

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

Université Mouloud MAMMERI Tizi-Ouzou
Faculté du Génie de la Construction
Département de génie civil



MÉMOIRE DE MASTER II

Spécialité : Génie Civil

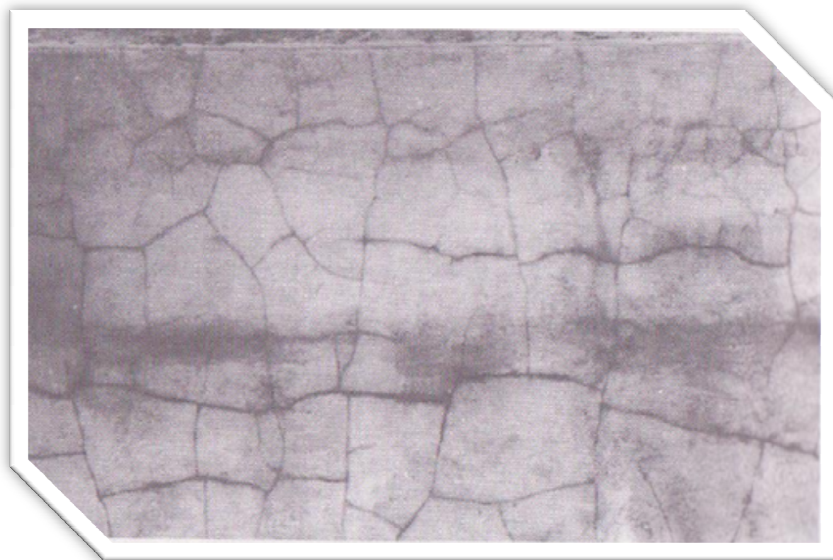
Option : Structure & matériaux

Promotion : 2012/2013

THEME :

**FISSURATION A JEUNE AGE DU BETON ET DU
MORTIER**

(à volumes de pâtes équivalents)

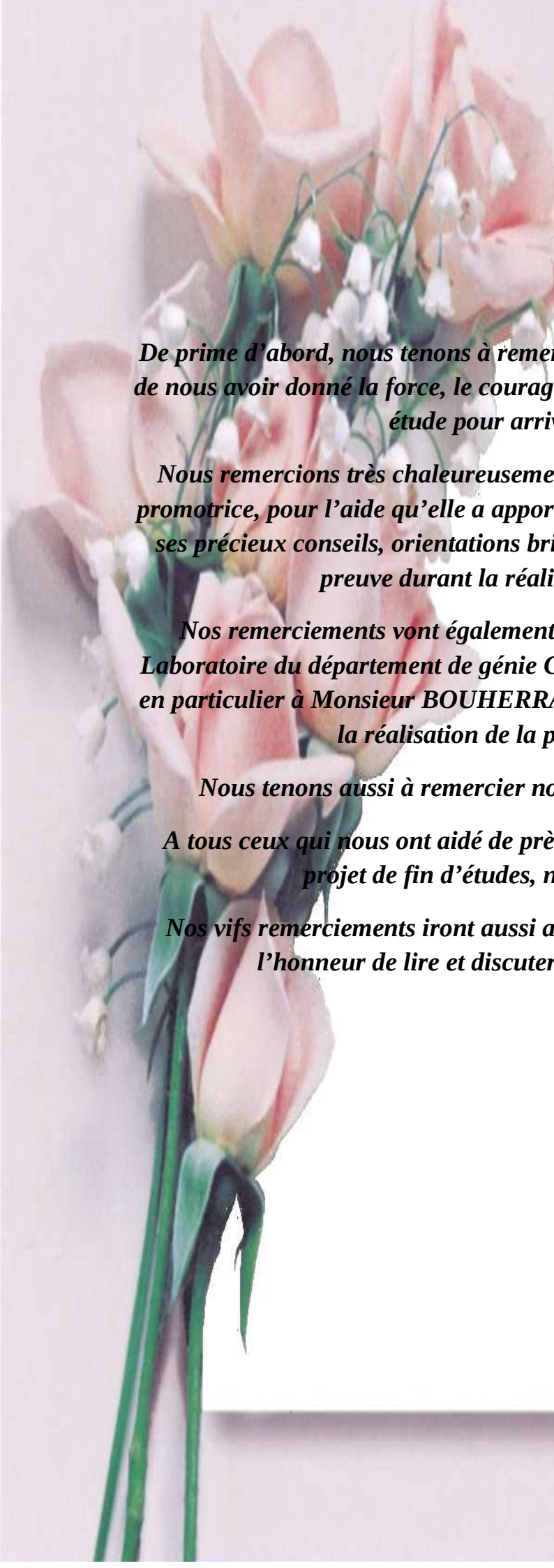


Présenté par :

Mlle GHEDDOUCHI Touria

Mlle ABIDALLAH Ahlem

Proposé et dirigé par : M^{me} O. MALEK – HADDAD



Remerciements

De prime d'abord, nous tenons à remercier le Dieu clément et miséricordieux de nous avoir donné la force, le courage, la patience et la volonté durant notre étude pour arriver à ce jour là.

Nous remercions très chaleureusement Mme O. MALEK-HADDAD notre promotrice, pour l'aide qu'elle a apportée à la réalisation de ce travail et pour ses précieux conseils, orientations brillantes et motivations, dont elle a fait preuve durant la réalisation de ce mémoire.

Nos remerciements vont également aux responsables et personnels du Laboratoire du département de génie Civil, Université Mouloud MAMMERI, en particulier à Monsieur BOUHERRAOUA. R., pour sa précieuse aide dans la réalisation de la partie expérimentale.

Nous tenons aussi à remercier nos familles, ainsi que nos ami(e)s.

A tous ceux qui nous ont aidé de près ou de loin dans la réalisation de ce projet de fin d'études, nous leurs disons merci.

Nos vifs remerciements iront aussi aux membres de jury qui nous ferons l'honneur de lire et discuter et juger ce modeste travail.



Dédicaces

Le projet de fin d'étude qu'on a l'honneur de présenté, a été exécuté et mené à bien grâce à la participation exceptionnelle de notre promotrice.

Je dédie ce modeste travail :

À ma très chère mère qui a su être à mes cotés dans les moments difficiles sans laquelle je n'aurai pas abouti à ce stade d'étude, ainsi que chaque instant de bonheur qu'elle m'a procurée, je supplie le dieu de la préservée dans la prospérité et d'être clément et miséricordieux avec mon père et lui fait entrer dans les hautes paradis, fasse Dieu que je puisse les honorés.

A mes chers frère Abdlaziz et Djamel

A mes sœurs Samia, Hassiba et Nadia

A mes chers neveux : Ouassim, Ibtissam et le plus petit beau Mohammed Zouhir

A ma chère grande famille Gheddouchi,

A Hamza et sa famille,

A toute mes amis (es),

A mon amie et binôme Abidallah Ahlem ainsi que sa famille.

TOURIA



Dédicaces

Le projet de fin d'étude qu'on a l'honneur de présenté, a été exécuté et mené à bien grâce à la participation exceptionnelle de notre promotrice.

Je dédie ce modeste travail :

À mes très chers parents qui ont su être à mes cotés dans les moments difficile sans lesquels je n'aurai pas abouti à ce stade d'étude, ainsi que chaque instant de bonheur qu'ils m'ont procuré, fasse Dieu que je puisse les honorés.

A mon frère sid Ali et ma petite sœur Nour el Houda

À ma chère grande famille,

À tous mes amis (es),

A Mon amie et binôme Gheddouchi Touria ainsi que sa famille.

AHLEM

LISTE DE FIGURES

<i>Figure I-1 : étapes de fabrication du ciment, de la carrière à l'expédition [4,5].....</i>	<i>5</i>
<i>Figure I-2 : développement de la résistance des différents constituants du clinker [2,6].....</i>	<i>8</i>
<i>Figure I.3 : liste des différents types de ciments courants normalisés [7].....</i>	<i>11</i>
<i>Figure I-4 : Béton fortement armé concassé avec un broyeur.....</i>	<i>12.</i>
<i>Figure I-5 : Éventail de grosseurs de granulats utilisés dans le béton.....</i>	<i>13</i>
<i>Figure. I-6 : courbes granulométriques de deux sables de dunes de deux régions de Sahara.....</i>	<i>15</i>
<i>Figure I-7 : Défloculation du ciment par l'action des superplastifiants.....</i>	<i>18</i>
<i>Figure I-8 : Courbes d'évolution du seuil de cisaillement (début de prise) en fonction de la présence d'un accélérateur ou d'un retardateur de prise [11].....</i>	<i>19</i>
<i>Figure I-9 : Courbes illustrative de l'essai d'affaissement au cône d'Abrams.....</i>	<i>23</i>
<i>Figure I-10 : Abaque permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment en fonction du rapport E/C et de l'ouvrabilité désirée (affaissement au cône d'Abrams) [2].....</i>	<i>26</i>
<i>Figure I-11 : Fuseaux préférentiels pour la granularité des sables pour béton selon la méthode de Dreux Gorisse [2].....</i>	<i>27</i>
<i>Figure I-12 : Courbe du mélange optimum selon la méthode de Dreux Gorisse [2].....</i>	<i>27</i>
<i>Figure I.13 : les quatre principales sortes de fissures précoces susceptibles d'affecter un ouvrage en béton.....</i>	<i>33</i>
<i>Figure I.14 : Exemple de fissuration par retrait plastique d'un revêtement de façade avec un pas de maillage de l'ordre de un à trois décimètres [14].....</i>	<i>35</i>
<i>Figure. II.1 : Sable de Sahara utilisé.....</i>	<i>41</i>
<i>Figure II-2 : Courbes granulaires du sable de Sahara, sable 0/3, gravier 3/8 et gravier 8/15.....</i>	<i>42</i>
<i>Figure II-3 : Courbes granulaires des 3 granulats, la courbe brisée et les lignes de partage.....</i>	<i>45</i>
<i>Figure III. 1 : Corrélation affaissement béton et étalement MBE.....</i>	<i>49</i>
<i>Figure III.2 : sable 02/04 pour le mortier à pâte équivalente pâte du béton.....</i>	<i>50</i>
<i>Figure. III.3 : Courbe granulaire du sable 02/04 utilisé.....</i>	<i>51</i>
<i>Figure IV.1 : Préparation du matériel nécessaire pour le gâchage manuel des bétons.....</i>	<i>55</i>
<i>Figure IV.2 : éprouvette en cours de l'écrasement.....</i>	<i>55</i>
<i>Figure IV.3 : à gauche : en avant plan éprouvettes 10×20 pour la résistance à 28 jours, en arrière plan éprouvette 16×32 pour le ressuage ; à droite : prélèvement d'eau de ressuage à la seringue...56.</i>	
<i>Figure IV.4 : moules après remplissage, apparence des dalles après décoffrage.....</i>	<i>57</i>

<i>Figure IV.5 : moule disposé à l'étuve pour le séchage accéléré.....</i>	<i>57</i>
<i>Figure IV.6 : Préparation de la gâchée pour un mortier.....</i>	<i>58</i>
<i>Figure IV.7 : La fabrication des moules en bois pour les dalles de mortiers.....</i>	<i>59</i>
<i>Figure IV.8 : à gauche moules à l'étuve, au milieu au laboratoire, à droite à l'extérieur du laboratoire.....</i>	<i>59</i>
<i>Figure IV.9 : Paramètres de composition des formules de béton et de mortiers.....</i>	<i>60</i>
<i>Figure IV.10 : résistances à la compression des bétons à 28 jours avec la barre d'erreur en écart type de ± 1.21 MPa.....</i>	<i>63</i>
<i>Figure IV.11 : résistances à la compression des bétons à 28 jours avec la barre d'erreur en écart type de ± 1.21 MPa.....</i>	<i>63</i>
<i>Figure IV.12 : Mesures de ressuage exprimées en %, après trois heures de la gâchée.....</i>	<i>64</i>
<i>Figure IV.13 : Mise en évidence des fissures en appliquant l'encre à écrire en surface : (droite zone bien fissurée, droite zone faiblement fissurée).....</i>	<i>65</i>
<i>Figures IV.14 : Représentation des résultats de fissuration exprimée en pourcentage pour deux environnements d'exposition (SP : sans protection ; AP : avec protection).....</i>	<i>66</i>
<i>Figures IV.15 : Représentation des résultats de fissuration exprimée en pourcentage pour deux environnements d'exposition (SAs : sans armatures ; AAs : avec armatures).....</i>	<i>66</i>
<i>Figures IV.16 : Représentation des résultats de fissuration exprimée en pourcentage pour deux environnements d'exposition (décoffrage à 24 heures, décoffrage à 7 jours).....</i>	<i>67</i>
<i>Figure IV.17 : Résistances à la compression des mortiers à 28 jours avec la barre d'erreur en écart type de $\pm 0,88$ MPa.....</i>	<i>70</i>
<i>Figure IV.18 : Mesures de ressuage des mortiers exprimées en %, après trois heures de la gâchée.....</i>	<i>71</i>
<i>Figure IV.19 : Représentation des résultats de fissuration exprimée en pourcentage pour deux environnements d'exposition (à l'intérieur du laboratoire ; à l'extérieur du laboratoire).....</i>	<i>72</i>
<i>Figure V.1 : Corrélation entre les résistances à 28 jours des bétons et celles des mortiers.....</i>	<i>74</i>
<i>Figure V.2 : Diagonale de corrélation entre les résistances des bétons et les celles des mortiers....</i>	<i>75.</i>
<i>Figure V.2 : Diagonale de corrélation entre les taux de fissurations moyens des bétons et ceux des mortiers.....</i>	<i>77</i>

Liste des tableaux

<i>Tableau I.1 : Comportement à l'hydratation des différents constituants du clinker [6].....</i>	<i>7</i>
<i>Tableau I.2 : évolution de l'hydratation et transformation de la pâte de ciment dans le temps [3]....</i>	<i>8</i>
<i>Tableau I.3 : liste des différents types de ciments courants normalisés [7].....</i>	<i>9</i>
<i>Tableau I.4 : Classes de consistances des bétons ordinaires.....</i>	<i>23</i>
<i>Tableau I.5 : Classes de résistances des bétons.....</i>	<i>23</i>
<i>Tableau I.6 : Coefficients d'appréciation de la qualité K_G des granulats.....</i>	<i>25</i>
<i>Tableau I.7 : Causes générales de fissuration précoces, mécanismes physiques et paramètres impliqués pour les bétons courants [14].....</i>	<i>32</i>
<i>Tableau II.1.Composition minéralogique du ciment.....</i>	<i>40</i>
<i>Tableau II.2 : Masse volumique apparente et absolue des granulats.....</i>	<i>43</i>
<i>Tableau II.3 : Absorption des granulats.....</i>	<i>43</i>
<i>Tableau II-4 : Compositions des différentes formules de béton à étudier.....</i>	<i>45</i>
<i>Tableau II-5 : Quelques propriétés supplémentaires des bétons formulés.....</i>	<i>46</i>
<i>Tableau III.1 : Masses volumique des différents granulats.....</i>	<i>52</i>
<i>Tableau III.2 : formulation des mortiers à partir des bétons.....</i>	<i>52</i>
<i>Tableau III.3 : Quelques propriétés supplémentaires des bétons formulés.....</i>	<i>53</i>
<i>Tableau IV.1 : dosage en superplastifiant et consistance des différents bétons.....</i>	<i>60</i>
<i>Tableau IV.2 : Résultats des résistances à 28 jours, et pesées des éprouvettes des bétons.....</i>	<i>61</i>
<i>Tableau VI.3 : Masses volumiques des bétons durcis.....</i>	<i>62</i>
<i>Tableau IV.4 : Résistances moyennes des bétons et calcul d'écarts types (MPa).....</i>	<i>62</i>
<i>Tableau IV.5 : mesures des remontées d'eau et calculs de ressuage des bétons.....</i>	<i>64</i>
<i>Tableau IV.6 : valeurs du taux de fissuration des bétons exprimés en %.....</i>	<i>65</i>
<i>Tableau IV.7 : Résultats des résistances à 28 jours, et pesées des éprouvettes des mortiers.....</i>	<i>68</i>
<i>Tableau IV.8 : Masses volumiques des Mortiers durcis.....</i>	<i>69</i>
<i>Tableau IV.9 : Résistances moyennes des mortiers et calcul d'écarts types (MPa).....</i>	<i>69</i>
<i>Tableau IV.10 : mesures des remontées d'eau et calculs de ressuage des mortiers.....</i>	<i>70</i>
<i>Tableau IV.11: valeurs du taux de fissuration des mortiers exprimés en %.....</i>	<i>72</i>
<i>Tableau V.1: Taux de fissuration des bétons et mortiers conservés sous les mêmes conditions ; et taux de fissurations relatifs aux moyennes de fissuration des bétons puis des mortiers.....</i>	<i>76</i>

SOMMAIRE

INTRODUCTIONS GENERALE

CHAPITRE 1 : (PARTIE 1) ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1- Introduction

I.2 Les constituants d'un béton

I.2.1 Ciment portland

I.2.1.1- Fabrication du ciment Portland (Clinker)

I.2.1.2- Hydratation du ciment

I.2.1.3- Prise et durcissement des constituants de clinker

I.2.1.4- Prise et durcissement du ciment

I.2.1.5- Paramètres influençant les réactions d'hydratation

I.2.1.6- Les différents types de ciments courants

I.2.2- Les granulats

I.2.2.1-Provenance des granulats

I.2.2.2- Propriétés des granulats

I.2.3- Cas du sable de Sahara

I.2.4- Les adjuvants

I.2.4.1- Classes des adjuvants

I.2.4.2- Les adjuvants modifiant l'ouvrabilité du béton

I.2.4.3- Les adjuvants modifiant la prise et le durcissement

I.2.4.4- Les adjuvants modifiant certaines propriétés du béton

I.2.5- Les additions minérales

I.2.6- L'eau de gâchage du béton

I.3 Classification des bétons

I.3.1- Classification selon les masses volumiques

I.3.2- Classification selon la consistance (ouvrabilité)

I.3.3- Classification selon la résistance mécanique

I.3.4- Classification selon l'exposition & actions dues à l'environnement

I.4- Composition des bétons

I.4.1 Méthode de Bolomey

I.4.2- Méthode de Dreux Gorisse

I.4.2.1 Calcul du dosage en ciment

I.4.2.2 Calcul du dosage en eau

I.4.2.3- Calcul du dosage en granulats

I.5- Propriétés essentielles des bétons

I.5.1- Propriétés de résistance des bétons

I.5.2- Le béton armé

I.5.3- Les bétons de fibres

CHAPITRE 1 : (PARTIE 2) LA FISSURATION DES BETONS

I.6- La fissuration précoce des bétons

I.6.1- Généralités

I.6.2- Fissuration précoce de la pâte de ciment

I.6.3- Causes générales de fissuration précoce

I.6.3.1- Le ressuage

I.6.3.2- Le retrait total

I.6.3.3- Le retrait plastique

I.6.3.4- Le retrait de dessiccation

I.6.3.5- Le retrait thermique

I.6.3.5- Le retrait d'auto-dessiccation (endogène)

I.6.4- Principaux facteurs agissant sur la fissuration précoce

I.6.4.1- Facteurs agissant sur le tassement et donc le ressuage

I.6.4.2- Facteurs agissant sur le retrait plastique

I.6.4.3- Facteurs agissant sur la contraction thermique après prise

I.6.4.4- Facteurs agissant sur le retrait d'auto-dessiccation

I.6.5- Comment éviter ou contrôler le retrait ?

I.6.6- Conclusion

CHAPITRE II : CARACTERISATION DES MATERIAUX ET COMPOSITION DES BETONS

II.1- Introduction

II.2- Définition des Matériaux et caractérisation

II.2.1- Matériaux de base utilisés

II.2.1.1- Ciment

II.2.1.2- Les granulats

II.2.1.3- Adjuvant (superplastifiant)

II.2.1.4- Eau de gâchage

II.2.1.5- Les armatures

II.2.2- Caractérisation des granulats

II.2.2.1- Echantillonnage (NF P 18-553)

II.2.2.2- Analyse granulométrique (EN 933-1 et EN 933-2)

II.2.2.3- Module de finesse du sable

II.2.2.4- Masses volumiques et Coefficient d'absorption

II.3- Formulation des bétons

II.3.1- Définition des proportions relatives des composants du squelette granulaire

II.3.2- Les formulations des bétons utilisés

CHAPITRE III : LE MORTIER COMME OUTIL D'AIDE A LA FORMULATION DES BETONS.

III.1- Définition d'un mortier

III.2- Pourquoi les mortiers ?

III.3- Historique

III.4- Quels mortiers pour notre étude ?

III.5- Principe de calcul du mortier à pâte équivalente pâte du béton

III.6- Pourquoi le sable 2/4 ?

III.7- Programme expérimental des mortiers

III.7.1- Matériaux de base utilisés

III.7.2- Composition des mortiers à pâtes équivalentes pâtes des bétons :

III.8- Conclusion

CHAPITRE IV : RESULTATS ET EXPLOITATION DES RESULTATS SUR BETONS ET MORTIERS

IV.1 INTRODUCTION

IV.2- MODES OPERATOIRES ET ESSAIS

IV.2.1- Confection des bétons et essais sur bétons

IV.2.1.1- Préparation de la gâchée

IV.2.1.2- Essai d'affaissement et d'étalement

IV.2.1.3- Essais de résistance à 28 jours pour les bétons

IV.2.1.4- Essais de ressuage

IV.2.1.5- Essais de fissuration

IV.2.2- Confection des mortiers et essais sur mortiers

IV.2.2.1- Préparation d'une gâchée de mortier

IV.2.2.2- Essais de résistance à 28 jours des mortiers

IV.2.2.3- Essais de ressuage

IV.2.1.4- Essais de fissuration

IV.3- RESULTATS DE CARACTERISATION DES BETONS ET DISCUSSIONS

IV.3.1- paramètres de composition des bétons et mortiers

IV.3.2- Résultats des bétons

IV.3.2.1- Essai d'affaissement et d'étalement

IV.3.2.2- résultats de résistances à 28 jours

IV.3.2.3- Résultats de ressuage

IV.3.2.4- Résultats de Fissurations

IV.3.3- Résultats des Mortiers

IV.3.3.1- Résultats de résistances à 28 jours

IV.3.3.2- Résultats de ressuage

IV.3.3.3- Résultats de Fissurations

IV.4.- Conclusions

CHAPITRE V : CORRELATION ENTRE LES RESULTATS DES BETONS ET CEUX DES MORTIERS.

V.1- Introduction

V.2- Corrélation entre les résultats des bétons et ceux des mortiers

V.2.1- Corrélation entre les résistances des bétons et celles des mortiers

V.2.2- Corrélation entre les résultats de Fissuration de béton et ceux des mortiers

IV.3- Conclusions

CONCLUSIONS GENERALES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

ANNEXE 1

A1.1- ECHANTILLONNAGE (NF P 18- 553)

A1.2- ANALYSE GRANULOMETRIQUE (EN 933-1 ET EN 933-2)

A1.3- ABSORPTION (NF P 18-555)

ANNEXE 2 : RESULTATS DE CARACTERISATION EXPERIMENTALE DES GRANULATS

ANNEXE 3 : FICHE TECHNIQUE DE L'ADJUVANT

INTRODUCTIONS GENERALE

Le béton est le matériau de construction le plus utilisé au monde. A ces débuts, le béton traditionnel est un mélange de trois produits : Granulats, ciment et eau. Au 20^{ème} siècle, le béton s'est développé considérablement, notamment avec l'évolution des techniques de sa production et l'arrivée des adjuvants, des additions minérales, des fibres.... Le béton a atteint des performances record en résistance à la compression (plus de 120 MPa), mais aussi sur l'aspect architectural. Le béton est le meilleur matériau de construction à meilleur rapport qualité/prix.

Le béton présente toujours quelques défauts en terme de résistance à la traction, aux chocs ; mais aussi en terme de durabilité. L'introduction des armatures a amélioré les propriétés des bétons, au point que ces dernières années on a tendance à introduire des pourcentages d'armatures non négligeable, soit par nécessité, soit par mesure de sécurité.

La fissuration reste l'ennemi n°1 du béton d'hier et d'aujourd'hui, et c'est l'étude qui attire le moins de gens pour la difficulté particulière qu'elle présente.

La fissuration est un phénomène de chantier qui dépend de phénomènes diverses analysables en laboratoire (variation de volume, conditions aux limites, conditions d'exposition au jeune âge et à long terme) mais aussi de tous les aléas qui surviennent sur chantier. Pour l'étudier, il faut faire à la fois des essais de laboratoire et des constatations sur chantier, puis former un tout cohérent avec ces deux sources d'informations.

La recherche sur la fissuration est nécessairement diversifiée, car la fissuration est un signe de plusieurs dommages possibles. En effet, Les fissures peuvent résulter de sollicitations mécaniques (chargements, chocs) ou de retraits, gonflement d'origines physiques, chimiques, physico-chimiques...

La fissuration au jeune âge (précoce) est une étude très compliquée par l'interaction des phénomènes physico-chimiques qui se produisent au jeune âge. Par exemple, à l'état frais, l'évaporation de l'eau interne augmente la tension de l'eau dans les capillaires, ralentit l'hydratation du ciment, modifie la structure des cristaux formés...

Par ailleurs, ces dernières décennies, avec le souci du réchauffement planétaire, mais aussi pour des soucis de la protection de l'environnement, le prix des matières premières composants le béton ne cessent d'augmenter ; soit pour la non disponibilité des matières premières ; soit par les prix de revient qui augmentes, (prix des aciers, ciment mais aussi du transport), par conséquent les prix des bétons commencent à s'envoler.

Pour ces différents contraintes, les laboratoires de recherches continus de s'investir, notamment en terme :

Durabilité : pour produire des bétons moins sensibles aux agressions chimiques, et donc des structures fonctionnelles sur des durées de vies de plus en plus longues ;

Améliorer les propriétés des bétons en terme de résistance à la traction et aux chocs pour limiter le plus possible le développement de la fissuration du béton ;

Innover en terme de produits à introduire dans le béton en essayant de respecter les plus possible l'environnement

...

Dans notre étude on s'est fixé quelques objectifs que l'on peut résumer comme suit :

- Essayer de démarrer un sujet de recherche sur les phénomènes régissant la fissuration précoce des bétons. Toute fois, Vu le manque d'équipement de mesures des différentes origines des la fissuration du béton (retraits), dans notre humble étude on s'est fixé comme objectif d'étudier la fissuration totale des plusieurs formulations de bétons et de mortiers. Ces derniers, sont sujets à des conditions de conservations différentes (variation de la température d'exposition, protection contre l'évaporation et non, introduction d'armatures et non) ;
- Le deuxième objectif fixé dans cette étude est de trouver une composition en mortier qui reproduirait d'une manière fidèle les propriétés de jeune âge du béton en terme de fissuration et surtout de retrait. L'objectif dans le développement de ce mortier est surtout de donner les moyens au laboratoire de recherche d'alléger les essais nécessaires à l'étude de la fissuration du béton en utilisant des mortiers. On effet, les essais qui se font habituellement pour l'étude du retrait se fonds sur des pâtes composants les bétons, il est difficile alors d'en conclure sur les bétons ;
- Le troisième objectif est purement environnemental ; dans cette étude on s'est intéressé au sable de Sahara comme une solution alternative aux problèmes d'extraction des sables de rivières ou bien des carrières.

Pour le cas de ce dernier point, l'extraction des granulats alluvionnaire (rivières et oueds) provoque la baisse de la nappe phréatique et puis le séchage des sols au alentour des ces rivières. Procédés d'extraction ont des incidences négatives sur la faune et la flore qui dépendent de ces massifs de terres, et des ces eaux qui finissent par disparaître. En Algérie, la législation est devenue très sévère contre toute extraction abusive des granulats de rivière et des oueds.

Pour ces raisons, environnementales et économiques, il est devenu indispensable de trouver de nouvelles sources en granulats qui peuvent apporter des solutions alternatives. Le sable de Sahara semble être une des solutions. Le sable de Sahara représente une ressource inépuisable et à bon prix en Algérie.

L'utilisation du sable de Sahara pour la formulation des bétons offre une économie sur l'utilisation d'une grande quantité de ciment et d'agent de viscosité. En effet, pour la formulation des bétons nous avons besoin d'une grande quantité de particules fines pour assurer l'ouvrabilité requise dans les nouveaux bétons. Habituellement, on utilise pour cela une grande quantité de ciment et un agent de viscosité. Le sable de Sahara offre donc une alternative très intéressante économiquement et sur le plan de résultats de formulation.

Ce présent mémoire est organisé de la manière suivante :

Après l'introduction générale, ce présent document est composé de cinq chapitres et une conclusion générale.

Le premier chapitre est composé de deux parties :

Partie 1 : nous avons fait un rappel des définitions fondamentales sur les bétons et les méthodes de formulation des bétons.

Partie 2 : nous avons discuté les origines de la fissuration précoces des bétons ; et rappelé les définitions sommaires des différents retraits des pâtes de ciment.

Au deuxième chapitre : nous avons présenté :

- les résultats de caractérisation des matériaux utilisés pour la composition de nos bétons et mortiers ;
- nous avons illustré la méthode de formulation des bétons utilisés ;
- nous avons donné les compositions des différentes formules de bétons étudiées.

Au troisième chapitre :

- Nous avons discuté pourquoi le mortier comme outil d'aide à la formulation des bétons.
- nous avons détaillé les étapes de la méthode proposée pour la formulation des mortiers à pâte équivalente pâte du béton
- nous avons donné les compositions des différentes formules de mortiers étudiées.

Au Quatrième chapitre :

- Dans ce chapitre sont décrits les modes opératoires pour les essais réalisés sur les différentes formules de bétons et de mortiers.
- Nous avons, par la suite, présenté les résultats de caractérisation des résistances à la compression à 28 jours, ceux du ressuage, et ceux la fissuration précoce des bétons et des mortiers.

Au cinquième chapitre : nous avons fait une étude comparative entre les différents résultats obtenus sur les bétons et ceux obtenus sur mortiers.

En dernier, nous avons récapitulés nos conclusions sur le travail menés et proposé des perspectives.

CHAPITRE 1 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Partie 1

I.1- Introduction

Le béton varie en fonction de ses composants : nature des granulats, des adjuvants, du ciment, mais aussi en fonction de la mise en œuvre et du traitement de surface. Ainsi, en combinant ces différents produits on peut produire des bétons avec des propriétés très variables : en résistances, isolation thermique, résistance au feu, isolation phonique, durabilité. On peut également se permettre avec le béton des réalisations de formes très complexes, de différentes teintes et textures.

Qu'est ce qu'un béton ?

Le béton est un mélange de plusieurs composants : ciment, eau, granulats et le plus souvent d'adjuvants. Ces composants sont très différents, leurs masses volumiques vont, dans les bétons courants, de 1 t/m³ pour l'eau à 3 t/m³ pour le ciment. Les dimensions de leurs grains s'échelonnent de 0,5 µm pour les grains les plus fins du ciment à 30 mm pour les grains des gravillons.

