

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



**Département Génie Civil
Laboratoire Génie Sismique et Dynamique des Structures**

Mémoire de Master

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Génie Civil

Thème

**Etude du comportement
Thermomécanique d'un BHP
avec *ciments Blancs* pour Ouvrages d'Art**

Réalisé par
Aghiles BEGRICHE

Encadré par

Mme D.CHERID
MAA ENP

Mme H.MOHABBEDINE
MAA ENP

Lounes HAMADACHE
CDL LAFARGE

Composition du Jury

| | | |
|------------|-------------------------|-------------|
| Président | M. S. BELKACEMI..... | Pr ENP |
| Rapporteur | Mme. D.CHERID..... | MAA ENP |
| | Mme. H.MOHABBEDINE..... | MAA ENP |
| | M. L. HAMADACHE..... | CDL LAFARGE |
| Examineur | M. A.BALI..... | Pr ENP |
| | M. R.BOUTEMEUR..... | MAA ENP |

Promotion: juin 2016

Ecole Nationale Polytechnique 10, Rue des frères OUDDEK Hassen Badi
BP 182 16200 El-Harrach, Alger, ALGERIE.
Tel : 023 82 85 35 / Fax : 023 82 85 29

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



**Département Génie Civil
Laboratoire Génie Sismique et Dynamique des Structures**

Mémoire de Master

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Génie Civil

Thème

**Etude du comportement
Thermomécanique d'un BHP
avec *ciments Blancs* pour Ouvrages d'Art**

Réalisé par
Aghiles BEGRICHE

Encadré par

Mme D.CHERID
MAA ENP

Mme H.MOHABBEDINE
MAA ENP

Lounes HAMADACHE
CDL LAFARGE

Composition du Jury

| | | |
|------------|-------------------------|-------------|
| Président | M. S. BELKACEMI..... | Pr ENP |
| Rapporteur | Mme. D.CHERID..... | MAA ENP |
| | Mme. H.MOHABBEDINE..... | MAA ENP |
| | M. L. HAMADACHE..... | CDL LAFARGE |
| Examineur | M. A.BALI..... | Pr ENP |
| | M. R.BOUTEMEUR..... | MAA ENP |

Promotion: juin 2016

Ecole Nationale Polytechnique 10, Rue des frères OUDDEK Hassen Badi
BP 182 16200 El-Harrach, Alger, ALGERIE.
Tel : 023 82 85 35 / Fax : 023 82 85 29

Je rends grâce à Dieu,

et dédie ce modeste travail:

À mon défunt Père, pour qui l'instruction représentait beaucoup, paix à son âme.

À ma Mère, pour son soutien, son support et ces encouragements

À mon Frère, mes Sœurs, et mes Beau-frères, qui m'ont épaulé en tout temps.

À mes amis et frères:

Achour MENASRI (Adel)

Mehdi Belkacem CHERIKH

Ahmed Walid MOULAHOUIM (Vourdar)

Billal KARKAR

À toute la promotion 2013/2016 de l'ENP.

À tous les enseignants qui ont contribué à ma formation.

Alger le 31/10/2016

Aghiles BEGRICHE

REMERCIEMENTS

J'exprime mes sincères remerciements à toutes les personnes qui, de près ou de loin, de par leurs actes ou leurs conseils, ont contribué à la réalisation de ce projet.

En particulier, je tiens à exprimer ma profonde gratitude à :

- Mes encadreurs, **Mme. D. CHERID** et **Mme. H. MOHABBEDDINE**, enseignantes au département Génie Civil de l'**Ecole Nationale Polytechnique**, pour la confiance qu'elle m'ont fait pour ce sujet.
- Mon Encadreur Monsieur **Lounes HAMADACHE**, Développeur au CDL-LAFARGE, pour m'avoir Encadrer, initier au domaine, et partager son expérience.
- Toute l'équipe du CDL-LAFARGE, Agents; Techniciens, Ingénieurs, Chercheurs et responsables, qui m'ont accueillis, répondu à mes nombreuses interrogations et travailler avec moi, en particulier:

Sofiane Ait OUAKLI
Hichem KHEDIM
Redouane ZEROUAL
Tewfik GACI
Hamid ZEROUB
Farid ABDELKADER

- Tout le **corps enseignant** de l'Ecole Nationale Polytechnique.
- Ma **Mère** et toute **ma familles** pour m'avoir encouragé et soutenu tout au long de mon parcours.

Je vous réitère ma profonde gratitude.

Aghiles BEGRICHE

ملخص

يعرض هذا التقرير العمل المنجز خلال الفترة من 20 أوت - 30 أكتوبر 2016، ضمن مخبر تطوير البناء لافارج الجزائر والذي يهدف إلى دراسة السلوك الميكانيكي الحراري لخرسانة عالية الأداء مع أسمنت أبيض لجسر.

كلمات البحث

السلوك الميكانيكي الحراري, أسمنت أبيض, خرسانة عالية الأداء, خرسانة

Summary

This Master Thesis expose work done during an internship in the CDL teams (Construction and Development Laboratory) of Lafarge-Holcim Algeria from 20 August to 30 October 2016, in order to study the thermomechanical properties of high performance concrete with white cement, for Bridge.

Key words

Concret, HPC, White cement, Thermomechanical.

Résumé

Le présent rapport expose le travail réalisé au cours d'un stage de Projet de Master pour l'obtention du diplôme de Master en Génie Civil de l'Ecole Nationale Polytechnique (Alger), effectué du 20 Août au 30 Octobre 2016, au sein des équipes du CDL (Laboratoire de Développement de la Construction) de LAFARGE-HOLCIM Algérie, dont le but est l'Etude du comportement thermomécanique d'un Béton hautes Performances avec Ciments blancs, pour un Ouvrage d'Art.

Mots clés

Béton, BHP, Ciment Blanc, Thermomécanique.

Liste des Figures

| | |
|--|----|
| Figure I-1: Modélisation en 3D de la Conception finale du double Viaduc V5..... | 12 |
| Figure II-1: Désignation d'un ciment courant..... | 14 |
| Figure II-2: Moule à éprouvettes Prismatique 40×40×160..... | 16 |
| Figure II-3: Moule sur table à choc. | 16 |
| Figure II-4: Éprouvette prismatique 160×40×40..... | 16 |
| Figure II-5: Appareillage de Traction par flexion. | 17 |
| Figure II-6: Appareillage de compression. | 17 |
| Figure II-7: Appareil de VICAT (CDL). | 18 |
| Figure II-8: Sondes de l'appareil de VICAT..... | 18 |
| Figure II-9: Appareil de mesure de la SSB (CDL). | 19 |
| Figure II-10: Granulats 0/1-0/4-3/8-8/15. | 20 |
| Figure II-11: Echantillonneur de Sables pour essais VB/ES..... | 21 |
| Figure II-12: Lavage des Granulats avant essais. | 21 |
| Figure II-13: Etuvage à 105°C pendant 24H..... | 21 |
| Figure II-14: Série de Tamis. | 21 |
| Figure II-15: Prélèvement des Refus.. | 21 |
| Figure II-16: Courbes Granulométriques des granulats KEF AZROU/BOUSSAADA..... | 22 |
| Figure II-17: Grille à fontes pour la détermination de l'Aplatissement..... | 23 |
| Figure II-18: Mesure des hauteurs pour Equivalent de Sable..... | 24 |
| Figure II-19: équipement pour Essai VB (CDL) | 25 |
| Figure II-20: Tâche de solution (VB) sur papier filtre..... | 26 |
| Figure II-21: Tâche Concluante (VB)..... | 26 |
| Figure II-22: Echantillons de graviers et de sable dans l'eau..... | 27 |
| Figure II-23: Panier immerger dans l'eau relié à une balance..... | 27 |
| Figure III-1: Représentation graphique des formulations. | 31 |
| Figure III-2: Pesée des composants pour formulations (CDL) | 32 |
| Figure III-3: Malaxeur Utilisé pour le Gachage des Bétons (CDL)..... | 32 |
| Figure III-4: Cône d'ABRAMS pour Slump-Test. | 33 |
| Figure III-5: Moules d'éprouvettes à béton Cubiques. | 33 |
| Figure III-6: Ecrasement d'Éprouvette Cubique B52,5. | 33 |
| Figure III-7: Représentation graphique de l'Évolution des Résistances à la compression sur cubes en fonction de l'âge des bétons..... | 35 |
| Figure III-8: Représentation graphique de l'Évolution des Résistances à la compression équivalente sur éprouvettes cylindriques en fonction de l'âge des bétons..... | 35 |
| Figure III-9: Coupe en 3D du montage expérimental pour la mesure de la température dans le béton..... | 37 |
| Figure III-10: Moule cylindrique d'éprouvette à béton. | 38 |
| Figure III-11: Mise en place de l'éprouvette avec thermocouple dans un caisson d'isolation. | 38 |
| Figure III-12: Enregistreur de température TESTO 174T4..... | 38 |
| Figure III-13: Représentation graphique du montage Expérimentale pour la mesure de la température des trois formulations..... | 38 |
| Figure III-14: Représentation graphique de l'évolution de la température au coeur des bétons en fonction du temps..... | 39 |
| Figure III-15: Représentation graphique de l'évolution de la Température et de la Résistance du BHP Blanc B52,5..... | 40 |
| Figure III-16: Représentation graphique de l'évolution de la Température et de la Résistance du BHP Blanc B42,5..... | 41 |

.....Liste des Tableaux

| | |
|--|----|
| Tableau II-1: Dimensions et caractéristiques des familles de granulats..... | 15 |
| Tableau II-2: Résultats des essais de résistances sur prisme de mortier..... | 17 |
| Tableau II-3: Résultats des consistances et délais de prises..... | 18 |
| Tableau II-4: Résultats des SSB sur les ciments..... | 19 |
| Tableau II-5: Résultat de la Granulométrie sur sables (en pourcentages des passants)..... | 21 |
| Tableau II-6: Résultat de la Granulométrie sur graviers (en pourcentages des passants)..... | 22 |
| Tableau II-7: Equivalent d'écartement de gris pour les fraction de granulométrie..... | 23 |
| Tableau II-8: Coefficient d'aplatissement obtenus..... | 23 |
| Tableau II-9: Modules de finesse des sables..... | 23 |
| Tableau II-10: Résultats des essais d'équivalent de sable..... | 25 |
| Tableau II-11: Valeurs préconisées pour l'équivalent de sable. | 25 |
| Tableau II-12: Résultats des essais au bleu de méthylène..... | 26 |
| Tableau II-13: Masse Volumique Réelle et coefficient d'Absorption..... | 28 |
| Tableau III-1: Dosage pour le béton Blanc B52,5(0,40) avec 1,3% d'Adjuvant T12..... | 31 |
| Tableau III-2: Dosage pour le béton Blanc B52,5(0,47) avec 1,0% d'Adjuvant T12..... | 31 |
| Tableau III-3: Dosage pour le béton Blanc B42,5(0,40) avec 1,0% d'Adjuvant T12..... | 31 |
| Tableau III-5: Les classes de Consistance..... | 32 |
| Tableau III-6: Evolution de la Résistance du béton B52,5(E/C=0,47)..... | 34 |
| Tableau III-7: Evolution de la Résistance du béton B52,5(E/C=0,4)..... | 34 |
| Tableau III-8: Evolution de la Résistance du béton Blanc 42,5 (E/C=0,4)..... | 34 |
| Tableau III-10: Les températures initiales des bétons et de l'air..... | 37 |
| Tableau III-11: Pic de température des bétons..... | 40 |

Introduction

Générale

Le béton, matériau de construction contemporain, né avec le XXe siècle, est incontournable dans tous les projets de construction, des bâtiments aux ouvrages d'art les plus complexes, en raison de son adaptation **polymorphe** sans équivalent. Ce matériau pouvant associer une multitude de composants, est donc pluriel, il n'existe pas un béton mais **des bétons**. En raison de leurs multiples particularités d'emploi comme de l'extrême diversité des matières premières disponibles (ciments, additions, granulats, adjuvants...etc.), leur formulation est rendue de plus en plus complexe pour assurer au mieux leurs fonctions dans le temps.

