

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

المركز الجامعي لعين تيموشنت

Centre Universitaire Belhadj Bouchaïbd'Ain Temouchent

Institut de Technologie

Département de Génie Civil



Projet de fin d'études

Pour l'Obtention du Diplôme de Master en :

Filière : Génie Civil

Spécialité : Structures

Thème :

**VALORISATION DE BETON A HAUTE
PERFORMANCE
(ACTIVATION THERMIQUE DE LA POUZZOLANE)**

Présenté par :

M. SAYAH Abderrahim

Devant le Jurys composé de :

Mme . DERBEL Ahlem

C.U.B.B (Ain Temouchent) Encadreur.

Année universitaire 2015/2016

Remerciement

Tout d'abord, nous remercions DIEU le tout puissant de nous avoir donné le courage et la patience de bien mener ce travail, qu'il soit béni et glorifié.

J'à exprimer toute ma gratitude, toute ma reconnaissance et tous mes remerciements a :

M^{eme} A. derbel , pour sa disponibilité permanente et son encouragement constant, la confiance et les conseils judicieux qu'il n'a pas cessé de nous prodiguer toute au long de ce mémoire.

Je remercie aussi M^{elle} KAWTER pour avoir m'aider durant tous les essais et leurs conseils précieux,

J'associe à ces remerciements tous les membres du laboratoire de CVAT, les ingénieurs et les techniciens avec qui j'ai eu le plaisir de travailler.

JE remercie tous les enseignants qui ont contribué à ma formation.

Résumé :

Les travaux effectués dans le cadre de ce mémoire concernent l'étude sur le béton qui reste de nos jours le matériau le plus utilisé dans la construction. Aussi des études et des découvertes n'ont cessé de lui conférer des performances et des aptitudes nouvelles, dans le but de trouver un compromis entre l'ouvrabilité et la résistance. Les soucis des constructeurs sont d'aboutir à des hautes performances ou résistances avec un choix judicieux des matériaux et l'adjonction de nouveaux produits, tels qu'adjuvants et additions fines.

L'objectif principal de notre travail est de connaître bien le béton à hautes performances, et il permet de compléter les études sur la formulation des BHP. La substitution d'un pourcentage du ciment, par des additions fines avec l'utilisation de pouzzolane, permet d'améliorer la résistance mécanique de 21 à 90 jours. Par conséquent sur les performances des bétons utilisés dans la construction des bâtiments et des ouvrages de génie civil.

Mots clés : caractérisation, bétons à hautes performances, résistance mécanique, additions, adjuvants.

Summary:

The work carried out under this memorandum concern the study on concrete that remains today the most widely used in building material. Also studies and discoveries have continued to give it performance and new skills in order to find a compromise between the workability and resistance. The concerns of manufacturers are to achieve high performance or resistors with a careful choice of materials and the addition of new products, such as adjuvant and fine additions.

The main objective of our work is to know well the high performance concrete, and it allows completing studies on the formulation of BHP. The substitution of a percentage of the cement, for fine additions with the use of pozzolan, improves the mechanical strength from 21 to 90 days. Therefore the performance of the concrete used in construction of buildings and civil engineering works.

Keywords: characterization, high performance concretes, mechanical resistance, additives, adjuvants.

ملخص

في إطار انجاز هذه المذكرة الخاصة بدراسة الخرسانة التي ما زالت إلى يومنا المادة الأساسية و الأكثر استعمالا في البناء ، و الدراسات و البحوث المقامة أعطتها الأداء و المهارات الجديدة بهدف البحث عن علاقة بين الصلابة و التشييد ، و إن الاهتمامات الشركات بإعطائها الأداء العالي و الصلابة مع الإختيار الجيد لمواد البناء و زيادة مواد مضافة و مساعدة.

الهدف الأساسي من هذا العمل هو المعرفة الحقيقية للخرسانة عالية الأداء ، يهدف أيضا إلى إتمام البحوث حول الدراسات المنجزة على الخرسانة عالية الأداء ، و نسبة الإسمنت و الإضافات و المواد المساعدة مع استخدام البوزلان يعطي صلابة و قوة ميكانيكية كبيرة من 21 إلى 90 يوم مما أدى إلى تشييد مباني و أعمال هندسية عالية الصلابة.

كلمات البحث: توصيف ، الخرسانة عالية الأداء ، قوة ميكانيكية ، مواد مضافة ، مواد مساعدة.

Sommaire

<i>Introduction Générale</i>	01
<i>Chapitre I : Généralité sur BHP.</i>	
<i>I.Introduction</i>	02
<i>I.1. Historiques et perspectives</i>	02
<i>I.2. Les voies d'obtention des hautes performances</i>	06
<i>A- Défloculation des grains de ciment</i>	06
<i>B- Extension du spectre du mélange granulaire</i>	07
<i>I.3. Principes des BHP</i>	07
<i>I.4. Composition des bétons à hautes performances</i>	07
<i>A- Fumée de silice NF P 18-502</i>	08
<i>B- Pouzzolanes ASTM 618-94</i>	10
<i>C- Matériaux Pouzzolaniques</i>	10
<i>C-1.Pouzzolanes naturelles</i>	10
<i>C-2.Pouzzolane artificielle</i>	10
<i>D- Pouzzolanes et pouzzolanité</i>	11
<i>I.5- Conclusion</i>	12
 <i>ChapitreII : Caractérisation Des matériaux utilisés</i>	
<i>II.1. Introduction</i>	13
<i>II.2. Le ciment NF P 15-301</i>	13
<i>II.3. Caractéristiques des granulats</i>	14
3.1 <i>Essais sur granulats</i>	14
✓ <i>Le sable</i>	14
✓ <i>Détermination de la masse volumique apparente du sable</i>	14
✓ <i>Détermination de la masse volumique absolue</i>	16
✓ <i>Analyse granulométrique de gravier par tamisage</i>	17
✓ <i>Les tamis</i>	17
✓ <i>La pouzzolane</i>	18