Pour utiliser au mieux le béton, il faut bien connaître ses propriétés : à l'état frais, alors qu'il est plastique on peut le travailler ; à l'état durci, alors que sa forme ne peut plus être modifiée mais que ses propriétés continuent à évoluer durant de nombreux mois, voir des années.

Au cas par cas, en fonction de la disponibilité des matières premières, de la nature de l'ouvrage, des moyens de mise en œuvre, on rédige un cahier des charges qui englobera la liste des critères auxquels doit répondre le béton à fabriquer.

I.2 Les constituants d'un béton

I.2.1 Ciment portland

Le ciment portland est un liant hydraulique capable de faire prise dans l'eau. Il se présente sous l'aspect d'une poudre très fine de couleur grise (ciment ordinaire) ou blanche (ciment blanc). Mélangé à l'eau, le ciment forme une pâte qui durcit progressivement dans le temps [1, 2, 3].

I.2.1.1- Fabrication du ciment Portland (Clinker)

Le **clinker** composant de base du ciment portland est obtenu à partir de la cuisson d'un mélange de 80 % de Calcaire (CaCO_3) et près de 20% d'Argile ($\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$). Selon l'origine des matières premières, ce mélange peut être corrigé par apport de bauxite, oxyde de fer ou autre matériaux fournissant le complément d'alumine et de silice requis [4].

Il existe 4 méthodes de fabrication du ciment qui dépendent essentiellement du matériau:

- Fabrication du ciment par voie humide (la plus ancienne).
- Fabrication du ciment par voie semi-humide (en partant de la voie humide).
- Fabrication du ciment par voie sèche (la plus utilisée).
- Fabrication du ciment par voie semi-sèche (en partant de la voie sèche).

La fabrication par voies sèche est la plus utilisée car elle est économique en énergie. Le processus de fabrication du ciment est décrit dans la figure 1 suivante.

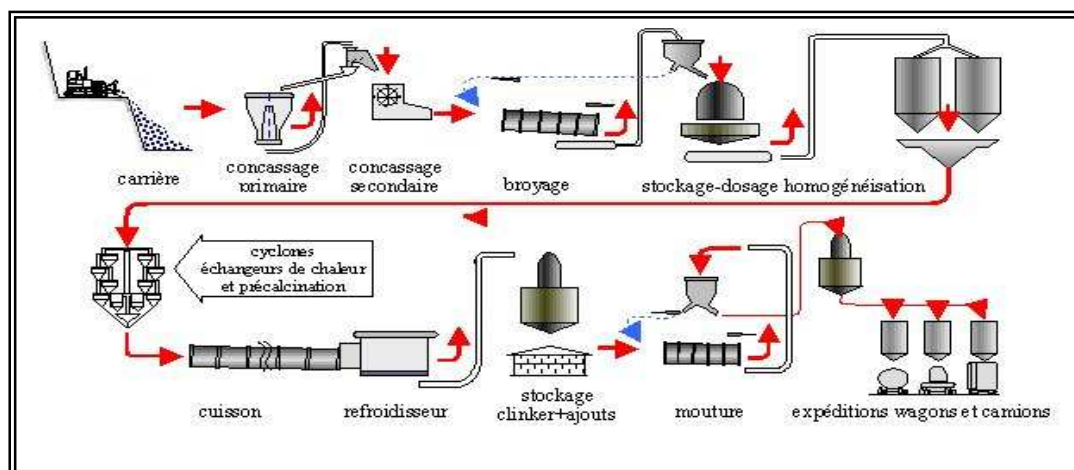


Figure I-1 : étapes de fabrication du ciment, de la carrière à l'expédition [4,5].

Les étapes de fabrication du ciment peuvent être résumées comme suit [4,5] :

Etape 1 : Extraction et préparation des matières premières ;

Extraction : Les matières premières sont extraites de carrières généralement à ciel ouvert. Les blocs obtenus sont réduits, dans des concasseurs situés généralement sur le lieu même de l'extraction en éléments d'une dimension maximale de 50 mm.

Préparation de la matière première : Les grains de calcaire et d'argile sont intimement mélangés par broyage ou délayage, dans des proportions définies, en un mélange très fin le « **cru** ». A cette étape, des corrections de composition peuvent être effectuées en incorporant en faible proportion de la Bauxite, oxyde de fer...

Le cru est préparé automatiquement sous forme de granules (voie sèche ou semi-sèche) ou de pâte (voie humide ou semi-humide) en fonction de la technique utilisée.

Etape 2 : Cuisson « cru » : matière première pour l'obtention du clinker ;

Un échangeur de chaleur comportant une série de 4 à 5 cyclones dans lesquels la poudre déversée à la partie supérieure progresse jusqu'à l'entrée du four. Elle se réchauffe au contact des gaz chauds en sortant de ce four, et se décarbonate en partie, la poudre est portée à une température de 1000 °C. Les différentes transformations pendant cette étape sont :

1. Zone de séchage (0 à 100 °C) $\Rightarrow$ Elimination de l'eau libre
2. Zone de préchauffage (100 à 200°C) $\Rightarrow$ Elimination de l'eau liée chimiquement.
3. Zone de calcinations : décomposition de l'argile de l'alumine et du calcaire (en MgO , Al_2O_3 , SiO_2 , CaO ...)
4. Zone de formation des minéraux et de clinkerisation.
Entrée des éléments formés dans le four rotatif (1 à 3 tours par minutes) horizontale (avec une légère inclinaison). Le four est en tôle d'acier avec un revêtement réfractaire intérieur. Il a 60 à 90 m de long et 4 à 5 m de diamètre. La matière pénètre à l'amont du four où s'achève la calcination et progresse jusqu'à la zone de clinkerisation (environ 1450°C). Au final on obtient les produits suivants :
 - a. les silicates bicalciques : $2\text{CaO}.\text{SiO}_2$ (**C₂S**)
 - b. les aluminates tricalciques : $3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$ (**C₃A**)
 - c. les alumino-ferrites quadricalciques : $4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$ (**C₄AF**)
 - d. les silicates tricalciques $3\text{CaO}.\text{SiO}_2$ (**C₃S**)
5. Zone de refroidissement dans le four

Etape 3 : Broyage du clinker avec ajout du gypse pour l'obtention du ciment.

A la fin de la cuisson, la matière refroidie se présente sous forme de granules qui constituent le **Clinker**. Le clinker est finement Broyé on lui associe alors près de 5 % de Gypse pour régulariser la prise. Le produit ainsi obtenu est du ciment Portland. Le clinker est d'une prise rapide, le rôle du gypse est de retarder le début de prise du clinker.

Une fois prêt, le ciment est stocké dans des silos. Le ciment est par la suite conditionné soit dans des sacs ou des conteneurs fermés en fonctions des commandes.

Composition du clinker

La composition chimique du clinker est la suivante :

Oxyde de calcium	[CaO]	62 à 68 %
Bioxyde de silicium	[SiO ₂]	21 à 24 %
Alumine	[Al ₂ O ₃]	4 à 8 %
Oxyde de fer	[FeO ₃]	2 à 5 %

Note : les autres catégories de ciment sont obtenues en ajoutant d'autres constituants tels que le laitier granulé de haut fourneau, cendres volantes, schistes calcinés, calcaire, fumées de silice, fillers...

I.2.1.2- Hydratation du ciment

Au contact de la poudre de ciment et de l'eau, les réactions d'hydratation se développent, il se produit alors une cristallisation qui aboutit à un nouveau système de constituants hydratés stables avec formations de cristaux en aiguilles plus au moins enchevêtrées produisant la prise.

Les réactions d'hydratation sont « **exothermique** », elles s'accompagnent d'un dégagement de chaleur plus au moins important selon les ciments et la rapidité de la prise [2,6].

Les hydrates formés sont composées de silicates de calcium hydratés (C-S-H) à 70 %, de Portlandite Ca(OH)₂ à 20 % et d'ettringite à 10 %. Le processus des réactions chimiques des constituants du ciment peut être décrit comme suit :

- Dissolution des constituants du ciment (clinker) dans l'eau ;
- Formation d'une solution interstitielle sursaturée en différents hydrates
- Précipitation et cristallisation de ces hydrates dans les vides inter-granulaires.

I.2.1.3- Prise et durcissement des constituants de clinker

Pour mieux comprendre les propriétés des ciments, il est intéressant de comprendre comment réagit en présence d'eau chacun des constituants anhydres du clinker pris individuellement.

N°	Constituants	comportement du constituant pur	chaleur dégagée
1	C ₃ S	Fait prise et durcit rapidement haute résistance atteinte à court terme	120 cal /gr
2	C ₂ S	Réagit lentement Haute résistance atteinte à long terme	62 cal /gr
3	C ₃ A	prise de façon très désordonnée et rapide faible résistance	207 cal /gr
4	C ₄ AF	Faible résistance responsable de la couleur grise du ciment.	100 cal /gr

Tableau I.1 : Comportement à l'hydratation des différents constituants du clinker [6].

Le graphique ci-dessous montre le développement des résistances dans le temps des constituants purs du ciment portland.

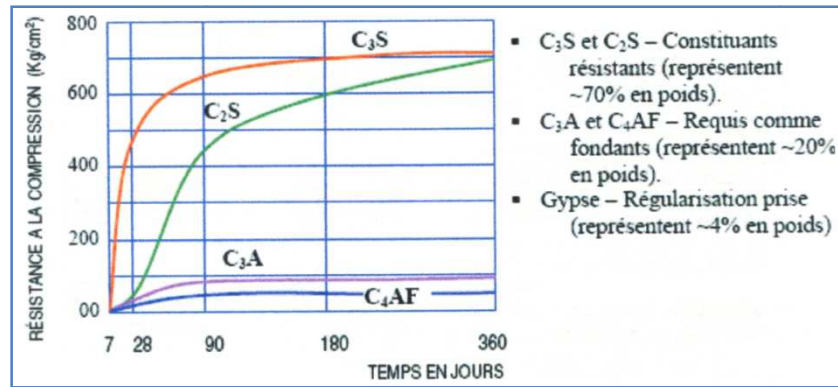


Figure I-2 : développement de la résistance des différents constituants du clinker [2,6].

I.2.1.4- Prise et durcissement du ciment

Cinétique des réactions d'hydratation : les réactions d'hydratation se font en quatre phases :

- Phase initiale : au cours de laquelle le silicate tricalcique se dissout superficiellement pour former un monosilicate de calcium hydraté et l'ettringite ;
- Phase dormante : au cours de laquelle la pâte reste fluide, les réactions précédentes se poursuivant moins rapidement pendant une durée de 2 à 3 heures ;
- Phase de prise : au cours de laquelle la pâte acquiert une certaine consistance due à l'interpénétration des cristaux ;
- Phase de durcissement : qui se développe environ 8 heures après le début de l'hydratation et qui se poursuit pendant des années à une vitesse de plus en plus lente et dont le résultat est l'augmentation de la résistance mécanique et de la compacité.

0 minutes	de 1 à 5 minutes	de 5 à 30 minutes	de 30 minutes à 2 heures	de 2 heures et plus
Grains de ciments anhydres	Introduction de l'eau et malaxage. Formation immédiate de cristaux d'hydrates à la périphérie des grains.	Période dormante. l'hydratation se poursuit, mais lentement tant qu'il reste suffisamment de gypse.	Début de prise : le gypse est consommé, l'hydratation s'accélère. Des ponts d'hydrates commencent à relier les grains entre eux.	Fin de prise : les grains sont tous solidarisés. la poursuite de l'hydratation se traduit par le Début de durcissement.

Tableau I.2 : évolution de l'hydratation et transformation de la pâte de ciment dans le temps [3].

Les durées indiquées dans ce tableau sont indicatives. En réalité, elles changent en fonction de la nature du ciment, des conditions d'exposition de la pâte, de la présence d'additifs et d'adjuvants qui influent les cinétiques des réactions d'hydratation.

I.2.1.5- Paramètres influençant les réactions d'hydratation

Les réactions d'hydratation sont liées à de nombreux paramètres tels :

- La nature du ciment
- la finesse du ciment, plus le ciment est fin plus le temps de prise est court ;

- La température ambiante, ainsi :
 - o en temps chaud (température ambiante > 30 °C), les réactions chimiques s'accélèrent.
 - o en temps froid (température ambiante < 10 °C), les réactions chimiques ralentissent.
- la présence de matières organiques dans l'eau ou dans les constituants du béton ;
- l'excès d'eau de gâchage a une action retardatrice sur la prise.

I.2.1.6- Les différents types de ciments courants

Les ciments courants ont pour constituant principal le clinker (norme ENV. 197-1). Au Clinker sont ajoutées, suivant la nature du ciment voulu, les additions minérales de différentes natures.

- Laitier granulé de haut fourneau (S)
- Pouzzolanes naturelles (Z)
- Cendres volantes (V et W)
- Fumées de silice (D)
- Calcaire (L)
- Schistes calcinés (T)
- constituants secondaires

Le tableau suivant donne la liste des différents types de ciments courants normalisés.

Désignations	Types de ciment	Teneur en clinker	Teneur en % de l'un des constituants (laitier, cendres, fumées de silice, pouzzolanes, calcaire, schistes)	Teneur en constituants secondaires
CEM I (CPA)	Ciment portland	95 à 100 %	/	0 à 5 %
CEM II/A (CPJ)	Ciment portland composé	80 à 94 %	de 6 à 20 % de l'un quelconque des constituants, sauf dans les cas où le constituant est des fumées de silice auquel cas la proportion est limitée à 10 % (*) ; de 21 à 35 % avec les mêmes restrictions que ci-dessus.	0 à 5 %
CEM II/B (CPJ)		65 à 79 %		
CEM III/A (CHF) CEM III/B (CHF) CEM III/C (CLK)	Ciment de haut-fourneau	35 à 64 % 20 à 34 % 5 à 19 %	36 à 65 % de laitier de haut-fourneau 66 à 80 % de laitier de haut-fourneau 81 à 95 % de laitier de haut-fourneau	
CEM IV/A (CPZ)	Ciment pouzzolanique	65 à 90 %	10 à 35 % de pouzzolanes, cendres siliceuses ou fumées de silice, ces dernières étant limitées à 10 %. 36 à 55 % comme si dessus	0 à 5 %
CEM IV/B (CPZ)		45 à 64 %		
CEM V/A (CLC)	Ciment au laitier et aux cendres	40 à 64 %	18 à 30 % de laitier de haut-fourneau et 18 à 30 % de cendres siliceuses ou de pouzzolanes. 31 à 50 % de chacun des constituants comme ci-dessus	0 à 5 %
CEM V/A (CLC)		20 à 39 %		

Tableau I.3 : liste des différents types de ciments courants normalisés [7].

Les ciments sont notés CEM et numérotés de 1 à 5 en chiffres romains dans leur notation européenne, l'ancienne appellation est indiquée entre parenthèse. Pour chaque ciment sont indiqués les désignations propres et les pourcentages respectifs de leurs constituants.

Il existe plusieurs autres ciments, ciments spéciaux, décrits par d'autres normes, généralement utilisés pour des ouvrages spéciaux ou dans des conditions spéciales. Parmi d'autres, nous avons :

- Ciment prompt naturel (**CNP**).
- Ciment alumineux fondu (**CA**)
- ciment de laitier à la chaux (**CLX**)
- Ciment à maçonner (**CM**)
- ...

Classes de résistance des ciments courants

La résistance normale d'un ciment est la résistance mécanique à la compression mesurée à 28 jours conformément à la norme NF EN 196 – 1 et exprimée en MPa. Pour chaque type de ciment, trois classes de résistance sont définies en fonction de la résistance normale à 28 jours, ces classes sont notées, classe 32,5, classe 42,5 et classe 52,5.

Pour chaque classe de résistance normale, deux classes de résistance au jeune âge sont définies, une classe avec une résistance au jeune âge ordinaire et une classe avec une résistance au jeune âge élevée (indiquée par la lettre R).

I.2.2- Les granulats

On appelle granulats, tout matériau inerte provenant de l'érosion des roches ou de leur broyage, utilisé dans la construction, et entrant dans la composition des mortiers et bétons. Le terme granulat est étendu à des granulats artificiels utilisés dans la construction.

Les bétons sont composés à 75% de leurs volumes de granulats, qui sont eux liés entre eux par une pâte de ciment. Il n'est donc pas étonnant que les performances des bétons dépendent des propriétés des granulats qui les composent.

Les granulats utilisés pour réaliser un béton doivent répondre à des exigences et des critères de qualité et de régularité et doivent permettre aussi, d'une part, de remplir correctement et en totalité le moule ou le coffrage et, d'autre part, d'assurer un enrobage correct des armatures [3, 5].

I.2.2.1-Provenance des granulats

D'après leur provenance ou leur fabrication on distingue :

A- Les granulats naturels

Les granulats naturels sont issus de roches meubles ou massives, n'ayant subi aucune transformation autre que mécanique (concassage, broyage, criblage et lavage). Les roches meubles (alluvionnaires) sont exploitées le long des fleuves et des rivières. Les roches massives calcaires constituent les bassins sédimentaires et les chaînes récentes; les roches massives éruptives constituent les massifs anciens.

Les granulats de roche meuble (matériaux alluvionnaires)

La forme de ces granulats, dits aussi roulée, est acquise par l'érosion. Ces granulats sont lavés puis criblés pour obtenir différentes classes granulaires. On peut trouver différentes roches selon la région d'origine, les granulats utilisés pour le béton sont le plus souvent siliceux, calcaires ou silico-calcaires. Ils sont exploités à proximité des cours d'eau, dans la nappe ou au-dessus de la nappe ou sur des fonds marins peu profonds. L'extraction est donc réalisée en fonction du gisement à sec ou dans l'eau.

Les granulats de roche massive, (de carrière)

En plaine sur un plateau ou en montagne au bord d'une falaise, la carrière peut être implantée, par abattage et concassage on obtient des granulats de formes angulaires.

Pour avoir des granulats propres on doit passer par une phase de pré criblage. Les différentes phases de concassage nous conduisent à obtenir toutes les classes granulaires.

Les granulats concassés ont des caractéristiques qui dépendent de plusieurs paramètres comme l'origine de la roche, la régularité du banc, le degré de concassage.

B- Les granulats artificiels

Les granulats artificiels sont souvent soit plus légers soit plus lourds. Ces derniers peuvent être employés pour réaliser des bétons à usages spécifiques. Ils sont d'origine minérale, résultant d'un procédé industriel comprenant des transformations thermiques ou chimiques. Les transformations se font à haute température (1000 à 1200 °C), dans un four rotatif, de nodules d'argile ou de schiste produit d'une part un dégagement gazeux au sein de chaque nodule sous l'effet de réactions chimiques internes, ce qui entraîne l'expansion du nodule, d'autre part une vitrification de la couche externe. Par conséquent, on obtient un granulats plus gros, avec une grande porosité, donc des granulats légers.



Figure I-3 : Granulats légers ; Argile expansée (gauche) et schiste expansé (droite).

C- Les granulats recyclés

Ces dernières années plusieurs chantiers ont démontré la viabilité du recyclage de vieux bétons provenant de chaussées, de bâtiments ou autres structures comme source de granulats. Cette pratique permet d'économiser matériaux et énergie. Les étapes de traitement de ce genre de déchets peuvent être résumées comme suit :

1. enlever le vieux béton ;
2. Le broyer dans des broyeurs primaires et secondaires ;

3. le débarrasser de l'acier d'armature et des éléments noyés ;
4. le cribler et laver les morceaux ;
5. entreposer le gros granulat et le granulat fin ainsi produits



Figure I-4 : Béton fortement armé concassé avec un broyeur.

I.2.2.2- Propriétés des granulats

De nombreuses propriétés des granulats sont intimement liées aux propriétés du massif rocheux d'origine, c.-à-d. la composition chimique et minéralogique, les caractéristiques pétrographiques, la densité, la dureté, la résistance, la stabilité physique et chimique, la structure des pores et la couleur. Par ailleurs, les granulats présentent un certain nombre de propriétés intrinsèque qui ne sont pas reliées à la nature du massif rocheux d'origine, telles la forme et la dimension des grains, la texture de surface et l'absorption, or toutes ces propriétés peuvent avoir une influence considérable sur la qualité du béton, autant à l'état frais qu'à l'état durci [2, 3].

D'après leur nature minéralogique on distingue trois grandes classes :

- Les granulats siliceux ;
- Les granulats calcaires ;
- Les granulats granitiques (argileux ou schisteux)

Les granulats (gravillons et sable) ont des effets sur la résistance mécanique et sur la consistance du béton de plusieurs manières [6, 8]:

- Par leurs propriétés de résistance mécanique ;
- Par la capacité d'adhérence de ces granulats avec la pâte liante ;
- Par la forme de ces granulats (roulés, concassés et semi-concassés);
- Par leur granulométrie et le diamètre maximal des granulats ;
- Par la compacité du mélange granulaire formé.

A- granulométrie

Dans une composition de béton la dimension des granulats à utiliser passe des micromètres à quelques centimètres. La dimension maximale est variable, elle dépend des confinements des armatures et des dimensions des coffrages. On trie les granulats par dimension au moyen de tamis (mailles carrées) et de passoirs (trous circulaires). Les principales classes granulaires caractérisées par les dimensions extrêmes d et D des granulats sont (Norme XP P 18-540):

- Fillers 0/D $\Rightarrow$ pour $D < 2$ mm et ayant au moins 70 % de grains passant au tamis de 0,63 mm.
- Sablon 0/D $\Rightarrow$ pour $D < 1$ mm et avec moins de 70 % de grains passant au tamis de 0,63 mm
- Sable 0/D $\Rightarrow$ Pour $1 \text{ mm} < D \leq 6,3$ mm ;
- graves 0/D $\Rightarrow$ Pour $D > 6,3$ mm
- gravillons d/D $\Rightarrow$ Pour $d \geq 1$ mm et $D \leq 125$ mm
- Ballast d/D $\Rightarrow$ Pour $d \geq 25$ mm et $D \leq 50$ mm



Figure I-5 : Éventail de grosseurs de granulats utilisés dans le béton.

B- Module de finesse

Pour confectionner des bétons de qualité, on utilise au moins des granulats de deux classes granulométriques différentes. Les principales divisions comprennent le sable et le gros granulat, dont les éléments mesurent au moins 5 mm de diamètre.

Les sables doivent présenter une granulométrie telle que les éléments fins ne soient ni en excès, ni en trop faible proportion.

- S'il y a trop de grains fins, il sera nécessaire d'augmenter le dosage en eau du béton ;
- Si le sable est grossier, la plasticité du béton sera réduite et sa mise en place sera difficile.

Le caractère plus ou moins fin d'un sable peut être quantifié par le calcul du module de finesse (MF). Celui-ci correspond à la somme de pourcentages des refus cumulés, ramenés à l'unité, pour les tamis (0,16 ; 0,315 ; 0,63 ; 1,25 ; 2,5 ; 5).

La valeur du module de finesse est d'autant plus élevée que le granulat est grossier. Un bon sable à béton doit avoir un module de finesse d'environ 2,2 à 2,8. Au-dessous de 2,2 le sable a une majorité d'éléments fins, ce qui nécessite une augmentation du dosage en eau ; au-dessus de 2,8 le sable manque de fines et le béton perd en ouvrabilité [2, 6].

La quantité de pâte de ciment fraîche à introduire dans le béton doit être suffisante pour recouvrir la surface de tous les grains de sorte que, plus la surface spécifique des granulats est faible, moins il faut de pâte et conséquemment, plus la demande en eau est faible.

C- Forme et texture des granulats

La forme et la texture ont des effets sur le serrage des granulats dans le béton soit la compacité granulaire. Ils ont donc une incidence sur la maniabilité du béton.

La texture de la surface des granulats affecte sa liaison avec la pâte de ciment et influence la demande en eau du mélange. La forme en aiguille ou plate, mais aussi les granulats très anguleux sont à éviter car elle nécessitent une quantité d'eau plus élevée, pour une même maniabilité du béton, ce qui peut nuire à la qualité du béton et peut provoquer des défauts d'aspect.

La forme et la texture des granulats influencent :

- la demande en eau
- la maniabilité : facilité de mise en œuvre et le compactage du béton.
- La compacité du mélange, donc le volume des vides à remplir par la pâte de ciment.
- L'adhérence du granulat à la pâte de ciment.

D- La propreté

Les granulats utilisés dans le béton doivent être propres, débarrassés de tous corps polluant qui peuvent nuire à l'adhérence entre la pâte de ciment et les granulats et provoquer une fissuration précoce du béton [2, 6].

La propreté désigne d'une part, la teneur en fines argileuses ou autres particules adhérentes à la surface des grains, ce qui se vérifie sur le chantier par les traces qu'elles laissent lorsqu'on frotte les granulats entre les mains, traces dues à la présence d'oxyde de fer, pyrite, argile... Un granulat propre ne laisse pas trace. D'autre part, les impuretés susceptibles de nuire à la qualité du béton, parmi lesquelles on peut citer les scories, le charbon, les particules de bois, les feuilles mortes, ...

Les granulats ne doivent pas contenir d'hydrocarbures, d'huiles végétales ou de matière organiques. Les granulats doivent être exempts de sulfures sous forme de pyrites, de sulfates et de chlorures qui nuisent aux propriétés de durabilité du béton durci.

Il existe plusieurs essais de laboratoire pour le contrôle de la propreté des granulats :

- Essai de la perte au feu
- Essai d'équivalent de sable « ES »
- Tests chimiques ; les composants chimiques à utiliser dépendent du produit recherché. Exemple de l'essai au bleu de méthylène qui permet de déterminer la teneur en argile du sable : les fines d'origine argileuse retiennent le bleu de méthylène.

Les fines selon la norme NF P 18-540 désignent les particules passant au tamis de 0,08 mm. Les fines peuvent provenir du sable, des gravillons et d'additifs divers. Dans le sable et gravillons concassés leur pourcentage peut être élevé. Un excès de fines nécessite un dosage en eau plus élevé mais un manque de fines conduit à des bétons peu maniables, ségrégeables et de faible compacité. Leur nocivité est grande lorsqu'elles contiennent des matières argileuses, c'est pourquoi il faut les tester au bleu de méthylène.

E - Propriétés mécaniques des granulats

En plus des propriétés de résistance à la compression, cisaillement, traction..., les granulats sont testés vis-à-vis de la résistance à l'usure et au choc donc à l'écrasement. Pour certains usages les granulats

peuvent également être caractérisés vis-à-vis de l'action du gel dégel et des températures d'usages très élevées.

I.2.3- Cas du sable de Sahara

Le sable de Sahara, appelé aussi sable de dune, est composé de particules siliceuses pratiquement de même taille et de petites dimensions. La figure I-6, présente les courbes granulométriques de deux sables de dunes de deux origines différentes. Ces sables sont accumulés sous forme de dunes mouvantes de hauteur très variable.

L'utilisation du sable de Sahara n'est pas nouvelle, beaucoup d'études et de réalisations ont été faites et un guide pratique d'utilisation routière des sables a été publié (Chauvin, 1987). Cependant, les sables de Sahara constituent un cas particulier pour lequel les directives et recommandations ne peuvent pas être appliquées sans études spécifiques.

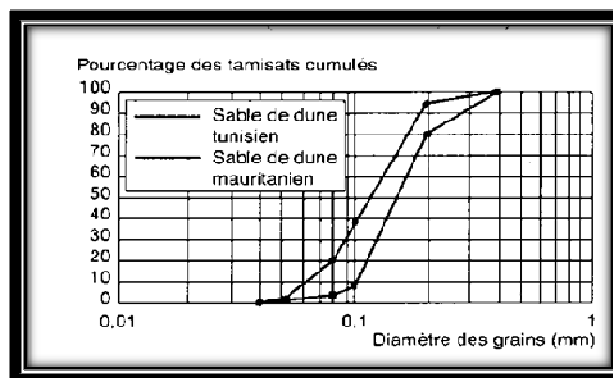
Identification des sables du Sahara

Composition chimique : Ce sont des sables dont la composition chimique est très simple : plus de 95 % de silice, de 1 à 2 % de calcaire et des traces de différents oxydes.

Du fait de cette constitution, le sable a une couleur blanche légèrement jaune et ocre, il se dessèche et perd facilement sa cohésion en surface.

Granulométrie : Le diamètre des plus gros éléments des sables de Sahara est de l'ordre de 0,5 mm. Il est maximal aux endroits les plus proches de la roche mère et diminue de plus en plus quand on s'en éloigne. Les particules deviennent aussi de plus en plus arrondies. Le diamètre des éléments les plus fins est de l'ordre de 0,04 mm.

Le coefficient d'uniformité ($C_u = D_{60} / D_{10}$) est de l'ordre de 1,8 et le coefficient de courbure ($C_c = D_{302} / [D_{10} \cdot D_{60}]$) est de l'ordre de 10. Il s'agit donc d'un sable très fin mal gradué. La figure I.6 montre deux courbes granulométriques de sables de dunes prélevés dans deux zones sahariennes différentes en Tunisie (Gara, 1994) et en Mauritanie (Ould Sid, 1995).



Comportement mécanique : Des essais de compactage puis de cisaillement direct ont été réalisés par Ould Sid (1995). Les principaux résultats trouvés sont que :

- l'effet de la teneur en eau sur le compactage est peu significatif quand la teneur en eau est faible (0 à 6 %) ;
- la cohésion à une valeur très faible, de l'ordre de 5 kPa ;
- l'angle de frottement interne varie de 30 à 35°, selon la densité du sable.

Les valeurs de ces paramètres montrent que le sable de dune peut avoir un bon comportement mécanique même lorsque sa compacité est faible, à condition d'être à l'abri du vent.

Par ailleurs, l'indice portant CBR de ces sables, au poids volumique et à la teneur en eau de l'optimum Proctor modifié, est relativement faible. Il est de l'ordre de 10 %. C'est ce qui permet, entre autres, d'écarter toute possibilité d'utilisation de ces sables seuls en corps de chaussée.

Les utilisations du sable de Sahara

Compte tenu de sa disponibilité, le sable de Sahara peut donc être utilisé comme additif dans les bétons soit comme remplacement de certains fillers, soit pour corriger certains sables grossiers. L'intérêt d'un tel mélange se situe à deux niveaux technique et économique.

- Les aspects économiques & environnementales : sont évidents dans la mesure où l'utilisation du sable de Sahara permet une économie des autres matériaux de construction, et donc la préservation de l'environnement, d'autant plus qu'il est disponible en quantités inépuisables. Par ailleurs, son extraction n'engendre pratiquement pas de frais supplémentaires et son mélange avec les autres matériaux sur chantier peut se faire facilement.
- Les intérêts techniques sont de deux types :

Le sable peut contribuer à la densification des matériaux, soit la compacité des bétons. Ceci permet, par la même occasion, l'amélioration de leurs caractéristiques mécaniques et de durabilité.

Le sable de Sahara, par sa finesse, va permettre également, d'améliorer les propriétés rhéologiques des bétons frais.

