de performances contrôlées suivant des méthodes d'essais définies.

## **2.2. Les bétons à Composition Prescrite (BCP)**

Béton pour lequel la composition et les constituants à utiliser sont spécifiés par le prescripteur au producteur. Le producteur est responsable de fournir un béton respectant cette composition. Les contrôles sur les performances atteintes ne sont pas de la responsabilité du producteur. La responsabilité du prescripteur est de réaliser une étude de formulation et d'établir la composition détaillée du béton qu'il doit communiquer au producteur, qui s'engage à la respecter.

Les données de base comprennent :

- l'exigence de conformité à la norme,
- le dosage en ciment,
- le type de ciment et sa classe de résistance,
- le rapport eau/ciment ou la consistance,
- la qualité des granulats,
- la dimension maximale des granulats,
- le type et la quantité des adjuvants et additions (ainsi que l'origine de leurs constituants).

Le producteur est responsable de fournir un béton respectant cette composition prescrite. Les contrôles sur les performances atteintes ne sont pas de la responsabilité du producteur, ils incombent au prescripteur ou à l'utilisateur.

## **2.3. Les Bétons à Composition Prescrite dans une Norme (BCPN)**

Spécification par la norme des compositions de béton pour des applications particulières. Le prescripteur a la responsabilité dans ce cas de sélectionner, dans la norme, la composition appropriée à l'ouvrage. La fabrication du béton peut être réalisée soit en centrale à béton fixe (béton prêt à l'emploi) ou sur le chantier.

Dans ce travail, nous nous intéressons au béton prêt à l'emploi.

## **3. BETON PRET A L'EMPLOI (BPE)**

Les bétons prêts à l'emploi sont fabriqués dans une centrale à béton fixe. Ils sont ensuite transportés à l'état frais à l'aide d'un camion bétonnière vers les chantiers pour leur mise en place qui peut se faire à l'aide de goulotte ou de tapis (de moins en moins utilisés) ou de pompe à béton (béton pompé, de plus en plus utilisé).

Les bétons prêts à l'emploi conviennent pour les grands ouvrages qui nécessitent un volume important de béton ou lorsque le stockage des matériaux de construction sur le chantier n'est pas possible en raison de la surface réduite disponible.

On peut citer quelques avantages et inconvénients du béton prêt à l'emploi

- **Avantages du béton prêt à l'emploi.**
  - Simplification de l'organisation du chantier
  - Absence de stockage des matériaux sur le chantier :
    - ✓ Absence de perte de matériaux
    - ✓ Absence de frais supplémentaires pour le stockage
    - ✓ Respect de l'environnement.
  - Main d'œuvre réduite sur le chantier, pour la mise en place uniquement
  - Spécifiques selon les besoins du chantier
  
- **Inconvénients du béton prêt à l'emploi.**
  - Ne convient pas aux petits projets de construction qui nécessitent un faible volume de béton.
  - Les opérations de fabrication dans la centrale, le transport et le coulage doivent être synchronisées avec le coulage afin d'éviter une attente prolongée du béton sur le chantier
    - L'ouvrabilité du béton prêt à l'emploi a un temps limité. Tout retard dû aux embouteillages sur les routes et surtout une panne du véhicule peuvent conduire à de graves problèmes
  
- **Applications des bétons prêts à l'emploi**
  - Bétonnage monolithique pour les dalles et les poutres de la toiture,
  - Les pistes de circulation,
  - Les chaussées,
  - Revêtement des tunnels,
  - Barrages et structures hydrauliques.

#### 4. LES CONSTITUANTS DES BPE

Les constituants des BPE sont les mêmes que ceux du béton, la seule différence réside dans leur fabrication dans une centrale à béton fixe. Ils sont constitués de granulats (gros et fins) d'eau de ciment et éventuellement complété par des adjuvants et des additions.

Le mélange entre le ciment et l'eau forme la pâte, mélangée au sable constitue le mortier. Celui-ci a pour rôle d'enrober et de lier les gros granulats pour former une pierre artificielle. Les adjuvants et les additions servent à améliorer certaines caractéristiques du béton frais ou durci.

#### 4.1. Le ciment

Le ciment est un liant hydraulique, finement moulu qui, gâchée avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit et conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau.

- **Types de ciment**

Les ciments portland sont classés en fonction de leur composition, en cinq types principaux selon la norme NA 442 [4] (Tableau 2).

- CEM I: Ciment Portland
- CEM II: Ciment Portland composé
- CEM III: Ciment de haut fourneau
- CEM IV: Ciment pouzzolanique
- CEM V: Ciment composé

- **Classes de résistance**

La classe de résistance d'un ciment est la résistance mécanique à la compression mesurée à 28 jours sur mortier normal conformément à la norme NF EN 196-1 [5] et exprimée en MPa.

Les ciments sont répartis en trois classes de résistance, 32,5 - 42,5 - 52,5. (Tableau 1.1)

**Tableau 1.1 - Valeurs limites de la résistance en compression des ciments [5]**

	<b>Résistances minimales absolues en MPa</b>		
	<b>2 jours</b>	<b>7 jours</b>	<b>28 jours</b>
<b>32,5 L</b>	-	10	30
<b>32,5 N</b>	-	14	30
<b>32,5 R</b>	8	-	30
<b>42,5 L</b>	-	14	40
<b>42,5 N</b>	8	-	40
<b>42,5 R</b>	18	-	40
<b>52,5 L</b>	8	-	50
<b>52,5 N</b>	18	-	50
<b>52,5 R</b>	28	-	50

A chaque classe de résistance courante, correspondent trois classes de résistance à court terme

- une classe de résistance à court terme normale, notée N ;
- une classe de résistance à court terme élevée, notée R ;
- une classe de résistance à court terme limitée, notée L, applicable aux ciments CEM III qui sont alors des ciments de haut fourneau à faible résistance à court terme.

## **4.2. Les granulats**

Les granulats sont constitués d'un ensemble de grains minéraux de dimension comprise entre 0 et 125 mm. Les granulats peuvent être classés selon plusieurs critères :

### **4.2.1. Selon leur provenance**

- Naturel : d'origine minérale, issus de roches meubles, ou de roches massives, n'ayant subi aucune transformation autre que mécanique (tels que concassage, broyage, criblage, lavage).
- Artificiel : d'origine minérale résultant d'un procédé industriel (granulats d'argile expansée ou laitier rocheux)
- Recyclé : obtenu par traitement d'une matière inorganique utilisée précédemment dans la construction, tels que des bétons de démolition de bâtiments.

### **4.2.2. Selon la forme**

- **Les granulats de roche meuble (roulés) :**

Dont la forme a été acquise par l'érosion (usure sous l'effet des paramètres atmosphériques). Ces granulats sont lavés pour éliminer les particules argileuses, nuisibles à la résistance du béton et criblés pour obtenir différentes classes de dimension. Les granulats utilisés pour le béton sont le plus souvent siliceux, calcaires ou silico-calcaires.

- **Les granulats de roche massive (concassés ou de carrière) :**

Sont obtenus par abattage et concassage, ce qui leur donne des formes angulaires. Une phase de précriblage 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 d'un grand nombre de paramètres : origine de la roche, régularité du banc, degré de concassage.

### **4.2.3. Selon les dimensions**

Les granulats sont classés en fonction de leur granularité (distribution dimensionnelle des grains) déterminée par analyse granulométrique à l'aide de tamis.

Le granulat est désigné par le couple d/D avec :

- d: dimension inférieure du granulat
- D: dimension supérieure du granulat

Un granulat est caractérisé du point de vue granulaire par sa classe d/D.

Lorsque d est inférieur à 2 mm, le granulat est désigné 0/D.

Il existe cinq classes granulaires principales caractérisées par les dimensions extrêmes d et D des granulats rencontrés selon la norme NF EN 12620+A1 [6] :

- Les fines                    0/D avec  $D \leq 0,08$  mm,
- Les sables                 0/D avec  $D \leq 6,3$  mm,
- Les gravillons            d/D avec  $d \geq 2$  mm et  $D \leq 31,5$  mm,
- Les cailloux                d/D avec  $d \geq 20$  mm et  $D \leq 80$  mm,
- Les graves                 d/D avec  $d \geq 6,3$  mm et  $D \leq 80$  mm,

### 4.3. Les adjuvants

Un adjuvant est un produit dont l'incorporation à faible dose (inférieure à 5 % de la masse du ciment) aux bétons, mortiers ou coulis, lors du malaxage ou avant la mise en œuvre, provoque les modifications des propriétés du mélange, à l'état frais ou durci.

Au début, les adjuvants étaient à base de matière organique et utilisés de manière empirique. Au cours du XXe siècle, des progrès scientifiques ont permis de développer des adjuvants avec des propriétés spécifiques. Leur utilisation s'est généralisée ces dernières décennies. Ils sont aujourd'hui incorporés dans tous les types de bétons, qu'ils soient livrés prêts à l'emploi, utilisés en usine de préfabrication ou fabriqués sur chantier.

La norme NF EN 934-2 +A1 [7] classe les adjuvants pour bétons, mortiers et coulis suivant leur fonction principale. On peut distinguer trois grandes catégories d'adjuvants :

- **Ceux qui modifient l'ouvrabilité du béton**
  - Plastifiants - réducteurs d'eau
  - Superplastifiants
- **Ceux qui modifient la prise et le durcissement :**
  - Accélérateurs de prise
  - Accélérateurs de durcissement
  - Retardateurs de prise

- **Ceux qui modifient certaines propriétés particulières :**
  - Entraîneurs d'air
  - Hydrofuges de masse
  - Rétenteurs d'eau.

#### **4.4. L'eau de gâchage**

L'eau de gâchage du béton ne doit pas contenir de composés risquant d'attaquer le ciment, les granulats ou les armatures. Plusieurs types d'eau peuvent être utilisés pour la fabrication du béton. L'eau potable peut être utilisée sans aucun essai.

L'eau récupérée issue de la fabrication du béton (eau de lavage, eau excédentaire...) doit satisfaire à des exigences spécifiques (définie dans l'annexe A de la norme NF EN 1008) [8].

Les eaux d'origine souterraine (nappe phréatique), les eaux de surface et les eaux de rejets industrielles peuvent être utilisées mais doivent être soumises à des essais avant utilisation.

Les eaux de mer peuvent être utilisées uniquement pour la fabrication du béton non armé. Dans le cas du béton armé ou précontraint, l'emploi de l'eau de mer est interdit en raison des risques de corrosion des armatures.

Les eaux usées ne sont pas autorisés.

#### **4.5. Additions pour béton**

Les additions pour le béton sont définies dans la norme NF EN 206+A2 [3].

**Définition :** Une addition est un matériau minéral finement divisé et pouvant être ajouté au béton pour améliorer certaines de ses propriétés, ou pour lui conférer des propriétés particulières. Il existe deux types d'additions :

- **les additions quasiment inertes (type I) :**
  - Filler de type L
  - Filler de type LL
- **les additions réactives (type II) (à caractère pouzzolanique) :**
  - Les pouzzolanes naturelles
  - Les fumées de silice
  - Les cendres volantes

- les additions réactives (type II) à caractère hydraulique latent :
- laitier granulé de haut fourneau

## 5. SPECIFICATIONS DES BETONS PRETS A L'EMPLOI (BPE)

Nous rappelons quelques spécifications données par la norme NF EN 206+A2/CN [3]

### 5.1. Classes de masse volumique

La norme NF EN 206+A2 [3] couvre les bétons de masse volumique normale (2000 à 2600 kg/m<sup>3</sup>), les bétons lourds (masse volumique supérieure à 2600 kg/m<sup>3</sup>) et les bétons légers (masse volumique comprise entre 800 et 2000 kg/m<sup>3</sup>) (Tableau 1.2)

**Tableau 1.2 – Type de béton en fonction de la masse volumique**

Types de béton	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )
Béton léger	800 - 2000
Béton ordinaire	2000 - 2600
Béton lourd	> 2600

### 5.2. Classes de résistance à la compression

La norme NF EN 206+A2 [3] propose deux familles de classes de résistance ( $f_c$ ) (Tableau 1.3): La classe de résistance à la compression des bétons de masse volumique normale et des bétons lourds est désignée par la lettre C (de concrete) suivie des valeurs sur éprouvettes cylindrique et cubique ( $f_{c-cyl}$  et  $f_{c-cube}$ ).

**Tableau 1.3 - Classe de résistance à la compression**

Bétons ordinaires et lourds		
Classe	$f_{c-cyl}$ , MPa	$f_{c-cube}$ , MPa
C8/10	8	10
C12/15	12	15
C16/20	16	20
C20/25	20	25
C25/30	25	30
C30/37	30	37
C35/45	35	45
C40/50	40	50
C45/55	45	55
C50/60	50	60
C55/67	55	67
C60/75	60	75
C70/85	70	85
C80/95	80	95
C90/105	90	105

### 5.3. Classes de consistance

La norme NF EN 206+A2 [3] définit 5 classes de consistance des bétons (Tableau 1.4):

La mesure de l'affaissement est réalisée à l'aide du cône d'Abrams selon la norme NF EN 12350 [9].

**Tableau 1.4 - Classes de consistance**

Classes	S1	S2	S3	S4	S5
Etat	Ferme	Plastique	Très plastique	Fluide	Très fluide
Affaissement (mm)	10 - 40	50 - 90	100 - 150	160 - 210	> 220

La classe de consistance correspondant au type d'ouvrage ou de béton est donnée par le tableau 1.5

**Tableau 1.5 - Types d'ouvrages et classe de consistance correspondante**

Types d'ouvrages	Classe de consistance	
- Béton de chaussée compacté - Béton extrudé pour réaliser les séparateurs de voies - Béton pour coffrage glissant	S1	Ferme
- Béton coulé en pente	S2	Plastique
- Fluidité employée pour une grande variété d'éléments : ouvrages courants ; dalles, voiles, poteaux, poutres, fondations.	S3	Très plastique
- Structure fortement ferrillées - Formes complexes - <u>Béton pompable</u>	S4	Fluide
- Applications horizontales et verticales (voiles, poutres, poteaux, fondations superficielles, fondations profondes, dalles, dallages, remplissage de blocs à bancher, etc.	S5	Très fluide

## 6. EXIGENCES SUR LES CONSTITUANTS

### 6.1. Choix du ciment

Le choix du ciment doit prendre en considération :

- La classe de résistance du béton
- Les conditions de cure,
- Les dimensions de la structure (développement de chaleur lors de l'hydratation du ciment),
- les agressions environnementales auxquelles la structure est exposée,
- la réactivité potentielle des granulats aux alcalins des constituants.

## 6.2. Choix des granulats

Le type, la dimension et les catégories de granulats doivent être sélectionnés en tenant compte :

- des contraintes d'exécution de l'ouvrage,
- de l'utilisation finale du béton,
- des conditions environnementales auxquelles sera soumis le béton,
- de toutes les exigences liées aux traitements de surface appliqués au béton frais ou durci,
- Le maximum de la dimension nominale supérieure des granulats ( $D_{max}$ ) est sélectionné en prenant en compte la valeur d'enrobage, la géométrie des sections et les dispositions constructives des armatures.

## 6.3. Valeurs limites spécifiées applicables à la composition et aux propriétés des bétons

L'Annexe de la norme NF EN 206+A2 [3] définit des valeurs limites spécifiées relatives à la composition et aux propriétés du béton en fonction de chaque classe d'exposition (Tableau 1.6).

**Tableau 1.6 - Valeurs limites spécifiées applicables à la composition et aux propriétés du béton**

Classes d'exposition		Rapport $E_{eff}/Liant_{eq}$ max	Classe de résistance min	Teneur min en liant <sub>eq</sub>	Teneur min en air	
Aucun risque de corrosion		X0	-	150	-	
Carbonatation		XC1	0.65	C20/25	260	-
		XC2	0.65	C20/25	260	-
		XC3	0.60	C25/30	280	-
		XC4	0.60	C25/30	280	-
Corrosion induite par les chlorures	Eau de mer	XS1	0.55	C30/37	330	-
		XS2	0.55	C30/37	330	-
		XS3	0.50	C35/45	350	-
	Autres que marine	XD1	0.60	C25/30	280	-
		XD2	0.55	C30/37	330	-
		XD3	0.50	C35/45	350	-
Attaques gel/dégel		XF1	0.60	C25/30	280	-
		XF2	0.55	C25/30	300	4.0
		XF3	0.50	C30/37	315	4.0
		XF4	0.45	C30/37	340	4.0
Attaques chimiques		XA1	0.55	C30/37	330	-
		XA2	0.50	C35/45	350	-
		XA3	0.45	C40/50	385	-

## 7. CENTRALE A BETON

Il en existe deux modes d'installation de centrale à béton :

- Les centrales fixes
- Les centrales mobiles ou de chantier

Les centrales fixes sont équipées de malaxeur de grande capacité et peuvent desservir plusieurs chantiers en BPE. Alors que les centrales mobiles permettent la fabrication du béton au pied du chantier.

### 7.1. Les principaux équipements d'une centrale à béton

Une centrale à béton comporte un certain nombre d'équipements et d'installations:

- **Box de stockage des granulats :**

Le stockage des granulats se fait à deux niveaux

- Dans des box, constituant un stock tampon qui assurent l'approvisionnement de la centrale pendant quelques jours pour éviter la rupture des stocks. Le transfert des granulats du stock tampon vers les trémies peut être réalisé à l'aide de tapis convoyeur ou pelle mécanique,
- Dans des trémies ou cuves de dosage qui assurent l'alimentation du malaxeur

Les granulats sont stockés séparément en fonction de leurs dimensions et de leurs natures (Photos 1.1 et 1.2.)



**Photo 1.1- Pré-stockage des granulats dans des box [10]**



**Photo 1.2 - Dosage des granulats par tapis peseur [10]**

- **Silos à ciment**

Le silo à ciment sert à contenir de grands volumes de ciment qui arrivent en vrac par camion (Photo 1.3)



**Photo 1.3 - Silos à liants [10]**

- **Balances**

Les balances sont généralement placées sous les trémies, permettant le pesage des constituants avant leurs transferts vers le malaxeur.