✓ Réactivité	20
✓ Détermination de la masse volumique apparente de pouzzolane.....	20
✓ Détermination de la masse volumique de pouzzolane avec pycnomètre.....	22
✓ Essai analyse granulométrique de sable pouzzolanique par vois sèche	23
✓ L'eau de gâchage	24
✓ L'adjuvant	24
- SIKA VISCORETE TEMPO 12	25
- Dosage.....	25
II.4. Caractéristiques des fumées de silice	26
4-1. Mode d'action des fumées de silice dans le béton	26
A/ Effet physique	26
B/ Effet pouzzolanique	26
4.2. Dosage en fumée de silice.....	27
II.5. Conclusion	29

Chapitre III : Les essais et Les résultats :

III. Introduction	30
III.1. préparation des éprouvettes	30
✓ les compositions du béton	30
✓ Préparation des éprouvettes	32
III.2. Essais de la résistance en compression	33
✓ Résistance a la compression.....	33
III.3. Interprétation	35
III.4. Discussions et interprétations	36
III.5. Conclusion et perspective	37

Les Tableaux

Chapitre I : Généralité sur BHP.

Tab.1- Les différentes classes de BHP.....	08
--	----

Chapitre II : Caractérisation Des Matériaux Utilisés.

Tab.2 - Composition chimique du clinker.....	13
--	----

Tab.3 - Composition minéralogique du clinker.....	14
---	----

Tab .4 - propriétés physiques du ciment.....	14
--	----

Tab.5 - Résistance mécaniques du ciment (bars).....	14
---	----

Tab.6- Analyse granulair par tamisage P 18-560.....	18
---	----

Tab.7- : Analyse chimique de la pouzzolane naturelle (N. Belas et col, 2003).....	19
---	----

Tab.8- : Caractéristique physiques de la pouzzolane naturelle.....	20
--	----

Tab.9- : tamisage des granulas pouzzolanique 2.5/8.....	23
---	----

Tab.10- : des caractéristiques chimiques de l'eau.....	24
--	----

Tab.11- : caractéristiques de l'adjuvant.....	25
---	----

Tab.12- - Résultat de l'analyse chimique de la fumée de silice.....	27
---	----

Tab.13 - Caractéristiques physiques de la fumée de silice.....	28
--	----

Chapitre III : Les essais et Les Résultats.

Tab.14- de poids des éprouvettes.....	33
---------------------------------------	----

Tab.15- Résultat d'écrasement de 7 jours.....	34
---	----

Tab.16- Résultat d'écrasement de 14 jours.....	34
--	----

Tab.17- Résultat d'écrasement de 21 jours.....	34
--	----

Tab.18- Résultat d'écrasement de 28 jours.....	35
--	----

Tab.19- Résultat d'écrasement de 60 jours.....	35
--	----

Les Figures

Chapitre I : Généralité sur BHP.

Fig1- Gratte- ciel de la région de Chicago construits avec des bétons à très haute résistance.....	5
Fig 2: Progression de la hauteur des gratte-ciel.....	5
Fig.3 - : type Pouzzolane naturelle.....	10
Fig.4- pouzzolanes rouges calibrées.....	11
Fig.5- Pouzzolane noire.....	11

Chapitre II : Caractérisation Des Matériaux utilisés .

Fig.6- sable pouzzolanique préparé.....	19
Fig.7- : Le Tamis électrique au niveau de laboratoire de [C.U.A.T].....	23
Fig.8- : Courbe granulométrique des sable pouzzolanique.....	24
Fig.9 - : Dosage de l'adjuvant.....	25
Fig.10-Courbe granulométriques des granulats	28

Chapitre III : Les essais et Les Résultat.

Fig.11- malaxeur hobart normalisé pour béton.....	31
Fig.12- : Moules pour éprouvettes de béton(70×70×70mm).....	31
Fig.13- : appareil de chocs.....	32
Fig.14- Bain d'eau pour la conservation des éprouvettes.....	33
Fig.15- : écrasement des éprouvettes en béton a l'âge de j jours.....	34
Fig.16-Résultats de l'évolution de la résistance en compression en fonction du temps du béton...35	

INTRODUCTION GENERALE :

Durant les dernières décennies, plusieurs travaux scientifiques ont été élaborés dans la perspective d'améliorer les propriétés constructives du béton frais et durci. Aussi, des études et des découvertes n'ont cessé de lui conférer des performances et des aptitudes nouvelles dans le but de trouver un compromis entre l'ouvrabilité et la résistance.

Les soucis des constructeurs sont d'aboutir à des hautes performances ou résistances avec un choix judicieux des matériaux et l'adjonction de nouveaux produits, telle qu'adjuvants et additions fines.

Les Bétons à Hautes Performances (BHP) ont d'abord été utilisés pour leur haute résistance. Cette caractéristique facilement mesurable a fait des progrès spectaculaires à partir des années quatre-vingt. Elle est passée de 30/35 MPa à plus de 100 MPa pour les bétons à très hautes performances.

Les gains de résistance ne sont pas les seuls avantages de ces bétons qui tirent leurs propriétés de leur microstructure très dense, d'une forte réduction de leur porosité et d'un réseau capillaire non connecté.

Les BHP ont été d'abord employés pour la réalisation de structures exceptionnelles. Les ouvrages d'art ont constitué, historiquement en France, un domaine d'application privilégié des BHP. Ils ont ensuite, pour les ouvrages exceptionnels, fait leurs preuves sur de nombreuses réalisations. Ils sont utilisés depuis de nombreuses années en préfabrication.

L'objectif de cette étude est d'exposer l'état d'art des BHP, en s'appuyant sur la méthode et la microstructure de BHP

Le premier chapitre de ce mémoire est d'abord consacré à une revue bibliographique portant sur l'historique des bétons à très haute résistance de même que sur les principes généraux de fabrication des BHP et les étapes de développement des BHP. Elle traite ensuite le choix des types et la marque des matériaux utilisés pour confectionner un BHP avec des méthodes d'essais et des normes utilisées lors de notre travail de recherche.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons les caractéristiques physico-chimiques et minéralogiques des matériaux utilisés dans notre travail expérimental ainsi que le mode opératoire de chaque essai effectué sur béton.

