

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

Université A.MIRA Béjaïa

Faculté de la Technologie
Département de Génie Civil

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de magister en Génie Civil

Option : **Matériaux et Structures**

Par : **BOUKELLOUDA Abdelhafid**

Thème :

**Comparaison des caractéristiques
mécaniques et retrait du béton en
utilisant les différentes méthodes de
compositions de béton**

Jury composé de :

| | | | |
|----------------------|------------|-------------------------|--------------------|
| MAZA Mustapha | Président | Maitre de conférences A | Univ. de Béjaïa |
| CHELOUAH Nasser | Rapporteur | Maitre de conférences A | Univ. de Béjaïa |
| TAHAKOURT Abdelkader | Examineur | Professeur | Univ. de Béjaïa |
| KADRI Mohamed | Examineur | Maitre de conférences A | Univ. de Boumerdes |

Promotion : 2010

Résumé

Ce mémoire présente d'une façon générale comparaison des caractéristiques mécaniques et retrait du béton en utilisant les différentes méthodes de composition des bétons principalement : Bolomey, Dreux- Gorisse et Faury.

L'objectif de cette étude est de déterminer une méthode de composition de béton adéquate qui donne une évolution de la résistance à la compression meilleure et un retrait minime.

Après rappel des enjeux actuels de la formulation des bétons une présentation sommaire de ces méthodes, ce mémoire met en application de ces dernières pour formuler un béton a caractère normalisé à partir de ses constituants granulaires. Quatre classes granulaires ont été soumises à une série d'essais normatifs. Cette caractérisation permet d'apprécier la qualité des granulats rentrant dans la confection de ces bétons, il s'agit du sable calcaire concassé 0/3 et le gravier concassé 3/8, 8/15 et 15/25mm. En outre, un dosage en ciment à été fixé 400Kg/m³, plusieurs mélanges de béton ont été confectionnés, avec un rapport E/C = 0,5.

Essai à la compression simple permet de suivre l'évolution de la résistance à la compression des éprouvettes de béton dimensions (16x32) cm² jusqu'à 180 jours d'âge.

Essai au retrait de béton sur des éprouvettes prismatiques dimensions (10x10x50) cm³ jusqu'à 180 jours d'âge.

On termine en comparants les résultats de formulation de béton donnés par les trois méthodes, pour en conclure la perfection de la méthode de Dreux-Gorisse.

Mots clés : Béton, granulats, formulation, résistance à la compression, retrait,...etc.

Abstract

This paper presents a general comparison of mechanical properties and shrinkage of concrete using different methods of composition of concrete mainly: Bolomey, Dreux and Gorisse Faury.

The objective of this study is to determine a method of concrete composition that gives a proper evolution of the compressive strength better and minimal shrinkage.

After recalling the current issues in the formulation of concrete a summary presentation of these methods, this thesis implements the past to formulate a concrete character standard from its granular components. Granular four classes were subjected to a series of normative tests. This characterization allows us to appreciate the quality of aggregates falling into the making of these concretes, it is crushed limestone sand 0 / 3 and crushed gravel 3 / 8, 8 / 15 and 15/25mm. In addition, a cement content was fixed 400Kg/m³ Several concrete mixtures were made with a W / C = 0.5.

Simple compression test can follow the evolution of the compressive strength of concrete samples sizes (16x32) cm² up to 180 days of age.

Removal of concrete test on prismatic samples dimensions (10x10x50) cm³ to 180 days of age.

We end by comparing the results to formulate concrete given by the three methods, and concluded the perfection of the method of Dreux-Gorisse.

Keywords: Concrete, aggregate, formulation, compressive strength, shrinkage.

Remerciements

Les travaux présentés dans ce mémoire ont été préparés au sein du Laboratoire des Travaux Publics de L'est (L'TPE) direction de Sétif. Nombreux sont ceux que je voudrais remercier pour m'avoir aidé durant ces deux années de thèse.

*Je tiens à exprimer en premier toute ma reconnaissance à Monsieur **Nasser CHELOUAH** pour avoir accepté d'être directeur de ma thèse et pour l'aide considérable qu'il m'a apportée afin de réaliser ce travail de recherche.*

Il m'est particulièrement agréable de remercier tout le personnel du Laboratoire des Travaux Publics de l'Est (L'TPE) : le directeur, le chef de service, les techniciens, le personnel du secrétariat, ainsi que toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin pour la qualité de leur encadrement, pour les discussions scientifiques et les conseils utiles, qui m'ont permis de m'affranchir efficacement des difficultés apparues pendant ma thèse.

Mes remerciements vont également aux membres du jury

*Je remercie M^r **Mustapha MAZA** de m'avoir fait l'honneur d'accepter de présider mon jury de thèse. Ses nombreux conseils seront, j'en suis persuadé, d'une grande utilité pour moi dans le futur.*

*Je tiens à remercier également M^r **Abdelkader TAHAKOURI** et M^r **Mohamed KADRI** pour avoir accepté d'examiner ce travail. Leurs commentaires, leurs critiques et leurs questions sont autant d'encouragements à poursuivre ce travail.*

Finalement, je voudrais remercier toute ma famille et ma belle famille qui m'ont encouragé à poursuivre mes études et mes travaux, je leur dédie ce mémoire.

----- Liste des figures-----

| | |
|--|----|
| Figure I.1. Cône d'Abrams..... | 11 |
| Figure I.2. Résistance à la compression à très court terme [4]..... | 14 |
| Figure I.3. Résistances minimales garanties d'un CEM 42,5N [4]..... | 15 |
| Figure I.4. Utilisations des super plastifiants- Tiré de [14]..... | 16 |
| Figure I.5. Demande en eau approximative pour différents affaissements et tailles des granulats concassés..... | 18 |
| Figure I.6. Changements de volume dans la pâte fraîche et durcie causés par les retrait chimique et endogène..... | 22 |
| Figure I.7. Retrait de la pâte de ciment [14]..... | 23 |
| Figure I.8. Relation entre le retrait endogène et retrait chimique de la pâte de ciment à jeune age..... | 24 |
| Figure I.9. Relation volumétrique entre le tassement, l'eau de ressuage, le retrait chimique et le retrait endogène. Seul le retrait endogène après la prise initiale est représenté..... | 24 |
| Figure I.10. Fissuration due au retrait plastique ressemblant à une déchirure dans la surface de béton..... | 25 |
| Figure I.11. Gonflement au jeune âge d'un échantillon de béton de mûri dans l'eau [29]..... | 26 |
| Figure I.12. Illustration schématique des mouvements dus aux variations d'humidité dans le Béton [30]..... | 27 |
| Figure I.13.a. Distribution de l'humidité relative à différentes profondeurs, du retrait au séchage Et de la perte de masse suivi d'un séchage à 23 °C et 50 % d'humidité relative [31]..... | 28 |
| Figure I.13.b. Retrait au séchage des échantillons cylindriques de différents diamètres [32]..... | 29 |
| Figure I.14. Relation entre la teneur en eau totale et le retrait au séchage [32]..... | 30 |
| Figure I.15. Retrait au séchage de bétons contenant des cendres volantes comparativement à un mélange témoin [33]..... | 30 |
| Figure II.1. Courbe granulométriques du mélange sec (Dreux, 1978) [5]..... | 34 |
| Figure II.2. Courbe optimale du mélange selon Bolomey [5]..... | 35 |
| Figure II.3. Courbe optimale du mélange selon Faury [5]..... | 38 |
| Figure II.4. Abaque permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment à prévoir en fonction du rapport C/E et de l'ouvrabilité désirée [2]..... | 45 |
| Figure II.5. Correction sur le dosage en eau [14]..... | 46 |
| Figure II.6. Courbe optimale type selon Dreux-Gorisse [14]..... | 48 |
| Figure II.7. Composition optimale du béton selon la méthode de Bolomey [35]..... | 52 |
| Figure II.8. Composition optimale du béton selon la méthode de Faury [35]..... | 55 |
| Figure II.9. Composition optimale du béton selon la méthode de Dreux Gorisse [35]..... | 59 |

----- **Liste des figures** -----

| | |
|--|-----|
| Figure II.10. Analyse granulométriques des 5 granulats [36]..... | 62 |
| Figure II.11. Courbe granulométriques +Courbe de référence Bolomey [36]..... | 62 |
| Figure II.12. Courbes granulométriques +Courbes de référence Faury [36]..... | 63 |
| Figure II.13. Courbes granulométriques + Courbe de référence Dreux-Gorisse [36]..... | 63 |
| FigureII.14. Courbes de variation de la résistance en fonction de l'âge pour les huit mélanges du BCR [36]..... | 64 |
| Figure.III.1. Masse volumique absolue à partir du pycnomètre..... | 77 |
| Figure III. 2. Essai de stabilité avec l'appareil le Chatelier..... | 82 |
| Figure IV.1. Composition de béton selon Dreux Gorisse..... | 86 |
| Figure IV.2. Composition de béton selon Faury..... | 93 |
| Figure IV.3. Pourcentage des différentes fractions granulaires dans la composition de béton..... | 94 |
| Figure IV.4. Juxtaposition des deux granulats..... | 96 |
| Figure IV.5. Superposition partielle des deux courbes..... | 97 |
| Figure IV.6. Discontinuité entre les deux courbes..... | 97 |
| Figure IV.7. Composition de béton selon Bolomey..... | 102 |
| FigureV.1. Mesure de l'air occlus à l'aéromètre..... | 105 |
| Figure V.2. Evaluation de la masse moyenne des bétons en fonction du temps..... | 107 |
| Figure V.3. Evaluation de la masse volumique moyenne des bétons en fonction du temps..... | 108 |
| Figure V.4. Evaluation de la résistance à la compression des bétons en fonction du temps..... | 115 |
| Figure V.5. Evaluation des retraits des prismes de béton en fonction du temps..... | 123 |
| Figure V.6. Evaluation de la masse moyenne des prismes de béton en fonction du temps..... | 125 |

-----**Liste des Tableaux**-----

| | |
|--|----|
| Tableau I.1. Qualités de divers paramètres en fonction soit de l'ouvrabilité, soit de la résistance recherchée pour un béton..... | 10 |
| Tableau I.2. Classes de consistance vis-à-vis de l'affaissement..... | 12 |
| Tableau I.3. Classes de résistances des ciments conformes à la norme (NF P 15 301)..... | 14 |
| Tableau I.4. Limites garanties du ciment à 28 jours..... | 15 |
| Tableau I.5. La quantité d'eau de gâchée et teneur en air approximatives requises pour différents affaissements et grosseurs nominales et maximales des granulats..... | 17 |
| Tableau I.6. Evaluation de l'agressivité de l'eau naturelle..... | 19 |
| Tableau II.1. Valeurs de (A) selon Bolomey..... | 36 |
| Tableau II.2. Les valeurs du coefficient K selon Bolomey..... | 37 |
| Tableau II.3. Valeurs du coefficient A selon Faury..... | 40 |
| Tableau II.4. Valeurs du coefficient K selon Faury..... | 40 |
| Tableau II.5. Evaluation de l'ouvrabilité par référence à l'affaissement au cône ou au test d'ouvrabilité..... | 42 |
| Tableau II.6. Evaluation approximative de D dimension maximale (Tamis) des granulats en fonction des caractéristiques de la pièce à bétonner et de l'ambiance plus ou moins agressive.. | 43 |
| Tableau II.7. Valeurs approximatives du coefficient granulaire G..... | 44 |
| Tableau II.8. Les dosages minimaux en ciment en fonction de la dimension maximale des granulats (D)..... | 45 |
| Tableau II.9. Correction sur le dosage en eau en fonction de la dimension maximale D des granulats si ($D \neq 25$ mm)..... | 46 |
| Tableau II.10. Valeurs du coefficient K selon Dreux-Gorisse..... | 47 |
| Tableau II.11. Valeurs du coefficient de compacité γ | 49 |
| Tableau II.12. Caractéristiques des granulats utilisés..... | 61 |
| Tableau II.13. Constituants des huit mélanges utilisés..... | 61 |
| Tableau II.14. Pourcentages des composants pour les 3 Méthodes..... | 63 |
| Tableau III.1. Analyse granulométrique du gravier 3/8..... | 67 |
| Tableau III.2. Analyse granulométrique du gravier 8/15..... | 67 |
| Tableau III.3. Analyse granulométrique du gravier 15/25..... | 68 |
| Tableau III.4. Analyse granulométrique du sable 0/3 Ain Roua..... | 68 |
| Tableau III.5. Analyse granulométrique du sable 0/3 Adrar Oufarnou..... | 69 |
| Tableau III.6. Analyse granulométrique du mélange de 02 sables..... | 70 |
| Tableau III.7. Détermination du coefficient d'aplatissement 'A' pour le gravier (3/8)..... | 71 |

-----Liste des Tableaux-----

| | |
|---|-----|
| Tableau III.8. Détermination du coefficient d'aplatissement 'A' pour le gravier (8/15)..... | 71 |
| Tableau III.9. Détermination du coefficient d'aplatissement 'A' pour le gravier (15/25)..... | 72 |
| Tableau III.10. Calcul de la teneur en impuretés pour les gravillons..... | 73 |
| Tableau III.11. Résultats de l'équivalent de sable visuel et par piston (sable Ain Roua)..... | 74 |
| Tableau III.12. Résultats de l'équivalent de sable visuel et par piston (sable Adrar Oufarnou). | 74 |
| Tableau III.13. Résultats de l'équivalent de sable visuel et par piston du mélange..... | 74 |
| Tableau III.14. Résultats des analyses chimique des sables..... | 75 |
| Tableau III.15. Masse volumique absolue des granulats utilisés par la méthode d'éprouvette graduée..... | 76 |
| Tableau III.16. Masse volumique absolue des granulats utilisés par la méthode au Pycnomètre..... | 78 |
| Tableau III.17. Masse volumique apparente des granulats utilisés..... | 79 |
| Tableau III.18. Mesure du coefficient Los Angeles des granulats..... | 80 |
| Tableau III.19. Mesure du coefficient micro-Deval des granulats..... | 81 |
| Tableau III.20. Mesure le temps de début et de fin de prise..... | 81 |
| Tableau III.21. Détermination de la stabilité par le Chatelier..... | 83 |
| Tableau IV.1. Résultats de la courbe de référence selon Dreux Gorisse..... | 86 |
| Tableau IV.2. Récapitulation de la composition du béton par la méthode de Dreux | 89 |
| Tableau IV.3. Récapitulation de la composition du béton selon la méthode de Faury..... | 92 |
| Tableau IV.4. Les résultats de la courbe de mélange selon la méthode de Faury..... | 92 |
| Tableau IV.5. Résultats de la courbe de mélange selon Bolomey..... | 99 |
| Tableau IV.6. Résultats de la composition de béton selon Bolomey..... | 101 |
| Tableau V.1. Les quantités des composants selon Dreux, Faury et Bolomey..... | 104 |
| Tableau V.2. Résultats d'affaissement au cône d'Abrams..... | 104 |
| Tableau V.3. Volume d'air occlus dans le béton selon Bolomey, Dreux et Faury | 105 |
| Tableau V.4. Evaluation de la masse moyenne des bétons par Bolomey, Dreux et Faury en fonction du temps..... | 106 |
| Tableau V.5. Evaluation de la masse volumique moyenne des bétons selon Bolomey, Dreux et Faury en fonction du temps..... | 107 |
| Tableau V.6. Résultats de la résistance à la compression à différents ages en jours selon Bolomey..... | 112 |

-----**Liste des Tableaux**-----

| | |
|---|-----|
| Tableau V.7. Résultats de la résistance à la compression à différents ages en jours selon Dreux Gorisse..... | 113 |
| Tableau V.8. Résultats de la résistance à la compression à différents ages en jours selon Faury..... | 114 |
| Tableau V.9. Les quantités des composants selon Dreux, Faury et Bolomey..... | 120 |
| Tableau V.10. Valeurs du retrait sur les prismes du béton selon Dreux en fonction du temps.. | 118 |
| Tableau V.11. Valeurs du retrait sur les prismes du béton selon Faury en fonction du temps... | 120 |
| Tableau V.12. Valeurs du retrait sur les prismes du béton selon Bolomey en fonction du temps..... | 121 |
| Tableau V.13. Evaluation de la masse moyenne des prismes de béton selon Dreux en fonction du temps..... | 124 |
| Tableau V.14. Evaluation de la masse moyenne des prismes de béton selon Faury en fonction du temps..... | 124 |
| Tableau V.15. Evaluation de la masse moyenne des prismes de béton selon Bolomey en fonction du temps..... | 124 |

SOMMAIRE

| | |
|--|----|
| Liste des figures | 1 |
| Liste des tableaux | 3 |
| Introduction générale | 6 |
| Chapitre I : Etude bibliographique | |
| I.1.Critères exigés pour la formulation du béton | 9 |
| I.1.1 Dimension maximale des granulats..... | 10 |
| I.1.2 Résistance..... | 10 |
| I.1.3 Ouvrabilité..... | 11 |
| I.1.4 Agressivité du milieu ambiant..... | 12 |
| I.2. Comment déterminer la composition du béton..... | 12 |
| I.3. L'approche de la formulation..... | 13 |
| I.3.1. Dosage en ciment..... | 13 |
| I.3.2. Dosage en eau..... | 15 |
| I.3.2.1.Caractéristique de l'eau de gâchage..... | 18 |
| I.3.3. Choix des granulats..... | 19 |
| I.3.4. Choix et dosage des adjuvants..... | 21 |
| I.4. Changements volumétriques du béton..... | 21 |
| I.4.1. Changements volumétriques au jeune âge..... | 21 |
| I.4.1.1. Le retrait chimique..... | 22 |
| I.4.1.2. Le retrait endogène..... | 23 |
| I.4.1.3. Le tassement..... | 25 |
| I.4.1.4. Le retrait plastique..... | 25 |
| I.4.1.5. Gonflement..... | 26 |
| I.4.1.6. Retrait au séchage du béton durci..... | 26 |
| I.4.2. Effet des ingrédients du béton sur le retrait au séchage..... | 29 |
| Chapitre II : Méthodes de composition des bétons | |
| II.1. Introduction | 32 |
| II.2. Méthodes de composition de béton..... | 33 |
| II.2.1. Méthode de Bolomey..... | 34 |
| II.2.1.1. Principe..... | 34 |

| | |
|---|----|
| II.2.1.2. Courbe optimale..... | 35 |
| II.2.1.3. Détermination de la quantité d'eau selon Bolomey..... | 36 |
| II.2.1.4. Limite et emploi de la méthode de Bolomey..... | 37 |
| II.2.2. Méthode de Faury..... | 37 |
| II.2.2.1. Principe..... | 37 |
| II.2.2.2. Particularités de la méthode de Faury..... | 37 |
| II.2.2.3. Tracé de la courbe optimale..... | 38 |
| II.2.2.4. Emploi de la méthode de Faury..... | 39 |
| II.2.2.5. Détermination de la quantité d'eau par Faury..... | 40 |
| II.2.3. Méthode de Dreux et Gorisse..... | 40 |
| II.2.3.1. Principe de la méthode..... | 40 |
| II.2.3.2. Données de base..... | 41 |
| II.2.3.3. Dimension maximale des granulats..... | 42 |
| II.2.3.4. Dosage en ciment..... | 43 |
| II.2.3.5. Dosage en eau..... | 46 |
| II.2.3.6. Dosage des granulats..... | 46 |
| II.3. Ajustement de la formule au mètre cube..... | 50 |
| II.4. Exemple de détermination de composition de bétons..... | 51 |
| II.4.1. Méthode de Bolomey..... | 52 |
| II.4.2. Méthode de Faury..... | 55 |
| II.4.3. Méthode de Dreux Gorisse..... | 58 |
| II.5. Application des trois méthodes pour le béton compacté au rouleau..... | 60 |
| II.5.1. Identification des constituants du mélange du BCR..... | 60 |
| II.5.1.1. Dosage en ciment..... | 60 |
| II.5.1.2. Qualité et dosage des granulats..... | 60 |
| II.5.1.3. Dosage en eau..... | 61 |
| II.5.2. Identification des mélanges..... | 61 |
| II.5.3. Conclusion | 63 |
| Chapitre III : Caractérisation des matériaux | |
| III.1. Introduction | 65 |
| III.2. Classification des granulats..... | 65 |
| III.3. Description des composants de base..... | 66 |
| III.3.1. Ciment..... | 66 |
| III.3.2. L'eau de gâchage..... | 66 |

| | |
|--|----|
| III.3.3. Le sable..... | 66 |
| III.3.4. Les granulats..... | 66 |
| III.4. Analyse granulométrique des granulats utilisés..... | 66 |
| III.4.1. Analyse granulométrique des gravillons..... | 66 |
| III.4.2. Analyse granulométrique du sable..... | 68 |
| III.5. Expression des résultats de la courbe granulométrique..... | 68 |
| III.6. Mesure du Coefficient d'aplatissement des granulats..... | 70 |
| III.6.1. Expression du coefficient d'aplatissement 'A'..... | 70 |
| III.6.2. Interprétation des résultats..... | 72 |
| III.7. Calcul de la teneur en impureté..... | 72 |
| III.7.1. Détermination de la propreté superficielle..... | 72 |
| III.7.2. Expression des résultats..... | 72 |
| III.7.3. Interprétation des résultats..... | 73 |
| III.8. Caractérisation des sables..... | 73 |
| III.8.1. Essai d'équivalent de sable à 10 % de fines..... | 73 |
| III.8.2. Présentation des résultats..... | 74 |
| III.8.3. Interprétation des résultats..... | 74 |
| III.9. Mesure du coefficient de fiabilité des sables..... | 75 |
| III.9.1. Expression des résultats..... | 75 |
| III.9.2. Interprétation des résultats..... | 75 |
| III.10. Analyse chimique des sables utilisés..... | 75 |
| III.11. Détermination de la masse volumique..... | 75 |
| III.11.1. Masse volumique absolue..... | 75 |
| III.11.1.1. Méthode de l'éprouvette..... | 75 |
| III.11.1.2. Méthode au pycnomètre..... | 77 |
| III.11.2. Calcul de la masse volumique apparente..... | 79 |
| III.12. Résistance au choc : essai Los Angeles..... | 80 |
| III.13. Résistance à l'usure : essai micro-Deval..... | 80 |
| III.14. Essais sur la pâte de ciment..... | 81 |
| III.14.1. Essai de prise..... | 81 |
| III.14.2. Détermination de la stabilité «appareil le Chatelier»..... | 82 |

| | |
|--|----|
| III.14.2.1. Objectif de l'essai..... | 82 |
| III.14.2.2. Préparation de l'échantillon | 82 |
| III.16.2.3. Expression des résultats | 83 |

Chapitre IV : Etude de la formulation

| | |
|--|----|
| IV.1. Formulation du béton selon la méthode de Dreux-Gorisse..... | 84 |
| IV.1.1. Détermination de la composition du béton..... | 84 |
| IV.1.2. Tracé de la courbe granulaire de référence..... | 84 |
| IV.1.3. Tracé de la courbe représentative du mélange des granulats..... | 85 |
| IV.1.4. Calcul les volumes absolus des matières solides..... | 87 |
| IV.1.5. Calcul des dosages des granulats et de ciment en (Kg/m ³)..... | 88 |
| IV.1.6. Calcul des dosages des granulats en (litres/m ³)..... | 88 |
| IV.2. Formulation du béton selon la méthode de Faury..... | 89 |
| IV.2. 1. Détermination de D _{max} | 89 |
| IV.2.2. Détermination de quantité d'eau « I »..... | 90 |
| IV.2. 3. Détermination de la masse sèche (en litres)..... | 90 |
| IV.2.4. Détermination de la masse volumique apparente du ciment..... | 90 |
| IV.2.5. Détermination de pourcentage (sable + gravier)..... | 90 |
| IV.2.6. Calcul les volumes absolus des constituants..... | 90 |
| IV.2.7. Calcul des dosages des granulats et de ciment en (Kg/m ³)..... | 91 |
| IV.2.8. Calcul des dosages des granulats en (litres/m ³)..... | 91 |
| IV.3. Formulation du béton par la méthode de Bolomey..... | 95 |
| IV.3.1. Processus d'étude..... | 95 |
| IV.3.1.1. Données..... | 95 |
| IV.3.1.2. Détermination de la courbe optimale..... | 95 |
| IV.3.1.3. Détermination les pourcentages C, S, G1 et G2 des quatre constituants..... | 95 |
| IV.3.1.4. Détermination de la courbe granulométrique du mélange sec envisagé..... | 98 |
| IV.3.1.5. Détermination la composition d'un mètre cube de béton..... | 99 |

Chapitre V : Etude expérimentale et interprétation des résultats

| | |
|---|-----|
| V.1. Confection des bétons..... | 103 |
| V.2. Essais effectués sur le béton frais..... | 104 |
| V.2. 1. Essai d'affaissement au cône d'Abrams – Slump test (NF P 18-451)..... | 104 |
| V.2. 2. Contrôle du volume d'air entraîné (NF P 18-353)..... | 104 |
| V.3. Prélèvement des échantillons..... | 105 |

| | |
|---|------------|
| V.4. Mode de mûrissement..... | 106 |
| V.5. Masse volumique fraîche..... | 106 |
| V.6. Essais réalisés sur le béton durci..... | 107 |
| V.6.1. Masse volumique..... | 107 |
| V.6.2. Calcul de la masse volumique sèche..... | 108 |
| V.6.2.1. Calcul de la masse volumique sèche théoriquement..... | 108 |
| V.6.2.2. Calcul de la masse volumique sèche à 28 jours..... | 109 |
| V.6.3. Essai de compression (NF P 18-406)..... | 110 |
| V.6.3.1. Rectification des faces de l'éprouvette..... | 110 |
| V.6.3.1. Objectif de l'essai..... | 111 |
| V.6.3.2. Principe de l'essai..... | 111 |
| V.6.3.3. Equipement nécessaire..... | 111 |
| V.6.3.4. Présentation des résultats..... | 111 |
| V.6.3.5. Présentation des résultats..... | 111 |
| V.7. Correction effectuée sur le béton selon la méthode de Dreux-Gorisse..... | 115 |
| V.8. Essais de retrait..... | 116 |
| V.8.1 Objectif de l'essai..... | 116 |
| V.8.2. Principe de l'essai..... | 116 |
| V.8.3. Conduite de l'essai..... | 116 |
| V.8.4. Résultats obtenus..... | 118 |
| V.9. Evaluation de la masse moyenne sur les prismes de béton..... | 124 |
| Conclusion générale..... | 126 |
| Références bibliographiques..... | 128 |
| Annexes..... | 131 |

INTRODUCTION GENERALE

Introduction Générale

Le béton, depuis son origine, a été réalisé à partir des composants de base que sont : le ciment, l'eau et les granulats. Les romains le confectionnaient à partir de chaux, de céramique écrasée et de sable volcanique (Vitruvius « de Architectura » 1er siècle av. J.C.). Le Panthéon de Rome, an 124 après J.C., est couvert par une gigantesque coupole en béton [1].

Si le matériau est plastique donc moulable lors de sa fabrication, il acquiert ses propriétés au cours du temps. Une fois mature, le béton doit être considéré comme un composite constitué de granulats et d'une pâte de ciment durcie, dont les propriétés dépendent, pour une grande part, de sa formulation [2].

L'évolution des connaissances du matériau, les exigences nouvelles en matière de propriétés ont incité les chercheurs et les utilisateurs à introduire dans les formulations de nouveaux « produits » afin d'obtenir des propriétés singulières. Ainsi, actuellement, assiste-t-on à une explosion de la gamme des bétons pour répondre aux demandes des industriels. En retour, les maîtres d'oeuvre, s'appropriant les connaissances de ces nouveaux matériaux, proposent des ouvrages innovants. Il s'agit réellement d'une révolution dans la mesure où le matériau est conçu en fonction d'un nombre de critères de plus en plus important et par conséquent des formulations différentes seront définies pour chaque ouvrage[2].

Toutefois, il ne faut pas se faire d'illusion, la formulation élaborée résulte le plus souvent d'un compromis répondant au mieux aux propriétés recherchées. Après avoir établi la composition théorique, et bien souvent avec l'aide de l'expérience, il sera nécessaire de réaliser et de faire évoluer la formule en laboratoire, avant de la tester dans un processus industriel jusqu'à la mise en oeuvre.

Pour éviter des formulations de béton inadaptées, le législateur encadre de plus en plus celles-ci en définissant des limites de formulation. Les dernières normes européennes à statut de normes françaises (ou, à défaut, les normes françaises en vigueur) seront prises pour référence dans ce document. L'évolution rapide de ce domaine incitera donc le lecteur à prendre en compte les dernières normes en vigueur sur ce sujet.

1-2 Situation du problème

L'étude de la composition d'un béton, revient à définir le mélange optimal des granulats, du dosage en ciment, en eau, ainsi qu'en adjuvant dont on dispose dans le but d'obtenir un béton adéquat.

La plupart des approches de formulation ne considèrent pas l'effet spécifique des paramètres du mélange et leurs interactions sur la performance du béton. Plusieurs chercheurs se sont penchés sur ce problème afin de développer des formulations de béton se caractérisant par une haute ouvrabilité et de bonnes caractéristiques mécaniques et de durabilité.

Les principaux problèmes auxquels on se trouve confronté, sont principalement la méthode de formulation d'une part qui réside en une démarche mathématique conduisant à une formule de composition de béton approximative et unique et d'autre part les données expérimentales mais souvent difficiles à interpréter qui trouvent un grand intérêt chez les chercheurs par les économies qu'elles procurent en réduisant le nombre d'essais nécessaires afin d'aboutir à une formule adéquate de composition de béton.

1-3 Objectifs de la recherche

Il existe plusieurs méthodes donnant une comparaison d'un béton. L'objectif de ce travail est de choisir la méthode de composition adéquate vis-à-vis de la résistance à la compression et le retrait. Les différentes méthodes à comparer sont :

- Méthode de Bolomey
- Méthode de Dreux-Gorisse
- Méthode de Faury

Une étude des relations entre les divers paramètres caractérisant le béton ordinaire (BO) est utile afin de mieux comprendre les limites des essais pour des différentes gâchées et identifier les paramètres les plus concluants.

Le but de cette étude est de déterminer la méthode de composition de béton adéquate qui donne une évolution de la résistance à la compression meilleure et un retrait minime.

Des méthodologies d'optimisation et de développement de formulation du béton permettant de déterminer les principales caractéristiques d'un béton à partir de sa composition et d'estimer le dosage à partir des caractéristiques souhaitées.

1-4 Organisation du mémoire

Ce mémoire est structuré en cinq chapitres.

Après cette introduction, le premier chapitre présente un aperçu général sur l'état de recherche et de développement de la formulation du béton, il traite d'abord des critères exigés pour la formulation du béton à savoir : les dimensions maximales des granulats, la résistance à la compression, l'ouvrabilité et l'agressivité du milieu ambiant. En deuxième chapitre, quelques méthodes de composition du béton ont été exposées, principalement la méthode de Bolomey, la méthode de Faury et la méthode de Dreux-Gorisse.

Le troisième chapitre regroupe les détails relatifs aux matériaux et appareillages utilisés dans cette étude. Nous y présentons également les normes utilisées et les différentes procédures expérimentales adoptées pour la réalisation des différents essais.

Dans le quatrième chapitre, une étude de formulation de béton selon les trois méthodes citées précédemment visant à déterminer les proportions des différents matériaux à mettre en œuvre afin de réaliser un béton à caractère normalisé et d'estimer les dosages des différents constituants en kg/m^3 ou en l/m^3 à partir des caractéristiques souhaitées.

Le chapitre cinq regroupe les résultats et discussions sur les essais d'études, des gâchées expérimentales ont été réalisées, d'une part 9 séries d'éprouvettes cylindriques dimensions $(16 \times 32) \text{ cm}^2$ de béton (54 éprouvettes), qui feront l'objet de suivre l'évolution de la résistance à la compression jusqu'à 180 jours, et 3 séries d'éprouvettes prismatiques de dimensions $(10 \times 10 \times 50) \text{ cm}^3$ de béton (09 prismes), qui feront l'objet de suivre l'évolution de retrait au séchage de béton jusqu'à 180 jours.

Enfin, on achèvera notre travail par une conclusion générale qui résume les principaux résultats obtenus.

CHAPITRE I

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Introduction :

Depuis que l'on fabrique des bétons, les ingénieurs et chercheurs ont élaboré des théories, plus au moins inspirées de l'expérience, afin de définir les règles de composition pour la fabrication de ces bétons [3].

L'étude de la composition d'un béton consiste à définir le mélange optimal des différents constituants (granulats) dont on dispose ainsi que le dosage en ciment et en eau à fin de réaliser un béton dont les qualités soient celles recherchées pour la construction de l'ouvrage ou la partie de l'ouvrage en cause [2, 4, 6, 7]

Aborder un problème de formulation aujourd'hui ne se présente pas comme la simple application d'une méthode qui se présenterait comme une démarche que l'on suivait pas à pas et qui, pour chaque cas concret, conduirait à une solution entièrement et uniquement définie par les données techniques. Il convient de distinguer deux volets dans la formulation d'un béton :

Le choix des constituants tout d'abord, la détermination de leurs proportions ensuite [5].

Quelle que soit la méthode utilisée, la formule de composition calculée ne peut prétendre correspondre parfaitement au béton désiré, car il n'est pas possible d'appréhender avec précision, par le calcul, certaines qualités des constituants qui influencent directement la qualité du béton : forme, angularité, porosité, adhésivité des granulats, fines du sable, finesse de mouture et classe de résistance vraie du ciment, etc.

C'est pourquoi, comme beaucoup de spécialistes dans la matière, nous pensons que le calcul d'un mélange n'est qu'une première approche de préparation des mélanges d'essais qui permettront de corriger expérimentalement la formule calculée pour aboutir au béton désiré [7].

I.1.Critères exigés pour la formulation du béton [2, 5, 7 et 8]

De nombreuses méthodes ont été élaborées par le passé en fonction de l'évolution des connaissances relatives aux constituants et de leurs rôles, des technologies et de l'expérience acquise sur les chantiers.

L'étude de la composition de béton consiste presque toujours, à rechercher conjointement deux qualités essentielles : résistance et ouvrabilité ; or ces deux qualités sont étroitement liées l'une à l'autre, quant aux facteurs dont elles dépendent mais elles varient en sens inverse comme indiqué dans le tableau (I.1) [4, 5, 9]

| Tableau I.1. Qualités de divers paramètres en fonction soit de l'ouvrabilité, soit de la résistance recherchée pour un béton | | |
|---|----------------------------|-----------------------------------|
| Facteurs de composition du béton | Pour une bonne ouvrabilité | Pour une bonne résistance |
| Finesse du sable..... | plutôt fin | plutôt grossier |
| Rapport $\frac{G(\text{gravier})}{S(\text{sable})}$ | à diminuer | à augmenter |
| Dosage en eau | à augmenter | à diminuer |
| Granularité | continue préférable | discontinue légèrement préférable |
| Dimension maximale des granulats D..... | plutôt petite | plutôt forte |

Les critères exigés pour la formulation du béton se résume alors en quatre étapes majeures :

- détermination de la dimension maximale des granulats,
- La résistance
- L'ouvrabilité
- Agressivité du milieu ambiant (durabilité)

I.1.1. Dimension maximale des granulats [4]

La dimension maximale du gros granulat que l'on peut utiliser dépend à la fois de la forme et des dimensions des éléments de béton, ainsi que des quantités et de la disposition des aciers d'armature. Généralement la grosseur maximale des granulats ne doit pas dépasser 1/5 de la plus faible dimension de l'élément de béton ou le 3/4 de l'espacement des aciers d'armature ou de leur distance aux coffrages.

Dans le cas des dalles non armées reposant sur le sol, la grosseur maximale des gros granulats ne doit pas dépasser 1/3 de l'épaisseur de la dalle.

I.1.2. Résistance mécanique [7, 10 et 11]

La mise au point d'une formule de béton consiste à rechercher à partir d'un composant donné (le plus souvent local), un mélange ayant, à l'état frais, une certaine maniabilité, à l'état durci, une résistance en compression donnée, et ce au moindre coût.

Ce critère de résistance conduira au choix du ciment (nature, classe) et son dosage, ainsi qu'au dosage en eau et à l'éventuelle utilisation d'adjuvants. Ce critère a également une influence sur le rapport G/S (proportion gravier / sable).

La résistance à la compression s'explique par la réaction d'hydratation du ciment Portland, Mélange de clinker et de gypse finement co-broyés. Le clinker se compose principalement des

quatre minéraux suivants: silicate tricalcique C_3S , silicate bicalcique C_2S , aluminat tricalcique C_3A et aluminoferrite tétra calcique C_4AF .

La réaction du C_2S et du C_3S avec l'eau conduit à la formation d'hydrates dont les principaux sont les cristaux de C-S-H ($CaO-SiO_2-H_2O$), qui sont en majeure partie responsables du durcissement de la pâte de ciment, permettant à cette dernière de reprendre les charges extérieures et donc de participer à la résistance macroscopique du béton ([12] et [13]).

La liaison entre la pâte durcie et les granulats qu'elle enrobe conditionne également la résistance mécanique du béton.

- La durabilité est liée à la résistance aux agressions physico-chimiques du milieu environnant (milieu humide, milieu marin, effet du gel, pollution atmosphérique, etc.) et aux sollicitations mécaniques de l'ouvrage.

I.1.3. Ouvrabilité [7, 10 et 11]

L'ouvrabilité est une qualité essentielle du béton, elle peut se définir comme la facilité offerte à la mise en oeuvre du béton pour le remplissage parfait du coffrage et du ferrailage, une bonne ouvrabilité comporte une marge de sécurité permettant sans conséquences fâcheuses, une certaine et nécessaire latitude par rapport aux bonnes et plus ou moins rigoureuses règles à appliquer pour une exécution optimale.

De l'ouvrabilité dépendent, en effet, la plupart des qualités de l'ouvrage : compacité et résistance réelle du béton dans l'ouvrage lui-même, enrobage et adhérence des armatures, cohésion du béton entraînant un moindre risque de ségrégation, parements de belle apparence, étanchéité.

L'ouvrabilité est, pour le béton, une qualité fondamentale qui doit être très sérieusement prise en compte dans l'étude de la composition.

Des essais permettent de mesurer empiriquement certaines caractéristiques dépendant de l'ouvrabilité. Nous pouvons citer quelques appareils recensés dans la littérature: le cône d'Abrams et l'étalement à la table à secousses [14]. Cet essai est présenté dans la figure (I.1).



Figure I.1 : cône d'Abrams

L'affaissement au cône d'Abrams est incontestablement un des essais les plus simples et les plus fréquemment utilisés il est décrit dans la norme (NF P 18-451), cette norme spécifie cinq classes de consistance S1 à S5 en fonction de l'affaissement (Tableau I.2).

Tableau I.2-Classes de consistance vis-à-vis de l'affaissement

| Classes | S1 | S2 | S3 | S4 | S5 |
|------------------------|---------|---------|-----------|-----------|-------|
| Affaissement A en (mm) | 10 à 40 | 50 à 90 | 100 à 150 | 160 à 210 | ≥ 220 |

Dans le cas d'un béton serré par vibration, le temps total de vibration est relié à l'affaissement par l'expression empirique suivante [11] :

$$t_v = 2,5(G + \frac{1}{A + 0,05}) \frac{VF}{\Phi}$$

Où

t_v : temps total de vibration (s)

A : affaissement au cône d'Abrams (m)

V : volume du béton (m³)

Φ : diamètre de l'aiguille vibrante (m)

F : coefficient de ferrailage (1 ; 1,5)

G : coefficient de d'angularité des granulats (1 ; 5)

I.1.4. Agressivité du milieu ambiant (durabilité) [7]

Le milieu ambiant conditionne l'étude de la composition du béton. La présence d'eaux agressives, les conditions climatiques et thermiques peuvent influencer le choix du type de ciment, la nature minéralogique des granulats et le rapport E /L (dosage en eau sur dosage en liant).

I.2. Comment déterminer la composition du béton [8,15]

L'obtention des caractéristiques requises pour le béton passe impérativement par l'adoption et l'optimisation de sa formulation aux exigences appropriées à l'ouvrage et à son environnement. C'est la raison pour laquelle la démarche retenue comporte le plus souvent deux phases.

- Approche d'une composition, soit de façon graphique à partir de méthodes telles que celle de Faury ou de Dreux, soit de façon expérimentale (par exemple à partir de la méthode LCPC de Baron et Lesage) [16].

Il faut préciser que ces différentes méthodes sont basées sur la recherche d'une compacité maximale conformément aux théories de Caquot sur la composition granulaire des mélanges, que les connaissances actuelles sur le béton ont confirmées pour l'essentiel.

- La deuxième phase consiste à ajuster expérimentalement cette formulation en fonction des résultats obtenus par des essais effectués en laboratoire (essais d'étude) ou dans les conditions du chantier (épreuves de convenance).

I.3. L'approche de la formulation [8,15]

I.3.1. Dosage en ciment

Pour bien comprendre le caractère primordial du dosage en ciment, il faut rappeler que celui-ci remplit deux fonctions essentielles dans le béton.

a. La fonction de liant

Elle est déterminante dans la résistance du béton, qui dépend de la nature du ciment, de sa propre résistance et de l'évolution de son durcissement.

b. La fonction filler

Le ciment complète la courbe granulométrique du béton dans les éléments fins. Il faut noter que le développement dans le temps des hydrates du ciment colmate progressivement les pores capillaires, contribue à diminuer la porosité d'ensemble du béton et améliore notablement sa durabilité.