La diversité de l'offre de ce matériau de construction devenu de plus en plus technologique grâce aux évolutions de la chimie minérale et organique et de l'amélioration des outils de production, impose aux industriels comme aux constructeurs une attention particulière dans leurs emplois. Il convient de valider leurs caractéristiques et performances atteintes à toutes les étapes, depuis leur formulation, leur fabrication, leur coulage, jusqu'à leur utilisation finale.

Le présent rapport expose le travail réalisé au cours d'un stage de Projet de Master pour l'obtention du diplôme de Master en Génie Civil de l'**Ecole Nationale Polytechnique (Alger)**, effectué du 20 Août au 30 Octobre 2016, au sein des équipes du **CDL (Laboratoire de Développement de la Construction) de LAFARGE-HOLCIM Algérie**. Nous commencerons par un chapitre introductif où nous présentons "le pourquoi" de ce sujet et les objectifs que nous nous sommes fixés, puis nous énumérerons les matériaux constituants dont nous avons déterminé les caractéristiques à travers divers essais en Laboratoire, qui nous ont permis de formuler nos bétons à étudier. Nous passerons par la suite aux essais qui déterminent les performances et le comportement thermomécanique de ces bétons à leurs différents états, puis à l'analyse et l'exploitation des résultats obtenus.

Nous terminerons l'étude par une conclusion générale dans laquelle nous exposerons les points essentiels abordés dans ce mémoire ainsi que les résultats auxquels nous sommes arrivés.

Chapitre I

Chapitre

Introductif

La qualité d'une structure passe par une conception adéquate, une étude rigoureuse et une bonne réalisation, impliquant une connaissance et maîtrise parfaite des matériaux employés. Le choix des matériaux influe non-seulement sur la qualité de l'ouvrage à réaliser, mais aussi sur les coûts et délais de réalisation.

Après la Conception et l'Étude du Viaduc V5 sur le tracé de la pénétrante autoroutière reliant la ville de Tizi-Ouzou à l'Autoroute EST/Ouest, réalisés au cours du Projet de Fin d'Etude d'Ingénierat [1], nous proposons pour sa réalisation, un Béton Blanc à Hautes Performances (**BHP**) avec ciment blanc, dont la formulation et l'étude **thermomécanique** sont effectuées au niveau du **Construction and Développement Laboratory (CDL)** de **LAFARGE-HOLCIM Algérie**. Nous avons travaillé avec un ciment blanc 52,5N et un ciment blanc 42,5N. La réaction d'hydratation du ciment étant très exothermique, nous fixons un dosage de 380 kg pour le ciment 52,5N, et 450 kg pour le 42,5N afin de comparer leur comportement thermomécanique à dosages différents.

I-1-Laboratoire de Développement de la Construction (CDL) LAFARGE

Leader mondial des matériaux de construction, Lafarge occupe une position de premier plan dans chacune de ses activités. En Algérie, Lafarge emploie 2600 collaborateurs et possède 2 cimenteries (M'Sila & Oggaz) avec une capacité totale de production de 8,6 millions t/an, gère en partenariat avec le GICA la cimenterie de Meftah (1,2 millions t/an) et compte 30 centres de production de béton. C'est un réseau en croissance continue, d'une capacité actuelle d'un million de mètres cubes. Implanté en 2013, le Laboratoire de **Développement de la Construction** est le premier pôle de recherche du genre en Afrique, il se veut être une plate-forme centralisant le développement de toutes les innovations du groupe Lafarge pour l'Algérie. Une équipe pluridisciplinaire d'ingénieurs, d'architectes et de techniciens y sont installés pour mettre au point les futurs produits, systèmes et solutions à base béton pour l'ensemble de la construction [3].

I-2-Bétons Hautes Performances (BHP)

Les recherches sur l'amélioration des résistances mécaniques ont abouti à la mise au point des BHP (Bétons à Hautes Performances), bétons très compacts utilisés pour leurs résistances élevées aussi bien à court terme qu'à long terme et leur durabilité, et ce depuis les années 80. L'optimisation de la formulation des BHP consiste à diminuer la porosité de la matrice cimentaire et à optimiser le squelette granulaire avec un diamètre maximal $D_{max}=16$. Les BHP se caractérisent par une résistance à la compression à 28 jours supérieure à 50 MPa sur cylindre et un rapport $Eau_{efficace}/liant_{équivalent}$ limité à 0,4. Ils présentent une micro-texture très dense et une faible porosité et sont donc très résistants à la pénétration d'agents agressifs. Hautes performances signifient aussi facilité de mise en œuvre et souplesse d'adaptation aux contraintes d'exécution des ouvrages[4].

I-3-Présentation du projet

C'est au PK 15+500 en partant de Tizi-Ouzou, que se situe l'ouvrage à réaliser. La conception réalisée pour le "Projet de Fin d'Etude d'Ingénierat" a abouti à un double viaduc de type VIPP (Viaduc à travées indépendantes à Poutres Précontraintes par post-tension) d'une longueur totale de tablier de 120m, avec 3 travées identiques de 40m de longueur reposant sur deux piles multi-fûts et deux culées remblayées aux extrémités[1].

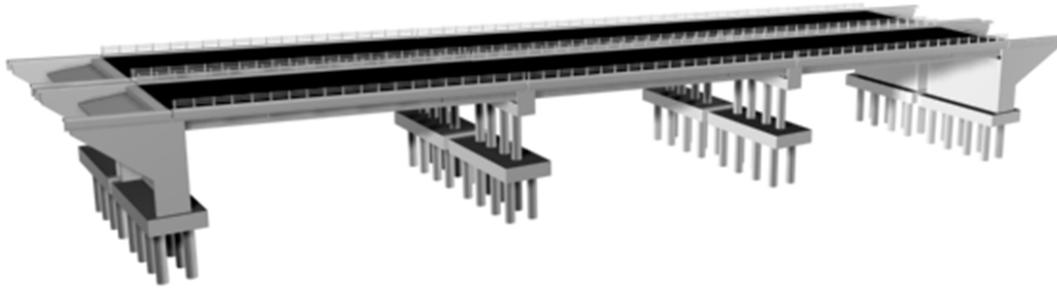


Figure I-1: Modélisation en 3D de la Conception finale du double Viaduc V5.

I-3-1-Problématique Liée au projet

Les Résistances minimales théoriques requises pour l'ouvrage en question ont été fixées lors de l'étude à 35 MPa à 28 jours sur cylindre pour la superstructure et 27 MPa à 28 jours pour les éléments d'infrastructure. À cela vient s'ajouter le protocole de précontrainte des poutres établi par l'entreprise de réalisation **E.N.G.O.A**, répartissant la mise en tension en deux phases principales:

- mise en tension de 50% à 7 jours lorsque le béton atteint une résistance de 23,1 MPa
- mise en tension de 100% à 28 jours lorsque le béton atteint les 35 MPa

Le but des travaux présentés dans ce rapport est de formuler et d'étudier le comportement thermomécanique d'un BHP blanc adéquat à la structure V5 qui offre des délais de réalisation optimisés de par ces performances, tout en traitant l'aspect esthétique de l'ouvrage par la couleur blanche apportée par les ciments employés.

Chapitre II

Caractérisation des matériaux

Le béton est obtenu par malaxage de ciment, de granulats, d'eau et, le cas échéant, d'additions et d'adjuvants, pendant une durée supérieure à une minute [4]. Certaines propriétés attendues d'un béton sont obtenues en agissant sur sa composition, c'est pourquoi il faut porter une attention constante aux particularités des matériaux qui le constituent, ainsi qu'à sa mise en œuvre.

II-1-Matériaux constituant le béton

II-1-1-Ciment

Le ciment est un liant hydraulique, donnant après gâchage à l'eau et durcissement un solide pierreux résistant à l'eau. En ce référant à la norme EN 197-1 "Ciment-Composition, Spécifications et critères de conformité des ciments courants", on distingue essentiellement les types suivants [2]:

- Ciment Portland (CEM I)
- Ciment Portland au laitier (CEMII/A-S, CEM II/B-S)
- Ciment Portland à la fumée de silice (CEMII/A-D)
- Ciment Portland à la pouzzolane (CEM II/A-P, CEM II/B-P)
- Ciment Portland aux cendres volantes (CEM II/A-V)
- Ciment Portland au schiste calciné (CEM II/A-T, CEM II/B-T)
- Ciment Portland au calcaire (CEM II/A-LL)
- Ciment Portland composé (CEM II/B-M)
- Ciment Portland de haut fourneau (CEM III/A, CEM III/B)

En plus de leur désignation, les ciments sont livrés en différentes classes de résistance: Les Ciments de classes de résistance 32,5; 42,5 et 52,5 sont divisés en sous classes selon que leurs résistance à court terme est Normale (désignation "N"), élevée (désignation "R") [2].

CEM II / A - LL 32,5 R

| | | | | |
|---------------------------|--|---|--|--|
| Famille de ciment courant | classes de composition A,B ou C selon la teneur en CLINKER | Nature des Constituants autres que le Clinker | Classe de Résistance courante (28 jours) 32,5-42,5-52,5 | Classe de Résistance à court terme R ou N |
|---------------------------|--|---|--|--|

Figure II-1: Désignation d'un ciment courant.

Remarque

En ce qui concerne les ciments utilisables pour la confection d'un BHP, on recommande l'utilisation des types CEM I, CEM II ou CEM III, classes de résistance conseillées 42,5 ou 52,5 conformes à la norme NF EN 197-1 [4].

II-1-2-Granulat

Les granulats sont des grains minéraux appelés suivant leurs dimensions: fillers, sablons, sables, graves ou gravillons. Ils sont obtenus en exploitant des gisements de sables et de graviers d'origines alluvionnaires, en concassant des roches massives (calcaires ou éruptives) ou encore dans certains cas par recyclage de matériaux de démolition. Etant généralement moins déformables que la matrice de ciment, les granulats constituent le squelette du béton et s'opposent à la propagation des microfissures provoquées dans la pâte par le retrait, améliorant ainsi la résistance de la matrice. Comme la nature des liaisons qui se manifestent à l'interface granulat/pâte de ciment, conditionne les résistances mécaniques du béton, le choix d'un granulat est donc un facteur important de la composition du béton[4].

Les granulats sont classés en granulats légers, normaux ou lourds en fonction de leur masse volumique (ils sont considérés comme courants lorsque leur masse volumique est supérieure à $2t/m^3$, et légers si elle est inférieure à cette valeur); ils sont répartis en classe granulaire selon leurs dimensions (minimales et maximales) [4], classe désigné par **d/D** ou **O/D** avec :

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

Tableau II-1: Dimensions et caractéristiques des familles de granulats[5]

| Familles | Dimensions | Caractéristiques |
|------------|------------|--|
| Fillers | 0/D | D < 2 mm avec au moins 85% de passant à 1,25 mm et 70% de passant à 0,063 mm |
| Sables | 0/D | d = 0 et D ≤ 4 mm |
| Graves | 0/D | D > 6,3 mm |
| Gravillons | d/D | d ≥ 2 mm et D ≤ 63 mm |
| Ballasts | d/D | d = 31,5 mm et D = 50 ou 63 mm |

II-1-3-Additions

Ce sont des matériaux pulvérulents comme la farine de pierre, le trass, la fumée de silice ou la cendre volante, utilisés pour augmenter la résistance à la compression du béton et améliorer l'étanchéité de la matrice cimentaire[4].