1.2.4- Les adjuvants

Produits chimiques ou naturels (liquides ou poudres) susceptibles d'améliorer certaines propriétés des bétons, mortiers, coulis. Les adjuvants sont incorporés aux bétons à faible dose inférieure à 5 % de la masse du ciment, avant ou pendant le malaxage. Le but est d'améliorer certaines propriétés du béton, qu'il soit à l'état frais, pendant la prise et le durcissement, ou à l'état durci [9,10].

- la rhéologie;

- la cinétique d'hydratation (temps de prise et de durcissement);
- les performances mécaniques ;
- ...

Chaque adjuvant est défini par une fonction principale, caractérisée par la modification majeure qu'il apporte aux propriétés des bétons. Un adjuvant présente une voir plusieurs fonctions secondaires qui sont plus souvent indépendantes de la fonction principale. L'emploi d'un adjuvant peut aussi entraîner des effets secondaires non recherchés (non souhaités). L'efficacité de la fonction principale de chaque adjuvant peut varier selon son dosage et sa compatibilité avec les matériaux utilisés [6, 9]. Dans leur ensemble, les adjuvants ne doivent pas contenir de chlore.

I.2.4.1- Classes des adjuvants

Selon les objectifs visés, on introduit dans le béton tel ou tel adjuvants. Dans cette section ont présente les différentes classes de bétons.

I.2.4.2- Les adjuvants modifiant l'ouvrabilité du béton

Ces adjuvants modifient le comportement rhéologique des bétons, à l'état frais, avant le début de prise. Ils abaissent le seuil de cisaillement de la pâte et en modifient la viscosité.

Ce sont en général des produits de synthèse, ils sont à base de lignosulfonates, de sels d'acides organiques, de mélamine sulfonate, de naphthalène sulfonate et dérivés de mélamine ou naphthalène.

Ces adjuvants ont des effets sur les valeurs d'affaissement au cône d'Abrams. Plus le dosage en adjuvant est importante plus l'affaissement est grand. L'affaissement cesse lorsque l'on atteint le dosage de saturation au l'adjuvant n'a plus d'effet. La viscosité peut être caractérisée par le temps d'écoulement dans un entonnoir : le temps d'écoulement baisse avec l'augmentation de l'adjuvant, cela se traduit par une viscosité faible.

Mode d'action

Lors du gâchage du béton, sous l'effet des forces attractives de l'eau, les particules de ciment forment des agglomérats piégeant une bonne partie d'eau libre à l'intérieur « floculation ». L'eau disponible pour fluidifier le béton est ainsi limitée, et le béton présente une certaine fermeté. L'introduction du plastifiant a pour rôle d'empêcher ce phénomène de floculation.

Le plastifiant (superplastifiant) s'adsorbe à la surface des particules de ciment. Une fois adsorbé, il agit par répulsion électrostatique en neutralisant les charges électriques présentes à la surface des grains et/ou par répulsion stérique en écartant les grains les uns des autres (Figure I-7 : **Défloculation du ciment par l'action des superplastifiants.**

). L'eau initialement piégée entre les floculats est à nouveau disponible pour fluidifier le béton [9].

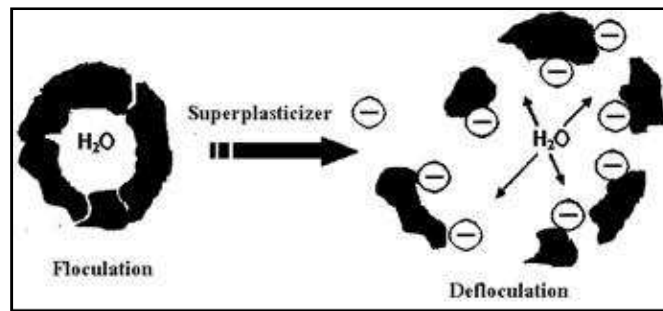


Figure I-7 : Défloculation du ciment par l'action des superplastifiants.

Ce processus permet:

- D'améliorer la maniabilité sans augmenter le dosage en eau : dans ce cas la quantité d'eau de la formule initiale de béton n'est pas modifiée, mais son ouvrabilité évolue avec le changement du pourcentage en superplastifiant ; quant à la résistance mécanique, elle reste quasi constante ;
- D'améliorer les performances mécaniques du béton ; de réduire le rapport E/C (réducteur d'eau), dans ce cas la quantité d'eau du béton est réduite pour une même maniabilité, et la résistance mécanique augmente.

Les plastifiants / réducteurs d'eau

Ces adjuvants ont pour fonction principale de conduire, à même ouvrabilité, à une augmentation des résistances mécaniques par une réduction de la teneur en eau d'un béton, d'un mortier ou d'un coulis.

La diminution de la teneur en eau – de 10 à 35 l/m³ de béton entraîne une augmentation de sa compacité, par conséquent de sa durabilité. Cette amélioration des caractéristiques résulte de la diminution des vides dus à l'excès d'eau [6].

Les superplastifiants / hauts réducteurs d'eau

Introduits dans un béton, en général peu avant sa mise en œuvre, ils ont pour fonction principale de provoquer un fort accroissement de l'ouvrabilité du mélange.

Sur le béton frais, on constate une augmentation considérable de l'ouvrabilité pour une même teneur en eau. Ces effets ont une durée d'effet prolongée dans le temps, sans risque de ségrégation, ni de ressuage si des précautions sont prises à la mise en œuvre; la cohésion du béton reste très bonne.

Les superplastifiants sont particulièrement utiles pour la réalisation des fondations, dallages, radiers, sols industriels, etc. Les superplastifiants sont indispensables pour la confection des bétons autoplaçants et dans le cas des bétons pompables [6].

1.2.4.3- Les adjuvants modifiant la prise et le durcissement

Ce sont des produits chimiques qui modifient la solubilité des constituants du ciment et surtout leur vitesse de dissolution. Physiquement, cette action se traduit par l'évolution de la résistance au jeune âge, en fonction de l'adjuvant utilisé (le graphique de la page suivante, illustre ce phénomène).

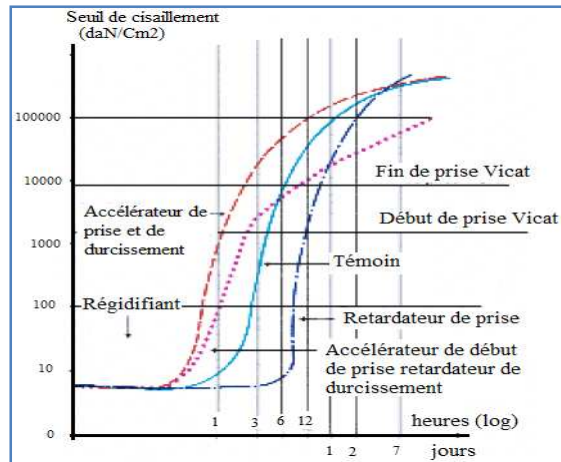


Figure I-8 : Courbes d'évolution du seuil de cisaillement (début de prise) en fonction de la présence d'un accélérateur ou d'un retardateur de prise [11].

Les accélérateurs de prise et les accélérateurs de durcissement

L'accélérateur de prise a pour fonction principale de diminuer les temps de début et de fin de prise du ciment dans les bétons, il diminue le temps de passage de l'état plastique à l'état solide du béton. L'accélérateur du durcissement a pour fonction principale d'accélérer le développement des résistances initiales des bétons.

Les constituants de ces adjuvants sont généralement des dérivés de la soude, de la potasse ou de l'ammoniaque.

Ils sont à recommander pour les bétonnages par temps froid, les décoffrages rapides, les scellements, les travaux en galerie, les travaux sous l'eau, etc.

Il est à noter qu'un béton fortement accéléré, au moyen d'adjuvants, risque d'avoir une résistance mécanique finale légèrement diminuée.

Les retardateurs de prise

Le retardateur de prise a pour fonction principale d'allonger le temps de début et de fin de prise du ciment dans les bétons, il augmente le temps de passage de l'état plastique à l'état solide du béton. L'accélérateur du durcissement a pour fonction de retarder le développement des résistances initiales des bétons. Ils sont à base de lignosulfonates, d'hydrates de carbone ou d'oxydes de zinc ou de plomb.

Par rapport au témoin, l'augmentation du temps de début de prise est comprise entre une à deux heures. A l'état durci, la résistance du béton est en général augmentée par rapport à celle du témoin.

Les retardateurs de prise sont particulièrement recommandés pour les bétonnages par temps chaud et les bétonnages en grande masse. Ils permettent aussi de faciliter les reprises de bétonnage.

1.2.4.4- Les adjuvants modifiant certaines propriétés du béton

Les entraîneurs d'air

Ils ont pour fonction la formation de microbulles d'air uniformément réparties dans la masse du béton. Les entraîneurs d'air sont des corps tensio-actifs : lignosulfonates, abiétates de résines, sels d'éthanolamine, que l'on mélange en fonction des propriétés à obtenir.

Le béton durci contient naturellement une certaine quantité d'air provenant, soit d'un entraînement lors du malaxage, soit de l'évaporation de l'eau de gâchage non fixée. Cet air (2 % du volume) est réparti de manière aléatoire. En revanche, l'entraîneur d'air permet d'en entraîner un volume supérieur et de le répartir uniformément.

L'objectif d'introduire l'entraîneur d'air est d'améliorer la résistance au gel du béton durci, ainsi que sa résistance aux sels de déverglaçage. Les microbulles qui coupent les réseaux des capillaires limitent le développement des contraintes dues au gel de l'eau interstitielle. L'entraîneur d'air permet également d'améliorer la résistance aux incendies des bétons. En revanche, la présence de bulles peut entraîner une chute des résistances mécaniques.

En Europe, l'utilisation des entraîneurs d'air pour les bétons routiers est obligatoire. La valeur de l'air occlus doit être comprise entre 4 et 6 %.

Les hydrofuges de masse

Les hydrofuges de masse ont pour fonction principale de diminuer la perméabilité et l'absorption capillaire des bétons, des mortiers ou des coulis durcis. Cette diminution de l'absorption capillaire procure une bonne étanchéité au béton. Les hydrofuges sont généralement à base d'acides gras ou de leurs dérivés (stéarates). Ils peuvent également comporter des matières fines (type bentonite) ainsi que des agents fluidifiants.

L'efficacité dépend de la nature du ciment. Cependant, il à préciser que ces adjuvants ne peuvent pas rendre étanche un mauvais béton, mal composé, présentant des vides importants ou des hétérogénéités.

Ils sont utilisés pour les bétons d'ouvrages hydrauliques (canaux, murs de fondation, retenues d'eau...) et les mortiers d'étanchéité (chapes, joints de maçonnerie, galeries de tunnels).

Les rétenteurs d'eau

Ces produits ont pour fonction de réguler l'évaporation de l'eau et d'augmenter ainsi l'homogénéité et la stabilité du mélange. Le ressuage par l'action de ces stabilisants est réduit de 50 %.

La rhéologie du béton frais est améliorée même dans le cas d'une diminution du volume des fines. La diminution des résistances à 28 jours par rapport à un béton témoin est de l'ordre de 20 %.

Ces produits, qui sont, entre autres, des agents colloïdaux ou des dérivés de la cellulose sont utilisés pour l'exécution de mélanges retardés ou de mélanges à couler sous l'eau sans délavage.

Les produits de cure

Les produits de cure ont pour effet de protéger le béton frais après sa mise en œuvre, en évitant sa dessiccation par évaporation trop rapide de l'eau. Celle-ci entraînerait une baisse des résistances mécaniques, la formation de fissures de retrait avant prise.

Ces produits sont à base de résines, cires ou paraffines en émulsion aqueuse, de résines naturelles ou synthétiques, de cires ou de paraffines dissoutes dans un solvant pétrolier, de caoutchouc chloré. Ce

sont des produits que l'on peut pulvériser sur le béton frais. Il se forme alors un film continu imperméable protecteur, qu'il faut ensuite éliminer par brossage une fois le béton durci.

Ils sont recommandés pour les bétonnages des planchers, pistes, dallages et généralement tous les ouvrages pour lesquels le rapport surface d'évaporation/épaisseur est élevé.

1.2.5- Les additions minérales

Les additions minérales sont souvent sous forme d'une poudre fines ou ultra fines de faibles dimensions, elles sont ajoutées en quantités de l'ordre de 10 % du poids de ciment. Les additions minérales sont soit actives ou inertes qui, améliorent notablement les performances et la durabilité du béton grâce à leurs propriétés physicochimiques (cendres volantes, laitier, fillers,).

Ces poudres permettent dans un premier temps d'améliorer la consistance du béton frais en le rendant plus fluide. A long terme ces poudres procurent aux bétons une meilleure compacité (une porosité réduite) ce qui permet d'améliorer leurs propriétés de durabilité [12].

Par ailleurs pour les poudres actives à caractères pouzzolanique (fumée de silice et cendres volantes...), ils permettent d'obtenir des bétons plus résistants et plus compacte et donc plus durables. Ces poudres sont souvent utilisées pour produire des bétons à haute résistances et des bétons à ultra haute performances.

1.2.6- L'eau de gâchage du béton

L'eau est un constituant nécessaire pour obtenir un béton ou un mortier. Pratiquement toute eau naturelle potable n'ayant pas une odeur ou un goût prononcé peut être employée pour la fabrication du béton. Les eaux non potable ne doivent pas contenir de composés risquant d'attaquer chimiquement le ciment, les granulats ou les armatures (comme le chlorure, environ 0,2 % à 0,4 % de la masse de ciment peut provoquer des risques de corrosion).

L'eau doit être pure de toutes particules en suspension dont la quantité peut modifier les qualités originales. L'eau doit être débarrassée des poussières en suspension, des huiles...

I.3 Classification des bétons

Les bétons peuvent être classés en plusieurs catégories de plusieurs manières [2, 6].

1.3.1- Classification selon les masses volumiques

Il existe quatre grandes classes

- Bétons très lourd $M_v > 2500 \text{ kg/m}^3$

- | | |
|-----------------------------------|---|
| • Bétons lourds (bétons courants) | $1800 \text{ kg/m}^3 \leq M_v \leq 2500 \text{ kg/m}^3$ |
| • Bétons légers | $500 \text{ kg/m}^3 \leq M_v < 1800 \text{ kg/m}^3$ |
| • Bétons très légers | $M_v < 500 \text{ kg/m}^3$ |

Les bétons courants sont les plus utilisés, aussi bien dans le bâtiment qu'en travaux publics. Ils présentent des masses volumiques de 2500 kg/m^3 environ. Ils peuvent être armé ou non. Lorsqu'ils sont très sollicités en flexion ils sont précontraints.

Les bétons très lourds dont la masse volumique peut atteindre les 6000 kg/m^3 sont utilisés pour les ouvrages hydrauliques là où il faut empêcher la perméabilité de l'eau. On les utilise également dans le cas des centrales nucléaires et tout ouvrage de stockage des produits radioactifs.

Les bétons légers et très légers peuvent répondre aux problèmes d'isolation dans le bâtiment. Ils sont aussi utilisés dans les ouvrages maritimes.

1.3.2- Classification selon la consistance (ouvrabilité)

La propriété essentielle du béton frais est son ouvrabilité : aptitude d'un béton à remplir les coffrages et à enrober convenablement les armatures.

De nombreux facteurs influent sur l'ouvrabilité du béton : type et dosage en ciment, forme des granulats, emploi des adjuvants et dosage en eau. Un excès d'eau se traduit par plusieurs inconvénients :

- Ressuage du béton : création à la surface d'une pièce en béton, d'un film d'eau, générateur de fissures après évaporation.
- Diminution de la compacité et donc de la résistance du béton.
- Porosité accrue du béton ;
- Augmentation des risques de ségrégation des constituants du béton ;
- Retrait du béton...

La grandeur qui caractérise l'ouvrabilité est la consistance ; sa mesure peut être effectuée facilement sur chantier avec la méthode du cône d'Abrams, qui est un essai d'affaissement d'un volume de béton de forme tronconique.

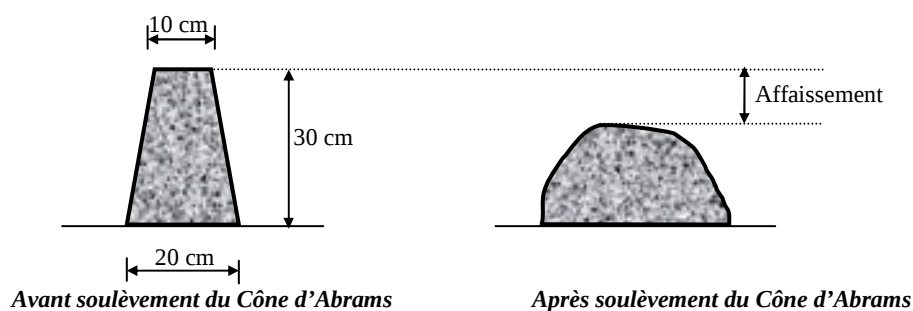


Figure I-9 : Courbes illustrative de l'essai d'affaissement au cône d'Abrams.

Selon la valeur de l'affaissement, il existe 5 classes de bétons :

Classes	Consistance du béton	Affaissement au cône d'Abrams (cm)
S1	Ferme	1 à 4
S2	Plastique	5 à 9
S3	très plastique	10 à 15
S4	Fluide	16 à 21
S5	très fluide	≥ 22

Tableau I.4 : Classes de consistances des bétons ordinaires.

Il existe plusieurs autres essais de laboratoire pour la caractérisation de la consistance du béton :

- Essai d'affaissement à la table à secousse ;
- Essai d'écoulement dans un cône d'écoulement ;
- Maniabilimètre à béton
- ...

I.3.3- Classification selon la résistance mécanique

La résistance utilisée pour la classification des bétons durcis est souvent la résistance mécanique à la compression du béton et à 28 jours (R_{c28j}). Les classes de résistance à la compression des bétons courants de masses volumiques comprises entre 1800 kg/m³ et 2500 kg/m³, selon la norme EN 206-1 sont données dans le tableau suivant.

Classes de résistance	R_c minimale sur cylindre N/mm ²	R_c minimale sur cube N/mm ²
C8/10	8	10
C12/15	12	15
C16/20	16	20
C20/25	20	25
C25/30	25	30
C30/37	30	37
...	...	...
C100/115	100	115

Tableau I.5 : Classes de résistances des bétons.

Les valeurs données dans le tableau sont mesurées sur des cylindres de 150 mm de diamètre sur 300 mm de hauteur et des cubes de 150 mm de côtés.

I.3.4- Classification selon l'exposition & actions dues à l'environnement

Le béton peut être soumis à plusieurs attaques chimiques liées à l'environnement d'exposition. Ainsi on peut classer les bétons comme suit.

- Classe **X0** : Aucun risque de corrosion ni d'attaques
- Classe **XC** : corrosion induite par carbonatation
- Classe **XD** : Corrosion induite par les chlorures, ayant une origine autre que marine
- Classe **XS** : Corrosion induite par les chlorures présents dans l'eau de mer
- Classe **XF** : Attaque gel/dégel avec ou sans agent de déverglaçage
- Classe **XA** : Attaque Chimiques

I.4- Composition des bétons

La formulation d'un béton ordinaire (vibré ou autoplaçant) consiste à définir les proportions de ces différents constituants. La formulation des bétons dépend des propriétés de mise en œuvre, mécaniques et de durabilité souhaitées [1, 2, 8]. Toutes les méthodes de formulation suivent les mêmes grandes lignes résumées comme suit :

- Choix du squelette granulaire (gravillons et sable) et du diamètre maximal des granulats ; le squelette doit être validé par un fuseau granulaire de béton correspondant au type de béton espéré. Un fuseau granulaire est obtenu par rassemblement des courbes granulaires des bétons de qualité, qui ont fait preuves dans des projets antérieurs.
- Choix de la nature du ciment et du rapport eau / ciment ;
- Choix de la quantité de ciment et donc du volume des granulats ;
- Choix des adjuvants ;
- Recherche par le biais d'essais expérimentaux des dosages en adjuvants.

Quand à la nature des granulats, souvent elle est imposée par les carrières qui fournissent la région où le béton doit être produit.

Il existe plusieurs méthodes de formulation des bétons, méthode de Bolomey, méthode d'Abrams, de Faury, de Valette, de Joisel... Dans la partie qui suit on rappelle les grandes lignes de la méthode de Bolomey et de **Dreux Gorisse**, méthodes les plus utilisées en Algérie.

I.4.1 Méthode de Bolomey

La formulation en terme de résistance à la compression, la méthode est basée sur la relation suivante :

$$R_{cb} = R_{cc} \times G \left[\frac{C}{(E + Air)} - 0,5 \right]$$

R_{cb} : résistance à la compression du béton, R_{cc} : résistance caractéristique à la compression du ciment, C : quantité ciment, E : quantité d'eau efficace (≤ 200 litres), Air : volume d'air (en litre), G : coefficient de qualité des granulaire.

La formulation du squelette granulaire du béton, ciment compris, est cherchée de façon à ce qu'elle soit aussi proche que possible de la courbe de référence théorique obtenue par la formule suivante:

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

A : varie de 8 à 16, il est d'autant plus élevé que le dosage en ciment est plus fort. P : est le pourcentage de grains passant au tamis de diamètre d, D : est le diamètre du plus gros grain.

Cette méthode aboutit théoriquement, plus au moins, à une granularité continue [DRE 98].

I.4.2- Méthode de Dreux Gorisse

Cette méthode a l'avantage d'être issue de nombreuses formulations déjà validées sur chantier et ayant donné satisfaction. Elle est très simple d'utilisation, elle ne demande que la connaissance des courbes granulométriques des granulats [DRE 98]. Les étapes de la méthode sont récapitulées dans les paragraphes suivants.

Expérimentalement on commence par l'évaluation du rapport C/E en fonction de la résistance moyenne désirée,

$$f_{cb} = K_G \cdot F_{cim} \left(\frac{C}{E} - 0,5 \right)$$

La relation est nommée formule de Bolomey, où : f_{cb} : résistance moyenne en compression **visée** (à 28 jours) en MPa ; F_{cim} : classe vraie du ciment (à 28 jours) en MPa ; C : dosage en ciment (kg/m^3) ; E : dosage en eau (kg/m^3) ; K_G : coefficient granulaire.

- **La résistance visée f_{cb}** : elle représente une majoration de 15 % de la résistance désirée.

Ainsi
$$f_{cb} = f_{c28} + 15 \% \times f_{c28}$$

Avec f_{c28} est la résistance à la compression du béton désiré à 28 jours d'âge.

Ainsi si l'on souhaite formuler un béton de classe de résistance C25, on vise alors une résistance

$$f_{cb} = 1,15 f_{c28} = 1.15 \times 25 = 28.75 \text{ MPa.}$$

- **Le coefficient K_G** : il traduit la qualité des granulats (forme, texture, minéralogie, diamètre maximal, dureté,...). La valeur de K_G doit être mentionnée sur la fiche technique des granulats à l'achat. Le tableau suivant donne quelques valeurs de K_G en fonction de leurs diamètres est de leurs qualités.

Qualité des granulats	Dimension D des granulats		
	D ≤ 12.5 (granulats fins)	20 ≤ D ≤ 31.5 (granulats moyens)	D ≤ 50 (gros granulats)
Excellente	0.55	0.60	0.65
Bonne	0.45	0.50	0.55
Passable	0.35	0.40	0.45

Tableau I.6 : Coefficients d'appréciation de la qualité K_G des granulats.

- **F_{cim} classe vraie du ciment** : la classe vraie du ciment est fonction de la classe du ciment, la valeur est indiquée sur la fiche technique du produit à l'achat.

I.4.2.1 Calcul du dosage en ciment

Le dosage définitif en ciment (C) dépend du rapport C/E tel que définis précédemment, mais aussi de la quantité d'eau, soit donc de la consistance (affaissement) du béton visée.

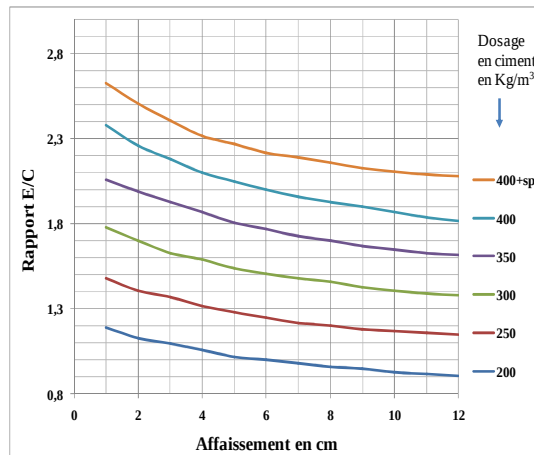


Figure I-10 : Abaque permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment en fonction du rapport E/C et de l'ouvrabilité désirée (affaissement au cône d'Abrams) [2].

I.4.2.2 Calcul du dosage en eau

Ayant fait le choix du dosage en eau, on déduit alors le dosage approximatif en eau totale à prévoir (provisoirement) et qu'il conviendra bien entendu d'ajuster ultérieurement par quelques essais de laboratoire en fonction du diamètre maximale des granulats mais aussi de l'état d'humidité des granulats...

I.4.2.3- Calcul du dosage en granulats

Le choix du sable à utiliser est d'une grande importance. Par cette méthode, il est conseillé d'utiliser des sables roulés car ils conduisent aux meilleurs résultats du point de vue maniabilité. La courbe granulométrique du sable doit se situer dans le fuseau A des courbes de la Figure I- 3, ce qui correspond à un module de finesse (MF) compris entre 2,2 et 2,8.

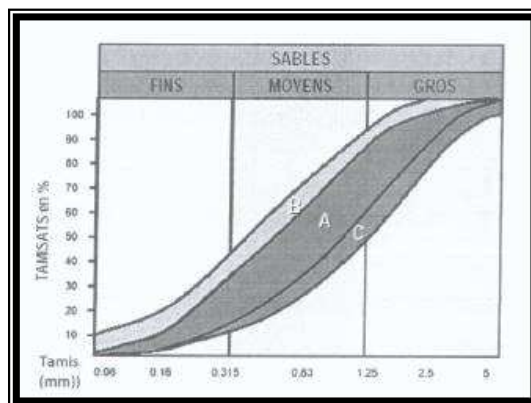


Figure I-11 : Fuseaux préférentiels pour la granularité des sables pour béton selon la méthode de Dreux Gorisse [2].

Le fuseau A correspond au sable préférentiel, MF de 2,20 à 2,80.

Le fuseau B correspond au sable trop fin, MF de 1,80 à 2,20 (induit à l'augmentation du dosage en eau).

Le fuseau C correspond au sable trop grossier, MF de 2,80 à 3,20.

Il est à noter : qu'un sable grossier (fuseau C) risque d'entraîner une moins bonne maniabilité et une possible ségrégation et qu'un sable fin (fuseau B) nécessite une grande quantité d'eau pour humidifier le sable donc améliorer la maniabilité ce qui peut pénaliser la résistance mécanique du béton.

Il est toujours possible de modifier le module de finesse d'un sable par l'adjonction d'un deuxième sable de module de finesse différent.

Tracé de la courbe granulaire de référence

La composition granulométrique optimale est représentée par une ligne brisée OAB voir figure suivante :

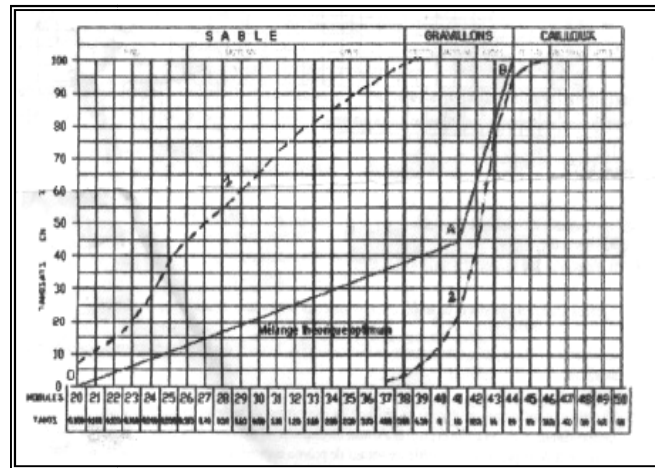


Figure I-12 : Courbe du mélange optimum selon la méthode de Dreux-Gorisse [2].

Le point (B) (à l'ordonnée 100%) est confondu avec le point d'ordonnée 100 % de la courbe granulométrique du plus gros granulat. Le point de brisure (A) a les coordonnées ainsi définies :

En abscisse :

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

Si $D \geq 20$ mm, l'abscisse est située au milieu du segment délimité par D et par le tamis de 5 mm.

D : dimension des plus gros grains du squelette granulaire retenu par la méthode de Dreux-Gorisse, est telle que le refus sur le tamis correspondant soit le plus proche possible de 8%.

En ordonnée :

$$y = 50 - \sqrt{D} + K$$

K : terme correcteur qui dépend : du dosage en ciment, de l'efficacité de serrage à la mise en place (vibration); de la forme des granulats et du module de finesse MF du sable.

Dans le cas d'une vibration normale du béton et des dosages habituellement utilisés en ciment.

$K = 6 \text{ MF} - 15$ Si le sable est roulé ;

$K = 6 \text{ MF} - 13$ Si le sable est concassé.

Une fois la courbe granulaire de référence est définie, reste à définir les proportions du gravier et du sable qui vont permettre d'approcher au plus près cette courbe.

Compacité du béton et dosage des granulats

Pour le calcul du dosage en granulats nous avons besoin d'une appréciation de la compacité (γ) du béton. La compacité du béton étant le rapport à 1 m³ du volume absolu des matières solides (ciment + granulats) réellement obtenues dans 1 m³ de béton frais mis en œuvre après vibration. La compacité du béton dépend principalement de trois paramètres qui sont :

- consistance désirée pour le béton ;
- de l'intensité de la vibration ;
- du diamètre maximal des granulats.

I.5- Propriétés essentielles des bétons

Les propriétés du béton changent en fonction de la composition du béton de la nature de ces différents composants, notamment de la quantité et nature du ciment et de la quantité d'eau.

Les propriétés mécaniques du béton évoluent avec son âge, notamment au jeune âge. Ainsi au gâchage le béton frais est maniable, il présente des propriétés de résistances nulles. A partir du début de la prise du ciment, le béton commence à acquérir de la résistance en fonction de la nature du ciment et des conditions climatiques (temps chaud, temps froid). Ainsi à 7 jours le béton atteint près de 50 % de sa résistance finale. A 28 jours, le béton atteint près de 85 % de sa résistance finale. A partir de 28 jours l'évolution de la résistance du béton continue d'évoluer lentement et d'une façon asymptotique.

En fonction des conditions d'exposition, le béton est exposé à des attaques chimiques de différentes natures (humidité, sels marins, sulfures, eaux d'égout, CO₂, gel dégel....), le béton va se dégrader soit par carbonatation, soit par lessivage, soit par oxydation.