Enfin, dans le troisième et dernier chapitre est réservé à l'aspect pratique de notre travail. Dans le premier temps, nous présentons le programme expérimentation que nous avons réalisé ainsi que la démarche suivie pour l'élaboration et la formulation du béton à hautes performances et du béton ordinaire témoin. Dans un second temps, nous présentons les résultats obtenus, qui grâce aux essais effectués sur la résistance à la compression.

Chapitre I

*GENERALITES SUR LES BETONS A HAUTES
PERFORMANCES*

I.Introduction :

On appelle Béton à Hautes Performances (BHP) les bétons hydrauliques ordinaires (Sable + Eau +Graviers +Ciment) auxquels on rajoute des adjuvants (fluidifiant et éventuellement des ultra fines) pour augmenter leur performances, dont la résistance, qui doit dépasser les 60MPa à 28 jours [01]. Cependant, la résistance à la compression élevée n'est pas la seule et la principale propriété des BHP, car plusieurs autres propriétés se trouvent améliorées, telles que la très faible perméabilité donc une durabilité accrue.

Le BHP apporte en outre des avantages multiples par rapport au béton ordinaire citons, à titre d'exemple :

- la maniabilité est accrue sans risque de ségrégation lors de la mise en œuvre.
- la durabilité des structures est améliorée par la forte compacité du béton avec une perméabilité à l'air et à l'eau réduite, une résistance aux agressions et une meilleure résistance à l'alcali -réaction, une plus grande résistance à l'abrasion et une meilleure tenue aux cycles de gel/dégel,
- il permet de concevoir des structures plus minces grâce à l'augmentation des caractéristiques mécaniques (compression, traction, module d'élasticité) tant au jeune âge qu'à terme.

Cependant, les propriétés améliorées des BHP ne peuvent être obtenues que grâce à plusieurs dispositions simultanées concernant :

- les granulats doivent être de bonne qualité, la résistance du béton pouvant être limitée par celle des granulats eux-mêmes,
- l'emploi d'adjuvants spécifiques, notamment des superplastifiant réducteurs d'eau ainsi que des ajouts minéraux tel que la cendre volante, le laitier du haut fourneau, la fumée de silice.... etc.
- l'emploi de ciments de classe élevée à des dosages compris entre 400 et 550 kg/m³.

Ces dernières années ont vu l'utilisation de bétons de résistance en compression de plus en plus élevée pouvant aller de 50MPa jusqu'à 400MPa et même de 800MPa en utilisant des traitements thermiques et mécaniques appropriés et des produits spéciaux comme la poudre métallique [02]. De telles résistances élevées ont donné une nouvelle classification de bétons, ils sont actuellement appelés bétons à haute résistance (BHR), bétons à hautes performances (BHP), bétons à très hautes performances (BTHP), bétons à poudres réactives (BPR), et bétons fibrés ultra performants (BFUP).

1.1.Historiques et perspectives :

Il est obligatoire d'avoir un esprit de pionnier pour se lancer dans le développement des bétons à haute résistance au milieu des années 1960. Pourquoi essayer introduit dans une technique dans le domaine du béton prêt à l'emploi en augmentant la résistance à la compression ?

À cette époque, la plupart des concepteurs étaient tout à fait satisfaits de calculer des structures avec des bétons de 15 à 20MPa. Ces bétons leur étaient bien connus, ils étaient économiques, compétitifs et permettaient de construire des structures de façon sécuritaire.

Au début des années 1960 dans la région de Chicago, les bétons à haute résistance ont, en quelque sorte, vu le jour et ont commencé à être utilisés en quantité non négligeable dans plusieurs structures majeures. Même si la résistance des premiers bétons à hautes résistances qui ont alors été développés peut paraître modeste de nos jours, il faut se rappeler qu'à cette époque les bétons usuels avec lesquels on construisait des structures avaient une résistance à la compression essentiellement comprise entre 15 et 30MPa.

Il faut aussi se souvenir que le ciment et les adjuvants qui étaient disponibles à cette époque n'étaient pas aussi performants que ceux dont on dispose à l'heure actuelle pour fabriquer des BHP. La plupart des ciments commerciaux n'étaient pas broyés aussi finement qu'à l'heure actuelle et surtout les réducteurs d'eau commerciaux utilisés à cette époque étaient essentiellement à base de lignosulfonate et ne permettaient de diminuer la quantité d'eau de gâchage que de 8 à 10 %.

Les premiers bétons à haute résistance ont été développés dans un tel contexte historique. De façon à pouvoir mettre en valeur les qualités des bétons à haute résistance, les concepteurs et les producteurs de béton ont fait appel à un moyen simple et efficace pour convaincre les propriétaires d'utiliser un tel matériau pour lequel on n'avait aucune expérience et sur lequel on avait finalement très peu de données techniques.

En fait, l'augmentation de la résistance à la compression du béton qui avait pu être obtenue était attribuable à la diminution de la valeur du rapport eau/ciment en sélectionnant des réducteurs d'eau un peu plus efficace que la majorité des produits commerciaux disponibles à cette époque. En outre, dans cette recherche visant à diminuer le rapport eau/liant vers des valeurs comprises entre 0.35 et 0.40, on a commencé à s'apercevoir que le choix du ciment était aussi critique. Le ciment choisi devait bien performer, non seulement d'un point de vue mécanique, mais aussi d'un point de vue rhéologique. Les premiers ciments utilisés pour fabriquer des bétons à haute résistance étaient des ciments de type I ou de type II ASTM ou des ciments qualifiés comme Type II modifiés.

De façon à diminuer le plus possible le rapport eau/liant, le dosage en réducteur d'eau était augmenté le plus possible par rapport aux dosages qui étaient normalement utilisés dans des bétons ayant des résistances à la compression de 20 ou 30MPa. Cependant, le dosage en réducteur d'eau ne pouvait être augmenté de beaucoup, car, à ce moment-là, très vite cette augmentation du dosage en réducteur d'eau se traduisait par un retard de prise significatif ou par une quantité d'air entraînée excessive qui, évidemment, diminuait la résistance finale du béton. Les bétons à haute résistance étaient utilisés uniquement dans des applications intérieures.