II-1-4-Adjuvants

Ce sont des produits qui par une action chimique et/ou physique, modifient certaines propriétés du béton comme la vitesse de prise, l'ouvrabilité ou la résistance aux attaques de gel/dégel (leur influence sur la composition volumique est négligeable)[4]. Pour nos formulations, nous faisons appel à un super-plastifiant Haut réducteur d'eau "SIKA VISCORETE TEMPO 12" (T12) non chloré à base de copolymère acrylique. Sa Plage d'utilisation recommandée est de 0,2 à 3 % du poids du liant ou du ciment selon la fluidité et les performances recherchées.

II-2-Essais sur matériaux

II-2-1-Ciment

Nous Utilisons pour la confection de nos bétons:

Ciment Blanc 52,5:

CPJ – CEM II / A-L 52,5 N; conforme à la norme **NA 442**;
Ciment à hautes résistances initiales et finales, issu du broyage d'un Clinker Blanc;

Ciment Blanc 42,5:

CPJ – CEM II/B 42,5 R;
Ciment issu du broyage d'un Clinker blanc, en cours d'étude dont la mise sur le marché est prévue en 2017.

Remarque

Selon la norme Allemande DIN 1164, les ciments blancs ne sont pas des ciments spéciaux; ce sont des ciments Portland CEM II, pauvres en oxyde de fer [2].

II-2-1-1-Essais de flexion et compression NF EN 196-1

Nous réalisons ces essais afin de définir la classe de résistance d'un liant à 28 jours, les résultats nous permettent de vérifier sa conformité.

II-2-1-1-1-Gâchage du Mortier Normal

La détermination des résistances mécaniques d'un ciment se fait sur éprouvettes prismatiques 40×40×160 (mm) en mortier d'essai composé "d'une partie" (en masse) de ciment (450g) et de "trois parties" (en masse) de sable normalisé (1350g), avec un rapport E/C de 0,5 (225 ml d'eau).

Nous versons l'eau dans le récipient du malaxeur suivie du ciment puis nous mettons en marche le malaxeur à vitesse lente pendant 30 secondes. Le sable est versé progressivement au court des 30 secondes qui suivent, puis nous mettons le malaxeur en vitesse rapide pendant 30 secondes supplémentaire. On arrête le malaxeur pendant 1 min 30s, le temps d'enlever le mortier adhérent au bord vers l'intérieur; puis nous remettons le malaxeur en marche pendant 60 secondes à vitesse rapide.

II-2-1-1-2-Préparation des éprouvettes

Les moules étant préparés au préalable (montage et graissage), nous introduisons dans chaque compartiment du moule le mortier en deux couches, chaque couche subit 60 chocs sur l'appareil à choc. Les éprouvettes sont conservées à une température de 20°C et une humidité relative de 90% pendant 24H, puis elles sont placées sous l'eau jusqu'au jour de l'essai à 20°C.



Figure II-2: Moule à éprouvettes Prismatique 40×40×160



Figure II-3: Moule sur table à choc.



Figure II-4: Éprouvette prismatique 160×40×40

II-2-1-1-3-Essais de Résistances

II-2-1-1-3-a-Traction par Flexion

Nous plaçons les éprouvettes entre les appuis de l'appareil de Flexion, en prenant soin que les faces latérales (lisses) sont en contact avec les appuis, nous rapprochons l'appui supérieur pour entrer en contact avec la face supérieure de l'éprouvette puis nous appliquons la charge.

II-2-1-1-3-b-Compression

La compression est mesurée sur les demi-prismes obtenus à partir de l'essai de traction par flexion). Nous plaçons les corps d'essai de manière à ce que les faces de l'éprouvette en contact de la presse soient perpendiculaires à l'axe de l'éprouvette, puis nous amenons les plateaux de la presse en contact avec l'éprouvette et nous appliquons la charge.



Figure II-5: Appareillage de Traction par flexion.

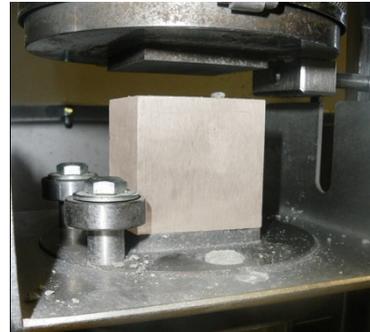


Figure II-6: Appareillage de compression.

Tableau II-2:
Résultats des essais de résistances sur prisme de mortier.

| Ciment | Blanc 52,5 | | Blanc 42,5 | | |
|--------|-------------|----------|-------------|----------|-------------|
| | Age en jour | Traction | Compression | Traction | Compression |
| 2 | | 7,15 | 32,00 | 3,72 | 20,40 |
| 7 | | 9,58 | 45,06 | 6,12 | 31,71 |
| 28 | | 10,08 | 55,76 | 6,83 | 44,32 |

La Norme NA 234 stipule que les résistances à la compression doivent être supérieures à 20 MPa à 2 jours, et supérieures à la résistance minimale garantie (en fonction de la classe: 52,5 MPa ou 42,5 MPa) à 28 jours. Nos deux échantillons de ciments sont donc conformes.

II-2-1-2-Temps de prise NF EN 196-3 NA 230/1990

L'association ciment-eau génère des réactions extrêmement complexes. Les silicates et aluminates qui se développent dans la phase d'hydratation, forment un gel cristallin qui marque le début du phénomène de "prise". Le développement et la multiplication de ces microcristaux au cours de la phase de "durcissement" (peut durer plusieurs mois) expliquent l'augmentation des résistances mécaniques et font du ciment une "roche composite". Avant d'atteindre son stade final, la pâte de ciment passe par trois phases successives:

- **La phase dormante:** La pâte reste en apparence inchangée malgré le démarrage des premières réactions.
- **Le début et la fin de prise:** Après une à deux heures, pour la plupart des ciments, une augmentation brusque de la viscosité se produit, accompagnée d'un dégagement de chaleur – c'est le début de prise. La fin de prise est effective lorsque la pâte cesse d'être déformable et devient un matériau rigide.
- **Le durcissement:** L'hydratation du ciment se poursuit et la résistance mécanique continue à croître durant plusieurs mois. La résistance à 28 jours est la valeur conventionnelle de contrôle.



Figure II-7: Appareil de VICAT (CDL).

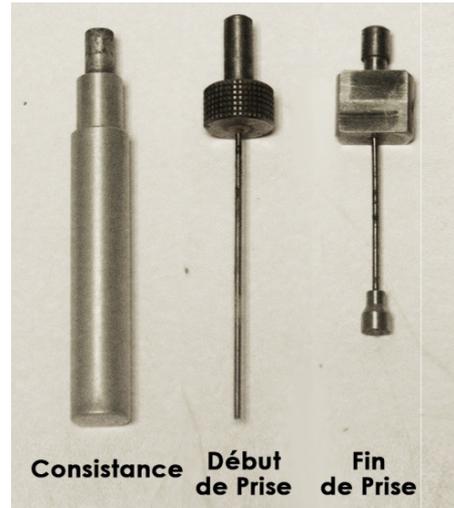


Figure II-8: Sondes de l'appareil de VICAT

Le temps de prise est déterminé par la pénétration d'une aiguille de 1,13mm de diamètre (appareil de Vicat) dans la pâte de ciment de consistance normalisée jusqu'à atteindre une valeur spécifique (après 30s). Le début de prise est l'intervalle de temps entre l'instant de gâchage et celui où l'aiguille de Vicat pénètre à une distance de 4 ± 1 mm du fond du moule. Le temps de Fin de prise, quant à lui, est l'intervalle de temps entre l'instant de gâchage et celui où la sonde de Vicat ne s'enfonce dans la pâte de ciment que de 0,5mm. Ces deux essais sont réalisés à $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$.

Tout d'abord, nous déterminons la consistance normalisée (NA229/1990) à l'aide de l'appareil de Vicat pour pâte de ciment (Ciment(500g)+eau(125ml)), puis nous déterminons la quantité d'eau correspondant à une pénétration de la sonde de 6 ± 1 mm par essais de pénétrations successives sur les pâtes de ciments, cette quantité représente celle de la consistance normalisée recherchée, puis nous recherchons les temps de prise.

Nous obtenons les résultats suivants:

Tableau II-3: Résultats des consistances et délais de prises.

| Ciment | Consistance (%) | Début de Prise (min) | Fin de Prise (min) |
|------------|-----------------|----------------------|--------------------|
| Blanc 52,5 | 27,90 | 148 | 202 |
| Blanc 42,5 | 29,70 | 129 | 236 |

II-2-1-3-Mesure de la finesse Blaine NF EN 196-6/NA 231

Sachant que la vitesse d'écoulement d'un fluide à travers un corps granulaire est liée à la finesse de mouture de ces grains et que cette même finesse de mouture est liée à la notion de "Surface Spécifique" qui désigne le total des aires de tous les grains contenus dans une quantité unité (1 gramme), l'essai qui relie ces trois grandeurs a donc pour but de calculer le débit d'air susceptible de passer à travers la poudre de ciment. Plus la surface massique de cette poudre est importante, plus le temps mis par l'air pour traverser la poudre est long.



Figure II-9: Appareil de mesure de la SSB (CDL).

Nous calculons donc ce temps pour les trois ciments utilisés, et nous l'introduisons dans la formule suivante:

$$SSB = \frac{K \times \sqrt{e^3} \times \sqrt{t}}{\rho_{abs} \times (1 - e) \times \sqrt{\eta}}$$

avec:

- K..... Constante de l'appareil
- t..... Temps calculé
- e..... Porosité du lit de ciment
- n..... Porosité fixé à 0,5
- ρ_{abs} Masse volumique apparente du ciment
- η Viscosité dynamique de l'air au moment de l'essai
(en relation avec la température de l'air)

Nous obtenons les résultats suivants:

Tableau II-4: Résultats des SSB sur les ciments.

| Ciment | Surface Spécifique Blaine SSB (cm ² /g) |
|------------|---|
| Blanc 52,5 | 4860 |
| Blanc 42,5 | 5750 |

Observations

On remarque que le Blanc 42,5 a une finesse de grain (SSB) plus importante que celle du 52,5.

II-2-2-Granulats

II-2-2-1-Caractéristiques géométriques des granulats

II-2-2-1-1-Détermination de la granularité NF EN 933-1/A1 NA2607/92

La norme NF EN 12620 spécifie les caractéristiques générales de granularité que doivent respecter les gravillons, les sables, les graves et les fillers en fonction de leur classe granulaire. La granularité représente la distribution dimensionnelle des grains contenus dans les granulats, elle est déterminée par **Analyse granulométrique**, qui consiste à déterminer cette distribution dont les dimensions sont comprises entre 0,063 et 125 mm.

Pour nos formulations de bétons, nous sélectionnons les classes **0/4**, **3/8**, **8/15** de provenance **Kef Azrou** et un sable correcteur **0/1** de provenance **Boussâada**.



Figure II-10: Granulats 0/1-0/4-3/8-8/15.

II-2-2-1-1-a-Analyse Granulométrique

L'essai consiste à fractionner au moyen d'une série de **tamis** un matériau en plusieurs classes granulaires de tailles décroissantes. Les masses des différents refus et tamisats sont rapportées à la masse initiale de matériau. Les pourcentages ainsi obtenus sont exploités sous forme numérique et sous forme graphique.