Par ailleurs, un béton sollicité en traction ou en cisaillement va développer de la fissuration juste après la sollicitation. Un béton sollicité en compression restera intact (pas de fissure liée à la compression).

I.5.1- Propriétés de résistance des bétons

Résistance à la compression : le béton présente une excellente résistance à la compression ; f_{c28} jours des bétons peut pendre des valeurs entre 20 MPa et 200 MPa.

Résistance à la traction et au cisaillement : le béton présente une faible résistance au cisaillement et en traction. Sa résistance à la traction est de l'ordre du 10ème de sa résistance à la compression.

Ainsi le béton sollicité en traction ou en cisaillement se fissure dès la sollicitation et tombe en ruine. Pour y remédier à cette faiblesse les béton sont donc armé d'Acier d'où l'appellation **Béton Armé**.

Résistance aux chocs : on entend par chocs les sollicitations soudaines (de courte durée) et d'une forte intensité comme le séisme, les explosions, les accidents de véhicules contre les ouvrages...

Dans ces cas le béton se comporte comme un matériau fragile, il se brise juste après la sollicitation, il n'est pas ductile. Un matériau ductile se déforme largement avant de rompre.

Pour compenser les insuffisances du béton, notamment en terme de résistance à la traction, au cisaillement, aux chocs ; mais aussi aux effets des attaques chimiques qui provoquent de la fissuration dans le béton, on introduit alors dans le béton soit des armatures ou bien des fibres, d'où le béton armé et le béton de fibres.

1.5.2- Le béton armé

Le béton armé est utilisé dans tous les éléments d'ouvrages (poteaux, poutres, dalles, fondations, voiles...) soumis à des sollicitations importantes. Dans ce cas, les bétons sont dosés à près de 350 à 450 kg de ciment par m³. Les armatures sont souvent en Acier, elles sont introduites pour compenser les défauts du béton en résistance à la traction, au cisaillement et aux chocs.

Ces bétons présentent, dans le cas courant, des masses volumiques de l'ordre de 2500 kg/ m³. Toutefois, la masse volumique de ces bétons peut être adaptée en fonction des objectifs : bétons légers et bétons lourds.

Il existe trois sortes de béton armé :

Bétons ordinaires (BO) : les bétons ordinaires sont caractérisés par une résistance à la compression de l'ordre de 20 à 45 MPa. Ces bétons sont utilisés pour la réalisation des ouvrages usage habitations, commerces, scolaires, administratifs, culturels...

Bétons à hautes performances (BHP) : Ils sont caractérisés par une résistance à la compression de l'ordre de 45 à 80 MPa.

Bétons à ultra hautes performances (BUHP) : Ils sont caractérisés par une résistance à la compression de l'ordre de 80 à 120 MPa.

Le BHP et le BUHP se caractérisent souvent par des propriétés de durabilité excellentes, soit donc une faible porosité. Ils sont obtenus par l'introduction d'un pourcentage en fumée de silice ou de cendres volantes dans la composition du béton, mais aussi de forts réducteurs d'eau pour pouvoir formuler des bétons compacts à faible rapport E/C.

Ces bétons sont utilisés pour la réalisation des ouvrages d'une grande importance où la durée de vie longue est un critère essentiel à obtenir, exemple: Ponts, viaducs, tunnels, centrales nucléaires, barrages d'eau, certains murs de soutènement...

1.5.3- Les bétons de fibres

Souvent ce sont les bétons armés (BO, BHP, BUHP) auxquels on va associer des fibres. Les fibres ont des longueurs qui varient entre quelques millimètres à quelques centimètres, elles sont très fines au plus 1 à 2 mm de diamètre. Elles peuvent être de plusieurs natures : aciers, verre, végétales, synthétiques.... Dans le béton les fibres sont réparties d'une manière homogène dans son volume, sans orientation privilégiée.

Les fibres sont introduites pour empêcher (limiter) la fissuration du béton au jeune âge et à long terme. Les fibres vont également réduire le caractère fragile des bétons en lui procurant une meilleure résistance aux chocs notamment pour les surfaces extérieures et les surface de dallage.

Chapitre 1

Partie 2

LA FISSURATION DES BETONS

I.6- La fissuration précoce des bétons

I.6.1- Généralités

Une fissure est une rupture partielle, une fente du matériau. La fissure peut être superficielle ou bien profonde.

La fissuration du béton est indissociable du fonctionnement du béton et du béton armé et est intégrée au calcul des ouvrages [13, 14]. Une fissure peut avoir trois origines :

- le fonctionnement mécanique ou thermique de la structure
- la mise en œuvre du béton,
- les réactions chimiques internes à l'intérieur de la pâte de ciment.

Le béton se fissure dès que sa déformation dépasse 0,015 %. Une fissure due au fonctionnement mécanique peut-être considérée comme pathologique quand son ouverture atteint 0,3 mm. Dans les autres cas, son caractère pathologique dépend de son environnement et son origine.

En fonctionnement normal, les éléments du béton armé qui travaillent en traction (tirants) ou en flexion (poutres et dalles) sont fissurés. Les règlements de calcul béton armé proposent alors des formules de calculs fixant la limite admissible d'ouverture des fissures en fonction de l'agressivité du milieu.

La fissuration liée à la mise en œuvre peut être maîtrisée en renforçant le contrôle de la qualité du béton livré, voire la mise en place d'une centrale sur chantier, adapter des techniques utilisables pour la mise en place du béton en certains points particuliers de la structure, rappelé au techniciens l'interdiction d'ajout d'eau au béton, et l'application d'un produit de cure.

La fissuration qui reste difficile à maîtriser reste la fissuration liée aux réactions chimiques internes à l'intérieur de la pâte de ciment, et principalement la fissuration précoce du béton.

Les fissures précoces, souvent ouvertes, ayant échappée à la maîtrise générale de la fissuration par les armatures ou par les joints, sont préjudiciables à la durabilité des ouvrages en béton parce qu'elles peuvent faciliter la pénétration d'agents agressifs.

I.6.2- Fissuration précoce de la pâte de ciment

Au jeune âge, ce n'est pas le béton qui se fissure, mais c'est plutôt la pâte qui compose le béton [15]. En effet, toute déformation de la pâte de ciment entraîne une déformation du béton. La microfissuration spontanée du béton est liée aux retraits de la pâte de ciment dont les mécanismes dépendent essentiellement de la nature de la liaison eau-solide qui évolue dans le temps et plus particulièrement au cours des réactions d'hydratation du ciment[14, 15].

Ces fissures relèvent de quatre causes générales différentes qui se produisent au très jeune âge du béton tel que représenté dans le tableau suivant [13, 15].

Axe du temps	Quelques heures		Quelques jours	
	Pré-prise		Prise	Durcissement
Causes Mécanismes	Ressuage	Retrait plastique		Retrait thermique après prise
Tassement ; Forces de Van der Waals entre les grains	• Dosage en eau • Nature minéralogique des éléments fins (sable, ciment) • Ions dans la solution interstitielle du béton frais			
Dessiccation par évaporation		• Dosage en eau • Durée de prise (température) • Hygrométrie/ vitesse du vent • Rapport surface sur épaisseur • Distance à la face exposée.		
Contraction par refroidissement + auto-dessiccation				• Courbe de chaleur d'hydratation • Dimensions des pièces • Isolation du coffrage

Tableau I.7 : Causes générales de fissuration précoces, mécanismes physiques et paramètres impliqués pour les bétons courants [14].

Dans le tableau I.7, sont données les causes générales liées aux variations dimensionnelles du béton : avant la prise, le ressuage ; avant et pendant la prise, le retrait plastique et après la prise (période de durcissement) la concentration thermique et l'auto-dessiccation.

A ces causes correspondent des conditions particulières liées aux conditions de fabrication et de mise en œuvre qui co-déterminent la fissuration. Les principales sont : pour le ressuage, les obstacles au tassement (compacité granulaire, présence et densité des armatures), pour le retrait plastique, le vent et les températures élevées et, pour la concentration thermique, l'épaisseur des pièces.

Les fissures constituent des surfaces de discontinuité dans le béton, donc des chemins de passages à partir desquels la pénétration des agents agressifs est facile. Ces fissures sont d'autant préjudiciables à la durabilité qu'elles sont précoces car, se produisant avant que l'armature ne joue pleinement son rôle, elles sont alors souvent ouvertes [14].

Sur la figure suivante (xxx) on montre les quatre sortes de fissures précoces qui peuvent affecter un ouvrage.

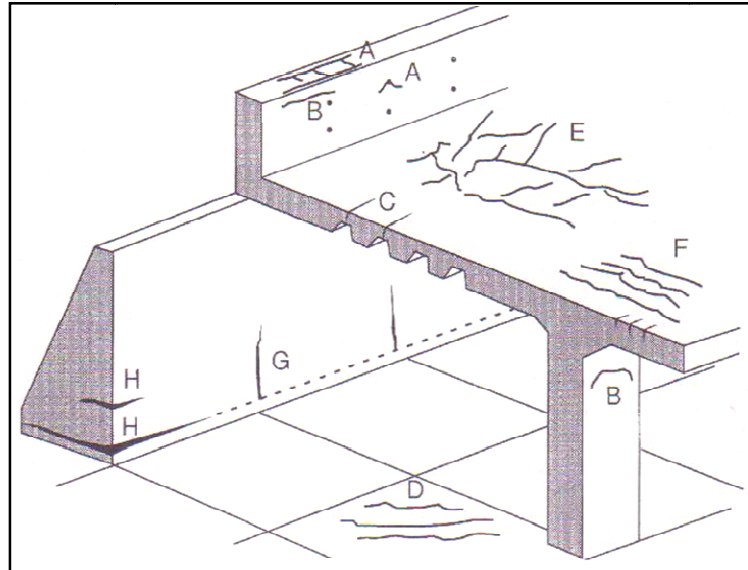


Figure I.13 : les quatre principales sortes de fissures précoces susceptibles d'affecter un ouvrage en béton.

Représentation schématique adaptée dans le « guide to durable concrete structures » selon C. H. Détriché [14]

A, B, C : fissures par ressuage ou par tassement du béton frais ;

D, E, F : fissures par retrait plastique ;

G, H : fissures par retrait thermique après prise ou par auto-dessiccation.

I.6.3- Causes générales de fissuration précoce

I.6.3.1- Le ressuage

Le phénomène de ressuage correspond à l'apparition d'une pellicule d'eau claire à la surface libre horizontale du béton frais. Cette manifestation est liée à un tassement progressif du squelette sous la pesanteur et à une remontée concomitante de l'eau et qui est ainsi (chassée) [14, 16, 17].

Le ressuage peut entraîner la formation de fissures au droit des obstacles s'opposant au mouvement de tassement du béton, comme la présence d'armatures, ou la variation locale de l'épaisseur de la pièce.

Pour prévenir ce phénomène, on peut jouer sur le dosage en eau et la dimension des granulats. Mais il faut surtout veiller à une composition granulométrique de qualité en particulier au niveau des sables.

Cependant, pour des structures présentant une grande surface horizontale et une hauteur réduite après mise en œuvre du béton, un peu de ressuage ne nuit pas car le béton augmente sa compacité de lui-même par sédimentation et se protège d'une dessiccation très rapide grâce à ce film d'eau ressue. Mais trop de ressuage est toujours néfaste.

I.6.3.2- Le retrait total

Le retrait correspond à des variations dimensionnelles mettant en jeu des phénomènes physiques avant, pendant ou après la prise des bétons. Lorsqu'elles ne sont pas maîtrisées par le ferrailage ou la présence de joints, ces variations dimensionnelles donnent lieu à l'apparition de fissurations précoces, d'ouverture conséquente [13, 14].

Les fissurations liées au retrait doivent être différenciées des phénomènes de fissuration fonctionnelle des ouvrages, ces derniers étant généralement maîtrisés par les règles de calcul, et restent compatibles avec la bonne tenue des ouvrages dans le temps, notamment en raison des faibles ouvertures des fissures.

Quatre types de retrait peuvent être à l'origine de l'apparition de fissures sur la surface des parements: retrait plastique, retrait de dessiccation, le retrait thermique et le retrait d'auto-dessiccation.

I.6.3.3- Le retrait plastique

Le retrait plastique est défini, de manière classique, comme la contraction du béton en phase plastique consécutive au séchage. Il se développe lorsque la quantité d'eau évaporée à la surface du béton est supérieure à la quantité d'eau de ressuage. En effet, juste après le coulage, les grains de ciment et l'air entraîné sont en suspension dans l'eau. Sous l'effet de la gravité, les particules solides sédimentent, alors que les bulles d'air remontent : la pâte se compacte. Au cours de cette consolidation, l'eau est contrainte de remonter vers la surface. Il se forme alors une couche d'eau de ressuage. Ce retrait est limité à la période précédant la prise du béton, lorsque ce dernier reste suffisamment déformable pour subir des tassements.

Mais, comme le début de prise est difficile à mesurer pour un béton, les mesures de retrait plastique disponibles dans la littérature englobent très souvent la contraction totale pendant la prise.

Au final, le retrait plastique est défini comme la contraction totale du béton entre la fabrication du béton et la fin de prise, contractions qui peuvent être gênées et créer une fissuration de surface au droit d'obstacles tels que des armatures.

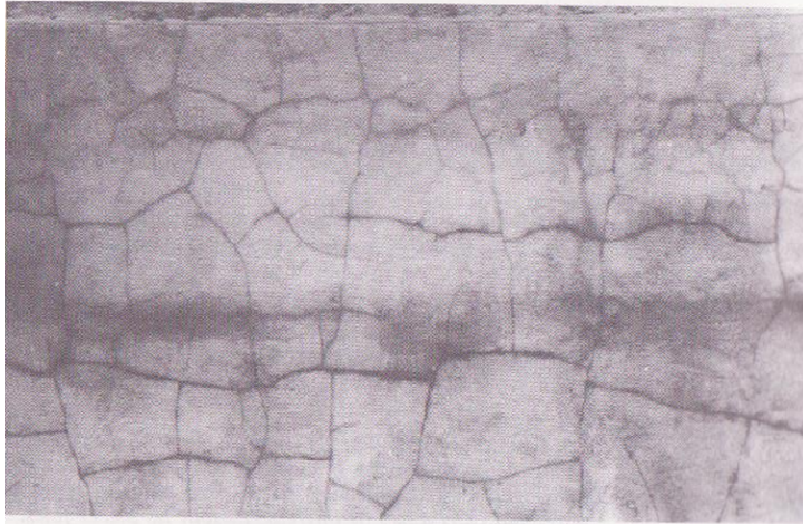


Figure I.14 : Exemple de fissuration par retrait plastique d'un revêtement de façade avec un pas de maillage de l'ordre de un à trois décimètres [14].

I.6.3.4- Le retrait de dessiccation

Le retrait de dessiccation est lié au séchage qui se manifeste avant, pendant et après la prise du béton. Dans des conditions courantes, il est de l'ordre de 1 mm/m. La fissuration qui en résulte est due à la dépression capillaire qui se produit lorsque des ménisques d'eau se forment dans les pores capillaires du béton frais.

Ce retrait, qui est donc consécutif à l'évaporation de l'eau, peut se manifester quelques minutes après la mise en œuvre du béton, et se poursuivre quelques semaines après. Il est piloté par la cinétique de dessiccation.

I.6.3.5- Le retrait thermique

Le retrait thermique est lié au retour à température ambiante des pièces en béton ayant au préalable subi une élévation de température due aux réactions exothermiques d'hydratation du ciment. Ce retour à température ambiante est accompagné d'une contraction qui génère des déformations empêchées susceptibles de conduire à l'apparition de phénomènes de fissuration.

Ce type de retrait, qui ne concerne que des pièces d'épaisseur supérieure à 60 à 80 cm, se manifeste de quelques dizaines d'heures après la mise en œuvre, jusqu'à quelques semaines, sa durée étant dépendante de la nature des éléments en béton considérés (plus une pièce est massive, et plus la contraction thermique sera lente).

I.6.3.5- Le retrait d'auto-dessiccation (endogène)

On nomme le retrait d'auto-dessiccation appelé aussi retrait endogène la contraction volumique de la pâte de ciment sans échange d'humidité avec le milieu extérieur en conditions isothermes [11, 16].

C'est la conséquence macroscopique du retrait chimique, contraction égale à la différence de volume entre les hydrates formés et les réactifs, eau et ciment. Phénomène appelé couramment contraction « Le Chatelier » : le volume des hydrates formés est plus petit que le volume de l'eau et du ciment anhydre initial [14].

Ce retrait augmente lorsque le rapport E/C diminue, il peut dépasser 10^{-4} en déformation linéaire après quelques jours de conservation.

Le phénomène conduisant à la contraction est dû à des forces de traction capillaires internes, similaires à celles responsables du retrait plastique. Ce dernier type de retrait concerne plus particulièrement les bétons à hautes performances (BHP) ou à très hautes performances (BTHP). Il devient négligeable pour les bétons ordinaires.

Ces quatre types de retrait peuvent se cumuler l'échelle d'un même béton (on parle ainsi du retrait total comme la somme des différents retraits). Enfin, le retrait d'auto-dessiccation et le retrait thermique intéressent la masse du béton, alors que les deux autres types de retrait concernent la périphérie des éléments en béton.

1.6.4- Principaux facteurs agissant sur la fissuration précoce

1.6.4.1- Facteurs agissant sur le tassement et donc le ressuage

Le tassement est d'autant plus fort que :

La durée de vibration est importante : la transmission directe de la vibration aux armatures accélère le tassement et localise des chenaux de ressuage près de l'armature ; la fissure reproduit alors le plan de la nappe supérieure d'armature.

La profondeur du béton frais est plus grande : la juxtaposition de deux zones de béton frais de profondeur différente, soit au voisinage des armatures, soit à la jonction de l'âme et du hourdis d'une poutre, entraîne des tassements différentiels.

La suspension est instable qui peut résulter des éléments ci-après :

- Manque d'éléments fins dans le sable ou dosage en ciment insuffisant ;
- Grains plats dans les éléments fins du sable ;
- Dosage en eau excessif ;
- Présence de certains électrolytes (adjuvants)

1.6.4.2- Facteurs agissant sur le retrait plastique

Le retrait plastique est d'autant plus grand que [16] :

La distance à la face exposée est petite : Les éléments de structure présentant un rapport surface/volume important sont les plus sollicités par ce type de retrait dont la manifestation est essentiellement superficielle.

La prise est lente : une température ambiante basse, des constituants secondaires (laitiers, cendres volantes,...), un excès d'eau de gâchage ou l'utilisation d'adjuvants ayant une composante retardatrice allongeant la période de prise.

La dessiccation est forte : une hygrométrie sèche, l'action du vent, une température du béton supérieure à celle du milieu ambiant favorisent la dessiccation par évaporation.

Un support poreux non humidifié, un coffrage absorbant sont également à l'origine d'une dessiccation par succion.

Un produit de cure peu efficace ou appliqué trop tard ne permet pas de contrer les effets de l'évaporation.

I.6.4.3- Facteurs agissant sur la contraction thermique après prise

La contraction thermique dépend [18] :

De la géométrie des éléments : les pièces massives subissent à cœur les élévations de température les plus importantes. Les pièces présentant des zones massives raccordées à des parties plus élancées sont le siège de gradients thermiques importants.

De la nature plus ou moins isolante des coffrages et de l'époque de décoffrage.

De l'exothermie présentée par le liant et de la cinétique de l'hydratation, la vitesse de dégagement de chaleur ayant avantage à être répartie dans le temps plutôt qu'à être brutale.

I.6.4.4- Facteurs agissant sur le retrait d'auto-dessiccation

Ce retrait de type endogène n'est réellement important que dans le cadre des bétons à hautes performances pour lesquels on a un faible rapport E/C.

I.6.5- Comment éviter ou contrôler le retrait ?

Dans la mesure où la fissuration de retrait est due à des mécanismes différents en fonction du type de retrait, les mesures préventives à considérer sont différentes. Il convient donc, en premier, d'identifier le ou les types de retraits susceptibles de se manifester pour un ouvrage donné [14, 19].

La limitation des effets liés au retrait de ressuage peut être obtenue en optimisant la formulation des bétons, en terme de dosage en ciment, de dosage en éléments fins et de dimension maximale des granulats, ainsi qu'en maîtrisant la quantité d'eau de gâchage afin de limiter le ressuage.

L'utilisation d'adjuvants réducteurs d'eau, ainsi qu'une étude soignée des plans de ferrailage et de la géométrie des pièces, constituent des solutions préventives indispensables. La prévention des effets liés au retrait plastique est obtenue en limitant la dessiccation du béton, c'est-à-dire l'évaporation de l'eau avant et pendant le durcissement.

La mise en place d'une cure du béton, dans le cas où les risques d'évaporation sont optimums (températures ambiantes élevées, vent), permet de réduire la dessiccation.

Les procédés de cure peuvent correspondre à une humidification régulière du parement, à la mise en place d'une feuille de polyane, ou encore à l'utilisation de produits de cure. La maîtrise de l'humidité des granulats et des coffrages, l'utilisation de fibres, ainsi que l'utilisation de quantités d'eau de gâchage peu élevées (emploi d'adjuvants réducteurs d'eau) permettent aussi de réduire la fissuration associée au retrait plastique.

La limitation des effets liés au retrait thermique peut être obtenue en utilisant des ciments à faible chaleur d'hydratation, tels que définis par la norme NF EN 197-3. Une protection de la surface des parements afin de limiter les risques de dessiccation accentués par l'élévation de la température de la masse du béton, constitue une mesure préventive complémentaire efficace.

Enfin, la fissuration due au retrait d'auto-dessiccation peut être limitée en prenant en compte, dans le calcul, les contraintes engendrées, et en les maîtrisant par l'ajout d'armatures passives ou de précontrainte.

1.6.6– Conclusion

La fissuration précoce du béton est directement liée à la fissuration précoce du ciment et donc aux différents phénomènes de retrait se produisant avant et pendant l'hydratation du ciment. Il en résulte que la fissuration précoce du béton dépend des différents paramètres régissant les réactions d'hydratation comme la composition de la pâte (rapport eau/ ciment, nature des ciments, dosage en ciment, teneur du béton en éléments fin...), mais aussi du mode de malaxage et de mise en place (durée de malaxage, manque de vibration...).

Dans tous les cas, la conséquence du phénomène de fissuration précoce est la diminution des propriétés des bétons, notamment en terme de durabilité des structures en béton armé ou précontraint et/ou limiter leur capacité portante, notamment dans le cas de manifestation dans la masse.

Cette fissuration peut conduire à limiter l'adhérence entre un matériau rapporté en surface (revêtement par exemple) et le support en béton.

Les conséquences de la fissuration sur la durabilité des structures en béton sont dues à l'augmentation de la cinétique de pénétration des agents agressifs présents dans le milieu environnant, au travers des fissures ouvertes sur les parements.

CHAPITRE II : CARACTERISATION DES MATERIAUX ET COMPOSITION DES BETONS

II.1- Introduction

Dans le béton les granulats (gravier et sable) forment la structure granulaire de béton, alors que le ciment, l'eau et les adjuvants forment la pâte liante. Lorsque le squelette granulaire est composé uniquement de sable, on parle alors de mortier. La pâte joue le rôle de lubrifiant et de colle.

Dans le béton et dans les mortiers la pâte joue un double rôle :

- A l'état frais, elle joue le rôle de lubrifiant, elle procure au béton la fluidité nécessaire pour faciliter la mise en place du béton et du mortier.
- A l'état, elle joue le rôle de colle, elle assure la liaison de l'empilement granulaire du béton.

Les propriétés des bétons, la résistance et la durabilité, sont donc intimement liées aux propriétés de la pâte liante, notamment en terme de fissuration précoce.

Ce chapitre est composé de trois parties :

- Dans la première partie, nous avons récapitulé les résultats de caractérisation des différents matériaux utilisés pour la composition de nos granulats. A la caractérisation du sable on s'est rendu compte que le sable est très grossier, on a alors pris la décision d'utiliser le sable du Sahara pour le corriger.
- Dans la deuxième étape, nous avons décrit les différentes formules de bétons étudiées on faisant varier la composition de la pâte de ciment.
- Dans la troisième étape, nous avons proposé une méthode pour la composition d'un mortier à pâte équivalent pâte du béton. Nous avons donc calculé les différentes compositions des mortiers à étudier.

Au total sept formules de béton sont formulées et testées, et sept autres formules de mortiers équivalent sont formulées et testées.

II.2- Définition des Matériaux et caractérisation

II.2.1- Matériaux de base utilisés

Dans notre étude, nous avons utilisé des matériaux naturels locaux.

II.2.1.1- Ciment

Le ciment utilisé pour notre étude est un ciment de type CPJ- CEM II/B 32,5 N Produit par LAFARGE Algérie. Les différentes caractéristiques que se soit chimiques, physiques ou mécaniques du ciment utilisé sont données sur la fiche technique élaborée par le producteur au niveau d'un laboratoire spécialisé conformément aux normes NA 442 et EN 197-1. Certaines caractéristiques sont présentées dans le tableau II.1 suivant :

Eléments (abréviation)	Teneur en(%)
Silicate tri calcique (C3 S)	58,00 - 64,00
Silicate bi calcique (C2 S)	12,00 - 20,00
Aluminates tricalciques (C3 A)	6,0 - 8,00
Alumino ferrites-tetracalcique (C4 AF)	10,00 - 13,00
SO ₃	2,10 - 2,50
MgO	1,00 - 1,30
Chlorures	0,01 - 0,03
Résidus insolubles	0,70 - 1,50
Perte au feu	8,00 - 10,00

Tableau II.1.Composition minéralogique du ciment

Propriétés physiques du ciment

Expansion 0,5 mm - 1,50 mm

Surface spécifique Blaine 4300 - 4800 cm²/g

Consistance normale 25,5 % - 28,00 %

Temps de prise à 20 °C :

Début	fin
2h40 min	3h25min
3h29 min	4h30min

Résistances caractéristique en compression du ciment.

A 2 jours ≥ 10 MPa

A 28 jours $\geq 32,5$ MPa

II.2.1.2- Les granulats

On a utilisé pour cette étude des granulats naturels semi concassés. Ces granulats sont de trois classes granulaires livrées sous les appellations commerciales : Sable 0/3, Gravier 3/8, Gravier 8/16. On a

également utilisé le sable 0/1 de Sahara, provenant de Boussaâda wilaya de Msila, Algérie. Ces granulats sont utilisés à l'état sec, mis en étuve à 105°C pendant 24 heures. Les paramètres de caractérisations de ces granulats sont donnés au paragraphe II.2.2.

Le sable de sahara est très fin et il est inerte. L'objectif dans son utilisation dans la formulation de nos bétons est d'améliorer la compacité du béton, mais aussi son ouvrabilité par sa finesse.



Figure. II.1 : Sable de Sahara utilisé.

II.2.1.3- Adjuvant (superplastifiant)

Dans notre étude on a utilisé le superplastifiant MEDAPLAST SP 40, produit par Granitex. Ce superplastifiant est aussi un haut réducteur d'eau. Il permet d'obtenir des bétons et mortiers de grande qualité en termes de résistance et de fluidité. En plus de sa fonction principale de superplastifiant, il permet de diminuer considérablement la teneur en eau du béton. MEDAPLAST SP 40 permet également un maintien d'ouvrabilité sur une longue période (2 heures). Voir fiche technique en annexe 3 pour plus d'indications sur ce produit.

II.2.1.4- Eau de gâchage

Pour toutes les gâchées de bétons et de mortiers, on a utilisé l'eau de robinet, qui est une eau potable.

II.2.1.5- Les armatures

Pour la partie étude de la fissuration, on a équipé certaines éprouvettes (dalles) de petites barres d'acier de diamètre 10 mm pour les dalles des mortiers, et de diamètre 12 mm pour celles des bétons.

II.2.2- Caractérisation des granulats

Les granulats utilisés dans les travaux de bâtiments et de génie civil doivent répondre à des impératifs de qualité et à des caractéristiques propres à chaque usage, il est nécessaire d'en établir les caractéristiques par différents essais de laboratoire.

II.2.2.1- Echantillonnage (NF P 18-553)

Les essais effectués au laboratoire portent nécessairement sur des quantités réduites de matériaux. Ceux-ci devant permettre de mesurer les 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 (annexe 1). L'opération d'échantillonnage s'effectue en général en deux étapes :

1. Prélèvement d'échantillon global du matériau, soit dans une carrière ou dans une usine.

2. Au laboratoire, prélèvement d'un échantillon par quartage pour les essais prévus. Cet échantillon doit être représentatif de l'échantillon du prélèvement de départ.

II.2.2.2- Analyse granulométrique (EN 933-1 et EN 933-2)

L'analyse granulométrique sert à déterminer la distribution en poids des particules d'un matériau suivant leurs dimensions. L'essai consiste à classer les différents grains de l'échantillon en utilisant des tamis, emboîtés les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. L'échantillon étudié est mis sur le tamis supérieur et le classement des grains est obtenu par vibration de la colonne de tamis (annexe 1).

Les pourcentages des tamisats cumulés sont représentés sous forme d'une courbe granulométrique en portant les ouvertures des tamis en abscisse sur une échelle logarithmique, et les pourcentages en ordonnée, sur une échelle arithmétique.

Il est bien de savoir que plus une courbe granulaire est régulière plus le squelette granulaire du béton formé est compact. La distribution granulaire a aussi un effet sur l'ouvrabilité du béton [8].

Sur la figure II.2 on a présenté les résultats de caractérisation granulométrique des granulats de notre étude (Sable de Sahara 0/1 ; Sable 0/3 ; gravillons 3/8 et gravillons 8/15).

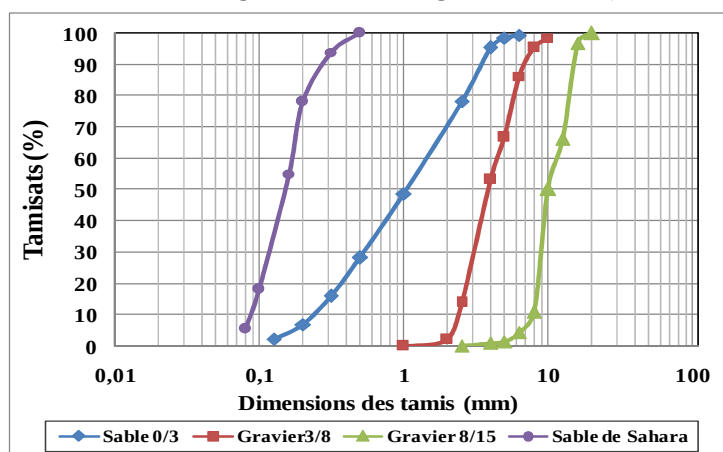


Figure II-2 : Courbes granulaires du sable de Sahara, sable 0/3, gravier 3/8 et gravier 8/15.

II.2.2.3- Module de finesse du sable

Le module de finesse (MF) est défini comme étant la somme des refus cumulés % ramené à l'unité des tamis : 0.16, 0.315, 0.63, 1.25, 2.5 et 5 mm. Ce paramètre est particulièrement appliqué aux sables dont il est une caractéristique importante. Un bon sable à béton doit avoir un MF entre 2.2 et 2.8. Voir plus de détails au paragraphe I.2.2.2 du chapitre 1.