- **Cuves de stockage des adjuvants**

Les adjuvants sont entreposés dans un local (hors gel) attenant à la centrale dans des cuves de 1000 à 2000 litres ou des fûts de 200 litres, fermés et bien identifiés pour éviter les mélanges (Photos 1.4 et 1.5)



**Photo 1.4 - Local à adjuvant [10]**



**Photo 1.5 - Pompes et doseurs à adjuvants [10]**

- **Cuves tampon d'eau**

Il peut être nécessaire, selon les cas, de stocker l'eau avant utilisation dans des cuves tampon. L'eau de gâchage peut être de l'eau potable (eau du réseau) ou bien de l'eau naturelle (ex : puits, rivière, étang) ou récupérée du processus de fabrication du béton (eau recyclée), (Photo 1.6)



**Photo 1.6 - Bassins de décantation pour l'eau recyclée [10]**

- **Malaxeur**

Le malaxeur est le cœur de la centrale à béton. Le travail du malaxeur consiste à recevoir tous les ingrédients et à les mélanger soigneusement (Figure 1.7 et 1.8)



Photo 1.7 - Bloc malaxeur [10].



Photo 1.8 - Intérieur d'un malaxeur [10].

- **Panneau de commande**

Le panneau de commande contrôle toutes les opérations de fabrication du béton : dosages des constituants, le malaxage, la vidange et le nettoyage du malaxeur

Un exemple de schéma de principe d'une centrale à béton est présenté par la figure 1.1.

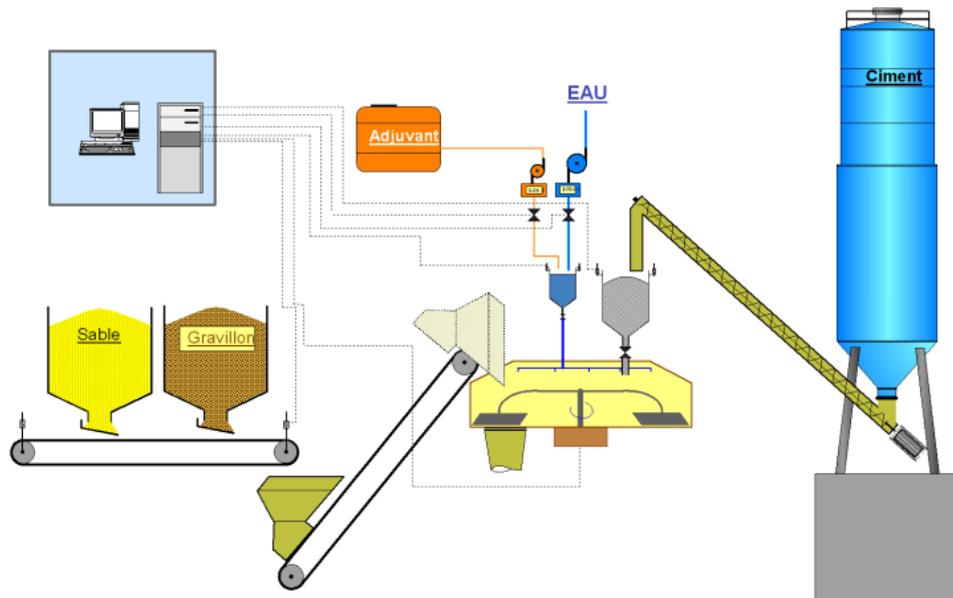


Figure 1.1 - Schéma de principe d'une centrale à béton [11]

## 7.2. Phases de fabrication de BPE

### 7.2.1. Réception et stockage des matières premières :

Ciments et additions : livrés par camion citerne et transvasés dans les silos verticaux (30 à 80 tonnes) [11]

- Sables et gravillons : livrés par camion benne et stockés dans des box correspondantes à chaque fraction séparées par des cloisons
- Adjuvants : Livrés en cuves ou fûts sur palettes.
- Eau : réseau, forage et récupération (recyclée/décantée)

### **7.2.2. Pesée des différents constituants**

- Ciment + addition : bascule électronique
- Granulats : Ajustement des pesées en fonction de l'humidité du matériau par pesée sur tapis-peseur, skip peseur ou bascule électronique
- Eau : bascule électronique
- Adjuvant : dosage par pompe-doseuse ou bascule et introduction dans bascule à eau ou directement dans le malaxeur.

### **7.2.3. Malaxage**

Le but est d'obtenir un mélange homogène avec une bonne répartition des différents constituants et en particulier de la pâte (ciment + additions + eau + adjuvants)

- Introduction des matériaux dans le malaxeur par ouverture des vannes des différentes bascules (Eventuellement transfert par skip pour les granulats)
- Mélange dans le malaxeur: malaxage à sec des constituants solides puis malaxage humide après introduction de l'eau de gâchage

### **7.2.4. Contrôle de la plasticité du béton frais**

- Mesure de l'affaissement au cône d'Abrams du béton
- Mesure de la puissance électrique du moteur d'entraînement des pales du malaxeur à l'aide d'un Wattmètre : plus le béton est ferme plus la consommation de l'électricité est importante
- Autres systèmes qui mesurent la résistance électrique du béton à l'aide de microsondes.

### **7.2.5. Déchargement du malaxeur**

Le déchargement du malaxeur dans le camion bétonnière : Selon la capacité du malaxeur, plusieurs gâchées sont généralement nécessaires pour remplir le camion

### **7.2.6. Contrôle de la résistance**

Lors du déchargement du béton, un échantillon est prélevé pour la confection d'éprouvettes cylindriques ou cubiques pour des essais de conformité à différentes échéances.

L'échantillonnage et les contrôles de conformité sur béton frais et durci seront développés au quatrième chapitre.

## **8. TRANSPORT DU BPE**

Le transport du béton frais jusqu'au lieu de coulage fait appel à différentes techniques, selon qu'il s'agit de parcourir de courtes distances sur un chantier ou s'il doit être acheminé depuis une centrale de fabrication (centrale BPE), parfois éloignée de plusieurs dizaines de kilomètres.

Le béton est généralement transporté entre le lieu de fabrication et le chantier par des camions bétonnières, qui assurent le maintien de l'homogénéité du béton pendant le transport. Ils sont équipés d'un réservoir tournant sur lui-même. Leur axe est incliné par rapport à l'horizontale et ils comportent une pale solidaire de la cuve, en forme de vis.

## **9. MISE EN ŒUVRE**

Le choix de la technique de mise en œuvre dépend du type de structures, des rendements souhaités et de l'accessibilité au chantier et aux coffrages. La mise en œuvre du béton frais peut être faite à l'aide:

- De goulotte ou bennes
- De tapis
- De pompe à béton

## **10. COULAGE DU BETON PAR POMPAGE**

Le pompage du béton est une technique de plus en plus utilisée [12] qui se développe car il permet une grande productivité, 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 et la mise en place de quantités importantes en une seule coulée.

Pour les grands chantiers, le pompage s'effectue à l'aide d'un camion pompe équipé d'une flèche. Par son intermédiaire, le béton est directement transporté du camion bétonnière au point de coulage.

L'évolution rapide des bétons pompés permet d'atteindre des longueurs de transport de 300 à 400 m, et jusqu'à plus de 100 m en hauteur avec des bétons adaptés [13].

## **11. FORMULATION DES BPE POMPABLES**

La technique de pompage du béton a débuté dans les années 1950 [14].

La formulation de béton prêt à l'emploi est réalisée de la même manière qu'un béton fabriqué dans une bétonnière ou une centrale de chantier.

Même si les méthodes classiques utilisées pour la formulation des bétons non pompables peuvent être utilisées, la formulation d'un béton pompable, nécessite la prise en compte d'un certain nombre de critères [15].

Par définition un béton pompable est un béton transportable facilement par pompe et sans ségrégation. Pour atteindre cette qualité, il est nécessaire d'introduire les paramètres suivants lors de la formulation d'un béton pompable :

- **Facteurs affectant la pompabilité** [14 - 15]

La pompabilité du béton dépend des paramètres suivant :

- La formulation
- De la pompe
- Du circuit de pompage

La composition du béton est un paramètre de premier ordre affectent l'aptitude au pompage du béton. Or celle-ci dépend d'une multitude de paramètres

- Le rapport G/S [13 et 15]
- Courbes granulométriques étalées et continues [15 - 16]
- Optimiser la compacité du mélange granulométrique [17 – 18]
- Limiter la valeur de  $D_{max}$  [17 – 18]
- Optimiser la teneur en fines [18]
- Limiter la viscosité plastique [15]
- Viser un béton fluide de classe S4 [3]

## 12. CONCLUSION

La formulation d'un BPE pompable dépend en premier lieu du choix des matériaux en relation avec le cahier des charges qui doit répondre à des exigences supplémentaires par rapport à celles d'un béton ordinaire.

Ces exigences peuvent être parfois contradictoires, car concilier la fluidité et la résistance en compression reste délicate surtout lorsqu'on cherche à garantir une résistance en compression importante.

La limitation du dosage en eau et en substituer une partie par un adjuvant de type plastifiant réducteur d'eau peut être contrariée par le cout du béton.

A cet effet, nous présentons dans le chapitre suivant les méthodes expérimentales et les caractéristiques des matériaux.

**CHAPITRE 2**  
**LES METHODES EXPERIMENTALES ET LES**  
**CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX**

# CHAPITRE 2 - LES METHODES EXPERIMENTALES ET LES CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX

## 1. LES METHODES EXPERIMENTALES

### 1.1. Essais sur les granulats

#### 1.1.1. La masse volumique apparente [19]

La masse volumique apparente est la masse de l'unité de volume d'un matériau y compris les vides et les pores.

Elle est nécessaire lors de la formulation d'une composition de béton car elle permet d'estimer les poids d'exploitation et la masse final de béton préparé.

La masse volumique apparente peut être exprimée en  $\text{kg/m}^3$ , et  $\text{gr/cm}^3$  ; E

- **Matériel**

- Un récipient cylindrique de volume connu et dont la taille est adaptée au matériau

- Une règle à araser métallique.
- Une main écope pour le remplissage.
- Une balance de portée 1 à 5 kg, (précision 1 g)
- Des bacs en plastique pour effectuer les essais
- Un entonnoir monté sur un trépied

- **Mode opératoire**

- Choisir le volume du récipient selon le matériau ( $V_0$ ).
- Peser le récipient propre et vide ( $M_0$ ).
- Placer le récipient dans le bac en plastique.
- Verser le matériau sec sans tassement :
- Araser l'excès de matière à l'aide de la règle métallique par un mouvement horizontal de va et vient.

- Noter la masse du récipient rempli ( $M_1$ ).
- Vider les granulats dans un autre bac en plastique.
- Calculer la masse de l'échantillon ( $M$ ),  $M = M_1 - M_0$
- Calculer la masse volumique apparente à l'aide de l'expression suivante

$$\rho_{app} = \frac{M}{V}$$

$\rho_{app}$  – Masse volumique apparente en ( $\text{g/cm}^3$ ,  $\text{kg/m}^3$ )

M – Masse de l'échantillon en g

V – Volume de l'échantillon en  $\text{cm}^3$

### 1.1.2. Masse volumique réelle par la méthode de l'éprouvette graduée [20]

C'est la masse par unité de volume d'un matériau y compris les vides internes ouverts et fermés mais sans les vides intergranulaires. La masse volumique réelle est exprimée en kilogrammes par mètre cube.

- **Matériel**
  - Une éprouvette graduée
  - Une balance de portée 1kg avec une précision de 1g
  
- **Mode opératoire**
  - Sécher l'échantillon dans une étuve à 105 °C
  - Peser une masse M de l'échantillon
  - Remplir l'éprouvette graduée d'un volume  $V_0$  d'eau
  - Verser dans l'éprouvette l'échantillon et faire remonter l'échantillon pour faire remonter les bulles d'air puis lire le nouveau volume ( $V_1$ )
  - Calculer le volume de l'échantillon ( $V = V_1 - V_0$ )
  - Calculer la masse volumique réelle de l'échantillon

$$\rho_{réelle} = \frac{M}{V}$$

$\rho_{réelle}$  – Masse volumique apparente en (kg/m<sup>3</sup>)

M – Masse de l'échantillon en g

V – Volume de l'échantillon en cm<sup>3</sup>

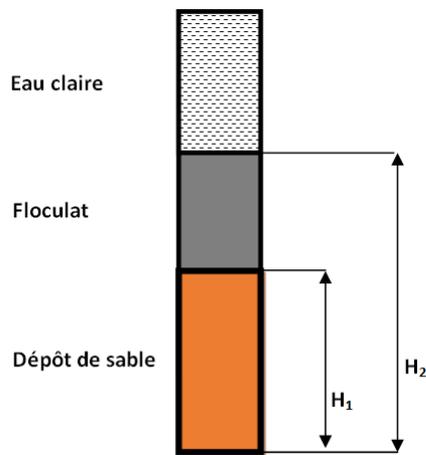
### 1.1.3. Equivalent de sable [21]

L'équivalent de sable caractérise la propreté d'un sable. Il indique la teneur en éléments fins. L'essai permet de mettre en évidence la proportion des fines généralement argileuse.

- **Matériel**
  - Eprouvettes graduées
  - Tamis 5 mm
  - Entonnoir
  - Spatule
  - Balance de capacité 1000g avec une précision de 1g
  
- **Mode opératoire**

L'essai consiste à agiter un échantillon de sable dans une solution lavante selon un protocole normalisé; ou l'eau si on n'a pas de solution lavante; puis on laisse reposer : trois couches apparaissent : (Figure 2.1)

- L'eau claire
- Le flocculat (eau trouble chargée de fines en suspension)
- Dépôt de sable



**Figure 2.1 – Essai de l'équivalent de sable**

L'équivalent de sable est exprimé par la relation suivante :

$$ES = \frac{H_1}{H_2} \cdot 100, \quad (\%)$$

ES – Equivalent de sable en %

H<sub>1</sub> – Hauteur du dépôt de sable

H<sub>2</sub> – Hauteur totale du mélange dépôt de sable et du flocculat

Les lectures des hauteurs H<sub>1</sub> et H<sub>2</sub> peuvent être faites à vue ou à l'aide d'un piston déposé sur le sable.

Le tableau 2.1 indique les valeurs préconisées pour l'équivalent de sable.

**Tableau 2.1 - Valeurs préconisées pour l'équivalent de sable.**

ES au piston (%)	ESV a vue (%)	Nature et qualité du sable
ES < 60	ES < 65	Sable argileux - Risque de retrait ou de gonflement, à rejeter pour des bétons de qualité
60 ≤ ES < 70	65 ≤ ES < 75	Sable légèrement argileux - de propreté admissible pour béton de qualité quand on ne craint pas particulièrement de retrait
70 ≤ ES < 80	75 ≤ ES < 85	Sable propre - à faible pourcentage de fines argileuses Convenant Parfaitement pour les bétons de haute qualité.
ES > 80	ES > 85	Sable très propre - l'absence presque totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra rattraper par une augmentation du dosage en eau.

#### 1.1.4. Propreté des graviers [22]

A l'instar de ce qui se pratique pour les sables, les graviers doivent être propres avant leur utilisation dans la fabrication des bétons.

Le gravier est propre si  $P$  (quantité d'éléments fins)  $< 5\%$

Contrairement aux sables, les graviers présentant des classes granulaires relativement grossières. Ainsi, le principe de séparation des agrégats des éléments fins ne se fera pas par sédimentation mais par lavage.

- **Matériel**

- Série de tamis à mailles carrées
- Balance de capacité 1000g avec une précision de 1g
- Etuve

- **Mode opératoire**

- Sécher un échantillon de gravier dans une étuve à 105°C
- Peser un échantillon de masse 1 kg de gravier sec, soit  $M_0$
- Mettre l'échantillon sur un tamis de mailles 0,5 mm et le laver sous le robinet jusqu'à ce que l'eau soit claire,
- Sécher l'échantillon dans une étuve à 105°C
- Peser l'échantillon lavé et séché, soit  $M_1$  la nouvelle masse
- Calculer la propreté

$$P = \frac{M_0 - M_1}{M_0} \cdot 100, (\%)$$

$P$  – Propreté du granulat en %

$M_0$  – Masse de l'échantillon sec, g

$M_1$  – Masse de l'échantillon lavé et sec, g

#### 1.1.5. Analyse granulométrique [23 et 24].

L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant l'échantillon

L'essai consiste à classer les différents grains qui constituent l'échantillon en utilisant une série de tamis emboîtés les uns sur les autres dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas.

- **Matériel**

- Série de tamis normalisée : 0,063 - 0,125 - 0,25 - 0,5 - 1 - 2 - 4 - 8 - 16 - 31,5 - 63 (mm)
- Une balance électronique de capacité 1 kg avec une précision de 1g

- Tamiseuse électrique
- Etuve pour le séchage des granulats
- **Mode opératoire**
  - Sécher l'échantillon dans une étuve à 105 °C
  - Peser l'échantillon (la masse de l'échantillon  $M \geq 0.2 D_{\max}$ ) et ne doit pas saturer les tamis (soit 1kg pour le sable et de 2 à 4 kg pour les gros granulats)
    - Monter la colonne de tamis dans l'ordre croissant de la dimension des mailles (du bas vers le haut)
    - Verser le matériau dans le tamis du haut de la série
    - Fermer le couvercle de la colonne de tamis.
    - Secouer mécaniquement ou manuellement la colonne de tamis
    - A la fin du tamisage, peser le refus sur chaque tamis
    - Porter les résultats des pesées dans un tableau et calculer les refus particuliers et cumulés ainsi que les tamisas
    - Tracer sur un graphique la courbe de granulométrie à l'aide des résultats obtenus.
    - Calculer le module de finesse MF pour le sable
      - Le module de finesse permet de déterminer la finesse du sable, car il influence le comportement du béton. Il est égale à 1/100 de la somme des refus cumulés exprimés en pourcentage sur les tamis 0.125 ; 0.250 ; 0.5 ; 1 ; 2 ; 4

$$M_f = \frac{1}{100} \sum A_i = \frac{A_{0.16} + A_{0.315} + A_{0.63} + A_{1.25} + A_{2.5} + A_5}{100}$$

Les sables peuvent être classés en fonction de leur module de finesse en trois classes (Tableau 2.2):

**Tableau 2.2 – Classification des sables en fonction du module de finesse**

Valeur du $M_f$	Observation
$M_f = 1.8 - 2.2$	Sable à majorité de grains fins.
$M_f = 2.2 - 2.8$	Sable préférentiel
$M_f = 2.8 - 3.3$	Sable un peu grossier. Il donnera des bétons résistants mais moins maniables

### 1.1.6. Essai Micro Deval [25]

L'essai micro-Deval a pour but de déterminer dans des conditions normalisées (EN 1097-1) la résistance à l'usure des granulats par frottement mutuels en présence d'eau et d'une charge dans un cylindre en rotation.