Le prélèvement des échantillons se fait soit selon la méthode du quartage, soit sur échantillonneur. Les quantités à prélever sont de 1200 g pour les sables (0/1-0/4) et pour les graviers nous prélevons la quantité égale à deux fois le diamètre D de la fraction, soit:

- $M_{0/1} = 1200$ g
- $M_{0/4} = 1200$ g
- $M_{3/8} = 1600$ g
- $M_{8/15} = 3000$ g



Figure II-11: Echantillonneur de Sables pour essais VB/ES.



Figure II-12: Lavage des Granulats avant essais.



Figure II-13: Etuvage à 105°C pendant 24H



Figure II-14: Série de Tamis.



Figure II-15: Prélèvement des Refus.

Après prélèvement des échantillons et préparation par lavage et tamisage suivant la norme NA2607/92, nous obtenons les valeurs suivantes pour les sables:

Tableau II-5: Résultat de la Granulométrie sur sables (en pourcentages des passants)

| Classe et Provenance | Tamis | | | | | | | | | | | | |
|----------------------|-------|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|------|-------|-------|--|
| | 8 | 6,3 | 5 | 4 | 3,15 | 2 | 1,6 | 1 | 0,5 | 0,25 | 0,125 | 0,063 | |
| 0/1 BOUSSAADA | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 97,2 | 27,7 | 2,6 | |
| 0/4 KEF AZROU | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 96,0 | 65,9 | 47,0 | 29,6 | 27,1 | 21,1 | 16,6 | |

Et les valeurs suivantes pour les graviers:

Tableau II-6: Résultat de la Granulométrie sur graviers (en pourcentages des passants)

| Classe et Provenance | Tamis | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------------|-------|-----|-----|------|------|------|------|------|-----|-----|---|-----|------|-------|-------|
| | 31,5 | 25 | 20 | 16 | 12,5 | 10 | 8 | 6,3 | 4 | 2 | 1 | 0,5 | 0,25 | 0,125 | 0,063 |
| 3/8 KEF AZROU | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 99,3 | 90,6 | 61,9 | 7,8 | 0,8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 8/15 KEF AZROU | 100 | 100 | 100 | 93,9 | 61,6 | 31,1 | 9,9 | 3,1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

II-2-2-1-1-b-Courbe Granulométrique

Il suffit de porter les divers pourcentages des tamisats ou des différents refus cumulés sur une feuille semi-logarithmique avec **en abscisse** les dimensions des mailles sur une échelle logarithmique, **en ordonnée** les pourcentages sur une échelle arithmétique.

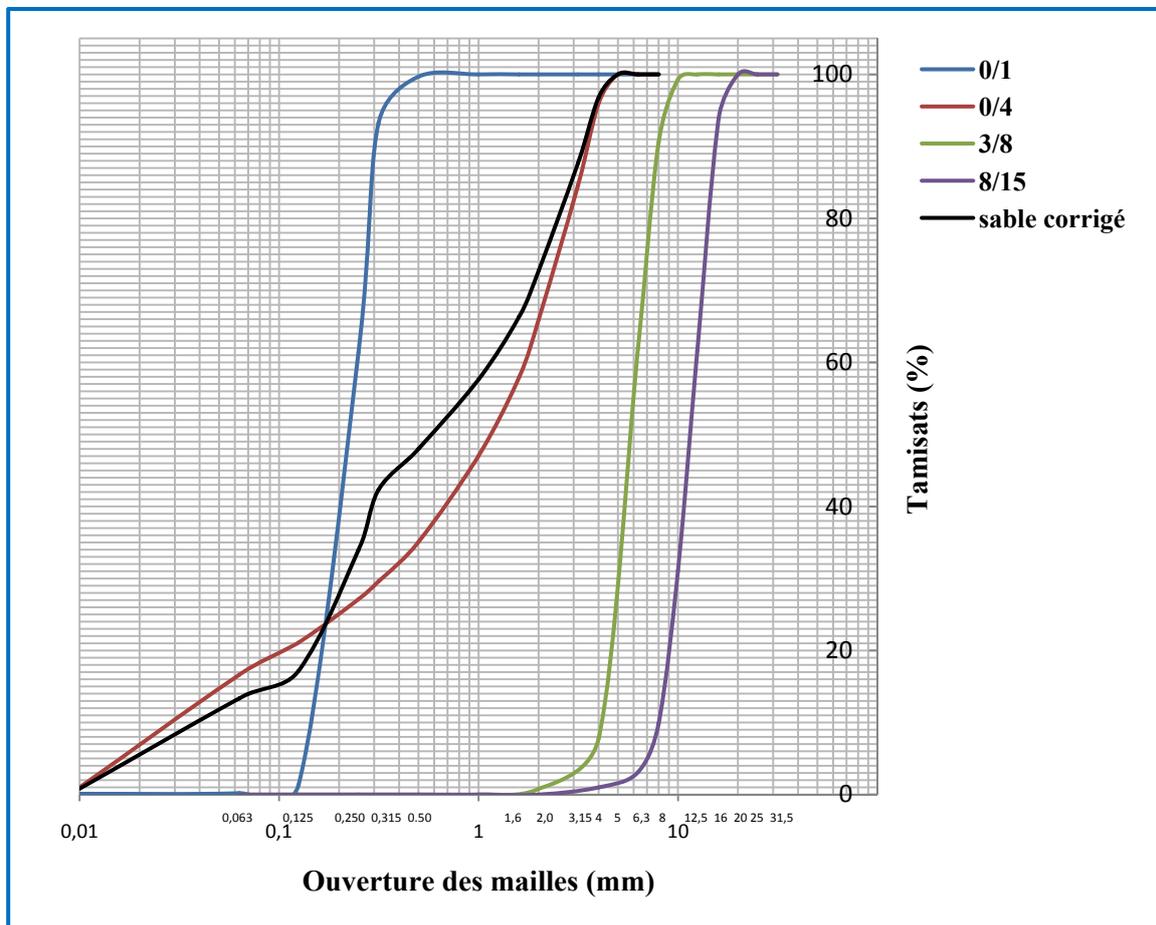


Figure II-16: Courbes Granulométriques des granulats KEF AZROU/BOUSSAADA.

La représentation graphique des résultats de l'analyse granulométrique est utilisé dans la formulation des béton, dans le chapitre suivant.

II-2-2-1-2-Détermination de la forme des granulats NF EN 933-3/A1

II-2-2-1-2-a- Le coefficient d'aplatissement

Ce coefficient caractérise la forme du granulat, plus les gravillons sont plats, moins leur mise en place dans les bétons est facile et plus ils sont fragiles. Il est donc important de contrôler le coefficient d'aplatissement de chaque granulométrie. L'essai qui permet sa détermination est effectué en parallèle avec la granulométrie. Chaque fraction d/D récupérée pendant la granulométrie est passée dans une grille à fontes lui correspondant. Généralement on retient les granulats dont le coefficient est inférieur à 35%.



Figure II-17: Grille à fontes pour la détermination de l'aplatissement.

Tableau II-7: Equivalent d'écartement de gris pour les fraction de granulométrie.

| Classe Granulaire | 31,5-40 | 25-31,5 | 20-25 | 16-20 | 12,5-16 | 10-12,5 | 8-10 | 6,3-8 | 5-6,3 | 4-5 |
|------------------------|---------|---------|-------|-------|---------|---------|------|-------|-------|-----|
| Ecartement des grilles | 20 | 16 | 12,5 | 10 | 8 | 6,3 | 5 | 4 | 3,15 | 2,5 |

Nous obtenons les résultats suivants:

Tableau II-8: Coefficient d'aplatissement obtenus.

| Fraction Granulaire | Coefficient d'aplatissement A(%) |
|---------------------|----------------------------------|
| 3/8 | 12 |
| 8/15 | 16 |

Observation

Comme $A_{3/8}=12\%$ et $A_{8/15}=16\%$ sont inférieurs à 35%, nous les retenons.

II-2-2-1-2-b-Le Module de Finesse

On le calcule pour les sables, il permet de caractériser leur granularité par une seule valeur, il est égal au 1/100e de la somme des refus cumulés en pourcentage sur certains tamis définis par la Norme EN 12620 (0,125 - 0,25 - 0,50 - 1 - 2 - 4). Plus le module de finesse est faible, plus le sable est fin. On estime qu'un MF est bon lorsqu'il se situe entre 2,2 et 2,8.

Nous obtenons:

Tableau II-9: Modules de finesse des sables.

| Sable | Module de Finesse |
|------------|-------------------|
| 0/1 | 1,38 |
| 0/4 | 3,10 |

Comme le $MF_{0/4}=3,07$ (Sable Grossier), ce qui donne un béton peu maniable, nous procédons donc à sa correction par le sable 0/1 afin d'aboutir à un mélange de sable ayant un MF de 2,75 (sable préférentiel) suivant la formule d'ABRAMS [6]:

$$\text{quantité 0/1(\%)} = \frac{2,75 - MF_{0/4}}{MF_{0/1} - MF_{0/4}} = 20\%$$

$$\text{quantité 0/4(\%)} = \frac{MF_{0/1} - 2,75}{MF_{0/1} - MF_{0/4}} = 80\%$$

II-2-2-1-3-Évaluation des fines

II-2-2-1-3-a-Équivalent de sable NF EN 933-8

La propreté d'un sable (ES) est fournie par l'essai « équivalent de sable » qui permet de mesurer la fraction argileuse du matériau. L'essai consiste à séparer le sable des matières argileuses et fines qui remontent par floculation à la partie supérieure de l'éprouvette où l'on a effectué le lavage (plus la valeur de ES est grande, plus le sable est propre).

Nous remplissons deux éprouvettes pour chaque échantillon (0/1-0/4) avec une solution lavante préparée pour l'essai au niveau du premier trait, puis nous versons l'échantillon sec de 120g, on élimine les bulles d'air puis nous laissons le mélange reposé pendant 10 minutes. Nous bouchons les deux éprouvettes et les passons à l'agitateur pour 90 cycles pendant 30 secondes. Nous faisons remonter les fines et nous lavons les bords à l'aide d'un tube laveur en le faisant remonter et tourner entre les doigts; nous retirons le tube laveur et fermons le robinet une fois que le niveau du liquide atteint le trait supérieur, puis on laisse reposer pendant 20 mn. Nous mesurons la hauteur H_1 au niveau supérieur du floculat puis nous faisons descendre lentement le piston et l'immobilisons au contact du sable afin de mesurer H_2 .

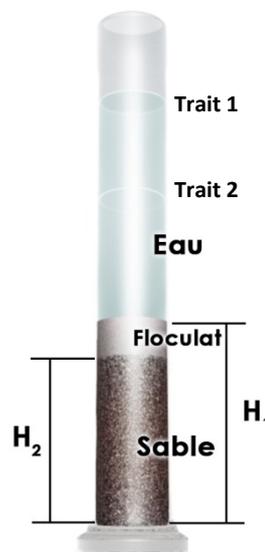


Figure II-18:
Mesure des hauteurs pour
Equivalent de Sable.

Nous obtenons les Résultats suivants:

Tableau II-10: Résultats des essais d'équivalent de sable.

| Sable | ES |
|-------|--------|
| 0/1 | 74,35% |
| 0/4 | 63% |

En se basant sur les classification établies par la norme:

Tableau II-11: Valeurs préconisées pour l'équivalent de sable.

| ES(%) | Nature du sable |
|----------|---|
| ES<60 | Argileux à rejeter |
| 60<ES<70 | Légèrement argileux admissible pour un béton de qualité |
| 70<ES<80 | Propre convenable pour un béton de haute qualité |
| ES>80 | Très propre Risque d'un default de plasticité |

nous retenons les deux sables puisqu'ils sont légèrement argileux, ES_{0/1} et ES_{0/4} se situant entre 60% et 70%.