Comme on vient de le voir, le moteur principal du développement des bétons à hautes résistances en Amérique du Nord (figure 1) a été essentiellement économique, dans le domaine des bâtiments de grande hauteur et porté par des producteurs de béton et des entrepreneurs.

Le contexte est en effet très différent en Europe et plus particulièrement :

- Il y a peu de bâtiments de grande hauteur et leur structure est traditionnellement en béton.
- La séparation historique depuis le XVII^e siècle entre les métiers d'ingénieurs et d'architectes a conduit insensiblement ces derniers à délaisser la science des matériaux et des structures.

- On a ainsi vu en France, au cours du XXe siècle le développement du béton précontraint, des ponts à encorbellement avec division matériaux et structures pour ouvrage d'art à joints conjugués, des ouvrages haubanés, de la construction mixte, du passage sous l'impulsion des directions techniques des entreprises et en étroite collaboration avec l'administration française.

Ainsi, l'apparition et le développement des BHP en France se sont essentiellement déroulés au sein du génie civil dans le domaine des ponts et autour de deux entités pionnières :

- L'administration de l'Equipement sous la férule du Laboratoire Centrale des Ponts et Chaussées avec la réalisation d'un premier ouvrage d'art en 1984 dans la région de Melun au sud de Paris. Il est remarquable de noter, que dans la communication relative à cette expérience, on trouve pour la première fois sous la plume de Yves MALIER, alors responsable de la division matériaux et structures pour ouvrages d'art au LCPC, l'appellation « bétons à haute performances » au lieu de « haute résistance ».
- L'entreprise Bouygues, sous l'impulsion de son directeur scientifique de l'époque, Pierre Richard, avec la réalisation d'un plot d'essai sur la dalle du viaduc SNCF de l'A.86 dans la région parisienne en 1984, puis du pont de l'île de Ré et de l'arche de la défense de 1985 à 1987.

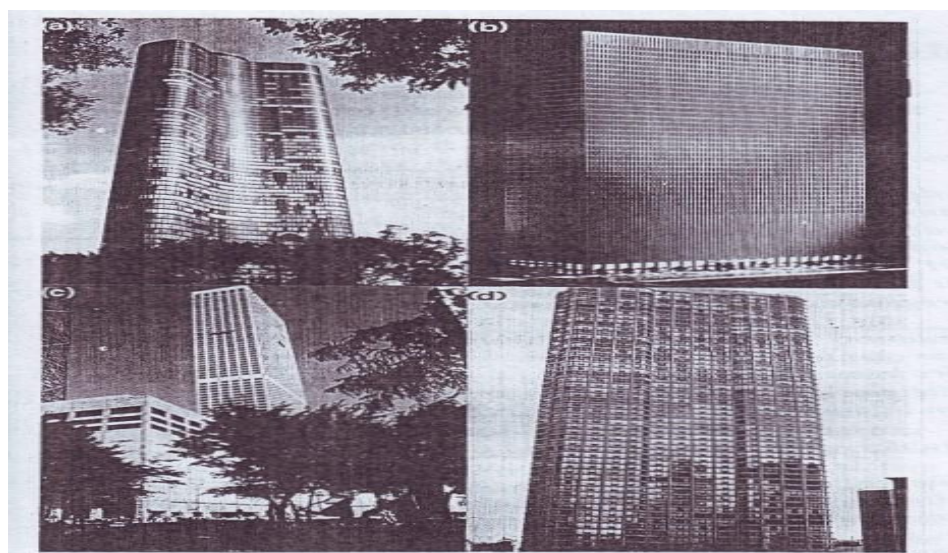
À ce stade, une part importante de la recherche et développement dans le domaine des BHP s'est fédérée autour des Projets Nationaux

- le projet national «Voies nouvelles du matériau béton» ;
- puis le projet national «BHP».

Parmi les nombreux apports de ces structures, on peut distinguer :

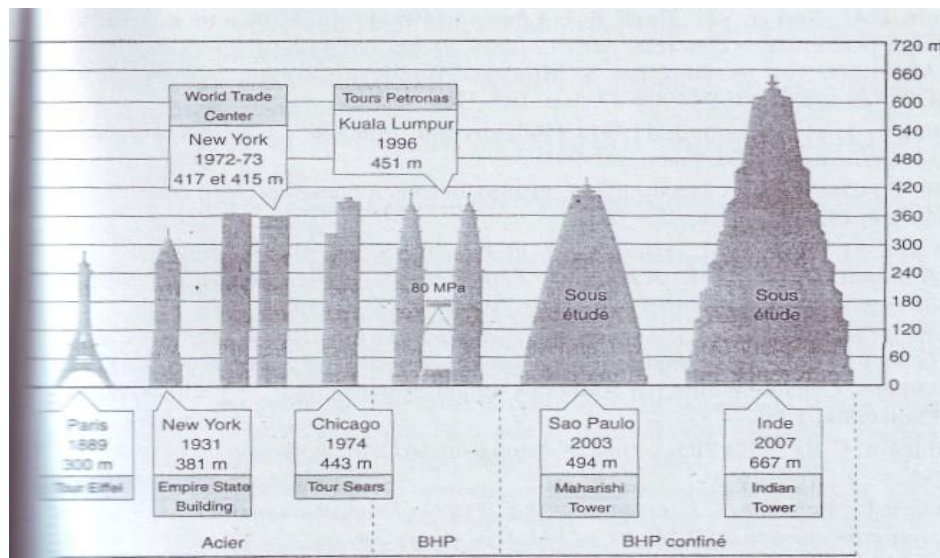
- l'évolution des règlements de calcul BAEL et BPEL avec une première extension aux B60 en 1994 puis aux B80 en 1999. Cette dernière reposant sur un important travail scientifique en particulier au niveau de retrait et du fluage.