La granulométrie de l'échantillon doit être conforme à l'une des classes granulaires types : 4-6,3 ; 6,3-10 ; 10-14 ; 25-50.

- **Matériel**

- Machine micro-Deval : La machine micro-Deval (Photo 2.1) comporte un à quatre cylindres creux en acier inox ayant un diamètre intérieur de 20 cm et une longueur utile de 15,4 cm. Ces cylindres ont une épaisseur supérieure ou égale à 3 mm. Ils sont posés sur deux arbres horizontaux soudés sur un châssis métallique tubulaire et sont aussi étanches grâce à un joint placé sur le couvercle. Un moteur assure une rotation de 100 tours par minute



**Photo 2.1 – Appareil Micro-Deval**

- Une balance de portée de 1 kg, avec une précision de 1 g
  - Tamis de 1,6 mm
  - Etuve
  - Un bac destiné à ramasser les matériaux après l'essai ;
- **Mode opératoire**
  - Sécher l'échantillon de la fraction 4/14 à l'étuve à une température de 105 °C
  - Peser 500 g de granulats de la fraction 10/14. Pour les fractions de 4 – 14 mm la masse de l'échantillon sera 500 g  $\pm$  2 g et de 10 kg  $\pm$  20 g pour les granulats de 25-50 mm.
  - Peser de charge abrasive correspondant à la fraction granulaire selon le tableau 2.3.

**Tableau 2.3 – Masse de la charge abrasive en fonction de la fraction de granulats**

Classe granulaire (mm)	Charge abrasive (g)
4 - 6.3	2000 $\pm$ 5
6.3 - 10	4000 $\pm$ 5
10 - 14	5000 $\pm$ 5

- Charger l'échantillon de gravier et la charge abrasive dans la machine
- Mettre en marche la machine qui effectuera 12000 tours soit 2 heures

- Décharger la machine et tamiser au tamis 1,6 mm
- Peser le tamisa et calculer le coefficient micro-Deval  $M_{DS}$

$$M_{DS} = \frac{m}{M} 100, (\%)$$

$M_{DS}$  - Coefficient micro-Deval, %

m – Masse du tamisa au tamis 1.6, g

M – Masse de l'échantillon, g

### 1.1.7. Essai Los Angeles : Essai de dureté [26]

L'essai consiste à déterminer la résistance à la fragmentation du matériau testé (granulats de diamètre compris entre 4 et 50 mm) par la pesée de la masse d'éléments inférieurs à 1.6 mm produite en soumettant le matériau aux chocs de boulets normalisés dans le cylindre de la machine Los Angeles (Photo 2.2) après 500 tours.



Photo 2.2 – Appareil Los Angeles

- **Matériel**

- Une machine Los Angeles : elle comporte un cylindre creux en acier de 12 mm d'épaisseur, fermé à ses deux extrémités ayant un diamètre intérieur de 711 mm et une longueur intérieure de 508 mm. Le cylindre est porté par deux axes horizontaux fixés à ses deux parois latérales, mais ils n'entrent pas à l'intérieur du cylindre. Sur toute la longueur du cylindre, on trouve une ouverture de 150 mm de largeur qui permet d'introduire l'échantillon. Au cours de l'essai, cette ouverture est fermée de façon étanche aux poussières. Un moteur assurant au tambour de la machine une vitesse de rotation comprise entre 30 et 35 tours par minute ;

- Une balance de portée de 1 kg, avec une précision de 1 g
- Tamis de 1,6 mm
- Etuve
- Un bac destiné à ramasser les matériaux après l'essai

- **Mode opératoire**

La granularité du matériau soumis à l'essai est choisie parmi les six classes fractions granulaires suivantes (4-6.3 mm ; 6.3-10 mm ; 10-14 mm ; 10-25 mm ; 16-31.5 mm et 25-50 mm).

- Sécher l'échantillon de la fraction 10/14 à l'étuve à une température de 105 °C
- Peser (M = 5000 g) de granulats de la fraction 4/14
- Introduire 11 de boulets correspondant à la fraction 4/14, selon le tableau 2.4

**Tableau 2.4 – Nombre de boulets en fonction de la fraction granulaire**

Classes granulaires (mm)	Nombre de boulets	Masse totale de la charge (g)
4 – 6.3	7	3 080
6.3 – 10	9	3 960
10 – 14	11	4 840
10 – 25	11	4 840
16 – 31.5	12	5 280
25 – 50	12	5 280

- Charger l'échantillon de gravier et la charge de boulets dans la machine
- Mettre en marche la machine qui effectuera 500 tours
- Décharger la machine et tamiser au tamis 1,6 mm
- Laver sur un de mailles de 1,6 mm,
- Sécher le refus jusqu'à masse constante
- Peser le refus séché (m)
- Calculer le coefficient Los Angeles (LA) en appliquant la formule suivante :

$$LA = \frac{M - m}{M} 100, (\%)$$

LA - Coefficient micro-Deval, %

m – Masse du refus au tamis 1,6, g

M – Masse de l'échantillon, g

### 1.1.8. Coefficient d'aplatissement [28]

La détermination du coefficient d'aplatissement A est l'un des tests permettant de caractériser la forme plus ou moins massive des granulats.

- **Matériel**

- Etuve
- Balance
- une série de tamis à mailles carrées (Photo 2.3)
- une série de grille à fentes (Photo 2.4).



**Photo 2.3 – Tamis à mailles carrées**



**Photo 2.4 - Grilles à fentes**

La correspondance entre les classes granulométriques et  $d/D$  et l'écartement des fentes  $E$  est donnée par le tableau 2.5.

**Tableau 2.5 – Correspondance entre les classes granulométriques et  $d/D$  et l'écartement des fentes**

$d/D$	$\frac{60}{80}$	$\frac{31.5}{40}$	$\frac{25}{31.5}$	$\frac{20}{25}$	$\frac{16}{20}$	$\frac{12.5}{16}$	$\frac{10}{12.5}$	$\frac{8}{10}$	$\frac{6.3}{8}$	$\frac{5}{6.3}$	$\frac{4}{5}$
$E$	40	20	16	12.5	10	8	6.3	5	4	3.15	2.5

- **Mode opératoire**
  - Peser l'échantillon tel que sa masse  $M_0 \geq 0.2 D_{\max}$  [Granulats –Sols – Ciment et Béton]
  - Tamiser l'échantillon tel les grains inférieurs à 4 mm et supérieurs à 80 soient  $M_{TR}$  pesés et écartés. La Masse  $M_R$  restante sert pour déterminer le coefficient d'aplatissement
  - Tamiser l'échantillon sur la série de tamis à mailles carrées et isoler les fractions granulaires telles qu'elles sont définies dans le tableau 3
  - Peser et retenir séparément tous les grains de fraction  $d_i/D_i$  comprise entre 4 mm et 80 mm
  - Tamiser le refus de chaque classe granulaire sur le tamis à fente d'écartement  $E$  correspondant. Le passant à travers chaque grille est pesé.
  - Calculer le coefficient d'aplatissement
  - On calcule d'abord le coefficient d'aplatissement partiel  $A_i$  de chaque classe granulaire  $d_i/D_i$  à l'aide de l'expression suivante :

$$A_i = \frac{T_i}{M_i} \cdot 100, (\%)$$

$A_i$  – Coefficient d'aplatissement partiel d'une classe granulaire

$M_i$  – Masse de la classe granulaire (g)

$T_i$  – Masse du tamisa de la classe granulaire à travers la fente d'écartement  $E$  (g)

Le coefficient d'aplatissement global peut être déterminé par la relation suivante :

$$A_{total} = \sum A_i = \frac{\sum T_i}{\sum M_i} \cdot 100, (\%)$$

- A – Coefficient d'aplatissement global, %  
A<sub>i</sub> – Coefficient d'aplatissement partiel d'une classe granulaire, %  
M<sub>i</sub> – Masse de la classe granulaire (g)  
T<sub>i</sub> – Masse du tamis de la classe granulaire à travers la fente d'écartement E (g)

$$\sum T_i \geq 0.98 \sum M_i$$

### 1.1.9. Coefficient d'absorption d'eau [20]

Les matériaux granulaires peuvent être poreux, ce qui est préjudiciable pour les bétons à l'état frais (absorbent l'eau et entraîne un défaut d'ouvrabilité) et durci (provoquent l'éclatement des bétons par effet de gel).

Le coefficient d'absorption d'eau est déterminé par la quantité d'eau absorbée par les granulats

- **Matériel**
  - Bac de conservation
  - Balance de capacité de 1 kg avec une précision de 0,1 g
  - Etuve
  - Papier absorbant
  
- **Mode opératoire**
  - Sécher un échantillon de granulats
  - Peser l'échantillon de masse sèche M<sub>S</sub>
  - Immerger l'échantillon sous l'eau pendant 24 heures
  - Retirer l'échantillon de l'eau
  - Sécher la surface de l'échantillon à l'aide de papier absorbant (les gros granulats sont séchés individuellement)
  - Peser l'échantillon humide, à surface sèche M<sub>H</sub>
  - Calculer le coefficient d'absorption d'eau Abs par la relation suivante

$$Abs = \frac{M_H - M_S}{M_S} 100, \%$$

- Abs - Coefficient d'absorption d'eau, %  
M<sub>H</sub> - Masse humide à surface sèche  
M<sub>S</sub> - Masse sèche

## 1.2. Essais sur le ciment

### 1.2.1. Masse volumique apparente [28]

La méthode de détermination de la masse volumique apparente du ciment est la même que celle utilisée pour le sable (§1.1.1)

### 1.2.2. Masse volumique absolue (Méthode du densimètre le Chatelier) [29]

La masse volumique absolue est la masse par unité de volume de la matière qui constitue le matériau, sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre des grains.

Des caractéristiques intrinsèques des matériaux telles que la résistance à la compression et le module d'élasticité sont fonctions de la masse volumique absolue.

- **Matériel**
  - Le densimètre Le Chatelier
  - Un liquide inerte vis-à-vis du ciment (alcool à brûler de préférence, à défaut l'eau).
  - Une balance de portée 100g avec une précision de 0,1g
  - Un entonnoir à long col.
  - Une tige métallique.
  - Une spatule.
  
- **Mode opératoire**
  - Sécher l'échantillon dans une étuve à 105 °C
  - Remplir le densimètre (Phot 2.5) avec un liquide inerte jusqu'au niveau zéro. Utiliser à cet effet l'entonnoir à long col pour éviter de mouiller les parois intérieures du densimètre

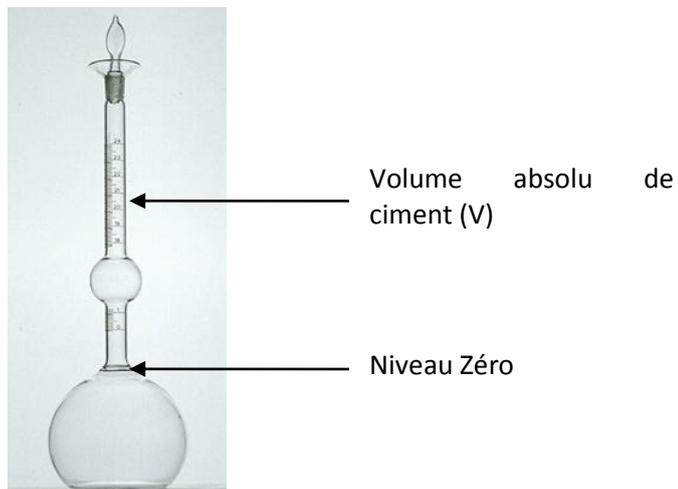


Photo 2.5 – Densimètre Le Chatelier

- Noter alors le volume initial ( $V_0 = 0$ ).
- Introduire à l'aide de la spatule 50 g de poudre, en évitant de laisser la poudre se déposer sur les parois. Si des amas se forment, désobstruer l'intérieur du densimètre à l'aide de la tige métallique.
- Noter le niveau du volume final ( $V_1$ ), c'est le volume de l'échantillon
- Répéter cette manipulation trois fois
- Calculer la masse volumique absolue à l'aide de la formule suivante

$$\rho_{abs} = \frac{M}{V}$$

$\rho_{abs}$  – Masse volumique absolue en ( $\text{g/cm}^3$ )

M – Masse de l'échantillon en g

V – Volume de l'échantillon en  $\text{cm}^3$

### 1.2.3. Détermination de la finesse par tamisage [30]

La mesure de la finesse par tamisage est un essai simple et rapide utilisé en cimenterie pour contrôler le rendement du broyeur. En effet, il permet de donner la teneur en éléments gros supérieure à  $63 \mu\text{m}$  par exemple qui doit être inférieure à 30%. Cet essai est complété par l'essai de finesse Blaine.

- **Matériel**

- Tamis de 80 ( $\mu\text{m}$ ) (N°0,08) ou 200 ( $\mu\text{m}$ )(N°0,2)
- Un récipient pour peser le ciment
- Une balance de précision de capacité 200g (0,1g)
- Une spatule
- Chronomètre

- **Mode opératoire**

- Peser 50 g de ciment
- Tamiser avec un tamis 80 (N°0,08) ou 200 (N° 0,2) ( $\mu\text{m}$ )
- Arrêter le tamisage lorsque la masse du tamisât sera inférieure à 0,5 g/mn,
- Peser le refus en gr
- Calculer le pourcentage du refus à l'aide de la formule suivante

$$R_i = \frac{M_i}{M_t} 100, \%$$

Ri – Refus en gr

Mi – Masse du refus en gr

Mt – Masse totale de l'échantillon

#### 1.2.4. Détermination de la consistance normale du Ciment [31]

Il s'agit de déterminer la quantité d'eau nécessaire à mélanger avec la poudre de ciment pour obtenir une pâte plastique et malléable ni trop molle ni trop sèche.

- **Matériel**

- Appareil, moule tronconique et sonde de Vicat
- Malaxeur
- Des récipients pour pesage du ciment et de l'eau
- Une balance de capacité de 1 kg avec une précision de 0.1 gr
- Une main écope

- **Mode opératoire**

- L'essai doit se dérouler dans une salle dont la température est de  $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$  et dont l'humidité relative est supérieure à 90%.
- Peser 400 gr de ciment
- Peser une quantité d'eau qui se situe dans le domaine des valeurs usuelles qui caractérisent la consistance normale des ciments de 24 à 30 (%) par rapport à la masse de ciment c'est-à-dire de 120 à 150 (g) d'eau
- Introduire l'eau dans le malaxeur ensuite le ciment et malaxer pendant 90 secondes à vitesse lente.
- Arrêter le malaxage pendant 15 secondes et racler la pâte collée à la paroi de la cuve du malaxeur.
- Redémarrer le malaxeur pendant 90 secondes à vitesse lente
- Préparer le moule tronconique de Vicat et le support en verre en les humidifiant à 'aide d'un chiffon humide
- Retirer la cuve du malaxeur et emplir le moule tronconique de Vicat, posé sur une plaque en verre avec la pâte de ciment, sans vibrer.
- Araser l'excès de pâte à l'aide d'une règle métallique
- Placer l'ensemble de la plaque en verre et du moule sur la platine de l'appareil de Vicat
- Ajuster l'extrémité inférieure de la sonde de Vicat au contact de la bordure du moule de Vicat et ajuster le réglet à la valeur 40 mm
- Placer la sonde au contact de la pâte en position d'attente
- Positionner le moule dans l'axe de la sonde.
- Débloquer la sonde et laisser s'enfoncer dans la pâte
- Bloquer la sonde après son arrêt (ou après 30 secondes)
- Lire sur le réglet la distance  $d$  en mm qui sépare l'extrémité inférieure de la sonde du fond du moule
  - ✓ Si  $d = 6\text{mm} \pm 1\text{mm}$ , l'essai est terminée on note la quantité d'eau utilisée en pourcent et on dit que la pâte est de consistance normale ou normalisée. Il convient de refaire l'essai avec une quantité d'eau différente jusqu'à atteindre la valeur recherchée de la consistance dans les cas suivants

- ✓ Si  $d > 7$  mm, diminuer la quantité d'eau
- ✓ Si  $d < 5$  mm, augmenter la quantité d'eau

### 1.2.5. Détermination des délais de prise du Ciment [31]

L'essai de prises est réalisé à l'aide de l'appareil et l'aiguille de Vicat

L'essai consiste à suivre la transformation de l'état de la pâte de ciment maniable et modulable jusqu'à la perte de maniabilité.

Le temps de début de prise est déterminé par le suivi de la pénétration d'une aiguille de diamètre de 1 mm dans une pâte pure de ciment de consistance normalisée jusqu'au moment où l'aiguille n'atteint plus le fond de la pastille de ciment. En continuant à perdre sa maniabilité, l'aiguille ne pénètre plus dans la pâte, cet état correspond à la fin de prise.

- **Matériel**

- Malaxeur
- Appareil de Vicat et ses accessoires (sonde et aiguille), (Figure 2.2)
- Moule tronconique avec support en verre ou métallique
- Récipient pour pesage du ciment et de l'eau
- Une balance de capacité de 1 kg avec une précision de 1 gr
- Une main écope
- Une règle métallique à araser et une truelle
- Un chronomètre.