- **2.2 < MF ≤ 2.8** sable préférentiel: convient bien pour obtenir une ouvrabilité satisfaisante et une bonne résistance avec des risques de ségrégation limités.
- **1.8 < MF < 2.2** sable un peu trop fin : est à utiliser si l'on recherche particulièrement la facilité de mise en œuvre au détriment probable de la résistance.
- **2.8 < MF < 3.2** sable un peu trop grossier : correspond à des sables à utiliser pour la recherche de résistance élevées, mais on aura en général une moins bonne ouvrabilité et des risques de ségrégation.

Pour notre sable est de $MF = \frac{96 + 84 + 66 + 48 + 23 + 2}{100} = 3,19$ ce qui correspond à un sable grossier.

II.2.2.4- Masses volumiques et Coefficient d'absorption

Les résultats de caractérisation des masses volumiques des différents granulats sont récapitulés dans le tableau II-2 ci-dessous (voir annexe 2 pour plus de détail)

1. La masse volumique apparente : c'est la masse d'un corps par unité de volume apparent à l'état naturel, après passage à l'étuve à 105°C, exprimée en (gr/cm³).
2. La masse volumique absolue : C'est la masse d'un corps par unité de volume absolu de matière pleine (volume de matière seule, pores à l'intérieure des grains exclus), après passage à l'étuve à 105°C, exprimée en (gr/cm³).

Granulats	Sable (0/3)	Gravier (3/8)	Gravier (8 /15)
Masse volumique absolue (g/cm³)	2,79	2,73	2,71
Masse volumique apparente (g/cm³)	2,59	2,63	2,63

Tableau II.2 : Masse volumique apparente et absolue des granulats

La mesure d'absorption permet de corriger la quantité d'eau finale à introduire dans la composition du béton. En fonction de l'état des granulats avant la gâchée (secs ou saturés ou simplement humides), on recalcule la quantité d'eau à introduire dans le béton : ainsi si les granulats sont secs, ils risquent d'absorber de l'eau efficace prévue pour l'hydratation du ciment, et donc voir le rapport E/C en baisse ; à l'inverse, si les granulats sont humides ou saturés, les granulats vont fournir au béton plus d'eau, et le rapport E/C change en hausse.

Le coefficient d'absorption est le rapport de la masse d'eau absorbée par le matériau jusqu'à saturation à la masse de l'échantillon sèche. Les résultats de caractérisation de l'absorption des différents granulats sont récapitulés dans le tableau II.3 ci-dessous.

Granulats	Sable (0/3)	Gravier (3/8)	Gravier (8 /15)
Absorption(%)	2,06	1,38	1,15

Tableau II.3 : Absorption des granulats

II.3- Formulation des bétons

Pour faciliter l'étude de la fissuration précoce, nous avons décidé de garder le même squelette granulaire pour tous les bétons à étudier. Les variables sont les proportions de la pâte, qui a priori ont un effet sur la fissuration précoce du béton.

Pour définir les proportions des différents granulats dans le béton on s'est servi de la méthode de Dreux Gorisse pour le calcul des proportions relatives des composants du squelette granulaire.

II.3.1- Définition des proportions relatives des composants du squelette granulaire

Pour la formulation du squelette du béton nous avons utilisé la méthode de Dreux Gorisse, méthode qui permet de déterminer les quantités optimales de matériaux pour 1 m³ de béton. La méthode est très simple d'utilisation, elle ne demande que la connaissance des courbes granulométriques des granulats. Pour plus d'information sur la méthode lire le paragraphe I.4.2 du chapitre 1.

Tracer de la courbe de référence selon la méthode de Dreux Gorisse

Cette courbe correspondant au mélange des granulats (sable 0/3, gravier 3/8 et gravier 8/15). Sur le même graphe d'analyse granulométrique (pourcentage des tamisats en fonction du diamètre des tamis), déjà obtenu (figure II-2 & figure II-3), on trace une courbe granulaire de référence OAB avec :

- Le point **O** est repéré par les coordonnées : [0,080 ; 0].
- Le point **B** est repéré par les coordonnées : [$D_{\max} = 20$; 100], ($D_{\max}$: le diamètre du plus gros granulat à l'analyse granulométrique).
- Le point de **brisure A**, a les coordonnées suivantes :
 - Abscisse : $X_A = D_{\max} / 2 = 10 \text{ mm}$;
 - Ordonnée : $Y_A = 50 - (20)^{1/2} + K + K_s + K_p$

Avec **K**, **K_s** et **K_p** : coefficients qui dépendent du dosage en ciment, de l'intensité de vibration, de la forme des granulats roulés ou concassés, de leur module de finesse et de la pompabilité du béton.

Pour le cas de notre béton de référence, on a souhaité formuler un béton courant d'un dosage en ciment de 350 kg, pas de vibration, soit donc une valeur de $K = 0$.

Dans notre étude nous avons souhaité de formuler des bétons très plastiques, affaissement total des bétons, béton auto-nivelant. Nous avons également souhaité que ces bétons soient pompables sans ségrégation, Soit donc une valeur de $K_p = 5$.

Ainsi pour le cas de notre squelette granulaire, malgré que notre sable présente un module de finesse de 3,14 (sable grossier) nous avons décidé de le corriger avec le sable de Sahara, soit donc un $K_s = 0$.

$$\text{Ordonnée : } Y_A = 50 - (20)^{1/2} + 0 + 0 + 5 = 50 - 4,47 + 5 \cong 50$$

Les lignes de partage

Les droites raccordant le point à 95% (tamisât) d'un granulat au point à 5% du granulat suivant (et ainsi de suite) sont appelées **lignes de partage**. Les points d'intersection des lignes de partage successives donnent en cumulés les pourcentages correspondant aux différents granulats successives. Il s'agit de pourcentages en volumes absolus.

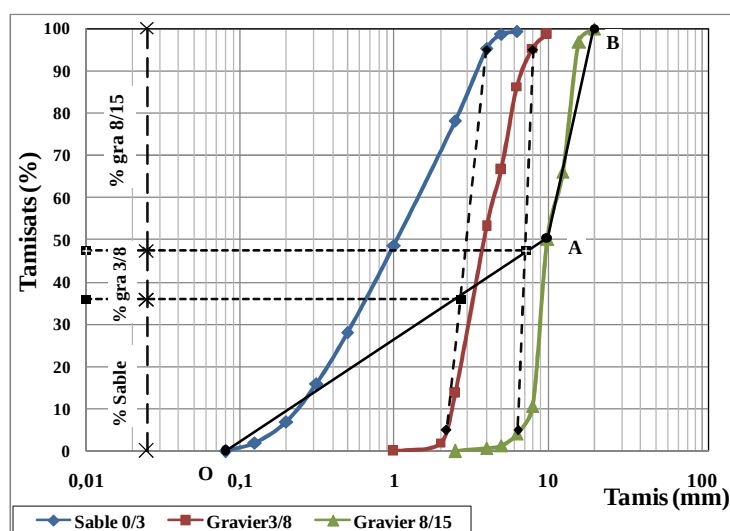


Figure II-3 : Courbes granulaires des 3 granulats, la courbe brisée et les lignes de partage.

Sur la courbe granulométrique, les points d'intersections entre les lignes de partage et la courbe de référence OAB donnent les pourcentages des granulats suivants :

Sable (0/3) : 36%

Gravier (3/8) : 48% - 36% = 12 %

Gravier (8/14) : 52%

II.3.2- Les formulations des bétons utilisés

Pour notre étude nous avons utilisé six formulations de bétons. Les compositions sont indiquées dans le tableau II-4 suivant. La formule de référence pour notre étude est la formule 2. Les autres formules sont obtenues en rajoutant ou bien en soustrayant une quantité soit en eau ou en ciment ou bien en sable de Sahara à la formule 2. Les proportions volumiques entre les granulats sont restés les mêmes. Le paramètre global qui varie est le volume de pâte ou la composition de la pâte.

Compositions (kg) de 1 m ³ de béton						
	Formule 1	<u>Formule 2</u>	Formule 3	Formule 4	Formule 5	Formule 6
Ciment	425	<u>404</u>	401	370	447	404
Sable de Sahara	243	<u>347</u>	401	370	335	0
Sable 0/3	558	<u>532</u>	527	567	514	646
Gravier 3/8	134	<u>127</u>	126	136	123	244
Gravier 8/15	631	<u>601</u>	596	641	581	717
Eau	221	<u>212</u>	212	182	220	212

Tableau II-4 : Compositions des différentes formules de béton à étudier.

Note : toutes les formules seront dosées en superplastifiant, suffisamment pour avoir un affaissement total du béton, soit donc avoir des bétons auto-nivelant.

Dans le tableau suivant nous avons récapitulé quelques propriétés supplémentaires des bétons testés.

	Formule 1	<u>Formule 2</u>	Formule 3	Formule 4	Formule 5	Formule 6
E/C	0,52	<u>0,53</u>	0,53	0,49	0,49	0,53
V pâte (E+C)	356	<u>340</u>	339	299	361	340
G/S vol (sans SS)	1,35	<u>1,35</u>	1,35	1,35	1,35	1,46
G/S vol (avec SS)	0,94	<u>0,82</u>	0,77	0,82	0,82	1,46
Vol (C+E+SS)	448,2	<u>472,2</u>	491,8	439,8	488,6	340,4
Vol granulats sans SS	503	<u>478</u>	474	510	462	610
Vol granulats avec SS	595	<u>610</u>	627	651	590	610
Densité théorique	2222	<u>2232</u>	2257	2275	2228	2233

Tableau II-5 : Quelques propriétés supplémentaires des bétons formulés.

Les valeurs indiquées dans le tableau II.5 sont obtenues en utilisant les propriétés des différents composants des bétons (masses volumiques imbibée). Vu le nombre de calculs important, dans ce tableau nous avons indiqué uniquement les résultats obtenus.

CHAPITRE III : LE MORTIER COMME OUTIL D'AIDE A LA FORMULATION DES BETONS.

III.1- Définition d'un mortier

Dans cette partie qui traite les mortiers, on s'intéresse au mortier comme outil d'aide à la formulation des bétons, et non pas comme matériau de construction. Pour cette raison on ne donnera ici qu'une brève définition d'un mortier.

Le mortier se distingue du béton par l'absence de gravillons. Le mortier est un mélange de sable, ciment, eau et éventuellement d'adjuvants. De multiples compositions de mortier peuvent être obtenues en jouant sur les différents paramètres : liants (type et dosage), adjuvants et ajouts, dosage en eau. En ce qui concerne le liant, tous les ciments et les chaux sont utilisables; le choix de leur nature et de leur dosage est fonction de l'utilisation envisagée du mortier.

Habituellement le mortier est utilisé comme un matériau de construction notamment pour tous les éléments en maçonnerie, les enduits, les chapes, les scellements et les calages etc. L'objectif de notre étude est d'utiliser le mortier comme outil d'aide à la formulation et la caractérisation des bétons.

III.2- Pourquoi les mortiers ?

L'étape de formulation des bétons a toujours été difficile. Les essais de caractérisation à menés sur les bétons sont très lourds et coûteux en argent mais aussi en temps, ainsi le travail de formulation des bétons devient très difficile. Toutes les méthodes de formulation des bétons ont recours à des essais de laboratoire pour le calage des quantités des différents composants. De plus, avec tous les nouveaux produits proposés sur le marché, il devient très difficile de choisir les produits les plus adéquats aux exigences prescrites.

Pour répondre à ce besoin d'aide à la formulation et au tri des produits, plusieurs essais sur pâte de ciment, sur coulis ou sur mortier sont alors développés [9, 21]. Ces derniers permettent d'étudier les interactions possibles de certains composants et donc de détecter, au préalable, toutes incompatibilités des produits.

Cependant, la pâte de ciment reste insuffisante pour représenter correctement les différents phénomènes régissant le comportement des bétons, particulièrement les interactions ciment-granulats-

adjuvants. De plus, en présence de granulats, la pâte a un comportement qui est fonction de la compacité granulaire. Le mortier est donc le matériau qui présente le plus de ressemblances de propriétés à celles des bétons.

Le mortier normalisé, formulé avec du sable normalisé, est utilisé pour caractériser les résistances caractéristiques des ciments, valeurs habituellement utilisées pour la prévision des résistances des bétons comme c'est déjà expliqué au paragraphe I.4.2 du chapitre 1. Là aussi, pour ce genre de mortiers, le problème c'est la nature du sable qui est imposée ; la nature du sable est différente de la nature du sable des bétons, donc la prévision des propriétés des bétons n'est pas évidente [9, 21].

Par ailleurs, le mortier utilisant le sable du béton a déjà démontré son efficacité quant à l'étude des interactions ciment - adjuvant.

III.3- Historique

Depuis toujours, on a utilisé la pâte de ciment ou le mortier normalisé formulés avec le ciment du béton pour définir au préalable la cinétique de durcissement des bétons à partir de celle de la pâte ou bien la résistance d'un béton à partir de celle d'un mortier normalisé.

L'écoulement au mini cône d'une pâte de ciment a été un des premiers essais sur pâte à être utilisé pour étudier l'influence des superplastifiants réducteurs d'eau sur l'ouvrabilité de la pâte de ciment [23]. En 1989, le Laboratoire central des ponts et chaussées a développé la méthode des coulis comme outil d'aide à la formulation des bétons à hautes performances [20]. La méthode des coulis utilise les fines de béton à diamètres inférieurs à 80 μm . Les techniques de mesure sont diverses ; mesures de l'étalement du coulis en utilisant un mini cône; mesure du temps d'écoulement au cône de Marsh pour comparer la fluidité de plusieurs pâtes de ciment et ou d'additions [24, 25].

Les résultats obtenus par ces méthodes sont utilisés pour sélectionner les constituants de la pâte et étudier leurs interactions, mais ne permettent pas de prédire le comportement du béton. En effet, par ces méthodes, on ne peut pas prévoir les interactions possibles entre les adjuvants et les granulats. De plus, la pâte de ciment et les coulis ne présentent pas le même comportement quand ils sont pris individuellement ou en présence des granulats. En effet, le seuil de cisaillement d'une pâte de ciment est fonction l'écartement des granulats [9, 26].

Turcry a utilisé des mortiers formulés à 45% de sable normalisé pour étudier l'influence de la composition d'un béton sur la fissuration plastique [16].

La méthode du Mortier de Béton Equivalent (MBE) considère un mortier dont la composition est dérivé de celle du béton [22, 26]. Le principe de cette méthode est basé sur le fait qu'il existe une corrélation simple reliant les propriétés rhéologiques d'un béton à celles du mortier le composant. La composition du MBE est calculée à partir de la formule de béton à étudier en remplaçant les gravillons par un sable 0/4 développant la même surface granulaire que les gravillons enlevés.

En effet, la rhéologie des produits cimentaires dépends beaucoup de la surface de contact entre les granulats et la pâte ; cette substitution permet donc de trouver une corrélation entre le comportement rhéologique des bétons et des mortiers de béton équivalent.

La méthode a démontré qu'il existe une corrélation linéaire entre l'affaissement d'un béton vibré, mesuré au cône d'Abrams, et l'étalement de son MBE, mesuré au mini cône (échelle ½ cône d'Abrams) [27].

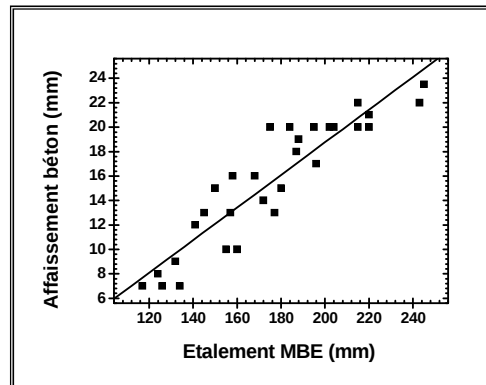


Figure III. 1 : Corrélation affaissement béton et étalement MBE

La méthode a également démontré qu'il existe une corrélation de type linéaire entre l'étalement d'un béton autoplaçant et l'étalement de son MBE.

Le MBE permet de suivre le maintien de la rhéologie sur mortier au lieu du béton. La méthode permet de choisir la nature, le dosage et le mode d'introduction de l'adjuvant en fonction de la rhéologie visée. Elle permet également de détecter les incompatibilités ciment - adjuvants. Cependant, une fois les sélections faites sur MBE, il est recommandé de mener sur béton des essais de vérification.

Par ailleurs, parce que le béton et son MBE sont composés d'un même ciment, au même rapport E/C, il a été démontré que le béton et son MBE se caractérisent de la même énergie d'activation des réactions d'hydratation du ciment, mais aussi de la même cinétique d'hydratation [9].

III.4- Quels mortiers pour notre étude ?

L'objectif de cette étude est de proposer un mortier qui permettra de corrélérer, le mieux possible, la fissuration précoce des bétons. On s'est basé alors, pour la composition du mortier, à garder les mêmes paramètres qui influent le plus la fissuration des bétons, comme le volume de pâte, la composition de la pâte, la teneur en fines des bétons, et le rapport eau/ciment, etc. Le mortier que l'on souhaite développer est le mortier à pâte équivalente pâte du béton.

III.5- Principe de calcul du mortier à pâte équivalente pâte du béton

La composition du mortier à pâte équivalente pâte du béton est calculée à partir de la formule de béton à étudier en respectant les conditions suivantes :

- Utilisation du sable du béton ;
- Pas de matériau de diamètre supérieur à 4 mm ;
- Même ciment que le béton et même rapport Eau efficace / ciment ;
- Même addition et même rapport addition / ciment ;
- Mêmes adjuvants et mêmes rapport adjuvants / ciment ;
- Même volume de sable que le béton ;
- Même volume de pâte que le volume de pâte du béton ;

Même dosage en adjuvant.

Pour satisfaire ce dernier point on remplace le volume occupé par les gravillons par un volume identique de sable 2/4.

III.6- Pourquoi le sable 2/4 ?

Le choix du sable 2/4 est justifié par le fait que ce sable ne contient pas de fines, donc la surface spécifique développée par ce sable n'est pas tellement grande devant celle développée par les gravillons. En effet, pour une sphère de diamètre D représentant la forme du granulat, la surface spécifique de ce granulat correspond au rapport entre la surface développée par la sphère sur le volume de la sphère. Soit :

$$\text{Surface (sphère) / Volume (sphère)} = [\pi \times D^2] / [(1/6) \pi \times D^3] = 6/D$$

Ainsi : Plus le granulat est grand plus sa surface spécifique est petite.

Pour d'autre forme de granulats, on obtiendrait un coefficient autre que 6/D, mais la surface spécifique demeure toujours inversement proportionnelle à la dimension du granulat.

Avec cette démarche, on se rapproche de plus en plus de la propriété des bétons.

Pour le calcul des compositions des mortiers à pâte équivalente pâte du béton, il suffit de calculer le volume des gravillons imbibés et de le remplacer par un volume égale en sable 2/4. Dans ce cas le sable doit être lavé et écrêté aux tamis 02 et 04 mm, une photo du sable obtenue est donnée sur la figure III.2.



Figure III.2 : sable 02/04 pour le mortier à pâte équivalente pâte du béton.

III.7- Programme expérimental des mortiers

III.7.1- Matériaux de base utilisés

Les matériaux utilisés pour la formulation des ces mortiers sont ceux déjà décrits au chapitre 2 ; Sable 3/8, même ciment, même adjuvant. Dans ce cas, le seul nouveau produit est le sable 02/04 qui remplace donc les deux graviers (gravier 3/8 et le gravier 8/15).

Sur la figure III-3 est représentée la courbe granulaire du sable 02/04 obtenue après qu'il soit lavé et écrêté aux tamis 02 et 04 mm.

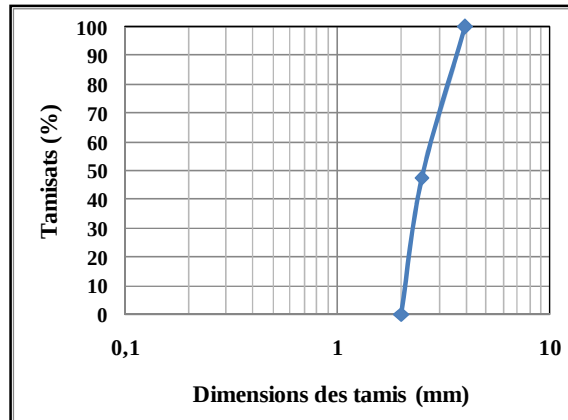


Figure. III.3 : Courbe granulaire du sable 02/04 utilisé.

III.7.2- Composition des mortiers à pâtes équivalentes pâtes des bétons :

Il est à noter que chaque béton a son propre mortier équivalent. Comme nous avons 6 formules de bétons on dispose alors de 6 formules de mortiers.

Principe de calcul

Composition du béton

Composition du mortier

Volume gravier 8/15	=	Volume Sable 2/4
Volume gravier 3/8	=	Volume Sable 2/4
Volume Sable de Sahara	=	Volume Sable de Sahara
Volume Sable 0/04	=	Volume Sable 0/04
Volume Ciment	=	Volume Ciment
Volume d'eau efficace	=	Volume d'eau efficace
Dosage en adjuvant	=	Dosage en adjuvant.

Ainsi, le volume du sable 2/4 = (Volume gravier 3/8 + volume gravier 8/15)

Granulat	Masse volumiques absolue	Masse volumiques réelles
Sable 0/3	2,79	2,59
Granulat 3 /8	2,73	2,63
Granulat 8/15	2,71	2,63
Sable 2/4	2,73	2,60

Tableau III.1 : Masses volumique des différents granulats.

Calcul des volumes :

Calcul de la quantité de sable 2/4 en remplacement au gravier 8/15.

$$V_{G8/15} = V_{S2/4} \Rightarrow \frac{M_{G8/15}}{Mv_{G8/15}} = \frac{M_{S2/4}}{Mv_{S2/4}}$$

$$M_{S2/4}^1 = \frac{M_{G8/15}}{Mv_{G8/15}} \cdot Mv_{S2/4}$$

Le même calcul est effectué pour le gravier 3/8.

$$V_{G3/8} = V_{S2/4} \Rightarrow \frac{M_{G3/8}}{Mv_{G3/8}} = \frac{M_{S2/4}}{Mv_{S2/4}}$$

$$M_{S2/4}^2 = \frac{M_{G3/8}}{Mv_{G3/8}} \cdot Mv_{S2/4}$$

La quantité totale de sable 2/4 est la somme des deux quantités calculées précédemment :

$$M_{S2/4}^{Total} = M_{S2/4}^1 + M_{S2/4}^2$$

Le calcul a été effectué autant de fois que nous avons de formules.

Les compositions de 1m³ des mortiers ainsi obtenues à partir des compositions de 1m³ de béton sont récapitulées dans le tableau suivant :

Compositions (kg) de 1 m ³ de Mortiers						
	FM1	FM2	FM3	FM4	FM5	FM6
Ciment	425	404	401	370	447	404
sable de Sahara	243	347	401	370	335	0
sable 0/3	558	532	527	567	514	646
Sable 2/4	132	126	125	134	121	241
Sable 2/4	624	594	589	634	574	709
E efficace	221	212	212	182	220	212

Tableau III.2 : formulation des mortiers à partir des bétons.

Dans le tableau suivant nous avons récapitulé quelques propriétés supplémentaires des mortiers testés. Les valeurs indiquées dans le tableau suivant sont obtenues en utilisant les propriétés des différents composants des (masses volumiques imbibées), les formules utilisées sont celles décrites au chapitre II paragraphe II.3.2. Vu le nombre de calculs important, dans ce tableau nous avons indiqué uniquement les résultats obtenus.

	Formule 1	<u>Formule 2</u>	Formule 3	Formule 4	Formule 5	Formule 6
E/C	0,52	<u>0,53</u>	0,53	0,49	0,49	0,53
V pâte (E+C)	356	<u>340</u>	339	299	361	340
G/S vol	0	<u>0</u>	0	0	0	0
Vol (C+E+SS)	448,2	<u>472,2</u>	491,8	439,8	488,6	340,4
Vol granulats sans SS	503	<u>478</u>	474	510	462	610
Vol granulats avec SS	595	<u>610</u>	627	651	590	610
Densité théorique	2213	2224	2249	2266	2220	2222

Tableau III.3 : Quelques propriétés supplémentaires des bétons formulés.

III.8- Conclusion

Dans ce chapitre nous avons récapitulé les différents résultats de caractérisation des matériaux utilisés pour notre étude. Nous avons aussi décrit les différents modes opératoires de essais soit dans le texte, soit en annexes (Echantillonnage, Analyse granulométrique, masses volumiques etc.). Nous avons également, donné la démarche suivie pour la formulation de nos bétons et les formules étudiées. Les compositions prévues pour l'étude sont donc résumées sous forme d'un tableau, six formules sont à étudier.

CHAPITRE IV : RESULTATS ET EXPLOITATION DES RESULTATS SUR BETONS ET MORTIERS

IV.1 INTRODUCTION

Ce chapitre est subdivisé en trois parties :

- Dans la première partie nous avons détaillé les modes opératoires des essais et le programme expérimentale mené sur béton et celui mené sur mortiers à pâte équivalentes pâtes des bétons. Dans le programme expérimental nous avons mené trois campagnes d'essais : essais de résistance à 28 jours, essais de ressuage et essais de fissuration précoces.
- Dans la deuxième partie, nous avons récapitulés les résultats expérimentaux sur bétons en résistance, fissuration et ressuage, ainsi qu'une interprétation des résultats ;
- Dans la troisième partie sont donnés les résultats expérimentaux sur Mortiers ainsi qu'une interprétation des résultats ;

IV.2- MODES OPERATOIRES ET ESSAIS

La réalisation de n'importe quelle gâchée nécessite une quantité suffisante de matériaux et un certain matériel de laboratoire.

Pour les matériaux nous avons travaillé avec des granulats secs, donc nous les avons mis à l'étuve pendant 24 heures à une température de 105°C. Après séchage, les granulats sont ramenés à la température ambiante. Les granulats sont par la suite mis dans des sacs en plastique pour éviter qu'ils reprennent de l'humidité.

IV.2.1- Confection des bétons et essais sur bétons

IV.2.1.1- Préparation de la gâchée

Nous avons nettoyé les moules et nous les avons huilés pour faciliter le démoulage. Nous avons aussi préparé les pesées (gravier 3/8 et 8/14, sable 0/3 et sable de Sahara, le sable 2/4 pour les mortiers, l'eau et l'adjuvant). Une fois que tout le matériel nécessaire est préparé (les moules, cône d'Abrams, la table d'étalement, mètre...), tout le matériel utilisé est prés humidifié.

A cause d'une panne du malaxeur les gâchés de bétons sont réalisées à la main (comme montré sur la figure III.1 ci- dessous).



Figure IV.1 : Préparation du matériel nécessaire pour le gâchage manuel des bétons.

En premier lieu il faut introduire le sable et le gravier dans le récipient. Homogénéiser bien puis et ajouter de l'eau prévue pour l'humidification des granulats. Après 2 minutes de repos, on ajoute le ciment et on mélange bien le tout, puis on ajoute l'eau tout en mélangeant. Par la suite on introduit le super plastifiant peu à peu, jusqu'à se qu'à l'œil le béton devient fluide, il s'étale sous son propre poids. A cet instant, on arrête de mélanger.

Tout suite après, on réalise l'essai d'étalement au cône d'Abrams tel que montré sur la figure IV.1. Une fois le béton validé, on remplit les moules prévus pour la résistance, la fissuration et le ressuage.

IV.2.1.2- Essai d'affaissement et d'étalement

Cet essai est utilisé pour apprécier la consistance des bétons. Il est réalisé en utilisant un moule tronconique de 300 mm de haut, de 200 mm diamètre à sa base et 100 mm de sa partie supérieure.

Le moule tronconique placé sur une surface lisse horizontale, il est rempli de béton, après arasement, le moule est retiré verticalement pour laisser le béton couler. Une fois le béton stable, on mesure alors une des valeurs souhaitées « affaissement ou étalement ».

L'échantillon de béton s'effondre sous son poids propre ; plus l'affaissement est grand plus le béton est plastique ; aussi plus l'étalement est grand plus le béton est fluide.

IV.2.1.3- Essais de résistance à 28 jours pour les bétons

Pour caractériser la résistance à 28 jours, on a utilisé des moules cylindrique de diamètre de 10 cm et d'une hauteur de 20 cm. Après que les moules soient remplis de béton, ils sont protégés avec un film en plastique pour éviter l'évaporation de l'eau. Après 24 heures, les éprouvettes sont démoulées et référencées au marqueur (date de la réalisation et numéro de l'éprouvette). Elles sont alors immergées dans un bac d'eau pendant 27 jours. Au 28^{ème} jour, elles sont retirées de l'eau, laissées séchées en surface pendant 2 à 3 heures, elles sont en suite pesées, puis écrasées.



Figure IV.2 : éprouvette en cours de l'écrasement.

La résistance d'un béton à 28 jours désignée souvent f_{c28j} est mesurée à partir de la charge à la rupture (Fr) : charge maximale enregistrée au cours de l'essai d'écrasement sous une contrainte normale axiale. La presse utilisée est d'une capacité maximale de 2000 kN (voir figure III.12), les essais ont été réalisés avec une vitesse de chargement de 0,5 MPa/s.

IV.2.1.4- Essais de ressuage

Le béton fraîchement coulé a tendance à libérer son eau. Sous l'effet de la pesanteur et du compactage, les composants lourds du béton se tassent dans la pâte de ciment aqueuse, poussant l'eau vers le haut. Un film d'eau se forme à la surface supérieure. Son étendue dépend principalement de la composition du béton, de la consistance et de la teneur en eau du béton frais, ainsi que de la hauteur de la colonne de béton. Ce phénomène peut entraîner un tassement du squelette du béton, et être à l'origine de fissures.

Pour mesurer le ressuage des bétons nous avons utilisé un moule cylindrique 16 × 32 cm. Le moule est rempli de béton frais à une hauteur bien définie. Le moule est couvert d'un film en plastique pour empêcher l'évaporation de l'eau de ressuage. Après trois heures de repos, l'eau de ressuage est prélevée par une seringue puis pesée.

A 24 heures l'éprouvette formée est décoffrée, puis pesée pour pouvoir calculer la quantité de ressuage par rapport au poids de l'échantillon.



Figure IV.3 : à gauche : en avant plan éprouvettes 10×20 pour la résistance à 28 jours, en arrière plan éprouvette 16×32 pour le ressuage ; à droite : prélèvement d'eau de ressuage à la seringue.

IV.2.1.5- Essais de fissuration

Pour étudier la fissuration, nous avons choisis de travailler sur des petites dalles d'une faible épaisseur de l'ordre de 3 à 4 cm. Nous avons alors testés des dalles, d'une longueur et largeur de 23 × 27 cm². Plusieurs sortes d'expositions sont réalisées ; pour chaque formule de béton, nous avons confectionné 6 à 8 dalles, chaque dalle sa spécificité.