II-2-2-1-3-b-Essai au bleu de méthylène NF EN 933-9

L'Essai est utilisé pour déterminer la propreté d'un sable ou d'un granulat (les différents types d'argiles et matière organique qu'il contient), il consiste à mesurer la quantité de colorant (bleu de méthylène) fixée par 100 g de la fraction granulaire analysée.

Nous préparons un échantillon de granulat de 200 g après passage au tamis 0/2 et étuvage, nous le versons ensuite dans un bécher contenant 500 ml d'eau distillée, que nous plaçons sous un agitateur à ailettes réglé sur 600 tours/min pendant cinq minutes, puis nous réduisons la vitesse à 400 tours/min pour le reste de l'essai.



Figure II-19: équipement pour Essai VB (CDL)

On injecte 5 ml de colorant, après 1 min, on prélève une goutte que l'on dépose sur un papier filtre à l'aide d'une tige en verre, de manière à ce que la tâche qui s'y forme fasse entre 8 et 12mm de diamètre. La tâche est généralement formée d'un dépôt central de couleur bleu foncée entourée d'une zone humide incolore. On réitère l'opération jusqu'à ce qu'on obtienne une tâche dont la zone humide est colorée d'un bleu clair sur à peu près 1mm d'épaisseur.

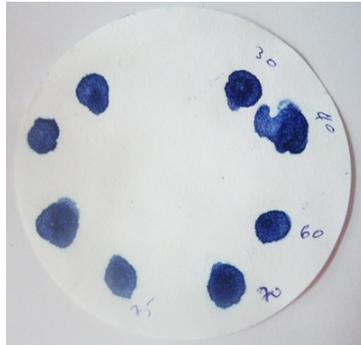


Figure II-20: Tâche de solution (VB) sur papier filtre.

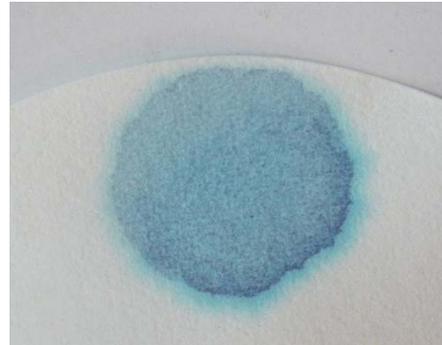


Figure II-21: Tâche Concluante (VB).

La valeur de bleu VB est calculée suivant la relation suivante:

$$VB = 10 \times \frac{V_B}{M_{ech}}$$

avec:

- V_B : la quantité de bleu injecté à la solution (ml)
- M_{ech} : la masse de l'échantillon, soit 200g

Plus la valeur au bleu (VB) est élevée, moins le sable est propre, selon la norme elle doit être inférieure à 1 g/kg.

Nous obtenons les Résultats suivants:

Tableau II-12: Résultats des essais au bleu de méthylène.

| Sable | VB (g/kg) |
|-------|-----------|
| 0/1 | 0,5 |
| 0/4 | 0,16 |

Comme les valeurs VB obtenues (0,5 et 0,16) sont strictement inférieures à 1g/kg, les sables 0/1 et 0/4 sont retenus.

II-2-2-2-Propriétés physiques des granulats

II-2-2-2-1-Détermination de la masse volumique réelle et du coefficient d'absorption d'eau NF EN 1097-6

Le coefficient d'absorption d'eau A_b représente la capacité d'absorption d'eau d'un granulat. Plus il est élevé, plus le matériau est absorbant.

Nous prélevons:

$$M_0(0/1) = 1000\text{g}$$

$$M_0(0/4) = 1000\text{g}$$

$$M_0(03/8) = 1000\text{g}$$

$$M_0(8/15) = 2000\text{g}$$

Puis nous passons ces échantillons au lavage au tamis 4 mm pour les fractions 3/8 et 8/15, au tamis 0,063 pour les fractions 0/1 et 0/4, et nous les immergeons dans l'eau pendant 24H.



Figure II-22: Echantillons de graviers et de sable dans l'eau.

Nous pesons les échantillons (3/8; 8/15) dans l'eau en les plaçant dans un panier à treillis immergé relié à une balance (M_1) et nous relevons la température de l'eau à cet instant afin de fixer la masse volumique de l'eau ρ_w à l'aide d'abaques (voir Annexe). Nous pesons la masse du panier vide dans l'eau (M_2), puis nous pesons la masse des échantillons saturés séchés superficiellement dans l'air à l'aide d'un chiffon sec pour 3/8 et 8/15 (M_3). Nous mettons nos échantillons à l'étuve pendant 24 H à 105°C afin de peser par la suite leurs masses (M_4), étant entièrement secs. En ce qui concerne les fractions (0/1, 0/4) nous procédons aux mêmes pesées mais avec un pycnomètre.



Figure II-23: Panier immerger dans l'eau relié à une balance.

Après avoir récolté les données nécessaires, nous calculons:

- Masse volumique réelle: $\rho_{rd} = \frac{M_4}{(M_3 - (M_1 - M_2))} \times \rho_w$
- Coefficient d'absorption d'eau: $A_b = \left(\frac{M_3 - M_4}{M_4}\right) \times 100$

Nous obtenons les résultats suivants:

Tableau II-13: Masse Volumique Réelle et coefficient d'Absorption.

| Fraction | 0/1 | 0/4 | 3/8 | 8/15 |
|---------------------|------|------|------|------|
| $\rho_{rd}(g/cm^3)$ | 2,55 | 2,76 | 2,66 | 2,67 |
| Ab (%) | 1,42 | 0,6 | 1,43 | 0,99 |

Remarque

En prenant en considération ces données pour les formulations de béton, on calcule la quantité d'eau nécessaire pour l'hydratation du ciment ($E_{efficace}$) et on ajoute la quantité susceptible d'être absorbée par les granulats ($E_{absorbition}$), afin de garantir une parfaite hydratation du ciment.

$$E_{totale} = E_{efficace} + E_{absorbition}$$

Maintenant que les caractéristiques de nos composants (ciments, sables, graviers) sont fixées, nous pouvons passer aux formulations et à l'étude des bétons dans le chapitre qui suit.

Chapitre III

Formulation et Étude des Bétons

La confection d'un béton approprié à son utilisation consiste à déterminer et à optimiser la composition granulaire et le dosage des divers constituants, à partir d'études graphiques et expérimentales. Un Ouvrage en béton qui offre satisfaction et performance repose sur un matériau doté de propriétés adaptées. La qualification de ces propriétés se définit à travers d'essais, d'études, de contrôles, réalisés sur béton frais et sur béton durci.

III-1-Formulation des Bétons

Les attentes que l'on a d'un béton sont:

- **Ouvrabilité**
- **Résistance**
- **Durabilité**

Ce sont ces trois caractéristiques qui nous permettent de juger de la performance et de la qualité d'un béton. Pour un **BHP**, Les clefs de ses performances sont:

- **la réduction de la quantité d'eau** opérée par l'ajout de superplastifiants (Adjuvants).
- **l'optimisation de la répartition granulométrique** des composants, ce qui diminue la porosité.

Nous fixons pour la formulation de nos BHP:

- un rapport E_{Totale}/C égale à **0,40**;
- un rapport **G/S égale à 1,2**;
- un dosage en ciment de:
 - 380 kg/m³ pour le ciment 52,5**;
 - 450 kg/m³ pour le ciment 42,5**;
- un affaissement de classe **S4**;
- fractions: **$D_{\text{max}} < 16\text{mm}$** ;
- **0/1 (Boussaada) comme sable correcteur**;
- **0/4 - 3/8 - 8/15 (Kef Azrou)**;

Remarque

Afin de mettre en évidence le rôle du rapport E/C en ce qui concerne les performances d'un béton, nous réalisons une formulation supplémentaire de ciment Blanc 52,5 dosé à 380 kg/m³, avec un rapport $E_{\text{Totale}}/C=0,47$ que nous nommons "B52,5(0,47)".

Les dosages en pourcentage des granulats sont réalisés suivant un algorithme basé sur la méthode de DREUX-GORISSE [6], prenant en considération la banque de données du CDL.

Nous aboutissons à nos formulations, après correction du sable 0/4 (exposé dans le chapitre II) et application de la méthode de DREUX-GORISSE basée sur le rapprochement des représentations graphiques granulaires par une courbe théorique proche de la courbe réelle déterminée à partir de trois points significatifs A, B et O, tels que:

$$\begin{aligned}
 O &= [0,080\text{mm}; 0\%] \\
 B &= [D; 100\%] \\
 A &= [D/2; (50-\sqrt{D} + K+K_S+K_P)]
 \end{aligned}$$

Avec:

- K: Optimisation de la compacité en fonction de la vibration et du dosage en ciment[6].
- K_S : Ajustement de la granularité du sable[6].
- K_P : Ajustement du dosage en sable pour les bétons pompés[6].

Nous obtenons:

Tableau III-1: Dosage pour le B52,5(0,40) avec 1,3% d'Adjuvant T12.

| Matériaux | 0/1 | 0/4 | 3/8 | 8/15 | Ciment Blanc 52,5 | Eau | Adjuvant T12 |
|-----------------------|-----|-----|-----|------|-------------------|-----|--------------|
| Qte Kg/m ³ | 167 | 695 | 365 | 695 | 380 | 155 | 4,94 |

Tableau III-2: Dosage pour le B52,5(0,47) avec 1,0% d'Adjuvant T12.

| Matériaux | 0/1 | 0/4 | 3/8 | 8/15 | Ciment Blanc 52,5 | Eau | Adjuvant T12 |
|-----------------------|-----|-----|-----|------|-------------------|-----|--------------|
| Qte Kg/m ³ | 167 | 695 | 365 | 695 | 380 | 180 | 3,80 |

Tableau III-3: Dosage pour le B42,5(0,40) avec 1,0% d'Adjuvant T12.

| Matériaux | 0/1 | 0/4 | 3/8 | 8/15 | Ciment Blanc 42,5 | Eau | Adjuvant T12 |
|-----------------------|-----|-----|-----|------|-------------------|-----|--------------|
| Qte Kg/m ³ | 155 | 645 | 340 | 645 | 450 | 180 | 4,50 |

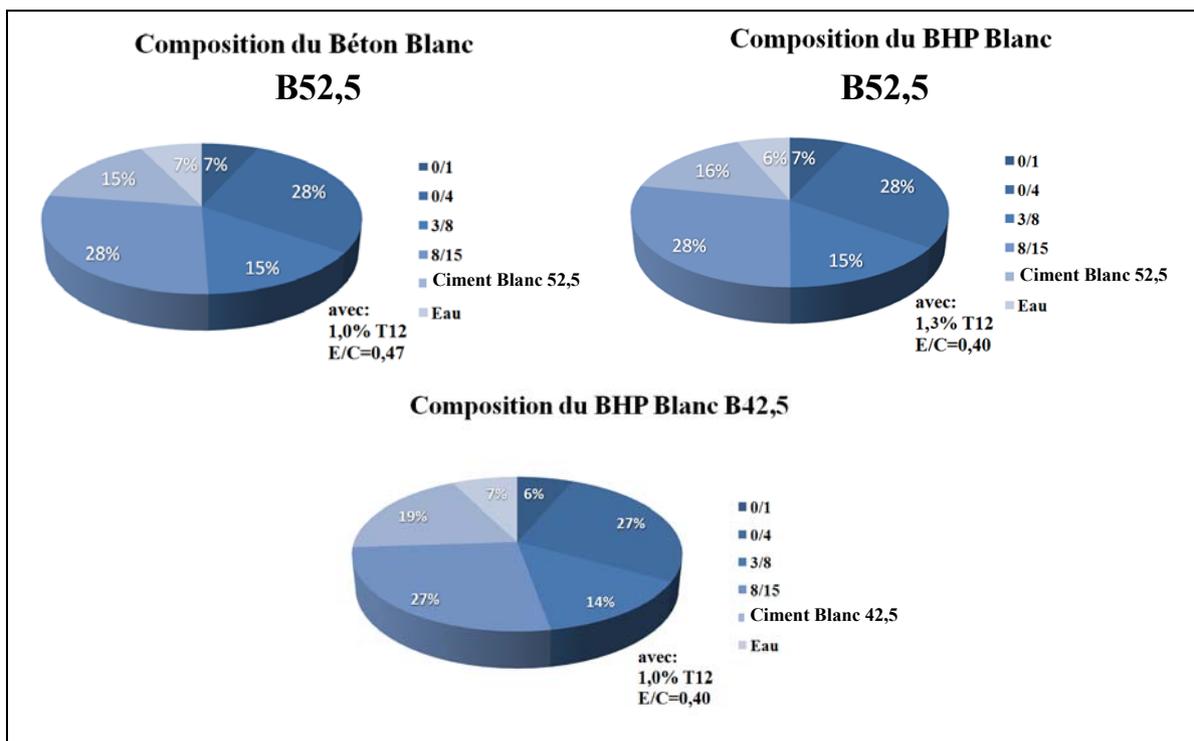


Figure III-1: Représentation graphique des formulations.