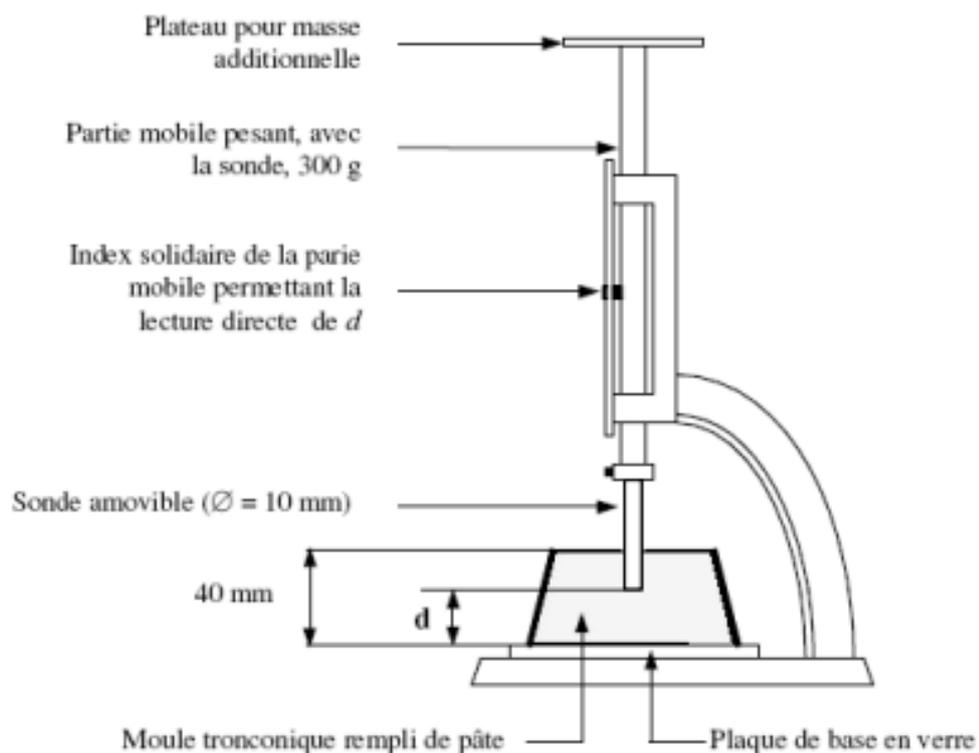
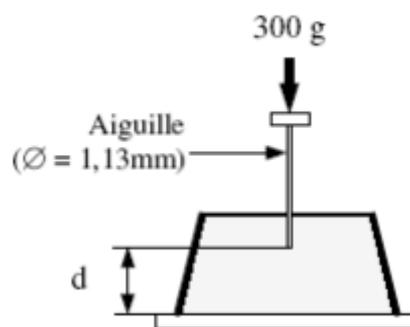


Figure 2.2 – Appareil de Vicat

- **Mode opératoire**

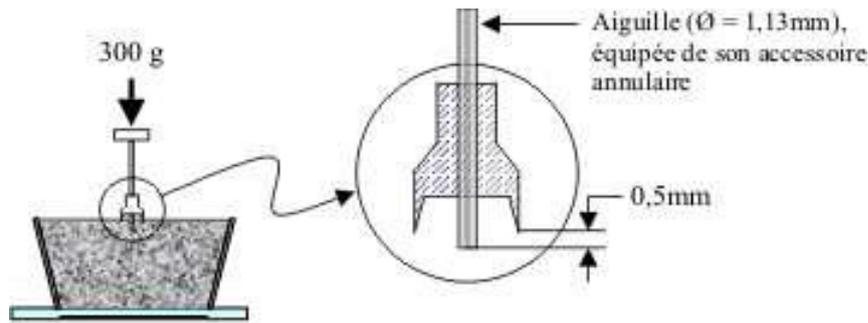
L'essai doit se dérouler dans une dans une salle, dont la température est de  $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$  et dont l'humidité relative est supérieure à 90%.

- Peser 400 gr de ciment
- Peser une quantité d'eau correspondant à la consistance normalisée
- Introduire l'eau ensuite le ciment dans la cuve du malaxeur et noter le temps  $t_0$
- Malaxer pendant 90 secondes à vitesse lente.
- Arrêter le malaxage pendant 15 secondes et racler la pâte collée à la paroi de la cuve du malaxeur.
- Redémarrer le malaxage pendant 90 secondes à vitesse lente
- Remplir le moule tronconique posé sur une plaque en verre avec la pâte de ciment, sans vibrer. Le moule et le support en verre doivent être préalablement humidifiés à l'aide d'un chiffon humide.
- Araser l'excès de pâte à l'aide d'une truelle ou d'une règle métallique par un mouvement de va et vient perpendiculairement à la surface supérieure du moule.
- Placer l'ensemble de la plaque en verre et du moule sur la platine de l'appareil de Vicat
- Abaisser l'aiguille au contact de la plaque en verre et ajuster le réglet au niveau zéro
- Placer l'aiguille au contact de la pâte en position d'attente
- Positionner le moule dans l'axe de l'aiguille.
- Débloquer l'aiguille et laisser s'enfoncer dans la pâte
- Bloquer l'aiguille après son arrêt (ou après 30 secondes)
- Lire la distance  $d$  en mm qui sépare l'extrémité inférieure de l'aiguille et le fond de la pâte. Lorsque  $d$  est égale à  $4 \pm 1$ (mm), noter le temps  $t_1$  (Figure 2.3)



**Figure 2.3 – Mesure du temps de début de prise**

- Retourner le moule et commencer la mesure du temps de fin de prise (Figure 2.4)



**Figure 2.4 – Mesure du temps de début de prise**

- Lorsque la profondeur d'enfoncement de la pointe de l'aiguille est  $< 0,5$  mm, noter  $t_2$
- Calculer les délais de prise comme suit
  - ✓ Début de prise (DP) :  $t_1 - t_0$
  - ✓ Fin de prise (FP) :  $t_2 - t_0$

### 1.2.6. Détermination des résistances mécaniques en compression et en flexion du ciment [5]

On distingue deux types d'essais de résistance mécanique des ciments

- Classe de résistance : La classe de résistance d'un ciment est la valeur minimale de résistance à la compression garantie par le fabricant. La classe de résistance est inscrite sur le sac de ciment, il existe trois classes 32,5 – 42,5 et 52,5.
- Résistance vraie : Cet essai est utilisé par les fabricants de béton et de mortier pour vérifier la classe de résistance du ciment pour diverses raisons : stockage prolongé ou dans de mauvaises conditions du ciment en vrac dans les silos ou en sacs). Parfois la résistance peut s'écarter de la classe de résistance, ce qui est acceptable mais pour des tolérances de l'ordre de  $\pm 10\%$ .

Dans les deux cas Les résistances mécaniques des ciments sont déterminées par les essais sur d'éprouvettes prismatiques de dimensions 4 x 4 x 16 cm en mortier dit "normal", à 28 jours d'âge en flexion et en compression

Le mortier normal sert à définir la classe de résistance ou la résistance vraie d'un ciment. C'est un mélange de ciment, de sable normalisé et d'eau dans des proportions définies par les normes, comme suit :

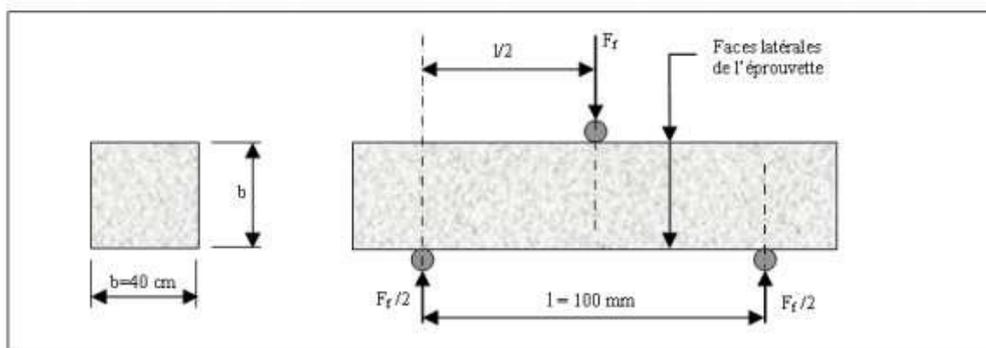
- Une partie pondérale de ciment
- Trois parties pondérales de sable normalisé, de granulométrie moyenne définie par la norme EN 191 – 1.
- Une demi-partie pondérale d'eau

- **Matériel**

- Malaxeur
- Moules 4x4x16 cm

- Table à chocs permettant d'appliquer 60 chocs par minute avec une hauteur de chute de 15 mm
  - Un bac de conservation des éprouvettes
  - Récipient
  - Une main écope
  - Truelle de maçon
  - Une balance permettant de peser à 1 g près
  - Une presse hydraulique pour essais de flexion trois points et compression
- **Mode opératoire**
    - Peser les constituants : Ciment : 450 g, eau : 250 g, le sable est fourni dans des petits sacs préalablement pesé (1350 g)
    - Nettoyage, montage et graissage des moules
    - Préparation du mortier : Le mortier normalisé est malaxé pendant 4 minutes conformément aux prescriptions de la norme EN 196.1
    - Remplir les moules en deux couches en appliquant 60 coups pour chacune
    - Araser l'excès de mortier à l'aide d'une règle métallique
    - Conserver les éprouvettes dans le moule pendant 24 heures dans une salle avec une HR > 90% et une température de 21°C.
    - Démoulage des éprouvettes 24 h après et conservation sous l'eau à 20 °C ± 1 °C jusqu'au 27ème jour pour séchage. L'essai doit être réalisé sur des éprouvettes sèches.
  - **Essai de traction par flexion :**

L'essai de traction par flexion est réalisé selon le schéma suivant (trois points) sur trois éprouvettes prismatiques 4x4x16 (cm) (Figure 2.5)



**Figure 2.5 – essai de traction par flexion sur éprouvettes en mortier**

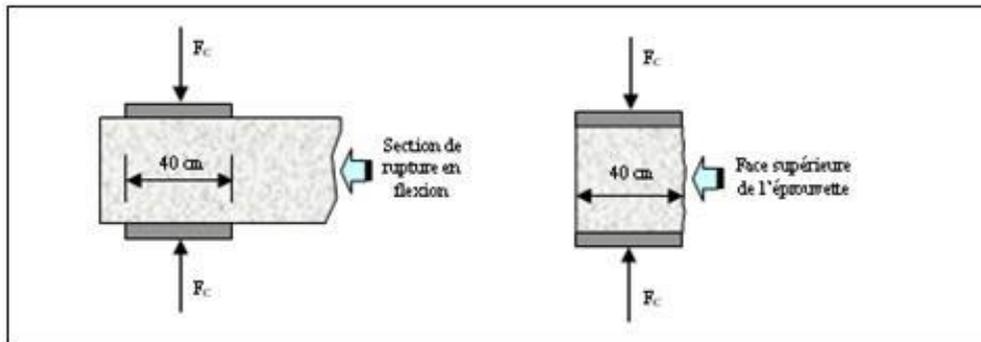
La résistance en traction par flexion est calculée par la relation suivante :

$$\sigma_f = \frac{3}{2} \frac{P \cdot L}{bh^3}, \left[ \frac{N}{\text{mm}^2} \text{ ou } MPa \right]$$

$\sigma_f$  – Contrainte de flexion en N/mm<sup>2</sup> ou MPa (1N/mm<sup>2</sup> = 1 MPa)  
P – Charge de rupture en N  
L – Distance entre appuis (l = 100 mm)  
b – Largeur et hauteur de l'éprouvette (b = 40 mm)

- **Essai de compression**

L'essai de compression est réalisé selon le schéma suivant sur six demi-éprouvettes récupérées après l'essai de traction par flexion (Figure 2.6)



**Figure 2.6 – Essai de compression sur éprouvettes en mortier**

La résistance en compression est calculée par la relation suivante

$$\sigma_c = \frac{P}{S}, \quad \left[ \frac{N}{mm^2} \text{ ou } MPa \right]$$

$\sigma_c$  – Contrainte de compression en N/mm<sup>2</sup> ou MPa (1N/mm<sup>2</sup> = 1 MPa) F – Charge de rupture en N  
S – Surface de chargement (S = b x b = 40 x 40= 1600 mm<sup>2</sup>)

### 1.3. Essais sur béton

#### 1.3.1. Essai de consistance du béton au cône d'Abrams [9]

L'essai d'affaissement au cône d'Abrams est un essai pratique qui permet de mesurer la maniabilité du béton frais aussi bien en laboratoire que sur chantier. Il s'agit de mesurer la distance de l'affaissement du volume de béton introduit dans un cône après avoir soulevé ce dernier.

- **Matériel** (Photo 2.6)
  - Cône d'Abrams : de dimensions D = 20cm, d = 10cm et h = 30cm.
  - Entonnoir
  - Plaque métallique
  - Une tige de piquage en acier de 16mm de diamètre et de longueur 60 cm

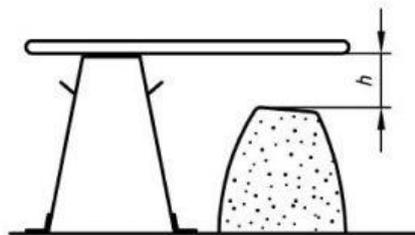
- Une règle graduée
- une main écope
- Une truelle.



**Photo 2.7 - Matériel requis pour l'essai au cône d'Abrams.**

### **Mode opératoire**

- Humidifier le cône et la plaque métallique support.
- Placer le cône sur la plaque
- Remplir de béton le cône à l'aide de la main écope
- A l'aide de la main écope, remplir de béton le cône d'Abrams en trois couches. Piquer chaque couche 25 fois avec la tige de piquage
- Retirer l'entonnoir et araser la surface de béton à l'aide de la truelle.
- Soulever verticalement le cône en 5 à 10 s
- Mesurer l'affaissement (h) en déterminant la différence entre la hauteur du moule et le point le plus haut du béton affaissé (Figure 2.7)



**Figure 2.7 – Mesure de la hauteur d'affaissement**

### **1.3.2. Essai de résistance en compression sur béton [32]**

La résistance en compression permet de vérifier la qualité du béton. Le test est réalisé sur des éprouvettes cylindriques ou cubiques à 28 d'âge [33]

Il s'agit de placer une éprouvette en béton entre les plateaux d'une presse et appliquer une charge progressivement jusqu'à la rupture.

L'essai de compression a été réalisé sur trois éprouvettes cubiques à chaque échéance de 2,7 et 28 jours.

- **Matériel**

- Une presse de compression
- Malaxeur
- Moules cubiques de dimensions 10x10x10 (cm)
- Table vibrante
- Bacs de conservation des éprouvettes

- **Mode opératoire**

- Confection des éprouvettes selon les normes EN 12350-1 [34] et EN 12390-2 [35]
- Placer et centrer l'éprouvette sur le plateau inférieur de l'éprouvette
- Ramener le plateau supérieur à la surface de l'éprouvette
- Appliquer la charge d'une manière continue jusqu'à rupture de l'éprouvette, la vitesse de chargement doit être constante pendant toute la durée de l'essai et égale à 0.5 MPa/s,
- Noter la charge de rupture en N
- Calculer la résistance en compression ( $R_C$ )

$$R_C = \frac{P}{S}, \left[ \frac{N}{mm^2}, MPa \right]$$

$R_C$  - Résistance en compression

P - Charge de rupture

S- Surface de compression de l'éprouvette ( $S = 10^4 \text{ mm}^2$ )

## 2. LES MATERIAUX

### 2.1. Le ciment

Le ciment utilisé dans cette étude est un ciment de type CEM II/B – L R de, c'est un ciment portland composé obtenue conforme à la norme algérienne NA 442 [4], provenant de la cimenterie de Biskra.

La composition chimique et minéralogique du ciment ainsi que certaines caractéristiques physiques, sont fournies par le laboratoire de la cimenterie de Biskra (\*) et présentés dans les tableaux (2.6, 2.7 et 2.8).

**Tableau 2.6. Composition Chimique du Ciment (%) \***

S <sub>i</sub> O <sub>2</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	CaO libre	Cl <sup>-</sup>
21.5	65.83	3.29	5.38	1.77	0.82	1.23	0.035

**Tableau 2.7. Composition Minéralogique du Ciment (%) \***

C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF
62.14	16.15	8.32	9.81

**Tableau 2.8. Caractéristiques Physico - mécaniques du ciment**

Masse volumique apparente, kg/m <sup>3</sup>	1100	
Masse volumique absolue, kg/m <sup>3</sup>	3160	
Consistance, %	26	
Refus au tamis 80 µm, %	12	
Début de prise, heure et minute	1H45	
Fin de prise, heure et minute	3H32	
Classe de résistance du ciment (CEM II)*	42.5	
Résistance vraie à la compression (MPa)	2 jours	22.1
	7 jours	33.35
	28 jours	48

\*Informations fournies par la cimenterie

## 2.2. L'adjuvant

L'adjuvant utilisé est un superplastifiant, haut réducteur d'eau pour béton prêt à l'emploi de type Sika® ViscoCrete®-4032 RMX [36]

Sika®ViscoCrete®-4032 RMX a été développé spécifiquement pour l'adjuvantation des bétons courants, en centrale de béton prêt à l'emploi. Il permet la confection de bétons de consistance S2 à S4.

## 2.3. Les granulats

Les sables utilisés dans cette étude sont de deux natures différentes, le premier est un sable naturel, roulé de dune, siliceux et fin de module de finesse 1,68. Le deuxième est un sable concassé, de roche calcaire de granulométrie grossière et d'un module de finesse de 3,33.

Le gravillon et le gravier utilisé sont des granulats concassés, de même nature minéralogique que le sable concassé.

### 2.3.1. Analyses granulométriques

Les analyses granulométriques des différents granulats sont présentées sur la figure 2.8.