- 1^{ère} dalle : sans armatures et sans protection ; (démoulage à faire à 24 heures) ;
- 2^{ème} dalle : Sans armatures et avec protection; (démoulage à faire à 24 heures) ;
- 3^{ème} dalle : avec armatures et sans protection ; (démoulage à faire à 24 heures) ;
- 4^{ème} dalle : avec armatures et avec protection ; (démoulage à faire à 24 heures) ;
- 5^{ème} dalle : avec armatures et sans protection (démoulage à faire le 7^{ème} jour) ;
- 6^{ème} dalle : avec armatures et avec protection (démoulage à faire le 7^{ème} jour) ;

Ce programme a été complété par la variation d'exposition, nous avons en plus réalisé 2 dalles de $40 \times 40 \text{ cm}^2$ conservées à des températures de 40°C , 50°C .

Pourquoi ces différentes variantes de conditions ?

- l'objectif dans l'introduction des armatures et de créer des lignes préférentielles pour les fissures ; contrairement au mêmes dalles sans armatures
- l'objectif de protéger avec un film en plastique c'est d'empêcher l'évaporation de l'eau de ressuage et le séchage de la surface supérieure, contrairement au autres sans protection pour lesquelles l'eau va s'évaporer et cela accélérera la fissuration des éprouvettes.
- le démoulage à 7 jours c'est pour maintenir les dalles dans les moules bien serrées, ce qui a priori empêcherait toute éventuelle déformations imposées ; contrairement aux éprouvettes démoulées sous 24 heures, elles sont sujettes à toutes éventuelle déformation.
- l'objectif de changer la température d'exposition et de amplifier la fissuration, en accélérant le l'évaporation et le séchage, mais aussi les réactions d'hydratation. les bétons sont testés à la température ambiante près de 20°C pour la saison ; puis à l'étuve à deux températures d'exposition différentes 50°C et 60°C .

Donc finalité, on a souhaité provoquer la fissuration sur certaines éprouvettes plus que sur les autres.

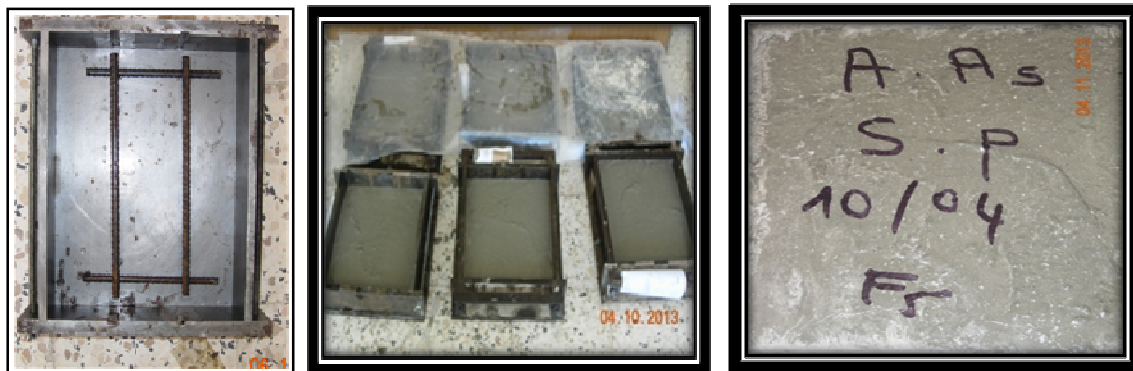


Figure IV.4 : moules après remplissage, apparence des dalles après décoffrage.



Figure IV.5 : moule disposé à l'étuve pour le séchage accéléré.

IV.2.2- Confection des mortiers et essais sur mortiers

IV.2.2.1- Préparation d'une gâchée de mortier

Nous avons commencé par la préparation de tout le matériel nécessaire, nettoyage, huilage et humidification. Nous avons préparé les pesées des matériaux (sable 0/3, le sable 2/4 de remplacement, le sable de Sahara, le ciment, eau et l'adjuvant).

De même que pour les bétons, le malaxage des mortiers a été fait manuellement (figure IV.1).

En premier lieu on introduit les sables et l'eau prévue pour leurs humidification, puis on mélange jusqu'à homogénéisation. Après 2 minutes de repos, on ajoute le ciment et on mélange bien le tout, puis on ajoute l'eau tout en mélangeant. En dernier on introduit le super plastifiant prévu peu à peu.



Figure IV.6 : Préparation de la gâchée pour un mortier.

Une fois le mortier prêt on remplit les moules prévus pour la résistance, la fissuration et le ressuage.

IV.2.2.2- Essais de résistance à 28 jours des mortiers

Pour caractériser la résistance à 28 jours, nous avons suivi la même démarche que pour la résistance à 28 jours des bétons tel que décrit au paragraphe IV.2.1.3 *Essais de résistance à 28 jours des bétons*. Comme pour les bétons, nous avons utilisé les moules cylindrique de diamètre de 10 cm et d'une hauteur de 20 cm pour mesurer la résistance.

IV.2.2.3- Essais de ressuage

Pour mesurer le ressuage des mortiers nous avons utilisé un moule cylindrique de 6 cm de diamètre à la base et de 10 cm de hauteur. Pour le déroulement de l'essai nous avons respecté la même procédure que pour le béton tel que décrit au paragraphe IV.2.1.4- *Essais de ressuage*.

IV.2.1.4- Essais de fissuration

De même que pour les bétons, nous avons choisis de travailler sur des petites dalles d'une faible épaisseur de l'ordre de 3 à 4 cm. Nous avons alors testés des dalles carrés $10 \times 10 \text{ cm}^2$. Les dalles sont coulées dans des moules en bois confectionné manuellement au laboratoire. Nous avons également

pour les essais mis en étuve à 50 et 60°C, nous avons utilisés des dalles en forme de disque en aluminium de près de 30 cm de diamètre.



Figure IV.7 : La fabrication des moules en bois pour les dalles de mortiers.

Nous avons alors repris les mêmes essais que pour les bétons, les mêmes variantes et mêmes expositions. Pour chaque formule de mortier, nous avons confectionné 6 dalles, chaque dalle sa spécificité.

- 1^{ère} dalle : sans armatures et sans protection ; (démoulage à faire à 24 heures) ;
- 2^{ème} dalle : Sans armatures et avec protection ; (démoulage à faire à 24 heures) ;
- 3^{ème} dalle : avec armatures et sans protection ; (démoulage à faire à 24 heures) ;
- 4^{ème} dalle : avec armatures et avec protection ; (démoulage à faire à 24 heures) ;
- 5^{ème} dalle : avec armatures et sans protection (démoulage à faire le 7^{ème} jour) ;
- 6^{ème} dalle : avec armatures et avec protection (démoulage à faire le 7^{ème} jour) ;

Ce programme a été compléter par la variation d'exposition, nous avons en plus réalisé 2 dalles en forme de disques de 30 cm² de diamètre conservées à des températures de 40°C, 50°C.

Comme pour les bétons, nous avons souhaité provoquer la fissuration sur certaines éprouvettes plus que sur les autres, tel que expliqué au paragraphe IV.2.1.5- *Essais de fissuration*.



Figure IV.8 : à gauche moules à l'étuve, au milieu au laboratoire, à droite à l'extérieur du laboratoire.

IV.3- RESULTATS DE CARACTERISATION DES BETONS ET DISCUSSIONS

IV.3.1- paramètres de composition des bétons et mortiers

Ce paragraphe est introduit, ici, pour faciliter la discussion des résultats, nous avons, sous forme d'histogrammes, représenté les différents paramètres de composition des formules finalement présentées dans ce chapitre.

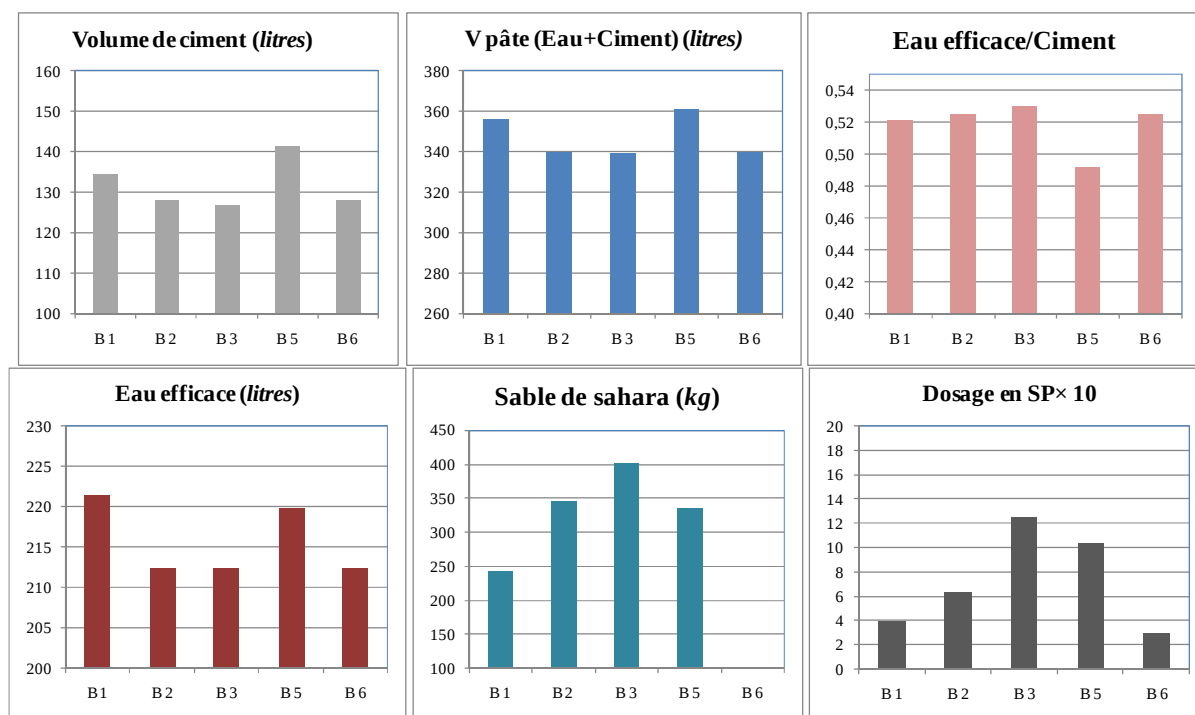


Figure IV.9 : Paramètres de composition des formules de béton et de mortiers.

IV.3.2- Résultats des bétons

Dans un premier temps, nous avons réalisé deux premières formulations tests qui nous ont permis de rechercher et valider la formule de référence à partir de laquelle sont déduites les autres formulations. Les résultats de ces deux formules ne sont donc pas donnés dans ce document.

IV.3.2.1- Essai d'affaissement et d'étalement

Les mesures d'affaissement et d'étalement obtenus pour les différentes formules de bétons sont récapitulées dans le tableau suivant :

Bétons	B1	B2	B3	B4	B4 bis	B5	B6
Dosage en Superplastifiant	0,40	0,63	1,28	2,66	2,50	1,04	0,3
Affaissement (mm)	240	235	AT	AT	AT	AT	AT
Etalement (mm)	450	465	650	620	585	580	600

Tableau IV.1 : dosage en superplastifiant et consistance des différents bétons.

AT : Affaissement total.

Nous rappelons qu'au départ, nous avons souhaité avoir des bétons très fluide, donc les bétons ont été adjuvantés de sorte à avoir des affaissements dépassant les 220 mm, soit des galettes d'étalement des bétons. Les étalements ainsi obtenus correspondent aux étalements des bétons auto-nivelant.

Remarque pour la formule 4 : Après 2 à 3 minutes, nous avons constaté que le béton de la formule 4 présente un problème, la laitance qui remonte en surface, sorte de ségrégation. On réalise la formule 4 correspond au béton qui est formulé avec le moins de pâte, elle a donc nécessité une grande quantité en superplastifiant pour la fluidifier, ce qui a provoqué sa ségrégation.

Nous avons essayé de corriger cette formule en diminuant le dosage en superplastifiant, mais on a eu des difficultés à obtenir la consistance désirée, d'où la formule 4 bis du document.

La formule 4 avec la composition prévue et avec la consistance souhaitée n'est pas bonne, nous avons alors décidé de l'écarter pour l'étude de la fissuration, mais par simple curiosité nous avons maintenue les essais de résistance à 28 jours.

IV.3.2.2- résultats de résistances à 28 jours

Les résultats de la résistance à la compression des bétons à 28 jours de toutes les éprouvettes des différents bétons, ainsi que les poids des éprouvettes, sont donnés au tableau IV.2.

Bétons/Éprouvettes		n°1	n°2	n°3
B 1	Poids(Kg)	3,66	3,61	/
	Rc (MPa)	19,77	18,86	/
B 2	Poids(Kg)	3,64	3,61	3,57
	Rc (MPa)	19,74	20,30	19,31
B 3	Poids(Kg)	3,69	3,68	3,64
	Rc (MPa)	19,90	19,19	16,80
B 4	Poids(Kg)	3,61	3,64	3,68
	Rc (MPa)	14,45	17,10	18,51
B 4 bis	Poids(Kg)	3,62	3,64	3,60
	Rc (MPa)	15,61	14,40	11,79
B 5	Poids(Kg)	3,60	3,54	3,56
	Rc (MPa)	16,62	19,51	17,94
B6	Poids(Kg)	3,59	3,55	3,69
	Rc (MPa)	20,68	17,17	19,79

Tableau IV.2 : Résultats des résistances à 28 jours, et pesées des éprouvettes des bétons.

Pour l'exploitation des résultats, dans un premier temps nous avons calculé la masse volumique des différents bétons. Le volume de l'éprouvette cylindrique (10:20) est de 1570.8 cm³. Les masses volumiques des bétons sont résumées dans le tableau suivant :

Bétons	B1	B2	B3	B4	B4bis	B5	B6
Masses volumiques (g/cm ³)	2,31	2,30	2,34	2,32	2,30	2,27	2,30

Tableau VI.3 : Masses volumiques des bétons durcis.

Pour faciliter la comparaison des valeurs entre elles, nous avons calculé les données statistiques des mesures expérimentales de chacun des bétons. Les résultats sont résumés dans le tableau IV.4 suivant. La moyenne des résistances R_{cmoy} est calculée sur les trois mesures R_{ci} en utilisant la relation suivante :

$$R_{cmoy} = \frac{\sum_{i=1}^3 R_{ci}}{3}$$

Les écarts type des trois mesures de résistance sont calculés avec la formule suivante :

$$Ecart\ type = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^3 (R_{ci} - R_{cmoy})^2}{2}}$$

Toutes ces valeurs sont résumées dans le tableau IV.4.

Bétons	Rc1	Rc2	Rc3	Moyenne	Ecart type	Rcmoy - Etm	Rcmoy + Etm
B1	19,77	18,86	/	19,32	0,643	18,108	20,522
B2	19,74	20,3	19,31	19,78	0,496	18,576	20,990
B3	19,9	19,19	16,8	18,63	1,624	17,423	19,837
B5	16,62	19,51	17,94	18,02	1,447	16,816	19,230
B6	20,68	17,17	19,79	19,21	1,825	18,006	20,420

Tableau IV.4 : Résistances moyennes des bétons et calcul d'écarts types (MPa).

Etm : écart type moyen.

Or, les cinq valeurs d'écart type obtenues sur les cinq formules des bétons sont elles aussi dispersées. Cette dispersion est due au fait que le nombre d'éprouvettes testées pour chacune des formules est petit (population de l'échantillon réduite : 3 éprouvettes). Pour une meilleure interprétation des résultats, nous avons alors estimé notre écart type de résistance à la compression de nos bétons par la moyenne des écarts type de chacun des bétons.

Il est à noter que par définition, l'écart type d'une population est $\geq$ à l'écart type d'un échantillon et l'inverse n'est pas valable : l'écart type de l'échantillon ne peut être qu'inférieur à l'écart type de la population.

La moyenne des écarts types est de 1,21 MPa.

Pour comparer les valeurs de résistance entre les différents bétons, nous avons représenté les valeurs des résistances moyennes sur les mêmes graphiques sous forme d'histogrammes. Nous avons de plus, représenté pour chaque colonne la barre d'erreur correspondant à chacune des valeurs.

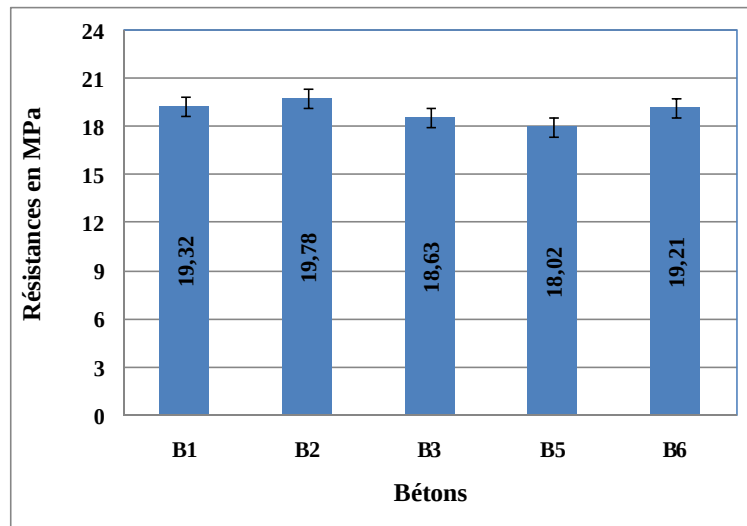


Figure IV.10 : résistances à la compression des bétons à 28 jours avec la barre d'erreur en écart type de ± 1.21 MPa.

Ainsi, comme on le constate sur la figure IV.10 on peut dire que les bétons formulés sont d'une même classe de résistance. Pour expliquer d'avantage ces résultats, nous avons alors repris sur les figures suivantes deux paramètres caractérisant ces différentes compositions, le dosage en superplastifiant et le volume de ciment dans les différentes compositions.

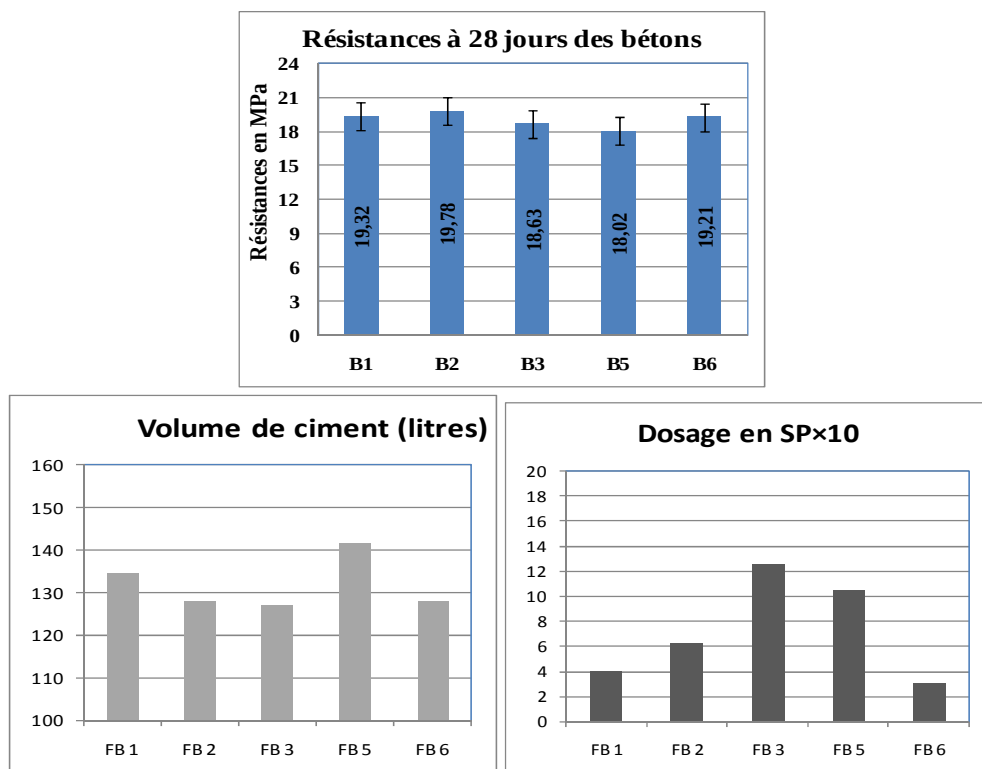


Figure IV.11 : résistances à la compression des bétons à 28 jours avec la barre d'erreur en écart type de ± 1.21 MPa.

Ainsi, sur la figure on remarque que moins on met de ciment, plus on rajoute de superplastifiant pour défloculer d'avantage, en conséquence plus le ciment est disponible pour s'hydrater, ce qui expliquerait en partie ce rapprochement des valeurs de résistances à 28 jours des différentes compositions de bétons.

On rappelle que le béton B2 et le béton B6 sont formulés de la même manière, avec la même composition, à l'exception de la présence du sable de Sahara qui est remplacé au même volume par les autres granulats dans la formule B6. Les deux bétons, présentent la même résistance mécanique. Et l'ensemble de nos bétons formulés avec le sable de Sahara n'ont pas présenté des insuffisances particulières. On peut donc conclure sur le fait que le sable de Sahara représente bien un bon compromis de remplacement aux sables fins habituellement utilisés pour la formulation des bétons.

IV.3.2.3- Résultats de ressuage

Les mesures de remonté d'eau en surface (ressuage) sont indiquées dans le tableau suivant pour les différentes formules de bétons étudiées. Pour faciliter la lecture des valeurs, nous avons alors exprimé le ressuage en %. Pour ce faire, nous avons calculé le rapport [masse de l'eau de ressuage / masse de l'échantillon à l'état frais avant l'extraction de l'eau].

$$R(\%) = \frac{\text{masse de l'eau}}{\text{masse de l'éprouvette fraîche}} \times 100$$

Bétons	B1	B2	B3	B5	B6
<i>P béton (kg)</i>	13,87	13,82	13,92	13,99	0,42
<i>P l'eau(g)</i>	5,5	26,5	4,0	4,5	1,0
<i>Ressuage(%)</i>	0,04%	0,19%	0,03%	0,03%	0,24%

Tableau IV.5 : mesures des remontées d'eau et calculs de ressuage des bétons.

Sur la figure IV.12 suivante, nous avons représenté les résultats du tableau sous forme d'histogramme.

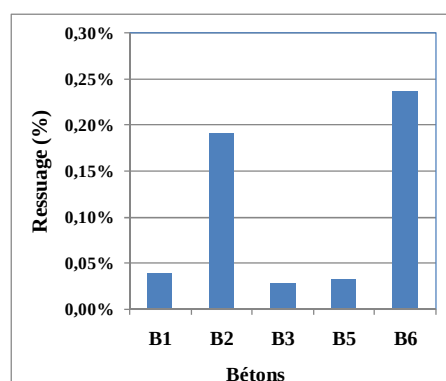


Figure IV.12 : Mesures de ressuage exprimées en %, après trois heures de la gâchée.

Nous avons dans un deuxième temps essayé de voir s'il y a une relation entre les paramètres de composition et le volume d'eau ressuée. Pour cela nous avons alors comparé ces valeurs au volume

d'eau, volume de ciment, volume de pâte, dosage en adjuvant etc. mais aucune relation particulière n'a été mise en évidence.

IV.3.2.4- Résultats de Fissurations

Cette partie d'étude a été la plus difficile pour la raison que les dalles de bétons n'ont fissuré que légèrement, néanmoins pas comme nous l'avons espéré.

Pour mettre en évidence les fissures des dalles, on a utilisé l'encre à écrire sur les dalles. L'encre a pénétré les fissures, et elles ont pris une teinte beaucoup plus foncée que sur le reste de la surface (figure IV.13). On s'est par la suite servi d'une loupe pour mesurer la longueur des fissures de chacune des dalles. Ainsi, pour chaque dalle, nous avons calculé la somme des fissures développées.

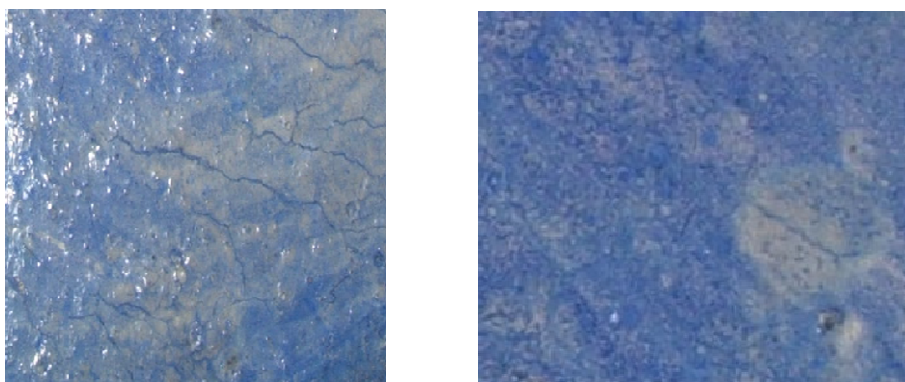


Figure IV.13 : Mise en évidence des fissures en appliquant l'encre à écrire en surface : (droite zone bien fissurée, droite zone faiblement fissurée).

Pour l'exploitation des résultats, nous avons calculé le taux de fissuration comme suit : **somme des fissures / la surface de la dalle**, ce rapport est exprimé en pourcentage.

Dans cette partie, nous avons détaillé les résultats de fissuration des bétons au cas par cas. Pour faciliter la lecture des tableaux et des figures, on définit la nomenclature suivante pour les différentes expositions.

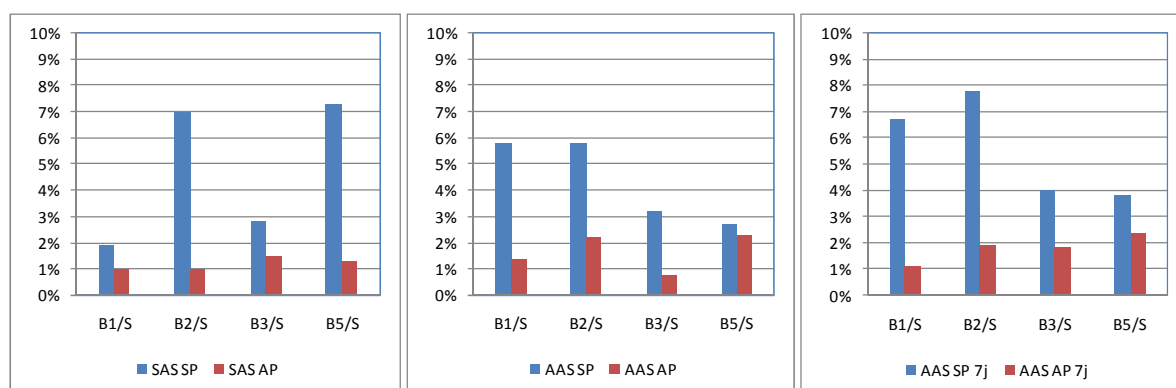
- Dalles Sans Armature (SAs) ; dalles avec Armature (AAs)
- Dalles Sans Protection (Sp) ; dalles Avec Protection (Ap)
- Dalles décoffrées à 7 jours (7j).

	AA _s SP	AA _s AP		SA _s Sp	SA _s AP		AA _s SP 7j	AA _s AP 7j
B1/S	6%	1%	B1/S	2%	1%	B1/S	7%	1%
B2/S	6%	2%	B2/S	7%	1%	B2/S	8%	2%
B3/S	3%	1%	B3/S	3%	2%	B3/S	4%	2%
B5/S	3%	2%	B5/S	7%	1%	B5/S	4%	2%

Tableau IV.6 : valeurs du taux de fissuration des bétons exprimés en %.

Pour faciliter la comparaison des résultats, nous avons au cas par cas défini un seul critère de comparaison à la fois.

1^{er} critère de comparaison : protection et sans protection



a) dalles sans armatures

b) dalles avec armatures

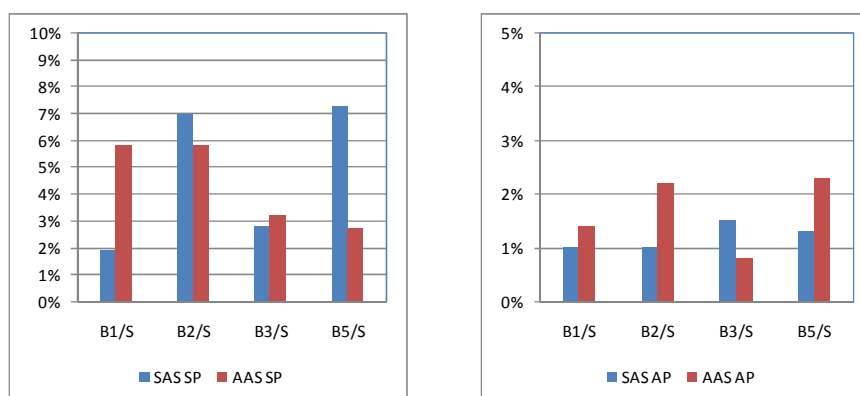
c) dalles décoffrées à 7 jours

Figures IV.14 : Représentation des résultats de fissuration exprimée en pourcentage pour deux environnements d'exposition (SP : sans protection ; AP : avec protection)

Comme attendu, avec ces histogrammes, on constate que les dalles sans protection ont présenté un taux de fissuration plus élevé que celles avec la protection. Le taux de fissuration des dalles sans protection en moyenne deux fois, voir plus, plus grand que le taux de fissuration des dalles avec protection.

Par ailleurs, nous n'avons pas pu établir une relation directe qui liera un des paramètres de composition, tel que détaillés au paragraphe IV.3.1, aux taux de fissuration des dalles.

2^{ème} critère de comparaison : Sans et avec armatures



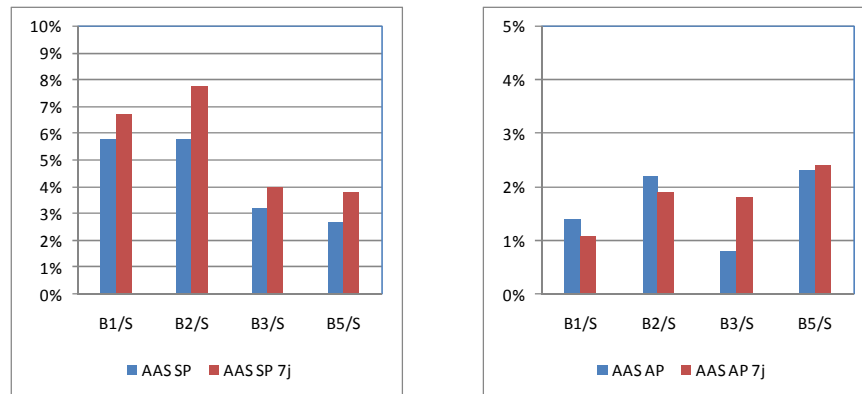
a) dalles sans protections

b) dalles avec protection

Figures IV.15 : Représentation des résultats de fissuration exprimée en pourcentage pour deux environnements d'exposition (SAs : sans armatures ; AAs : avec armatures)

Pour cette partie, 5 cas sur 8, nous avons eu le taux de fissuration des dalles avec armatures est plus grand que pour les barres sans armatures. Mais, il n'y a pas de relation directe entre le taux de fissuration et la composition des bétons.