Figure III-2: Pesée des composants pour formulations (CDL)



Figure III-3: Malaxeur Utilisé pour le Gachage des Bétons (CDL)

III-2-Essais sur béton

III-2-1-Essais sur béton frais

La consistance des bétons est une caractéristique importante pour la mise en œuvre sur chantier.

III-2-1-1-Essai d'affaissement (Slump test) Norme NF EN 12350-2 NA 431/1989

La consistance ou l'ouvrabilité d'un béton est un facteur important, elle conditionne la facilité de mise en place du béton dans le coffrage. Sa mesure se fait à travers l'essai d'affaissement au cône d'ABRAMS; l'importance de l'affaissement du béton permet de vérifier si l'ouvrabilité du béton est conforme à celle attendue d'une formulation. L'échelle mise en place permet de définir cinq classes de consistance selon la norme européenne: **Ferme, Plastique, Très plastique, Fluide, Très Fluide**[6].

Remarque

Dans la littérature, certaines références ne considèrent que les quatre premières classes de consistance.

Tableau III-5: Les classes de Consistance

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



Figure III-4: Cône d'ABRAMS pour Slump-Test.

Nous obtenons:

Blanc 52,5(0,40).....210 mm Classe S4 (1,3% d'adjuvant T12);
Blanc 52,5(0,47).....215 mm Classe S4 (1,0% d'adjuvant T12);
Blanc 42,5(0,40).....215 mm Classe S4 (1,0% d'adjuvant T12);

Nous avons donc atteint la classe de consistance souhaitée **S4** pour les trois formulations.

III-2-2-Essais sur bétons durcis (Essais mécaniques)

III-2-2-1-Essais de compression NF EN 12390-4 NA 427/1989

Le principe de l'essai est de soumettre une éprouvette cylindrique, cubique ou une carotte, à une force croissante et constante jusqu'à rupture de celle-ci, afin de déterminer sa résistance à la compression.

Nous avons opté pour des écrasements sur Cubes 150×150×150 (NA 424/1990) plus faciles à démouler, moins gourmands en béton et ne nécessitant pas de surfaçage. Nous pratiquons les écrasements à 1, 2 et 14 jours. La vitesse d'écrasement est normalisée à **11,3 kN/s**, appliquée sur une surface de 225cm².



Figure III-5: Moules d'éprouvettes à béton Cubiques.



Figure III-6: Ecrasement d'Eprouvette Cubique B52,5.

Nous obtenons suite aux écrasements les résultats suivants:

Tableau III-6: Evolution de la Résistance du béton B52,5 (E/C=0,47)

| R _c moyenne MPa | R _c /cylindre moyenne MPa | Age jours | Date | Observation |
|----------------------------|--------------------------------------|-----------|------------|-------------|
| 28,80 | 23,80 | 1 | 26/09/2016 | R.A.S |
| 35,10 | 29,13 | 2 | 27/09/2016 | R.A.S |
| 45,81 | 38,02 | 14 | 09/10/2016 | R.A.S |

Tableau III-7: Evolution de la Résistance du béton B52,5 (E/C=0,40)

| R _c /cube moyenne MPa | R _c /cylindre moyenne MPa | Age jours | Date | Observation |
|----------------------------------|--------------------------------------|-----------|------------|-------------|
| 43,02 | 35,70 | 1 | 11/10/2016 | R.A.S |
| 47,96 | 39,80 | 2 | 12/10/2016 | R.A.S |
| 55,06 | 45,70 | 14 | 24/10/2016 | R.A.S |

Tableau III-8: Evolution de la Résistance du béton B42,5 (E/C=0,40)

| R _c /cube moyenne (MPa) | R _c /cylindre moyenne MPa | Age jours | Date | Observation |
|------------------------------------|--------------------------------------|-----------|------------|-------------|
| 30,20 | 25,06 | 1 | 19/09/2016 | R.A.S |
| 32,23 | 26,75 | 2 | 20/09/2016 | R.A.S |
| 48,99 | 40,66 | 14 | 02/10/2016 | R.A.S |

Nous représentons les résultats obtenus graphiquement sur les figures suivantes:

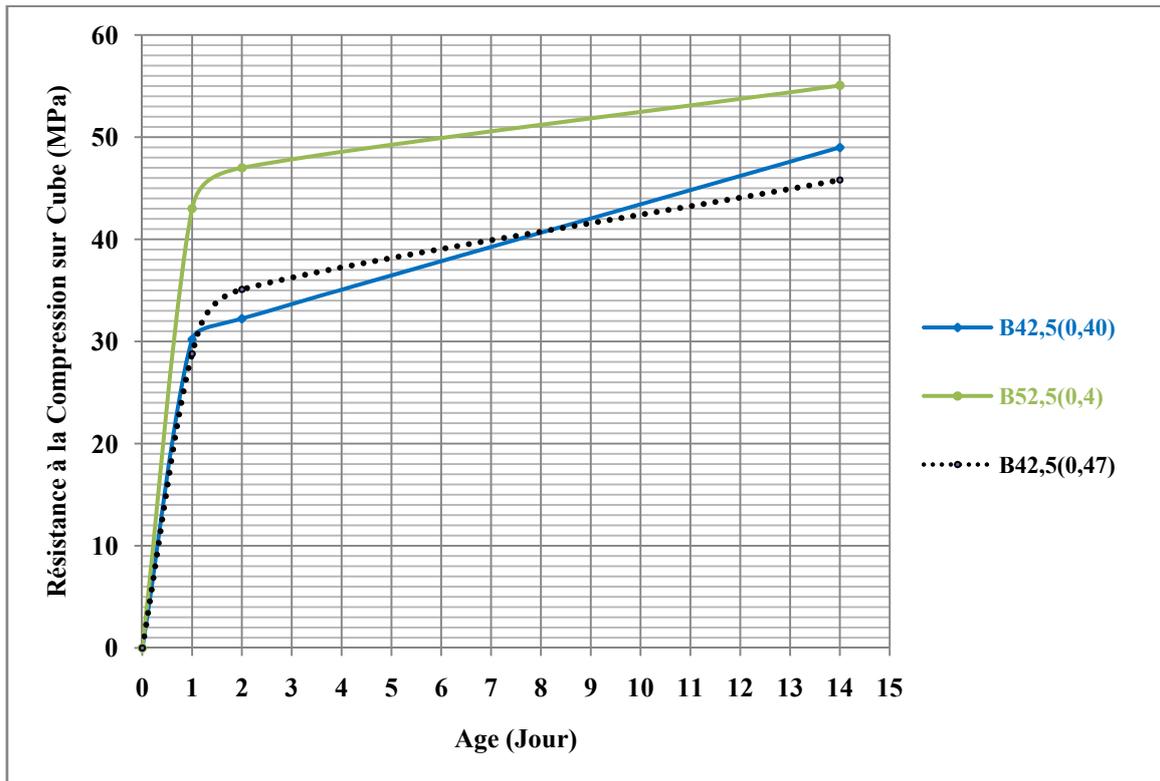


Figure III-7:
Représentation graphique de l'Évolution
des Résistances à la compression sur cubes en fonction de l'âge des bétons.

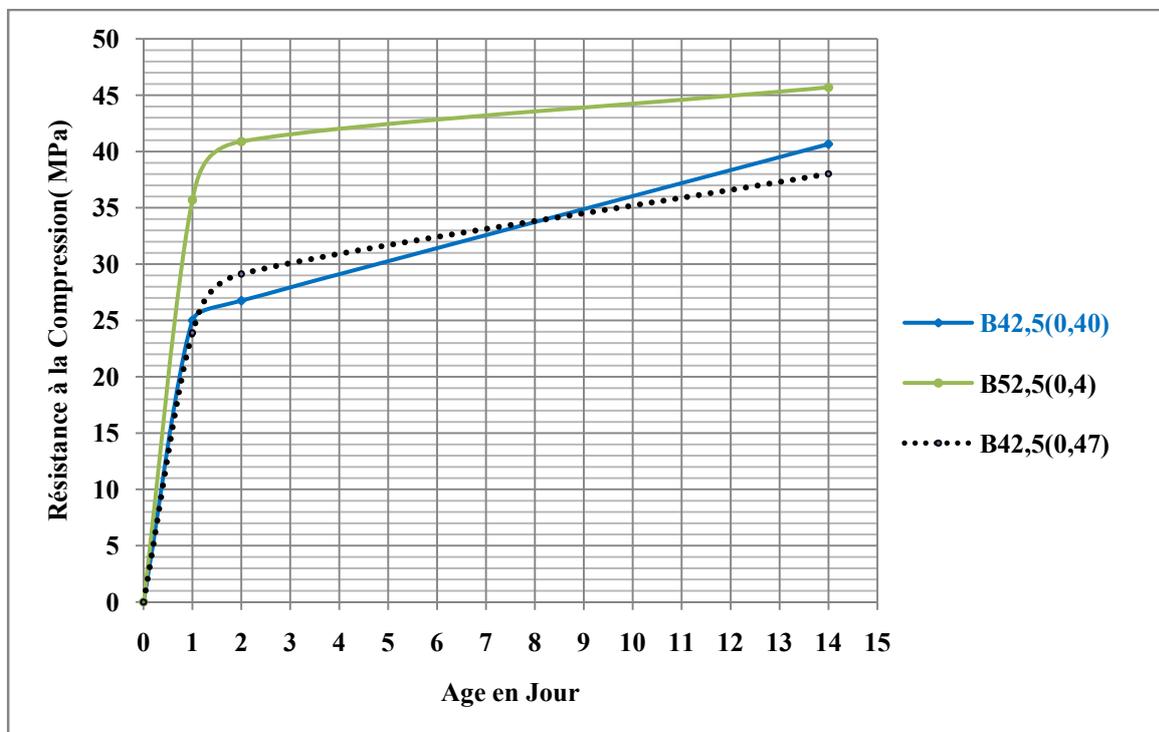


Figure III-8:
Représentation graphique de l'Évolution des Résistances à la compression équivalente sur éprouvettes
cylindriques en fonction de l'âge des bétons.

Observations

On observe que les croissances des résistances (pentes) pour les trois formulations, sont à leurs valeurs maximales au cours des premières 24 heures qui suivent le gachage; en se rapprochant des 48 heures, les pentes diminuent brutalement pour se stabiliser entre 2 jours et 14 jours.