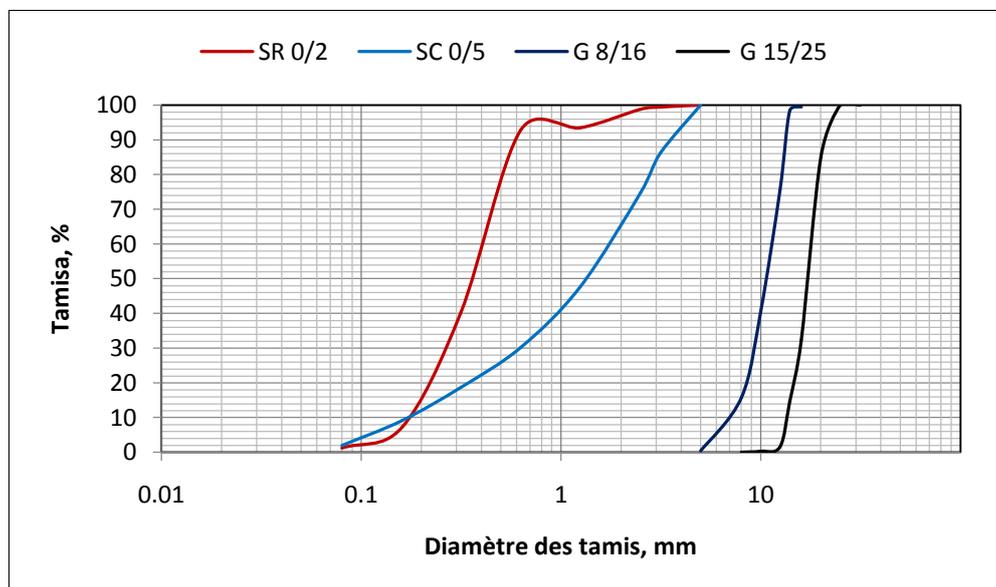


Figure 2.8 – Courbes granulométriques des granulats

### 2.3.2. Caractéristiques physiques des granulats

Les principales caractéristiques des granulats sont données dans le tableau 2.9.

Tableau 2.9. Caractéristiques Physiques et Mécaniques des granulats

Caractéristiques	Unité	Sable Roulé	Sable Concassé	Gravillon	Gravier
Masse volumique apparente	Kg/m <sup>3</sup>	1481	1587	1425	1392
Masse volumique réelle	Kg/m <sup>3</sup>	2610	2840	2750	2740
d/D	-	0/2	0/5	8/16	15/25
Module de finesse	-	1.68	3.33	-	-
Equivalent de sable	%	89.33	83.18	-	-
Propreté	%	-	-	0.1	0.5
Absorption d'eau	%	-	-	3.33	1.67
Essai Los-Angeles (4/14)	%	-	-	28	-
Essai Micro Deval (4/14)	%	-	-	95	-
Coefficient d'Aplatissement	%	-	-	3.76	19.10

## 2.4. L'eau

L'eau utilisée dans cette étude est l'eau du réseau public (contrôlée)

### 3. CONCLUSION

La caractérisation des matériaux notamment des gros granulats a permis de tirer quelques enseignements :

D'après la valeur de l'équivalent de sable donnée au tableau 2.9, le sable roulé est très propre avec absence presque totale de fines argileuses : risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton, qu'il faudrait rattraper par une augmentation du dosage en eau, en superplastifiant ou par addition de fines

Le sable concassé est propre, à faible teneur en fines convenant pour les bétons de haute qualité

La qualité des gros granulats est moyenne à faible selon La valeur de Los Angeles (LA) obtenue sur la fraction 8/14 par rapport à la classification donnée au tableau 2.10.

**Tableau 2.10 – Classification des granulats selon leur résistance à la fragmentation par chocs et par frottements réciproques [37]**

Valeurs de coefficient Micro Deval en présence de l'eau	Appréciation
< 10	Très bon à bon
De 10 à 20	Bon à moyen
De 20 à 35	Moyen à faible
> 35	Médiocre

De même, l'essai Micro Deval qui permet de déterminer la résistance à l'usure par le frottement réciproque des éléments d'un granulat, réalisé sur la même fraction (8/14) a donnée une grande valeur (90%) ce confirme la faible qualité des gros granulats

Le coefficient d'aplatissement de la fraction 15/25 (19,10 %) est supérieur à celui de la fraction 8/16 (3,76 %). En effet la fraction 15/25 contient une quantité de grains aplatis plus importante.

Le chapitre suivant sera consacré à la mise en place des compositions du béton ainsi que les essais d'étude.

**CHAPITRE 3 - FORMULATION ET CARACTERISATION  
DES BETONS**

# CHAPITRE 3 - FORMULATION ET CARACTERISATION DES BETONS

## 1. INTRODUCTION

Le béton est un mélange dont la composition influence ses propriétés; mais si les caractéristiques attendues sont la plupart du temps bien définies, la mise au point d'un béton approprié peut s'avérer plus délicate.

- Plusieurs méthodes de formulation du béton existent ((Bolomey, Abrams, Dreux/Gorisse, Faury, Valette, Joisel, etc...)). Cependant, quelque soit la méthode utilisée pour la formulation du béton, il est souvent nécessaire d'apporter des ajustements pour satisfaire les caractéristiques du béton. C'est la raison pour laquelle la démarche permettant d'aboutir à une composition appropriée comporte le plus souvent deux phases :

- La première phase consiste à approcher une composition par une des méthodes de formulation du béton

- La deuxième phase consiste à ajuster expérimentalement cette formulation en fonction des résultats obtenus.

## 2. FORMULATION DU BETON D'ETUDE

La plupart des méthodes de formulation du béton s'appuient sur deux principales caractéristiques du béton :

- Caractéristique du béton à l'état frais : la principale caractéristique du béton à l'état frais est son ouvrabilité caractérisée par l'affaissement au cône d'Abrams

- Caractéristique du béton à l'état durci : La résistance mécanique en compression est un paramètre capital.

Dans cette étude qui s'inscrit dans le cadre d'une collaboration avec une centrale à béton dans la région d'Annaba, en plus des critères d'ouvrabilité et de résistance, deux autres paramètres ont été posés

- Béton pompable

- Proposer une composition la plus économique

La méthode de formulation retenue est celle de Dreux, la plus utilisée [38]

### 3. EXEMPLE DE FORMULATION DU BETON

#### 3.1 Première composition

On présente un exemple détaillé de la composition du béton mais qui sera modifiée dans la suite en fonction des critères de l'ouvrabilité, de l'homogénéité) et de la résistance en compression.

L'homogénéité du béton sera appréciée visuellement par l'observation de l'absence de ségrégation et de ressuage ainsi que la qualité de l'enrobage des gros granulats

#### 3.2. Critères imposés par les clients de la centrale à béton

- Béton fluide (Classe d'ouvrabilité du béton: S4) : On a visé une valeur de 12 cm car l'abaque de Dreux est limité à 12 cm. L'augmentation de l'ouvrabilité du béton sera garantie par l'emploi de superplastifiant
- Résistance du béton à 28 jours :  $f_{c28} = 25$  MPa
- Béton pompable
- Composition du béton économique
  - o Dosage en adjuvant à 1% maximum
  - o Dosage en ciment 375 kg/m<sup>3</sup> maximum
  - o Rapport E/C (0,45 – 0,55)

Les matériaux sont fournis par la centrale

- Type et classe de résistance du ciment : CEM II 42,5
- Sable concassé S<sub>1</sub> (0/5),  $M_{f1} = 3,33$
- Sable roulé S<sub>2</sub> (0/2) :  $M_{f2} = 1,68$
- Gravillon : 8/16, concassé,
- Gravier 15/25
- Adjuvant superplastifiant : SIKA Viscocrete®4032 RMX

#### 3.3. Les étapes de calcul

- Détermination du rapport C/E
- Détermination des dosages en ciment C et en eau E
- Détermination des pourcentages des granulats
- Estimation de la compacité du béton
- Détermination des volumes des granulats
- Détermination des masses des granulats
- Correction

**Remarque :** Dans un premier temps on n'a pas introduit la fraction de gravier 15/25, en raison de la limitation de D<sub>max</sub> à 20 mm pour garantir la propriété de pompabilité du béton

- Majoration de la résistance moyenne du béton à 28 jours de 4 MPa (NA 16002) [39]

$$\sigma'_{28} = f_{c28} + 4 = 25 + 4 = 29 \text{ MPa}$$

$f_{c28}$  - résistance minimale en compression du béton

### 3.3.1. Détermination du rapport C/E

$$\sigma'_{28} = G' \sigma'_{vc} (C/E - 0,5)$$

$\sigma'_{28}$  = Résistance moyenne en compression du béton à 28 jours en MPa (29 MPa)

$\sigma'_{vc}$  = Résistance vraie du ciment à 28 jours en MPa ( $\sigma'_{vc} = 48 \text{ MPa}$ )

C = Dosage en ciment en kg pour 1 m<sup>3</sup> de béton

E = Dosage en eau total sur matériau sec en litre par 1 m<sup>3</sup> de béton

G' = Coefficient qui tient compte de la qualité des granulats (Tableau 3.1)

**Tableau 3.1** - Coefficient qui tient compte de la qualité des granulats

Qualité des granulats	Dimension D des granulats		
	Fins (D ≤ 16 mm)	Moyen (25 ≤ D ≤ 40 mm)	Gros (D ≥ 63 mm)
Excellente	0.55	0.60	0.65
Bonne, courante	0.45	0.50	0.55
Passable	0.35	0.40	0.45

$D_{\max} = 16 \text{ mm}$

Qualité du granulat courante

$$G = 0,45$$

$$\sigma'_{28} = G' \sigma'_{vc} (C/E - 0,5)$$

$$C/E = \sigma'_{28}/G' \sigma'_{vc} + 0,5$$

$$C/E = 29/(0,45 \times 48) + 0,5$$

$$C/E = 1,84$$

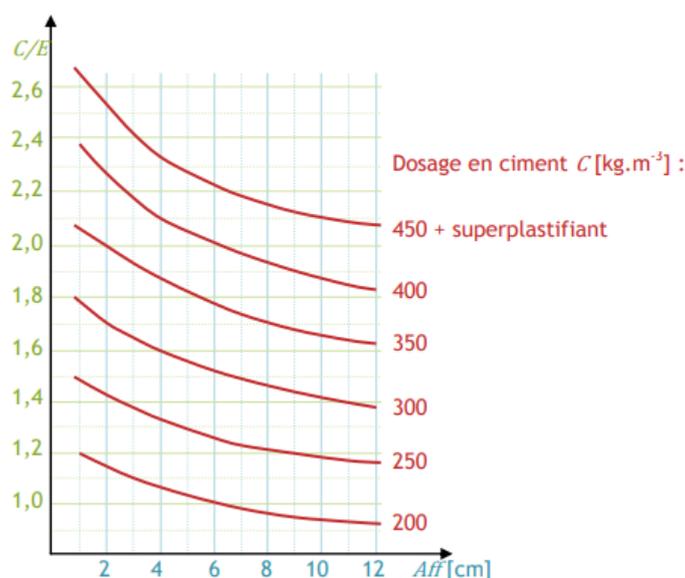
$$E/C = 0,54$$

### 3.3.2. Détermination des dosages en ciment (C) et en eau (E)

- **Détermination du dosage en ciment**

Le dosage en ciment est déterminé à l'aide de l'abaque de Dreux donné par la figure 1.1 en fonction :

- de l'affaissement du béton ( $A = 12 \text{ cm}$ )
- du rapport  $C/E = 1,84$



**Figure 3.1** – Détermination du dosage en ciment en fonction du rapport C/E et de l'affaissement

L'abaque indique un dosage de l'ordre  $400 \text{ kg/m}^3$  mais pour satisfaire le paramètre économique exigée par le cahier de charges de la centrale à béton, on prendra 375

$$C = 375 \text{ kg /m}^3$$

- **Détermination du dosage en eau**

$$C/E = 1,84$$

$$C = 375 \text{ kg /m}^3$$

$$E = \frac{375}{1.84} = 204 \text{ kg /m}^3$$

- **Correction du dosage en eau en fonction de  $D_{\max}$**

Lorsque  $D_{\max}$  est différent de 25 mm, le tableau 1.2 donne les corrections à faire sur le dosage en eau calculé

**Tableau 3.2 – Correction du dosage en eau en fonction de  $D_{max}$**

Dimension maximale des granulats ( $D_{max}$ en mm)	10	12.5	16	20	25	31.5	40	50
Correction sur le dosage en eau (en %)	+ 9	+ 6	+ 4	+ 2	- 0	- 2	- 4	- 6

Pour  $D_{max} = 15$  mm, la correction est de + 4 % :  $E_c = 204 \times 1,04 = 212 \text{ kg /m}^3$   
 $E_C = 212 \text{ kg /m}^3$ ,

On prendra  $E = 180 \text{ kg /m}^3$  mais pour satisfaire le paramètre le cahier de charges exigé par la centrale à béton.

### 3.3.3. Détermination des pourcentages des granulats

- Détermination des coordonnées des points O, A et B de la courbe de référence OAB

- $X_O = 0$  et  $Y_O = 0$  %
- $X_B = D_{max}$  et  $Y_B = 100\%$
- $X_A = ?$  et  $Y_A = ?$

Si  $D_{max} \leq 20$  mm, l'abscisse  $X_A = D_{max}/2$ :  **$D_{max} = 16$ ,  $X_A = 8$**

$$Y_A = 50 - \sqrt{D_{max}} + K_c + K_s + K_p$$

- $K_C$  – Coefficient donné par le tableau 1.3 qui est fonction de la forme des granulats, du mode de vibration et du dosage en ciment

**Tableau 3.3 - Valeurs du coefficient  $K_c$  en fonction de la forme des granulats, du mode de vibration et du dosage en ciment**

Vibration		Faible		Normale		Puissante	
Forme des granulats (du sable en particulier)		Roulé	Concassé	Roulé	Concassé	Roulé	Concassé
Dosage en Ciment	400 + Fluid	- 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

$C = 375 \text{ kg/m}^3$   
 Béton très plastique  
 Sable concassé et roulé

Pour le Sable Roulé :  $K_{CSR} = \text{entre } +2 \text{ et } +4$  ( $K = +3$ )

Pour le Sable Concassé  $K_{CSC}$  entre +2 et 0 ( $K = +1$ )

$$K_C = (+3 + 1)/2 = +2$$

$$K_c = +2$$

- **K<sub>s</sub>** – Coefficient correcteur qui tient compte de la granulométrie du sable

$$K_s = 6 M_f - 15 = 6 \cdot 2.5 - 15 = 0$$

$$K_s = 0$$

- **K<sub>p</sub>** - Correction supplémentaire si le béton est indiqué pompable :

Béton pompable : **K<sub>p</sub> = + 5 à + 10**

On prendra **K<sub>p</sub> = + 7** (Valeur moyenne)

$$Y_A = 50 - \sqrt{D_{max}} + K_c + K_s + K_p = 50 - \sqrt{16} + 2 + 0 + 7 = 55$$

$$Y_A = 55 \% \quad \text{et} \quad X_A = 8 \text{ mm}$$

- **Détermination graphique des pourcentages granulats** (Figure 3.2)
  - Tracer sur un graphique de Dreux les courbes des granulats
  - Tracer la courbe de référence OAB
  - Relier le point correspondant à 95% de tamis de la première courbe (sable) au point correspondant à 5 % de tamis de la courbe suivante. Relier les autres courbes de la même façon.