Les abaques de G. Dreux, reposent sur cette approche qui privilégie la « fonction liant », donc la résistance. Dans cette démarche, le ratio C/E (dosage en ciment sur dosage en eau) est calculé à partir de la formule de Bolomey suivante :

$$f_{cm} = G \cdot \sigma'_c \cdot \left(\frac{C}{E} - 0,5 \right)$$

Expression simplifiée inspirée de la formule de Féret.

Avec :

$$f_{cm} = f_{c28} + 15\% f_{c28}$$

f_{c28} : Résistance à la compression du béton à 28 jours.

f_{cm} = Résistance moyenne visée à 28 jours.

σ'_c = Classe vraie du ciment à 28 jours

G = Coefficient granulaire compris entre 0,35 et 0,65. Il faut cependant rappeler que la « fonction filler » conduit à un dosage en ciment supérieur aux valeurs habituellement

fixées par les cahiers des charges ou les documents normatifs. La norme (NF EN 206-1) fixe des dosages minimaux en ciment *C* liés aux classes d'environnement.

Les ciments se caractérisent en fonction de leur classe de résistance à la compression, ces dernières, mesurées à 28 jours d'ages, étant exprimées en MPa.

Tableau I.3. Classes de résistances des ciments conformes à la norme NF P 15- 301 de juin 1994 [8,14]

| Désignation de la classe | Résistance au jeune age (MPa) | | Résistance normale en (MPa) | |
|--------------------------|-------------------------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|
| | à 2 jours limite inférieure | à 7 jours limite inférieure | à 28 jours limite inférieure | à 28 jours limite supérieure |
| 32,5 N | - | - | ≥ 32,5 | ≤ 52,5 |
| 32,5 R | ≥ 13,5 | - | | |
| 42,5 N | ≥ 12,5 | - | ≥ 42,5 | ≤ 62,5 |
| 42,5 R | ≥ 20 | - | | |
| 52,5 N | ≥ 20 | - | ≥ 52,5 | - |
| 52,5 R | ≥ 30 | - | | |

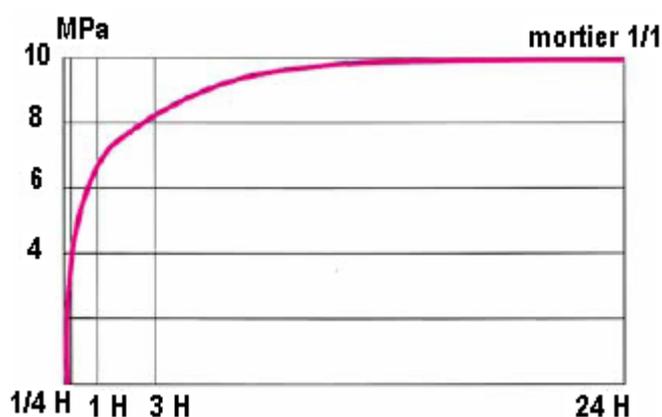


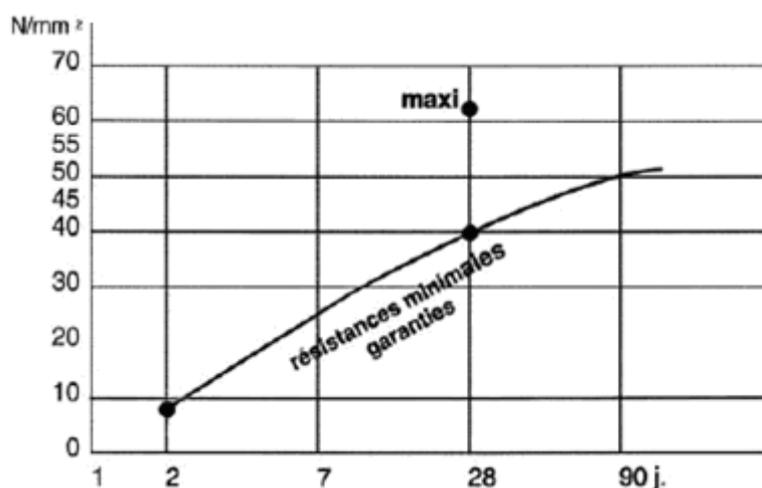
Figure I.2. Résistance à la compression à très court terme [6]

Les limites garanties sont précisées dans le tableau (I.4), étant entendu qu'un ciment comportant un ou plusieurs échantillons dépassant les valeurs limites garanties ne serait pas conforme à la norme.

Tableau I.4 : Limites garanties du ciment à 28 jours [14]

| Classes | à 2 jours | à 7 jours | à 28 jours |
|---------|-----------|-----------|------------|
| 32,5 N | - | 17,5 | 30,0 |
| 32,5 R | 12,0 | - | 30,0 |
| 42,5 N | 10,0 | - | 40,0 |
| 42,5 R | 18,0 | - | 40,0 |
| 52,5 N | 18,0 | - | 50,0 |
| 52,5 R | 28,0 | - | 50,0 |

Les classes « R » rapides, présentent aux jeunes ages des caractéristiques mécaniques plus élevées trouvent leur intérêt particulièrement des certaines circonstances telles que bétonnage par temps froids et décoffrage rapide (préfabrication).

**Figure I.3. Résistances minimales garanties d'un CEM 42,5N [6]**

• Finesse d'un ciment [14, 15]

La finesse de mouture d'un ciment est caractérisée par sa surface spécifique ou surface développée totale des grains continus dans une masse donnée, elle est d'une façon générale, comprise entre 3000 à 3500 cm²/g. Cette finesse, mesurée conventionnellement selon la norme européenne (EN 196-6), est exprimée en cm²/g.

A une augmentation de finesse correspond une augmentation des résistances précoces (2 à 7 jours), mais aussi une tendance accrue et à l'éventuellement au retrait.

I.3.2. Dosage en eau [17]

Le dosage en eau est un facteur très important de la composition du béton. On présente bien l'influence qu'il a sur la porosité du béton par les pores capillaires créés, lorsque l'eau

s'élimine pour différentes raisons (Évaporation, combinaison chimique, absorption par les granulats). Par exemple, avec un E/C , couramment utilisé, de 0.55, on estime que la moitié de l'eau de gâchage sert à l'hydratation du ciment, l'autre moitié est une eau de mouillage interstitielle qui contribue à la plasticité du béton requise pour sa mise en oeuvre. Ce schéma est modifié par l'emploi croissant d'adjuvants contribuant à améliorer la plasticité sans nécessiter une présence d'eau en excès, nuisible aux caractéristiques finales du béton durci.

Toutes ces raisons soulignent l'importance de l'optimisation du dosage en eau, qu'on a tendance à approcher, par exemple en le déduisant de l'expression C/E précédemment adoptée et en l'affinant grâce à des essais pratiqués dans les conditions du chantier, qui ont le mérite d'intégrer des paramètres difficiles à quantifier.

La figure (I.4) montre un abaque tiré de la méthode de formulation de Dreux et Gorisse, qui permet, pour différents dosages en ciment, d'évaluer la quantité d'eau nécessaire pour obtenir un affaissement visé.

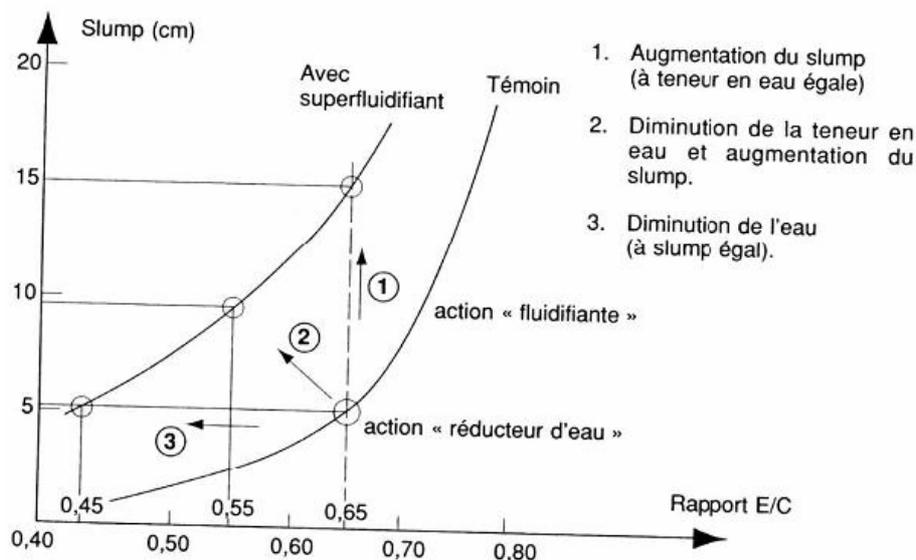


Figure I.4-Utilisations des super plastifiants- Tiré de [14]

Le tableau (I.5) montre la quantité d'eau de gâchée et teneur en air approximatives requises pour différents affaissements et grosseurs nominales et maximales des granulats.

Tableau I.5. Quantité d'eau en Kg/m³ de béton pour grosseurs nominales et maximales des granulats indiqués [18]

| Affaissement (mm) | Quantité d'eau en Kg/m ³ de béton pour grosseurs nominales et maximales des granulats indiqués | | | | | | | |
|--|---|-------|-------|-------|-------|------|------|-------|
| | 10mm | 14mm | 20mm | 28mm | 40mm | 56mm | 80mm | 150mm |
| Béton sans air entraîné | | | | | | | | |
| 25 à 50 | 207 | 199 | 190 | 179 | 166 | 154 | 130 | 113 |
| 75 à 100 | 228 | 216 | 205 | 193 | 181 | 169 | 145 | 124 |
| 150 à 175 | 243 | 228 | 216 | 202 | 190 | 178 | 160 | - |
| Quantité approximative d'air emprisonnée dans un béton sans air entraîné (%) | 3 | 2, 5 | 2 | 1,5 | 1,0 | 0,5 | 0,3 | 0,2 |
| Béton à air entraîné | | | | | | | | |
| 25 à 50 | 181 | 175 | 168 | 160 | 150 | 142 | 122 | 107 |
| 75 à 100 | 202 | 193 | 184 | 175 | 165 | 157 | 133 | 119 |
| 150 à 175 | 216 | 205 | 197 | 184 | 174 | 166 | 154 | - |
| Teneur en air totale recommandée (%) | | | | | | | | |
| - Catégorie 1 | 6 à 9 | 5 à 8 | 5 à 8 | 4 à 7 | 4 à 7 | - | - | - |
| - Catégorie 2 | 5 à 8 | 4 à 7 | 4 à 7 | 3 à 6 | 3 à 6 | - | - | - |

Les teneurs en eau approximatives du tableau (I.5) et de la figure (I.5), utilisés pour le dosage, se rapportent à des gros granulats anguleux (pierre concassée).

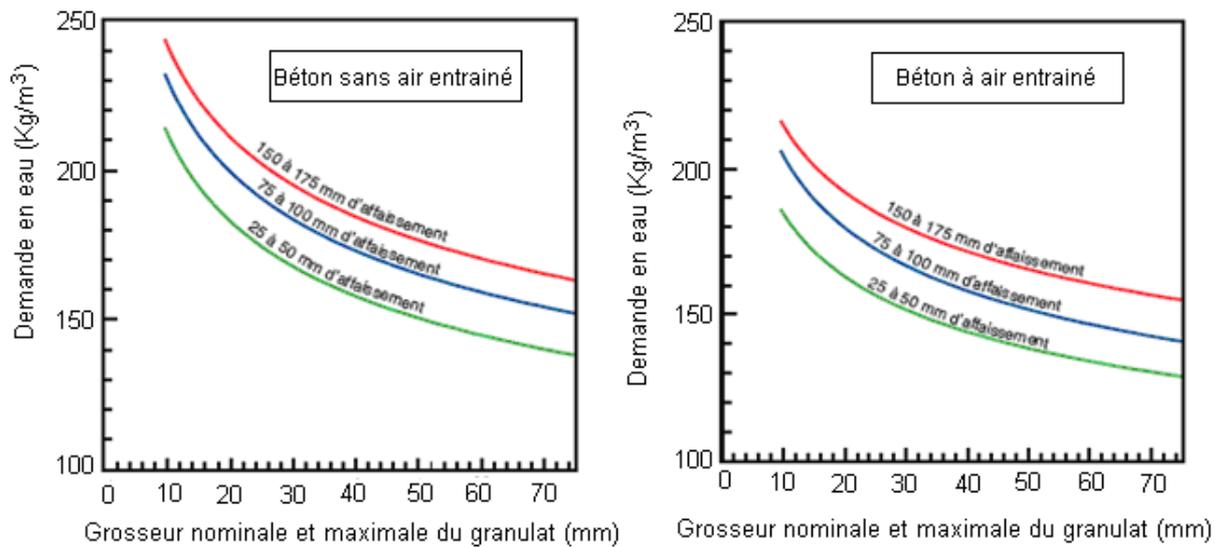


Figure I.5. Demande en eau approximative pour différents affaissements et tailles des granulats concassés

I.3.2.1. Caractéristique de l'eau de gâchage [19]

a- Caractéristiques physiques

L'eau de gâchage des bétons peut être une eau non potable (eau de rivière par exemple) ou, dans certaines régions du globe, une eau de littoral.

Mais dans tous les cas de figures, elle doit être propre, c'est-à-dire ne pas contenir de matières en suspension au-delà de certaines valeurs permises.

Les tolérances réglementaires pour les matières en suspension sont les suivantes :

- 2 g / litre pour les bétons des types A et B ;
- 5 g / litre pour les bétons du type C.

Avec :

1. Type A : béton à résistance mécanique élevée (ouvrages en béton armé) ;
2. Type B : béton à faible perméabilité (barrages, réservoirs, tuyaux)
3. Type C : béton à résistance mécanique faible (béton peu ou non armé, massif de fondations)

b- Caractéristiques chimiques

Les sels dissous dans l'eau interviennent dans la rhéologie du béton, la prise du ciment et la durabilité du matériau durci. L'eau de gâchage des bétons ne doit pas contenir des taux de sels en dessus des seuils normatifs suivants :

- 15 g / litre pour les bétons des types A et B ;
- 30 g / litre pour les bétons du type C.

Dissoutes (acides, sulfate de magnésie, etc.) ne puisse pas nuire à la conservation du béton.

Par ailleurs, il faudra veiller à ce que la proportion de certaines matières.

L'agressivité d'une eau naturelle vis-à-vis du béton peut être appréciée par les valeurs limites du tableau (I.6), extraites de la norme Allemande (DIN 4030).

Tableau I.6 : Evaluation de l'agressivité de l'eau naturelle

| Examen chimique | Agressivité | | |
|-----------------|-------------|------------|------------|
| | Faible | Forte | Très forte |
| Valeur du PH | 6.5 à 5.5 | 5.5 à 4.5 | < 4.5 |
| CO ₂ | 15 à 30 | 30 à 60 | > 60 |
| Ammonium | 15 à 30 | 30 à 60 | > 60 |
| Magnésium | 100 à 300 | 300 à 1500 | > 1500 |
| Sulfates | 200 à 400 | 600 à 3000 | > 3000 |

Toute eau douteuse doit être soumise à une analyse chimique. Cette analyse diffère de celle effectuée sur les eaux potables où l'on cherche les éléments toxiques, donc nocifs à la santé humaine, c'est plutôt la recherche des éléments nocifs à la prise, au durcissement, la durabilité du béton et la corrosion des armatures. Parmi les éléments ou substances nocifs on peut citer : les sulfates, la magnésie libre, les chlorures, etc. Enfin, l'eau de mer est strictement interdite pour la confection des ouvrages en béton armé, mais tolérée sous réserve, pour la confection de béton non armé.

I.3.3. Choix des granulats

A. Introduction

On désigne par le terme « granulat » un ensemble de particules de matière prévenant des roches naturelles, artificielles ou de matériaux recyclés. Ces particules sont de dimension, de formes et de natures diverses. On peut les agglomérer avec un liant pour produire des bétons de ciment ou on les utiliser telles quelles soit pour construire de chaussées, de barrages, etc.

B. Caractéristiques des granulats

1. Classe granulaire

Les granulats sont classés selon leur grosseur déterminée par criblage sur des tamis à maille carrée dont la dimension est exprimée en (mm).

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 rencontrées (Norme NFP18-101):

- 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 $d \geq 63$ mm et $D \leq 80$ mm,

▪ Choix des classes granulaires

La plupart du temps, la composition d'un béton présente une courbe granulaire discontinue obtenue à partir de deux classes granulaires : un sable de type 0/4 et un gravillon 5 /12,5 ; 5/16 ou 5/20, par exemple. On peut également utiliser deux classes de gravillons dans des compositions plus élaborées, lorsqu'on cherche à se rapprocher d'une granulométrie continue. Pour répondre à des performances particulières, il existe des bétons spéciaux qui font appel à d'avantage de classes.

2. Courbe granulaire

On trace les courbes granulométriques sur un graphique de référence, présentant en ordonnées les pourcentages des passants en refus, en abscisse l'ouverture des mailles (les gros grains supérieur à 80 mm et les fines inférieures à 80μ) sont exclus.

La forme des courbes granulométriques apporte les informations suivantes :

▪ Choix des granulats

Deux facteurs ont longtemps été considérés comme ayant une influence sur les propriétés du béton :

- la proportion relative gravillons/sable traduite par le facteur G/S que les études récentes ont fait apparaître comme moins importante qu'on ne le pensait auparavant, dans la mesure où ce facteur reste inférieur à 2 [14].
- la granulométrie du sable caractérisée, par exemple, par son module de finesse Le module de finesse d'un sable pour béton est généralement compris entre [2,2 et 2,8] [19].

I.3.4. Choix et dosage des adjuvants

Les adjuvants sont des produits chimiques qui, incorporés dans les bétons lors du malaxage ou avant leur mise en oeuvre, provoquent des modifications des propriétés du béton, notamment à l'état frais [14]. Il existe plusieurs types d'adjuvants qui sont régis par la norme (NF EN 934-2) : plastifiants/super plastifiants, rétenteurs d'eau, entraîneurs d'air, accélérateurs de prise, accélérateurs de durcissement, retardateurs de prise, hydrofuges....

I.4. Changements volumétriques du béton [18]

Le béton change légèrement de volume, pour plusieurs raisons, et comprendre la nature de ces changements s'avère utile pour planifier ou analyser les travaux en béton. Si le béton était libre de se déformer, les changements volumétriques normaux auraient très peu d'importance, mais puisque le béton est ordinairement retenu par la fondation, l'infrastructure, l'acier d'armature ou des membrures de liaison, il peut se produire des efforts importants. Cela est particulièrement sérieux lorsqu'il s'agit d'efforts de tension.

Des fissures se développent parfois, puisque le béton est relativement faible en tension mais particulièrement fort en compression. Les tensions élevées et la fissuration peuvent être évitées ou minimisées en contrôlant les variables qui affectent les changements volumétriques. Le calcul des structures devrait être effectué en tenant compte de l'ouverture de fissure tolérée dans le béton armé. Par changement de volume, on entend aussi bien une augmentation qu'une diminution de volume. La plupart du temps, les changements de volume du béton peuvent être reliés à une expansion ou une contraction due à des variations de température ou d'humidité. Il peut y avoir aussi des changements de volume causés par des réactions chimiques tel le retrait de carbonatation, l'attaque par des sulfates ou une expansion délétères alcalis granulats. Il y a aussi le fluage qui est une déformation consécutive à l'application continue d'une contrainte ou d'une charge.

Il ne faudrait pas oublier non plus les changements de longueur ou de forme dans le domaine des déformations élastiques ou inélastiques qui se produisent instantanément chaque fois qu'on applique une charge. Les changements de volume qui se produisent dans le béton sont normalement de très faible amplitude, ils peuvent varier de 10 à 1000 x 10⁻⁶.

I.4.1. Changements volumétriques au jeune âge

Le volume du béton commence à varier peu de temps après sa mise en place. Les variations volumétriques au jeune âge, durant les premières 24 heures, peuvent influencer les changements volumétriques (comme le retrait de séchage) et la fissuration du béton durci, particulièrement dans le cas des bétons ayant un faible rapport eau/liants.

Les différentes formes de changements volumétriques au jeune âge sont les suivantes :

I.5.1.1. Le retrait chimique

Le retrait chimique est la diminution du volume absolu des solides et des liquides de la pâte lors de l'hydratation du ciment. Le volume absolu des produits d'hydratation est inférieur à la somme des volumes absolus de l'eau et du ciment anhydre. Les deux premières colonnes de la figure (I.6) illustrent la variation volumique de la pâte de ciment à l'état plastique. Les bulles d'air entraînées par le malaxage ne sont pas représentées. Le retrait chimique se poursuit à l'échelle microscopique tant que progresse l'hydratation du ciment. Après la prise initiale, la pâte ne peut plus se déformer aussi librement que lorsqu'elle était à l'état plastique.

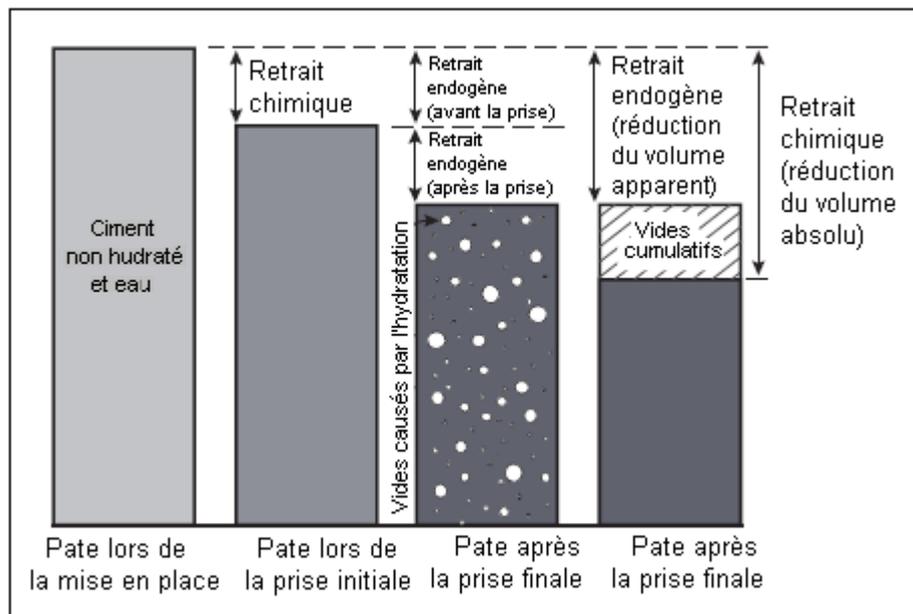


Figure I.6. Changements de volume dans la pâte fraîche et durcie causés par les retraits chimique et endogène.

L'hydratation additionnelle et le retrait chimique engendrent alors la formation de vides microscopiques engendre alors la formation de vides microscopiques dans la microstructure (figure I.6). La plus grande proportion du changement volumétrique est interne, ce qui n'engendre pas de variation apparente des dimensions de l'élément en béton.

La figure (1.7) représente le retrait chimique en (%) de la pâte de ciment portland conventionnel avec un rapport E/C = 0,5.

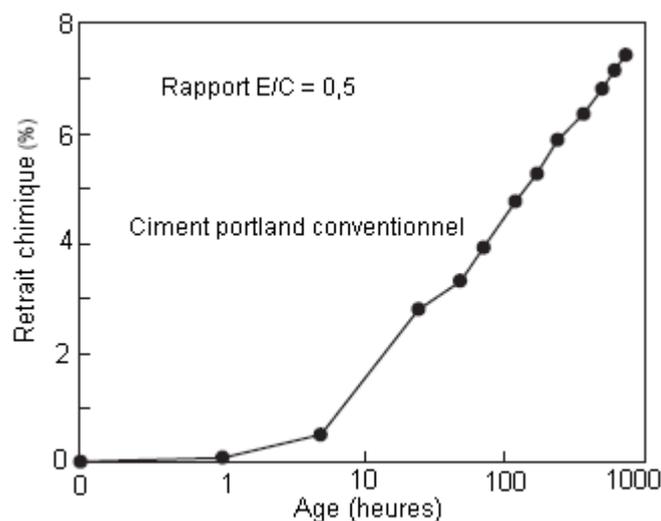


Figure I.7. Retrait de la pâte de ciment [20].

I.5.1.2. Le retrait endogène

Le retrait endogène est la diminution du volume externe apparent d'une pâte de ciment, d'un mortier ou d'un béton engendrée par l'hydratation du ciment. La diminution du volume externe apparent engendré par le retrait endogène est bien inférieure à la diminution du volume absolu engendrée par le retrait chimique en raison de la rigidité de la structure de la pâte de ciment durcie. Le retrait chimique est le mécanisme fondamental à la base de la formation du retrait endogène. Les figures (I.6, I.7 et I.8) illustrent la relation entre le retrait endogène et le retrait chimique. Certains chercheurs et certains organismes considèrent que le retrait endogène s'amorce au moment de la prise initiale alors que d'autres mesurent le retrait endogène à partir du début de la mise en place.

Le retrait endogène ne peut pas se développer en présence d'eau externe. En l'absence d'eau externe, l'hydratation du béton consomme l'eau des pores capillaires, ce qui engendre l'autodessiccation de la pâte et une diminution uniforme du volume [21].

Le retrait endogène augmente lorsque le rapport eau/liants diminue et lorsque la proportion volumique de pâte augmente.

Le retrait endogène des bétons conventionnels est négligeable mais il peut devenir beaucoup plus important lorsque le rapport eau/liants est inférieur à 0,42 [22]. Les bétons à haute résistance et à faible rapport eau/liants (0,30) peuvent développer un retrait endogène compris entre $(200 \text{ et } 400)10^{-6}$. Le retrait endogène d'un béton ayant un rapport eau/liants de 0,30 peut atteindre la moitié de son retrait du séchage.

Pour diminuer les risques de fissuration, les bétons pouvant développer un important retrait endogène devraient être soumis à une cure à l'eau pendant au moins 7 jours. On doit débiter la vaporisation d'eau dès la mise en place du béton.

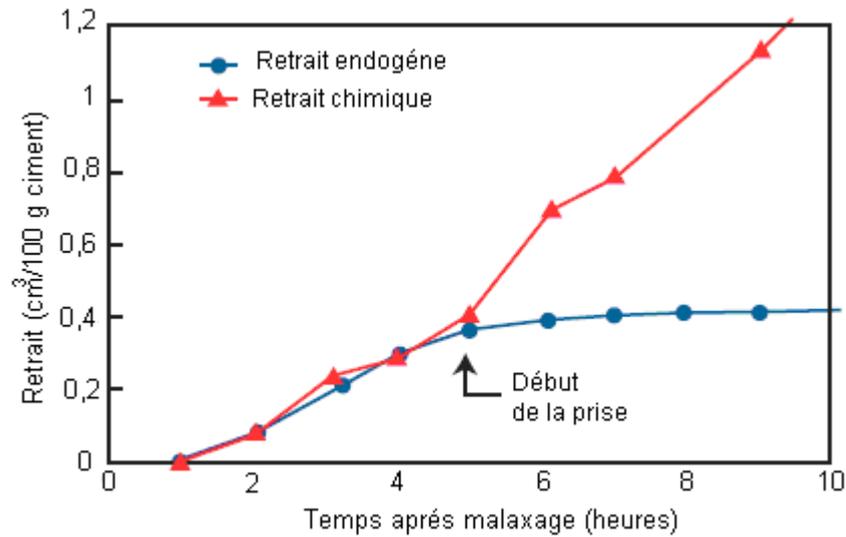


Figure I.8. Relation entre le retrait endogène et retrait chimique de la pâte de ciment à jeune âge [23].

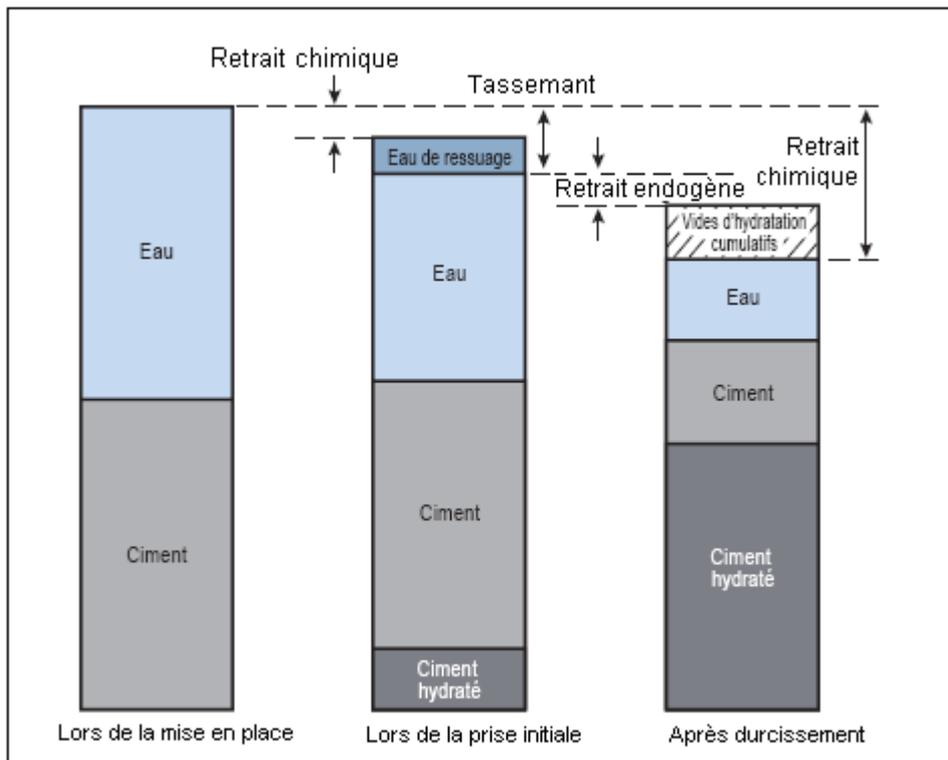


Figure I.9. Relation volumétrique entre le tassement, l'eau de ressuage, le retrait chimique et le retrait endogène. Seul le retrait endogène après la prise initiale est représenté.

I.5.1.3. Le tassement

Le tassement fait référence au retrait vertical survenant avant la prise initiale d'un matériau cimentaire. Il peut être causé par le ressuage (sédimentation des particules solides en suspension dans la phase liquide), par la remontée des bulles d'air en surface, et par le retrait chimique. Le tassement est aussi appelé retrait de tassement. Un béton bien consolidé et ayant un faible ressuage possède un tassement négligeable. La figure (I.9) illustre le tassement et les autres composantes du retrait. Un tassement excessif résulte souvent d'une mauvaise consolidation du béton frais. Un tassement trop important du béton peut engendrer des fissures de tassement au-dessus des barres d'armatures ou des autres éléments fixés ou retenus par les coffrages. L'air entraîné, un dosage adéquat en particules fines et un faible dosage en eau permettent de minimiser les risques de fissures de tassement [24].

I.5.1.4. Le retrait plastique

Le retrait plastique caractérise le changement de volume se produisant avant le durcissement, lorsque le béton est encore à l'état frais. Il s'observe généralement par la formation de fissures de retrait plastique se formant avant ou pendant la finition (voir figure I.10) Ces fissures semblent avoir déchiré la surface. Le retrait plastique résulte des effets combinés des retraits chimique et endogène et d'un taux élevé d'évaporation de surface excédant l'apport d'eau par le ressuage.

On peut contrôler les fissures de retrait plastique en diminuant le taux d'évaporation en surface par la vaporisation d'eau, par l'installation de murs de protection contre le vent, par l'érection de pare-soleil, par la protection à l'aide d'une pellicule de plastique, par l'utilisation de jute humide, la vaporisation d'un agent retardateur d'évaporation.



Figure I.10. Fissuration due au retrait plastique ressemblant à une déchirure dans la surface de béton.

I.5.1.5. Gonflement

Le béton, le mortier et la pâte de ciment gonflent en présence d'eau externe. Le volume de la masse de béton augmente lorsque l'eau externe est aspirée dans la porosité capillaire pour y occuper les espaces vides créés par le retrait chimique. Il n'y a pas d'auto dessiccation, donc il n'y a pas de retrait endogène. L'eau extérieure peut être apportée par un mûrissement humide ou par une immersion complète. Le gonflement résulte des effets de la croissance cristalline, de l'absorption d'eau et de la pression osmotique. Ce gonflement au jeune âge est relativement faible, soit environ 50×10^{-6} (figure I.11) Lorsque le béton n'est plus en contact avec de l'eau externe, le gonflement s'arrête et les retraits endogène et de séchage engendrent une contraction du béton.

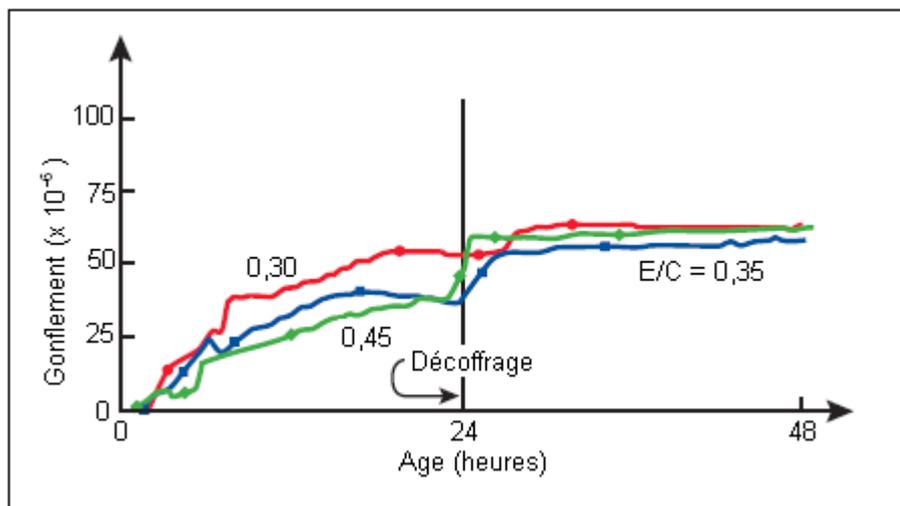


Figure I.11. Gonflement au jeune âge d'un échantillon de béton de mûrissement dans l'eau [25].

I.5.1.6. Retrait au séchage du béton durci

Le béton se dilate avec l'accroissement d'humidité et se contracte avec la perte d'humidité. Les effets de ces changements d'humidité sont illustrés schématiquement dans la figure (I.12) L'échantillon A représente un béton entreposé continuellement dans l'eau à partir du temps de la mise en place, tandis que l'échantillon B représente un autre échantillon du même béton exposé d'abord au séchage et ensuite à des cycles de mouillage et de séchage. Pour fins de comparaison, il peut être noté que le gonflement qui survient durant l'entreposage à l'humidité continue pendant une période de plusieurs années est de moins de (150×10^{-6}) soit le quart du retrait du béton séché à l'air pour la même période.

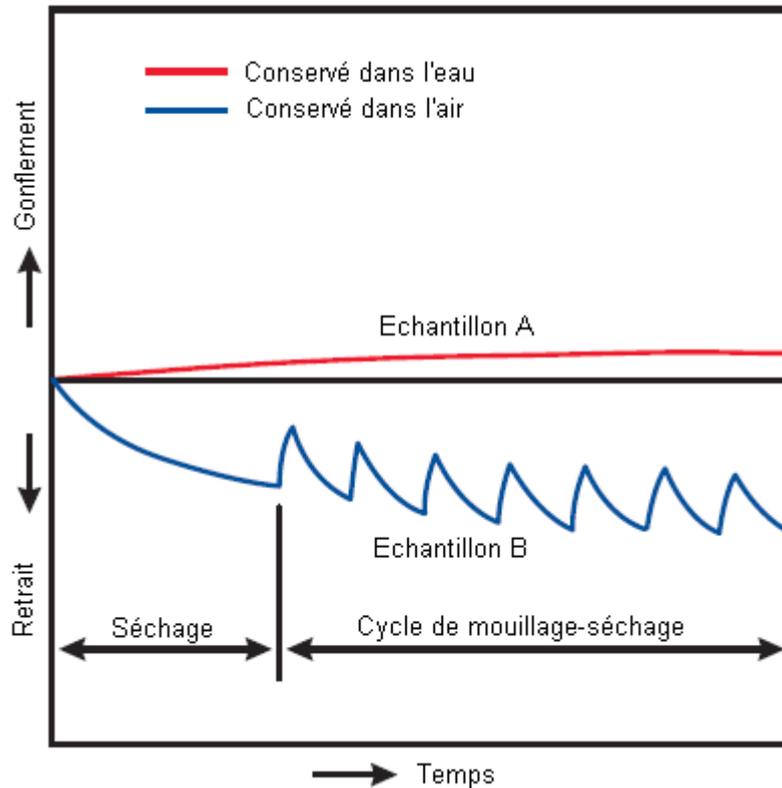


Figure I.12. Illustration schématique des mouvements dus aux variations d'humidité dans le béton [26].

Les essais indiquent que le changement de longueur dû au retrait causé par le séchage dans de petits échantillons de béton ordinaire (non armé) varie entre $(400 \text{ et } 800) \times 10^{-6}$ lorsqu'il est exposé à l'air à 50 % d'humidité.

Le retrait au séchage d'un béton à granulats pré placés est de l'ordre de $(200 \text{ à } 400) \times 10^{-6}$ ce qui est considérablement moindre que celui du béton normal, en raison du contact étroit des particules entre elles. Le retrait au séchage du béton structural léger varie d'une quantité légèrement inférieure à celle d'un béton de masse volumique normale et jusqu'à 30 % de plus, selon la nature du granulat utilisé.

Le retrait du béton armé est inférieur à celui du béton non armé, la différence dépendant de la quantité d'armature.

Pour les structures en béton armé ayant une quantité normale d'armature, le retrait au séchage est ordinairement considéré comme étant de $(200 \text{ à } 300) \times 10^{-6}$.

Pour plusieurs applications extérieures, le béton atteint son pourcentage d'humidité maximal durant l'hiver. Ainsi, les changements de volume dus à l'humidité et aux variations de température ont fréquemment tendance à se contrebalancer mutuellement.

La quantité d'humidité dans le béton est influencée par l'humidité relative de l'air environnant.

Le contenu d'humidité libre des éléments de béton à la suite d'un séchage à l'air à des humidités relatives de 50 % à 90 % pendant plusieurs mois est de l'ordre de 1 à 2 % en masse du béton selon les ingrédients du béton, le contenu original d'eau, les conditions de séchage et la dimension aussi bien que la forme de l'élément.

Le retrait peut continuer durant plusieurs années selon la grosseur et la forme de la masse de béton.

Le taux et la quantité ultime de retrait sont moins considérables pour les grandes masses de béton que pour les petites, bien que le retrait continue plus longtemps pour les grandes masses. Plus le rapport volume/surface est élevé, (plus les éléments sont volumineux) plus le retrait est faible ainsi que l'indique la figure (I.13.a) et (I.13.b).

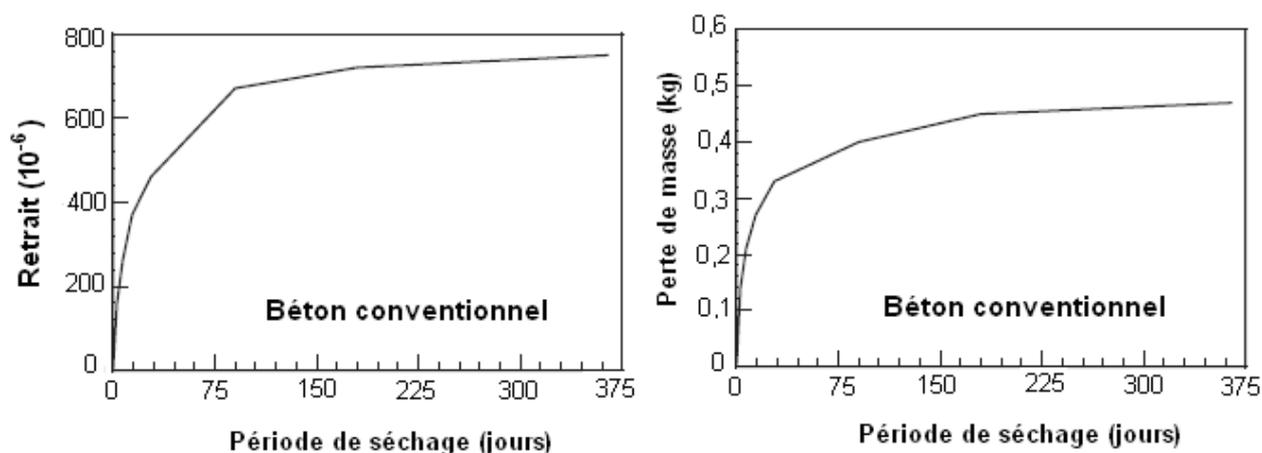


Figure I.13.a. Distribution de l'humidité relative à différentes profondeurs, du retrait au séchage et de la perte de masse suivi d'un séchage à 23 °C et 50 % d'humidité relative [27].