3^{ème} critère de comparaison : décoffrage à 24 heures et décoffrage à 7 jours.



Figures IV.16 : Représentation des résultats de fissuration exprimée en pourcentage pour deux environnements d'exposition (décoffrage à 24 heures, décoffrage à 7 jours)

Pour cette partie, 6 cas sur 8, nous avons eu le taux de fissuration des dalles pour qui le coffrage est maintenu pendant 7 jours plus grand par rapport à celles décoffrées sous 24 heures.

Constat général :

On analysant de plus près les résultats, on n'a pas pu établir une relation directe qui va lier un des paramètres de composition, tel que détaillés au paragraphe IV.3.1, aux taux de fissuration des dalles.

IV.3.3- Résultats des Mortiers

Pour les mortiers, nous avons utilisé les compositions calculées pour chaque béton. Pour le dosage en superplastifiant, nous avons utilisé les dosages en superplastifiants des bétons qui nous ont permis d'avoir des bétons très fluides.

Dans un premier temps nous avons souhaité caractériser la consistance des mortiers, mais malheureusement, nous n'avons pas pu avoir un cône d'une échelle réduite au niveau de notre laboratoire qui nous permettra de les caractériser. Donc les mortiers n'ont pas été caractérisés en terme de consistance.

Mais il est bien de savoir qu'à la réalisation des bétons, nous avons constaté que les mortiers obtenus sont d'une consistance très fluide. Ce qui paraît logique du moment que nous avons le même dosage en superplastifiant que les bétons, les mêmes volumes de pâtes, etc.

IV.3.3.1- Résultats de résistances à 28 jours

Les résultats de la résistance à la compression des mortiers à 28 jours de toutes les éprouvettes des différents mortiers, ainsi que les poids des éprouvettes, sont donnés au tableau IV.7.

Pour discuter les résultats de résistance de mortiers nous avons récapitulé les résultats dans le tableau suivant :

Mortiers/Eprouvettes		n°1	n°2	n°3
M1	Poids (Kg)	3,45	3,50	3,43
	Rc (MPa)	15,28	13,21	15,11
M2	Poids (Kg)	3,51	3,56	3,56
	Rc (MPa)	14,97	15,95	15,69
M3	Poids (Kg)	3,57	3,53	3,56
	Rc (MPa)	17,92	17,53	18,57
M4	Poids (Kg)	3,56	3,61	3,51
	Rc (MPa)	10,25	15,75	12,48
M5	Poids (Kg)	3,50	3,49	3,54
	Rc (MPa)	17,35	16,21	18,99
M6	Poids(Kg)	3,35	3,43	3,27
	Rc (MPa)	13,25	14,93	13,95

Tableau IV.7 : Résultats des résistances à 28 jours, et pesées des éprouvettes des mortiers.

Pour l'exploitation des résultats, dans un premier temps nous avons calculé la masse volumique des différents Mortiers. Le volume de l'éprouvette cylindrique (10:20) est de 1570.8 cm³. Les masses volumiques des mortiers sont résumées dans le tableau suivant :

Mortiers	M1	M2	M3	M4	M5	M6
Masses volumiques (g/cm ³)	2,20	2,26	2,26	2,26	2,23	2,13

Tableau IV.8 : Masses volumiques des Mortiers durcis.

Pour faciliter la comparaison des valeurs entre elles, nous avons calculé les données statistiques des mesures expérimentales de chacun des mortiers. Les résultats sont résumés dans le tableau IV.9 suivant. La moyenne des résistances R_{cmoy} est calculée sur les trois mesures R_{ci} en utilisant la relation déjà donnée au paragraphe IV.3.2.2- *résultats de résistances à 28 jours*. Les écarts type des trois mesures de résistance sont calculés avec la formule donnée au même paragraphe que pour R_{cmoy} .

Toutes Les valeurs sont résumées dans le tableau IV.9.

Mortiers	N°1	N°2	N°3	Moyenne	Ecart type	Rcmoy - Etm	Rcmoy + Etm
M1	15,28	13,21	15,11	14,53	1,149	13,34	15,73
M2	14,97	15,95	15,69	15,54	0,508	14,34	16,73
M3	17,92	17,53	18,57	18,01	0,525	16,81	19,20
M4	10,25	15,75	12,48	12,83	2,766	11,63	14,02
M5	17,35	16,21	18,99	17,52	1,397	16,32	18,71
M6	13,25	14,93	13,95	14,04	0,844	12,85	15,24

Tableau IV.9 : Résistances moyennes des mortiers et calcul d'écarts types (MPa).

Les six valeurs d'écart type obtenues sur les six formules de mortiers sont elles aussi dispersées. Cette dispersion est due au fait que le nombre d'éprouvettes testées pour chacune des formules est petit (population de l'échantillon réduite : 3 éprouvettes). Pour une meilleure interprétation des résultats, nous avons estimé l'écart type moyen des résistances des écarts type de chacun des bétons. La valeur obtenue est de 0.88 MPa.

Pour comparer les valeurs de résistance entre les différents bétons, nous avons représenté les valeurs des résistances moyennes sur les mêmes graphiques sous forme d'histogrammes. Nous avons de plus, représenté pour chaque colonne la barre d'erreur correspondant à chacune des valeurs.

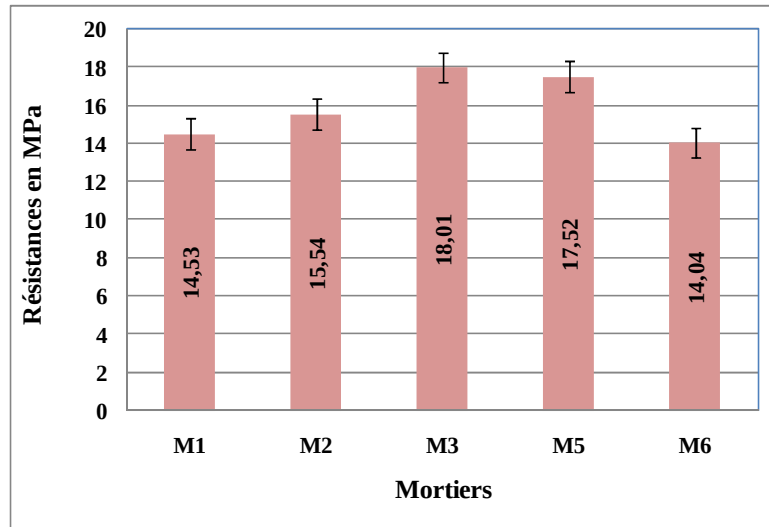


Figure IV.17 : Résistances à la compression des mortiers à 28 jours avec la barre d'erreur en écart type de $\pm 0,88$ MPa.

Comme pour les bétons, la formule M4 correspondant au béton B4 a été éloignée de l'exploitation. Toutefois, pour le cas des mortiers, on constate une légère différence entre les résistances des mortiers (M1, M2, M6) et celles des mortiers (M3, M5).

IV.3.3.2- Résultats de ressuage

Les mesures de ressuage sont indiquées dans le tableau IV.10 suivant pour les différentes formules de mortiers. Les valeurs sont exprimées en %, elles sont calculées en utilisant la formule suivante :

$$R(\%) = \frac{\text{masse de l'eau de ressuage}}{\text{masse de l'éprouvette fraîche}} \times 100$$

La masse de l'éprouvette fraîche qui contient aussi l'eau de ressuage, juste après la gâchée.

Mortiers	M1	M2	M3	M5	M6
P mortier (kg)	0,34	0,28	0,41	0,46	0,34
P l'eau (g)	1,0	1,5	0,2	1,7	1,1
Ressuage(%)	0,29%	0,54%	0,05%	0,37%	0,32%

Tableau IV.10 : mesures des remontées d'eau et calculs de ressuage des mortiers.

Sur la figure IV.18 suivante, On a représenté les résultats du tableau sous forme d'histogramme.

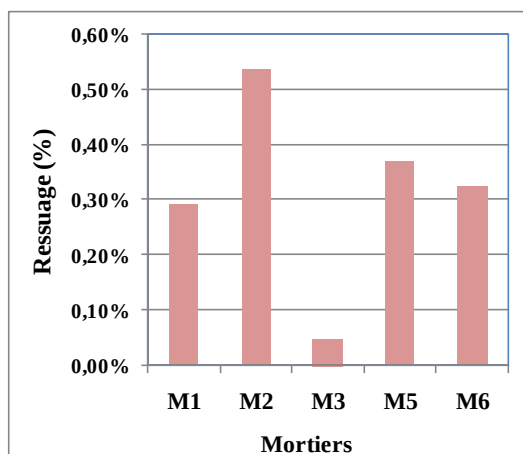


Figure IV.18 : Mesures de ressuage des mortiers exprimées en %, après trois heures de la gâchée.

IV.3.3.3- Résultats de Fissurations

Comme pour les bétons, d'une manière générale, le taux de fissuration des mortiers été léger. Cela nous a contraint même de modifier le programme initialement prévu à la recherche du paramètres qui nous aiderait à hausser la fissuration des dalles, d'où les dalles exposées à l'atmosphère extérieure (extérieur du laboratoire) et parfois à l'étuve à des températures 40°, 50°C et 60°C.

De même que pour les bétons, nous avons utilisé alors de l'encre à écrire pour mettre en évidence les fissures des dalles. L'encre a pénétré les fissures, et elles ont pris une teinte beaucoup plus foncée que sur le reste de la surface. On s'est par la suite servi d'une loupe pour mesurer la longueur des fissures de chacune des dalles. Ainsi, pour chaque dalle, nous avons calculé la somme des fissures développées.

Pour l'exploitation des résultats, nous avons calculé le taux de fissuration comme suit : **somme des fissures / la surface de la dalle**, ce rapport est exprimé en pourcentage.

Les résultats de fissuration des mortiers sont présentés en fonction des expositions au cas par cas.

Dans cette section, nous avons repris la même nomenclature que pour les bétons pour les différentes expositions.

Dalles Sans Armature (SAs) ; dalles avec Armature (AAs)

Dalles Sans Protection (Sp) ; dalles Avec Protection (Ap)

Cependant pour ce cas d'étude sur mortiers, nous avons un nouveau critère de comparaison qui est dalles conservées à l'intérieur du laboratoire, et celles conservées à l'extérieur du laboratoire.

	Laboratoire			Extérieur	
	AA _s AP(lab)	SA _s AP(lab)	AA _s SP(lab)	AA _s AP(ext)	AA _s SP(ext)
M1/S	5%	7%	15%	8%	18%
M2/S	5%	5%	16%	9%	16%
M3/S	4%	5%	7%	4%	8%
M5/S	3%	6%	10%	7%	12%

Tableau IV.11: valeurs du taux de fissuration des mortiers exprimés en %.

Nous avons au cas comparé les résultats selon un seul critère variable. Pour ne pas encombrer le document, on ne présente ici que les conclusions sans avoir à tracer les histogrammes qui ressemblent à ceux obtenus sur les bétons, avec les mêmes explications.

Comme pour les bétons, on constate que les dalles sans protection ont présenté un taux de fissuration plus élevé que celles avec la protection. Le taux de fissuration des dalles sans protection est en moyenne deux fois, voir plus, plus grand que le taux de fissuration des dalles avec protection.

De même, on n'a pas pu établir une relation directe qui va lier un des paramètres de composition des mortiers, tel que détaillés au paragraphe IV.3.1, aux taux de fissuration des dalles.

Comparaison des dalles conservées à l'intérieur du laboratoire et celles conservés à l'extérieur.

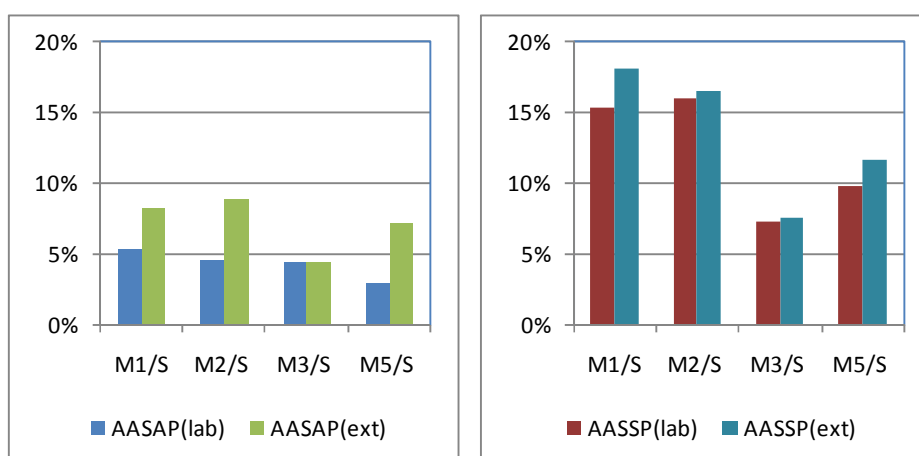


Figure IV.19 : Représentation des résultats de fissuration exprimée en pourcentage pour deux environnements d'exposition (à l'intérieur du laboratoire ; à l'extérieur du laboratoire)

Le constat sur ces figures c'est que les dalles conservées à l'extérieur du laboratoire ont fissurées d'avantage que celles conservées à l'intérieur du laboratoire, cela pour les dalles protégées par un film en plastique que pour celles qui ne sont pas protégées de l'évaporation.

Remarque : les résultats des dalles conservées à l'étuve à des températures de 50 et 60°C, n'ont pas apporté un nouveau résultat par rapport à ceux que nous avons déjà donné dans cette section, notamment en terme de rapport avec la composition du béton. Nous avons donc choisis de ne pas les

présenter. Un certain nombre d'eux est présenté au chapitre corrélation entre les résultats de béton à ceux des mortiers.

IV.4.- Conclusions

Comme toute étude expérimentale, lors de la réalisation des différentes parties du programme nous avons rencontré un nombre de problèmes.

En effet, pour la réalisation des bétons et des mortiers, nous étions contraints de faire le malaxage manuellement, faute d'une panne du malaxeur. cela fait que l'énergie de malaxage des bétons entre eux ou bien des mortiers entre eux n'a pas été toujours la même, notamment pour les produit visqueux.

La deuxième difficulté est de l'ordre de matériaux, au fait pour la réalisation des essais, on a été contraint de changer de lots de ciment, ce qui est déconseillé lorsqu'il s'agit d'une étude comparative.

On ce qui concerne les différentes formules composées, la formules 4 des bétons à présenté des problèmes de ségrégation, de ce fait nous l'avons écarté de la partie exploitation.

Tous les autres bétons formulés sont des bétons fluides « auto-nivelant », les résultats ont démontré qu'ils sont de la même classe de résistance, malgré les paramètres de composition qui sont différents.

Les Cinq bétons formulés avec le sable de Sahara n'ont pas présenté de problèmes particuliers. Les bétons B2 et B6 qui sont formulés de la même manière, avec la même composition, à l'exception de la présence du sable de Sahara pour la formule B2 présentent la même résistance mécanique. On peut donc conclure sur le fait que le sable de Sahara représente bien un bon compromis de remplacement aux sables fins habituellement utilisés pour la formulation des bétons.

La partie la plus compliquée été l'étude de la fissuration des bétons et des mortiers, car les éprouvettes n'ont fissuré que légèrement, pas comme nous l'avons espérer.

Par les résultats de fissuration obtenus, on n'a pas pu trouver de relation qui peut lier le taux de fissuration aux paramètres de composition des différentes formules. On a juste confirmé des constats déjà établis comme l'effet de la protection ou bien de la température sur la fissuration en surface.

CHAPITRE V : CORRELATION ENTRE LES RESULTATS DES BETONS ET CEUX DES MORTIERS.

V.1- Introduction

L'objectif dans ce chapitre est de voir s'il y a des corrélations entre les résultats obtenus sur bétons et ceux obtenus sur mortiers. On rappelle que les mortiers de cette étude sont formulés à partir des formules de bétons, mortiers à volume de pâte équivalent au volume de pâte du béton.

Dans ce chapitre on ne donnera que les figures et les explications. Les valeurs numériques sont récapitulées dans les différents tableaux du chapitre précédent.

V.2- Corrélation entre les résultats des bétons et ceux des mortiers

V.2.1- Corrélation entre les résistances des bétons et celles des mortiers

Les résultats de la résistance à la compression des bétons et ceux des mortiers à 28 jours sont donnés dans le chapitre IV précédent.

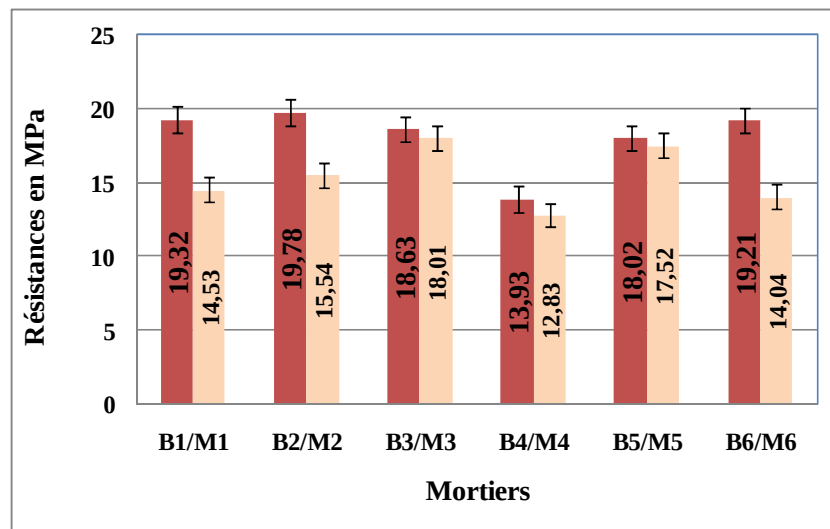


Figure V.1 : Corrélation entre les résistances à 28 jours des bétons et celles des mortiers.

Chapitre V : Corrélation entre les résultats des bétons et ceux des mortiers.

Déjà d'une manière générale les résistances des mortiers sont classées de la même manière que celles des bétons. Pour faciliter la comparaison, on va classer les résultats sur la diagonale des corrélations comme représenté sur la figure V.2 suivante. La diagonale des corrélations est un moyen facile de trouver l'évolution d'un paramètre par rapport à un autre pas une simple constatation.

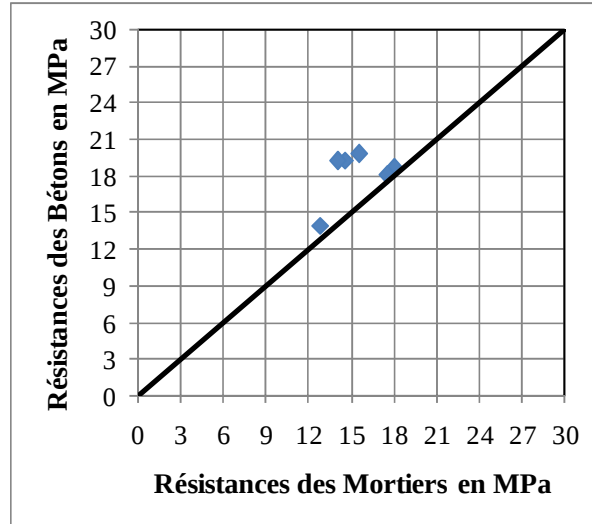


Figure V.2 : Diagonale de corrélation entre les résistances des bétons et les celles des mortiers.

La diagonale de la courbe de la figure V.2, indique : si les deux résistances des deux produits évoluent en parallèle d'une manière bien organisée. Plus les points sont proches de la droite, plus la corrélation est possible.

Pour le cas de notre étude, on voit que les six points sont bien classés par rapport à la courbe, ce qui nous permet de conclure qu'il y a bien une corrélation entre les résistances à la compression des deux produits, soit béton et mortiers.

V.2.2- Corrélation entre les résultats de Fissuration de béton et ceux des mortiers

Dans ce paragraphe nous avons exposé les résultats de corrélation entre le taux de fissuration des dalles de bétons et ceux des dalles de mortiers.

Le taux de fissuration correspond à la : **somme des fissures / la surface de la dalle**. Ce rapport est exprimé en pourcentage.

On rappelle que les résultats des taux de fissurations, ne nous ont pas permis de mettre en évidence la relation qui existe entre le taux de fissuration et la composition du béton. De plus, nous avons constaté que les mortiers, au cas par cas, ont fissuré beaucoup plus que les bétons.

Pour faciliter la comparaison entre les résultats de fissuration des mortiers à ceux des bétons, nous avons alors travaillé en relatif. En effet, travailler en relatif, permet de comparer les résultats qualitativement et non pas quantitativement, et notre objectif est de savoir déjà s'il y a bien une relation quelconque entre la fissuration des deux produits.

Chapitre V : Corrélation entre les résultats des bétons et ceux des mortiers.

Ainsi pour pouvoir faire cette comparaison nous n'avons repris que les résultats communs entre les deux produits, là où nous avons des résultats sous les mêmes conditions, en terme de présence ou pas d'armatures, protection avec un film ou pas...

Tel que indiqué dans le tableau V, d'une manière générale les taux de fissuration obtenue sur mortiers sont plus importants que ceux obtenus sur bétons. Mais nous ce qu'on souhaite savoir si les deux matériaux fissures d'une manière corrélable. Pour y parvenir, nous avons calculé le taux de fissuration relatif aux moyennes de fissuration des deux produits béton et mortiers. pour le faire, nous avons d'abord calculé les taux de fissuration moyens du bétons et mortiers, puis nous avons divisé les taux de fissuration initiaux sur ces moyennes, toutes les valeurs sont données dans le tableau V.1 suivant.

	Bétons	Mortiers	Fissuration béton/Moy FissB	Fissuration Mortier/Moy FissM
SASAP	0,029	0,068	0,801	0,311
	0,010	0,052	0,276	0,238
	0,015	0,046	0,415	0,210
	0,013	0,063	0,359	0,288
AASAP	0,014	0,053	0,387	0,242
	0,022	0,045	0,608	0,206
	0,008	0,044	0,221	0,201
	0,023	0,029	0,636	0,132
AASSP	0,058	0,153	1,603	0,699
	0,058	0,259	1,603	1,183
	0,032	0,073	0,884	0,334
	0,027	0,097	0,746	0,443
50°C	0,055	0,446	1,520	2,038
	0,070	0,479	1,934	2,188
60°C	0,055	0,528	1,520	2,412
	0,090	1,067	2,487	4,875
<u>Moyennes</u>	<u>0,04</u>	<u>0,22</u>		

Tableau V.1: Taux de fissuration des bétons et mortiers conservés sous les mêmes conditions ; et taux de fissurations relatifs aux moyennes de fissuration des bétons puis des mortiers.

Dalles Sans Armature (SAs) ; dalles avec Armature (AAs) ; Dalles Sans Protection (Sp) ; dalles Avec Protection (Ap)

Comme pour le cas des résistances, nous avons tracé la diagonale de corrélation des taux de fissuration relatifs à la moyenne.

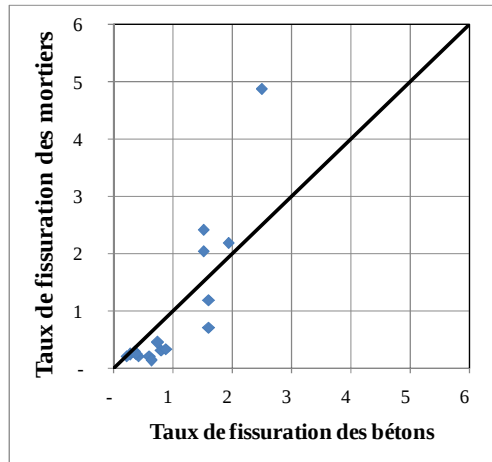


Figure V.3 : Diagonale de corrélation entre les taux de fissurations moyens des bétons et ceux des mortiers.

On voit donc d'après la figure V.2 que la majorité des points de corrélation sont situés tous près de la droite de corrélation. Ce résultat est très intéressant car, il démontre qu'il y a bien une corrélation entre le taux de fissuration des bétons et ceux des mortiers, et donc aux paramètres de composition des deux produits.

IV.3- Conclusions

Les résultats de ce chapitre sont très intéressants, car ils démontrent qu'il existe bien une corrélation entre les résultats de résistance et ceux du taux de fissuration des bétons et ceux des mortiers à volume de pâte équivalente au volume de pâte des bétons. Cette corrélation, nous l'avons constaté sur :

- les résultats de résistances à 28 jours des bétons et les résistances à 28 jours des mortiers ;
- les taux de fissuration relatifs les moyennes des bétons et ceux des mortiers.

Ces résultats, prouvent qu'il y a bien une relation entre ces paramètres étudiés et la composition des bétons. Toutefois dans le cas de la fissuration, on pense que des investigations supplémentaires sont nécessaires, car la fissuration totale dépend tellement de paramètres qu'il est difficile parfois de conclure.

L'intérêt de confirmer ce résultat est intéressant, car cela permettra de mener les essais de caractérisation en laboratoire sur les mortiers et de prédire les résultats de ceux des bétons.

CONCLUSIONS GENERALES

Dans cette étude expérimentale, nous avons essayé de répondre à plusieurs objectifs : à savoir initier une étude de la fissuration précoce des bétons ; développé un mortier spécial comme outil d'aide à la composition des bétons sous l'aspect fissuration précoce. On s'est également intéressé à l'utilisation du sable de Sahara pour la composition des différents bétons.

Malgré quelques difficultés de laboratoire, par cette étude nous avons pu répondre avec une certaine satisfaction aux objectifs visés.

Ainsi donc, pour la partie fissuration, avec les modes opératoires choisis, nous avons vu qu'il est très difficile de relier les résultats de la fissuration aux paramètres de composition des bétons. Cette difficulté vient du fait que nous avons étudié la fissuration totale. Cependant, avec les résultats obtenus, nous avons pu confirmer certains constats déjà établis comme l'effet de la protection ou bien de la température sur la fissuration en surface.

Les résultats montre donc, l'importance d'affiner d'avantage cette étude, en étudiant de plus près les causes de fissurations tel que les retraits et notamment le retrait plastique. Le deuxième constat sur cette partie, pour mieux cerner ce problème de fissuration, pour les études avenir, nous conseillant de travailler avec un ciment de type CEM I à forte chaleur d'hydratation et donc permettra de mettre plus en évidence la part de fissuration liée à l'hydratation du ciment (retrait thermique). En dernier, dans la mesure du possible, pour la délicatesse du problème de fissuration, il est essentiel de maintenir les mêmes lots de matériaux du début jusqu'à la fin de l'étude, car cela peut être une source d'erreur et donc d'incertitude.

Les résultats de la partie mortiers sont très intéressants, car ils démontrent qu'il existe bien une corrélation entre les résultats de résistance des bétons et ceux des mortiers, mais surtout entre les résultats des taux de fissurations des bétons à ceux des mortiers. L'intérêt de ces résultats est intéressant, car cela permettra de mener les essais de caractérisation en laboratoire sur les mortiers et de prédire les résultats de ceux des bétons.

Le mortier que nous proposons et formulé à partir de la formule des bétons, en utilisant les mêmes produits des bétons, et en remplaçant le volume granulaire des gravillons par le même volume en sable 02/04 obtenu à partir du sable du béton. Ainsi, le mortier formuler est caractérisé par un volume de pâte égale au volume de pâte du béton et un volume solide égale au volume solide du béton.

Par ailleurs, par cette étude et par les résultats obtenus, on a vu que l'utilisation du sable de Sahara représente bien un bon compromis de remplacement aux sables fins habituellement utilisés pour la formulation des bétons. Les bétons formulés avec ce sable ont présentés des propriétés de même qualité que celles du béton sans sable de Sahara.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Baron J., Ollivier J. P., « Les bétons - bases et données pour leur formulation », Association technique de l'industrie des liants hydrauliques, Editions Eyrolles, Paris, 1997
- [2] Dreux G., Festa J., « Nouveau guide du béton et de ses constituants » 8^e édition Eyrolles 2002.
- [3] Dupain R., Saint Arroman J.C. « granulats, sols, ciments et bétons », 4^{ème} édition CASTEILLA 2009.
- [4] Folliot A., M. Build «La structuration progressive de la pierre de ciment», Le béton hydraulique, GranDuBé : « Grandeurs associées à la durabilité des bétons » Association française du génie civil, presse de l'école nationale des ponts et chaussées, édition 2007.
- [5] Emile O. : « Technologie des matériaux de construction, Tome 1 », Entreprise moderne d'édition, Paris 1978.
- [6] Neville A., « Propriétés des bétons » (version française de Properties of concrete). Eyrolles, 2000.
- [7] AFN 196-NF EN 196-1, « Méthodes d'essais des ciments - Partie 1 : détermination des résistances mécaniques », AFNOR Avril 2006.
- [8] De Larrard F. « Structures granulaires et formulation des bétons », Laboratoire central des ponts et chaussées, 2000.
- [9] O. Haddad, « Contribution au développement d'outils d'aide à la formulation des BAP relatifs à la rhéologie à l'état frais et à la résistance au jeune âge », thèse de doctorat, France, 2007.
- [10] Aïtcin P. C., S. Jiang, B. Kim, P. Nkinamubanzi, N. Pétrov, « l'interaction ciment /superplastifiant cas des polysulfonates », B.L.P.C n°233 juillet - août 2001 pp 87-89.
- [11] Acker P., « Prise et durcissement des bétons : Les effets thermomécaniques », Techniques de l'ingénieur. Vol. 3, n° C2235, 1988.
- [12] Kara A.R., « Influence des additions minérales sur le besoin en eau et les résistances mécaniques des mélanges cimentaires », thèse de Doctorat, U Cergy Pontoise, décembre 2002.
- [13] BARON J. « comportement de béton hydraulique : fissuration et fragilité ». Etude bibliographique et critique, Rapport de recherche L. C. P. n° 69. Octobre 1977.
- [14] Baron J., Ollivier J. P. « La durabilité des bétons », Ouvrage collectif, Presse ENPC, ISBN 2-85978-184-6 1992.
- [15] AFB Association française du béton, « maitriser les fissurations » mortiers et bétons, Laboratoire centrale des ponts et chaussées, LCPC 1977.
- [16] Turcry Ph. « Retrait et fissuration des bétons auto-plaçants , influence de la formulation », thèse de Doctorat, Ecole centrale de Nante, France 2004.
- [17] Aïtcin P. C., A. Neville, P. Acker. « Les différents types de retrait du béton ». Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 215 :41_51, Mai - Juin 1998.