Les points de croisement des segments des droites reliant les point des tamis et la courbe de référence OAB, projetés sur l'axe des ordonnées permet de déterminer les pourcentages de chaque faction granulaire

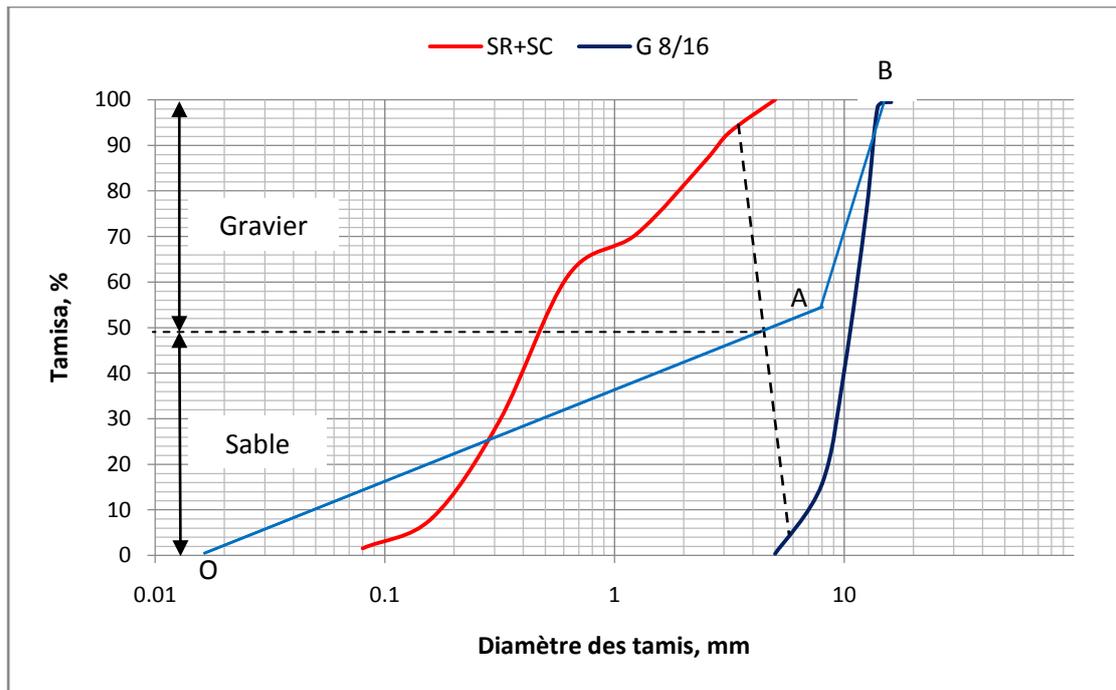


Figure 3.2 - Détermination des pourcentages du sable et du gravier par la méthode de Dreux

- **Pourcentages de chaque granulat**

- Sable mélange : 49%

Détermination des % de chaque sable par la méthode d'Abrams pour un module de finesse moyen de 2,5

$$S_1 = \frac{M_f - M_{f2}}{M_{f1} - M_{f2}} = \frac{2,5 - 1,68}{3,33 - 1,68} \cdot 100 = 50 \%$$

$$S_2 = \frac{M_{f1} - M_f}{M_{f1} - M_{f2}} = \frac{3,33 - 2,5}{3,33 - 1,68} \cdot 100 = 50 \%$$

- Sable de dune:  $SD = \frac{50 \cdot 49}{100} = 24,5 \%$
- Sable de carrière :  $SC = \frac{50 \cdot 49}{100} = 24,5 \%$

- Gravier : 51 %

### 3.3.4. Estimation du coefficient de compacité $\gamma$

Le coefficient de compacité  $\gamma$  estimé à l'aide du tableau 3.4, qui permet de déterminer la quantité des granulats. La compacité  $\gamma$  est définie comme le rapport entre le volume de solide et le volume total du béton ( $1 \text{ m}^3$ )

$$\gamma = \frac{V_s}{V_b} = \frac{V_c + V_g + V_G}{1000}$$

**Tableau 3.4 – Valeurs du coefficient de compacité  $\gamma$**

Consistance	serrage	Coefficient de compacité $\gamma$						
		$D_{max}=5$	$D_{max}=10$	$D_{max}=12,5$	$D_{max}=20$	$D_{max}=31,5$	$D_{max}=50$	$D_{max}=80$
Molle	Piquage	0,750	0,780	0,795	0,805	0,810	0,815	0,820
	Vibration faible	0,755	0,785	0,800	0,810	0,815	0,820	0,825
	Vibration normale	0,760	0,790	0,805	0,815	0,820	0,825	0,830
Plastique	Piquage	0,760	0,790	0,805	0,815	0,820	0,825	0,830
	Vibration faible	0,765	0,795	0,810	0,820	0,825	0,830	0,835
	Vibration normale	0,770	0,800	0,815	0,825	0,830	0,835	0,840
	Vibration puissante	0,775	0,805	0,820	0,830	0,835	0,840	0,845
Ferme	Vibration faible	0,775	0,805	0,820	0,830	0,835	0,840	0,845
	Vibration normale	0,780	0,810	0,825	0,835	0,840	0,845	0,850
	Vibration puissante	0,780	0,815	0,830	0,840	0,845	0,850	0,855

Ces valeurs sont convenables pour des granulats roulés sinon il conviendra d'apporter une correction: sable roulé et gravier concassé (-0,01) ; sable et gravier concassés (-0,03)

- **Valeur de  $\gamma$  avant correction**

$$\left. \begin{array}{l} \text{Béton plastique} \\ \text{Vibration normale} \\ D_{max} 16 \end{array} \right\} \gamma = 0,800 - 0,810 = 0,805$$

$$\gamma = \frac{0,800 - 0,810}{2} = 0,805$$

- Première correction : ( $c_1$ ) de la valeur de  $\gamma$  de (- 0,03) car le sable et les graviers sont concassés (la quantité de sable roulé est mineure)

$$c_1 = - 0,03$$

- Deuxième correction : ( $c_2$ ) de la valeur de  $\gamma$  de (0) car les granulats sont ordinaires (ils ne sont pas légers)

$$c_2 = 0$$

- Troisième correction : ( $c_3$ ) (de la valeur de  $\gamma$ ) si le dosage en ciment est différent de 350 kg/m<sup>3</sup>

Dosage en ciment : 375 kg/m<sup>3</sup>

$$(c_3) = \frac{C-350}{5000} = \frac{375-350}{5000} = 0,005$$

$$c_3 = 0,005$$

- Valeur de  $\gamma$  corrigée :  $\gamma = 0,805 - 0,03 + 0,005 = 0,78$

$$\gamma = 0,78$$

### 3.3.5. Détermination des volumes des granulats

$$\gamma = \frac{V_c + V_g + V_G}{1000} - V_c$$

$$V_c + V_g + V_G = 1000 \cdot \gamma - V_c$$

- Calcul du volume de ciment

$$V_c = \frac{m_c}{\rho_c} = \frac{375}{3,1} = 121 \text{ l}$$

$m_c$  – dosage en ciment (375 kg)

$\rho_c$  – Masse volumique du ciment (3,1)

$$V_c = 121 \text{ l}$$

- Détermination du volume des granulats (sable et gravier)

$$V_c + V_s + V_g + V_G = 1000 \cdot \gamma - V_c$$

$$V_s + V_g + V_G = (1000 \cdot 0,78) - 121$$

$$V_s + V_g + V_G = 659 \text{ l}$$

- Détermination des volumes de chaque granulat

- SR = 24,5 %
- SC = 24,5%
- Gravier 8/16 = 51 %

- Sable roulé (SR = 24,5 %)

$$V_{SR} = \frac{24,5 \cdot 659}{100} = 161,455 \text{ l}$$

$$V_{SR} = 161,455 \text{ l}$$

- Sable concassé (SC = 24,5%)

$$V_{SC} = \frac{24,5 * 659}{100} = 161,455 \text{ l}$$

$$V_{SC} = 161,455 \text{ l}$$

- Gravier : 8/16 (g = 51 %)

$$V_g = \frac{51 * 659}{100} = 159,96 \text{ l}$$

$$V_g = 336,09 \text{ l}$$

### 3.3.6. Détermination des masses de chaque granulat

On peut calculer la masse des granulats à l'aide de la formule suivante :

$$\rho = \frac{m}{V} \rightarrow m = V \times \rho$$

- Sable roulé ( $V_{SR} = 161,455$  et  $\rho = 2,61 \text{ kg/l}$ )

$$m_{SR} = 161,455 * 2,61 = 421 \text{ kg}$$

$$m_s = 421 \text{ kg}$$

- Sable concassé ( $V_{SC} = 161,455 \text{ l}$  et  $\rho = 2,84 \text{ kg/l}$ )

$$m_{SC} = 161,455 * 2,84 = 458 \text{ kg}$$

$$m_g = 458 \text{ kg}$$

- Gravier ( $V_G = 336,09 \text{ l}$  et  $\rho_G = 2,74 \text{ kg/l}$ )

$$m_G = 336,09 * 2,74 = 921 \text{ kg}$$

$$m_G = 921 \text{ kg}$$

Le tableau 3.5 présente le récapitulatif de la composition du béton

**Tableau 3.5 – Récapitulatif des dosages des constituants pour 1m<sup>3</sup> de béton**

Matériaux	Ciment	Eau	Sable roulé	Sable concassé	Gravier 8/16		Masse volumique théorique	Masse volumique expérimentale
					8/16	15/25		
Dosages pour 1m <sup>3</sup>	<b>375</b>	<b>180</b>	<b>421</b>	<b>458</b>	<b>921</b>	<b>0</b>	<b>2355</b>	<b>2460</b>

### 3.3.7. Correction de la formulation

Il s'agit de vérifier si les quantités de granulats utilisés permettent d'obtenir 1 m<sup>3</sup> de béton, ce qui peut être vérifiée par la relation suivante :

$$\rho_{th} - \rho_{ex}$$

Si  $\rho_{th} - \rho_{ex} = 0$ , cela implique que le volume réel du mélange sera égal à 1m<sup>3</sup> aucune correction n'est à faire.

Si  $\rho_{th} - \rho_{ex} < 0$ , cela implique que le volume réel du mélange est supérieur à 1m<sup>3</sup> et il convient de réduire les quantités de granulats au prorata de leurs pourcentages.

Si  $\rho_{th} - \rho_{ex} > 0$ , cela implique que le volume réel du mélange est inférieur à 1m<sup>3</sup> et il convient d'augmenter les quantités de granulats au prorata de leurs pourcentages.

- **Calcul de  $\rho_{th} - \rho_{ex}$**

$$\rho_{th} - \rho_{ex} = 2355 - 2460$$

$$\rho_{th} - \rho_{ex} = - 105 \text{ kg/m}^3$$

Etant vérifiée que  $\rho_{th} - \rho_{ex} < 0$ , cela implique que le volume réel du mélange est supérieur à 1m<sup>3</sup> et il convient de réduire les quantités de granulats au prorata de leurs pourcentages.

- **Calcul de la masse total à corriger ( $M_x$ )**

$$M_x = 1000 (\rho_{th} - \rho_{ex}), \text{ en kg}$$

$M_x$  – Masse total à corriger

$\rho_{th}$  – Masse volumique théorique

$\rho_{ex}$  – Masse volumique expérimentale

$$M_x = 1000 * (2355 - 2460)$$

$$M_x = -105 \text{ kg}$$

- **Calcul de la masse à corriger sur chaque granulat**

$$M_c = \frac{M_x * M}{M_t}$$

$M_c$  – Masse à corriger sur chaque granulat

$M_x$  – Masse total à corriger

$M$  – Masse de chaque granulat avant correction

$M_t$  – Masse total des granulats

- **Calcul de la masse totale des granulats**

$$M_t = \Sigma (M_{SR} + M_{SC} + M_G)$$

$$M_t = 421 + 458 + 921$$

$$M_t = 1800 \text{ kg}$$

$m_{SR}$  – Masse du sable roulé

$m_{SC}$  – Masse du sable concassé

$m_G$  - Masse du gros granulat

- **Calcul des quantités de granulats à soustraire ( $M_c$ )**

- Sable roulé :  $M_{C\ SR} = \frac{M_x * m_{SR}}{M_G} = \frac{105 * 421}{1800} = 25 \text{ kg}$

- Sable concassé :  $M_{C\ SC} = \frac{M_x * m_{SC}}{M_G} = \frac{105 * 458}{1800} = 26 \text{ kg}$

- Gravier 8/16 :  $M_{C\ G} = \frac{M_x * m_G}{M_G} = \frac{105 * 921}{1800} = 54 \text{ kg}$

Le tableau 3.6 présente le récapitulatif des corrections effectuées après l'essai d'étude.

**Tableau 3.6** – Récapitulatif des corrections effectuées sur les dosages en granulats

Granulats	Masse avant correction	Quantité à enlever	Masse après correction
Sable Roulé	421	- 25	396
Sable concassé	458	- 26	432
Gravier 8/16	921	- 54	867

Le tableau 3.7 présente le récapitulatif de la composition du béton après correction

**Tableau 3.7 – Récapitulatif des dosages des constituants après correction**

<b>Matériaux</b>	Ciment	Eau	Sable roulé	Sable concassé	Gravier 8/16
Kg/m <sup>3</sup>	<b>375</b>	<b>180</b>	396	<b>432</b>	<b>867</b>

#### 4. OPTIMISATION DES FORMULATIONS

La formulation du béton répondant aux critères annoncés a été réalisée en deux phases. Une première phase basée sur l'approche de la composition du béton par la méthode de Dreux. Alors que la deuxième phase est essentiellement réalisée par des ajustements sur les dosages des gros granulats, de l'eau et du superplastifiant selon les résultats expérimentaux obtenus.

##### 4.1. Première phase de formulation du béton

La première phase regroupe sept compositions présentées au tableau 8

**Tableau 3.8 – Compositions préliminaires du béton**

<b>Compositions</b>		A	B	C	D	E	F	G
<b>Constituants</b>								
<b>Ciment</b>		375	400	400	375	375	375	375
<b>Eau</b>		180	200	200	200	200	200	216
<b>Sable de dune</b>	Kg/m <sup>3</sup>	421	430	749	424	424	367	367
<b>Sable de carrière</b>		458	200	116	463	463	652	652
<b>Gravier 8/16</b>		921	181	246	924	739	1119	1119
<b>Gravier 15/25</b>		0	992	992	0	184	0	0
<b>SP</b>		%	0	0	0.5	0	0	0.5
<b>Affaissement</b>	cm	0	3	9	6	6	2	3
<b>Observation</b>	-	Ferme Hétérogène	Ferme	Plastique Hétérogène	Plastique	Plastique	Ferme	Ferme Hétérogène Ségrégation

L'analyse des compositions de la première phase montrent que plusieurs facteurs influencent l'ouvrabilité du béton ce qui est normale mais aussi sur l'homogénéité. Ainsi le gravier 15/25 entraîne un défaut d'ouvrabilité et l'absence ou un faible dosage en sable de dune (plus cher que le sable de carrière) donne un béton maigre (difficile à pomper). C'est pourquoi, il était nécessaire de limiter le dosage en gravier 15/25 d'une part et d'optimiser le dosage en eau et en adjuvant d'autre part.

## 4.2. Deuxième phase de formulation du béton

La deuxième phase regroupe 4 compositions présentées au tableau 3.9.

**Tableau 3.9 – Compositions finales des bétons**

Compositions		B.I	B.II	B.III	B.IV	
Constituants						
Ciment	kg/m <sup>3</sup>	375	375	375	375	
Eau		200	200	185	185	
E/C	-	0.53	0.53	0.49	0.49	
Sable de dune	kg/m <sup>3</sup>	424	424	424	424	
Sable de carrière		463	463	463	463	
Gravier 8/16		924	785	785	693	
Gravier 15/25		0	139	139	231	
G/S	-	1,04	1,04	1,04	1,04	
SP	%	0,5	0,8	0,8	0,8	
	kg/m <sup>3</sup>	1,875	3	3	3	
Affaissement	cm	18	23	18	18	
$\sigma_c$	2j	MPa	15.4	15.02	22.45	20.3
	7j		26.65	24.75	31	29
	28j		31.4	33.2	38.4	32.45
Prix du m <sup>3</sup>	DA	4795.02	5149.15	5140,82	5127,01	
Observation	-	Classe d'ouvrabilité S4 – Homogène et gras				

## 5. CARACTERISATION DES BETONS ET DISCUSSION DES RESULTATS

### 5.1. La première formulation (B.I)

La première composition (I) (Photo 3.1) ne contenant pas la fraction de gravier 15/25 pour limiter  $D_{max} < 20$  mm.



**Photo 3.1** – Affaissement important mesuré sur la composition B.I  
(Sans la fraction 15/25)

Le béton I est caractérisé par un affaissement de 18 cm requis pour les bétons pompables, un aspect homogène du béton frais (Photo 3.1) et une résistance en compression à 28 jours de 31 MPa. Il est le plus économique.

## 5.2. La deuxième formulation (B.II)

Dans le but d'améliorer la résistance en compression et pour intégrer la fraction 15/25 pour répondre à l'exigence de la centrale à béton, on a introduit 15 % de cette fraction dans la première composition en réduisant la même quantité de la fraction 8/16, ce qui a entraîné une perte d'ouvrabilité : le béton était ferme (Photo 3.2.a).

L'augmentation du dosage en superplastifiant de 0,5 à 0,8 (%) était nécessaire et a permis de rattraper l'ouvrabilité perdue et même de l'améliorer jusqu'à un affaissement de 23 cm (Photo 3.2.b). Le béton présentait un aspect homogène mais un faible ressuage. Il était donc nécessaire de traiter le ressuage en corrigeant le dosage en eau. Le prix a légèrement augmenté et la résistance en compression a légèrement augmentée aussi.



**Photo 3.2.a** – Affaissement faible mesuré avant l'augmentation du dosage en superplastifiant sur la composition B.II (avec la fraction 15/25)



**Photo 3.2.b** – Affaissement important accompagné de ressuage observé après l'augmentation du dosage en superplastifiant de 0,5 à 0,8 (%) sur la composition B.II (avec la fraction 15/25)

## 5.3. Troisième formulation (B.III)

Comme le béton (B.II) a un affaissement important de 23 cm le classant dans la catégorie S5 des bétons très fluides. Par conséquent la réduction du dosage en eau était admise. Le dosage en eau est réduit de 200 à 185 (kg/m<sup>3</sup>). La composition (B.III) a donnée un affaissement de 18 cm, suffisant pour le pompage du béton (Photo 3.3). La résistance a augmentée et le prix a faiblement diminué.



**Photo 3.3** – Affaissement mesuré après réduction du dosage en eau de 200 à 185 kg/m<sup>3</sup> (Absence de ressuage)

#### 5.4. Quatrième formulation (B.IV)

Dans la même logique d'augmenter le dosage en gros granulat (15/25) pour raison économique car la fraction 15/25 coûte moins chère que la fraction 8/16 et vu le résultat de l'affaissement de 18 cm qui permet d'augmenter le dosage de la fraction 15/25, qui a été augmentée à 25%.

La composition (B.IV) a donné un affaissement de 18 cm, suffisant pour le pompage du béton (Photo 3.4). Cependant la résistance a diminué, ce qui pourrait être expliqué par la qualité faible des granulats. Le prix a aussi diminué.



**Photo 3.4** – Affaissement mesuré après augmentation du dosage de la fraction (15/25) de 15 à 25 (%)

## 6. SYNTHÈSE DES RESULTATS

### 6.1. Sur l'affaissement

La figure 3.3 présente les résultats sur l'affaissement des quatre bétons. Les bétons pompables doivent avoir une ouvrabilité fluide dont la classe est S4 [3, chapitre 1] correspondant à un affaissement de 16 à 21 (cm). L'affaissement le plus

important est obtenu avec la composition B.II (Figure 3.3) ce qui est normal en raison des forts dosages en eau ( $200 \text{ kg/m}^3$ ) et du superplastifiant ( $3 \text{ kg/m}^3$ ).

L'affaissement est un critère de premier ordre pour les bétons pompables. Toutes les compositions satisfont ce paramètre, par conséquent le choix de la composition optimale sera déterminé en fonction d'autres critères : de la résistance et/ou du prix.