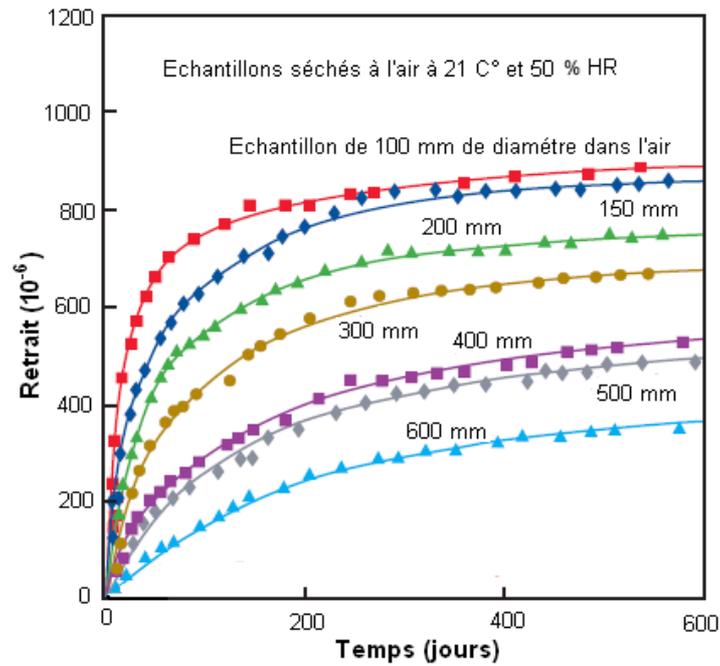


Figure I.13.b. Retrait au séchage des échantillons cylindriques de différents diamètres [28].

I.5.2. Effet des ingrédients du béton sur le retrait au séchage [29]

Le facteur maîtrisable le plus important qui influence le retrait est la quantité d'eau par unité de volume de béton. Des résultats d'essais illustrant la relation entre le contenu en eau et le retrait est présentée dans la figure (I.14). Le retrait peut être réduit en maintenant la quantité d'eau aussi basse que possible; ceci peut être réalisé en utilisant la plus grande quantité possible de gros granulats (diminution du volume de pâte). L'emploi de faibles affaissements et de méthodes de mise en place qui réduisent les besoins d'eau sont donc des facteurs importants de contrôle du retrait.

Tout ce qui augmente les besoins d'eau dans la pâte de ciment, comme les affaissements élevés, les températures excessivement hautes du béton frais, la forte teneur en granulat fin ou une plus petite taille du gros granulat, augmente le retrait.

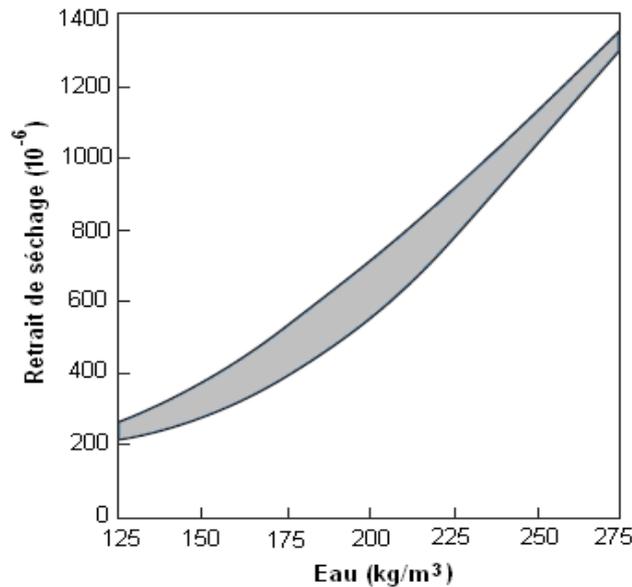


Figure I.14. Relation entre la teneur en eau totale et le retrait au séchage [29].

D'après la figure (I.14) le retrait au séchage croît avec l'augmentation de la teneur en eau.

La figure (I.15) montre que les bétons contenant des dosages normaux d'ajouts cimentaires ont un retrait similaire à celui des bétons ne contenant que du ciment portland.

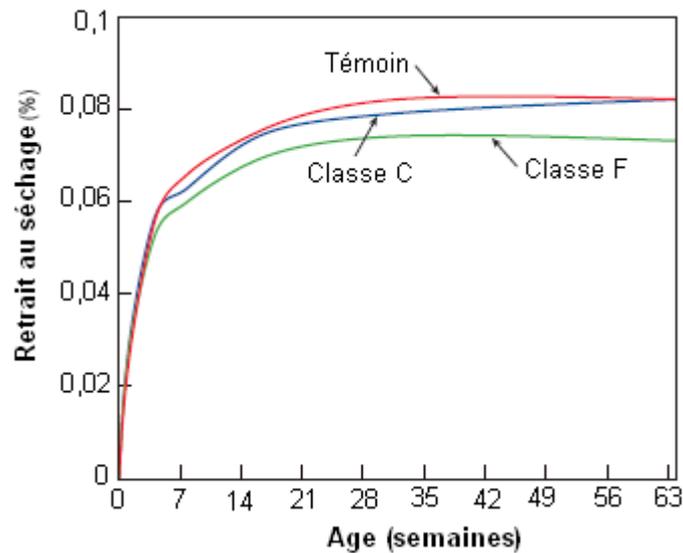


Figure. I.15. Retrait au séchage de bétons contenant des cendres volantes comparativement à un mélange témoin [30].

Les granulats dans le béton, spécialement les gros, restreignent le retrait de la pâte de ciment hydratée. Le contenu en pâte affecte le retrait au séchage du mortier plus que celui du béton. Le retrait au séchage dépend également du type de granulat. Les granulats rigides sont difficiles à comprimer et entravent le retrait de la pâte de ciment. A la limite, si des billes d'acier étaient substituées aux gros granulats, le retrait pourrait être réduit de 30 % ou plus.

On peut réduire les phénomènes de retrait en évitant d'utiliser des granulats qui contiennent des quantités excessives d'argile et des granulats qui offrent un fort retrait. Le quartz, le granite, le feldspath, le calcaire et la dolomie donnent des bétons à faible retrait au séchage.

La plupart des adjuvants n'ont que peu d'effet sur le retrait. L'utilisation d'accélérateurs de prise tel le chlorure de calcium augmente le retrait. Certains adjuvants réducteurs d'eau peuvent augmenter substantiellement le retrait malgré le fait qu'ils permettent de diminuer la quantité d'eau de gâchage. C'est particulièrement le cas de ceux qui contiennent des accélérateurs pour compenser leur effet retardant. L'entraînement d'air a peu d'effet, sinon aucun, sur le retrait au séchage. Les super plastifiants n'ont généralement qu'un faible effet sur le retrait de séchage.

CHAPITRE II

METHODES DE COMPOSTIONS DE BETON

II.1. Introduction [2, 4]

Les méthodes de calcul de la composition du béton sont nombreuses et il n'existe pas de méthode qui soit universellement reconnue comme étant la meilleure. Une composition de béton est toujours le résultat d'un compromis entre une série d'exigences généralement contradictoires. Une méthode de composition du béton pourra être considéré comme satisfaisante si elle permet de réaliser un béton répondant aux exigences suivantes :

- Le béton doit présenter, après durcissement, une certaine résistance à la compression.
- Le béton frais doit pouvoir facilement être mis en œuvre (ouvrabilité) avec les moyens et méthodes utilisées sur le chantier.
- Le béton doit présenter un faible retrait et un fluage peu important.
- Le coût du béton doit rester le plus bas possible.

Dans le passé, pour la composition du béton, on prescrivait des proportions théoriques de ciment, d'agrégat fin et d'agrégat grossier. Mais l'élaboration des ciments ayant fait des progrès considérables, de nombreux chercheurs ont exprimé des formules en rapport avec les qualités recherchées:

- minimum de vides internes, déterminant une résistance élevée;
- bonne étanchéité améliorant la durabilité ;
- résistance chimique;
- résistance aux agents extérieurs tels que le gel, l'abrasion, la dessiccation.

Sur un petit chantier où l'on fabrique artisanalement et souvent bien son béton l'on utilise le vieux principe: 2/3 de gros éléments et 1/3 d'éléments fins, soit 800 litres de gravillons et 400 litres de sable par mètre cube de béton pour 350 à 400 kg de ciment. La quantité d'eau de gâchage varie trop souvent au gré du savoir-faire du maçon, la nature de ciment, l'humidité du granulat passant après la consistance du béton à obtenir.

Le béton peut varier en fonction de la nature des granulats, des adjuvants, des colorants, des traitements de surface, et peut ainsi s'adapter aux exigences de chaque réalisation, par ces performances et par son aspect.

La composition d'un béton et le dosage de ses constituants sont fortement influencés par l'emploi auquel est destiné le béton et par les moyens de mise en oeuvre utilisés.

Dans la composition d'un béton, les deux relations importantes suivantes interviennent:

- La somme des poids des constituants de 1 m³ de béton fini est égale au poids de

1 m³ de béton fini. Si le ciment (C), l'eau (E) et les granulats (G_i) sont les poids des constituants en kg par m³ de béton fini et Δ la densité du béton en place, on a :

$$C + E + (\sum G_i) = 1000$$

- Le volume occupé par les constituants de 1 m³ de béton est égal à 1 m³. Si (C), (E) et (G_i) sont les volumes absolus des constituants en litres par m³ de béton fini, on a :

$$C + E + (\sum G_i) + V = 1000, \text{ avec } V : \text{ le volume de l'air dans le béton.}$$

II.2. Méthodes de composition de béton [2, 4, 6 et 14]

Le choix des proportions de chacun des constituants d'un béton afin d'obtenir les propriétés mécaniques et de mise en œuvre souhaitées s'appelle la formulation. Plusieurs méthodes de formulations existent, dont notamment :

- la méthode Baron ;
- la méthode Bolomey ;
- la méthode de Féret ;
- la méthode de Faury ;
- la méthode Dreux-Gorisse.

Les différences principales entre ces méthodes résident entre autres dans la définition de la courbe granulométrique de référence, selon que l'on inclue ou non le ciment dans les matières fines. Pourtant, toutes ont un point commun, elles dépendent de paramètres qui sont intimement liés aux caractéristiques morphologiques des matériaux utilisés (nature et qualité des granulats, type de liant, etc.).

C'est pourquoi, connaissant la nature éminemment variable des composants du béton et surtout des granulats, il est absolument nécessaire lors de la définition d'une composition de béton de compléter le calcul théorique des quantités des divers composants par un essai de gâchage et par des essais de résistance après durcissement. Pour le béton frais, l'essai de gâchage permet de contrôler que les propriétés du béton frais sont conformes aux exigences, ou sinon d'effectuer les corrections nécessaires (soit en agissant sur la composition, soit au moyen d'adjuvants).

La formulation d'un béton doit intégrer avant tout les exigences de la norme (NF EN 206-1), laquelle, en fonction de l'environnement dans lequel sera mis en place le béton, sera plus ou moins contraignante vis-à-vis de la quantité minimale de ciment à insérer dans la formule ainsi que la quantité d'eau maximum tolérée dans la formule. De même, à chaque environnement donné, une résistance garantie à 28 jours sur éprouvettes sera exigée aux

producteurs, pouvant justifier des dosages de ciments plus ou moins supérieurs à la recommandation de la norme, et basée sur l'expérience propre à chaque entreprise, laquelle étant dépendante des ses matières premières dont la masse volumique peut varier, notamment celle des granulats.

D'autres exigences de la norme (NF EN 206-1) imposent l'emploi de ciment particulier en raison de milieux plus ou moins agressifs, ainsi que l'addition d'adjuvants conférant des propriétés différentes à la pâte de ciment que ce soit le délai de mise en œuvre, la plasticité, la quantité d'air occlus, etc.

Dans ce qui suit, nous n'allons présenter que celles de Bolomey, Faury et Dreux-Gorisse.

II.2.1. Méthode de Bolomey [1, 2 et 4]

II.2.1.1. Principe

On se réfère aux courbes granulométriques des constituants secs (voir figure II-1).

Un mélange quelconque de ces constituants a lui aussi une courbe granulométrique. Le problème est donc de déterminer parmi l'infinité de courbes représentant ces mélanges, une qui correspond à un bon béton pour le travail à exécuter. Cette courbe sera nommée '**courbe optimale**'.

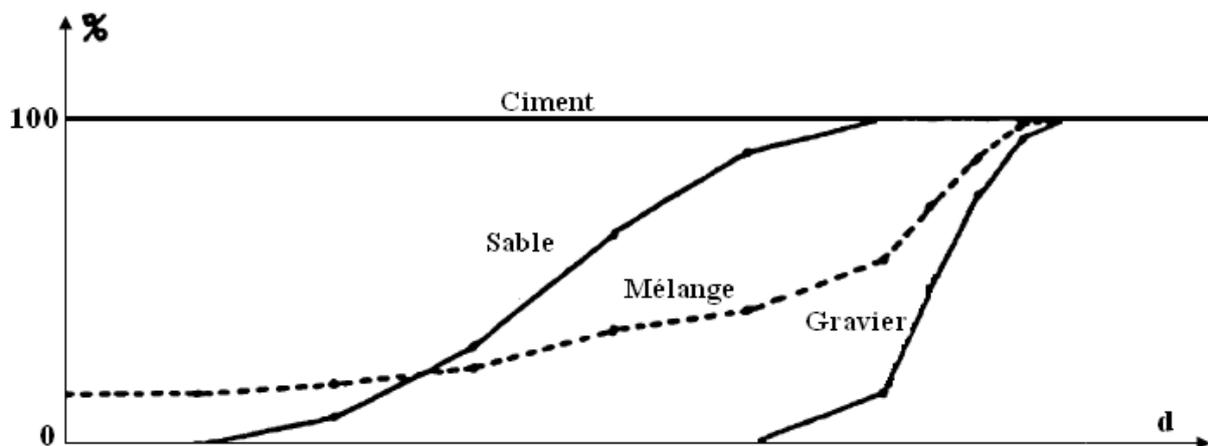


Figure II.1 Courbe granulométriques du mélange sec (Dreux, 1978) [2,19].

D'où le principe de la méthode :

- 1 - Déterminer la courbe optimale du mélange des éléments secs.
- 2- Chercher les pourcentages de ces constituants permettant de réaliser un mélange sec de la sorte que la courbe soit aussi voisine que possible de la courbe optimale.
- 3- Déduire la composition d'un mètre cube de béton.

II.2.1.2. Courbe optimale

Axes

Abscisses : diamètres des tamis, gradués proportionnellement à \sqrt{d} (segments proportionnels aux racines carrées des dimensions des tamis correspondants).

Ordonnées : Pourcentage du tamisât (voir figure II-2).

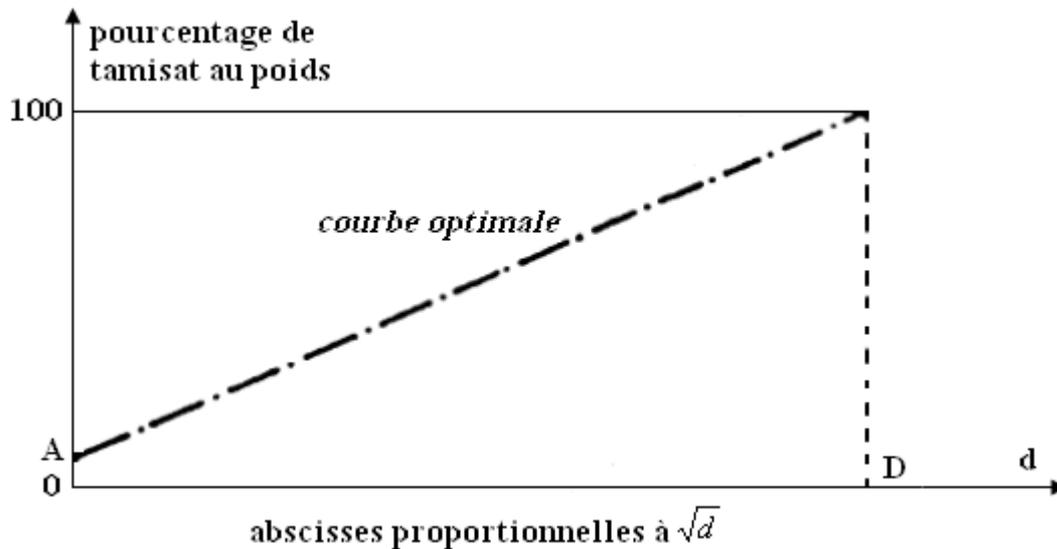


Figure II.2 : courbe optimale du mélange selon Bolomey [2,19].

Par une formule appropriée, on trace une courbe granulométrique de référence et l'on s'efforce de réaliser, avec les granulats dont on dispose, une composition granulaire totale (ciment compris) dont la courbe est aussi proche que possible de la courbe de référence théorique.

La formule de base est la suivante :

$$p = A + (100 - A) \cdot \sqrt{\frac{d}{D}}$$

Avec :

P : pourcentage de grains passant à la passoire de diamètre d ,

D : diamètre du plus gros grain,

Cette équation est de la forme $y = ax + b$, eu égard au mode de graduation de l'axe des abscisses, elle représente la droite qui passe par les points :

$$\begin{array}{ll} d = 0 & d = D \\ P = A & P = 100 \end{array}$$

Il suffit donc de déterminer A et D.

Valeurs de A

(A) est un point d'une courbe granulométrique qui représente le pourcentage des éléments très fin contenus dans le mélange sec, éléments qui ont une incidence sur la maniabilité du béton.

La valeur (A) dépendra donc de :

- La consistance souhaitée pour le béton ;
- La provenance des granulats.

Le tableau (II-1) résume les valeurs de A.

Tableau II.1. Valeurs de (A) selon Bolomey [2, 19]

| Consistance de béton | Granulats roulés | Granulats concassés |
|-----------------------|------------------|---------------------|
| Sec (béton vibré) | 6 à 8 | 8 à 14 |
| Plastique (non vibré) | 10 | 12 à 14 |
| Mou (béton coulé) | 12 | 14 à 16 |

II.2.1.3. Détermination de la quantité d'eau selon Bolomey [19]

La quantité d'eau nécessaire à introduire doit assurer : d'une part l'hydratation complète du ciment et d'autre part permettre une mise en œuvre convenable du béton dans les moules. Cette quantité d'eau dépend donc dans une large mesure la technique de mise en œuvre retenue.

Ainsi un béton pompé nécessitera d'avantage d'eau qu'un même béton placé par vibration. A l'heure actuelle on ne dispose pas encore de théorie capable de prédire avec exactitude la quantité d'eau nécessaire pour un béton donné, et les essais de convenances seront toujours nécessaires, cependant des formules empiriques permettent de donner un ordre de grandeur de la quantité d'eau, avec précision suffisante pour les études courantes.

Bolomey propose des expressions en fonction de la taille des granulats, la quantité d'eau nécessaire pour mouiller le mélange diffère.

Ainsi :

- Pour les éléments très fins ($D < 0,16$ mm) : la quantité d'eau à prévoir est :

$$Eau = 0,23P$$

- Pour les gros éléments ($D \geq 0,16$ mm) : la quantité d'eau à prévoir est :

$$Eau = \frac{K.P}{1,17 \sqrt[3]{d_1 \times d_2}}$$

Avec :

P : masse des matériaux à mouiller ;

d_1 : diamètre de plus petits granulats à mouiller ;

d_2 : diamètre de plus gros granulats à mouiller ;

K : coefficient dont les valeurs sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau.II.2. les valeurs du coefficient K selon Bolomey [19]

| Consistance du béton | Granulats roulés | Granulats concassés |
|-----------------------|------------------|---------------------|
| Sec (béton vibré) | 0,08 | 0,095 |
| Plastique (non vibré) | 0,09 à 0,095 | 0,10 à 0,11 |
| Mou (béton coulé) | 0,10 à 0,11 | 0,12 à 0,13 |

La quantité d'eau globale à prévoir sera évidemment la somme des deux termes, soit :

$$Eau = 0,23P (D < 0,16 \text{ mm}) + \frac{K.P}{1,17 \sqrt[3]{d_1 \times d_2}} (D \geq 0,16 \text{ mm})$$

II.2.1.4. Limite et emploi de la méthode de Bolomey

La méthode de Bolomey a le mérite d'avoir ouvert la voie aux études de béton.

Toutefois, elle ne peut être appliquée qu'aux granulats dont la masse volumique absolue est comprise entre 2.5 et 2.7g/cm³, ce sont d'ailleurs les granulats les plus courants.

La méthode de Bolomey donne des bétons riches en éléments fins, donc maniables, et susceptibles de rester bruts lors du décoffrage. On l'emploiera lorsque ces qualités sont recherchées, la résistance mécanique doit être bonne. Son emploi est fréquent pour les travaux routiers, et pour les bétons qui doivent être mis en place par pompage.

II.2.2. Méthode de Faury [2, 10].

En 1942, J. Faury proposa, comme suite à une étude générale du béton, une nouvelle loi de granulation du type continu.

II.2.2.1. Principe

Le même que celui de la méthode de Bolomey qui consiste à déterminer la courbe optimale du mélange des éléments secs, et de chercher à s'en rapprocher le plus possible.

II.2.2.2. Particularités de la méthode de Faury

1. Applicable à tous les granulats, quelle que soit la masse volumique.
2. Faury a étudié l'effet des vides, qui varient avec la racine cinquième de la dimension des grains ($\sqrt[5]{D}$).
3. Pour tenir compte de l'effet de coffrage et des armatures, Faury introduit la notion d'effet de paroi, qui dépend du rayon moyen du moule.

Pour un élément donné, Faury appelle le rayon moyen du moule, le rapport entre le volume du béton (aciers déduits) et la surface de ce qui est au contact du béton (coffrage + aciers). Aussi, il appelle l'effet de paroi le rapport D/R entre la dimension maximale des granulats et le rayon moyen du moule (Faury. 1958).

Il est souhaitable de prendre une valeur de $1.25 D/R$ comprise entre 0.8 et 1 (D est une dimension de tamis) [10].

II.2.2.3. Tracé de la courbe optimale

On trace donc pour l'ensemble du mélange, ciment compris, une courbe granulométrique de référence qui est composée de deux droites si l'on opère sur un graphique gradué, en abscisse, en $\sqrt[5]{D}$.

Axes :

Abcisses : dimensions des tamis proportionnelles à racine cinquième de D ($\sqrt[5]{D}$).

Ordonnées : pourcentages de tamisât, en fonction des masses volumiques absolues (voir figure II-3).

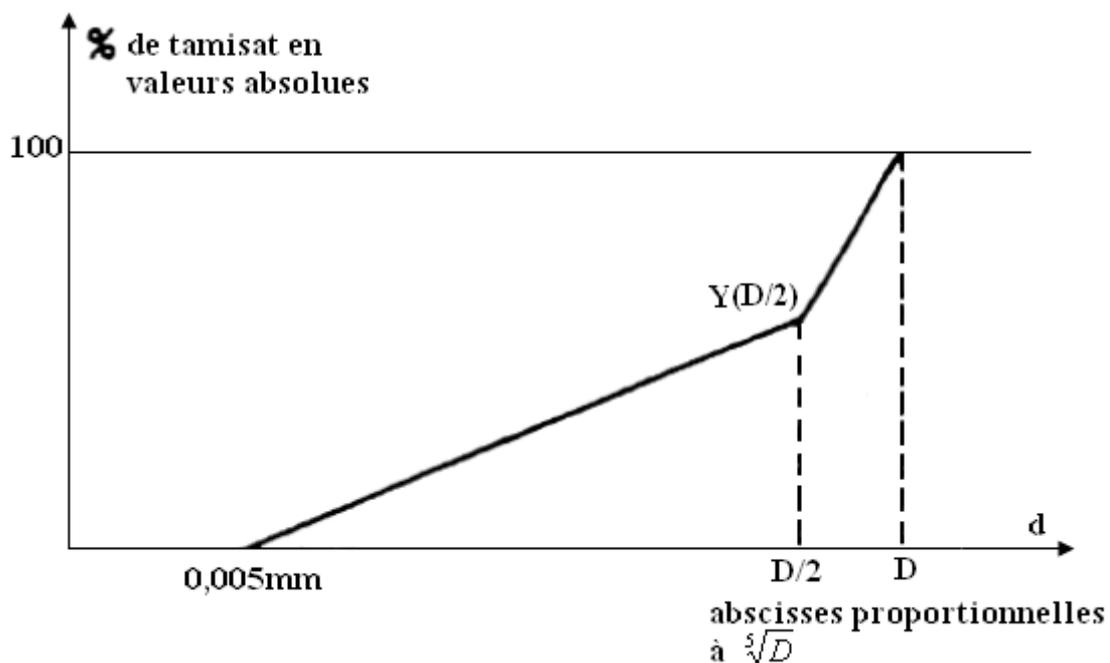


Figure II.3 : Courbe optimale du mélange selon Faury [2,19].

Donc la courbe ce n'est plus un segment de droite, mais deux segments de droites, formant une ligne brisée.

Il faut donc définir :

- L'origine
- L'extrémité
- Le point de brisure.

L'origine est le point de l'axe des abscisses correspondant au tamis de 0.005 mm.

L'extrémité est le point d'abscisse D et d'ordonnée 100. D ayant la même signification que pour la méthode de Bolomey.

Le point de brisure a pour abscisse D/2 et pour ordonnée Y (D/2) donnée par la formule suivante :

$$Y = A + 17.5\sqrt[5]{D} + \frac{B}{\frac{R}{1,25D} - 0,75}$$

Avec :

A = Constante, traduisant la maniabilité du béton,

B = Constante, traduisant l'importance du serrage du béton,

D = Plus grande dimension de tamis, il est donc nécessaire de connaître la valeur numérique de D,

R = Rayon moyen du moule,

$\frac{R}{D}$ = L'inverse de l'effet de paroi.

Valeur de A

Faury a distingué les bétons, suivant la grosseur des plus gros grains, avec coupures à 25 et 50mm (dimensions des tamis). Une valeur spéciale de A est attribuée au béton de piste, dont les conditions de travail recherchent des caractéristiques particulières (voir tableau II.3).

Valeur de B

La valeur de B varie en fonction des conditions techniques, elle est égale à 1 dans le cas d'un serrage particulièrement énergétique et à 1.5 dans tous les autres cas.

II.2.2.4. Emploi de la méthode de Faury

Cette méthode est venue en 1941 compléter la méthode de Bolomey, Mais elle ne l'a pas supplantée.

La méthode de Faury donne des bétons comportant moins de sable et davantage de gravier que la méthode de Bolomey. Ces bétons Faury seront donc plus raides, et conviendront à des travaux pour lesquels une très bonne maniabilité n'est pas indispensable.

Les bétons Faury auront une résistance mécanique supérieure aux bétons Bolomey correspondants.

Tableau II.3. Valeurs du coefficient A selon Faury [19]

| Moyens Mise en oeuvre | Matériaux utilisés | | |
|--------------------------|------------------------------|---------------------------------|------------------------------------|
| | Sable roulé Gravier roulé | Sable roulé Gravier concassé | Sable concassé Gravier concassé |
| Piquage damage | 28 | 30 | 32 |
| Vibration moyenne | 24 à 25 | 27 à 28 | 28 à 29 |
| Vibration poussée | 23 à 24 | 23 à 24 | 23 à 24 |
| Vibration puissante | 19 à 20 | 19 à 21 | 19 à 22 |

II.2.2.5. Détermination de la quantité d'eau selon Faury

La quantité d'eau est donnée par la formule suivante :

$$I = \frac{K}{\sqrt[5]{D_{\max}}}, \text{ les valeurs de K sont données par le tableau (II.4) :}$$

Tableau II.4. Valeurs du coefficient K selon Faury [19]

| Moyens de mise en oeuvre | Matériaux utilisés | | |
|-----------------------------|--------------------------------|------------------------------------|--|
| | -Sable roulé -Gravier roulé | -Sable roulé - gravier concassé | - Sable concassé - Gravier concassé |
| Piquage damage | 0, 345 | 0,345 | 0,350 |
| Vibration moyenne | 0,265 à 0,285 | 0,285 à 0,350 | 0,300 à 0,335 |
| Vibration poussée | 0,255 à 0,280 | 0,260 à 0,285 | 0,265 à 0,295 |
| Vibration puissante | 0,245 à 0,246 | 0,250 à 0,280 | 0,255 à 0,295 |

II.2.3. Méthode de Dreux - Gorisse [6]

Cette méthode a l'avantage d'être issue de nombreuses formulations ayant été testées sur chantier et ayant données satisfaction. Elle est d'autre part rapide et très simple d'utilisation ; puisqu'elle ne demande que de connaître les courbes granulométriques des granulats utilisés.

II.2.3.1. Principe de la méthode [4, 31]

La résistance et l'ouvrabilité désirées conduisent à déterminer le dosage en ciment et le dosage en eau.

Une courbe de référence granulaire est ensuite tracée schématiquement en tenant compte des différents paramètres concernant le béton étudié et ses constituants : dimension des granulats, dosage en ciment, plasticité, intensité du serrage, module de finesse du sable, pompabilité, etc. Cette courbe de référence permet de doser les proportions, en volume absolu, des différents granulats dont on dispose.

Enfin, la prise en compte d'un coefficient de compacité probable du béton et de la masse volumique des différents granulats permet d'aboutir à la formule de dosage pondéral pour le béton désiré.

Reste à exécuter, bien entendu, quelques essais sur ce béton pour apporter à cette formule les corrections expérimentales nécessaires.

II.2.3.2. Données de base [4]

Nous avons adopté comme critères de base les critères suivants :

a. Nature de l'ouvrage

La connaissance de la nature de l'ouvrage est nécessaire : ouvrage massif ou au contraire élancé et de faible épaisseur, faiblement ou très ferrailé. Il est nécessaire de connaître l'épaisseur minimale des éléments et les dispositions des armatures dans les zones les plus ferrillées, distance minimale entre elles, et couverture par apport au coffrage.

b. Résistance souhaitée

En général on demandera une résistance f_{c28} en compression à 28 jours et compte tenu des dispositions et de l'écart quadratique s , il faudra viser une résistance moyenne à 28 jours :

$$f_c \text{ Supérieure à } f_{c28} \text{ donc } f_{c28} = f_c - 0,8s$$

Si l'on admet un coefficient de variation moyen de l'ordre 20 % on pourra adopter la règle approximative pour la résistance moyenne à viser :

$$f_c = f_{c28} + 15\% f_{c28}$$

c. Consistance désirée

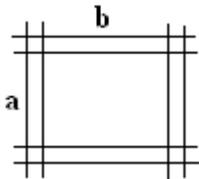
Cette consistance est fonction de la nature de l'ouvrage (plus ou moins massif ou plus ou moins ferrailé) de la difficulté de bétonnage, des moyens de serrage, etc. Elle peut se définir en général par la plasticité désirée mesurée par affaissement au cône d'Abrams (voir le tableau II.5).

Tableau.II.5. Evaluation de l'ouvrabilité par référence à l'affaissement au cône ou au test d'ouvrabilité

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

II.2.3.3. Dimension maximale des granulats

Compte tenu de l'efficacité des moyens actuels de vibration et de la tendance à faire des bétons plus plastique, ces valeurs de D sont peut être un peu restrictives, il ne faut pas oublier que les éléments de dimensions D_{\max} sont peu nombreux et que là ou ils ne passeraient pas, tout le reste passe à condition d'un $\frac{G}{S}$ pas trop élevé et d'une bonne ouvrabilité ce qui correspond à la tendance actuelle.

| Tableau.II.6. Evaluation approximative de D dimension maximale (Tamis) des granulats en fonction des caractéristiques de la pièce à bétonner et de l'ambiance plus ou moins agressive | |
|--|----------------|
| Caractéristiques de la pièce à bétonner | D (Tamis) |
| e_h espacement horizontal entre armatures | $\leq e_h/1,5$ |
| e_v espacement vertical entre armatures | $\leq e_v$ |
| C distance des armatures de coffrage | } < C |
| - ambiance très agressive $\geq 5\text{cm}$ | |
| - ambiance moyennement agressive $\geq 3\text{ cm}$ | |
| - ambiance moyennement agressive mais f_{c28} du béton supérieur à 40 MPa $\geq 2\text{cm}$ | |
| - ambiance non agressive $\geq 1\text{cm}$ | |
|  | |
| r : rayon moyen du ferrailage | |
| Granulats roués | $\leq 1,4 r$ |
| Granulats concassés | $\leq 1,2 r$ |
| $r = \frac{ab}{2(a+b)}$ | |
| h_m : hauteur ou épaisseur minimale | $\leq h_m/5$ |

II.2.3.4. Dosage en ciment

On commence par évaluer approximativement le rapport C/E en fonction de la résistance moyenne souhaitée f_c (à 28 j) ; on utilise pour cela une formule inspirée des études de Bolomey :

$$f_c = G \cdot \sigma'_c \cdot \left(\frac{C}{E} - 0,5 \right)$$

Avec :

f_c (MPa) : résistance moyenne en compression souhaitée à (28 jours),

σ'_c (MPa) classe vraie du ciment à (28 jours),

C (kg/m³) dosage en ciment, E (litres/m³) dosage en eau totale,

G est un coefficient granulaire sans dimension dont on choisit la valeur dans le tableau (II.7) :

| Tableau.II.7. Valeurs approximatives du coefficient granulaire G [19] | | | |
|--|----------------------------------|---|---------------------------|
| Qualité des granulats | Dimension D des granulats | | |
| | Petits $D \leq 16 \text{ mm}$ | Moyens $25\text{mm} \leq D \leq 40\text{mm}$ | Gros $D > 63\text{mm}$ |
| Excellente | 0,55 | 0,60 | 0,65 |
| Bonne, courante | 0,45 | 0,50 | 0,55 |
| Passable | 0,35 | 0,40 | 0,45 |

Nota : Ces valeurs de G correspondent à des bétons de plasticité courante ($4\text{cm} \leq A \leq <8\text{cm}$)

Avec A : affaissement au cône d'Abrams

On ajoute éventuellement aux valeurs de G ainsi évaluées une petite correction :

- pour les bétons fermes ($A \leq 3\text{cm}$) : - 0,03
- pour les bétons mous ($A \geq 9\text{cm}$) : + 0,03

❖ Dosage minimal

En fonction de l'environnement, les dosages minimaux prescrits par le fascicule 65A et le cahier des clauses techniques générales appliqués aux marchés publics pour l'exécution des ouvrages en béton armé ou précontraint, sont les suivants :

- en béton armé exposé à un milieu sans agressivité particulière $C \geq \frac{550}{\sqrt[5]{D}}$

- en béton armé exposé à un milieu sans agressivité particulière mais comportant un parement fin : $C \geq \frac{600}{\sqrt[5]{D}}$

- en béton armé exposé à des conditions agressives sévères ou coulé sous l'eau, ainsi en béton précontraint : $C \geq \frac{700}{\sqrt[5]{D}}$

Voir le tableau (II.8) (les dosages auxquels conduisant l'application de la formule précédente ainsi les valeurs de $\sqrt[5]{D}$ en fonction de D).

Tableau.II.8. Les dosages minimaux en ciment en fonction de la dimension maximale des granulats (D)

| D en mm | 5 | 6,3 | 8 | 10 | 12,5 | 16 | 20 | 25 | 31,5 | 40 | 50 | 63 | 80 | 100 |
|---------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $\sqrt[5]{D}$ | 1,38 | 1,45 | 1,52 | 1,59 | 1,66 | 1,74 | 1,82 | 1,90 | 2,00 | 2,09 | 2,19 | 2,29 | 2,40 | 2,51 |
| $\frac{550}{\sqrt[5]{D}}$ | 400 | 380 | 362 | 346 | 332 | 316 | 302 | 290 | 275 | 263 | 251 | 240 | 230 | 220 |
| $\frac{600}{\sqrt[5]{D}}$ | 435 | 415 | 395 | 378 | 362 | 345 | 330 | 315 | 300 | 288 | 275 | 262 | 250 | 240 |
| $\frac{700}{\sqrt[5]{D}}$ | 500 | 480 | 460 | 440 | 420 | 400 | 385 | 370 | 350 | 335 | 320 | 305 | 290 | 280 |

Le dosage en ciment est donc fonction du rapport C/E mais également du dosage en eau E nécessaire pour une ouvrabilité satisfaisante. L'abaque de la figure (II.4) permet d'évaluer approximativement C en fonction de C/E et de l'ouvrabilité désirée qui doit être considérée comme une donnée du problème.

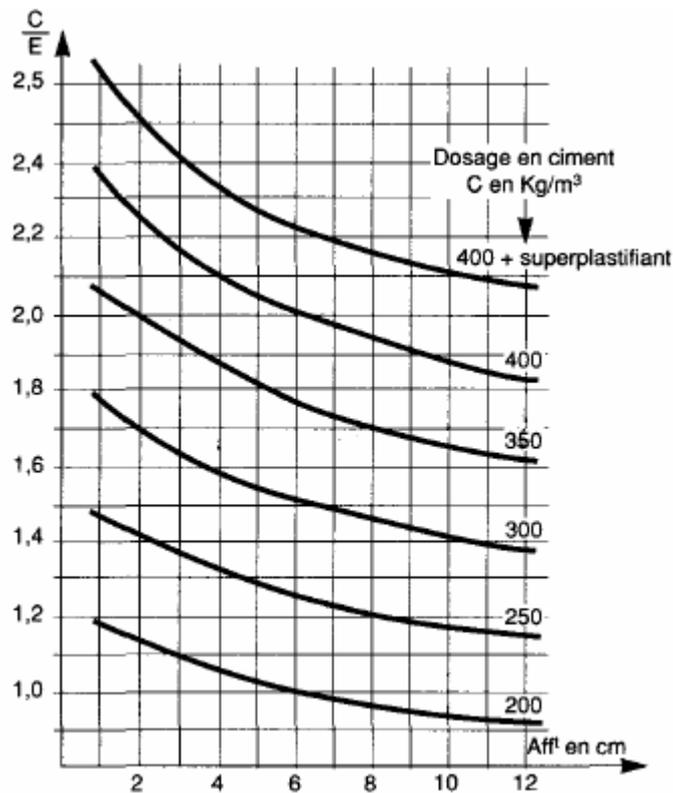


Figure II.4 – Abaque permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment à prévoir en fonction du rapport C/E et de l'ouvrabilité désirée [14].

II.2.3.5. Dosage en eau

Une fois le choix du dosage en ciment est fait, on déduit alors le dosage approximatif en eau totale à prévoir et qu'il conviendra bien entendu d'ajuster ultérieurement par quelques essais de plasticité et d'ouvrabilité.

L'abaque de la figure (II.5) donne l'allure générale de la variation du dosage en eau en fonction de l'affaissement au cône et du test d'ouvrabilité.

❖ Correction du dosage en eau totale en fonction de la dimension maximale D

La correction sur le dosage en eau correspondant à $D=25\text{mm}$ peut être approximativement évaluée d'après les valeurs du tableau (II.9) en fonction de D .

| Dimension maximale D des granulats..... (mm) | 5 | 10 | 16 | 25 | 40 | 63 | 100 |
|--|------|-----|-----|----|-----|-----|------|
| Correction sur le dosage en eau.... (%) | + 15 | + 9 | + 4 | 0 | - 4 | - 8 | - 12 |

Le graphique de la figure (II.5) donne l'allure générale de cette correction.

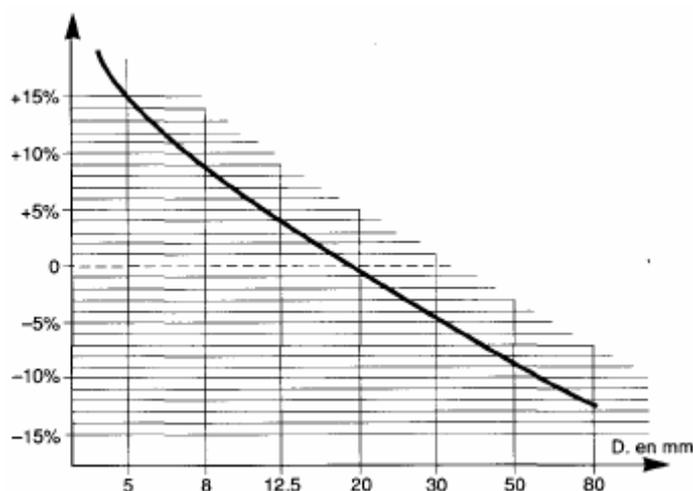


Figure II.5. Correction sur le dosage en eau [14]

II.2.3.6. Dosage des granulats

a. Tracé de la courbe granulaire de référence

Sur un graphique d'analyse granulométrique type AFNOR, on trace une composition granulaire de référence O A B.

Point O : ordonnée 0, abscisse : 0,080 mm

Point B : ordonnée : 100%, abscisse : dimension D du plus gros granulat

Point A :**En abscisse :**

Si $D \leq 20\text{mm}$, l'abscisse sera égale à $D/2$

Si $D > 20\text{mm}$, l'abscisse sera située au milieu du segment gravier limité par la dimension de tamis 5mm et le module correspondant à D.