Fig1- Gratte- ciel de la région de Chicago construits avec des bétons à très haute résistance



Des gratte-ciel peuvent être construits sur des sols qui ont une capacité portante marginale, des piliers et des tabliers de pont peuvent être conçus avec des BHP pour construire des ponts qui sont plus élancés et plus élégants et qui peuvent s'harmoniser beaucoup plus avec le paysage (figure 3).

Fig2 : Progression de la hauteur des gratte-ciel.



Bien sûr, les bétons à haute performance ne sont pas un remède universel qui ralentit le développement de tous les autres types de bétons. Le béton à haute performance a ses limites, mais c'est un béton durable qui permettra aux concepteurs et aux architectes de dépasser les limites du béton actuel. Parallèlement à ces développements dans le domaine des BHP, nous avons pu voir récemment d'autres bétons de pointe se tailler des marchés de niche tels le béton renforcé de fibres, le béton auto plaçant, le béton coulé sous l'eau, le béton à haute performance compacté au rouleau et le béton de poudres réactives.

Tous ces bétons sont conçus pour des marchés qui sont restreints mais rentables, où la compétition est limitée. Il est évident que cette courte liste de bétons spéciaux n'est pas complète et qu'elle s'allongera très rapidement avec le temps car il sera de plus en plus intéressant d'offrir aux propriétaires et aux entrepreneurs des solutions plus élégantes, plus économiques, plus durables et finalement plus rentables que celles où l'on utilise un béton de 20 à 30MPa.

Chose intéressante, on découvre parfois que ces bétons intelligents pourraient fournir des avantages additionnels que ceux pour lesquels ils ont été initialement conçus. Par exemple, l'on peut citer le cas du béton autoplaçant qui a été développé au Japon afin de faciliter la mise en place du béton dans des éléments structuraux congestionnés et qui maintenant commence à être utilisé comme « béton silencieux » ou béton « sans bruit ».

L'aperçu historique rappelé ci-dessus a mis en évidence l'intérêt de perfectionner le béton qui s'est caractérisé par l'appellation BHP.

Dans ce contexte, nous rappellerons de la paragraphe suivant les principales caractéristiques des BHP.

1.2. Les voies d'obtention des hautes performances :

Les études ont montré les effets néfastes pour la résistance et la durabilité des excès d'eau non hydratée mais nécessaire à la maniabilité et la mise en oeuvre. Il était donc nécessaire de chercher à réduire raisonnablement ce dosage en eau en introduisant des fluidifiants.

En parallèle les chercheurs voulaient du béton une roche massive et compacte en incorporant des ultratynes .

Ainsi deux voies se constituèrent pour obtenir les hautes performances.

A- Défloculation des grains de ciment :

Obtenue grâce à l'emploi de produits organiques (condensés de formaldéhyde et mélanine sulfonate). Elle permet aux grains en suspension dans l'eau de retrouver leur granularité originelle donc à une réduction sensible de l'eau qui n'est plus bloquée dans les flots de grains.

B- Extension du spectre du mélange granulaire:

Obtenue en introduisant des éléments ultrafins (fumée de silice ; fillers calcaires ; pouzzolane ; laitier) chimiquement réactifs, qui remplissent les vides pour augmenter la compacité et la rhéologie du béton.

Du point de vue applicabilité avec des matériaux locaux, on peut obtenir des bétons ayant une résistance atteignant à la compression entre 60 et 80 MPa. Avec d'autres approches plus strictes et avec un bon choix de matériaux (ciments et granulats de qualités exceptionnelles, adjonction de polymères,...), on peut atteindre des performances dépassant 90 MPa.

1.3. Principes des BHP :

Il faut admettre que pendant longtemps les progrès réalisés dans le domaine des BHP ont été plutôt le fruit d'une approche empirique que d'une approche fondamentale et scientifique.

Cependant, à l'heure actuelle, on peut quand même expliquer les meilleures performances des BHP en se basant sur des principes scientifiques établis, bien qu'il ne soit pas toujours possible d'expliquer toutes les propriétés des BHP dans leurs moindres détails.

En fait, tant et aussi longtemps que les BHP seront fabriqués avec des matériaux aussi simples et peu coûteux que ceux que l'on utilise pour faire des bétons usuels, il n'est pas évident qu'une recette magique simple puisse donner directement la composition optimale d'un BHP donné. Il faudra donc toujours, en un endroit donné, rechercher la meilleure combinaison de matériaux locaux pour obtenir un BHP ayant un rapport eau/ciment désiré.

Comme on le verra, fabriquer un BHP est une opération un peu plus compliquée que de produire un béton usuel. Les raisons en sont simples : au fur et à mesure que la résistance à la compression visée augmente, les propriétés du béton ne sont plus simplement reliées au rapport eau/liant, le paramètre fondamentale qui gouverne les propriétés des bétons usuels par l'intermédiaire de la porosité de la pâte de ciment hydraté.

1.4. Composition des bétons à hautes performances :

Pour un béton ordinaire, le problème de la composition consiste à réaliser un mélange le plus compact possible ayant une maniabilité acceptable et un coût inférieur, ce qui conduit en générale à limiter le dosage en ciment, composant le plus cher. Pour les BHP, investissement n'est pas vraiment le même.

L'objectif est de confectionner un béton avec une résistance à la compression supérieur accompagné d'une amélioration remarquable dans le comportement du béton, aussi bien à l'état frais, qu'à long terme.

Alors le dosage en ultrafine qui implique un dosage de superplastifiants représente un facteur très important.

On utilise généralement des ciments Portland de bonne qualité, mais non forcément de haute résistance pour la confection des BHP. La finesse n'a pas besoin d'être très grande étant donné que la granulométrie sera de toute façon complétée par celle de l'ultrafine. Le dosage en ciment varie entre 350 et 550 kg/m³, suivant la résistance recherchée.

De même le dosage en fumée de silice varie de 5 à 15%, par rapport au ciment selon les disponibilités locales.

Pour les superplastifiants, on utilise un dosage entre 1 et 3 % par rapport à la masse de ciment.

On est conduit à les mettre en œuvres en deux fois, une première dose dans l'eau de gâchage afin d'assurer le rôle de séparation des grains, et une deuxième dose après l'ensemble des constituants, pour permettre la fluidification du mélange.