- [18] Acker P. « Comportement mécanique du béton : apport de l'approche physico-chimique ». Rapport de recherche LPC n°152. Laboratoire Centrale des Ponts et Chaussées, 1988.
- [19] Regourd M., « L'hydratation du ciment portland », Le béton hydraulique » Presse de l'école nationale des ponts et chaussées 1982.
- [20] De Larrard F., C. Puch, « Formulation des bétons à hautes performances : la méthode des coulis », Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées, n° 161, 1989.
- [21] Mounanga P., « Étude expérimentale du comportement de pâtes de ciment au très jeune âge : hydratation, retraits, propriétés thermo-physiques », Th D, déc. 2003.
- [22] Calibé, « la méthode MBE »- rapport du projet national Calibé –MBE, formulation et suivi rhéologique des bétons Janvier 2001.
- [23] D.L. Kantro, « Influence des superplastifiants réducteurs d'eau sur les propriétés de la pâte de ciment – unslump test miniature », cement and concrete aggregate Vol 2, pp 95-102, 1980.
- [24] E. Hanna, K. Luke, D. Perraton P.C. Aitcin, « comportement rhéologique du ciment portland en présence de superplastifiants », 3ème conférence Internationale sur les superplastifiants et autres adjuvants chimiques dans les bétons, Ottawa pp 171-188. 1989
- [25] L. Agullo, C. Toralles, R. Gettu, A. Aguado, « Fluidity of cement pastes with mineral admixtures and superplasticizer- A study based on the Maersh cone test », Materials and Structures, Vol 32, pp 479-485, Aug-Sept 1999.
- [26] Schwartzentruber A., C. Catherine. "La méthode du mortier de béton équivalent (mbe) : un nouvel outil d'aide à la formulation des bétons adjuvantés ». Materials and Structure, 33(232) :475_482, 2000.
- [27] Nachbaur L., D. Kaplan, G. Marchese, « Extension of concrete equivalent mortar (CEM) method to self compacting concrete », 7th CANMET/ACI Int. Conf. on superplasticizers and other chemical admixtures in concrete, Berlin, Supplementary papers pp333-339, 2003.

LISTE DES FIGURES

<i>Figure I-1 : étapes de fabrication du ciment, de la carrière à l'expédition [4,5].....</i>	<i>5</i>
<i>Figure I-2 : développement de la résistance des différents constituants du clinker [2,6].....</i>	<i>8</i>
<i>Figure I.3 : Granulats légers ; Argile expansée (gauche) et schiste expansé (droite).</i>	<i>11</i>
<i>Figure I-4 : Béton fortement armé concassé avec un broyeur.....</i>	<i>12.</i>
<i>Figure I-5 : Éventail de grosseurs de granulats utilisés dans le béton.....</i>	<i>13</i>
<i>Figure. I-6 : courbes granulométriques de deux sables de dunes de deux régions de Sahara.....</i>	<i>15</i>
<i>Figure I-7 : Défloculation du ciment par l'action des superplastifiants.....</i>	<i>18</i>
<i>Figure I-8 : Courbes d'évolution du seuil de cisaillement (début de prise) en fonction de la présence d'un accélérateur ou d'un retardateur de prise [11].....</i>	<i>19</i>
<i>Figure I-9 : Courbes illustrative de l'essai d'affaissement au cône d'Abrams.....</i>	<i>23</i>
<i>Figure I-10 : Abaque permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment en fonction du rapport E/C et de l'ouvrabilité désirée (affaissement au cône d'Abrams) [2].....</i>	<i>26</i>
<i>Figure I-11 : Fuseaux préférentiels pour la granularité des sables pour béton selon la méthode de Dreux Gorisse [2].....</i>	<i>27</i>
<i>Figure I-12 : Courbe du mélange optimum selon la méthode de Dreux Gorisse [2].....</i>	<i>27</i>
<i>Figure I.13 : les quatre principales sortes de fissures précoces susceptibles d'affecter un ouvrage en béton.....</i>	<i>33</i>
<i>Figure I.14 : Exemple de fissuration par retrait plastique d'un revêtement de façade avec un pas de maillage de l'ordre de un à trois décimètres [14].....</i>	<i>35</i>
<i>Figure. II.1 : Sable de Sahara utilisé.....</i>	<i>41</i>
<i>Figure II-2 : Courbes granulaires du sable de Sahara, sable 0/3, gravier 3/8 et gravier 8/15.....</i>	<i>42</i>
<i>Figure II-3 : Courbes granulaires des 3 granulats, la courbe brisée et les lignes de partage.....</i>	<i>45</i>
<i>Figure III. 1 : Corrélation affaissement béton et étalement MBE.....</i>	<i>49</i>
<i>Figure III.2 : sable 02/04 pour le mortier à pâte équivalente pâte du béton.....</i>	<i>50</i>
<i>Figure. III.3 : Courbe granulaire du sable 02/04 utilisé.....</i>	<i>51</i>
<i>Figure IV.1 : Préparation du matériel nécessaire pour le gâchage manuel des bétons.....</i>	<i>55</i>
<i>Figure IV.2 : éprouvette en cours de l'écrasement.....</i>	<i>55</i>
<i>Figure IV.3 : à gauche : en avant plan éprouvettes 10×20 pour la résistance à 28 jours, en arrière plan éprouvette 16×32 pour le ressuage ; à droite : prélèvement d'eau de ressuage à la seringue... </i>	<i>56.</i>
<i>Figure IV.4 : moules après remplissage, apparence des dalles après décoffrage.....</i>	<i>57</i>

<i>Figure IV.5 : moule disposé à l'étuve pour le séchage accéléré.....</i>	<i>57</i>
<i>Figure IV.6 : Préparation de la gâchée pour un mortier.....</i>	<i>58</i>
<i>Figure IV.7 : La fabrication des moules en bois pour les dalles de mortiers.....</i>	<i>59</i>
<i>Figure IV.8 : à gauche moules à l'étuve, au milieu au laboratoire, à droite à l'extérieur du laboratoire.....</i>	<i>59</i>
<i>Figure IV.9 : Paramètres de composition des formules de béton et de mortiers.....</i>	<i>60</i>
<i>Figure IV.10 : résistances à la compression des bétons à 28 jours avec la barre d'erreur en écart type de ± 1.21 MPa.....</i>	<i>63</i>
<i>Figure IV.11 : résistances à la compression des bétons à 28 jours avec la barre d'erreur en écart type de ± 1.21 MPa.....</i>	<i>63</i>
<i>Figure IV.12 : Mesures de ressuage exprimées en %, après trois heures de la gâchée.....</i>	<i>64</i>
<i>Figure IV.13 : Mise en évidence des fissures en appliquant l'encre à écrire en surface : (droite zone bien fissurée, droite zone faiblement fissurée).....</i>	<i>65</i>
<i>Figures IV.14 : Représentation des résultats de fissuration exprimée en pourcentage pour deux environnements d'exposition (SP : sans protection ; AP : avec protection).....</i>	<i>66</i>
<i>Figures IV.15 : Représentation des résultats de fissuration exprimée en pourcentage pour deux environnements d'exposition (SAs : sans armatures ; AAs : avec armatures).....</i>	<i>66</i>
<i>Figures IV.16 : Représentation des résultats de fissuration exprimée en pourcentage pour deux environnements d'exposition (décoffrage à 24 heures, décoffrage à 7 jours).....</i>	<i>67</i>
<i>Figure IV.17 : Résistances à la compression des mortiers à 28 jours avec la barre d'erreur en écart type de $\pm 0,88$ MPa.....</i>	<i>70</i>
<i>Figure IV.18 : Mesures de ressuage des mortiers exprimées en %, après trois heures de la gâchée.....</i>	<i>71</i>
<i>Figure IV.19 : Représentation des résultats de fissuration exprimée en pourcentage pour deux environnements d'exposition (à l'intérieur du laboratoire ; à l'extérieur du laboratoire).....</i>	<i>72</i>
<i>Figure V.1 : Corrélation entre les résistances à 28 jours des bétons et celles des mortiers.....</i>	<i>74</i>
<i>Figure V.2 : Diagonale de corrélation entre les résistances des bétons et les celles des mortiers....</i>	<i>75.</i>
<i>Figure V.3 : Diagonale de corrélation entre les taux de fissurations moyens des bétons et ceux des mortiers.....</i>	<i>77</i>

LISTE DES TABLEAUX

<i>Tableau I.1 : Comportement à l'hydratation des différents constituants du clinker [6].....</i>	<i>7</i>
<i>Tableau I.2 : évolution de l'hydratation et transformation de la pâte de ciment dans le temps [3]....</i>	<i>8</i>
<i>Tableau I.3 : liste des différents types de ciments courants normalisés [7].....</i>	<i>9</i>
<i>Tableau I.4 : Classes de consistances des bétons ordinaires.....</i>	<i>23</i>
<i>Tableau I.5 : Classes de résistances des bétons.....</i>	<i>23</i>
<i>Tableau I.6 : Coefficients d'appréciation de la qualité K_G des granulats.....</i>	<i>25</i>
<i>Tableau I.7 : Causes générales de fissuration précoces, mécanismes physiques et paramètres impliqués pour les bétons courants [14].....</i>	<i>32</i>
<i>Tableau II.1.Composition minéralogique du ciment.....</i>	<i>40</i>
<i>Tableau II.2 : Masse volumique apparente et absolue des granulats.....</i>	<i>43</i>
<i>Tableau II.3 : Absorption des granulats.....</i>	<i>43</i>
<i>Tableau II-4 : Compositions des différentes formules de béton à étudier.....</i>	<i>45</i>
<i>Tableau II-5 : Quelques propriétés supplémentaires des bétons formulés.....</i>	<i>46</i>
<i>Tableau III.1 : Masses volumique des différents granulats.....</i>	<i>52</i>
<i>Tableau III.2 : formulation des mortiers à partir des bétons.....</i>	<i>52</i>
<i>Tableau III.3 : Quelques propriétés supplémentaires des bétons formulés.....</i>	<i>53</i>
<i>Tableau IV.1 : dosage en superplastifiant et consistance des différents bétons.....</i>	<i>60</i>
<i>Tableau IV.2 : Résultats des résistances à 28 jours, et pesées des éprouvettes des bétons.....</i>	<i>61</i>
<i>Tableau VI.3 : Masses volumiques des bétons durcis.....</i>	<i>62</i>
<i>Tableau IV.4 : Résistances moyennes des bétons et calcul d'écarts types (MPa).....</i>	<i>62</i>
<i>Tableau IV.5 : mesures des remontées d'eau et calculs de ressuage des bétons.....</i>	<i>64</i>
<i>Tableau IV.6 : valeurs du taux de fissuration des bétons exprimés en %.....</i>	<i>65</i>
<i>Tableau IV.7 : Résultats des résistances à 28 jours, et pesées des éprouvettes des mortiers.....</i>	<i>68</i>
<i>Tableau IV.8 : Masses volumiques des Mortiers durcis.....</i>	<i>69</i>
<i>Tableau IV.9 : Résistances moyennes des mortiers et calcul d'écarts types (MPa).....</i>	<i>69</i>
<i>Tableau IV.10 : mesures des remontées d'eau et calculs de ressuage des mortiers.....</i>	<i>70</i>
<i>Tableau IV.11: valeurs du taux de fissuration des mortiers exprimés en %.....</i>	<i>72</i>
<i>Tableau V.1: Taux de fissuration des bétons et mortiers conservés sous les mêmes conditions ; et taux de fissurations relatifs aux moyennes de fissuration des bétons puis des mortiers.....</i>	<i>76</i>

LISTE DES TABLEAUX

A1.1 - ECHANTILLONNAGE (NF P 18- 553)

A1.1.1- But et principe de l'échantillonnage

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. En général le prélèvement d'échantillons se fait en deux temps :

1. Prélèvement sur le chantier, la carrière ou l'usine d'une quantité de matériaux nettement plus grande que celle qui sera utilisée pour l'essai.
2. Au laboratoire, prélèvement de la quantité nécessaire à l'essai et qui soit également représentative de l'échantillon de départ.

A1.1.2- Prélèvement sur tas normaux (sables et graviers)

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

- a. à la main, à l'aide d'une planche ou d'une plaque métallique.
- b. à la main, sur tas d'éléments grossiers (gravier concassé) par ratissage dans un récipient (voir figures A1.1).
- c. au moyen d'une sonde, ouverture 4 ~ 6 cm, longueur 60 ~ 100 cm, extrémité taillée en sifflet.

Pour que l'échantillon soit représentatif de l'ensemble on prélèvera les matériaux en haut, en bas, au milieu et à l'intérieur du tas de granulat.

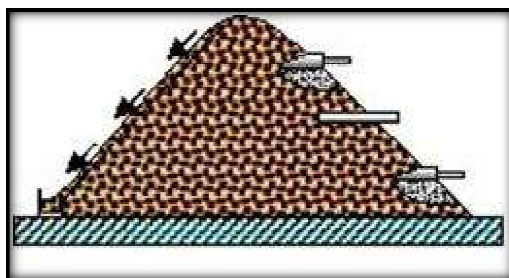


Figure A1.1 : le matériau en stock.

A1.1.3- Prélèvement en laboratoire (échantillonnage en laboratoire)

Le passage de l'échantillon total prélevé sur le tas à l'échantillon réduit, nécessaire à l'essai, peut se faire par quartage ou à l'aide d'un échantillonneur. L'échantillon doit être séché à l'étuve à 105 °C s'il est exempt de minéraux argileux, ce qui est rare, ou à 60 °C dans le cas contraire.

A1.1.4- Quartage

Il s'agit d'une méthode manuelle qui ne demande que peu de matériel (figure A1.2). Verser l'échantillon en un cône régulier sur un plateau horizontal ; à l'aide d'une petite pelle, séparer le cône verticalement par son sommet en deux moitiés symétriques et écartier l'une des deux moitiés de quelques centimètres ; scinder ensuite les deux moitiés par un nouveau plan vertical perpendiculaire au premier, puis séparer l'échantillon de sorte que l'on obtienne quatre quarts de cône identiques ;

Prélever et rassembler les quarts 1 et 3 (figure A1.2) avec lesquels l'opération est répétée jusqu'à l'obtention de la quantité désirée.

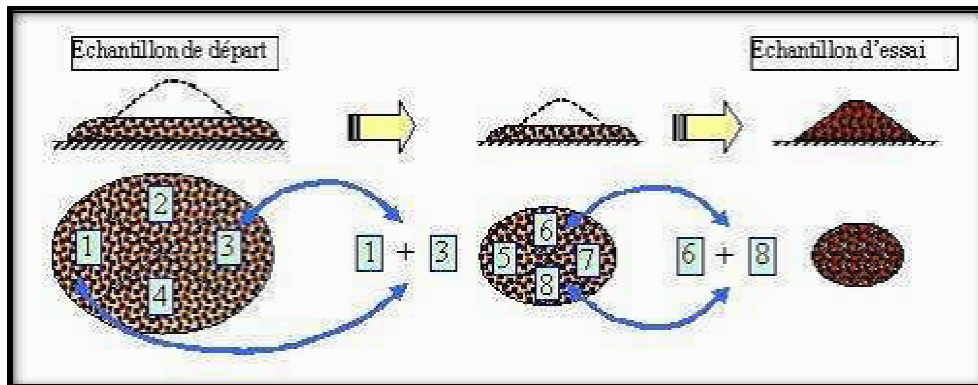


Figure A1.2 : Opération de quartage.

A1.1.5- Echantillonneur (quarter)

C'est un appareil de laboratoire (figure A1.3) qui permet de diviser facilement en deux parties représentatives la totalité d'un échantillon initial. Chaque moitié étant recueillie dans le bac de manière séparée. La répétition en cascade de cette opération du contenu de l'un des bacs, permet d'obtenir, après trois ou quatre opérations identiques, la quantité de matériaux représentative et nécessaire à l'essai envisagé.



Figure A1.3 : Echantillonneur utilisée

Les pièces typiques d'un système de quartage sont montrées sur la figure A1.3

- Le quarter lui-même, caractérisé par un dispositif de rainures (fentes) parallèles à directions de déversement alternativement opposées engendrant la séparation de l'échantillon. La largeur des rainures varie selon le modèle de quarter.
- Trois bacs de tailles adaptées au quarter permettant de verser l'échantillon (bac 1) et de récolter les deux moitiés de l'échantillon (bacs 2 et 3). Le procédé peut être résumé par la figure A1.4 ci-dessous. Celle-ci permet de sélectionner une masse (m) à partir d'un prélèvement de masse **3 m**.

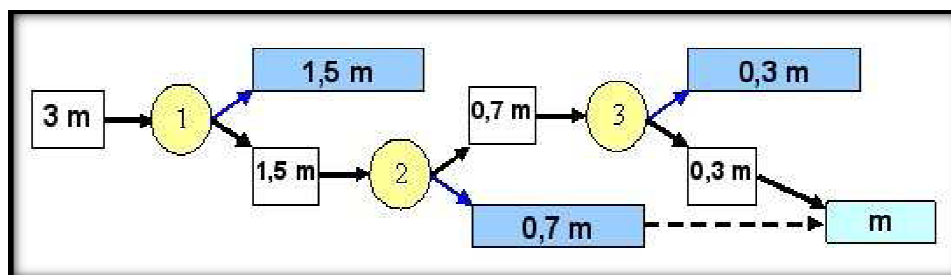


Figure A1.4 : Schéma d'une opération de répartition des matériaux en utilisant de l'échantillonneur.

A1.2- ANALYSE GRANULOMETRIQUE (EN 933-1 ET EN 933-2) :

A1.2.1- But de l'essai

L'analyse granulométrique à trois buts :

- -Déterminer les dimensions des grains.
- -Déterminer les proportions de grains de même dimension (% pondéral).
- -En déduire le module de finesse du granulat.

Elle s'applique à tous les granulats, à l'exclusion des fillers.

A1.2.2- Principe de l'essai :

L'analyse granulométrique s'intéresse à la détermination de la dimension des grains et la granularité concerne la distribution dimensionnelle des grains d'un granulat. L'analyse granulométrique consiste donc à fractionner des granulats au moyen d'une colonne de tamis dont les dimensions des mailles sont normalisées et décroissantes du haut vers le bas entre 80 mm et 0,063 mm.

Le matériau étudié est placé en partie supérieure des tamis et le classement des grains s'obtient par vibration de la colonne de tamis.

Avant l'opération de tamisage, l'échantillon est lavé au dessus d'un tamis de 0,063 mm afin d'éliminer les fines et éviter ainsi l'agglomération des grains, ceci pouvant fausser les résultats de l'analyse. L'analyse granulométrique est conduite sur la fraction refusée par le tamis de 0,063 mm.

La dimension nominale des tamis est donnée par l'ouverture de la maille, c'est-à-dire par la grandeur de l'ouverture carrée. Ces dimensions sont telles qu'elles se suivent dans une progression géométrique de raison 1010 (tableau AI.1), depuis le tamis 0,063 mm jusqu'au tamis 125 mm.

Tamis (mm)	0	0.063	0.08	0.1	0.125	0.160	0.2	0.25	0.315	0.4	0	0.63
Tamis (mm)	0.8	1	1.25	1.6	2	2.5	3.15	4	5	8	10	12.5
Tamis (mm)	14	16	20	25	31.5	40	50	80	100	125		

Tableau A1.1 : Dimensions nominales des tamis selon norme EN 933-2.

A1.2.3- Conduite de l'essai

La prise d'essai est séchée à $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$ jusqu'à masse constante puis pesée (masse M1). On réalise ensuite un tamisage par lavage afin de séparer les éléments inférieure à 0,063 mm du reste de l'échantillon. Le lavage est poursuivi jusqu'à ce que l'eau traversant le tamis de 0,063 mm soit claire.

L'échantillon ainsi préparé est alors séché à $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$. Après refroidissement il est pesé jusqu'à masse constante (masse M2). Le tamisage à sec peut alors être réalisé.

Dimensions des tamis utilisés

En fonction des dimensions du matériau à analyser, on utilisera la série de tamis préconisée par la norme EN 933-2 (tableau I.1). Pour notre étude, pour la raison du manque de certains tamis dans notre laboratoire, on a adapté notre série de tamis de façon à ce qu'elle soit la plus proche possible de celle définie par la norme (EN 933-1).

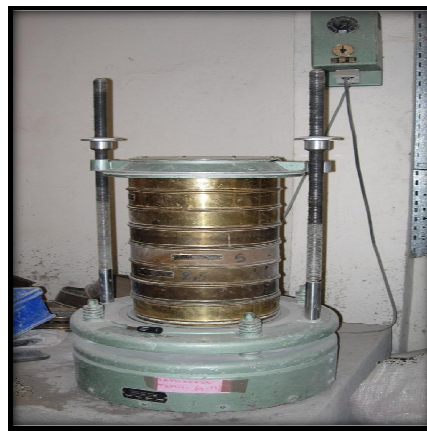


Figure A1.5 : Colonne de tamis utilisée

Préparation de l'échantillon

La quantité à utiliser doit répondre à différents impératifs qui sont contradictoires :

- il faut une quantité assez grande pour que l'échantillon soit représentatif,
- il faut une quantité assez faible pour que la durée de l'essai soit acceptable et que les tamis ne soient pas saturés et donc inopérants.

Dans la pratique, la masse utilisée sera telle que : $M \geq 0,2 D$ avec M : masse de l'échantillon en kg et D : diamètre du plus gros granulat exprimé en mm.

Description de l'essai

Le matériau séché, de masse M2, est versé sur une série de tamis choisis de telle manière que la progression des ouvertures soit croissante du bas de la colonne vers le haut. En partie inférieure, on dispose un tamis de 0,063 mm surmontant un fond étanche afin de récupérer les éléments fins qui n'auraient pas été entraînés par le lavage initial. Un couvercle est également disposé en haut de la colonne afin d'interdire toute perte de matériau pendant le tamisage.

On appellera tamisât le poids de matériau passant à travers un tamis donné et refus le poids de matériau retenu par ce même tamis.

Le matériau étudié est versé en haut de la colonne de tamis et celle-ci est vibrée à l'aide de la tamiseuse électrique. Le temps de tamisage varie avec le type de machine utilisé, mais dépend

également de la charge de matériau présente sur le tamis et de son ouverture. Un étalonnage de la machine est donc nécessaire.

A1.3- ABSORPTION (NF P 18-555)

A1.3.1- Principe de la mesure

On détermine un coefficient d'absorption, qui est défini comme le rapport de l'augmentation de la masse de l'échantillon après imbibition par l'eau, à la masse sèche de l'échantillon. Cette imbibition est obtenue par immersion de l'échantillon dans l'eau pendant 24 heures à 20 °C. Le coefficient d'absorption (Ab) est défini par la relation :

$$Ab = \frac{Ma - Ms}{Ms} \times 100$$

Ms = masse de l'échantillon sec après passage à l'étuve à 105 °C ; Ma = masse de l'échantillon imbibé surface sèche déterminée comme cela est décrit dans le paragraphe suivant.

Détermination de la masse imbibée à surface sèche *cas des sables*

Après imbibition dans l'eau pendant 24 heures, étaler l'échantillon sur une surface plane non absorbante et le soumettre à un flux d'air chaud, tout en le remuant afin que la surface externe des grains sèche. Ce séchage doit être effectué de manière douce afin de ne pas éliminer l'eau qui pourrait être piégée à l'intérieur du granulat. Veiller également à ne pas perdre de grains de sable au cours de l'opération. Les grains sont alors libres de toutes forces d'attraction capillaire.

On peut vérifier que cet état de séchage a été atteint en plaçant le matériau dans un moule tronconique (figure 1.6), posé sur une surface plane non absorbante, et en le compactant légèrement. On vérifie que celui-ci s'écoule en démoulant.

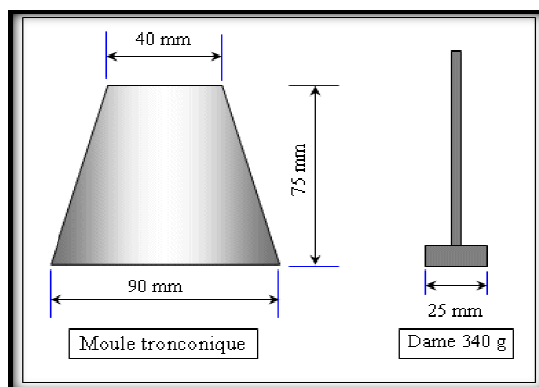


Figure A1.6 : Moule et dame pour coefficient d'absorption des graviers.

Détermination de la masse imbibée à surface sèche *cas des gravillons (NF p 18 554)*

Après imbibition, l'échantillon est soigneusement épongé avec un tissu absorbant, les gros éléments étant essuyés individuellement. Il est ensuite pesé.

Annexe 2 : Résultats de caractérisation expérimentale des granulats

Dans cette annexe sont présentés les résultats bruts de caractérisation des granulats utilisés pour notre étude.

A1. Analyse granulométrique

Tableau A2.1 : Analyse granulométrique du sable 0/03

Matériau : Sable 0/03 Forme : Sable semi concassé Provenance : Carrière de Tizi-Ouzou Date d'analyse : 24/03/2013 Type d'analyse : Analyse granulométrique Mode opératoire : Caractérisation faite selon la norme EN 933-1				
Résultats de l'analyse granulométrique Procédé utilisé: Lavage par tamisage Masse sèche totale : ----- M1 = 1994.5 g Masse sèche après lavage : ----- M2 = 1943.5 g Masse sèche des fines retirées par lavage : ----- M1-M2 = 51 g Passant au 0,063 : ----- P = 29 g				
Tamis en (mm)	Refus en (gr)	Refus C en (gr)	Refus C en (%)	Tamisât C en (%)
6.3	12.5	12.5	0.64	99.36
5	14.5	27.00	1.38	98.62
4	65	92.00	4.73	95.27
2.5	335.5	427.500	21.99	78.01
1	573.3	1000.8	51.49	48.51
0.5	400.2	1401	72.08	27.92
0.315	240.5	1641.5	84.46	15.54
0.2	175	1816.5	93.46	6.54
0.125	93.5	1910	98.28	1.72
Fond	29	1939	99.76	0.23
% du tamisât des fines < 0,063		$((M1-M2)+p) \times 100 / M1$	4.01	

C : cumulé.

Tableau A2.2 : Analyse granulométrique du Gravier 03/08

Matériau : Gravier 03/08 Forme : Gravier semi concassé Provenance : Carrière de Tizi-Ouzou Date d'analyse : 24/03/2013 Type d'analyse : Analyse granulométrique Mode opératoire : Caractérisation faite selon la norme EN 933-1				
Résultats de l'analyse granulométrique Procédé utilisé: Lavage par tamisage Masse sèche totale : -----M1 = 1952 g Masse sèche après lavage : -----M2 = 1937 g Masse sèche des fines retirées par lavage : -----M1-M2 = 15 g Passant au 0,063 : -----P = 39 g				
Tamis en (mm)	Refus en (gr)	Refus C en (gr)	Refus C en (%)	Tamisât C en (%)
10	28.00	28.00	1.44	98.56
8	63	91	4.69	95.31
6.3	174	265	13.68	86.32
5	382	647	33.40	66.6
4	260	907	46.82	53.18
2.5	762	1669	86.16	13.84
1	227.5	1896.5	97.90	2.1
Fond	39	1935.5	99.92	0.08
% du tamisât des fines < 0,063		$((M1-M2)+p) \times 100 / M1$		2.79

C : cumulé.

Tableau A2.3 : Analyse granulométrique du Gravier 08/15

Matériau : Gravier 08/15 Forme : Gravier semi concassé Provenance : Carrière de Tizi-Ouzou Date d'analyse : 24/03/2013 Type d'analyse : Analyse granulométrique Mode opératoire : Caractérisation faite selon la norme EN 933-1				
Résultats de l'analyse granulométrique Procédé utilisé: Lavage par tamisage Masse sèche totale : ----- M1 = 2118 g Masse sèche après lavage : ----- M2 = 2118 g Masse sèche des fines retirées par lavage : ----- M1-M2 = 0.0 g Passant au 0,063 : ----- P = 8.5 g				
Tamis en (mm)	Refus en (gr)	Refus C en (gr)	Refus C en (%)	Tamisât C en (%)
20	0	0	0	100
16	66	66	3.11	96.88
12.5	651.5	717.5	33.87	66.13
10	693	1410.5	66.59	33.41
8	478.5	1889	89.18	10.82
6.3	140.5	2029.5	95.82	4.18
5	58	2087.5	98.55	1.45
4	11.5	2099	99.10	0.9
2.5	6.5	2105.5	99.40	0.6
Fond	8.5	2114.	99.81	0.19
% du tamisât des fines < 0,063		$((M1-M2)+p) \times 100 / M1$	0.40	

C : cumulé.

Tableau A2.4 : Analyse granulométrique du sable de Sahara 0/1

Matériau : Sable de Sahara 0/1 Forme : / Provenance : Boussaâda Msila Date d'analyse : 24/03/2013 Type d'analyse : Analyse granulométrique Mode opératoire : Caractérisation faite selon la norme EN 933-1				
Résultats de l'analyse granulométrique Procédé utilisé: par lavage. Masse sèche totale : ----- M1 = 1000 g Masse sèche après lavage : ----- M2 = 1000 g Masse sèche des fines retirées par lavage : ----- M1-M2 = 0 g Passant au 0,063 : ----- P = 54,5 g				
Tamis en (mm)	Refus en (gr)	Refus C en (gr)	Refus C en (%)	Tamisât C en (%)
1	0	0	0	100
0.5	7.5	7.5	0.75	99.25
0.315	54	61.5	6.15	93.85
0.2	144.5	206.5	20.65	79.35
0.16	328	534.5	53.45	46.55
0.125	234	768.5	76.85	23.15
0.1	7	775.5	77.55	22.45
0.08	170	945.5	94.55	5.45
Fond	54.5	1000	100	0
% du tamisât des fines < 0,063		$((M1-M2)+p) \times 100 / M1$	5,45	

C : cumulé.

A2. Résultats des essais d'absorption et de masses volumiques**Tableau A2.5 : Résultats d'analyse d'absorption et de masses volumiques des granulats.**

	Sable 00/03	Gravier 03/08	Gravier 08/15
M1 (masse après séchage)	1,239	2.019	2.11
M2 (masse de récipient+ eau+gravier)	5,029	5.52	5,57
M3 (masse d'eau + récipient)	4,2585	4,2585	4,26
M4 (masse après passage à l'étuve)	1,214	1,9915	2.09
Mv absolue	2,74	2.73	2,71
Mv réelle	2,59	2.63	2,63
Mv saturée à surface sèches	2,64	2.67	2,66
Absorption	2,06	1.38	1.15

Formules de calculs :

Masse volumique absolue :

$$\rho_a = \frac{M_4}{M_4 - (M_2 - M_3)}$$

Masse volumique réelle déterminée par séchage à l'étuve :

$$\rho_{rd} = \frac{M_4}{M_1 - (M_2 - M_3)}$$

Masse volumique saturée à surface sèche :

$$\rho_{ssd} = \frac{M_1}{M_1 - (M_2 - M_3)}$$

Coefficient d'absorption :

$$\omega_{ssd} = \frac{100(M_1 - M_4)}{M_4}$$