En ordonnée : $Y = 50 - \sqrt{D} + K$

K est un terme correcteur qui dépend du dosage en ciment, de l'efficacité du serrage, de la forme des granulats roulés ou concassés et également du module de finesse du sable.

Les valeurs de K sont indiquées dans le tableau (II.10).

| Vibration | | Faible | | Normale | | Puissante | |
|---|-----------------|--------|----------|---------|----------|-----------|----------|
| Forme des granulats (du sable en particulier) | | Roulé | concassé | Roulé | concassé | Roulé | concassé |
| Dosage en ciment (Kg/m³) | 400+fluidifiant | - 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 |

Nota1 : Correction supplémentaire K_s : si le module de finesse du sable est fort (sable grossier) une correction supplémentaire sera apportée de façon à relever le point A, ce qui correspond à majorer le dosage en sable et vice versa. La correction supplémentaire (sur K) peut être effectuée en ajoutant la valeur $K_s = 6 Mf - 15$ avec Mf étant le module de finesse du sable qui peut varier de 2 à 3 avec une valeur optimale de l'ordre 2,5 pour laquelle la correction préconisée est alors nulle).

Nota 2 : Correction supplémentaire K_p : si la qualité du béton est préconisée « pompable » il conviendra de conférer au béton le maximum de plasticité et de l'enrichir en sable par apport à un béton de qualité « courante ». On pourra pour cela majorer le terme correcteur K de la valeur $K_p = + 5$ à $+ 10$ % environ, selon le degré de la plasticité désiré.

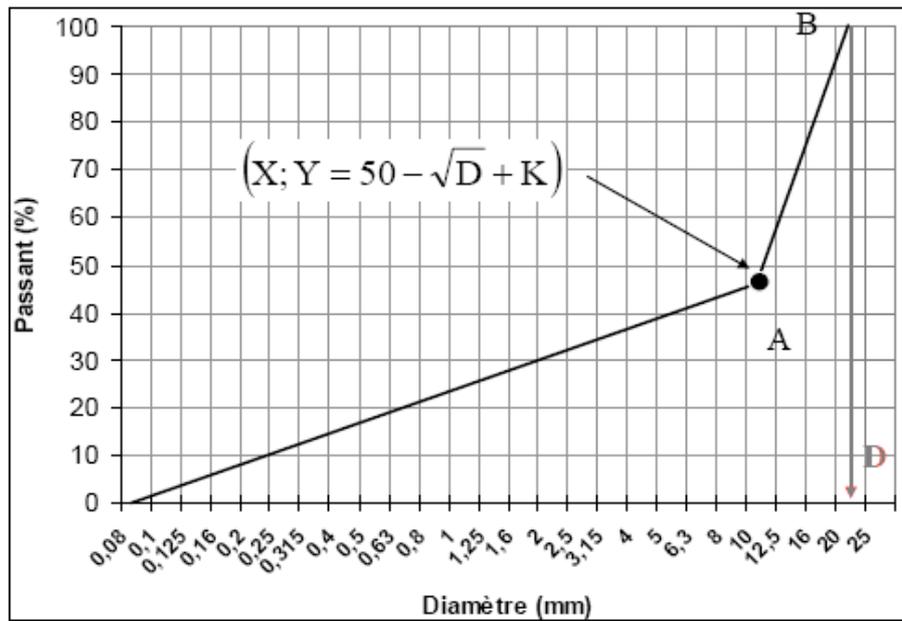


Figure II.6 - Courbe optimale selon Dreux-Gorisse [14]

b. Masse des granulats

Il convient alors de faire appel à la notion de coefficient de compacité du béton. On définit celui-ci comme le rapport entre la somme des volumes absolus des constituants solides (granulats et ciment) et le volume de béton correspondant en oeuvre que l'on prend ici égal à 1 000 litres.

$$\text{On a donc : } \gamma = \frac{V_g + V_c}{1000}$$

Avec V_g et V_c (en litres) volumes absolus des granulats d'une part et du ciment d'autre part dans un mètre cube de béton en oeuvre.

La connaissance du dosage en ciment C déjà fixé permet le calcul de V_c en supposant que la masse volumique du ciment est de 3,1 kg/litre. Le choix de la valeur de γ dans le tableau (II.11) permet de calculer le volume absolu V_g de l'ensemble des granulats : la connaissance du pourcentage de chacun d'eux permet alors de calculer leurs volumes absolus respectifs en litres pour un mètre cube de béton en oeuvre. La connaissance de la masse volumique de chacun d'eux est alors nécessaire et permet de calculer la masse de chacun d'eux dans la formule de composition qui est alors complètement définie et qui, par addition des masses des différents constituants, donne la masse volumique théorique du béton frais en oeuvre.

| Tableau II.11. Valeurs du coefficient de compacité γ [4] | | | | | | | | |
|---|---------------------|-----------------------------------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|
| Consistance | Serrage | Dimension D des granulats (en mm) | | | | | | |
| | | D = 5 | D = 10 | D=12,5 | D=20 | D=31,5 | D = 60 | D = 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 | 0.785 | 0.815 | 0.830 | 0.840 | 0.845 | 0.850 | 0.855 |

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

- sable roulé et gravier concassé : -0,01 ;
- sable et gravier concassé : -0,03.

Dosage des granulats

La courbe granulaire OAB de référence est tracée sur le même graphique que les courbes granulométriques des granulats composants.

On trace alors les lignes de partage entre chacun des granulats, en joignant le point à 95% de la courbe granulaire du premier, au point 5% de la courbe du granulat suivant et ainsi de suite.

On lira alors sur la courbe de référence, au point de croisement avec les droites de partage, le pourcentage en volume absolu de chacun des granulats soit g_1 , g_2 et g_3 respectivement.

Le volume absolu des grains de ciment est : $V_c = C/3,1$ avec C le dosage en ciment.

(3,1 étant la masse spécifique admise pour les grains de ciment).

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

On en déduit alors le volume absolu de chacun des granulats ainsi que les masses spécifiques de chacun des granulats.

Tels que :

Les volumes absolus de chacun des granulats sont par suite :

$$v_1 \geq g_1 V ; v_2 \geq g_2 V ; v_3 \geq g_3 V$$

Et si les masses spécifiques de chacun de ces granulats sont ρ_{s1} , ρ_{s2} et ρ_{s3} les masses de chacun d'eux seront :

$$P_1 = v_1 \rho_{s1} ; P_2 = v_2 \rho_{s2} ; P_3 = v_3 \rho_{s3}.$$

La masse totale des granulats sera $G = P_1 + P_2 + P_3$

II.3. Ajustement de la formule au mètre cube [14]

Si la masse des granulats est G , si la masse de ciment est C et si le dosage en eau est E (en litres par mètre cube sur matériaux supposés secs), la densité du mètre cube de béton devrait être théoriquement :

$$\Delta_0 = \frac{G + C + E}{1000}$$

On peut en pesant une ou plusieurs éprouvettes mesurer la densité réelle Δ du béton frais en oeuvre.

Si Δ est peut différente de Δ_0 , c'est que la formule étudiée correspond bien au mètre cube.

Si en revanche, la densité réelle Δ est plus petite que la densité Δ_0 , c'est que la formule étudiée donne un peu plus d'un mètre cube de béton et le dosage réel en ciment se trouve inférieur à celui théoriquement prévu et vice versa. Donc il faut apporter une correction sur la masse totale des granulats est alors :

$$x = 1000(\Delta - \Delta_0) \text{ En (Kg), maintenant :}$$

Si $(\Delta - \Delta_0) < 0 \Rightarrow$ la formule proposée faisant de plus du mètre cube.

Si $(\Delta - \Delta_0) > 0 \Rightarrow$ la formule proposée faisant moins du mètre cube.

Sur la masse de chacun des granulats dont les pourcentages sont g_1, g_2, g_3 et les masses P_1, P_2, P_3 la correction à apporter sera la suivante :

$$\frac{xP_1}{G}, \frac{xP_2}{G}, \frac{xP_3}{G} \text{ avec } G \text{ est la masse totale des granulats.}$$

II.4. Exemple de détermination de composition de bétons [19]

Détermination de composition de bétons optimales selon les méthodes de Bolomey, Faury et Dreux-Gorisse.

Nous proposons dans ce paragraphe une étude pratique de détermination de composition optimale, selon les méthodes de Bolomey, de Faury et de Dreux-Gorisse pour un béton fabriqué à partir :

D'un ciment de type CPJ avec un dosage de 400 Kg/m^3

Des granulats d'origines concassés ;

Consistance plastique ;

Le béton est destiné à servir à la construction d'un bâtiment à usage d'habitation.

Données de bases

Pour rendre fonctionnel ces méthodes, il est nécessaire de connaître :

L'étendue granulaire des granulats ;

Les propriétés physiques des constituants.

Les résultats des essais préliminaires sont les suivants :

- Analyse granulométriques du sable et du gravier

| Sable (0/5) | | Gravier (5/15) | |
|-------------|-------------|----------------|-------------|
| Tamis (mm) | Tamisât (%) | Tamis (mm) | Tamisât (%) |
| 5,00 | 100 | 20 | 100 |
| 3,35 | 98,5 | 14 | 80 |
| 2,00 | 83,5 | 11,2 | 38 |
| 1,18 | 63,3 | 10 | 23,7 |
| 0,60 | 42,8 | 8 | 5,8 |
| 0,30 | 26,5 | 6,3 | 1,4 |
| 0,15 | 13 | 5 | 0 |
| 0,063 | 4,4 | - | - |
| < 0,063 | 0 | - | - |

Les masses volumiques absolues des composants sont reproduites dans le tableau suivant :

| Composant | Masse volumique absolue (10^3 Kg/m^3) |
|----------------|---|
| Ciment (CPJ) | 3,10 |
| Sable (0/5) | 2,53 |
| Gravier (5/15) | 2,77 |

II.4.1. Méthode de Bolomey

Selon Bolomey la courbe optimale est :

$$P = A + (100 - A)\sqrt{\frac{d}{D}}$$

Le tableau (II.1) donne la valeur de $A = 13$ (béton armé avec des granulats d'origines concassés).

Détermination des pourcentages de ciment C de sable S et de gravier G dans la composition optimale :

Cas de ciment :

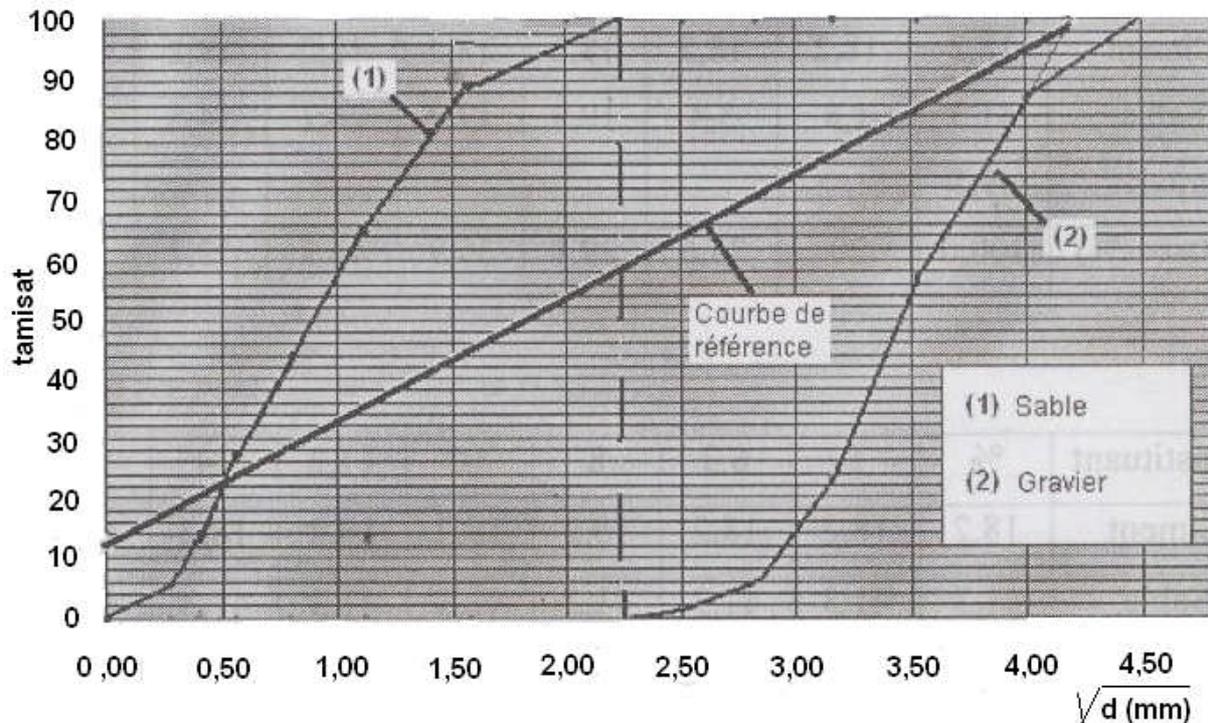
$$C = \left(\frac{\text{masse du ciment}}{\text{masse totale des éléments secs}} \right) 100$$

La masse de ciment dans un m^3 de béton est fixée à 400 Kg pour la masse des éléments secs, on admettra dans un premier temps qu'elle est égale à 2200 Kg.

Soit donc un pourcentage en ciment de :

$$C (\%) = \left(\frac{400}{2200} \right) = 18,2\%$$

Valeur D : pour la détermination de la valeur exacte de D, on pourra utiliser la méthode graphique de JOISEL, soit dans le présent cas : $D = 17,3$. (Voir figure II.7)



On tire donc, l'optimum les pourcentages suivants :

% sable + % ciment = 59,5%

% ciment = 18,2%

% sable = 41,3%

% gravier = 40,5%

Donc le mélange optimum doit contenir les pourcentages suivants :

- 18,2% de ciment
- 41,3% de sable
- 40,5% de gravier

Nous avons déterminés les proportions optimales de la phase sec du béton. Il reste encore à déterminer la quantité d'eau nécessaire. Pour cela nous allons utiliser les formules proposées par Bolomey citées précédemment.

Détermination de la quantité d'eau

Le tableau suivant présente les tailles des granulats, déduites de l'analyse granulométrique, ainsi que leurs pourcentages dans la formule optimale :

| Constituant | % | 0,063 | 0,15 | 0,3 | 0,6 | 1,18 | 2 | 3,35 |
|-------------|------|-------|------|------|------|------|------|------|
| Ciment | 18,2 | 18,2 | 18,2 | 18,2 | 18,2 | 18,2 | 18,2 | 18,2 |
| Sable | 41,3 | 1,8 | 5,4 | 10,9 | 17,7 | 26,1 | 34,5 | 40,7 |
| Gravier | 49,5 | | | | | | | |
| Totaux (%) | 100 | 20 | 23,6 | 29,1 | 35,9 | 44,3 | 52,7 | 58,9 |

| Constituant | % | 5 | 6,3 | 8 | 10 | 11,2 | 14 | 20 |
|-------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Ciment | 18,2 | 18,2 | 18,2 | 18,2 | 18,2 | 18,2 | 18,2 | 18,2 |
| Sable | 41,3 | 41,3 | 41,3 | 41,3 | 41,3 | 41,3 | 41,3 | 41,3 |
| Gravier | 40,5 | | 0,6 | 2,3 | 9,6 | 15,4 | 32,4 | 40,5 |
| Totaux (%) | 100 | 59,5 | 60,1 | 61,8 | 69,1 | 74,9 | 91,9 | 100 |

Pour les éléments inférieurs à 0,16 mm, nous avons évidemment le ciment qui intervient avec sa masse totale (soit 400 Kg) et une fraction du sable qui dans le cas présent est de 5,4% de la masse sec à mouiller (estimée à 2200 kg) soit finalement :

- D < 0,16 mm :

Ciment :400 kg

Sable fin.....5,4% (2200) = 118,8 kg

Total à mouiller :P = 400 + 118,8 = 518,8 kg

Soit une quantité d'eau de :Eau= (0,23P) = (0,23 x 518,8) = 119,3 kg

Pour la partie restante (D>0,16mm) la masse à mouiller correspond à la masse totale sec (estimée à 2200 kg) auxquelles il faudra déduire la masse des éléments inférieur à 0,16mm (soit dans le cas présent 518 kg) soit finalement :

- D ≥ 0,16mm :

Masse à mouiller = masse totale – masse des éléments fins

$$2200 - 518,8 = 1681,2 \text{ kg}$$

d₁ = 0,16mm ; d₂ = 17,3 mm K = 0,10 d'après le tableau (II. 2)

$$Eau = \frac{0,10 \cdot 1681,2}{1,17 \sqrt[3]{0,16 \cdot 17,3}} = 102,3 \text{ kg}$$

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

$$119,3 + 102,3 = 221,6 \text{ kg}$$

Pourcentage d'eau est déduit de :

$$E = \left(\frac{221,6}{2200} \right) \cdot 100 = 10,07 \%$$

$$\text{Soit un rapport } \frac{E}{C} = \frac{221,6}{400} = 0,55$$

Composition d'un mètre cube de béton est la composition de (100+E) % :

$$\left\{ \begin{array}{l} C = 18,2 \\ S = 41,3 \\ g = 40,5 \\ E = 10,07 \end{array} \right. \quad \text{Un total de 110,07 \%}$$

| Composant | % en poids | Masse volumique | Composant en volume | Composant en Poids (kg) |
|-----------|------------|-----------------|---------------------|-------------------------|
| Ciment | 18,2 | 3,10 | 5,87 | 388 (400) |
| Sable | 41,3 | 2,53 | 16,32 | 881 |
| Gravier | 40,5 | 2,77 | 14,62 | 864 |
| Eau | 10,07 | 1,0 | 10,07 | 212 |
| Totaux | 110,07 | | 46,88 | 2345 |

Ainsi la composition optimale selon Bolomey doit contenir, pour un m³ de béton exprimé en Kg, les masses suivantes :

$$\begin{cases} \text{Ciment} = 400 \\ \text{Sable} = 881 \\ \text{Gravier} = 864 \\ \text{Eau} = 212 \end{cases}$$

II.4.2. Méthode de Faury

D’après la définition la courbe de référence de Faury est constituée de deux segments de droites, formant une ligne brisée.

On a d’après l’équation : $D = 17,32$

L’origine de coordonnées : $(0,005 ; 0)$

L’extrémité de coordonnées : $(17,32 ; 100)$

Point de brisure de coordonnées : $(8,66 ; Y_{D/2})$

Pour calculer de $Y_{D/2}$

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

Nous avons un squelette inerte (sable + gravier) d’origine industrielle, dont la taille maximale est $D < 25$ mm, le béton est de consistance plastique, d’où :

$$A = 32 \text{ d’après le tableau (II.2), } B = 1,5 \text{ et } \frac{R}{1,25D} = 0,9$$

Donc le point de brisure a pour coordonnées $(8,66 ; 66,22)$

Les courbes granulométriques du sable et du gravier ainsi que la courbe optimale du béton sont représentées sur la figure (II.8) suivante :

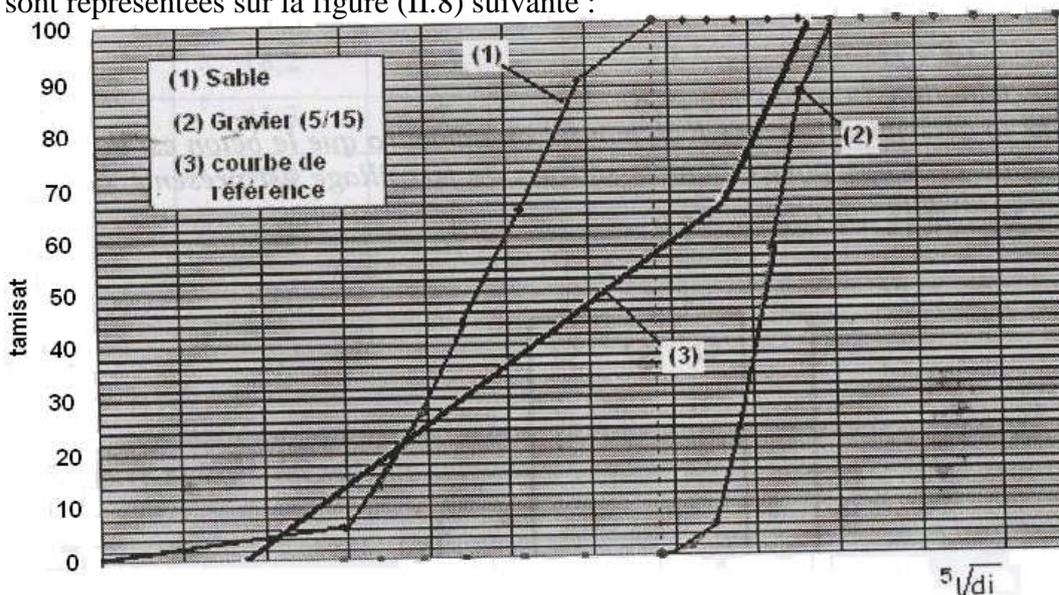


Figure II.8. Composition optimale du béton selon la méthode de Faury [19].

En appliquant la méthode graphique de JOISEL, on trouve :

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

Donc la composition optimale selon Faury devrait contenir :

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

Détermination de la quantité d'eau

C'est la même démarche utilisée dans la méthode de Bolomey qui reprise seule changement les proportions de la phase inerte (sable + gravier) :

| Constituant | % | 0,063 | 0,15 | 0,3 | 0,6 | 1,18 | 2 | 3,35 |
|-------------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|
| Ciment | 18,2 | 18,2 | 18,2 | 18,2 | 18,2 | 18,2 | 18,2 | 18,2 |
| Sable | 39,3 | 1,7 | 5,1 | 10,4 | 16,8 | 24,9 | 32,8 | 38,7 |
| Gravier | 42,5 | | | | | | | |
| Totaux (%) | 100,0 | 19,9 | 23,3 | 28,6 | 35,0 | 43,1 | 51,0 | 56,9 |

| Constituant | % | 5 | 6,3 | 8 | 10 | 11,2 | 14 | 20 |
|-------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Ciment | 18,2 | 18,2 | 18,2 | 18,2 | 18,2 | 18,2 | 18,2 | 18,2 |
| Sable | 39,3 | 39,3 | 39,3 | 39,3 | 39,3 | 39,3 | 39,3 | 39,3 |
| Gravier | 42,5 | | 0,6 | 2,5 | 10,1 | 16,2 | 34,0 | 40,5 |
| Totaux (%) | 100 | 57,5 | 58,1 | 60,0 | 67,6 | 73,7 | 91,5 | 100 |

- D < 0,16 mm :

Ciment :400 kg

Sable fin.....5,1% (2200) = 112,2 kg

Total à mouiller :P = 400 + 112,2 = 512,2 kg

Soit une quantité d'eau de :Eau= (0,23P) = (0,23 x 512,2) = 117,8 kg

Pour la partie restante (D>0,16mm) la masse à mouiller correspond à la masse totale sec (estimée à 2200 kg) auxquelles il faudra déduire la masse des éléments inférieur à 0,16mm (soit dans le cas présent 512,2 kg) soit finalement :

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

Masse à mouiller = masse totale – masse des éléments fins

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

$d_1 = 0,16\text{mm}$; $d_2 = 17,3 \text{ mm}$ K = 0,10 d'après le tableau (II. 2)

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

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

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

Pourcentage d'eau est déduit de :

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

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

Composition d'un mètre cube de béton est la composition de (100+E) % :

$$\left\{ \begin{array}{l} C = 18,2 \\ S = 39,3 \\ g = 42,5 \\ E = 10,02 \end{array} \right. \quad \text{Un total de } 110,02 \%$$

| Composant | % en poids | Masse volumique | Composant en volume | % en Poids | Composant en Poids (kg) |
|-----------|------------|-----------------|---------------------|------------|-------------------------|
| Ciment | 18,2 | 3,10 | 5,87 | 16,54 | 389 (400) |
| Sable | 39,3 | 2,53 | 15,53 | 35,72 | 840 |
| Gravier | 42,5 | 2,77 | 15,34 | 38,62 | 909 |
| Eau | 10,02 | 1,0 | 10,02 | | 220 |
| Totaux | 110,02 | | 46,76 | 100 | 2358 |

Ainsi la composition optimale selon Bolomey doit contenir, pour un m³ de béton exprimé en Kg, les masses suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Ciment} = 400 \\ \text{Sable} = 840 \\ \text{Gravier} = 909 \\ \text{Eau} = 220 \end{array} \right.$$

II.4.3. Méthode de Dreux Gorisse**Données de base :**

On admettra que la résistance nominale demandée du béton soit $\sigma'_0 = 35 \text{ MPa}$.

Les granulats utilisés sont de bonne qualité, d'où : $G = 0,5$

Le béton désiré est un béton plastique de vibration courante, soit : $A = 6$

Le ciment utilisé est le CPJ 45, la résistance à 28 jours vaut : $\sigma'_c = 45 \text{ MPa}$

Dosage en ciment

$$\sigma'_{28} = G\sigma'_c \left(\frac{C}{E} - 0,5 \right) \Rightarrow \frac{C}{E} = 2,03$$

Le dosage en ciment est donc de 400 Kg/m^3 , donc soit un dosage en eau

$$E = 400/2,03 = 197 \text{ litres.}$$

Dosages des granulats :

Traçons la courbe granulaire de référence OAB

Le point de brisure A de la courbe granulaire de référence se situe à l'abscisse

$$D/2 = 10\text{mm (module 41) son ordonnée est : } Y = 50 - \sqrt{D} + K \text{ avec : } \sqrt{D} = 4,47$$

Pour un dosage en ciment de 400 Kg , un granulat concassé et une vibration normale, on peut adapter un terme correcteur $K = 0$

La correction en fonction du module de finesse du sable qui est de $2,56$ soit :

$$K_s = 6M_F - 15 = 0,36$$

Donc l'ordonnée du point de brisure est : $Y = 50 - 0 - 0,36 = 44,64\%$

La ligne de partage entre les deux granulats s'obtient en joignant le point 95% de la courbe du sable au point 5% de la courbe du gravier.

La figure suivante présente la courbe optimale du béton étudié.

Le point de rencontre de la ligne de partage avec la courbe de référence donne le partage des pourcentages de sable et gravier. Dans notre cas, le mélange optimum doit contenir :

- 18,2 % de ciment
- 32,6 % de sable ; - 49,2 % de gravier
- 49,2 % de gravier

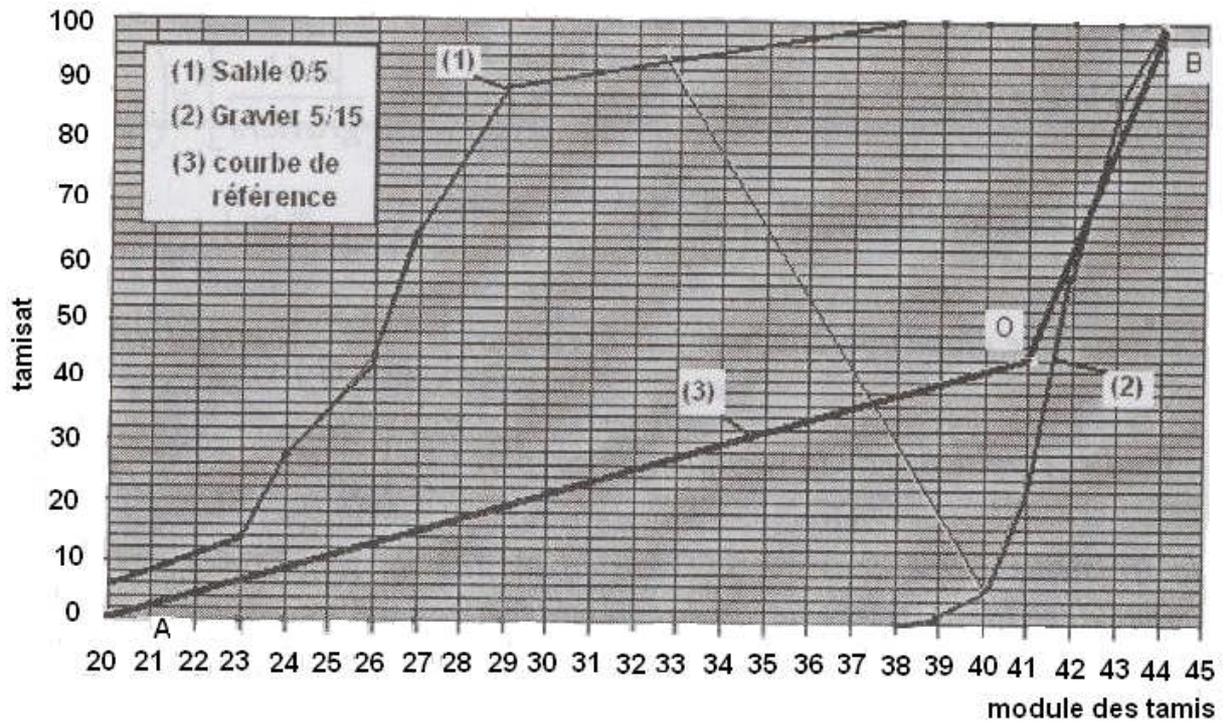


Figure II.9. Composition optimale du béton selon la méthode de Dreux Gorisse [19]

II.5. Application des trois méthodes pour le béton compacté au rouleau (BCR) [32]

Le Béton Compacté au Rouleau se présente comme étant une technologie évolutive pour une grande diversité d'application: Barrages, routes de transport, rues, aires de stationnement...

Le présent travail traite, pour une application routière, la résolution du problème de formulation du Béton Compacté au Rouleau (BCR) en utilisant des matériaux de gisements locaux avec la spécification d'un faible dosage en ciment. L'étude réalisée comporte les étapes suivantes :

- Caractérisation des différents constituants granulaires à base de matériaux de gisements locaux.
- Application des méthodes de formulation sur les différents mélanges de granulats, telle que celles de Bolomey, Faury, Dreux-Gorisse.
- Détermination des pourcentages des constituants granulaires avec chacune de ces méthodes.
- Réalisation des essais expérimentaux de compression sur des éprouvettes cylindriques.

II.5.1. Identification des constituants du mélange du BCR

La qualité et le comportement du béton compacté au rouleau (BCR) dépendent essentiellement de la pâte (ciment Portland, eau et air), du choix et du dosage des granulats convenables (sables, graviers et graves). Ces derniers représentent les principaux éléments du mélange [33]. Le dosage recherché consiste à déterminer les différentes proportions massiques ou volumiques nécessaires à l'obtention d'un béton de meilleure qualité.

II.5.1.1. Dosage en ciment

Généralement, les mélanges de BCR sont fabriqués avec un ciment hydraulique de teneur totale comprise entre 12 et 16% de la masse totale des constituants secs [34,35].

II.5.1.2. Qualité et dosage des granulats

Les granulats représentent généralement pour les bétons conventionnels un pourcentage de 75% du volume total du mélange solide. Pour le BCR, le pourcentage des granulats est approximativement compris entre 75 et 85% du volume total du mélange solide [36, 37,38].

Deux types de granulats utilisés: roulés pour les sables siliceux et concassés pour les sables calcaires, les graviers et les graves.

Tableau II.12. Caractéristiques des granulats utilisés (Carrière au nord de la Tunisie) [32]

| Granulats | Type | Provenance | ρ Kg/m ³ | Ap | Los Angeles | Micro-Deval |
|--------------|-----------------------|------------------|--------------------------|-------|-------------|-------------|
| Sable Kh | Sable roulé 0/5 | Khlidia | 2575 | - | - | - |
| Sable JO | Sable 0/4 concassé | Djebel Ouest | 2530 | - | - | - |
| Gravier 4/8 | Gravier 4/8 concassé | Djebel Ouest | 2614 | 21,23 | 28,08 | 11 |
| Gravier 4/16 | Gravier 4/16 concassé | Djebel El-Ressas | 2650 | 19,37 | 28,30 | 18 |
| Grave 0/20 | Grave 0/20 concassée | Djebel El-Ressas | 2631 | 25,58 | 26,5 | 12 |

II.5.1.3. Dosage en eau

La plage de variation de la teneur en eau (pourcentage de la masse de l'eau contenu dans un mélange par rapport à la masse totale des solides secs) est comprise entre 4,5% et 6% [34,39]. Ce dosage en eau considéré relativement faible par rapport au béton conventionnel permet d'obtenir un béton sec à affaissement nul.

II.5.2. Identification des mélanges

Mustapha ZDIRI [32] a considéré dans son étude huit mélanges granulaires différents dont les constituants sont résumés dans le tableau (II.12)

Tableau II.13. Constituants des huit mélanges utilisés

| N° | Mélange | N° | Mélange |
|----|---|----|---|
| M1 | Sable Kh et Grave 0/20 | M5 | Sable Kh, Sable JO et Gravier 4/16 |
| M2 | Sable Kh, Sable JO et Grave 0/20 | M6 | Sable Kh et Gravier 4/16 |
| M3 | Sable Kh, Sable JO, Gravier 4/8 et Grave 0/20 | M7 | Sable Kh, Sable JO, gravier 4/8 et Gravier 4/16 |
| M4 | Sable JO et Grave 0/20 | M8 | Sable Kh et Gravier 4/8 |

L'étude de la formulation du béton compacté au rouleau (BCR) consiste à définir les proportions massiques ou volumiques optimales des mélanges des différents granulats dont on dispose, ainsi que le dosage en ciment et en eau, pour pouvoir réaliser un béton dont les propriétés soient celles recherchées pour la construction routière [14,40].

Les méthodes essayées dans ce travail aboutissent à des dosages proportionnels «volumétriques».

Mustapha ZDIRI [32] a appliqué ces méthodes sur les huit mélanges granulaires.

Mustapha ZDIRI [32] a commencé par utiliser la méthode de Bolomey [14] dont la courbe granulométrique de référence est d'équation (1) (figure II.11), à la suite, on a appliqué pour

les mêmes mélanges, la droite théorique de J. Faury, appelée aussi courbe granulométrique de référence d'équation (2) (figure II.12) et puis on a appliqué la méthode dite de Dreux-Gorisse comportant une composition granulaire de référence

0AB (figure II.13) définie ainsi suivant deux formules (3) et (4) [14,40].

| Méthodes | Bolomey | Faury | Dreux 1 | Dreux 2 |
|------------|--|---|-----------------|-------------------------|
| Formules | $p = A + (100 - A) \cdot \sqrt{\frac{d}{D}}$ | $Y = A + 17 \cdot \sqrt[5]{D} + \frac{B}{\frac{R}{1,25D} - 0,75}$ | $Y = 50 - D/10$ | $Y = 50 - \sqrt{D} + K$ |
| Paramètres | D= 20mm et A= 8. | D= 20mm, B=1 et A=25 | D= 20mm et K=+5 | |

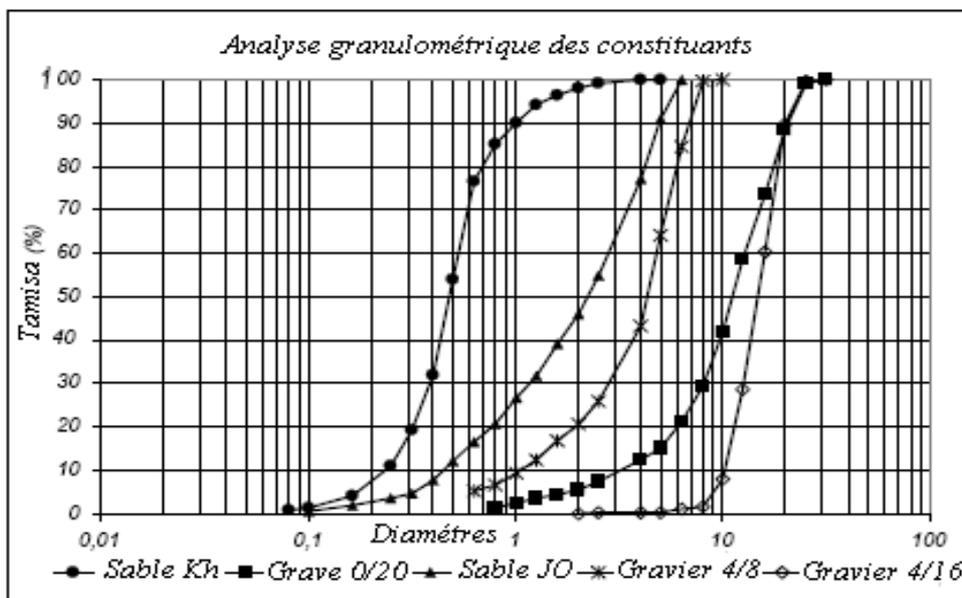


Figure II.10. Analyse granulométriques des 5 granulats [32]

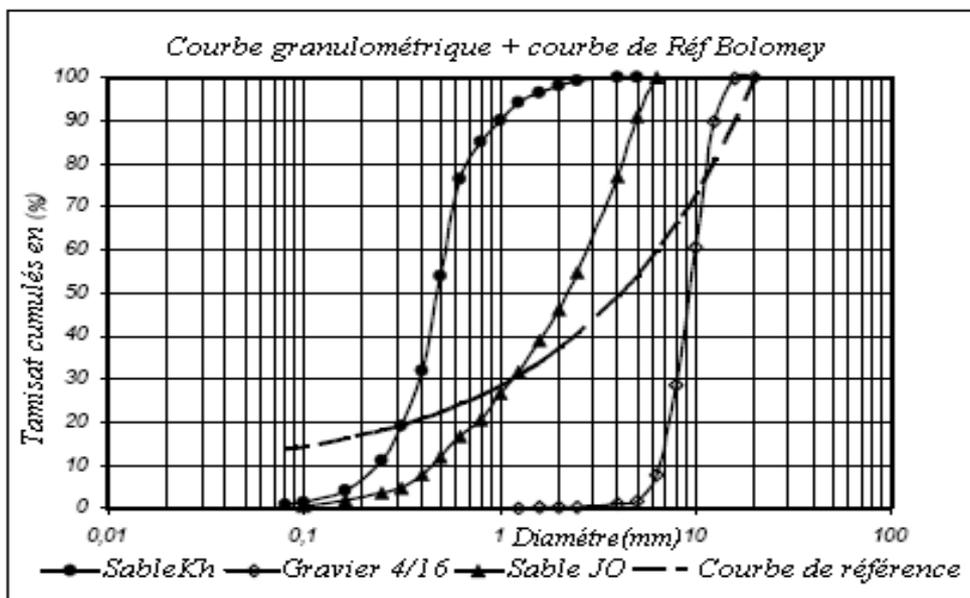


Figure II.11. Courbe granulométriques + Courbe de référence Bolomey [32].

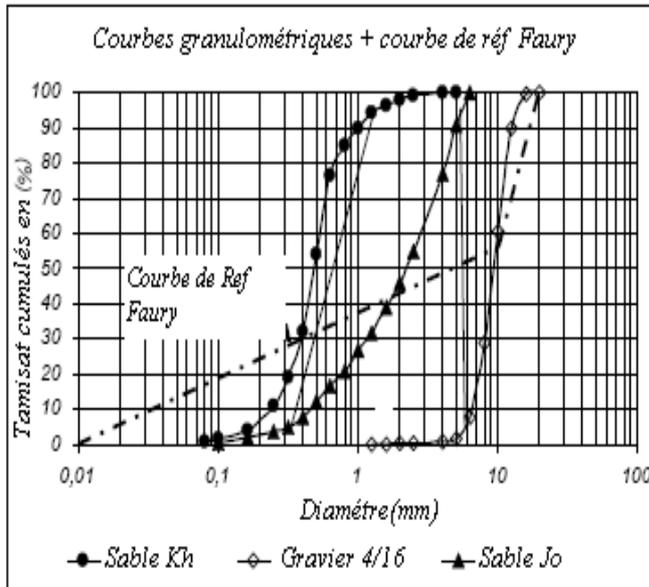


Figure II.12. Courbes granulométriques + Courbes de référence Faury [32].

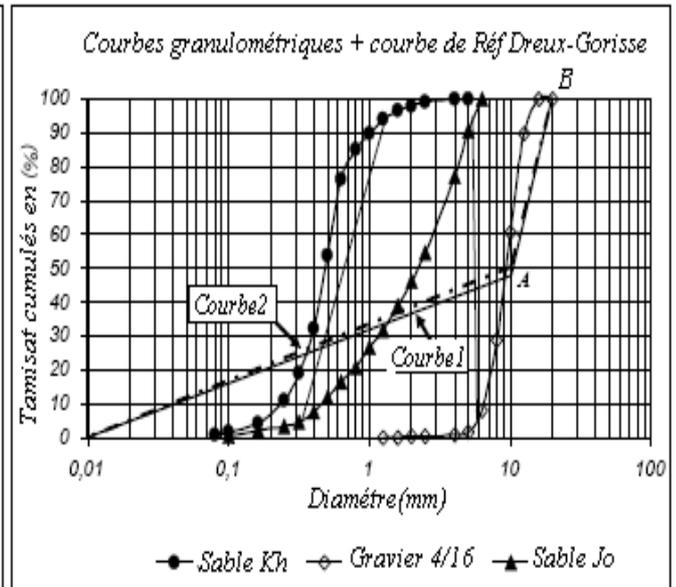


Figure II.13. Courbes granulométriques + Courbe de référence Dreux-Gorisse [32]

Les proportions des composants son données par le tableau suivant :

Tableau II.14. Pourcentages des composants pour les 3 Méthodes

| Formule de Bolomey | Formule de Faury | Dreux 1 | Dreux 2 |
|--------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Sable Kh: 21% | Sable Kh: 32% | Sable Kh: 25% | Sable Kh: 27% |
| Sable JO: 36% | Sable JO: 20% | Sable JO: 18% | Sable JO: 19% |
| Gravier 4/16: 43% | Gravier 4/16: 48% | Gravier 4/16: 57% | Gravier 4/16: 54% |

II.5.3. Conclusion

Mustapha ZDIRI [32] a remarqué que les valeurs données par les méthodes de Dreux et Faury diffèrent de celle donnée par les méthodes de Bolomey.