Les BHP sont divisés en cinq grandes catégories correspondant chacune à une plage de résistance de 25MPa. La classe I représente les BHP qui ont une résistance comprise entre 50 et 75MPa, la classe II, une résistance comprise entre 75 et 100MPa, la classe III, une résistance comprise entre 100 et 125MPa, la classe IV, une résistance comprise entre 125 et

150 MPa et la classe V, une résistance supérieure à 150MPa (tableau.1).

Les deux dernières classes correspondent en France aux bétons à très hautes performances.

Tab.1- Les différentes classes de BHP

Résistance à la compression	50	75	100	125	150
Classe des BHP	Classe I	Classe II	Classe III	Classe VI	Classe V

A- Fumée de silice NF P 18-502 :

La fumée de silice est une nouvelle venue parmi les liants hydrauliques. À l'origine, elle a été présentée comme une pouzzolane. Cependant, son action dans le béton n'est pas seulement celle d'une pouzzolane très réactive. Ajoutons cependant que la fumée de silice est un matériau peu économique.

La fumée de silice est aussi appelée microsilice ou fumée de silice condensée, mais le terme «fumée de silice » est le plus généralement utilisé.

Les très petites particules de fumée de silice peuvent combler l'espace entre les grains de ciment, ce qui améliore le remplissage des vides.

L'adjonction de fumée de silice ne se traduit par une augmentation de la résistance que pour des valeurs de FS/C inférieur à 26%. En effet, pour s'hydrater, la fumée de silice a besoin de la chaux dégagée par le clinker au cours de son hydratation ; plus il y a de fumée de silice et moins il y a de clinker donc moins de chaux.

Si l'on mélange la fumée de silice avec un ciment qui n'est pas du **CPA**, mais un **CPJ** faiblement dosé en clinker, l'effet pouzzolaniques s'en ressentira car le dégagement de chaux sera plus faible.

Pratiquement, l'utilisation des fumées de silice dans le but d'obtenir des résistances élevées doit donc se faire en les associant avec des CPA-CEM I sans dépasser le rapport FS/C = 18% ; même si l'effet granulaire de la fumée se fait sentir jusqu'à des valeurs de FS/C de l'ordre de 33%.

Au-delà de ce pourcentage, les avantages espérés risquent d'être moindres voir même des difficultés de mise en oeuvre. Propose un dosage optimal compris entre 6 et 10%.

Il faut signaler que l'utilisation de la fumée de silice nécessite obligatoirement l'ajout d'un superplastifiant qui aura comme fonction la défloculation des grains de ciment et des particules de la fumée de silice.

Sans superplastifiant, l'ajout de la fumée de silice au béton conduit pour une même maniabilité à une augmentation de la demande en eau. Car les ions de calcium Ca^{+2} libérés lors de l'hydratation du ciment, ancrent les particules de fumée de silice entre elles et forment une structure rigide s'apparentant à un gel ; cette structure diminue fortement la maniabilité du béton.

B- Pouzzolanes ASTM 618-94 :

Les pouzzolanes naturelles sont des produits généralement d'origine volcanique, ou des roches sédimentaires.

Est un matériau d'origine naturelle ou artificielle contenant de la silice sous forme réactive. Une définition plus explicite est donnée par la norme d'ASTM 618-94 a qui décrit une pouzzolane comme un matériau siliceux ou silico-alumineux qui, intrinsèquement, possède peu ou pas de valeur hydraulique, mais qui, finement broyée en pré-sence d'humidité et à des températures ordinaires, réagit chimiquement avec l'hydroxyde de calcium pour former des composés possédant des propriétés hydrauliques.

Le principal matériau pouzzolanique artificiel, les cendres volantes, sera examiné plus loin.

La norme ASTM C 618-94a décrit ces matériaux comme appartenant à la classe N 07 .

Les avantages du remplacement partiel du ciment par les matériaux pouzzolaniques sont divers :

- Ils participent au renforcement de la résistance aux attaques chimiques,
- en renforcement l'imperméabilité et de la durabilité du mortier,
- à la réduction des réactions alcalins agrégats et du retrait du mortier au séchage.

Ils permettent la réduction de la quantité de clinker utilisée dans la composition du ciment.

C- Matériaux Pouzzolaniques :

Matières siliceuses ou alumino-siliceuses naturelles d'origine volcanique ou artificielle. On distingue entre :

- Pouzzolanes naturelles (d'origine volcanique) désignation abrégée : P
- Pouzzolanes naturelles calcinées (matériaux traités thermiquement) désignation abrégée: Q

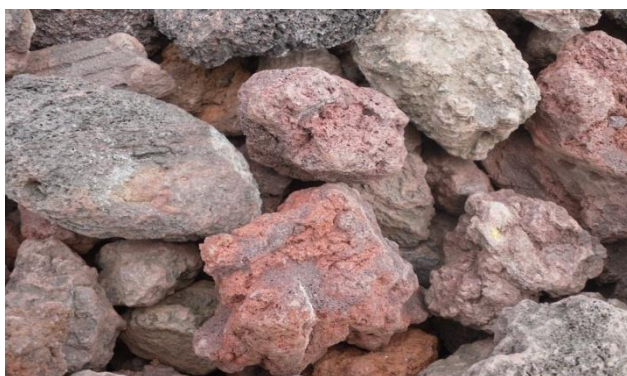


Fig.3- : type Pouzzolane naturelle

C-1. Pouzzolanes naturelles:

Les pouzzolanes naturelles sont des matériaux d'origine naturelle qui peuvent avoir été calcinées dans un four ou transformées, puis broyées pour obtenir une fine poudre.

Les variétés de pouzzolanes naturelles les plus fréquemment utilisées en Amérique du Nord à l'heure actuelle comprennent l'argile calcinée, le schiste calciné et le métakaolin.

Les pouzzolanes naturelles, y compris le métakaolin, doivent satisfaire aux exigences de la norme CSA A 3001, Liants utilisés dans le béton.