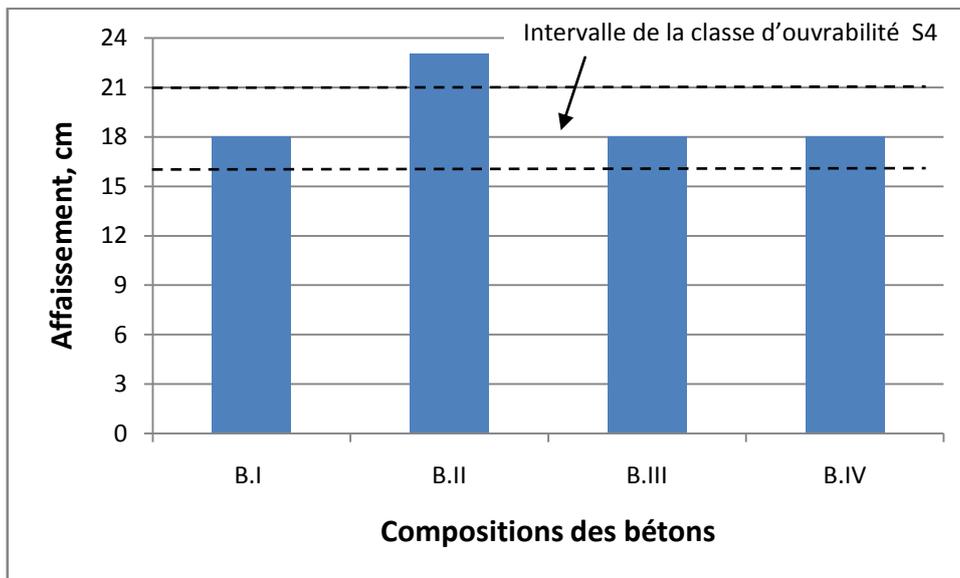


Figure 3.3 – Influence de la composition sur l'affaissement du béton

## 6.2. Sur la résistance en compression

La figure 3.4 présente les résultats sur la résistance mécanique en compression des quatre bétons.

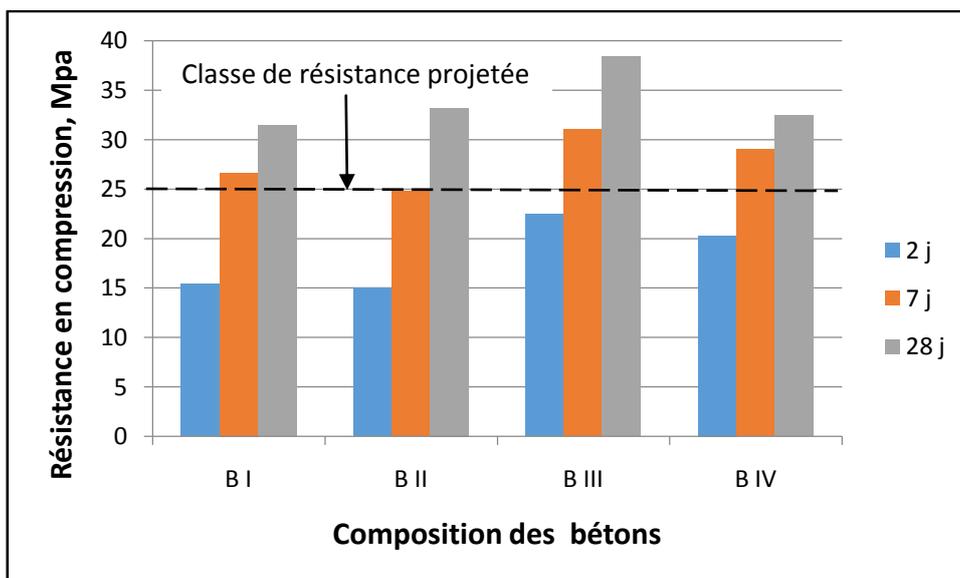


Figure 3.4 – Influence de la composition sur la résistance en compression du béton

La classe de résistance projetée du béton est de 25 MPa. Toutes les compositions satisfont ce critère. Cependant les compositions B.III et B.II ont respectivement les meilleures résistances.

Le béton optimal en termes de résistance mécanique correspond à la composition B.III.

### 6.3. Sur le prix de production

Le calcul du prix d'un m<sup>3</sup> de béton produit en centrale est simple à être réalisé en tenant compte des coûts des produits fournis par le service comptabilité de la centrale à béton:

- Matières premières (Ciment, eau, adjuvant, granulats)
- Energie électrique
- Carburant
- Main d'œuvre
- Frais divers

Le prix de vente d'un m<sup>3</sup> de béton est d'environ de 8000 à 10.000 DA [1 et 2]

Le prix d'un m<sup>3</sup> de béton dépend non seulement des constituants mais aussi de leur dosage. En effet, le prix du sable roulé est plus élevé que le sable concassé alors les gros granulats, les fractions plus fines coûtent plus chères que les fractions plus grosses.

L'étude des différents prix des bétons, présentée par la figure 3.5 montre à première vue des différences peu significatives mais elles peuvent être de l'ordre de millions de dinard lorsque le volume de béton est important.

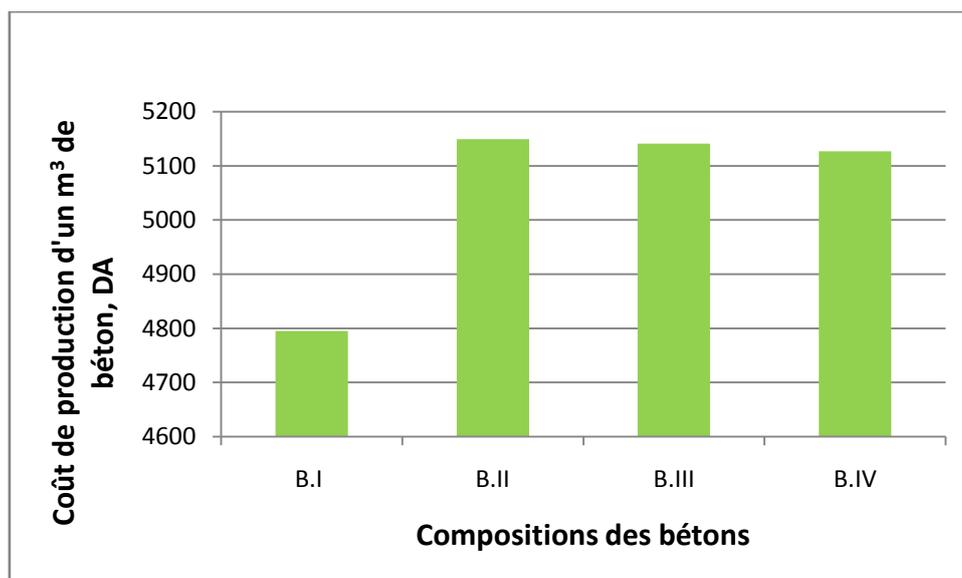


Figure 3.5 – Influence de la composition sur le coût de production d'un m<sup>3</sup> de béton

Le choix de la composition adéquate se fera en fonction des paramètres techniques (ouvrabilité et résistance) mais le facteur économique peut être un critère décisif.

## 7. CONCLUSION

L'approche de formulation d'un béton est simple, cependant le passage à la vérification de la composition par l'essai d'étude est beaucoup plus complexe, surtout lorsque des exigences contradictoires sont imposées. En effet, tous les composants influencent de façon directe ou indirecte les propriétés du béton à l'état frais et à l'état durci.

C'est dans ce contexte que nous avons préparé des compositions préliminaires pour élaborer les compositions finales en optimisant certains constituants et en fixant d'autres. Ainsi les dosages en ciment, en adjuvant, en sables ont été fixés. L'optimisation a porté essentiellement sur les dosages en eau et en gravier 15/25 pour aboutir finalement à plusieurs compositions qui concilient les exigences techniques (ouvrabilité et résistance) et le critère économique.

Cependant, toutes les compositions répondent aux exigences techniques et économiques. Le client aura donc à choisir la composition adéquate en relation avec le coût.

Les compositions retenues peuvent être encore être améliorées à condition de prendre en considération les éléments suivants :

- Optimisation de la qualité des granulats par un choix rigoureux (nature, forme et dimensions)
- Limiter  $D_{\max}$  à 20 mm afin d'inscrire l'action des centrales à béton dans la technologie du béton pompé.
- Emploi des additions minérales (filler calcaire et laitier granulé)

**CHAPITRE IV**  
**CONFORMITE DE LA CENTRALE A BETON**  
**ETB/TCE – ANNABA PAR RAPPORT A LA NORME NA 16002**

# CHAPITRE IV

## CONFORMITE DE LA CENTRALE A BETON

### ETB/TCE – ANNABA PAR RAPPORT A LA NORME NA 16002

#### 1. INTRODUCTION

Dans le cadre du stage pratique effectué dans la centrale à béton ETB/TCE – ANNABA, on s'est intéressé à la conformité des opérations de fonctionnement de la centrale à béton par rapport à la norme NA 16002 [39] qui spécifie les exigences applicables :

- aux constituants du béton (granulats, liants hydrauliques, eau, etc) ;
- aux propriétés du béton frais et durci et à leur vérification ;
- aux limitations imposées à la composition du béton ;
- à la spécification du béton ;
- à la livraison du béton frais ;
- aux procédures de contrôle de production ;
- aux critères de conformité et à l'évaluation de la conformité.

#### 2. DESCRIPTION DE LA CENTRALE E.T.B/T.C.E

La centrale à béton E.T.B/T.C.E – Annaba est située dans la cité « BEDARI » Annaba. Elle comprend les installations suivantes

- **Aire de stockage des granulats** (Figure 4.1) :

Les granulats sont stockés à l'air libre et repris par un chargeur qui les transporte jusqu'au tapis roulant – balance qui alimente le malaxeur.

- **Balances**

Tapis balance pour peser les granulats et alimenter le malaxeur (Figure 4.2)



Figure 4.1 – Aire de stockage des granulats



Figure 4.2 – Tapis balance pour granulats

- **Stockage des adjuvants**

L'adjuvant est conservé dans son cubitainer de 1100 kg, stocké à l'air libre (Figure 4.3)



**Figure 4.3 – Futs d'adjuvants**

- **Silos à ciment**

Le ciment est stocké dans deux silos. Le ciment est délivré en vrac puis transvasé directement du camion citerne vers les silos par des tuyaux à air comprimé (Figure 4.4).

- **Réservoirs d'eau**

L'eau est stockée dans des réservoirs (Figure 4.5)



**Figure 4.4 – Silos à ciment**



**Figure 4.5 – Réservoirs d'eau**

- **Malaxeur**

L'alimentation du malaxeur :

- Ciment acheminé par conduite à air comprimé
- Les granulats par tapis – balance
- L'eau à partir d'un réservoir à l'aide d'une pompe à eau
- L'adjuvant pompé à partir des cuves à l'aide d'une pompe

- **Pupitre de commande de la centrale** (Figure 4.6)

Les opérations d'alimentation du malaxeur en matériaux sont commandées à partir d'une salle de commande



**Figure 4.6 – Panneau de commande de la centrale à béton**

### **3. CONTROLE DE LA CONFORMITE DES BPS**

La norme NA 16002 [40] décrit les bases d'un système qualité du producteur, elle fournit des critères statistiques de conformité et les règles d'évaluation.

#### **3.1. Contrôle de conformité**

Le contrôle de conformité du béton vise à vérifier la conformité du béton avec les spécifications. Il est défini par :

- Un plan d'échantillonnage précisant le nombre et la fréquence minimale des prélèvements nécessaires aux essais de contrôle.
- Un plan d'essais de contrôle définissant les essais à effectuer.
- Des critères de conformité permettent d'exploiter les résultats des essais pour attester de la conformité

#### **3.2. L'échantillonnage**

L'échantillonnage et les essais de conformité doivent être effectués, soit sur chaque composition de béton prise individuellement, soit sur des familles de bétons dont la représentativité est établie.

Une famille de béton est un groupe de compositions de béton pour lesquelles une relation fiable entre des propriétés pertinentes a été établie (règles de formulation et règles de passages entre les bétons composant la même famille).

La notion de famille peut être élargie dans le cas de centrale faisant l'objet d'une certification du contrôle de production.

La fréquence minimale d'échantillonnage est modulée en fonction du système de certification de contrôle de production du béton.

### **3.3. Evaluation de la conformité**

Les contrôles de conformité concernent en particulier la consistance et la résistance en compression, d'autres propriétés complémentaires, la masse volumique, le rapport Eau/Liant, la teneur en ciment peuvent être contrôlée.

La conformité des bétons est évaluée sur la base de la conformité des résultats d'essais par rapport aux limites de la classe, ou aux valeurs limites spécifiées, ou aux valeurs cibles, en tenant compte des tolérances et de l'écart admissibles par rapport à ces valeurs spécifiées.

### **3.4. Contrôle de la conformité de la consistance à la livraison**

La consistance du béton est contrôlée par l'essai du cône d'Abrams.

Toute addition d'eau et d'adjuvants à la livraison est interdite. Dans des cas spéciaux, de l'eau ou des adjuvants peuvent être ajoutés lorsque l'opération est effectuée sous la responsabilité du producteur en vue d'amener la consistance à la valeur spécifiée, sous réserve que les valeurs limites permises par la spécification ne soient pas dépassées et que cette addition d'adjuvant soit prévue dans la formulation du béton. Toute quantité d'eau complémentaire ou d'adjuvants ajoutées dans le camion bétonnière doit être enregistrée sur le bon de livraison.

Les critères de conformité de la consistance sont donnés dans le tableau 4.1. [39]

**Tableau 4.1 - Critères de conformité applicables à la consistance du béton**

Méthode d'essai		Nombre minimal d'échantillons ou de déterminations	Critère d'acceptation	Écart maximal admissible <sup>a)</sup> des résultats individuels d'essai par rapport aux limites de la classe spécifiée ou par rapport aux tolérances de la valeur cible spécifiée	
				Valeur inférieure	Valeur supérieure
Examen visuel	Comparaison de l'aspect avec l'aspect d'un béton à la consistance spécifiée	Chaque gâchée ; dans le cas de béton prêt à l'emploi, chaque charge	—	—	—
Affaissement	NA 5102	i) fréquence comme au Tableau 13 pour la résistance à la compression ;	Voir Tableau 19b	- 10 mm	+ 20 mm
				- 20 mm <sup>b)</sup>	+ 30 mm <sup>b)</sup>
Vébé	NA 5103	ii) lors du contrôle de la teneur en air ;	Voir Tableau 19b	- 2 s	+ 4 s
				- 4 s <sup>b)</sup>	+ 6 s <sup>b)</sup>
Degré de compactabilité	NA 5104	iii) en cas de doute suite aux inspections visuelles	Voir Tableau 19b	- 0,03	+ 0,05
				- 0,05 <sup>b)</sup>	+ 0,07 <sup>b)</sup>
Étalement	NA 5105		Voir Tableau 19b	- 20 mm	+ 30 mm
				- 30 mm <sup>b)</sup>	+ 40 mm <sup>b)</sup>

a) En l'absence de limite supérieure ou inférieure dans les classes de consistance concernées, ces écarts ne sont pas applicables.  
b) Ne s'applique que pour l'essai de consistance effectué sur le déchargement initial du camion malaxeur (voir 5.4.1).

### 3.5. Contrôle de la conformité de la résistance à la compression

L'échantillonnage et les essais doivent être effectués soit sur chaque composition de béton prise individuellement, soit sur des familles de béton.

Les échantillons de béton doivent être sélectionnés de façon aléatoire et prélevés conformément à la NA 5092 [40]. L'échantillonnage doit être effectué sur chaque famille de béton produite dans des conditions présumées uniformes (Tableau 4.2)

**Tableau 4.2 – Fréquence minimale d'échantillonnage pour l'évaluation de la conformité**

Production	Fréquence minimale d'échantillonnage		
	50 premiers m <sup>3</sup> de la production	Au delà des 50 premiers m <sup>3</sup> de production <sup>a)</sup>	
		Béton avec certification du contrôle de la production	Béton sans certification du contrôle de la production
Initiale (jusqu'à ce que 35 résultats d'essai au moins aient été obtenus)	3 échantillons	1 échantillon tous les 200 m <sup>3</sup> ou 2 échantillons par semaine de production	1 échantillon tous les 150 m <sup>3</sup> ou 1 échantillon par jour de production
Continue <sup>b)</sup> (une fois que 35 résultats au moins ont été obtenus)		1 échantillon tout les 400 m <sup>3</sup> ou 1 échantillon par semaine de production	
<p>a) L'échantillonnage doit être réparti sur l'ensemble de la production et ne doit normalement pas comporter plus d'un échantillon pour 25 m<sup>3</sup>.</p> <p>b) Lorsque l'écart-type calculé pour les 15 derniers résultats d'essai est supérieur à 1,37 <math>\sigma</math>, la fréquence d'échantillonnage doit être portée à la fréquence requise pour la production initiale pour les 35 résultats d'essai suivants.</p>			

La conformité est confirmée si les deux critères donnés au tableau 4.3 pour la production du béton sont satisfaits.

**Tableau 4.3 – Critères de conformité pour les résultats d'essai de résistance à la compression**

Production	Nombre «n» de résultats d'essai de résistance dans le groupe	Critère 1	Critère 2
		Moyenne de n résultats ( $f_{cm}$ ) N/mm <sup>2</sup>	Chaque résultat individuel d'essai ( $f_{ci}$ ) N/mm <sup>2</sup>
Initiale	3	$\geq f_{ck} + 4$	$\geq f_{ck} - 4$
Continue	$\geq 15$	$\geq f_{ck} + 1,48 \sigma$	$\geq f_{ck} - 4$

Pour confirmer que chaque formulation appartient à la famille, la moyenne de tous les résultats bruts,  $f_{cm}$ , pour une formulation unique sera évaluée avec le critère 3 donné au tableau 4.4.

**Tableau 4.4 – Critères de confirmation pour les formules individuelles**

Nombre «n» de résultats d'essais de résistance pour un béton particulier	Critère 3
	Moyenne de tous les résultats d'essais bruts ( $f_{om}$ ) pour un béton particulier N/mm <sup>2</sup>
2	$\geq f_{ck} - 1,0$
3	$\geq f_{ck} + 1,0$
4	$\geq f_{ck} + 2,0$
5	$\geq f_{ck} + 2,5$
6	$\geq f_{ck} + 3,0$

### 3.6. Contrôle de conformité pour autres propriétés

Les propriétés complémentaires et les valeurs limites sont données aux tableaux 4.5 et 4.6.