Cette différence est due essentiellement à la prise en compte pour Dreux et Faury de l'effet de parement qui représente l'effet du coffrage dans le cas des bétons conventionnels. L'effet de parement n'a pas d'importance dans le cas du béton compacté au rouleau ce qui nous permet de ne pas le prendre en considération. Les résultats proches obtenus par la méthode de Bolomey confirment la négligence de cet effet.

Les essais d'études comportant, en particulier, la confection de quelques éprouvettes de contrôle de résistance qui nous permet de juger les propriétés du mélange. Les éprouvettes sont essayées à l'écrasement par compression centrée et certains mélanges ont donnés des résistances moyennes arrivant à 20 MPa.

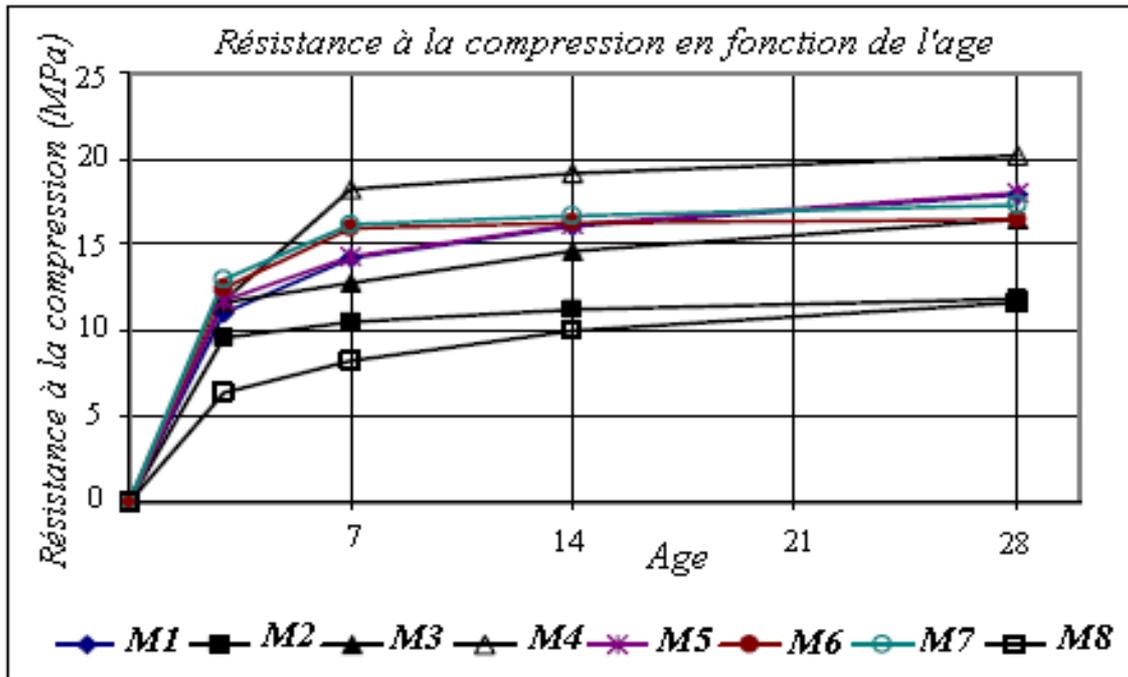


Figure II.14 .Courbes de variation de la résistance en fonction de l'âge pour les huit mélanges du BCR

CHAPITRE III

CARACTERISATION DES MATERIAUX

III.1. Introduction

Les granulats utilisés dans les travaux de génie civil doivent répondre à des impératifs de qualité et des caractéristiques propres à chaque usage. Les granulats constituent le squelette du béton et ils représentent, dans les cas usuels, environ 80 % du poids total du béton.

Les granulats sont nécessaires pour la fabrication des bétons; du point de vue économique, car ils permettent de diminuer la quantité de liant qui est plus cher; du point de vue technique, car ils augmentent la stabilité dimensionnelle (**retrait, fluage**) et ils sont plus résistants que la pâte de ciment. Il faut par conséquent, augmenter au maximum la quantité de granulats, en respectant toutefois les deux conditions suivantes:

- Les granulats doivent satisfaire à certaines exigences de qualité;
- La qualité de pâte liante doit être suffisante pour lier tous les grains et remplir les vides.

Les essais effectués en laboratoire portent nécessairement sur des quantités réduites de matériaux, ceux-ci devant permettre de mesurer des paramètres caractéristiques de l'ensemble du matériau dans lequel on a fait le prélèvement. Il faut que l'échantillon utilisé au laboratoire soit représentatif de l'ensemble. Cette opération est généralement difficile, prend du temps et, parfois, est coûteuse, mais elle est essentielle; souvent, les essais effectués sont sans valeur car ils ne sont pas représentatifs.

III.2. Classification des granulats

On trie les granulats par dimension au moyen de **tamis** (mailles carrées) et de passoirs (trous circulaires) et on désigne une classe de granulats par un ou deux chiffres. Si un seul chiffre est donné, c'est celui du diamètre maximum D exprimé en mm; si l'on donne deux chiffres, le premier désigne le diamètre minimum d , des grains et le deuxième le diamètre maximum D .

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 $0/D$.

Les granulats utilisés pour le béton sont soit d'origine naturelle, soit artificiels.

Parmi les granulats naturels, les plus utilisés pour le béton proviennent de roches sédimentaires siliceuses ou calcaires, de roches métamorphiques telles que les quartz et quartzites, ou de roches éruptives telles que les basaltes, les granites, les porphyres.

III.3. Description des composants de base

Les matériaux granulaires retenus pour cette étude sont des matériaux naturels de types sable et gravier (produits concassés calcaires).

III.3.1. Ciment

Tous les mélanges ont été fabriqués en utilisant le ciment portland type CPJ, CEM II 42,5 fabriqué par la société de ciments AIN EL KEBIRA, les caractéristiques chimiques et minéralogiques sont données par l'annexe A [41].

III.3.2. L'eau de gâchage

L'eau de gâchage utilisée lors de la fabrication des bétons est potable (l'eau de robinet).

III.3.3. Le sable

Pour la fabrication des bétons, on a utilisé un sable naturel (produit concassé calcaire) de granulométrie 0/3. La distribution granulométrique de ces sables naturels est présentée dans les tableaux (III.4, III.5 et III.6) de provenance Ain Roua (wilaya de Sétif) et Adrar Oufarnou (wilaya de Bejaia).

III.3.4. Les granulats

Les granulats utilisés proviennent de la carrière Ain Roua (wilaya de Sétif). Il s'agit des produits concassés calcaires. Les granulats utilisés sont constitués de trois granularités 3/8, 8/15 et 15/25. Les tableaux (III.1, III.2 et III.3) présentent respectivement la distribution granulométrique de ces trois graviers.

III.4. Analyse granulométrique des granulats utilisés

Les courbes granulométriques des différents granulats peuvent être déterminées par l'essai de l'analyse granulométrique (NF P 18-560) [42].

III.4.1. Analyse granulométrique des gravillons

Les résultats des analyses granulométriques des gravillons sont illustrés dans les tableaux (III.1, III.2 et III.3)

| <i>Tableau III.1. Analyse granulométrique du gravier 3/8</i> | | | |
|--|------------------------|-------------------|----------------------|
| Masse de l'échantillon soumis à l'essai : $M_{éch} = 3674$ grs | | | |
| Ouverture des tamis (mm) | Refus cumulés Rn (grs) | Refus cumulés (%) | Tamisats cumulés (%) |
| 10 | 03 | 00 | 100 |
| 8 | 29 | 01 | 99 |
| 6,3 | 1237 | 34 | 66 |
| 5 | 1910 | 52 | 48 |
| 2,5 | 3554 | 97 | 03 |
| 1,25 | 3603 | 98 | 02 |

| <i>Tableau III.2. Analyse granulométrique du gravier 8/15</i> | | | |
|--|------------------------|-------------------|----------------------|
| Masse de l'échantillon soumis à l'essai : $M_{éch} = 4200$ grs | | | |
| Ouverture des tamis (mm) | Refus cumulés Rn (grs) | Refus cumulés (%) | Tamisats cumulés (%) |
| 16 | 100 | 02 | 97 |
| 12 | 1460 | 35 | 65 |
| 10 | 2668 | 64 | 36 |
| 8 | 3560 | 85 | 15 |
| 6,3 | 4053 | 97 | 03 |
| 5 | 4132 | 98 | 02 |
| 2,5 | 4195 | 100 | 00 |

| Tableau III.3. Analyse granulométrique du gravier 15/25 | | | |
|--|------------------------|----------------------|----------------------|
| Masse de l'échantillon soumis à l'essai : $M_{éch} = 6536$ grs | | | |
| Ouverture des tamis (mm) | Refus cumulés Rn (grs) | Refus cumulés Rn (%) | Tamisats cumulés (%) |
| 25 | 90 | 01 | 99 |
| 20 | 1755 | 27 | 73 |
| 16 | 5444 | 83 | 17 |
| 12,5 | 6116 | 94 | 06 |
| 10 | 6166 | 94 | 06 |
| 8 | 6177 | 95 | 05 |
| 6,30 | 6211 | 95 | 05 |

III.4.2. Analyse granulométrique du sable

Les résultats sont donnés dans le tableau (III.4)

| Tableau III.4. Analyse granulométrique du sable 0/3 Ain Roua | | | |
|---|------------------------|-------------------|----------------------|
| Masse de l'échantillon soumis à l'essai : $M_{éch} = 1515$ grs | | | |
| Ouverture des tamis (mm) | Refus cumulés Rn (grs) | Refus cumulés (%) | Tamisats cumulés (%) |
| 5 | 21 | 01 | 99 |
| 2,50 | 645 | 43 | 57 |
| 1,25 | 1040 | 69 | 31 |
| 0,630 | 1215 | 80 | 20 |
| 0,315 | 1313 | 87 | 13 |
| 0,160 | 1362 | 90 | 10 |
| 0,080 | 1397 | 92 | 08 |

III.5. Expression des résultats de la courbe granulométrique

Les pourcentages des refus cumulés, ou ceux des Tamisats cumulés, sont représentés sous la forme d'une courbe granulométrie en portant les ouvertures des tamis en abscisse, sur une échelle

logarithmique, et les pourcentages en ordonnée, sur une échelle arithmétique. La courbe est tracée de manière continue et ne peut pas passer rigoureusement par tous les points.

Pour s’assurer que le sable présente une granulométrie telle que les éléments fins ne soient ni en excès, ni en trop faible proportion il suffit de calculer le module de finesse celui-ci correspond à 1/100° de la somme des refus cumulés exprimé en pourcentage de la série suivante :

0,16- 0,315- 0,63- 1,25- 2,5- 5mm.

Dans notre cas le sable utilisé est 0/3 son module de finesse est égal à :

$$MF = (90 + 87 + 80 + 69 + 43 + 01)/100 = \mathbf{3,70}$$

Commentaire : le module de finesse du sable est de 3,7 \notin [2,2 – 2,8] donc c’est un sable grossier il faut le corriger par un autre sable.

Soit on utilise un sable 0/3 provient de la carrière Adrar Oufarnou (wilaya de Bejaia).

Les caractéristiques de ce sable sont les suivantes :

Les résultats de l’analyse granulométrique sont donnés par le tableau (III.5)

| Tableau II.5. Analyse granulométrique du sable 0/3 Adrar Oufarnou | | | |
|--|------------------------|-------------------|----------------------|
| Masse de l’échantillon soumis à l’essai : $M_{éch} = 1625$ grs | | | |
| Ouverture des tamis (mm) | Refus cumulés Rn (grs) | Refus cumulés (%) | Tamisats cumulés (%) |
| 5 | 11 | 01 | 99 |
| 2,50 | 110 | 07 | 93 |
| 1,25 | 405 | 25 | 75 |
| 0,630 | 765 | 47 | 53 |
| 0,315 | 1051 | 65 | 35 |
| 0,160 | 1245 | 77 | 23 |
| 0,080 | 1350 | 83 | 17 |

$$MF = (77 + 65 + 47 + 25 + 7 + 1) / 100 = \mathbf{2,22}$$

Le pourcentage des éléments inférieurs à 80 microns est égal à 17% > 12 % donc c’est un sable fin. Alors, il est possible de modifier le module de finesse d’un sable par l’adjonction d’un deuxième sable de module de finesse différent. Soit MF le module de finesse visé et MF₁ le module de finesse du sable (S1) tel que : MF₁ > MF et MF₂ le module de finesse du sable (S2) tel que : MF₂ < MF les deux sables sont combinés dans les proportions s₁ et s₂ comme suit :

Dans notre étude on vise $MF = 2,80$; $MF_1 = 3,7$ et $MF_2 = 2,22$ alors :

$$s_1 = \frac{MF_1 - MF}{MF_1 - MF_2} = \frac{3,7 - 2,8}{3,7 - 2,22} = 0,6 \text{ soit } 60 \% \text{ du sable S1 (sable 0/3 concassé Ain Roua)}$$

$$s_2 = \frac{MF - MF_2}{MF_1 - MF_2} = \frac{2,8 - 2,22}{3,7 - 2,22} = 0,4 \text{ soit } 40 \% \text{ du sable S2 (sable 0/3 concassé Adrar Oufarnou)}$$

Les résultats de l'analyse granulométriques du mélange de sable sont donnés par le tableau

(III.6)

| Tableau III.6. Analyse granulométrique du mélange de 02 sables | | | |
|---|------------------------|-------------------|----------------------|
| Masse de l'échantillon soumis à l'essai : $M_{éch} = 1700$ grs | | | |
| Ouverture des tamis (mm) | Refus cumulés Rn (grs) | Refus cumulés (%) | Tamisats cumulés (%) |
| 5 | 17 | 01 | 99 |
| 2,50 | 425 | 25 | 75 |
| 1,25 | 850 | 50 | 50 |
| 0,630 | 1105 | 65 | 35 |
| 0,315 | 1305 | 77 | 23 |
| 0,160 | 1411 | 83 | 17 |
| 0,080 | 1511 | 89 | 11 |

$$MF = (83 + 77 + 65 + 50 + 25 + 1) / 100 = 3,01$$

Avec le pourcentage des fines inférieures à 80 microns est égal à $11\% < 12\%$.

III.6. Mesure du Coefficient d'aplatissement des granulats (NF 18-561) [42]

III.6.1. Expression du coefficient d'aplatissement 'A'

$$A = \frac{\sum_j M_{ei}}{\sum_j M_{gi}}$$

Les résultats sont représentés dans les tableaux (III.7, III.8 et III.9)

Tableau III.7. Détermination du coefficient d'aplatissement pour le gravier (3/8)

| Tamisage sur tamis | | Tamisage sut grille | | |
|--|-----------------------|--------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|
| Classes granulaires d/D (mm) | M _{gi} (grs) | Ecartement des grilles (mm) | Passant M _{ei} (grs) | $A_i = \frac{M_{ei}}{M_{gi}} 100$ |
| 8/10 | - | - | - | - |
| 6,3/8 | 882 | 4 | 139 | 15,76 |
| 5/6,3 | 537 | 3,15 | 55 | 10,24 |
| 4/5 | 800 | 2,5 | 84 | 10,50 |
| $M = \sum M_{gi} = 2219$ grs | | $\sum M_{ei} = 278$ grs | | |
| $A = \frac{\sum_j M_{ei}}{M} 100 = 13$ | | | | |

Tableau III.8. Détermination du coefficient d'aplatissement pour le gravier (8/15)

| Tamisage sur tamis | | Tamisage sut grille | | |
|--|-----------------------|--------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|
| Classes granulaires d/D (mm) | M _{gi} (grs) | Ecartement des grilles (mm) | Passant M _{ei} (grs) | $A_i = \frac{M_{ei}}{M_{gi}} 100$ |
| 16/20 | 169 | 10 | 21 | 12,42 |
| 12,5/16 | 1048 | 08 | 148 | 14,12 |
| 10/12,5 | 1242 | 6,3 | 195 | 15,70 |
| 8/10 | 835 | 5 | 153 | 18,32 |
| 6,3/8 | 590 | 4 | 127 | 21,52 |
| 5/6,3 | - | 3,15 | - | - |
| 4/5 | - | 2,5 | - | - |
| $M = \sum M_{gi} = 3884$ grs | | $\sum M_{ei} = 644$ grs | | |
| $A = \frac{\sum_j M_{ei}}{M} 100 = 17$ | | | | |

Tableau III.9. Détermination du coefficient d'aplatissement pour le gravier (15/25)

| Tamisage sur tamis | | Tamisage sur grille | | |
|---------------------------------------|-----------------------|--------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|
| Classes granulaires d/D (mm) | M _{gi} (grs) | Ecartement des grilles (mm) | Passant M _{ei} (grs) | $A_i = \frac{M_{ei}}{M_{gi}} 100$ |
| 20/25 | 1480 | 12,5 | 131 | 8,85 |
| 16/20 | 2636 | 10 | 107 | 4,06 |
| 12,5/16 | 694 | 08 | 57 | 8,21 |
| 10/12,5 | - | 6,3 | - | - |
| $M = \sum M_{gi} = 4810$ grs | | $\sum M_{ei} = 295$ grs | | |
| $A = \frac{\sum_j M_{ei}}{M} 100 = 6$ | | | | |

III.6.2. Interprétation des résultats

D'après nos résultats on constate que le coefficient d'aplatissement $A \leq 30\%$ pour tous les granulats selon la norme (NF 18-561), nous pouvons conclure que ces graviers peuvent être utilisés pour la confection du béton hydraulique.

III.7. Calcul de la teneur en impureté [42]

III.7.1. Détermination de la propreté superficielle (la norme NF P 18-591) [42]

La propreté superficielle est définie comme étant le pourcentage pondéral de particules inférieures 0,5 mm mélangées ou adhérentes à la surface des granulats supérieurs à 2mm.

III.7.2. Expression des résultats

La propreté superficielle est donnée par :

$$P = \frac{m}{M_s} \times 100$$

Avec :

M_s la masse sèche de l'échantillon soumis à l'essai de propreté est : $M_s = \frac{M_{1s}}{M_{1h}} \times M_h$

m la masse sèche des éléments inférieurs à 0,5 mm d'après la norme (NF P 18-591) est égale à

$$m = M_S - m'$$

Les résultats obtenus sont donnés par le tableau (III.10)

Tableau III.10. Calcul de la teneur en impuretés pour les gravillons.

| Désignation | Echantillon 3/8 | Echantillon 8/15 | Echantillon 15/25 |
|--------------------------------|-----------------|------------------|-------------------|
| Etat de l'échantillon | | | |
| Masse humide M_{1h} (g) | 3772 | 4202 | 6540 |
| Masse humide M_h (g) | 3020 | 4041 | 5010 |
| Masse sèche M_{1S} (g) | 3674 | 4200 | 6536 |
| Masse sèche M_S (g) | 2941,53 | 4039,07 | 5006,93 |
| Masse sèche m' (g) | 2890 | 4011 | 4987 |
| Masse sèche m (g) | 51,53 | 28,07 | 19,93 |
| Propreté superficielle P (%) | 1,75 | 0,70 | 0,40 |

III.7. 3. Interprétation des résultats

D'après nos résultats la propreté superficielle $P < 3$ % selon la norme (NF P 18- 591) donc les granulats utilisés ne contiennent pas d'impuretés.

III.8. Caractérisation des sables [42]

La caractérisation des sables fait intervenir des notions granularité et de propreté ; les caractéristiques granulaires sont estimées aux moyens des essais tel que (essai Los-Angels, résistance à l'usure et la résistance au polissage).

La propreté s'estime au moyen de deux essais principaux : l'essai de propreté et l'essai au bleu de méthylène.

III.8.1. Essai d'équivalent de sable à 10 % de fines selon la norme (NF P 18-597) [42]

L'équivalent de sable visuel est donné par $ESV = \frac{h_2}{h_1} \times 100$

L'équivalent de sable par piston est donné par $ESP = \frac{h_2}{h_1} \times 100$

III.8.2. Présentation des résultats

Les résultats trouvés sont donnés dans les tableaux (III.11, III.12 et III.13)

Tableau III.11. Résultats de l'équivalent de sable visuel et par piston (sable Ain Roua).

| N°de éprouvettes | Hauteur h1 (cm) | Hauteur h2 (cm) | Hauteur h'2 (cm) | ESV % | ESP % | ESV moyen | ESP moyen |
|------------------|-----------------|-----------------|------------------|-------|-------|-----------|-----------|
| Eprouvette1 | 11,40 | 10,00 | 9,25 | 87 | 81 | 89 | 85 |
| Eprouvette2 | 10,80 | 9,60 | 9,30 | 88 | 86 | | |
| Eprouvette3 | 10,50 | 9,70 | 9,40 | 92 | 89 | | |

Tableau III.12. Résultats de l'équivalent de sable visuel et par piston (sable Adrar Oufarnou).

| N°de éprouvettes | Hauteur H1 (cm) | Hauteur h2 (cm) | Hauteur h'2 (cm) | ESV % | ESP % | ESV moyen | ESP moyen |
|------------------|-----------------|-----------------|------------------|-------|-------|-----------|-----------|
| Eprouvette1 | 10,50 | 7,80 | 7,50 | 74 | 71 | 75 | 72 |
| Eprouvette2 | 10,35 | 7,90 | 7,65 | 76 | 74 | | |
| Eprouvette3 | 11,15 | 8,50 | 8,00 | 76 | 72 | | |

Tableau III.13. Résultats de l'équivalent de sable visuel et par piston du mélange

| N°de éprouvettes | Hauteur h1 (cm) | Hauteur h2 (cm) | Hauteur h'2 (cm) | ESV % | ESP % | ESV moyen | ESP moyen |
|------------------|-----------------|-----------------|------------------|-------|-------|-----------|-----------|
| Eprouvette1 | 10,00 | 8,00 | 7,40 | 80 | 74 | 80 | 74 |
| Eprouvette2 | 09,90 | 7,90 | 7,40 | 80 | 75 | | |
| Eprouvette3 | 10,20 | 8,20 | 8,60 | 80 | 74 | | |

III.8.3. Interprétation des résultats

D'après les résultats trouvés $70 \% \leq ESP \leq 80 \%$ selon la norme (NF P 18-597) le sable utilisé est propre à faible pourcentage de fines argileuses convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité.

III.9. Mesure du coefficient de fiabilité des sables (Norme NF P 18-576) [42]

Le coefficient de friabilité du sable est :

$$F_s = 100 \cdot \frac{m}{M}$$

III.9.1. Expression des résultats

Alors le coefficient de friabilité mesuré est alors $F_s = 100 \cdot \frac{500 - 318,25}{500} = \frac{181,75}{5} = 36\%$

III.9.2. Interprétation des résultats

$F_s = 36\% < 60\%$ d'après la norme (NF P 18-576), le sable utilisé est un sable fiable.

III.10. Analyse chimique des sables utilisés

Tableau III.14. Résultats des analyses chimiques des sables.

| Nature du sable | % insoluble | % carbonates CaCO ₃ | % chlorures NaCl | % gypse CaSO ₄ | Teneur en anions de sulfate SO ₄ ²⁻ (mg/Kg) |
|--------------------|-------------|-----------------------------------|---------------------|------------------------------|--|
| 0/3 Adrar Oufarnou | 2,95 | 96,18 | 0,0585 | Néant | Néant |
| 0/3 Ain Roua | 2,79 | 91,07 | 0,0554 | Néant | Néant |

- Les essais des analyses chimiques des sables ont été effectués au niveau du laboratoire des travaux publics Est (LTPE) direction de Sétif, à travers de ces résultats, on peut constater que les deux sables ne sont pas agressifs pour les bétons. Ces derniers ont une forte teneur en carbonates (CaCO₃) une nulle teneur en gypse, ils ne s'agit que de sables calcaires.

III.11. Détermination de la masse volumique (NF P 18-554) et (NF P 18-555) [42,43]

III.11.1. Masse volumique absolue

III.11.1.1. Méthode de l'éprouvette

- La masse volumique absolue est donnée par la relation suivante :

$$\rho_s = \frac{M_s}{V_2 - V_1}$$

Les résultats obtenus sont portés dans le tableau (III.15)

Avec la masse volumique absolue d'un échantillon est la moyenne des trois valeurs.

Tableau III.15. Masse volumique absolue des granulats utilisés par la méthode d'éprouvette

| Echantillon | | Volume V_2 (cm ³) | Masse volumique absolue ρ_s (g/cm ³) | ρ_s moyenne (g/cm ³) |
|--------------------------------|------|---------------------------------|---|---------------------------------------|
| Gravier 15/25 | Ech1 | 455 | 2,72 | 2,67 |
| | Ech2 | 475 | 2,67 | |
| | Ech3 | 495 | 2,63 | |
| Gravier 8/15 | Ech1 | 455 | 2,72 | 2,67 |
| | Ech2 | 475 | 2,67 | |
| | Ech3 | 495 | 2,63 | |
| Gravier 3/8 | Ech1 | 455 | 2,72 | 2,67 |
| | Ech2 | 475 | 2,67 | |
| | Ech3 | 495 | 2,63 | |
| Sable 0/3 | Ech1 | 455 | 2,72 | 2,67 |
| | Ech2 | 475 | 2,67 | |
| | Ech3 | 495 | 2,63 | |
| Sable 0/3 Adrar Oufarnou | Ech1 | 455 | 2,72 | 2,67 |
| | Ech2 | 475 | 2,67 | |
| | Ech3 | 495 | 2,63 | |

III.11.1.2. Méthode au pycnomètre [42,43]

La masse absolue est donnée par la relation suivante :

$$\rho_s = \frac{M_2 - M_1}{(M_4 + M_2 - M_1 - M_3)} \cdot \rho_w$$

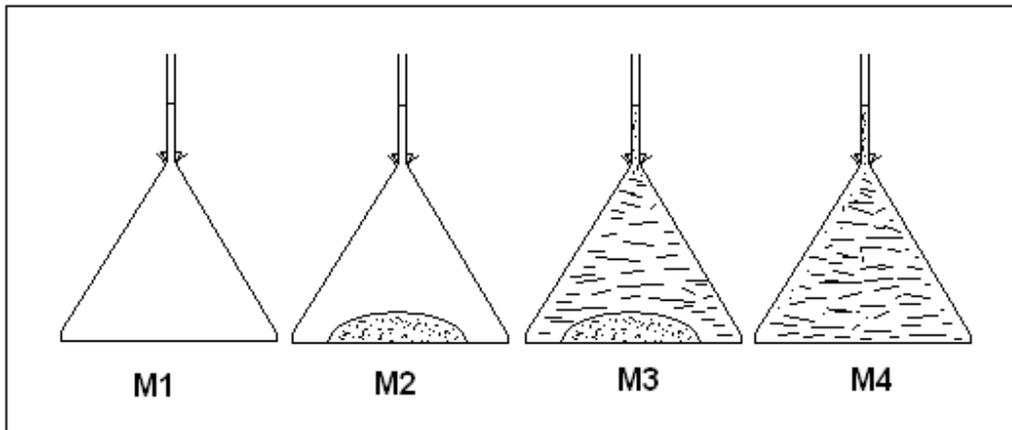


Figure.III.1. Masse volumique absolue à partir du pycnomètre

Soit la masse de pycnomètre vide $M_1 = 195,52$ grs

Les résultats obtenus sont portés dans le tableau (III.16)

Avec la masse volumique absolue d'un échantillon est la moyenne des trois valeurs.

Tableau III.16. Masse volumique absolue des granulats utilisés par la méthode au pycnomètre.

| Echantillon | | Masse M2 (g) (Pyc+Ech) | Masse M3 (g) (Pyc+Ech+eau) | Masse M4 (g) (Pyc rempli) | Masse volumique absolue ρ_s (g/cm ³) | ρ_s moyenne (g/cm ³) |
|---------------------|------|------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|--|--|
| Gravier 15/25 | Ech1 | 331,24 | 840,32 | 755,96 | 2,642 | 2,64 |
| | Ech2 | 402,29 | 884,70 | 756,14 | 2,643 | |
| | Ech3 | 415,11 | 892,69 | 756,32 | 2,638 | |
| Gravier 8/15 | Ech1 | 405,49 | 887,53 | 755,93 | 2,679 | 2,67 |
| | Ech2 | 377,81 | 869,70 | 755,72 | 2,668 | |
| | Ech3 | 408,42 | 889,25 | 755,84 | 2,678 | |
| Gravier 3/8 | Ech1 | 338,40 | 844,52 | 755,50 | 2,650 | 2,65 |
| | Ech2 | 332,38 | 840,79 | 755,70 | 2,640 | |
| | Ech3 | 369,18 | 865,59 | 756,84 | 2,670 | |
| Sable 0/3 | Ech1 | 296,02 | 818,71 | 755,66 | 2,683 | 2,65 |
| | Ech2 | 345,88 | 849,44 | 755,80 | 2,650 | |
| | Ech3 | 329,62 | 839,21 | 756,14 | 2,627 | |
| Sable 0/3 A.F | Ech1 | 285,75 | 811,53 | 755,28 | 2,650 | 2,63 |
| | Ech2 | 342,10 | 846,00 | 755,48 | 2,610 | |
| | Ech3 | 324,28 | 835,46 | 755,46 | 2,64 | |

Remarque : Dans notre étude on prend les résultats obtenus par la méthode de pycnomètre car elle est bien précise.

III.11.2. Calcul de la masse volumique apparente

La masse volumique apparente est donnée par la relation suivante :

$$\rho_{app} = \frac{M_2 - M_1}{V_T}$$

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau (III.17)

Tableau III.17. Masse volumique apparente des granulats utilisés

| Echantillon | | M ₂ (g) | (M ₂ -M ₁) (g) | Masse volumique apparente ρ_{app} (g/cm ³) | ρ_{app} moyenne (g/cm ³) |
|---------------------|------|-----------------------|--|---|--|
| Gravier 15/25 | Ech1 | 5990 | 5195,79 | 1,410 | 1,40 |
| | Ech2 | 5978 | 5183,79 | 1,407 | |
| | Ech3 | 5962 | 5167,79 | 1,403 | |
| Gravier 8/15 | Ech1 | 6034 | 5239,79 | 1,422 | 1,41 |
| | Ech2 | 5990 | 5195,79 | 1,410 | |
| | Ech3 | 5988 | 5193,79 | 1,410 | |
| Gravier 3/8 | Ech1 | 5724 | 4929,79 | 1,338 | 1,34 |
| | Ech2 | 5714 | 4919,79 | 1,340 | |
| | Ech3 | 5728 | 4933,79 | 1,340 | |
| Sable 0/3 A.R | Ech1 | 1940,62 | 1454,82 | 1,481 | 1,48 |
| | Ech2 | 1942,01 | 1456,21 | 1,483 | |
| | Ech3 | 1943,71 | 1457,91 | 1,485 | |
| Sable 0/3 A.F | Ech1 | 1919,15 | 1433,35 | 1,460 | 1,450 |
| | Ech2 | 1914,76 | 1428,96 | 1,455 | |
| | Ech3 | 1910,59 | 1424,79 | 1,451 | |

❖ **Interprétation des résultats :**

D'après les résultats trouvés nous avons : $\rho_s \in [2,5 \div 2,7]$ et $\rho_{app} \in [1,4 \div 1,6]$, ce sont des masses volumiques moyennes des granulats courants [19].

III.12. Résistance au choc : essai Los Angeles (NF P 18-573) [42,43]

Le coefficient Los Angeles est le rapport : $LA = \frac{m}{M} 100$

$M = 5000$ g la prise d'essai

$m = 5000 - m'$: c'est la masse des éléments inférieurs à 1,6 mm

Les résultats obtenus sont portés dans le tableau (III.18)

Tableau III.18. Mesure du coefficient Los Angeles des granulats.

| Nature du matériau | Classe granulaire | Poids (gr) | | | Coefficient : $LA = \frac{m}{M} 100$ |
|--------------------|-------------------|------------|---------------|-----------------------------|---|
| | | Initial | Final > 1,6mm | <1,6mm : $m = 5000 - m'$ | |
| 15/25 | 10 - 25 | 5000 | 3576 | 1424 | 28 |
| 8/15 | 10 - 14 | 5000 | 3568 | 1432 | 29 |
| 8/15 | 6,3 - 10 | 5000 | 3644 | 1356 | 27 |
| 3/8 | 4 - 6,3 | 5000 | 3100 | 1900 | 38 |

❖ **Interprétation des résultats**

Pour les trois classes du gravier testées la valeur du Los Angeles (LA) <40% d'après la norme (NF P 18-573), nous pouvons conclure que ces graviers peuvent être utilisés pour la confection du béton hydraulique.

III.13. Résistance à l'usure : essai micro-Deval (la norme NF P 18-572) [42,43]

La résistance à l'usure s'exprime par le coefficient micro-Deval M_{DE} .

Tel que : $M_{DE} = \frac{500 - m'}{500}$

Les résultats sont donnés dans le tableau (III.19)

Tableau III.19. Mesure du coefficient micro-Deval des granulats.

| Nature du matériaux | Classes granulaires | Charge abrasive (g) | Poids (g) | | | $M_{DE} = \frac{m}{M} 100$ |
|---------------------|---------------------|---------------------|-----------|--------|--------------------------|----------------------------|
| | | | Initial | Final | < 1,6 mm $m = M - m'$ | |
| 15 /25 | 10 – 14 | 5000 | 500 | 411,74 | 88,26 | 18 % |
| 8/15 | 6,3 – 10 | 4000 | 500 | 416,80 | 83,20 | 17 % |
| 3/8 | 4 – 6,3 | 2000 | 500 | 276,34 | 223,66 | 45 % |

❖ Interprétation des résultats

D'après nos résultats le coefficient $M_{DE} < 20$ pour 8/15 et 15/25 selon la norme (NF P 18-572) les granulats résistent bien à l'usure par contre le gravier 3/8 son $M_{DE} > 20$ donc résiste mal à l'usure.

III.14. Essais sur la pâte de ciment norme (EN 196-3)[42,43]

III.14.1. Essai de prise

Il est nécessaire de connaître le début et fin de prise des pâtes de ciment afin de pouvoir évaluer le temps disponible pour la mise en place correcte des mortiers et des bétons qui seront ensuite confectionnés.

$d = 4\text{mm} \pm 1\text{ mm}$ on dit que le début de prise est atteint.

Le « temps de fin de prise » est celui au bout duquel l'aiguille ne s'enfonce plus que de 0,5 mm.

Préparation de l'essai :

- Confectionner une gâchée de pâte de consistance normalisée soit 400 grammes de ciment et 25 à 35% d'eau.

Soit : $t_0 = 12\text{h } 10\text{ mn}$

Les résultats obtenus sont donnés par le tableau (III.20)

Tableau III.20. Mesure le temps de début et de fin de prise

| | |
|-------------------------|--|
| Temps de début de prise | $t_1 - t_0 = 14\text{ h } 35\text{ mn} - 12\text{ h } 10\text{ mn} = 2\text{ h } 25\text{ mn}$ |
| Temps de fin de prise | $t_2 - t_0 = 16\text{ h } 45\text{ mn} - 12\text{ h } 10\text{ mn} = 4\text{ h } 35\text{ mn}$ |

- ❖ **Interprétation des résultats** : Le début de prise se manifeste après 2h 25' donc le ciment utilisé est à prise lente.

III.14.2. Détermination de la stabilité «appareil le Chatelier» (EN 196-3) [42,43]

III.14.2.1. Objectif de l'essai

Il s'agit d'apprécier l'augmentation de volume que seraient susceptible de provoquer, au cours de la réaction d'hydratation, les oxydes de calcium ou de magnésium contenus dans le ciment.

La stabilité est caractérisée par la valeur **C-A** exprimée en mm à 0,5 mm près:

Stabilité = C – A qui doit être inférieur à 1 mm d'après la norme.

III.14.2.2. Préparation de l'échantillon

Soit on prend :

Masse : $m = 200$ gr, avec $\frac{E}{C} = 0,25 \Rightarrow E = 50$ grs

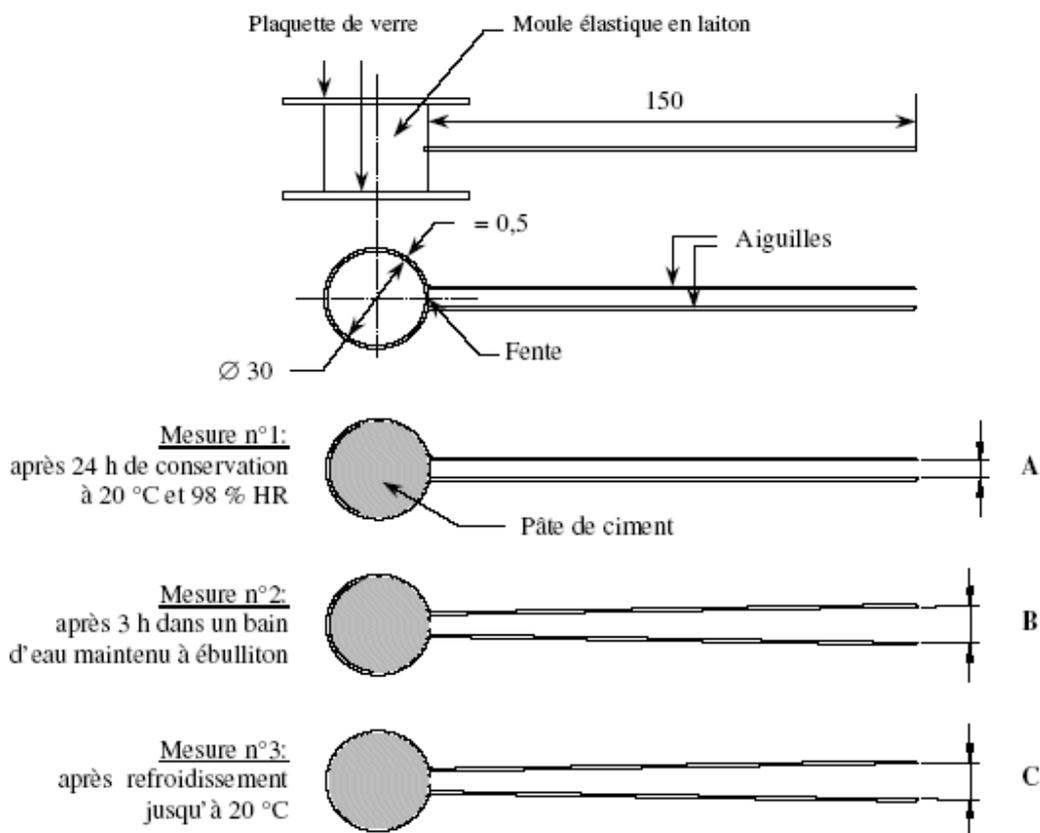


Figure.III.2. Essai de stabilité avec l'appareil le Chatelier.

III.14.2.3. Expression des résultats

Les résultats obtenus sont donnés dans le tableau (III.21)

Tableau III.21. Détermination de la stabilité par le Chatelier.

| N° du moule | Ecartement A (mm) | Ecartement B (mm) | Ecartement C (mm) | Stabilité = C – A (mm) |
|--------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|
| 1 | 4,00 | 5,00 | 5,00 | 1,00 |
| 2 | 3,00 | 3,00 | 3,00 | 0,00 |
| 3 | 4,00 | 4,00 | 4,00 | 0,00 |

St_{moyenne} = 0,33 mm < 1 mm donc d'après la norme le ciment utilisé n'est pas gonflant.

CHAPITRE IV

ETUDE DE LA FORMULATION

IV.1. Formulation du béton selon la méthode de Dreux-Gorisse

Cette méthode a l'avantage d'être issue de nombreuses formulations ayant été testées sur chantier, et ayant donné satisfaction.

Elle est d'autre part plus rapide et très simple d'utilisation ; puisqu'elle ne demande que de connaître les courbes granulométriques des granulats utilisés.

Nous allons établir toutes les courbes granulométriques sur un graphique du type normalisé AFNOR, qui comporte en abscisse une graduation logarithmique, ce qui présente l'avantage d'une graduation équidistante en module successifs ; outre l'intérêt que présente l'utilisation d'un graphique normalisé, cette échelle linéaire en module a l'avantage de la simplicité d'établissement.

IV.1.1. Détermination de la composition du béton

Sur le graphique semi-logarithmique, on trace les courbes granulométriques des granulats 0/3, 3/8, 8/15 et 15/25.

IV.1.2. Tracé de la courbe granulaire de référence

La composition granulométrique optimale est représentée par une ligne brisée OAB, cette courbe nous permet de déterminer les différents pourcentages (%) des granulats entrants dans la composition du béton.