En ce qui concerne les résistances atteintes, nous notons qu'à 24H (1 jour):

- Le B52,5(0,40) atteint une résistance de 35,70 MPa (sur Cylindre) supérieure à celles atteintes par le B52,5(0,47) 23,80 MPa et le B42,5 25,06 MPa; malgré le même dosage en ciment pour les 52,5 et la différence du dosage entre le 52,5(0,40) et le 42,5(0,40).
Le fait que le B52,5(E/C=0,40) atteint une résistance supérieure à celle du B52,5(E/C=0,47) confirme la loi de Boloomy concernant l'influence du rapport E/C sur la Résistance.

À 48H (2 jours):

- Le B52,5 (E/C=0,40) atteint 39,80 MPa et le B52,5 (E/C=0,47) atteint 29,13 MPa, soit plus de 10MPa de différence, E/C étant toujours influent sur la résistance à 48H.

À 14 jours:

- Le B52,5(0,40) dépasse le B42,5(0,40) avec 45,70MPa contre 40,66MPa, Malgré un dosage en ciment plus élevé pour le B42,5.
- Le B52,5(0,40) dépasse de loin le B52,5(0,47) avec 45,70MPa contre 38,02MPa, prouvant que l'influence de E/C sur la résistance est toujours présente à long terme malgré le même dosage en ciment 380kg pour les deux bétons.

III-2-3-Suivi de la Temperature des bétons

Le durcissement du béton a lieu avec des augmentations de température assez importantes pouvant dépasser les 50°C [7], phénomène dû à la réaction d'hydratation du ciment, qui en plus d'être **exothermique**, est **thermo-activé**, ce qui signifie que la vitesse à laquelle elle se fait croît avec la température[7].

Pour pouvoir mesurer l'évolution de la température dans le coeur du béton, nous utilisons un enregistreur de température (**Testo 174T4**) relié à un thermocouple introduit dans le coeur du béton coulé dans un moule cylindrique. Après 3 minutes du gâchage à une température de $20 \pm 2^\circ\text{C}$, nous remplissons un moule cylindrique (320×160) en plaçant le thermocouple à une profondeur d'un tiers de la hauteur totale de l'éprouvette. Nous plaçons l'éprouvette dans un caisson isolant pour éliminer les échanges thermiques avec le milieu extérieur et garantir une mesure parfaite de la température interne du béton.

Tableau III-10: Les températures initiales des bétons et de l'air.

| Bétons | Température air (°C) | Température béton (°C) |
|-------------|----------------------|------------------------|
| B52,5(0,47) | 21,70 | 26,60 |
| B52,5(0,40) | 21,10 | 25,70 |
| B42,5(0,40) | 20,70 | 26,30 |

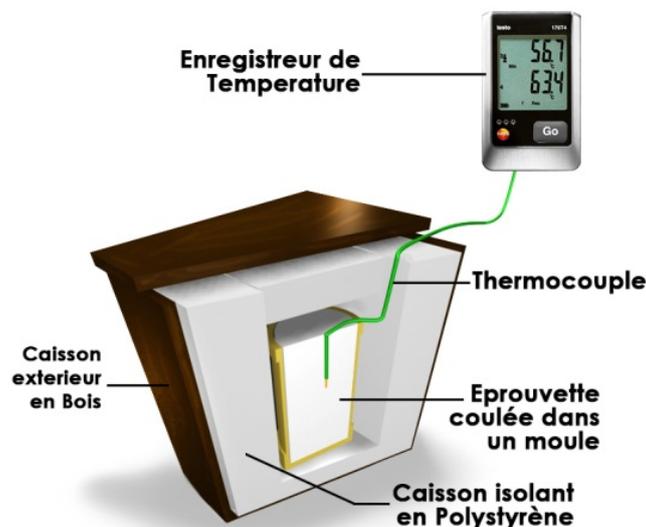


Figure III-9:
Coupe en 3D du montage expérimental pour la mesure de la température dans le béton.



Figure III-10:
Moule cylindrique
d'éprouvette à béton.



Figure III-11:
Mise en place de l'éprouvette
avec thermocouple dans un
caisson d'isolation.



Figure III-12:
Enregistreur de température
TESTO 174T4

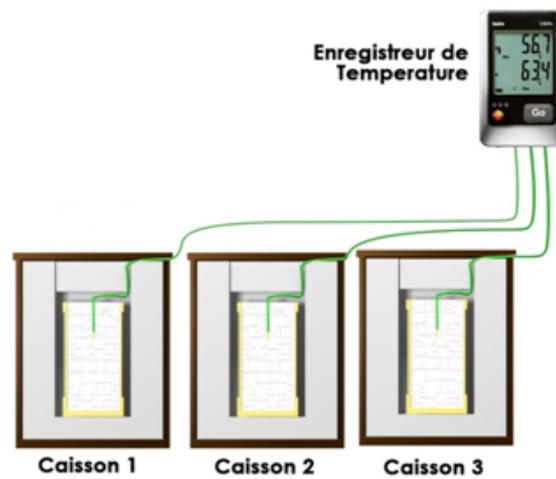


Figure III-13:
Représentation graphique du montage Expérimentale
pour la mesure de la température des trois formulations.

Nous procédons à l'enregistrement des températures pendant un minimum de 72 H afin de garantir l'enregistrement du pic de chaleur.

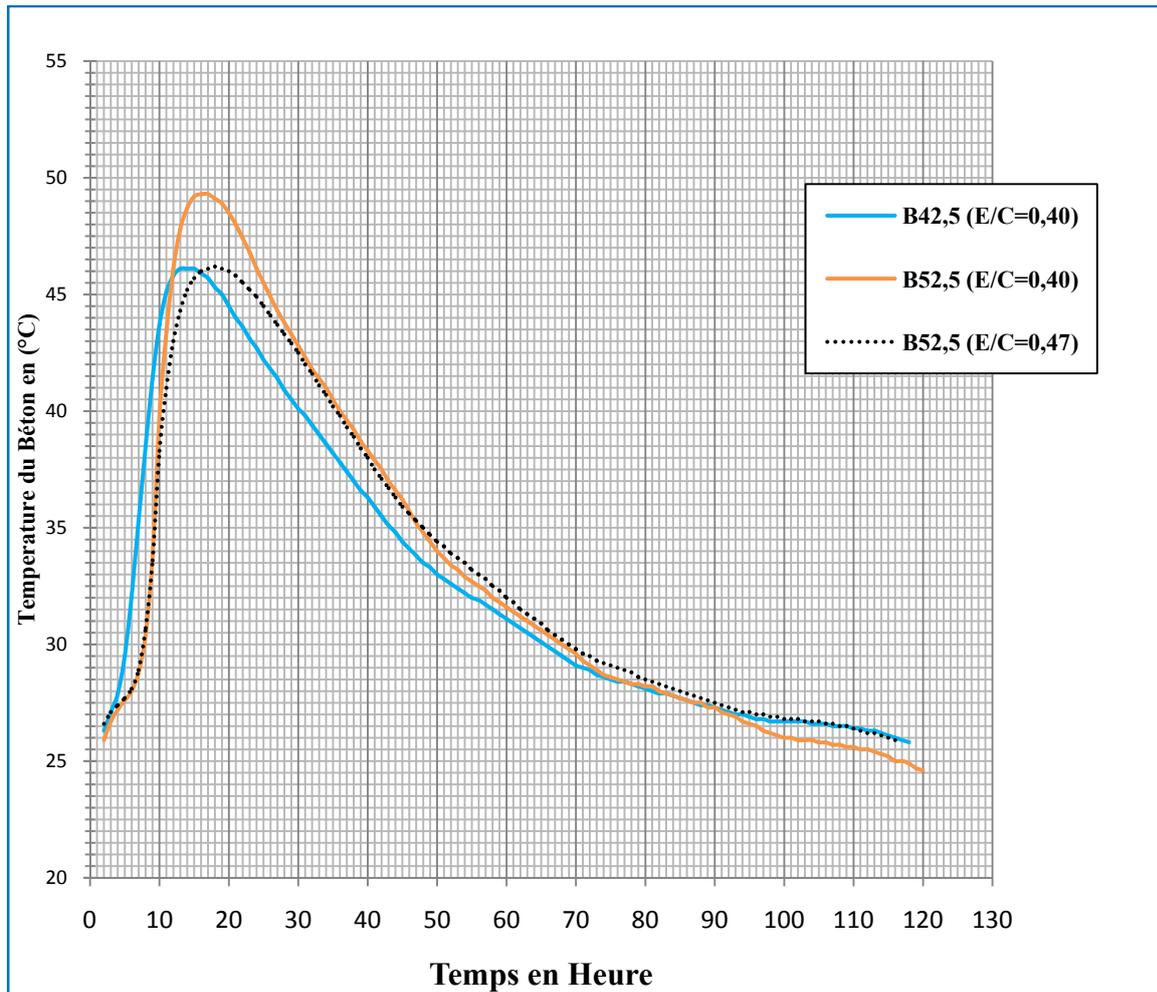


Figure III-14: Représentation graphique de l'évolution de la température au cœur des bétons en fonction du temps.

La température maximale du B52,5(0,40) de 49,3°C atteinte durant la 16^{ième} heure est plus élevée de 3°C que celle atteinte par le B52,5(0,47), soit 46,2°C après la 18^{ième} heure (2 heures d'intervalle entre les deux pics), indiquant des réactions plus importantes se déclenchant plus tôt dans la pâte de ciment du B52,5(0,40) comparé au B52,5(0,47). Cela trouve son explication dans:

- la différence de quantités en eau dans les deux bétons: la quantité d'eau supplémentaire dans le B52,5(0,47) jouant un rôle de refroidisseur;
- La différence de concentration en Superplastifiant TEMPO 12 (1,3% pour le B52,5(0,40) et 1,0% pour le B52,5(0,47)) qui possède un léger effet accélérateur de prise;

La température maximale du B52,5(0,40) est aussi plus élevée de 3°C que celle atteinte par le B42,5(0,40), soit 46,1°C après la 12^{ième} heure, soit 4 heures d'intervalle entre les deux pics, indiquant des réactions qui se déclenchent plus tôt dans la pâte du ciment 42,5 comparé au 52,5; cela peut s'expliquer non seulement par la différence de finesse des deux ciment (une SSB plus élevée pour le 42,5) mais aussi par la quantité de ciment des deux bétons.