**Tableau 4.5 – Critères de conformité pour les propriétés autres que la résistance**

Propriété	Méthode d'essai ou méthode de détermination	Nombre minimal d'échantillons ou de déterminations	Critère d'acceptation	Écart maximal admissible des résultats d'essai individuels par rapport aux limites de la classe spécifiée ou par rapport aux tolérances de la valeur cible spécifiée	
				Valeur inférieure	Valeur supérieure
Masse volumique du béton lourd	NA 5109	Comme au Tableau 13 pour la résistance à la compression	Voir Tableau 19a	- 30 kg/m <sup>3</sup>	pas de limite <sup>a)</sup>
Masse volumique du béton léger	NA 5109	Comme au Tableau 13 pour la résistance à la compression	Voir Tableau 19a	- 30 kg/m <sup>3</sup>	+ 30 kg/m <sup>3</sup>
Rapport eau/ciment	voir 5.4.2	1 détermination par jour	Voir Tableau 19a	Pas de limite <sup>a)</sup>	+ 0,02
Teneur en ciment	voir 5.4.2	1 détermination par jour	Voir Tableau 19a	- 10 kg/m <sup>3</sup>	pas de limite <sup>a)</sup>
Teneur en air d'un béton frais contenant de l'air entraîné	NA 5107 pour les bétons de masse volumique normale et les bétons lourds ;	1 échantillon par jour de production-après stabilisation	Voir Tableau 19a	- 0,5 % en valeur absolue	+1,0 % en valeur absolue
Teneur en chlorure du béton	voir 5.2.7	La détermination doit se faire pour chaque composition de béton et doit être réitérée en cas d'augmentation de la teneur en chlorure de l'un des constituants.	0	Pas de limite <sup>a)</sup>	Aucune valeur supérieure n'est autorisée

a) Sauf si des limites sont spécifiées.

La conformité du béton est évaluée sur la base de la conformité de résultats d'essais consécutifs aux valeurs limites spécifiées, aux limites de classes ou aux valeurs cibles, en tenant compte des tolérances et de l'écart type maximal admissible en tenant compte des valeurs spécifiées.

#### **4. DOCUMENTS TECHNIQUES**

La commande et la livraison de béton sont règlementés et assurés par des documents établis par la centrale à béton. La norme algérienne 16002 [39] préconise des modèles standards pour assurer la compatibilité des documents et aussi faciliter les démarches administratives et la communication entre le producteur et le client.

Le bon de commande renseigné par le client et le bon de livraison délivré par la centrale à béton comportent des informations précises concernant les caractéristiques du béton pour un BPS (Bétons à Propriétés Spécifiées) ou la composition s'il s'agit d'un BCP (Béton à Composition Prescrite), voir Chapitre I.

##### **4.1. Bon de livraison pour un béton prêt à l'emploi (BPS)**

Conformément à la norme NA 16002 le producteur doit remettre à l'utilisateur un bon de livraison pour chaque charge de béton sur laquelle figure les informations suivantes :

- Nom de l'usine de fabrication du béton
- La date et l'heure de chargement
- Le numéro du camion ou immatriculation
- Nom et localisation du chantier
- Numéro du bon de commande
- Nom de l'acheteur
- Volume du béton en m<sup>3</sup>
- Déclaration de conformité du béton par rapport à la norme NA 16002
- L'heure d'arrivée du béton sur le chantier
- L'heure du début de déchargement
- L'heure de la fin de déchargement

De plus le bon de livraison doit fournir les informations suivantes

- **Pour un BPS**
  - Classe de résistance
  - La classe d'exposition
  - Classe de teneur en chlorures
  - La classe de consistance ou la valeur cible
  - Les valeurs limites de la composition du béton lorsqu'elles sont spécifiées
  - Type et classe de résistance du ciment lorsqu'elles sont spécifiées
  - Types d'adjuvants et d'additions lorsqu'elles sont spécifiées

- Dimension maximale des granulats
- Des propriétés spécifiques lorsqu'elles sont spécifiées
- **Pour un BCP**
  - Teneur en ciment et s'il est prescrit le type d'adjuvant
  - Rapport E/C ou la consistance en termes de classe ou de valeur cible, en fonction des spécifications
  - Dimension maximale des granulats

#### **4.2. Bon de commande établi par la centrale**

L'administration de la centrale à béton ETB/TCE – ANNABA met à la disposition des clients un modèle de bon de commande incomplet et incohérent vis-à-vis de la norme NA 16002 [39].

Les quelques renseignements demandés se limitent aux informations suivantes:

- Nom et Prénom du client
- Quantité de béton commandée
- Dosage en ciment demandée

Le bon de commande doit être conforme à la norme NA 16002 [39] et doit comprendre en premier lieu le type de béton (BPS et BCP) en portant les spécifications relatives à chaque type de béton.

C'est pourquoi, on propose des modèles de documents techniques (bons de commande et bons de livraison) conformes à la norme NA 16002 pour les BPS et pour les BCP.

#### 4.2.1. Exemple de bon de commande pour un BPS

Dans le cas des BPS, le fournisseur de béton frais est responsable et garant des spécifications du béton demandées par le client conformément à la norme NA 16002 [39], en précisant les spécifications de base et les spécifications complémentaires éventuellement (Tableau 4.6).

Tableau 4.6 – Exemple de bon de commande d'un BPS

<b>Entreprise E.T.B/T.C.E - Annaba</b>
<b>BON DE COMMANDE</b>
<b>TYPE DE BETON BPS</b>
<i>Spécifications de base</i> <b>NA 16002</b>
Nom et Prénom du client : Conformité à la norme : NA 16002 Classe de résistance à la compression : Classe d'exposition : Classe de consistance : Classe de teneur en chlorures : Dimension maximale des granulats :
<i>Spécifications complémentaires</i>
Type ou classe particulière de ciment : Types ou classes particulières de granulats (alcali-réaction...) : Type, fonction et teneur maximale en fibres du béton renforcé par des fibres : Teneur en air (résistance au gel/dégel) : Dégagement de chaleur au cours de l'hydratation :

#### 4.2.2. Exemple de bon de commande pour un BCP conforme à la norme NA 16002

Dans le cas des BCP, le fournisseur de béton frais n'est pas responsable des spécifications du béton, car la composition et les constituants à utiliser sont spécifiés par le prescripteur au producteur. Les contrôles sur les performances atteintes ne sont pas de la responsabilité du producteur, ils incombent au prescripteur ou à l'utilisateur. Le modèle de bob de commande proposé et conforme à la norme EN 16002 [39] est présenté au tableau 4.7

Tableau 4.7 – Exemple de bon de commande d'un BCP

<b>Entreprise E.T.B/T.C.E - Annaba</b>
<b>BON DE COMMANDE</b>
<b>TYPE DE BETON BCP</b>
<i>Spécifications de base</i> <i>NA 16002</i>
Nom et Prénom du client : Conformité à la norme : NA 16002 Dosage en ciment, Type de ciment et sa classe de résistance, Rapport eau/ciment ou la consistance, Qualité des granulats, Dimension maximale des granulats, Type et quantité des adjuvants et additions (ainsi que l'origine de leurs constituants).

#### 4.2.3. Exemple de Bon de livraison d'un BPS

Au déchargement du béton, le producteur doit remettre à l'utilisateur un bon de livraison de chaque charge de béton sur lequel figurent au moins les informations imprimées, tamponnées ou manuscrites suivantes :

Tableau 4.8 – Exemple de bon de livraison d'un BPS

<b>Entreprise E.T.B/T.C.E - Annaba</b>
<b>BON DE LIVRAISON</b>
<b>TYPE DE BETON BPS</b>
<i>Informations de base</i> <b>NA 16002</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>- Nom l'usine de fabrication</li><li>- Le numéro de série du bon</li><li>- La date, l'heure de chargement (heure de gâchage du béton)</li><li>- Numéro du camion</li><li>- Le non de l'acheteur</li><li>- Le nom et la localisation du chantier</li><li>- Numéro de commande (relatifs aux spécifications)</li><li>- La quantité de béton en m<sup>3</sup></li><li>- La déclaration de conformité à la norme NA 16002</li><li>- L'heure d'arrivée du béton sur le chantier</li><li>- L'heure de début de déchargement</li><li>- L'heure de la fin de déchargement</li></ul>
<i>Précisions complémentaires</i>
<ul style="list-style-type: none"><li>- Type et classe de résistance à la compression :</li><li>- Classe d'exposition :</li><li>- Classe de teneur en chlorures</li><li>- Classe de consistance ou valeur cible</li><li>- Les valeurs limites de composition du béton</li><li>- Type d'adjuvants</li><li>- Les propriétés particulières si elles sont prescrites</li><li>- Dimension maximale des granulats</li></ul>

#### 4.2.4. Exemple de Bon de livraison d'un BCP

Au déchargement du béton, le producteur doit remettre à l'utilisateur un bon de livraison de chaque charge de béton sur lequel figurent au moins les informations imprimées, tamponnées ou manuscrites suivantes :

Tableau 4.8 – Exemple de bon de livraison d'un BCP

<b>Entreprise E.T.B/T.C.E - Annaba</b>
<b>BON DE LIVRAISON</b>
<b>TYPE DE BETON BCP</b>
<i>Informations de base</i> <b>NA 16002</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>- Nom l'usine de fabrication</li><li>- Le numéro de série du bon</li><li>- La date, l'heure de chargement (heure de gâchage du béton)</li><li>- Numéro du camion</li><li>- Le non de l'acheteur</li><li>- Le nom et la localisation du chantier</li><li>- Numéro de commande (relatifs aux spécifications)</li><li>- La quantité de béton en m<sup>3</sup></li><li>- La déclaration de conformité à la norme NA 16002</li><li>- L'heure d'arrivée du béton sur le chantier</li><li>- L'heure de début de déchargement</li><li>- L'heure de la fin de déchargement</li></ul>
<i>Précisions complémentaires</i>
<ul style="list-style-type: none"><li>- Informations relatives à la composition (teneur en ciment, type d'adjuvant etc.)</li><li>- Le rapport E/C, la consistance ou la valeur cible</li><li>- La dimension maximale des granulats</li></ul>

## 5. CONCLUSION

Après avoir effectué un stage au niveau de la centrale à béton E.T.B / E.T.C nous avons relevé quelques incohérences vis-à-vis de la norme NA 16002 [39] dont les deux points importants suivants:

- L'absence de laboratoire au pied de la centrale constitue un obstacle majeur pour vérifier la conformité aussi bien des matières premières que le produit fini (béton à l'état frais et à l'état durci)

- Les bons de commande et de livraison ne sont pas conformes à la norme NA 16002 [39].

## **CONCLUSION GENERALE**

## CONCLUSION GENERALE

La formulation d'un BPE pompable dépend en premier lieu du choix des matériaux en relation avec le cahier des charges qui doit répondre à des exigences supplémentaires par rapport à celles d'un béton ordinaire.

Les contraintes auxquelles on était confronté dans la formulation d'un BPE pompable étaient nombreuses, notamment des exigences contradictoires, car concilier la fluidité et la résistance en compression n'était pas facile surtout lorsqu'on cherche à produire un béton le moins coutant.

A cela s'ajoute l'imposition des matériaux disponibles à la centrale à béton, par conséquent il n'y avait d'autres d'optimiser la composition granulaire en limitant le  $D_{max}$  à 20 mm au lieu de 25 mm.

La qualité des gros granulats est juste moyenne à faible

C'est dans ces conditions qu'on a préparé des compositions préliminaires pour élaborer les compositions finales en optimisant certains constituants et en fixant d'autres. Ainsi les dosages en ciment, en adjuvant, en sables et gravier 8/16 ont été fixés. L'optimisation a portée essentiellement sur les dosages en eau et en gravier 15/25 pour aboutir finalement à plusieurs compositions qui concilient les exigences techniques (ouvrabilité et résistance) le critère économique.

Cependant, toutes les compositions répondent aux exigences techniques et économiques. Le client aura donc à choisir la composition adéquate.

Les compositions retenues peuvent être améliorées à condition de prendre en considération les éléments suivants :

- Optimisation de composition granulaire et éventuellement changer de fournisseur de granulats pour un choix rigoureux (nature, forme et dimensions)
- Emploi des additions minérales (filler calcaire par exemple)
- Limiter  $D_{max}$  à 20 mm afin d'inscrire l'action des centrales à béton dans la technologie du béton pompé.

Concernant le fonctionnement de la centrale à béton quelques recommandations peuvent être avancées :

- La création d'un laboratoire au pied de la centrale permettrait certainement une vérification rigoureuse de la conformité aussi bien des matières premières que le produit fini (béton à l'état frais et à l'état durci), voir même la mise en place de nouvelles formulations spécifiques aux commandes des clients
- Les bons de commande et de livraison doivent être mis en conformité vis-à-vis de la norme NA 16002 [39].

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] statistiques sur l'emploi du béton dans le monde (Consulté Mai 2023), [https://www.google.com/statistiques sur l'emploi du béton dans le monde](https://www.google.com/statistiques-sur-l'emploi-du-beton-dans-le-monde)
- [2] Centrale à béton, (Consulté mai 2023), <http://www.guidebeton.com/centrale-a-beton>,
- [3] EN 206+A2 (2022), Béton - Spécification, performance, production et conformité - Complément national à la norme,
- [4] NA 442 (2005), Composition, Spécifications et critères de conformité des ciments courants,
- [5] EN 196-1, (2016), Méthodes d'essais des ciments - Partie 1 : détermination des résistances
- [6] EN 12620+A1 (2008), granulats pour béton
- [7] EN 934-2+A1 (2012), Adjuvants pour bétons, mortier et coulis - Partie 2 : adjuvants pour béton - Définitions, exigences, conformité, marquage et étiquetage,
- [8] EN 1008 (2006), Eau de gâchage pour bétons - Spécifications d'échantillonnage, d'essais et d'évaluation de l'aptitude à l'emploi, y compris les eaux des processus de l'industrie du béton, telle que l'eau de gâchage pour béton,
- [9] EN 12350 – 2 (2019) : Essais pour béton frais - Partie 2 : essai d'affaissement
- [10] Centrale à béton (Consulté Mai 2023), <https://www.denisbeton.fr>
- [11] Denis Kaplan (2001), Pompage des bétons, Documents techniques du LCPC
- [12] Pompage des bétons (Consulté Mai 2023), <https://www.infociments.fr/pompage-des-betons>
- [13] Frédéric Chapdelaine (2007), Etude fondamentale et pratique sur le pompage du béton, Thèse de Doctorat, Université de Laval, Canada
- [14] De Larrard François (Consulté Mai 2023), Formulation, homogénéité et pompabilité, Documents Techniques LCPC
- [15] Shilstone, J.M.Sr (1990) Concrete Mixture Optimization, Concrete international, Vol. 12, No. 6.
- [16] Karl Ernst von. Eckardstein (1983), Pumping concrete and concrete pumps: A concrete placing manual
- [17] Ragan, Steven A., (1981), Evaluation of tests for determining the pumpability of concrete mixtures, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, miscellaneous paper SL-81-29, Vicksburg, .
- [18] Kempster, E. (1969), Pumpable Concrete, Current Paper No. 29/69, Building Research Station, Garston ;
- [19] EN 1097-3 (1998): Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 3 : méthode pour la détermination de la masse volumique en vrac et de la porosité intergranulaire
- [20] EN 1097-6 (2014): Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 6 : détermination de la masse volumique réelle et du

coefficient d'absorption d'eau

- [21] EN 933-8 (2012): Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 8 : évaluation des fines. Équivalent de sable
- [22] P18-591 (1990) : Granulats - Détermination de la propreté superficielle
- [23] EN 933 – 1 (2012) : Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 1 : détermination de la granularité - Analyse granulométrique par tamisage
- [24] EN 933 – 2 (2020) : Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 2 : détermination de la granularité - Tamis de contrôle, dimensions nominales des ouvertures
- [25] NF P 18-572 (1978) : Granulats. Essai d'usure micro-DEVAL.
- [26] NF P 18-573 (1990) Essai de Los Angeles
- [27] EN 933 – 3 (2012) : Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 3 : détermination de la forme des granulats - Coefficient d'aplatissement
- [28] Masse volumique apparente des ciments (Consulté Mai 2023), <https://www.stde.fr/ciments-mortiers/masse-volumique-apparente-des-ciments/>
- [29] BEHIM M (2023), TP Liants minéraux
- [30] EN 196-6 (2018) : Méthodes d'essai des ciments - Détermination de la finesse
- [31] 196 – 3 (2017) : Méthodes d'essai des ciments - Partie 3 : détermination du temps de prise et de la stabilité
- [32] EN 12390-3 (2019) : Essais pour béton durci - Partie 3 : résistance à la compression des éprouvettes
- [33] EN 12390-1 (2021) : Essais pour béton durci - Partie 1 : forme, dimensions et autres exigences aux éprouvettes et aux moules
- [34] EN 12350-1 (2019), Essais pour béton frais - Partie 1 : prélèvement et appareillage commun
- [35] EN 12390-2 (2019), Essais pour béton frais - Partie 2 : essai d'affaissement
- [36] Fiche technique (Mars 2022) Sika® ViscoCrete®-4032 RMX
- [37] Benessalah I (Consulté Mai 2023), Polycopié TP Détermination du coefficient de <los Angeles, <https://www.univ-chlef.dz/FGCA/wp-content/uploads/2020/11/Polycopie-Benessalah-Partie-2.pdf> Bensalah I,
- [38] Georges Dreux et Jean Festa (2002), Nouveau guide du béton et de ses constituants, édition Eyrolles
- [39] Norme Algérienne 16002 (2007), Béton, performances, spécification et conformité.
- [40] Norme Algérienne 5092 (2007), Essais pour béton frais – Prélèvements