Coordonnées des points O, A et B

- **Le point O** :

- abscisse : 0,08
- ordonnée : 0 %

- **Le point B** :

A l'ordonnée 100 % correspond à la dimension maximale D plus gros granulat.

- abscisse : 25 mm
- ordonnée : 100 %

- **Le point A** : (point de brisure), à les coordonnées suivant :

- **En abscisse** :

Si $D \leq 20$ mm ; l'abscisse est $D/2$

Si $D > 20$ mm ; l'abscisse est situé au milieu de segment délimité par D et par le tamis de maille 5 mm.

Dans notre cas on a $D > 20$ mm ($D = 25$ mm).

Alors l'abscisse du point A est situé au milieu de segment délimité par D et par le tamis de maille 5 mm.

- En ordonnée :

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

Avec :

K est un terme correcteur qui dépend du dosage en ciment, de l'efficacité du serrage, de la forme des granulats, et également du module de finesse.

Les valeurs de K sont indiquées dans le tableau (II.10)

Dans notre cas :

- dosage en ciment 400Kg/m³
- Vibration normale
- Granulats concassés.

D'où : $K = 0$

$K_p = 0$

$K_s = (6 \times 3,01) - 15 = 3,06$

Donc :

$$Y = 50 - \sqrt{25} + 3,06 = 48,06 \%$$

La courbe granulaire de référence est tracée sur le même graphique que les courbes granulométriques des granulats voir figure (IV.1).

Pour savoir les proportions des gravillons et de sable on trace, alors les lignes de partages entre chacun des granulats, en joignant le point de 95 % de la courbe granulaire du premier, au point de 5 % de la courbe granulaire suivante et ainsi de suite.

On lira sur la courbe de référence, au point de croisement avec les ligne de partage, le pourcentage de chacun des granulats utilisés 0/3, 8/15 et 15/25 qui sont respectivement : 35% , 10% , 20% et 35%.

IV.1.3. Tracé de la courbe représentative du mélange des granulats

Les valeurs des tamisât (%) de la courbe de mélange ,sont calculées a partir des analyses granulométriques des granulats et des pourcentage de ces dernier obtenus a partir de la courbe de référence, ces valeurs sont représentées sur le tableau (IV.1) :

Tableau IV.1 : Résultats de la courbe de référence selon Dreux- Gorisse

| Tamis (mm) | Tamisât (%) S (0/3) | Tamisât (%) G ₁ (3/8) | Tamisât (%) G ₂ (8/15) | Tamisât (%) G ₃ (15/25) | Tamisât (%) 0,1G ₁ + 0,2G ₂ + 0,35G ₃ + 0,35S |
|------------|------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|--|
| 0.08 | 11 | 0 | 0 | 0 | 4 |
| 0.16 | 17 | 0 | 0 | 0 | 6 |
| 0.315 | 23 | 0 | 0 | 0 | 8 |
| 0.63 | 35 | 0 | 0 | 0 | 12 |
| 1.25 | 50 | 02 | 0 | 0 | 18 |
| 2.5 | 75 | 03 | 0 | 0 | 27 |
| 05 | 99 | 48 | 02 | 0 | 40 |
| 6.3 | 100 | 66 | 03 | 05 | 44 |
| 08 | 100 | 99 | 15 | 05 | 50 |
| 10 | 100 | 100 | 36 | 06 | 54 |
| 12.5 | 100 | 100 | 65 | 06 | 60 |
| 16 | 100 | 100 | 98 | 17 | 71 |
| 20 | 100 | 100 | 100 | 73 | 91 |
| 25 | 100 | 100 | 100 | 99 | 100 |

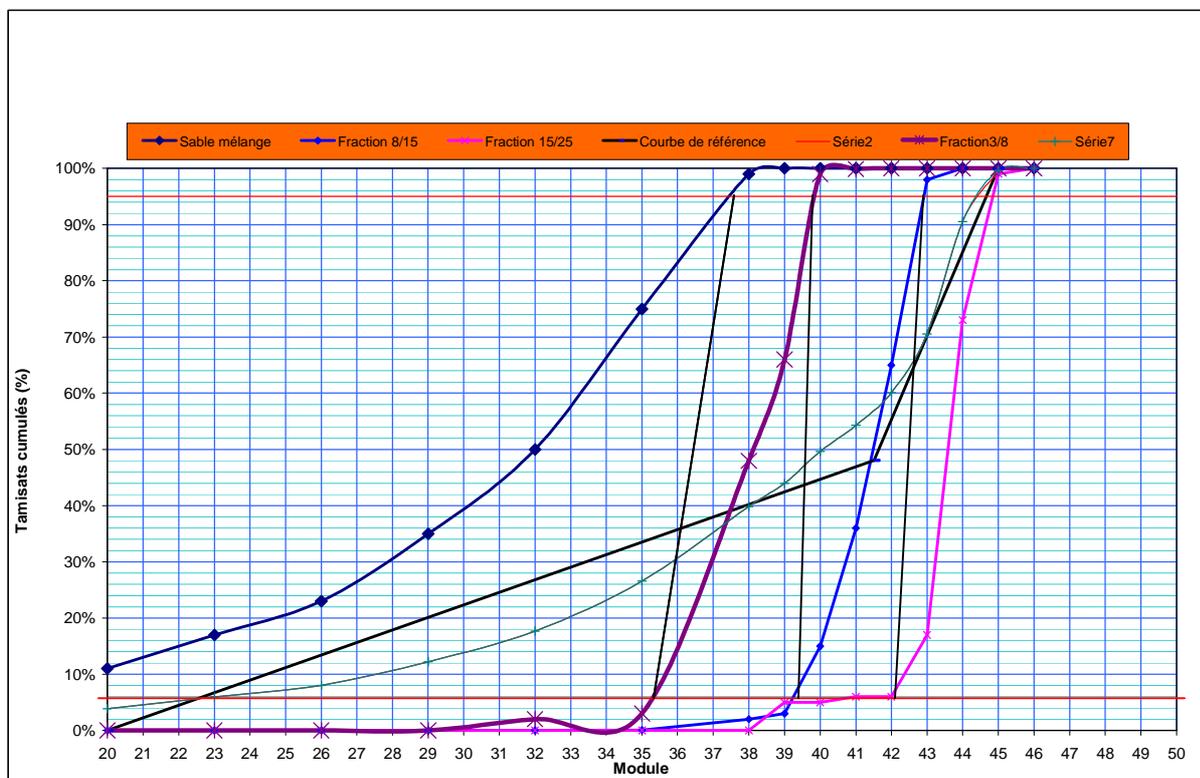


Figure IV.1 : Composition de béton selon Dreux Gorisse

Remarque : D'après le graphe on remarque que la courbe de mélange granulaire s'approche de la courbe de référence (voir la figure IV.1) ce qui implique une bonne granulométrie du mélange.

- **Dosage en ciment :**

On a un dosage en ciment $C = 400 \text{ Kg/m}^3$ or le dosage en ciment le plus couramment utilisé le béton de bon qualité est de 350 Kg/m^3 .

- **Dosage en eau :**

On a un dosage en ciment de l'ordre 400 Kg/m^3 et le rapport $\frac{E}{C}$ est fixé à 0,5 donc on peut déterminer directement la quantité d'eau à utiliser dans un mètre cube de béton.

Alors, on a :

$$\frac{E}{C} = 0,5 \quad C = 400 \text{ Kg/m}^3 \Rightarrow E = 0,5C = 200 \text{ kg/m}^3$$

- **Dosage des granulats :**

On calcul le coefficient de la compacité il est donné par la formule suivante :

$$\gamma = \frac{V_m}{1000}$$

Avec : $V_m = V_c + V_s + V_g$ (le volume absolu des matières solides)

Les valeurs du coefficient de compacité γ sont données par le tableau (II.11)

On a une consistance plastique, vibration normale et d'après le tableau (II.11) on trouve

Pour $D = 31,5\text{mm} \longrightarrow \gamma = 0,830$

Pour $D = 20 \text{ mm} \longrightarrow \gamma = 0,825$

On calcul γ pour $D = 25 \text{ mm}$ soit $\gamma = \frac{0,830 + 0,825}{2} = 0,827$

Mais cette valeur sera corrigée pour les granulats concassés par une valeur de (-0.03)

Soit $\gamma_{corr} = 0,827 - 0,03 = 0,797$

IV.1.4. Calcul les volumes absolus des matières solides

On a :

- le volume total absolu $V_m = 1000 \times \gamma = 1000 \times 0,797 = 797$ litres.

- le volume absolu du ciment $V_c = \frac{C}{\rho_c} = \frac{400}{3,1} = 129$ litres (3,1 masses volumiques des grains

de ciment, valeur moyenne habituellement admises).

Donc le volume absolu des granulats utilisés est : $797 - 129 = 668$ litres.

On calcul les volumes absolus des constituants sont les suivants :

- volume absolu du sable 0/3 $\longrightarrow 668 \times 0,35 = 233,80$ litres
- volume absolu du gravier 3/8 $\longrightarrow 668 \times 0,10 = 66,80$ litres
- volume absolu du gravier 8/15 $\longrightarrow 668 \times 0,20 = 133,60$ litres
- volume absolu du gravier 15/25 $\longrightarrow 668 \times 0,35 = 233,80$ litres
- volume absolu du ciment $\longrightarrow 129$ litres.

Total = 797 litres.

IV.1.5. Calcul des dosages des granulats et de ciment en (Kg/m³)

Pour trouver les Quantités des granulats et de ciment en (Kg/m³) il suffit de multiplier le volume absolu de chacun des granulats par sa masse volumique absolue (ρ_s).

- Sable 0/3233,80 $\times 2,64 = 617$ Kg/m³
- Gravier 3/8.....66,80 $\times 2,65 = 177$ Kg/m³
- Gravier 8/15.....133,60 $\times 2,67 = 357$ Kg/m³
- Gravier 15/25.....233,80 $\times 2,64 = 617$ Kg/m³
- Ciment129 $\times 3,1 = 400$ Kg/m³
- L'eau.....200 $\times 1,00 = 200$ Kg/m³

- La densité théorique du béton frais est égale à : $\Delta_0 = 2368$ Kg/m³

IV.1.6. Calcul des dosages des granulats en (litres/m³)

Les dosages des granulats en (litres/m³) sont obtenus en divisant les dosages des granulats en (Kg/m³) par leurs masses volumiques apparentes (ρ_{app}) on obtient :

- Sable 0/3617,23 / 1,46 = 423 litres/m³
- Gravier 3/8..... 177,02 / 1,34 = 132 litres/m³
- Gravier 8/15.....356,71 / 1,41 = 253 litres/m³
- Gravier 15/25.....617,23 / 1,40 = 441 litres/m³

On récapitule les résultats trouvés dans un tableau (IV.2) :

Tableau IV.2. Récapitulation de la composition du béton par la méthode de Dreux

| Constituants | % des granulats | ρ_s (g/cm ³) | ρ_{app} (g/cm ³) | V _{absolu} des Constituants (litres) | Dosage des constituants (Kg/m ³) | Dosage des constituants (litres/m ³) |
|---------------|-----------------|----------------------------------|--------------------------------------|---|--|--|
| Gravier 15/25 | 35 | 2,64 | 1,40 | 234 | 617 | 441 |
| Gravier 8/15 | 20 | 2,67 | 1,41 | 134 | 357 | 253 |
| Gravier 3/8 | 10 | 2,65 | 1,34 | 67 | 177 | 132 |
| Sable 0/3 | 35 | 2,65 | 1,46 | 234 | 617 | 423 |
| Ciment | - | 3,10 | - | 129 | 400 | - |
| Eau | - | 1,00 | 1,00 | 200 | 200 | 200 |

IV.2. Formulation du béton selon la méthode de Faury

On les coordonnées suivantes pour tracer la courbe de référence :

$$Y = A + 17 \cdot \sqrt[5]{D} + \frac{B}{\frac{R}{1,25D} - 0,75}$$

Ave:

A = 32 d'après le tableau (II.3) (Consistance plastique)

B = 1,5 dans les cas courants

| / | Tamis (D) | $\sqrt[5]{D}$ | (%) |
|---------------------|-----------|---------------|--------|
| Ciment | 0,0065 | 3,7 | -1,33 |
| D _{max} /2 | 12,5 | 16,6 | 64,4 |
| D _{max} | 25,0 | 19,0 | 100,00 |

Alors,

- L'origine : O (0,0065 ; 1,33%)

- Le point : A (12,5 ; 64,4%)

- Le point : B (25 ; 100%)

IV.2. 1. Détermination de D_{max}

$$D_{\max} = 25,0$$

$$D_{\max}/2 = 12,5$$

$$\sqrt[5]{D_{\max}} = 1,904$$

IV.2.2. Détermination de quantité d'eau « I » selon Faury

D'après Faury la quantité d'eau **I** est donnée par la formule suivante :

$$I = \frac{K}{\sqrt[5]{D_{\max}}} = \frac{0,317}{1,904} = 0,166 ; \text{ Avec } K = 0,317 \text{ d'après le tableau (II.4)}$$

Dons notre étude on a fixé le rapport E/C = 0,5 avec un dosage en ciment = 400 Kg/m³

D'où la quantité d'eau **I = 200 litres.**

IV.2. 3. Détermination de la masse sèche (en litres)

La masse sèche en litre est égale : 1000 – 200 = 800 litres

IV.2.4. Détermination de la masse volumique apparente du ciment

Après avoir tracé les courbes granulométriques, la courbe de référence et de tracer les verticales parallèles à l'axe des ordonnées qui sont placées à l'abscisse d_0 telle que, pour cette dimension de tamis, le pourcentage de tamisât du gros élément soit égal au pourcentage de refus du petit : (ab = cd) d'après la méthode de Joisel (2^{ème} cas superposition partielle des deux courbes) voir figure (IV.2). Cette verticale coupe la courbe optimale en un point M, qui, reporté en N sur l'échelle des pourcentages, détermine 2 segments :

- \overline{ON} est le pourcentage du granulat (d_1d_2), (Ciment + Sable)
- $\overline{N.100}$ est le pourcentage du granulat ($d_3 d_4$), (Gravillon + gravier).

On a la masse volumique du ciment égale 3,1 donc la quantité de ciment est

$$\frac{C}{3,1} = \frac{400}{3,1} = 129 \text{ litres soit } C = \frac{129}{800} \times 100 = 16\%.$$

IV.2.5. Détermination de pourcentage (sable + gravier)

On a % (S + G) = 100 – 16 = 84%

IV.2.6. Calcul les volumes absolus des constituants

D'après la courbe granulométrique du mélange on a les pourcentages suivants des composants

- Ciment C = 16% ; % (C+S) = 50% $\Rightarrow S = (50 - 16) = 34\%$, Gravier (3/8) = (56-50) = 6%

Gravier (8/15) = (72-56) = 16%, Gravier (15/25) = (100-72) = 28%.

- volume absolu du sable 0/3 $\longrightarrow 800 \times 0,34 = 272$ litres

- volume absolu du gravier 3/8 $\longrightarrow 800 \times 0,06 = 48$ litres

- volume absolu du gravier 8/15 $\longrightarrow 800 \times 0,16 = 128$ litres

- volume absolu du gravier 15/25 $\longrightarrow 800 \times 0,28 = 224$ litres

- volume absolu du ciment $\longrightarrow 129$ litres.

- Volume absolu de l'eau $\longrightarrow 200$ litres

Total = 1000 litres

V.2.7. Calcul des dosages des granulats et de ciment en (Kg/m³)

Pour trouver les Quantités des granulats et de ciment en (Kg/m³) il suffit de multiplier le volume absolu de chacun des granulats par sa masse volumique absolue (ρ_s).

- Sable 0/3272 × 2,64 = 718 Kg/m³
- Gravier 3/8.....48 × 2,65 = 127 Kg/m³
- Gravier 8/15.....128 × 2,67 = 342 Kg/m³
- Gravier 15/25.....224 × 2,64 = 591 Kg/m³
- Ciment129 × 3,1 = 400 Kg/m³
- L'eau.....200 × 1,00 = 200 Kg/m³

- La densité théorique du béton frais est égale à :

$$\Delta_0 = 2378 \text{ Kg/m}^3$$

IV.2.8. Calcul des dosages des granulats en (litres/m³)

Les dosages des granulats en (litres/m³) sont obtenus en divisant les dosages des granulats en (Kg/m³) par leurs masses volumiques apparentes (ρ_{app}) on obtient :

- Sable 0/3718 / 1,46 = 492 litres/m³
- Gravier 3/8..... 127 / 1,34 = 95 litres/m³
- Gravier 8/15.....342 / 1,41 = 243 litres/m³
- Gravier 15/25.....591 / 1,40 = 422 litres/m³

On récapitule les résultats trouvés dans un tableau (IV.3) :

Tableau IV.3. Récapitulation de la composition du béton selon la méthode de Faury

| Constituants | % des granulats | ρ_s (g/cm ³) | ρ_{app} (g/cm ³) | V _{absolu} des Constituants (litres) | Dosage des constituants (Kg/m ³) | Dosage des constituants (litres/m ³) |
|----------------------|-----------------|----------------------------------|--------------------------------------|---|--|--|
| Gravier 15/25 | 28 | 2,64 | 1,40 | 224 | 591 | 422 |
| Gravier 8/15 | 16 | 2,67 | 1,41 | 128 | 342 | 243 |
| Gravier 3/8 | 06 | 2,65 | 1,34 | 48 | 127 | 95 |
| Sable 0/3 | 34 | 2,65 | 1,46 | 272 | 718 | 492 |
| Ciment | 16 | 3,10 | - | 129 | 400 | - |
| Eau | - | 1,00 | 1,00 | 200 | 200 | 200 |

Les résultats de la courbe de mélange sont donnés par le tableau (IV.4) :

Tableau IV.4. Les résultats de la courbe de mélange selon la méthode de Faury

| Echantillon | Sable 0/3 | Gravier 3/8 | Gravier 8/15 | Gravier 15/25 | Ciment | Mélange |
|--------------|---------------------|-------------|--------------|---------------|--------|---------|
| Tamis | Pourcentages | | | | | |
| 20 | 34,00 | 6,00 | 16,00 | 28,00 | 16,00 | 100,00 |
| 16 | 34,00 | 6,00 | 16,00 | 27,72 | 16,00 | 99,72 |
| 12,5 | 34,00 | 6,00 | 16,00 | 20,44 | 16,00 | 92,44 |
| 10 | 34,00 | 6,00 | 15,68 | 4,76 | 16,00 | 76,44 |
| 08 | 34,00 | 6,00 | 10,40 | 1,68 | 16,00 | 68,08 |
| 6,3 | 34,00 | 6,00 | 5,76 | 1,68 | 16,00 | 63,44 |
| 5,0 | 34,00 | 5,94 | 2,40 | 1,40 | 16,00 | 59,74 |
| 2,5 | 34,00 | 3,96 | 0,48 | 1,40 | 16,00 | 55,84 |
| 1,25 | 33,66 | 2,88 | 0,32 | 0,00 | 16,00 | 52,86 |
| 0,63 | 25,50 | 0,18 | 0,00 | 0,00 | 16,00 | 41,68 |
| 0,315 | 17,00 | 0,12 | 0,00 | 0,00 | 16,00 | 33,12 |
| 0,16 | 11,90 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 16,00 | 27,90 |
| 0,080 | 7,28 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 16,00 | 23,28 |

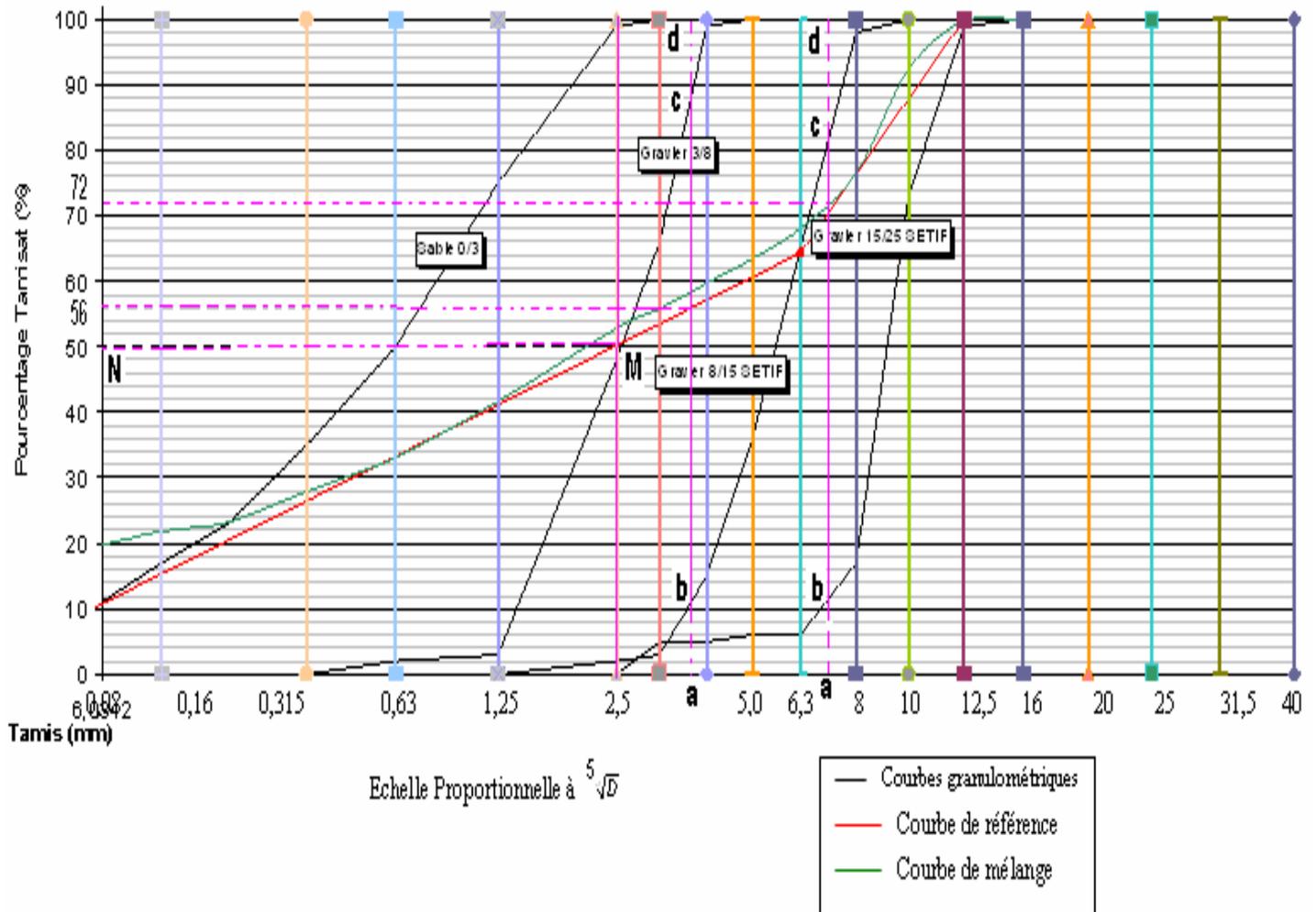


Figure IV.2 Composition de béton selon Faury

المخبر المركزي للأشغال العمومية
LABORATOIRE CENTRAL DES TRAVAUX PUBLICS

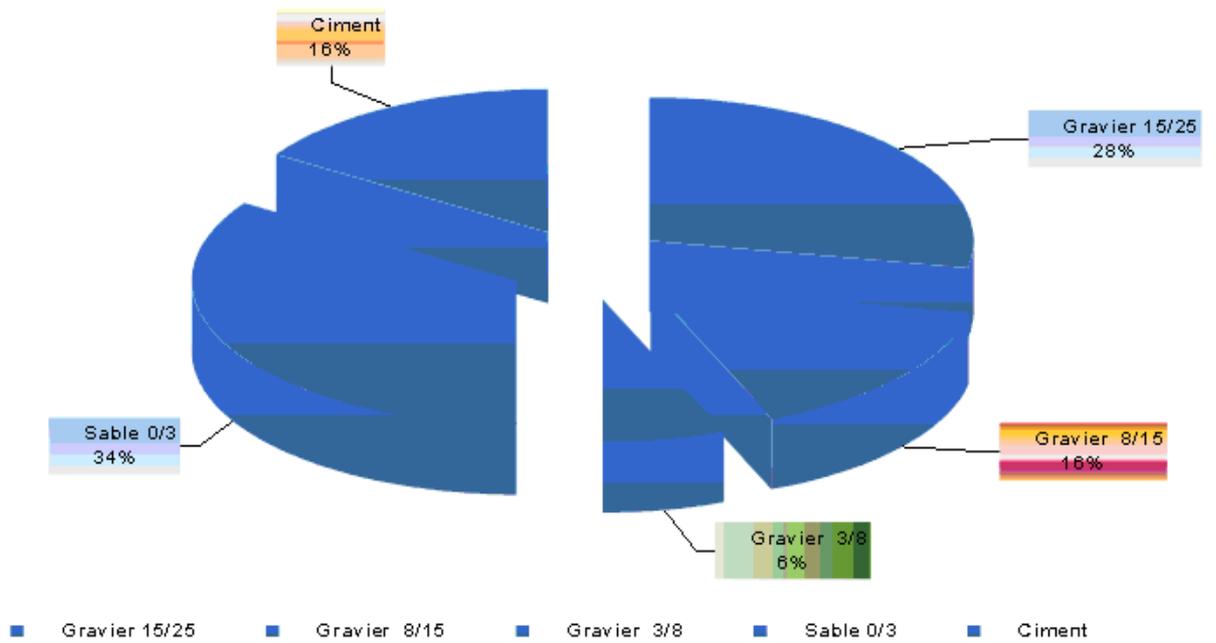


Figure IV.3. Pourcentage des différentes fractions granulaires dans la composition de béton

IV.3. Formulation du béton selon la méthode de Bolomey

IV.3.1. Processus d'étude

IV.3.1.1. Données

Ces données correspondent toujours des granulats secs

- courbes granulométriques des granulats voir la figure (IV.4)
- Masses volumiques absolues et apparentes des granulats et du ciment :

| | Masse volumique absolue | Masse volumique apparente |
|--------------|-------------------------|---------------------------|
| Ciment | 3,1 | 1,00 |
| Sable | 2,65 | 1,46 |
| Gravier 3/8 | 2,65 | 1,34 |
| Gravier 8/15 | 2,67 | 1,41 |

Provenance des granulats : concassés.

Nature du béton cherché : béton pour béton armé, normalement ferrailé.

Dosage en ciment : 400 Kg/m³ de béton en œuvre.

IV.3.1.2. Détermination de la courbe optimale [19]

- Le tableau (II.1) donne la valeur de A soit A = 13
- Détermination de D, avec D est évidemment comprise entre 16 et 20 mm pour l'obtenir, on peut prolonger l'avant dernier tronçon de la courbe du plus gros granulats le point trouvé était situé au-delà des 2/3 de l'intervalle 16-20 ou à droite de 20, c'est 20 qui serait la valeur retenue pour D.

IV.3.1.3. Détermination les pourcentages C, S, G1 et G2 des quatre constituants, qui permettent de faire un mélange sec dont la courbe granulométrique se rapproche autant que possible de la courbe optimale.

IV.3.1.3.1. Cas du ciment [19]

Nous cherchons :

$$C = \frac{\text{Masse du ciment}}{\text{Masse totale des éléments secs}} \times 100$$

Pour un mètre cube de béton :

- Masse du ciment : c'est le dosage, 400 Kg/m³
- Masse totale des éléments secs : elle ne peut être déterminée a priori. Il faut donc faire une hypothèse : en fin d'étude, les corrections utiles seront faites.
- L'expérience montre que, pour un mètre cube de béton, la masse totale des éléments secs est de l'ordre de 2200 Kg. Nous établirons les calculs sur cette base :

$$C\% = \frac{\text{Dosage}}{2200} \times 100 \quad (\text{hypothèse}).$$

$$\text{Dans notre étude : } C = \frac{400}{2200} \times 100 = 18,20 \%$$

IV.3.1.3.2. Cas des granulats [19]

Nous appliquerons la méthode graphique de Joisel

C'est une méthode universelle, applicable à toutes les courbes optimales, et tous mode de graduation des axes.

Considérons la figures (IV.4) deux granulats ($d_1 d_2$) et ($d_3 d_4$), que nous désirons mélanger pour respecter la courbe optimale C_{opt} .

La courbe ($d_1 d_2$) étant tracée, 3 cas seulement sont possibles :

1. d_3 coïncide avec d_2 : il y a juxtaposition des 2 granulats ;
2. d_3 est à gauche de d_2 : superposition partielle ;
3. d_3 est à droite de d_2 : discontinuité entre les deux granulats.

La méthode de Joisel repose sur le tracé d'une parallèle à l'axe des ordonnées ; prenons successivement chacun de 3 cas.

1^{er} cas : juxtaposition des deux granulats voir (figure IV.4)

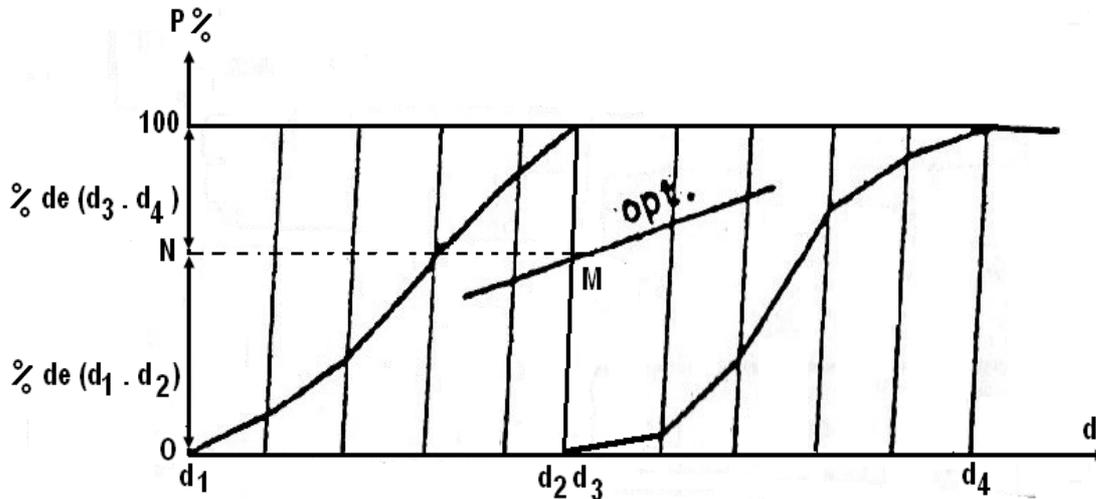


Figure IV.4. Juxtaposition des deux granulats [19]

La « verticale » est ici l'ordonnée correspondant à $d_2 d_3$.

Cette verticale coupe la courbe optimale en un point M , qui, reporté en N sur l'échelle des pourcentages, détermine 2 segments :

- \overline{ON} est le pourcentage du granulat ($d_1 d_2$),
- \overline{NM} est le pourcentage du granulat ($d_3 d_4$).

Précisons que \overline{ON} est, en fait, le pourcentage de l'ensemble des composants de dimension inférieure à d_2 ; par exemple ciment + sable. De même, $\overline{N.100}$ est le pourcentage de tout ce qui est plus gros que d_2 , par exemple gravillon + gravier.

2^{ème} cas : superposition partielle des deux courbes (voir figure IV.5)

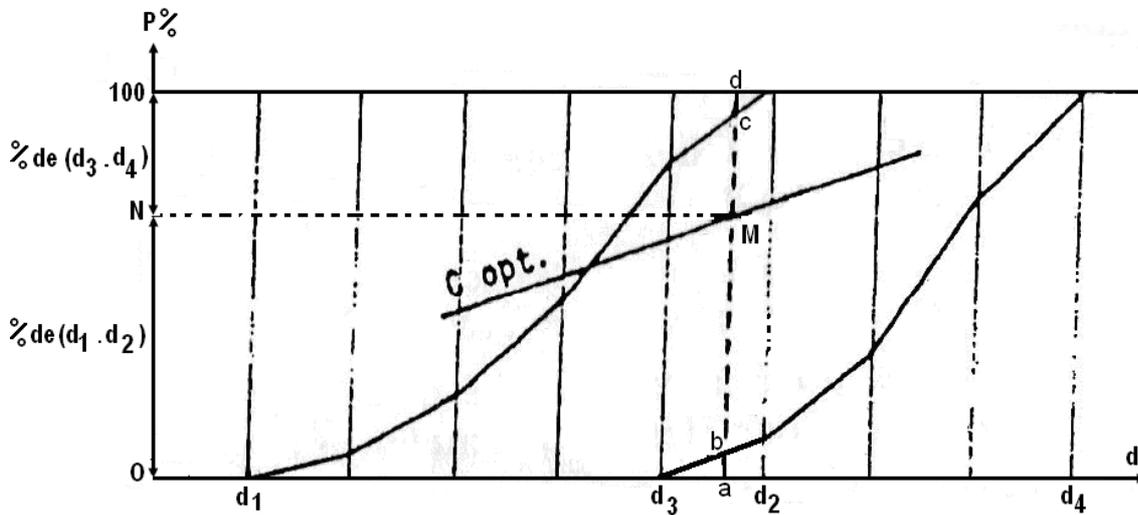


Figure IV.5. Superposition partielle des deux courbes [19]

La verticale est placée à l'abscisse d_0 telle que, pour cette dimension de tamis, le pourcentage de tamisât du gros élément soit égal au pourcentage de refus du petit : $ab = cd$. Les points M et N ont la même signification que dans le premier cas.

3^{ème} cas : discontinuité entre les deux courbes (voir figure IV.6)

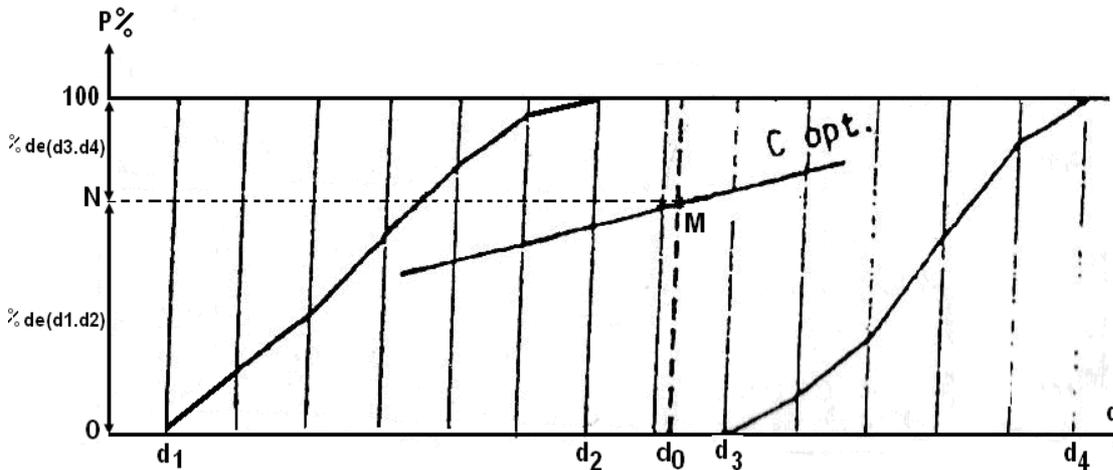


Figure IV.6. Discontinuité entre les deux courbes [19]

La verticale est au point d'abscisse $d_0 = \frac{d_2 + d_3}{2}$, et la construction est encore la même.

Notons que, à cause du mode de graduation de l'axe des abscisses, le point d_0 n'est pas au milieu du segment $d_2 d_3$: il est un peu à droite de ce milieu.

Dans notre étude figure (IV.4)

Nous sommes dans le 2^{ème} cas (superposition), et la verticale à été placée avec précision. On en tire :

$$S + C = 60 \%, G(3/8) = (72 - 60) = 12 \% \text{ et } G(8/15) = (100 - 72) = 28 \%$$

Comme on a déjà $C = 18,20 \%$ on en déduit $S = 41,8 \%$

Dans notre étude on peut dire, un mélange sec composé de :

18 % de ciment

42 % de sable

12 % de gravier 3/8

28 % de gravier 8/15

Soit un total de : 100 % (pourcentage en masse) et on doit avoir une courbe granulométrique voisine de la courbe optimale. Il faut, avant de poursuivre l'étude, nous assurer qu'il en est bien ainsi :

IV.3.1.4. Détermination de la courbe granulométrique du mélange sec envisagé, et la comparée à la courbe optimale [19]

Les pourcentages de tamisât seront déterminés par le calcul, sans qu'il soit nécessaire de faire une nouvelle analyse granulométrique.

Préparons, pour la commodité des calculs, un tableau comportant une colonne par tamis et une ligne par élément du mélange.

Indiquons dans la colonne correspondante les pourcentages ci-dessus, et calculons le tamisât de chaque élément à travers chaque tamis :

Tableau IV.5 : Résultats de la courbe de mélange selon Bolomey

| Echantillon | Sable 0/3 | Gravier 3/8 | Gravier 8/15 | Ciment | Mélange |
|-------------|--------------|-------------|--------------|--------|---------|
| Tamis | Pourcentages | | | | |
| 20 | 42,00 | 12,00 | 28,00 | 18,00 | 100,00 |
| 16 | 42,00 | 12,00 | 27,44 | 18,00 | 99,44 |
| 12,5 | 42,00 | 12,00 | 18,20 | 18,00 | 90,20 |
| 10 | 42,00 | 12,00 | 10,08 | 18,00 | 82,08 |
| 08 | 42,00 | 11,88 | 4,20 | 18,00 | 76,08 |
| 6,3 | 42,00 | 7,92 | 0,84 | 18,00 | 68,76 |
| 5,0 | 41,58 | 5,76 | 0,56 | 18,00 | 65,90 |
| 2,5 | 31,50 | 0,36 | 0,00 | 18,00 | 49,86 |
| 1,25 | 21,00 | 0,24 | 0,00 | 18,00 | 39,24 |
| 0,63 | 14,70 | 0,00 | 0,00 | 18,00 | 32,70 |
| 0,315 | 9,66 | 0,00 | 0,00 | 18,00 | 27,66 |
| 0,16 | 7,14 | 0,00 | 0,00 | 18,00 | 25,14 |
| 0,080 | 4,62 | 0,00 | 0,00 | 18,00 | 22,62 |

Comparaison à la courbe optimale : la courbe trouvée n'est pas une droite : elle doit rappeler la forme des courbes des granulats. Il y a donc des parties au-dessus de courbe optimale, et des parties au-dessous.

L'application correcte de la méthode de Joisel, la courbe trouvée doit passer sensiblement par le point d'intersection de la courbe optimale et de la verticale de Joisel. Dans notre étude le résultat peut être considéré comme satisfaisant.

Les pourcentages des constituants secs trouvés peuvent donc être retenus comme base des calculs ; et nous allons pouvoir :

IV.3.1.5. Détermination la composition d'un mètre cube de béton [19]

Cette composition devra indiquer la masse et le volume apparent de chacun des constituants d'un mètre cube de béton. Or, nous nous sommes occupés jusqu'à ici que des éléments secs ; et nous faut déterminer la quantité d'eau.

IV.3.1.5.1. Quantité d'eau dans un mètre cube de béton [19]

- Il n'existe pas de méthode rigoureuse pour cette détermination ; il nous faudra donc faire une deuxième hypothèse (la 1^{ère} était la masse totale des éléments secs contenus dans un mètre cube de béton).

- Q'un praticien expérimenté peut évaluer directement la quantité d'eau nécessaire, q'une détermination expérimentale est aléatoire, et que le calcul peut donner un ordre de grandeur acceptable.

Donc faisons ce calcul :

1° $D < 0,16 \text{ mm}$

- Ciment.....400Kg

- Sable (ligne « sable », colonne 0,16) qu'il y en a 7,14 % de 2200.....157Kg

Total à mouiller 557 Kg

Soit une quantité d'eau = $0,23 P = 0,23 \times 557 = 128 \text{ Kg}$.

2° $D > 0,16 \text{ mm}$

- $k = 0,10$; $d_1 = 0,16 \text{ mm}$; $d_2 = 20 \text{ mm}$ environ

- Poids total des éléments secs2200 Kg

Dont inférieurs à 0,16557 Kg

Reste supérieurs ou égaux à 0,16 mm.....1643Kg

- Donc : Eau = $\frac{0,10 \times 1643}{1,17 \cdot \sqrt[3]{0,16 \times 20}} = \dots\dots\dots 95 \text{ Kg}$

3° Soit au total.....223Kg d'eau,
pour un mètre cube de béton, valeur que nous retenons comme hypothèse de calcul.

IV.3.1.5.2. Pourcentage d'eau [19]

Il faut que la quantité d'eau soit exprimée, comme pour le ciment et les granulats, en pourcentage par rapport au total des éléments secs

- Nous pourrions calculer comme pour ciment :

$$E = \frac{223}{2200} \times 100 = 10,13\%$$

On peut calculer le rapport $C/E = 400/223 = 1,79$

Dans notre formulation on a fixé un rapport $E/C = 0,5$ pour toutes les méthodes donc soit la quantité d'eau égale à 200 litres on aura :

$$E = \frac{200}{2200} \times 100 \cong 9\%$$

IV.3.1.5.3. Composition d'un mètre cube de béton [19]

Nous connaissons :

- La composition de $(100 + E) \text{ Kg}$ de béton :

| | |
|------------|------|
| C = | 18 % |
| S = | 42 % |
| G (3/8) = | 12 % |
| G (8/15) = | 28 % |
| E = | 09 % |

Total = 109 Kg

- Le dosage imposé est 400 Kg de ciment par mètre cube de béton.