Résumé des résultats:

Tableau III-11: Pic de température des bétons.

| Béton | Pic de Température (°C) | Âge (heure) |
|-------------|-------------------------|-------------|
| B42,5(0,40) | 46,1 | 12 |
| B52,5(0,40) | 49,3 | 16 |
| B52,5(0,47) | 46,2 | 18 |

III-3-Comportement Thermomécanique

Nous exploitons le liens qui existe entre la variation de température au coeur des bétons et l'évolution des résistance;

En superposant les résultats obtenus concernant le **BHP B52,5** sur le graphique suivant:

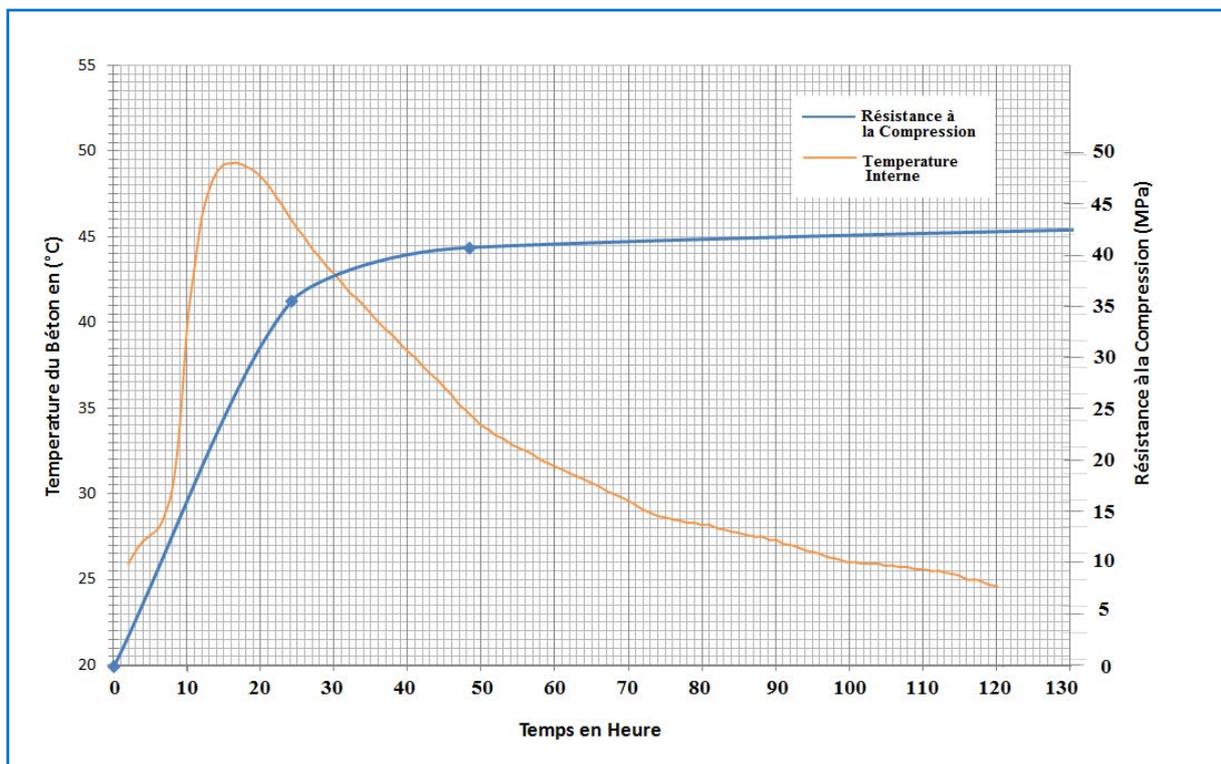


Figure III-15:
Représentation graphique de l'évolution de la Température et de la Résistance du BHP B52,5.

nous remarquons que la pente de l'évolution de la Résistance diminue après le pic de température (49,3°C ; 16H), démontrant le lien entre la température et la résistance (thermoactivité de l'hydratation du ciment). En terme de Résistance, les éléments confectionnés avec le BHP B52,5 peuvent être décoffrés à 24H, les 35 MPa étant dépassés. Mais afin d'éviter un risque de choc thermique entre la

surface du béton et l'air qui pourrait induire un retrait de dessiccation, il est impératif de s'assurer que le gradient thermique air/béton ne soit pas trop important.

Remarque

Les poutres en béton précontraint peuvent être mises en tension à 50% (cables de précontrainte) après décoffrage, et à 100% après 48H. Nous pouvons donc réduire les temps de confection des poutres de 92% du temps théorique (2 jours contre 28 jours) avec le B52,5 que nous recommandons pour les éléments structurels de structure et d'infrastructure.

En superposant les résultats obtenus concernant le **BHP B42,5** sur le graphique suivant:

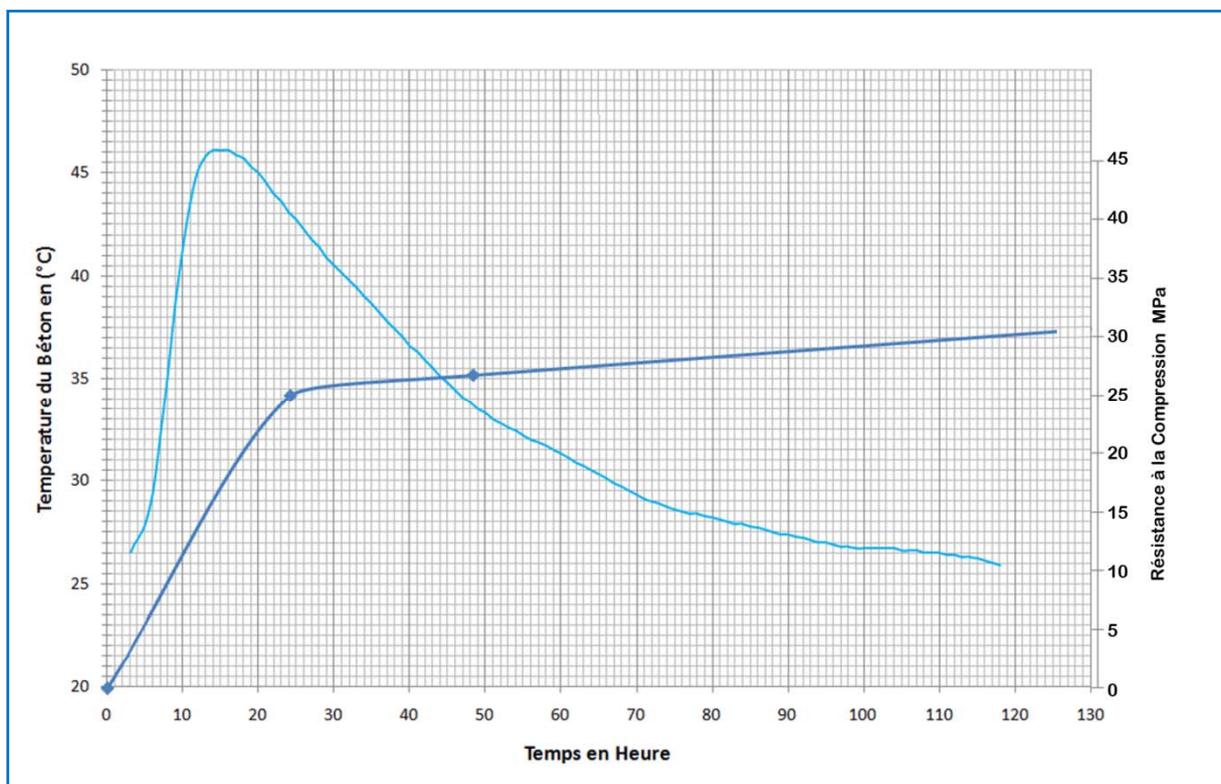


Figure III-16:
Représentation graphique de l'évolution de la Température et de la Résistance du BHP B42,5.

Tout comme pour le BHP B52,5 nous remarquons que la pente de l'évolution de la Résistance diminue après le pic de température (46,1°C ; 12H), démontrant le lien entre la température et la résistance (thermoactivité de l'hydratation du ciment). En terme de Résistance, les éléments confectionnés avec le BHP B42,5 peuvent être décoffrés à 24H, toujours en évitant le risque de choc thermique qui pourrait induire un retrait de dessiccation.

Remarque

La mise en tension des poutres peut se faire à 50% au décoffrage à 24H, mais la mise en tension à 100% ne peut se faire qu'après 10 jours, une fois les 35 MPa dépassé (Figure III-8); nous avons donc réduit les temps de coffection des poutres de 64% du temps théorique (10 jours contre 28 jours) avec le B42,5

Conclusions

- Le fait de diminuer le E/C de 17,5% (bétons B52,5) nous donne un gain en résistance de 50% à 24H.
- Le dosage en ciment Blanc 52,5 de 380 Kg/m³ a donné un béton avec un dégagement de chaleur assez voisin de celui du bétons Blanc 42,5 dosés à 450 Kg/m³, et une résistance à 24H supérieure de plus de 42%. Donc pour une quantité de ciment inférieure de 15%, nous avons obtenus un béton ayant un meilleur comportement thermo-mécanique, qui offre une optimisation de délais de réalisation et un gains possible en terme de nombre de coffrages et d'ouvriers, plus interessant.

Conclusion Générale

Le projet de Master représente une transition entre la formation et la Recherche, l'occasion pour l'Etudiant de faire ses armes en Laboratoire, de mettre en pratique ses connaissances théoriques acquises durant cinq années de formation.

Après considération des attentes faites par l'entreprise de réalisation **E.N.G.O.A**, analyse des données et des hypothèses de calcul concernant le projet du Viaduc V5[1], nous avons procédé en premier lieu, au **CDL-LAFARGE**, à la sélection et à la validation de matériaux afin de formuler des BHP à base de ciments blancs locaux, étudié et comparé leurs performances et comportement thermomécanique, puis analysé les résultats obtenus. Nous en avons tiré des conclusions. À travers le suivi du comportement thermomécanique des BHP nous avons abouti à une optimisation des délais de confection de 92%, une diminution du dosage en ciment de 15%, et des résistances à 24H plus élevées de 42%, tout en assurant les performances attendues d'un bon béton.

Ce mémoire représente le fruit de deux longs mois de travail acharné en laboratoire, de recherches documentées, de réflexion et d'analyse. Ce Projet m'a permis d'acquérir énormément de connaissances et d'approfondir celles acquises auparavant. J'ai eu la chance de côtoyer des acteurs du domaine (Techniciens, Ingénieurs et Chercheurs) et de prendre conscience de la réalité du terrain dans le domaine des matériaux (Recherche, développement et industrie). Ce travail m'a fait comprendre l'importance de la recherche et l'étroite relation qui la lie à l'industrie.

"...Car ce n'est pas assez d'avoir l'esprit bon, mais le principal est de l'appliquer bien"

René DESCARTES
DISCOURS
DE LA MÉTHODE
1637

Annexe

Masse volumique de l'eau

| Température °C | Masse volumique Mg/m ³ |
|-------------------|--------------------------------------|
| 5 | 1,0000 |
| 6 | 0,9999 |
| 7 | 0,9999 |
| 8 | 0,9998 |
| 9 | 0,9998 |
| 10 | 0,9997 |
| 11 | 0,9996 |
| 12 | 0,9995 |
| 13 | 0,9994 |
| 14 | 0,9992 |
| 15 | 0,9991 |
| 16 | 0,9989 |
| 17 | 0,9988 |
| 18 | 0,9986 |
| 19 | 0,9984 |
| 20 | 0,9982 |
| 21 | 0,9980 |
| 22 | 0,9978 |
| 23 | 0,9975 |
| 24 | 0,9973 |
| 25 | 0,9970 |
| 26 | 0,9968 |
| 27 | 0,9965 |
| 28 | 0,9962 |
| 29 | 0,9959 |
| 30 | 0,9956 |

Page 25
EN 1097-6:2000

Références Bibliographiques

- A.BEGRICHE, A.MENASRI (2016). Projet de Fin d'Etude, Conception et Etude du Vidaduc V5 sur le tracé de la pénétrante Autoroutière reliant la ville de Tizi-Ouzou à l'Autoroute Est/Ouest, Ecole Nationale Polytechnique, Algérie. (réf n°1)
- FRIEDBERT KIND-BARAKAUSKAS, BRUNO KAUHSEN, Construire en Béton, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes. (réf n°2)
- www.lafarge.dz/laboratoire-de-developpement-de-la-construction (25/09/2016). (réf n°3)
- CIMbéton Fiche Technique(2013) G11: Les bétons, formulation, fabrication et mise en œuvre, Tome2. (réf n°4)
- CIMbéton Fiche Technique(2005)T41: Bétons et Ouvrages d'art, Tome1. (réf n°5)
- Jean FESTA, Georges DREUX(1998) Nouveau Guide du béton et de ses constituants, EYROLLES, huitième édition.(réf n°6)
- Paul ACKER, Prise et durcissement des béton les effets thermomécaniques, Technique de l'Ingénieur C2 235.(réf n°7)