C-2. Pouzzolane artificielle :

Toute matière essentiellement composée de silice et d'oxyde de fer ayant subi un traitement thermique pour lui assurer des propriétés pouzzolaniques.

Egalement à la formation d'hydrates stables sont réputés avoir des propriétés pouzzolaniques.

D- Pouzzolanes et pouzzolanité:

L'étude de la Gravenne de Thueyts offre l'occasion de se pencher sur la pouzzolane en tant que matériau (Fig4 et fig5)

En France le terme pouzzolane concerne soit des scories volcaniques de composition basaltique ou proche, soit des matériaux ayant des propriétés dites «pouzzolaniques» et pouvant avoir des origines très diverses. Ainsi, la définition suivante : «Les pouzzolanes de Pozzuoli (Italie Centrale), sont des cendres trachytiques claires et friables, qui sont susceptibles d'être utilisées comme ciment naturel». La pouzzolane est généralement rouge ou noire.



Fig.4- pouzzolanes rouges calibrées



Fig.5- Pouzzolane noire

Les pouzzolanes sont des matières naturelles ou artificielles qui, ajoutées à du ciment, donnent un produit de qualité supérieure pour un prix généralement très bas de propriétés de prise mais qui, finement divisée et en présence de chaux, réagit avec l'hydroxyde de chaux à la température ordinaire pour former un composé ayant les propriétés d'un ciment».

1.5- Conclusion :

Bien que les différentes caractéristiques des BHP offrent plusieurs avantages par rapport aux bétons usuels, il y a encore place à l'amélioration, les BHP, comme tous les autres matériaux, ont encore des points faibles.

En outre, il existe et il va toujours exister de nombreux cas où un béton de 20 à 30 MPa sera le béton idéal pour répondre à des besoins particuliers : le développement des BHP n'éliminera pas l'utilisation des bétons usuels.

Avantages d'utilisation des BHP pour un propriétaire

L'objectif final pour un propriétaire est d'avoir un retour maximal sur son investissement durant toute la durée de vie d'une construction.

Dans la plupart des cas, la nature du matériau utilisé pour construire une structure a peu d'intérêt pour le propriétaire en étant que ce matériau satisfasse les exigences fonctionnelles qu'il s'est fixé et cela à un prix acceptable.

Par contre, certaines exigences économiques des propriétaires peuvent influencer fortement le choix final d'un matériau structural.

Avantages d'utilisation des BHP pour un concepteur

Le BHP n'a pas été toujours sélectionné pour sa résistance à la compression. Parfois, les concepteurs l'utilisent pour son module élastique très élevé, pour sa grande durabilité ou sa meilleure imperméabilité ou pour toute combinaison de plusieurs de ces facteurs.

Avantages d'utilisation des BHP pour un entrepreneur

Dans certains projets, l'entrepreneur a la possibilité d'offrir des solutions alternatives et il peut recommander d'utiliser un matériau qui, selon son expérience, est plus économique.

Avantages d'utilisation des BHP pour l'environnement

Chaque fois que l'on utilise le BHP à la place d'un béton usuel, il est facile de démontrer que l'on utilise de façon beaucoup plus efficace le pouvoir liant du ciment Portland.

Le rapport eau/ciment élevé des bétons usuels conduit à fabriquer un matériau poreux ayant une microstructure et une durabilité particulièrement faible.

Puisque la production du ciment Portland consomme beaucoup d'énergie et dégage pratiquement autant de CO₂ que de ciment produit, fabriquer et utiliser un béton de rapport eau/ciment élevé est un geste de gaspillage d'une matière première à très haut contenu énergétique.

Chapitre II

Caractérisation des Matériaux Utilisés

II.1. Introduction :

Les propriétés et les caractéristiques des matériaux de construction déterminent le domaine de leur application. Ce n'est qu'en évaluant ou en mesurant exactement les qualités et les caractéristiques les plus importantes, que nous pourrions confectionner des bétons qui nous permettent de construire des édifices et ouvrage solides, durables et haute efficacité économique et technique. Toutes les caractéristiques des matériaux de construction, d'après l'ensemble de leurs indices, sont divisées en caractéristiques physiques, chimiques pu mécaniques.

Les caractéristiques de chaque composant de ces constituants, la démarche adoptée ainsi que la méthodologie d'essais et le mode opératoire sont présentés.

II.2. Le ciment NF P 15-301:

Le ciment que nous avons utilisé pour l'exécution de tous les travaux expérimentaux est un ciment Portland de Classe CPJ/CEMII/42.5 fabriqué à l'usine de BENI SAF conformes à la norme NF P 15-301 norme Algérienne NA 442 équivalant au CEM II ENV. 197.

Les différentes caractéristiques que ce soit Chimiques, physiques ou mécaniques du ciment utilisé sont établies sur des fiches techniques élaborées au niveau des laboratoires Les différentes caractéristiques sont présentées dans les tableaux suivants. Nous notons que toutes les caractéristiques du ciment CPJ/CEMII/42.5 manipulé répondent aux normes.

Toute la quantité de ciment utilisée lors des séries d'expérimentation a fait l'objet d'une seule commande et conservé dans un milieu sec et à l'abri des écarts de température.

Composition chimique du clinker											
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	chlorures	CaO libre	résidus solubles	P.A.F
27,83	6,21	3,12	57,22	0,94	2,02	/	/	0,00	0,88	2,28	41

Tab. 2 - Composition chimique du clinker.

Composition minéralogique du clinker		
Éléments	Abréviation	Teneur (%)
Silicate tri calcique	C ₃ S	56,60
Silicate bi calcique	C ₂ S	22,98
Aluminate tricalcique	C ₃ A	9,87
Alumino-ferrite tetracalcique	C ₄ AF	8,25

Tab.3 - Composition minéralogique du clinker

propriétés physiques du ciment					
Temps de prise TD		Expansion le CHATELIER (E)		Surface spécifique (BLAINE)	Consistance normale
Début T _i	Fin T _f	à chaud	froid		
2h 50min	4h 06min	2,90	1,65	3891	26,91

Tab .4 - propriétés physiques du ciment.