- Les masses volumiques absolues et apparentes des constituants.

Donc nous cherchons la composition d'un mètre cube de béton, pour cela il suffit de déterminer la masse totale d'un mètre cube et le pourcentage en masse de chacun des constituant, eau comprise.

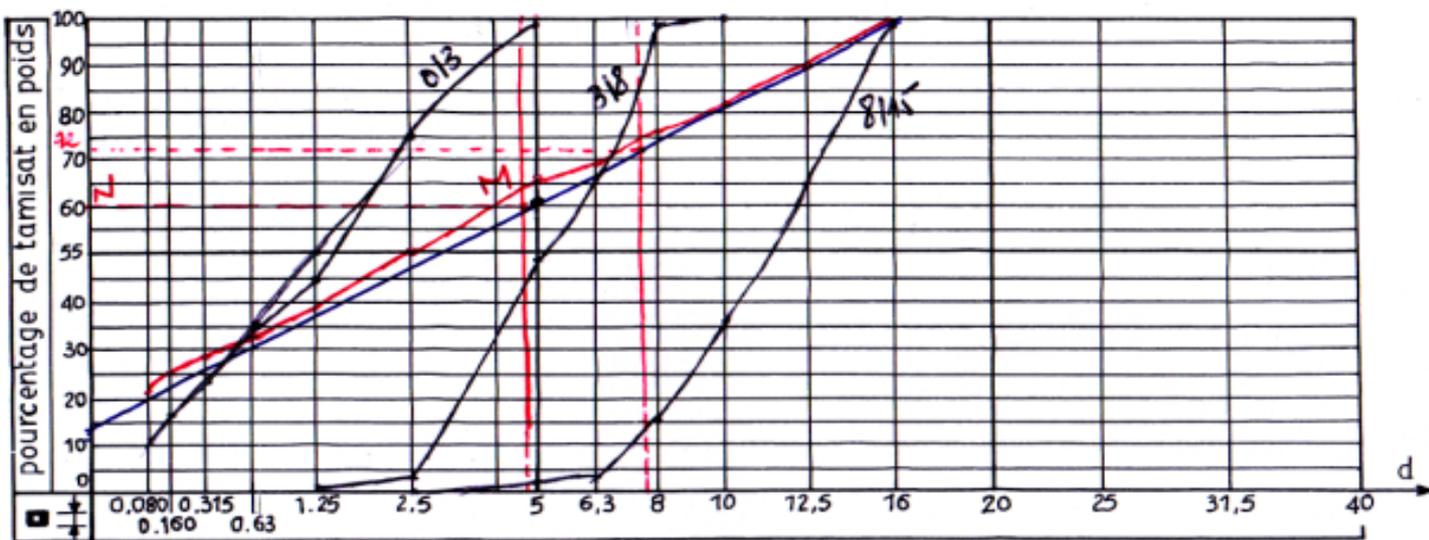
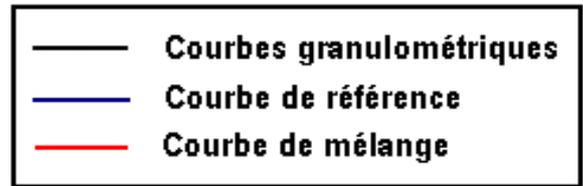
- 1- La masse totale d'un mètre cube de béton : c'est la masse volumique absolue du béton : on l'obtient en divisant les 109 Kg par le volume absolu occupé par cette quantité de béton.
- 2- Pourcentage en masse de chacun des composant : il suffit de multiplier la masse de chaque constituant par 100/109
- 3- Composition en masses : c'est la masse totale multipliée par les pourcentages calculés.
- 4- Composition en volumes apparents : diviser les masses par les masses volumiques apparentes.

Les résultats trouvés sont donnés par le tableau (IV.6)

Tableau IV.6. Résultats de la composition de béton selon Bolomey

| Composants | Poids en Kg | ρ_s (g/cm ³) | ρ_{app} (g/cm ³) | V _{absolu} des Constituants (dm ³) | Dosage des constituants (Kg/m ³) | Dosage des constituants (litres/m ³) | $\rho_{béton}$ |
|---------------------|-------------|-------------------------------|-----------------------------------|---|--|--|------------------------------|
| Gravier 8/15 | 28 | 2,67 | 1,41 | 10,48 | 613 | 435 | 2,387 T/m³ |
| Gravier 3/8 | 12 | 2,65 | 1,34 | 4,53 | 260 | 194 | |
| Sable 0/3 | 42 | 2,65 | 1,46 | 15,85 | 920 | 630 | |
| Ciment | 18 | 3,1 | 1,0 | 5,80 | 400 | 400 | |
| Eau | 09 | 1,0 | 1,0 | 9,0 | 200 | 200 | |
| Totaux | 109 | - | - | 45,66 | 2387 | - | - |

$(C+S)=60\%$; $C=18\%$ \rightarrow $S=42\%$
 $(G\ 3/8)=72-60=12\%$
 $(G\ 8/15)=100-72=28\%$



les abscisses sont proportionnelles aux racines carrées des dimensions des tamis

Figure IV.7 : Composition de béton selon Bolomey

CHAPITRE V
ETUDE EXPERIMENTALE ET INTERPRETATION
DES RESULTATS

V.1.Confection des bétons [18]

Le malaxage des bétons a été effectué à l'aide d'un malaxeur à cuve horizontale tournante d'une capacité de 80 litres. Le but recherché est de répartir, dans la masse, le plus régulièrement possible, chaque constituant afin de rendre le mélange homogène, et d'obtenir ainsi les mêmes propriétés, qu'une quantité identique prise en un endroit différent.

La vitesse du malaxeur combinée à l'action des couteaux et du rotor interne a permis une bonne dispersion du liant et une homogénéisation du mélange. La séquence d'introduction des différents matériaux dans le malaxeur est faite comme suit :

- On verse les gros éléments, sable, liant, et seront malaxés à sec pendant 1 minute, l'eau sera rajoutée et le malaxage sera poursuivi pendant 2 à 3 minutes.

- On commence les essais immédiatement.

La gâchée exécutée par le laboratoire pour des essais d'études doit qu'elle permette d'obtenir un volume de béton compacté excédant celui des éprouvettes d'au moins 25%.

Dans notre étude on réalise des bétons plastiques avec un affaissement voisin de 9 cm donc on ajoute progressivement la quantité d'eau qui nous permet d'avoir cet affaissement.

La quantité de la gâchée nécessaire pour confectionner 6 éprouvettes de dimension (16x32) cm² on procède de la manière suivante :

$$\text{On a le volume d'une éprouvette : } V = \pi \cdot \frac{D^2}{4} \cdot h = 3,14 \times \frac{16^2}{4} \times 32 \cong 6400 \text{ cm}^3$$

$$\text{Donc le volume de 6 éprouvettes} = 6 \times 6400 = 38400 \text{ cm}^3$$

$$\text{Soit le volume total } V_T = V_{6 \text{ éprouvettes}} + 25\% V_{6 \text{ éprouvettes}} = 38400 + (0,25 \times 38400) = 48000 \text{ cm}^3$$

2^{ème} manière

$$\text{On a le volume d'une éprouvette : } V = \pi \cdot \frac{D^2}{4} \cdot h = 3,14 \times \frac{16^2}{4} \times 32 \cong 6400 \text{ cm}^3$$

Pour l'essai au cône d'Abrams le volume est estimé au volume d'une éprouvette qui est égal à 6400 cm³.

Pour calcul le volume d'air occlus la capacité de l'aéromètre est estimée au volume d'une éprouvette qui est égal à 6400 cm³.

$$\text{Soit le volume total } V_T = 38400 + 6400 + 6400 = 51200 \text{ cm}^3$$

Soit $V_T \cong 0,05 \text{ m}^3$ donc l'essai de la gâchée est réalisé sur $\frac{1}{20}$ de mètre cube de béton.

Donc, pour une gâchée, les poids des composants nécessaires sont les suivants :

Tableau V.1. Les quantités des composants selon Dreux, Faury et Bolomey.

| Méthodes | Constituant (Kg) | | | | | |
|----------|------------------|-------------|--------------|---------------|--------|-------|
| | Sable 0/3 | Gravier 3/8 | Gravier 8/15 | Gravier 15/25 | Ciment | Eau |
| Dreux | 30,85 | 8,85 | 17,85 | 30,85 | 20,00 | 10,00 |
| Faury | 35,90 | 6,35 | 17,10 | 29,55 | 20,00 | 10,00 |
| Bolomey | 46,00 | 13,00 | 30,65 | - | 20,00 | 10,00 |

V.2. Essais effectués sur le béton frais [18]

Pour évaluer les propriétés et les qualités à l'état frais du béton, plusieurs types d'essais normalisés et non normalisés ont été proposés par les chercheurs, dont les principaux sont présentés ci-après.

V.2. 1. Essai d'affaissement au cône d'Abrams – Slump test (NF P 18-451)

C'est l'essai le plus couramment utilisé car il est très simple à mettre en œuvre. Il est utilisable tant que la dimension maximale des granulats ne dépasse pas 40 mm.

V.2. 1.1. Le principe

Il s'agit de constater l'affaissement d'un cône de béton sous l'effet de son propre poids. Plus cet affaissement sera grand et plus le béton sera réputé fluide.

Les résultats d'affaissement au cône d'Abrams sont représentés dans le tableau (V.2) :

Tableau V.2. Résultats d'affaissement au cône d'Abrams

| Méthodes de composition | Affaissement 'A' (cm) |
|-------------------------|-----------------------|
| Bolomey | 7,5 |
| Dreux-Gorisse | 9 |
| Faury | 8,5 |

❖ Interprétation de résultat

D'après la norme (NF P 18-451) l'affaissement ($5 \text{ cm} \leq A \leq 9 \text{ cm}$), donc le béton réalisé est un béton plastique.

V.2. 2. Contrôle du volume d'air entraîné (NF P 18-353) [18]

V.2. 2.1. Objet de l'essai

Il s'agit d'évaluer la quantité d'air occlus de manière à vérifier que le minimum prévu par la norme (NF P 18-305) en cas de gel est bien atteint.

V.2. 2.2. Principe de l'essai

On applique une pression donnée à un volume connu de béton. L'air occlus étant seul à diminuer de volume sous l'effet de cette pression, la loi de Mariotte d'en calculer le volume.

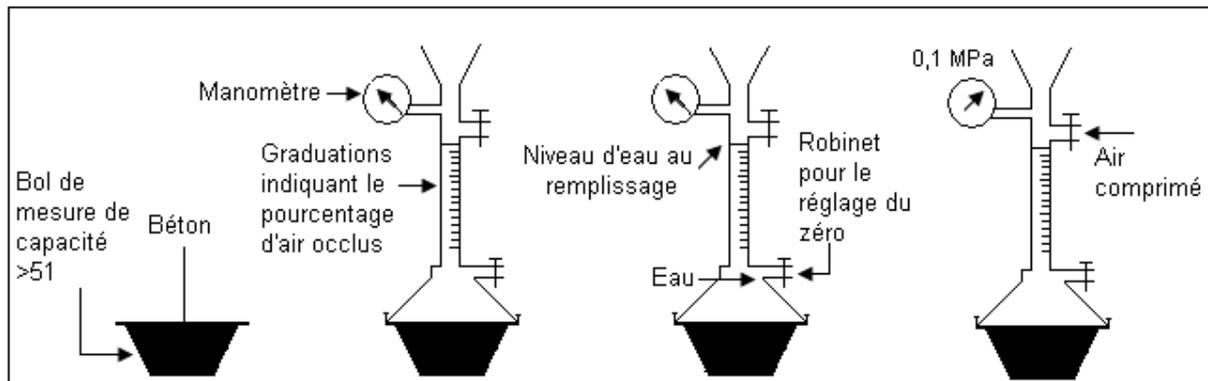


Figure V.1. Mesure de l'air occlus à l'aéromètre.

V.2. 2.5. Présentation des résultats

Les résultats obtenus des volumes d'air occlus de béton formulé par les trois méthodes sont donnés par le tableau (V.3) :

Tableau V.3. Volume d'air occlus dans le béton selon Bolomey, Dreux et Faury.

| Méthode | Volume moyen de l'air occlus (%) |
|---------|----------------------------------|
| Bolomey | 1,10 |
| Dreux | 1,48 |
| Faury | 1,30 |

Interprétation des résultats

Lors du mélange des bétons, il y a création des bulles d'air et mise en place du béton enferme toujours une certaine quantité d'air occlus. A travers les résultats obtenus, on constate que le volume d'air décroît en présence de fines car ces dernières remplissent les pores existant entre les grains, et augmente la capacité ainsi que la résistance des bétons.

On remarque que le volume d'air dans les bétons formés par Bolomey est plus faible que celui des bétons formés par Faury et Dreux et cela revient à la quantité des fines importantes utilisées par la méthode de Bolomey.

V.3. Prélèvement des échantillons [44]

Après avoir réalisé les essais sur le béton frais, on a procédé au prélèvement des échantillons de béton conformément à la norme (NA 424). Des moules cylindrique (éprouvettes), doivent être parfaitement nettoyés avec une application d'une pellicule d'huile minérale ou autre

substance possédant la faculté de faciliter le démoulage. Cette substance ne doit pas rentrer en réaction avec le ciment. Pour la mesure de la résistance en compression, on a utilisé trois éprouvettes de section (16 x 32) cm² pour des essais de compression à 3 jours, 7 jours, 21 jours, 28 jours, 3 mois et 6 mois.

Les moules ont été remplis en trois couches d'épaisseurs égales consolidées par une tige vibrante. Les éprouvettes sont conservées dans leurs moules durant une période de 24 heures environ à une température de 20°C ± 2°.

V.4. Mode de mûrissement [18]

Immédiatement après le démoulage effectué soigneusement, les éprouvettes sont conservées dans l'eau non courante ou dans une chambre à 95% d'humidité relative et à une température de 20°C ± 2°. Cette conservation est maintenue jusqu'au moment de l'essai.

V.5. Masse volumique fraîche [18]

La détermination de la masse volumique permet d'effectuer une correction éventuelle du mélange réalisé à partir pesées respectives des matériaux utilisés lors du malaxage.

Les résultats sont suffisamment précis pour calculer la quantité de béton produite par gâchée. Le test fournit des indications sur la teneur en air pourvu que les densités des ingrédients soient connues. Il faut prendre soin de consolider le béton convenablement, soit en le pilonnant ou en appliquant une vibration interne, et araser la surface avec un objet plat afin d'obtenir une surface lisse. La masse volumique s'exprime en kg/m³, soit le volume de béton produit par gâchée en mètre cube et la masse volumique fraîche d'une série de béton est la moyenne des six (06) éprouvettes.

- Les valeurs obtenues par les trois méthodes de formulation sont données par le tableau (V.4) et schématisées par la figure (V.2)

Tableau V.4. Evaluation de la masse moyenne des bétons par Bolomey, Dreux et Faury en fonction du temps

| Méthodes | Masses en (grs) | | | | | |
|----------------|-----------------|---------|---------|---------|----------|----------|
| | 0 h | 1 jours | 3 jours | 7 jours | 21 jours | 28 jours |
| Bolomey | 15489 | 15240 | 15153 | 15350 | 15432 | 15533 |
| Dreux | 15935 | 15682 | 15578 | 15800 | 15953 | 15980 |
| Faury | 15765 | 15620 | 15488 | 15692 | 15720 | 15770 |

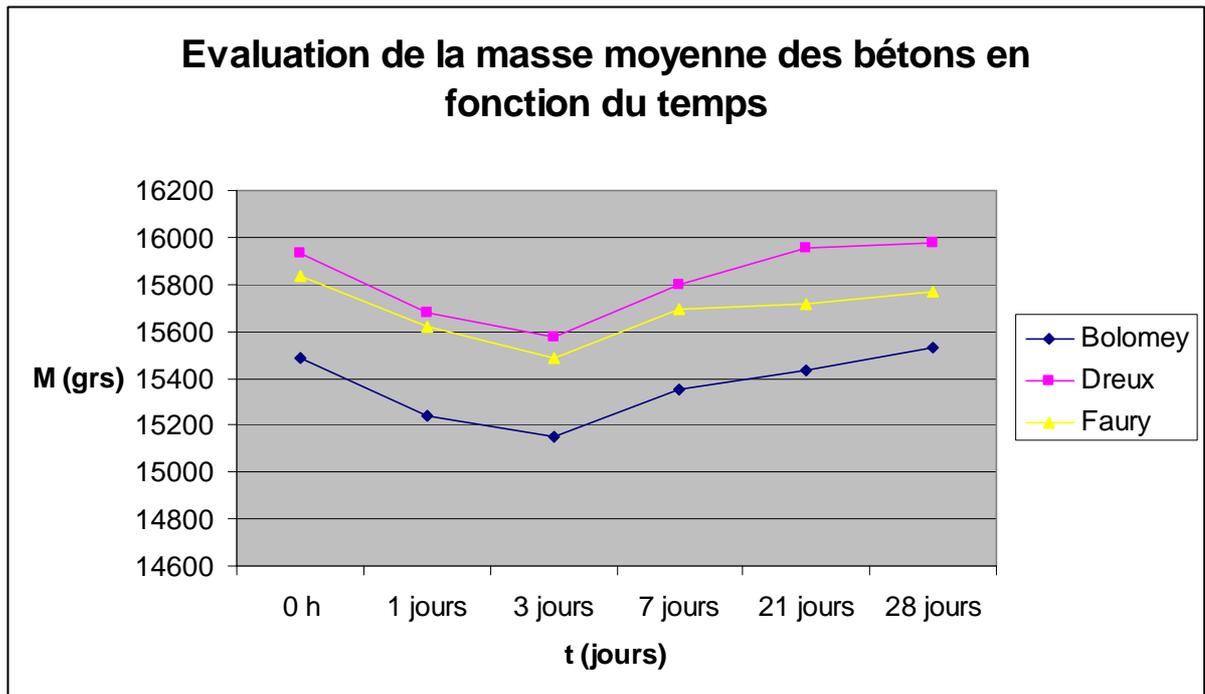


Figure V.2. Evaluation de la masse moyenne des bétons en fonction du temps

V.6. Essais réalisés sur le béton durci

V.6.1. Masse volumique

Après avoir retiré les éprouvettes de leur milieu de conservation (eau ou chambre humide), il convient de les essayer et les dessécher avant de les peser.

La masse volumique du béton à différents âges 0 h, 3 jours, 7 jours, 21 jours et 28 jours par les trois méthodes de formulation sera obtenue par la division de la masse par le volume de

l'éprouvette. Avec le volume de l'éprouvette $V = \pi \cdot \frac{D^2}{4} h = 3,14 \times \frac{16^2}{4} \times 32 \cong 6400 \text{ cm}^3$

- Les valeurs des masses volumiques obtenues par les trois méthodes de formulation sont données par le tableau (V.5) et schématisées sur la figure (V.3)

Tableau V.5. Evaluation de la masse volumique moyenne des bétons selon Bolomey, Dreux et Faury en fonction du temps

| Méthodes | Masses volumiques en (g/cm ³) | | | | | |
|----------|---|---------|---------|---------|----------|----------|
| | 0 h | 1 jours | 3 jours | 7 jours | 21 jours | 28 jours |
| Bolomey | 2,40 | 2,36 | 2,35 | 2,38 | 2,40 | 2,41 |
| Dreux | 2,47 | 2,43 | 2,42 | 2,45 | 2,48 | 2,48 |
| Faury | 2,45 | 2,43 | 2,41 | 2,44 | 2,45 | 2,46 |

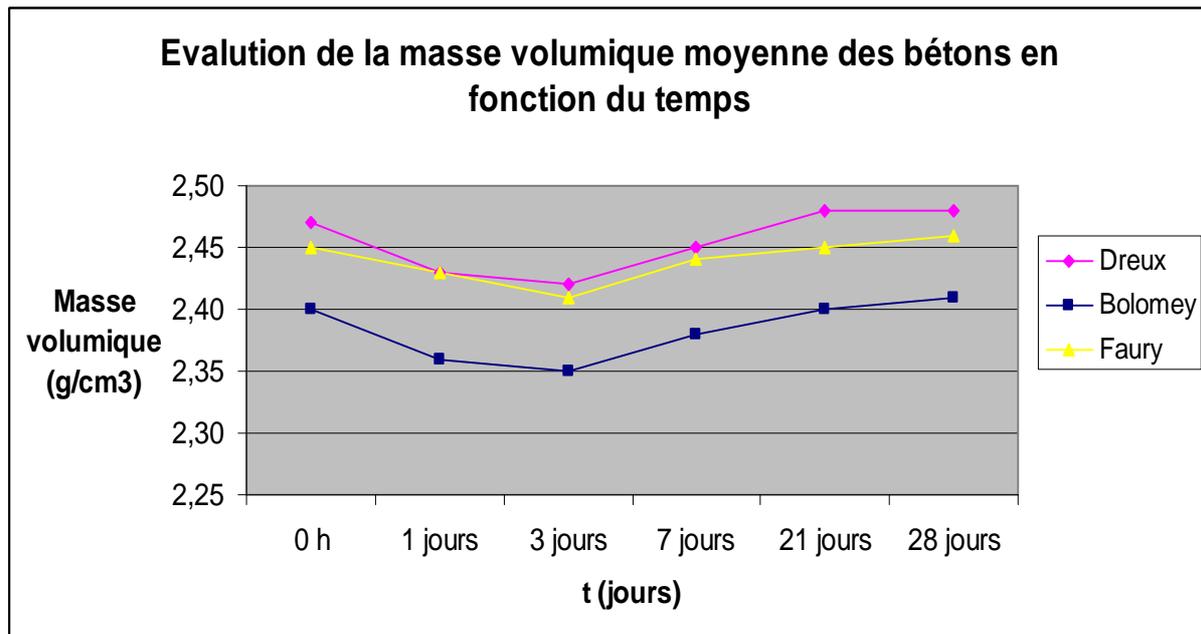


Figure V.3. Evaluation de la masse volumique moyenne des bétons en fonction du temps

🔧 Interprétation des résultats :

A partir des courbes tracées, nous remarquons que, les masses volumiques des bétons augmentent en fonction du temps, telles que ; entre 0h et 72h, nous constatons une chute de masse, et cela revient à l'exposition des bétons à l'air ambiant, ce qui dit le séchage du béton et l'évaporation de l'eau.

A partir de 72h, on observe une augmentation des masses volumiques des bétons, qui s'explique par l'hydratation continue des grains de ciment, sachant que les éprouvettes de bétons ont été conservées dans l'eau.

Bolomey présente une masse volumique toujours inférieure à celle de Dreux et Faury. Ceci s'explique par le fait que la méthode de Bolomey donne un taux élevé en sable (particules fines importantes). Ces fines dans le béton occupent les pores et empêchent l'absorption d'eau lorsque les éprouvettes sont plongées dans l'eau.

Nous constatons qu'à partir de 21 jours la masse reste presque constante pour tous les bétons (se stabilise), donc pas d'absorption de l'eau.

L'hydratation qui est de plus en plus lente n'est jamais entièrement achevée, une petite partie de ciment reste non hydratée.

V.6.2. Calcul de la masse volumique sèche [45,46]

V.6.2.1. Calcul de la masse volumique sèche théoriquement

La formule qui nous permet de calculer théoriquement la masse volumique sèche est la suivante :

$$\rho_{\text{sèche théorique}} = 1,25 C + G'$$

Avec :

C : La quantité de ciment en Kg/m³

G' : La masse des granulats sec en Kg/m³

1,25 : est un facteur composé de 100% de la teneur en ciment + 25% de la masse du ciment qu'est liée chimiquement à l'eau.

a) Béton selon Bolomey

La masse des granulats sec G' continue dans un mètre cube de béton donnée par Bolomey est

G' = 1793 Kg/m³, C = 400 Kg/m³ alors,

$$\rho_{\text{sèche théorique}} = (1,25 \times 400) + 1793 = 2293 \text{ Kg} / \text{m}^3 \quad \text{Soit : } 2,29 \text{ g/cm}^3$$

b) Béton selon Dreux- Gorisse

$$\left. \begin{array}{l} G' = 1768 \text{ Kg} / \text{m}^3 \\ C = 400 \text{ Kg} / \text{m}^3 \end{array} \right\} \rho_{\text{sèche théorique}} = 2268 \text{ Kg} / \text{m}^3 \quad \text{Soit : } 2,27 \text{ g/cm}^3$$

c) Béton selon Faury

$$\left. \begin{array}{l} G' = 1778 \text{ Kg} / \text{m}^3 \\ C = 400 \text{ Kg} / \text{m}^3 \end{array} \right\} \rho_{\text{sèche théorique}} = 2278 \text{ Kg} / \text{m}^3 \quad \text{Soit : } 2,28 \text{ g/cm}^3$$

V.6.2.2. Calcul de la masse volumique sèche à 28 jours

Pour calculer la masse volumique sèche du béton à 28 jours on doit suivre les étapes suivantes :

- Après l'écrasement des éprouvettes, un échantillon de béton est immédiatement récupéré.
- Ensuite on prend le poids de l'échantillon
- On étuve l'échantillon à 105 C° pendant 24h.
- Après séchage, et refroidissement on prend le poids de l'échantillon.
- Connaissons la masse d'une éprouvette à 28 jours, son volume (V= 6400 cm³) ainsi que les masses avant et après étuvage, par la méthode des trois on déduit la masse de l'éprouvette 'M' à l'état sec.

- En fin on calcul de la masse volumique sèche tel que : $\rho_{\text{sèche}} = \frac{M}{6400} \text{ (g/cm}^3\text{)}$

a) Béton selon Bolomey

- La masse moyenne des éprouvettes à 28 jours est égale à 15533 grs, le poids de l'échantillon récupéré après écrasement est égal à 1138 grs et la masse de l'échantillon après étuvage est égale à 1067 grs.

Par la méthode des trois on calcul la masse sèche M de l'éprouvette de la façon suivante :

$$\begin{array}{ccc} 1138 \text{ g} & \longrightarrow & 1067 \text{ g} \\ 15533 \text{ g} & \longrightarrow & M \end{array}$$

$$\text{D'ou : } M = 14564 \text{ g} \Rightarrow \rho_{\text{Sèche calculée}} = 2,27 \text{ g/cm}^3$$

b) Béton selon Dreux- Gorisse

$$\begin{array}{ccc} 1230,5 \text{ g} & \longrightarrow & 1115,57 \text{ g} \\ 15980 \text{ g} & \longrightarrow & M \end{array}$$

$$\text{D'ou: } M = 14487,45 \text{ g} \Rightarrow \rho_{\text{Sèche calculée}} = 2,25 \text{ g/cm}^3$$

c) Béton selon Faury

$$\begin{array}{ccc} 5546 \text{ g} & \longrightarrow & 5200 \text{ g} \\ 15765 \text{ g} & \longrightarrow & M \end{array}$$

$$\text{D'ou: } M = 14781,46 \text{ g} \Rightarrow \rho_{\text{Sèche calculée}} = 2,30 \text{ g/cm}^3$$

**Interprétation des résultats**

D'après les résultats trouvés on peut constater que les masses volumiques calculées à 28 jours sont presque les mêmes à celles calculées théoriquement ; ce qui nous renseigne sur l'homogénéité du béton.

La masse volumique sèche de Bolomey est légèrement supérieure à celle de Faury et Dreux en raison de la disparition de l'eau continue dans les pores du béton.

V.6.3. Essai de compression (NF P 18-406)**V.6.3.1 Rectification des faces de l'éprouvette [44]**

Comme il est difficile de confectionner les éprouvettes dont la surface est suffisamment plane (par suite mauvaise finition du béton frais, d'un stockage sur plan incliné...), il est impératif de recourir au surfaçage des extrémités de l'éprouvette (notamment l'extrémité supérieure). Le surfaçage dans à pour objectif d'obtenir une planéité parfaite et l'orthogonalité par rapport aux génératrices du cylindre. Dans notre étude on utilise un surfaçage par apport d'un autre matériau. Le surfaçage normalisé étant le surfaçage au soufre, adopté par la plus part des laboratoire, le mélange soufre-sable fin permet la création d'une couche plane, adhère très

bien au béton et possède une résistance à la compression supérieure à celle du béton, ce qui évite son écrasement prématuré.

V.6.3.2. Objectif de l'essai

L'essai a pour but de connaître la résistance à la compression du béton de l'éprouvette.

V.6.3.3. Principe de l'essai

L'éprouvette étudiée est soumise à une charge croissante jusqu'à la rupture. La résistance à la compression est le rapport entre la charge de rupture et la section transversale de l'éprouvette.

V.6.3.4. Equipement nécessaire

- Une machine d'essai qui est une presse de force et de dimension appropriées à l'éprouvette à tester et répondant aux prescriptions des normes (NF P 18-411) et (NF P 18-412).
- Un moyen pour rectifier les extrémités des éprouvette : surfaçage au soufre, ou disque diamanté.

V.6.3.5. Présentation des résultats

- Les résultats obtenus à 3 jours, 7 jours, 21 jours, 28 jours, 3 mois et 6 mois proviennent de la moyenne entre les trois échantillons sont représentés dans les tableaux (V.6, V.7 et V.8) et schématisés sur la figure (V.4).

Résultat de l'essai

$$R_c = \frac{F}{A} \quad \text{Avec :}$$

R_c : Résistance à la compression en N/mm²

F : Charge de rupture en Newtons (N)

A : Surface de l'éprouvette.

Tableau V.6. Résultats de la résistance à la compression à différents ages en jours selon Bolomey.

| Essai N° | Dimensions des éprouvettes | Poids (grs) | Charge (KN) | R/C (Kg/cm ²) | R/C Moyenne |
|--|--------------------------------------|-------------|-------------|---------------------------|-------------|
| B₁ Après 3^{ème} Jours | I (16 x 32) cm ² | 14830 | 180 | 90 | 82,00 |
| | II (16 x 32) cm ² | 15220 | 150 | 75 | |
| | III (16 x 32) cm ² | 15200 | 160 | 80 | |
| B₂ Après 7^{ème} Jours | I (16 x 32) cm ² | 14850 | 320 | 160 | 160,00 |
| | II (16 x 32) cm ² | 15150 | 340 | 170 | |
| | III (16 x 32) cm ² | 15250 | 300 | 140 | |
| B₃ Après 21^{ème} Jours | I (16 x 32) cm ² | 15660 | 540 | 270 | 262,00 |
| | II (16 x 32) cm ² | 15000 | 540 | 270 | |
| | III (16 x 32) cm ² | 15390 | 490 | 245 | |
| B₄ Après 28^{ème} Jours | I (16 x 32) cm ² | 15300 | 610 | 305 | 317,00 |
| | II (16 x 32) cm ² | 15450 | 682 | 341 | |
| | III (16 x 32) cm ² | 15840 | 610 | 305 | |
| B₅ Après 90^{ème} Jours | I (16 x 32) cm ² | 15500 | 710 | 355 | 370,00 |
| | II (16 x 32) cm ² | 15520 | 760 | 380 | |
| | III (16 x 32) cm ² | 15080 | 750 | 375 | |
| B₆ Après 180^{ème} Jours | I (16 x 32) cm ² | 15460 | 710 | 355 | 374,00 |
| | II (16 x 32) cm ² | 14760 | 762 | 381 | |
| | III (16 x 32) cm ² | 15460 | 770 | 385 | |

Tableau V.6. Résultats de la résistance à la compression à différents ages en jours par Dreux Gorisse.

| Essai N° | Dimensions des éprouvettes | Poids (grs) | Charge (KN) | R/C (Kg/cm ²) | R/C Moyenne |
|--|--------------------------------------|-------------|-------------|---------------------------|-------------|
| D₁ Après 3^{ème} Jours | I (16 x 32) cm ² | 14950 | 200 | 100 | 100,00 |
| | II (16 x 32) cm ² | 15330 | 200 | 100 | |
| | III (16 x 32) cm ² | 15700 | 200 | 100 | |
| D₂ Après 7^{ème} Jours | I (16 x 32) cm ² | 15800 | 420 | 210 | 210,00 |
| | II (16 x 32) cm ² | 15605 | 400 | 200 | |
| | III (16 x 32) cm ² | 15460 | 440 | 220 | |
| D₃ Après 21^{ème} Jours | I (16 x 32) cm ² | 15520 | 586 | 293 | 309,00 |
| | II (16 x 32) cm ² | 16200 | 620 | 310 | |
| | III (16 x 32) cm ² | 16140 | 650 | 325 | |
| D₄ Après 28^{ème} Jours | I (16 x 32) cm ² | 15800 | 710 | 355 | 363,00 |
| | II (16 x 32) cm ² | 15500 | 716 | 358 | |
| | III (16 x 32) cm ² | 15740 | 752 | 376 | |
| D₅ Après 90^{ème} Jours | I (16 x 32) cm ² | 15630 | 770 | 385 | 422,00 |
| | II (16 x 32) cm ² | 15825 | 870 | 435 | |
| | III (16 x 32) cm ² | 16150 | 890 | 445 | |
| D₆ Après 180^{ème} Jours | I (16 x 32) cm ² | 15600 | 880 | 440 | 430,00 |
| | II (16 x 32) cm ² | 15470 | 840 | 420 | |
| | III (16 x 32) cm ² | 15710 | 860 | 430 | |

Tableau V.7. Résultats de la résistance à la compression à différents ages en jours par Faury.

| Essai N° | Dimensions des éprouvettes | Poids (grs) | Charge (KN) | R/C (Kg/cm ²) | R/C Moyenne |
|--|--------------------------------------|-------------|-------------|---------------------------|-------------|
| F₁ Après 3^{ème} Jours | I (16 x 32) cm ² | 14830 | 160 | 80 | 92,00 |
| | II (16 x 32) cm ² | 15220 | 170 | 85 | |
| | III (16 x 32) cm ² | 15200 | 220 | 110 | |
| F₂ Après 7^{ème} Jours | I (16 x 32) cm ² | 15600 | 360 | 180 | 180,00 |
| | II (16 x 32) cm ² | 15300 | 370 | 185 | |
| | III (16 x 32) cm ² | 15260 | 350 | 175 | |
| F₃ Après 21^{ème} Jours | I (16 x 32) cm ² | 15580 | 640 | 320 | 308,00 |
| | II (16 x 32) cm ² | 15630 | 570 | 285 | |
| | III (16 x 32) cm ² | 16120 | 640 | 320 | |
| F₄ Après 28^{ème} Jours | I (16 x 32) cm ² | 16000 | 690 | 345 | 342,00 |
| | II (16 x 32) cm ² | 15840 | 680 | 340 | |
| | III (16 x 32) cm ² | 15320 | 680 | 340 | |
| F₅ Après 90^{ème} Jours | I (16 x 32) cm ² | 15620 | 840 | 420 | 390,00 |
| | II (16 x 32) cm ² | 16045 | 720 | 360 | |
| | III (16 x 32) cm ² | 15830 | 780 | 390 | |
| F₆ Après 180^{ème} Jours | I (16 x 32) cm ² | 15990 | 820 | 410 | 400,00 |
| | II (16 x 32) cm ² | 15720 | 790 | 395 | |
| | III (16 x 32) cm ² | 16000 | 790 | 395 | |

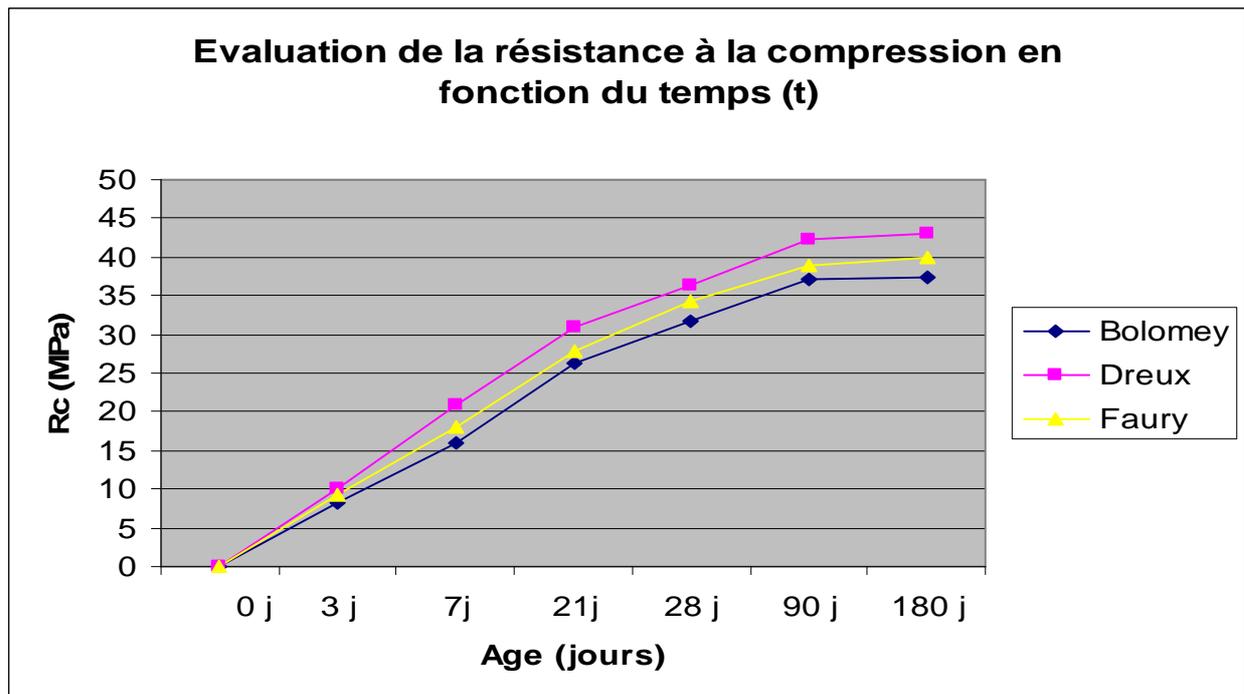


Figure V.4. Evaluation de la résistance à la compression des bétons en fonction du temps

Interprétation des résultats

D'après les courbes tracés sur la figure (V.4), nous remarquons que la résistance augmente en fonction du temps, ceci revient à l'augmentation de la compacité de béton (diminution de volume des vides) ; les constituants trouvant une grande facilité à ce réarranger d'une manière plus compact (ferme).

On remarque que la plus grande résistance est atteinte à 180 jours d'ages pour les trois méthodes de formulation, ceci permet de dire que le mélange est optimisé dans son squelette, c'est-à-dire que les proportions des différents constituants sont en bon rapport.

On remarque que la résistance à la compression donnée par Bolomey est inférieure à celles données par Dreux et Faury. Ceci est dû à l'absence du gravier 15/25 qui engendre une matrice cimentaire importante lors de l'écrasement du béton le chemin de rupture passe par la matrice cimentaire qui est plus faible que le squelette granulaire.

Les deux autres formulations représentent presque la même évolution de la résistance à la compression. Ceci est dû presque au même taux de sable et de squelette granulaire.

V.7. Correction effectuée sur le béton selon la méthode de Dreux-Gorisse

Au départ on calcul la densité la densité réelle Δ :

On a le poids de l'éprouvette à 28 jours donné par la méthode de Dreux-Gorisse est :

$$P_{ép} = 15980 \text{ grs}, \text{ la densité réelle } V_{ép} = 6400 \text{ cm}^3 \Rightarrow \Delta = 2,48 \text{ g / cm}^3$$

Or, que la densité théorique Δ_0 obtenue à partir des dosages des constituants est:

$$\Delta_0 = 2368 \text{ Kg/m}^3 \cong 2,37 \text{ g/cm}^3.$$

Alors, on a : $\Delta = 2,48 \text{ g/cm}^3 > \Delta_0 = 2,37 \text{ g/cm}^3 \Rightarrow$ la composition du béton réalisée donne un peu moins d'un mètre cube.

$(\Delta - \Delta_0) > 0 \Rightarrow$ La formule proposée faisant moins du mètre cube.

Donc il faut apporter une correction sur la masse totale des granulats est alors :

$$x = 1000(\Delta - \Delta_0) \text{ En (Kg)}$$

Soit : $x = 1000(2,48 - 2,37) = 110 \text{ Kg}$.

On obtient alors,

- $110 \times 0,35 = 38,5 \text{ Kg}$ de sable 0/3.
- $110 \times 0,10 = 11 \text{ Kg}$ de gravier 3/8.
- $110 \times 0,20 = 22 \text{ Kg}$ de gravier 8/15.
- $110 \times 0,35 = 38,5 \text{ Kg}$ de gravier 15/25.

D'où les dosages corrigés des constituants (en Kg/m^3)

- Sable 0/3 $617 + 38,50 = 655,50 \text{ Kg/m}^3$
- Gravier 3/8..... $177 + 11 = 188 \text{ Kg/m}^3$
- Gravier 8/15..... $357 + 22 = 379 \text{ Kg/m}^3$
- Gravier 15/25..... $617 + 38,50 = 655,50 \text{ Kg/m}^3$
- Ciment $129 \times 3,1 = 400 \text{ Kg/m}^3$
- L'eau..... $200 \times 1,00 = 200 \text{ Kg/m}^3$

V.8. Essais de retrait [43, 47]

Mesure du retrait sur éprouvettes de béton (NF P 15-433)

Ce phénomène, très complexe, fera l'objet d'une étude sur le retrait du béton.

V.8.1 Objectif de l'essai

L'essai de retrait consiste à mesurer, en fonction du temps, la variation de longueur que provoque le béton utilisé sur des éprouvettes prismatiques de dimensions $(10 \times 10 \times 50) \text{ cm}^3$ de béton conservées dans l'air libre.

V.8.2. Principe de l'essai

On compare, à différents temps t , la variation de longueur d'une éprouvette $(10 \times 10 \times 50) \text{ cm}^3$, par rapport à sa longueur à un temps t_0 pris pour origine.

V.8.3. Conduite de l'essai

On prépare trois (03) séries d'éprouvettes de béton pour les trois méthodes de formulation.

• Dosage ou pesée des constituants

Dans le cas de la préparation de trois (03) éprouvettes (10x10x50) cm³, on procède par le calcul suivant :

On a le volume d'un prisme de béton $V = 0,1 \times 0,1 \times 0,5 = 0,005\text{m}^3$

Donc le volume de trois prismes = $3 \times 0,005 = 0,015\text{m}^3$ or, la gâchée exécutée par le laboratoire doit qu'elle permette d'obtenir un volume de béton compacté excédant celui des éprouvettes d'au moins 25%.

Alors, le volume de la gâchée sera donc : $V_T = 0,015(1 + 0,25) \cong 0,019\text{m}^3$

Les quantités des composants selon les trois méthodes de composition sont les suivantes :

Tableau V.9. Les quantités des composants selon Dreux, Faury et Bolomey.

| Méthodes | Constituant (Kg) | | | | | |
|----------|------------------|-------------|--------------|---------------|--------|------|
| | Sable 0/3 | Gravier 3/8 | Gravier 8/15 | Gravier 15/25 | Ciment | Eau |
| Dreux | 11,723 | 03,363 | 06,783 | 11,723 | 7,60 | 3,80 |
| Faury | 13,642 | 02,413 | 06,498 | 11,229 | 7,60 | 3,80 |
| Bolomey | 17,48 | 04,940 | 11,647 | - | 7,60 | 3,80 |

Les éprouvettes sont conservées à l'air libre.

Epoque des mesures

Les mesures, effectuées sur trois (03) éprouvettes pour chaque série, ont lieu aux temps suivants :

- Au démoulage, mesure origine des variations.
- Au 3^{ème}, 7^{ème}, 14^{ème}, 21^{ème}, 28^{ème}, 60^{ème}, 90^{ème}, 120^{ème}, 150^{ème}, et 180^{ème} jour.

Mesure des variations de longueur

Avant chaque série de mesure, l'appareil est étalonné avec une tige de métal de longueur $L = 500$ mm, et dont les extrémités reproduisent la forme des plots de l'éprouvette.

Au moment de la mesure, le comparateur est mis à zéro sur la tige.

Soit : $d\ell(t)$: la valeur lue sur le comparateur au temps t .

L : la longueur de base prise égale à 500 mm.

L'éprouvette à une longueur au temps considéré :

$$\ell = L - d\ell(t).$$

La variation relative de longueur est généralement désignée par ε et a pour expression :

$$\varepsilon(t) = \frac{d\ell(t)}{L}$$

Remarques :

- $d\ell(t)$ est obtenue en faisant la moyenne sur les trois (03) éprouvettes issues du même moule.
- Comme on parle de retrait, c'est à dire les éprouvettes sont conservées dans l'air ; alors $d\ell(t)$ est négatif.

V.8.4. Résultats obtenus

Les résultats de la variation du retrait obtenus jusqu'à 6 mois aux temps suivants :

24 heures, 3^{ème}, 7^{ème}, 14^{ème}, 21^{ème}, 28^{ème}, 2 mois, 3 mois, 4 mois, 5 mois et 6 mois, sont représentés dans les tableaux (V.10, V.11 et V.12), et schématisés par les courbes suivantes (voir figure V.5)

Tableau V.10. Valeurs du retrait sur les prismes du béton selon Dreux en fonction du temps

| N° | Poids (gr) | Age (jours) | L (mm) | dℓ (mm) | ℓ (mm) | $\varepsilon(t) = \frac{d\ell(t)}{L}$ (mm/m) | $\varepsilon(t)$ (mm/m) Moyen |
|----|------------|-------------|--------|---------|--------|--|-------------------------------|
| 01 | 12140 | 01 jour | 500 | 462 | 38 | 0,076 | 0,076 |
| 02 | 12220 | 01 jour | 500 | 399 | 101 | 0,202 | |
| 03 | 12195 | 01 jour | 500 | 525 | -25 | -0,05 | |
| 01 | 12085 | 02 jours | 500 | 462 | 38 | 0,076 | 0,079 |
| 02 | 12165 | 02 jours | 500 | 399 | 101 | 0,202 | |
| 03 | 12135 | 02 jours | 500 | 521 | -21 | -0,042 | |
| 01 | 12030 | 03 jours | 500 | 462,5 | 37,5 | 0,075 | 0,084 |
| 02 | 12130 | 03 jours | 500 | 405 | 95 | 0,190 | |
| 03 | 12090 | 03 jours | 500 | 509,5 | -9,5 | -0,019 | |
| 01 | 11875 | 07 jours | 500 | 460 | 39 | 0,078 | 0,085 |
| 02 | 11995 | 07 jours | 500 | 398,5 | 101,5 | 0,203 | |
| 03 | 11955 | 07 jours | 500 | 513 | -13 | -0,026 | |
| 01 | 11830 | 14 jours | 500 | 468 | 32 | 0,064 | 0,087 |
| 02 | 11960 | 14 jours | 500 | 399 | 101 | 0,202 | |
| 03 | 11915 | 14 jours | 500 | 502,5 | -2,5 | -0,005 | |
| 01 | 11805 | 21 jours | 500 | 460 | 40 | 0,08 | 0,090 |
| 02 | 11935 | 21 jours | 500 | 397 | 103 | 0,206 | |
| 03 | 11890 | 21 jours | 500 | 508 | -8 | -0,016 | |

| | | | | | | | |
|----|-------|-----------|-----|-------|------|--------|-------|
| 01 | 11805 | 28 jours | 500 | 460 | 40 | 0,08 | 0,091 |
| 02 | 11935 | 28 jours | 500 | 397 | 103 | 0,206 | |
| 03 | 11885 | 28 jours | 500 | 506,5 | -6,5 | -0,013 | |
| 01 | 11805 | 30 jours | 500 | 458 | 42 | 0,084 | 0,097 |
| 02 | 11930 | 30 jours | 500 | 394 | 106 | 0,212 | |
| 03 | 11885 | 30 jours | 500 | 502,5 | -2,5 | -0,005 | |
| 01 | 11780 | 45 jours | 500 | 446 | 54 | 0,108 | 0,119 |
| 02 | 11915 | 45 jours | 500 | 388 | 112 | 0,224 | |
| 03 | 11870 | 45 jours | 500 | 497 | 3 | 0,006 | |
| 01 | 11780 | 60 jours | 500 | 447 | 53 | 0,106 | 0,113 |
| 02 | 11910 | 60 jours | 500 | 387 | 113 | 0,226 | |
| 03 | 11865 | 60 jours | 500 | 496 | 4 | 0,008 | |
| 01 | 11765 | 90 jours | 500 | 445 | 55 | 0,110 | 0,117 |
| 02 | 11900 | 90 jours | 500 | 386 | 114 | 0,228 | |
| 03 | 11850 | 90 jours | 500 | 494 | 6 | 0,012 | |
| 01 | 11750 | 120 jours | 500 | 444 | 56 | 0,112 | 0,119 |
| 02 | 11885 | 120 jours | 500 | 384 | 116 | 0,232 | |
| 03 | 11835 | 120 jours | 500 | 493 | 7 | 0,014 | |
| 01 | 11745 | 150 jours | 500 | 443 | 57 | 0,114 | 0,121 |
| 02 | 11885 | 150 jours | 500 | 383 | 117 | 0,234 | |
| 03 | 11830 | 150 jours | 500 | 493 | 7 | 0,014 | |
| 01 | 11725 | 180 jours | 500 | 445 | 55 | 0,110 | 0,118 |
| 02 | 11865 | 180 jours | 500 | 386 | 114 | 0,228 | |
| 03 | 11820 | 180 jours | 500 | 492 | 8 | 0,016 | |

Tableau V.11. Valeurs du retrait sur les prismes du béton selon Faury en fonction du temps

| N° | Poids (gr) | Age (jours) | L (mm) | dℓ (mm) | ℓ (mm) | $\varepsilon(t) = \frac{d\ell(t)}{L}$ (mm/m) | $\varepsilon(t)$ (mm/m) Moyen |
|----|------------|-------------|--------|---------|--------|--|----------------------------------|
| 01 | 12230 | 01 jour | 500 | 480 | 20 | 0,040 | 0,079 |
| 02 | 12085 | 01 jour | 500 | 427,5 | 72,5 | 0,145 | |
| 03 | 12020 | 01 jour | 500 | 473,5 | 26,5 | 0,053 | |
| 01 | 12175 | 02 jours | 500 | 477 | 23 | 0,046 | 0,085 |
| 02 | 12030 | 02 jours | 500 | 426 | 74 | 0,148 | |
| 03 | 11960 | 02 jours | 500 | 470 | 30 | 0,060 | |
| 01 | 12105 | 03 jours | 500 | 477 | 23 | 0,046 | 0,085 |
| 02 | 11975 | 03 jours | 500 | 426 | 74 | 0,148 | |
| 03 | 11895 | 03 jours | 500 | 470 | 30 | 0,060 | |
| 01 | 11990 | 07 jours | 500 | 475 | 25 | 0,050 | 0,086 |
| 02 | 11860 | 07 jours | 500 | 426 | 74 | 0,148 | |
| 03 | 11770 | 07 jours | 500 | 470 | 30 | 0,060 | |
| 01 | 11935 | 14 jours | 500 | 477 | 23 | 0,046 | 0,088 |
| 02 | 11805 | 14 jours | 500 | 422,5 | 77,5 | 0,155 | |
| 03 | 11715 | 14 jours | 500 | 468,5 | 31,5 | 0,063 | |
| 01 | 11910 | 21 jours | 500 | 473 | 27 | 0,054 | 0,091 |
| 02 | 11780 | 21 jours | 500 | 432 | 68 | 0,136 | |
| 03 | 11685 | 21 jours | 500 | 459 | 41 | 0,082 | |
| 01 | 11905 | 28 jours | 500 | 472 | 28 | 0,056 | 0,092 |
| 02 | 11770 | 28 jours | 500 | 431,5 | 68,5 | 0,137 | |
| 03 | 11680 | 28 jours | 500 | 458,5 | 41,5 | 0,083 | |
| 01 | 11905 | 30 jours | 500 | 469 | 31 | 0,062 | 0,099 |
| 02 | 11770 | 30 jours | 500 | 428 | 72 | 0,144 | |
| 03 | 11675 | 30 jours | 500 | 455 | 45 | 0,09 | |
| 01 | 11880 | 45 jours | 500 | 458 | 42 | 0,084 | 0,121 |
| 02 | 11750 | 45 jours | 500 | 417 | 83 | 0,166 | |
| 03 | 11655 | 45 jours | 500 | 443 | 57 | 0,114 | |

| | | | | | | | |
|----|-------|-----------|-----|-------|------|-------|-------|
| 01 | 11880 | 60 jours | 500 | 457 | 43 | 0,086 | 0,123 |
| 02 | 11745 | 60 jours | 500 | 416 | 84 | 0,168 | |
| 03 | 11650 | 60 jours | 500 | 442 | 58 | 0,116 | |
| 01 | 11865 | 90 jours | 500 | 457 | 43 | 0,086 | 0,120 |
| 02 | 11730 | 90 jours | 500 | 420,5 | 79,5 | 0,159 | |
| 03 | 11635 | 90 jours | 500 | 443 | 57 | 0,114 | |
| 01 | 11850 | 120 jours | 500 | 455 | 45 | 0,09 | 0,128 |
| 02 | 11715 | 120 jours | 500 | 412 | 88 | 0,176 | |
| 03 | 11615 | 120 jours | 500 | 440 | 60 | 0,120 | |
| 01 | 11840 | 150 jours | 500 | 454 | 46 | 0,092 | 0,129 |
| 02 | 11705 | 150 jours | 500 | 411 | 89 | 0,178 | |
| 03 | 11605 | 150 jours | 500 | 441 | 59 | 0,118 | |
| 01 | 11825 | 180 jours | 500 | 455 | 45 | 0,090 | 0,128 |
| 02 | 11695 | 180 jours | 500 | 414 | 86 | 0,172 | |
| 03 | 11595 | 180 jours | 500 | 439 | 61 | 0,122 | |

Tableau V.12. Valeurs du retrait sur les prismes du béton selon Bolomey en fonction du temps

| N° | Poids (gr) | Age (jours) | L (mm) | dℓ (mm) | ℓ (mm) | $\varepsilon(t) = \frac{d\ell(t)}{L}$ (mm/m) | $\varepsilon(t)$ (mm/m) Moyen |
|----|------------|-------------|--------|---------|--------|--|-------------------------------|
| 01 | 11985 | 01 jour | 500 | 476,5 | 23,5 | 0,047 | 0,084 |
| 02 | 11975 | 01 jour | 500 | 425 | 75 | 0,15 | |
| 03 | 11980 | 01 jour | 500 | 473 | 27 | 0,054 | |
| 01 | 11900 | 02 jours | 500 | 474 | 26 | 0,052 | 0,088 |
| 02 | 11895 | 02 jours | 500 | 432 | 68 | 0,136 | |
| 03 | 11890 | 02 jours | 500 | 462 | 38 | 0,076 | |
| 01 | 11815 | 03 jours | 500 | 475 | 25 | 0,050 | 0,089 |
| 02 | 11820 | 03 jours | 500 | 418 | 82 | 0,148 | |
| 03 | 11815 | 03 jours | 500 | 474 | 26 | 0,052 | |
| 01 | 11725 | 07 jours | 500 | 476 | 24 | 0,048 | 0,093 |
| 02 | 11730 | 07 jours | 500 | 430 | 70 | 0,140 | |
| 03 | 11720 | 07 jours | 500 | 455 | 45 | 0,090 | |

| | | | | | | | |
|----|-------|-----------|-----|-------|------|-------|-------|
| 01 | 11675 | 14 jours | 500 | 469 | 31 | 0,062 | 0,094 |
| 02 | 11670 | 14 jours | 500 | 430 | 70 | 0,140 | |
| 03 | 11665 | 14 jours | 500 | 460 | 40 | 0,080 | |
| 01 | 11645 | 21 jours | 500 | 465,5 | 34,5 | 0,069 | 0,109 |
| 02 | 11645 | 21 jours | 500 | 411,5 | 88,5 | 0,177 | |
| 03 | 11640 | 21 jours | 500 | 458,5 | 41,5 | 0,083 | |
| 01 | 11635 | 28 jours | 500 | 464 | 36 | 0,072 | 0,115 |
| 02 | 11635 | 28 jours | 500 | 408 | 92 | 0,184 | |
| 03 | 11630 | 28 jours | 500 | 455 | 45 | 0,090 | |
| 01 | 11635 | 30 jours | 500 | 464 | 36 | 0,072 | 0,116 |
| 02 | 11635 | 30 jours | 500 | 407 | 93 | 0,186 | |
| 03 | 11630 | 30 jours | 500 | 455 | 45 | 0,090 | |
| 01 | 11615 | 45 jours | 500 | 456,5 | 43,5 | 0,087 | 0,126 |
| 02 | 11620 | 45 jours | 500 | 403 | 97 | 0,194 | |
| 03 | 11610 | 45 jours | 500 | 451 | 49 | 0,098 | |
| 01 | 11605 | 60 jours | 500 | 456,5 | 43,5 | 0,087 | 0,130 |
| 02 | 11595 | 60 jours | 500 | 400 | 100 | 0,20 | |
| 03 | 11595 | 60 jours | 500 | 448,5 | 51,5 | 0,103 | |
| 01 | 11595 | 90 jours | 500 | 458 | 42 | 0,084 | 0,130 |
| 02 | 11595 | 90 jours | 500 | 402 | 98 | 0,196 | |
| 03 | 11590 | 90 jours | 500 | 446 | 54 | 0,108 | |
| 01 | 11580 | 120 jours | 500 | 454 | 46 | 0,092 | 0,135 |
| 02 | 11580 | 120 jours | 500 | 398 | 102 | 0,204 | |
| 03 | 11575 | 120 jours | 500 | 446 | 54 | 0,108 | |
| 01 | 11575 | 150 jours | 500 | 456 | 44 | 0,088 | 0,130 |
| 02 | 11570 | 150 jours | 500 | 400 | 100 | 0,200 | |
| 03 | 11565 | 150 jours | 500 | 449 | 51 | 0,102 | |
| 01 | 11555 | 180 jours | 500 | 454 | 46 | 0,092 | 0,133 |
| 02 | 11550 | 180 jours | 500 | 399 | 101 | 0,202 | |
| 03 | 11540 | 180 jours | 500 | 447 | 53 | 0,106 | |

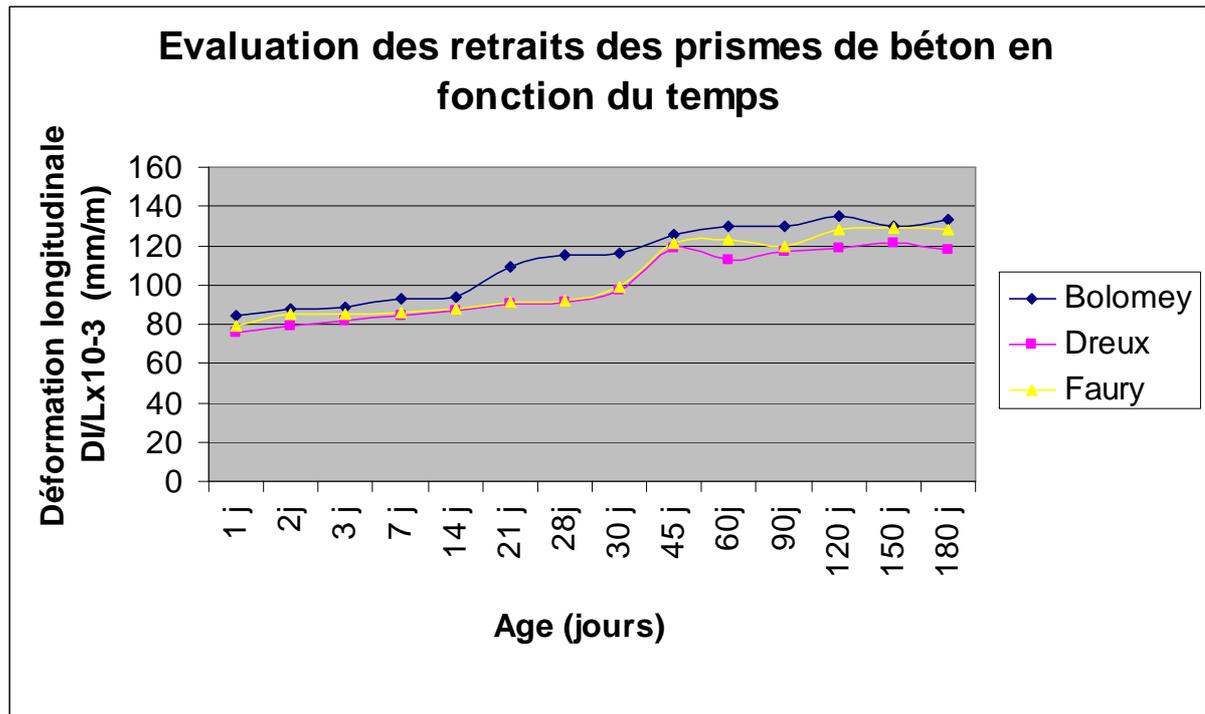


Figure V.5. Evaluation des retraits sur des prismes de béton en fonction du temps

Interprétation et discussion des résultats

On sait que la réaction d'hydratation s'accompagne d'une réduction de volume, appelée contraction. L'eau qui s'évapore d'un prisme conservé à l'air libre provoque du retrait, qui est la conséquence de la perte d'eau libre, lorsque cette eau se retire du matériau, une contraction se produit automatiquement.

Les résultats présentés sur la figure (II.5), montre un comportement de contraction des prismes de béton à différents âges et à différentes méthodes de composition, changements volumétriques se produisent après la prise. La variation de retrait des prismes de béton formulé par trois méthodes sont presque de même ordre de grandeur (les courbes représentatives ont un comportement identique ; même évolution).

Pour tous les prismes, nous remarquons une évolution continue de retrait en fonction de l'âge de mesure (1j, 2j, 3j, 7j, 14j, 21j, 28j, 30j, 60j, 90j, 120j, 150j, et 180j), donc on peut dire que le retrait évolue en fonction du temps, par évaporation de l'eau emprisonnée dans les prismes et par dessiccation, au-delà de 45 jours cette évolution se stabilise.

Dans la formule de Bolomey le retrait est légèrement supérieur aux deux autres formules (Dreux et Faury). Ceci est dû au taux de fines contenues dans le sable et l'absence du gravier 15/25. Cette absence engendre des matrices cimentaires (sable + ciment) importantes qui donne un retrait important.

La présence des fines de sable provoque un raffinement des pores, ce engendre alors des dépressions capillaires plus importantes. Les pores capillaires fins (raffinés) commencent très vites se dessécher en créant des contraintes de tensions élevées au sein du béton.

Cet assèchement interne entraîne la formulation de ménisques qui créent des forces de tension au sein du béton, ce qui entraîne le développement d'un certain retrait.

V.9. Evaluation de la masse moyenne sur les prismes de béton

- Les valeurs obtenues selon les trois méthodes de formulation sont données par les tableaux (V.13, V.14 et V.15) et schématisées sur la figure (V.6)

Tableau V.13. Evaluation de la masse moyenne des prismes de béton selon Dreux en fonction du temps

| Béton selon | Masses en (grs) | | | | | | | | |
|----------------|-----------------|-------------|--------------|--------------|--------------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 j | 2j | 3 j | 7 j | 14 j | 21 j | 28 j | 60 j | 45 j |
| Dreux | 12185 | 12128 | 12083 | 11942 | 11902 | 11877 | 11875 | 11873 | 11855 |
| | 60 j | 90 j | 120 j | 150 j | 180 j | | | | |
| | 11852 | 11838 | 11823 | 11820 | 11803 | | | | |

Tableau V.14. Evaluation de la masse moyenne des prismes de béton selon Faury en fonction du temps

| Béton selon | Masses en (grs) | | | | | | | | |
|----------------|-----------------|-------------|--------------|--------------|--------------|-------|-------|--------|-------|
| | 1 j | 2j | 3 j | 7 j | 14 j | 21 j | 28j | 1 mois | 45 j |
| Faury | 12112 | 12055 | 11992 | 11873 | 11818 | 11792 | 11785 | 11783 | 11762 |
| | 60 j | 90 j | 120 j | 150 j | 180 j | | | | |
| | 11758 | 11743 | 11727 | 11717 | 11705 | | | | |

Tableau V.15. Evaluation de la masse moyenne des prismes de béton selon Bolomey en fonction du temps

| Béton selon | Masses en (grs) | | | | | | | | |
|----------------|-----------------|-------------|--------------|--------------|--------------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 j | 2j | 3 j | 7 j | 14 j | 21 j | 28j | 60 j | 45 j |
| Bolomey | 11980 | 11895 | 11810 | 11725 | 11663 | 11648 | 11633 | 11630 | 11615 |
| | 60 j | 90 j | 120 j | 150 j | 180 j | | | | |
| | 11598 | 11593 | 11578 | 11570 | 11548 | | | | |

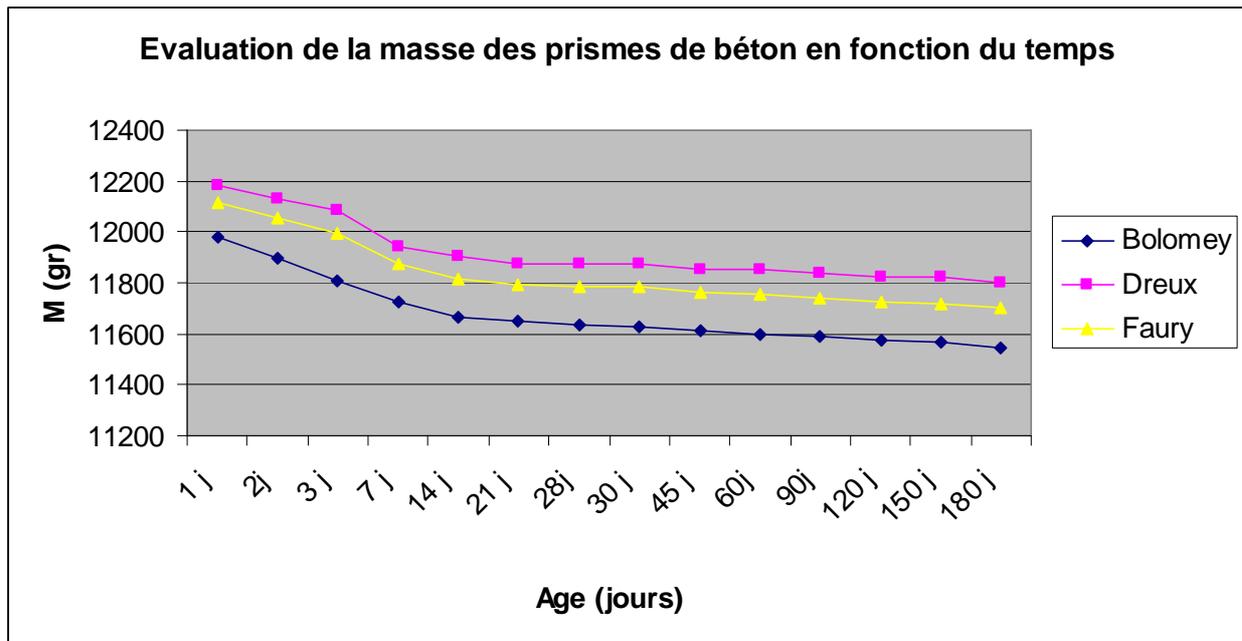


Figure V.6. Evaluation de la masse moyenne des prismes de béton en fonction du temps (t)

🔧 Interprétation et discussion :

On sait que le retrait s'accompagne systématiquement d'une diminution ou d'une perte de masse la figure (V.6) montre la perte de masse, cette dernière augmente en fonction du temps, et elle marque un palier de stabilité à partir de 60 jours, et que la perte de masse des prismes de béton formulé par Bolomey est plus grande que celles formulés par Faury et Dreux et peut s'expliquer par le taux de fines élevé dans les prismes formulés par Bolomey, donc l'hydratation plus grande, retrait mesuré plus grand, et perte de masse plus importante.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

L'objectif souligné dans ce mémoire est la détermination de la méthode de composition de béton adéquate qui donne une évolution de la résistance à la compression meilleure et un retrait minime.

Afin de déduire la méthode performante et adéquate pour la formulation des bétons, on a calculé les différentes proportions des empilements granulaires (des constituants) de chaque formulation.

Dans ce cadre, rappelons uniquement que la formulation meilleure est celle qui répond à deux aspects les plus communément étudiés d'une formule de béton, à savoir la maniabilité et la résistance en compression, et la durabilité (C'est le principe fondamental de toute formulation)

Dans le but de fixer définitivement, confirmer ou corriger la composition de béton les essais au laboratoire ont été exécutés avec les mêmes constituants qui sont utilisés sur le chantier.

Les résultats obtenus pour les différentes méthodes de composition nous ont permis de constater que :

- La résistance à la compression des bétons augmente en fonction du temps, cette augmentation est liée à l'augmentation de la compacité des bétons.
- les formulations données par Dreux – Gorisse et Faury présentent des résistances aux compressions plus élevées que celle donnée par Bolomey. Ceci est dû à l'absence du gravier 15/25 dans la formulation de Bolomey qui engendre une matrice cimentaire importante lors de l'écrasement du béton le chemin de rupture passe par la matrice cimentaire qui est plus faible que le squelette granulaire.
- La masse volumique à sec du mélange donné par Dreux-Gorisse est plus élevée que celles données par Faury et Bolomey ; ce qui laisse à penser que la résistance à la compression du mélange par Dreux sera beaucoup plus meilleure, en raison de la quantité de granulats de dimension 15/25.
- Le retrait du béton augmente en fonction du temps. Ceci est expliqué par le fait d'augmentation du dosage en fines.
- Le retrait au séchage donné par Bolomey est légèrement supérieur aux deux autres formulations (Dreux et Faury). Ceci est dû au taux de fines contenues dans le sable et l'absence du gravier 15/25. Cette absence engendre des matrices cimentaires (Sable + ciment) faibles qui donnent un retrait important.
- Les sables de carrières peuvent être utilisés dans les bétons de structure si la qualité et le

taux de fines sont conformes aux spécifications en vigueur. Ces fines sont considérées comme un constituant du béton, ayant une fonction bien définie, il est nécessaire donc qu'il soit constant en caractéristique et en qualité. Les producteurs de sable peuvent donc mettre sur le marché des sables de qualité qui grâce aux fines qu'ils renferment permettront l'obtention de béton répondant aux critères des acheteurs.

▪ Pour que l'utilisation de sables de carrières dans la confection des bétons soit efficace, il faut veiller au respect des recommandations suivantes :

- Renouvellement des équipements de concassage pour permettre l'obtention de sables ayant des calibres normalisés.

- Encadrement des organismes exploitants de carrières par des spécialistes pour optimiser le rendement du point de vue qualité et quantité de sable extrait.

L'étude effectuée, nous a permis de constater que toutes les méthodes graphiques ou expérimentales s'accordent sur les qualités essentielles à rechercher pour un béton (bonne résistance, faible porosité, durabilité, etc.), par contre se différencient dans la procédure à suivre et les résultats qui en découlent.

Pour les méthodes graphiques (Bolomey, Faury, Joisel), la principale différence réside dans la définition de la courbe granulométrique de référence, selon que l'on inclue ou pas le ciment dans les matières fines.

Portant, toutes ont un point commun, elles dépendent de paramètres qui sont intimement liés aux caractéristiques morphologiques des matériaux utilisés (nature et qualité des granulats, type de liant, etc.).

A travers cette étude, on peut constater d'une manière générale que :

La méthode de Bolomey donne généralement des bétons riches en éléments fins (sable), donc très maniable. Son emploi est fréquent pour les travaux routiers, et pour les bétons devant être mis en place par pompage. Cependant elle ne tient pas compte des idées modernes sur les effets de paroi et d'interférence, et de rayon moyen de moule.

La méthode de Faury donne des bétons contenant moins de sable et davantage de gravier ; les bétons Faury seront donc plus raides, et conviendront à des travaux pour lesquels une très bonne maniabilité n'est pas indispensable. Les bétons Faury présentent souvent une résistance mécanique supérieure à ceux préconisés par Bolomey.

Enfin, la méthode de Dreux-Gorisse c'est la méthode la plus utilisée actuellement, elle est simple et pratique. Elle fait un compromis entre toutes les méthodes déjà existantes, et donne d'excellents résultats.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

- [1] : Gérard BERNIER ; « Formulations des bétons » ; Maître de Conférences à l'École nationale supérieure de Cachan ; Techniques de l'ingénieur C 2 210.
- [2] : Mohamed Sadok HADRICH ; « Modélisation du comportement du béton auto plaçant : effet de la composition » ; mémoire de maîtrise en science appliquées spécialité : génie civil ; Décembre 1998, CANADA
- [3] : VALLETTE (R) ; « Manuel de composition des bétons », Méthodes expérimentales. Eyrolles (1963)
- [4] : G. Dreux, J. Festa ; « Nouveau guide du béton et de ses constituants » 7^{ème} édition, 1997.
- [5] : Gilles CHANVILLARD ; « Le matériau béton : Connaissances générale », ALEAS EDITEUR, Octobre 1999.
- [6] : J.F. Picardat ; « LE BETON », Edition « brutdebeton.com ».
- [7] : G. Dreux, J. Festa ; « Nouveau guide du béton et de ses constituants » ; édition, 1995
- [8] : Fiches techniques ; « composition des bétons courants », Nouvelle édition 2001.
- [9] : Guillaume FRANQUEVILLE « la technologie du béton »
- [10] : FAURY. (J.) « Le béton. Influence de ses constituants inertes. Règles à adopter pour sa meilleure composition », 3^{ème} édition, Dunod (1958).
- [11] : Geoffroy J.M., « Mise en oeuvre », Technique de l'ingénieur, Série de béton hydraulique, C 2 230
- [12] : Regourd M., 1982, « L'hydratation du ciment Portland », (dans « Le béton hydraulique, connaissance et pratique »), Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris.
- [13] : Folliot A., Buil M., 1982, « La structuration progressive de la pierre de ciment » (dans « Le béton hydraulique, connaissance et pratique »), Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris
- [14] : G. Dreux, J. Festa ; « Nouveau guide du béton et de ses constituants », 8^{ème} édition, 1998, Eyrolles, Paris
- [15] : Adam M.Neville ; « Propriétés des bétons », Edition Eyrolles 2000.
- [16] : J.P Trotignon, Professeur à l'Ecole Nationale Supérieure d'Art et Matières – Paris
« Chantier, matériel et matériaux, mise en œuvre et normalisation » Dépôt l'égal Décembre 2006.
- [17] : Ngoc-Dong LE ; « Amélioration de la régularité du béton en production » ; thèse doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, soutenu mai 2007.
- [18] : Steven H. Kosmatka, Beatrix Kerkhoff, William C. Panarese Normand F. MacLeod et Richard J. McGrath ; BULLETIN D'INGÉNIERIE EB101 Dosage et contrôle des mélanges de béton septième édition Canadienne.

Références bibliographiques

- [19] : Dr. CHERAIT Yacine et Mr NAFA Zahredinne, *Eléments de matériaux de construction et essais*, Direction de la publication universitaire de GUELMA 2007.
- [20] : Tazawa, Ei-ichi, *Autogenous Shrinkage of Concrete*, E & FN Spon and Routledge, New York, 1999, 428 pages [PCA LT245].
- [21] : Copeland, L. E., and Bragg, R. H., *Self Desiccation in Portland Cement Pastes*, Research Department Bulletin RX052, Portland Cement Association, http://www.portcement.org/Pdf_files/RX052.pdf, 1955.
- [22]: Holt, Erika E., *Early Age Autogenous Shrinkage of Concrete*, VTT Publication 446, Technical Research Center of Finland, Espoo, 2001, 194 pages. Also available through PCA as LT257.
- [23] : Hammer, T. A., “Test Methods for Linear Measurement of Autogenous Shrinkage Before Setting” *Autogenous Shrinkage of Concrete*, edited by E. Tazawa, E&FN Spon and Routledge, New York, 1999, pages 143 to 154. Also available through PCA as LT245
- [24]: Suprenant, Bruce A., and Malisch, Ward R., “The Fiber Factor,” *Concrete Construction*, Addison, Illinois, October 1999, pages 43 to 46.
- [25]: Aitcin, Pierre-Claude, “Does Concrete Shrink or Does it Swell?,” *Concrete International*, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, December 1999, pages 77 to 80.
- [26]: Roper, Harold, *Volume Changes of Concrete Affected by Aggregate Type*, Research Department Bulletin RX123, Portland Cement Association, http://www.portcement.org/Pdf_files/RX123.pdf, 1960.
- [27]: Hanson, J. A., *Effects of Curing and Drying Environments on Splitting Tensile Strength of Concrete*, Development Department Bulletin DX141, Portland Cement Association, http://www.portcement.org/pdf_files/DX141.pdf, 1968.
- [28]: Hansen, Torben C., and Mattock, Alan H., *Influence of Size and Shape of Member on the Shrinkage and Creep of Concrete*, Development Department Bulletin DX103, Portland Cement Association, http://www.portcement.org/pdf_files/DX103.pdf, 1966.
- [29] : Suprenant, Bruce A., and Malisch, Ward R., “A New Look at Water, Slump, and Shrinkage,” *Concrete Construction*, Addison, Illinois, April 2000, pages 48 to 53.
- [30]:Gebler, Steven H., and Klieger, Paul, *Effect of Fly Ash on Some of the Physical Properties of Concrete*, RD089, Portland Cement Association, http://www.portcement.org/pdf_files/RD089.pdf, 1986.
- [31] : LEUVREY Jean-Pascal “La nouvelle norme des bétons NF EN 206-1 Application pratique sur un chantier de bâtiment », Projet de fin d’études, Juin 2006.

Références bibliographiques

- [32] : Mustapha ZDIRI et all formulation et simulation des bétons compactés au rouleau: Application aux matériaux de gisement locaux.
- [33] : N. Pouliot, T. Sedran, F. De Larrard, J. Marchand, Prédiction de la compacité des bétons compactés au rouleau à l'aide d'un modèle d'empilement granulaire, 2001, 14 pages.
- [34] : Association Béton Québec (ABQ), Document: Conception et réalisation de revêtements en béton compacté au rouleau au Québec, 2004, 129 pages.
- [35] : P. Gauthier, J. Marchand, L. Boisvert, E. Ouellet , M. PIGEON, Conception, formulation, production et mise en oeuvre de revêtement en béton compacté au rouleau, formation continue GCI-A2455, Centre de recherche interuniversitaire sur le béton, Département de génie civil, Université Laval, 2000.
- [36] : Projet National BaCaRa 1988-1995. Le béton compacté au rouleau. Presse ENPC, 1996, 200 pages.
- [37] : Hisham Y. Qasrawi, Ibrahim M. Asi, H.I. Al-Abdul Wahhab, Proportioning RCCP mixes under hot weather conditions for a specified tensile strength, 2004, 10 pages.
- [38]: R. Anderson, Roller Compacted pavements- Physical Properties, CBI report N°. Ra 3:86, Swedish Cement and Concrete Research Institute, Sweden 1986.
- [39]: ACI 325.10R-95, State-of-the-art report on roller-compacted concrete pavements, ACI manual of concrete Practice, ACI, USA, 2000, 32 pages.
- [40]: M. Venuat, M. Papadakis Contrôle et essais des ciments, mortiers, bétons Eyrolles, 1961, pp 282-311
- [41] : Document technique de la cimenterie AIN EL KEBIRA.
- [42] : R. DUPAIN, R. LANCHON et J.C. SAINT-ARROMAN ; « Granulats, sols, ciments et bétons (Caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire) ». Editions CASTEILA. 1995.
- [43] : F. Gabrusiak « Matériaux – les granulats »
- [44] : M. MERZOUK Kamel, Consultant, Veille réglementaire « Mercredi du CTC Centre » 05 Octobre 2005, NA426- NA427-NA428.
- [45]: K. WESCHE; Baustoffe für tragende bauteile; Beton und masswerk; Bauverlag, Wiesbaden/Berlin, 1993. (matériaux de construction pour élément de support)
- [46]: G. LOHMEYER; Beton-Technik; Handbuch für planer und konstruktore, beton Verlag; Dusseldorf, 1989.
- [47] : B. Miao. « Effets mécaniques dus au retrait de dessiccation du béton ». Thèse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1992.

ANNEXES

Annexe A [41]

FICHE TECHNIQUE

AIN EL KEBIRA / CEM II CPJ 42,5

1/. COMPOSITION CHIMIQUE

| ELEMENTS | TENEUR (%) |
|--------------------------------|------------|
| SiO ₂ | 21,26 |
| Al ₂ O ₃ | 3,83 |
| Fe ₂ O ₃ | 2,91 |
| CaO | 61,22 |
| MgO | 1,17 |
| SO ₃ | 2,05 |
| Na ₂ | - |
| K ₂ O | - |
| Chlorures | - |
| CaO libre | 0,56 |
| Res. Insol | 2,64 |
| P.A.F | 6,24 |

2/. COMPOSITION MINERALOGIQUE DU

| C3S | C2S | C3A | C4AF |
|-------|-------|------|-------|
| 61,34 | 17,54 | 5,59 | 11,93 |

3/. ESSAIS PHYSIQUES

| | | |
|-------------------------------|--------------|--------|
| TEMPS DE PRISE | DEBUT | 2h :00 |
| | FIN | 3h :40 |
| EXPANSION LE CHATELIER | CHAUD | 2,00 |
| | FROID | - |
| SURFACE SPEC. BLAINE | | 3301 |
| CONSTANCE NORMALE | | 26,40 |

4/. ESSAIS MECANIKES

| | | |
|---|----------|------|
| RESISTANCE A LA FLEXION (bars) | 2 jours | 40,0 |
| | 7 jours | 57,0 |
| | 28 jours | 75,0 |
| RESISTANCE A LA COMPRESSION (bars) | 2 jours | 170 |
| | 7 jours | 300 |
| | 28 jours | 442 |