Résistance mécanique du ciment (bars)			
Essais	Age		
	2jours	7jours	28jours
Compression	143,2	266,4	433,1
Flexion	35,7	58,3	77,9

Tab.5 - Résistance mécaniques du ciment (bars).

II.3. Caractéristiques des granulats :

3.1 Essais sur granulats :

- **Le sable :**

Le **sable** est un matériau granulaire constitué de petites particules provenant de la désagrégation d'autres roches dont la dimension est comprise entre 0,063 (limon) et 2 mm (gravier) selon la définition des matériaux granulaires en géologie. Sa composition peut révéler jusqu'à 180 minéraux différents (quartz, micas, feldspaths) ainsi que des débris calcaires de coquillage et de corail.

- **Détermination de la masse volumique apparente du sable:**

But de l'essai

Cette manipulation a pour but de déterminer la masse volumique du sable avec la méthode d'un récipient jaugé, et pour plus de précision dans notre calcul de cette masse volumique, nous effectuerons les essais trois fois de suite.

Principe de l'essai:

On remplit un récipient dont on connaît le volume, en prenant de grandes précautions pour éviter les phénomènes parasites provoqués par le tassement.

On pèse ensuite l'échantillon en prenant soin de déduire la masse du récipient.

la masse de l'échantillon est divisée par le volume du récipient pour donner la masse volumique apparente du matériau

$$Mv_{app} = M/V$$

Mv_{app} = masse volumique apparente en g/cm³

M = masse du matériau étudié en g

V = volume du récipient en cm³

Matériel utilisé :

- Récipient jaugé d'un volume de 1L .
- Entonnoir.
- Balance mécanique.
- Sable .
- Règle à raser.

Mode opératoire :

On pèse le récipient vide.

On remplit le récipient avec le sable à raz bord, On s'aidera de l'entonnoir pour verser le granulat sans déborder, il est muni d'une sorte de vanne pour maîtriser le débit de granulat qu'on verse.

Avec la règle à raser, on arase de sorte à remplir exactement le récipient de 1L.

On pèse l'ensemble : récipient+sable.

Récipient vide	récipient+sable.		
1395.17 g	M1	M2	M3
	2922.74 g	2913.38 g	2317.52 g

Résultats de l'essai :

$$Mv_{app} = \frac{(M1+M2+M3)}{3} \cdot \frac{1}{V}$$

$$Mv_{app} = \frac{(2922,74 + 2917,52 + 2913,38)}{3}$$

$$Mv_{app} = 2917,08 \text{ g/cm}^3$$

- Détermination de la masse volumique absolue :

But de l'essai :

Cette manipulation a pour but de déterminer la masse volumique du sable avec la méthode de l'éprouvette graduée.

Matériel utilisé :

Pour se faire nous utiliserons le matériel suivant :

- Une éprouvette graduée.
- Une poignée environ de sable que l'on veut déterminer la masse volumique.
- De l'eau.
- Une balance électronique pour peser

Mode opératoire :

On procédera comme suit :

On prend l'éprouvette graduée et on la remplit d'eau,

on pèsera le tout : éprouvette + eau

ensuite, on prend une poignée de sable et on le met dans l'éprouvette.

On pèsera le tout : éprouvette + eau + sable .

Volume		Masse	
V1	210 ml	M1	426,6 g
V2	330ml	M2	726,2 g
V	120ml	Ma	419,6 g

V1 = volume d'eau.

V2 = volume d'eau + sable.

V = volume d'eau déplacée.

M1 = masse volumique d'éprouvette + eau.

M2 = masse volumique d'éprouvette + eau + sable.

M = masse volumique absolue de sable.

Résultats de l'essai :

$$Ma = \rho * V + (M2 - M1)$$

$$V = V2 - V1$$

$$V = 330 - 210 = 120\text{ml}$$

$$Ma = 1 * 120 + (726,2 - 426,6)$$

$$Ma = 419.6\text{g}$$

- **Analyse granulométrique de gravier par tamisage :**

La granularité d'un matériau est mesurée par un essai en laboratoire, l'analyse granulométrique. Celui-ci consiste à classer les différents grains d'un échantillon en utilisant une série de tamis ou passoire, emboîtés les uns sur les autres, dont les ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas.

L'échantillon étant placé au sommet, la pile de tamis est vibrée. Les matériaux restant dans chaque tamis (refus) sont pesés puis convertis en %. Une courbe est tracée, c'est la courbe granulométrique.

Les conditions manipulations sont décrites par la norme NF EN 933 – 1. Elle concerne les granulats du diamètre > 100 micromètre (0.001mm).

But global :

La résistance du béton dépend du dosage en ciment et de la qualité du ciment. Mais, elle dépend également de sa compacité, c'est-à-dire de la proportion de matière que contient le béton.

« Le gravier constitue la structure du béton, c'est lui qui supporte et répartie les charges. Le sable s'intercale entre les grains de gravier pour transmettre et répartir les charges entre ces grains de gravier. Le ciment en réagissant avec l'eau se cristallise pour lier l'ensemble ».

Mais il a également des vides d'air entre ses constituants. L'air ne résiste pas aux forces. L'idée consiste donc à réaliser un béton avec le moins de vide possible. Il faut donc, réaliser un béton qui comporte le plus de matière solide possible, c'est-à-dire un béton compact.

Les tamis :

Constitué d'une toile métallique ou d'une tôle perforée définissant des mailles de trous carrés. La taille des mailles est normalisée. Cette taille correspond aux termes d'une suite géométrique de raison 1.259.

Les tamis sont également repérés par un numéro d'ordre appelé « module », selon une progression arithmétique de raison 1.

ouverture en mm	de tamis vide	tamis + gravier	refus cumulé en (g)
10	1766 g	2167 g	401 g
08	1543 g	2023 g	480 g
05	1538 g	2380 g	842 g
04	1543 g	1796 g	253 g
02	1363 g	1387 g	24 g
01	1169 g	1175 g	6 g
Fond	1731 g	1733 g	2 g

Tab.6- Analyse granulaire par tamisage P 18-560

Mode opératoire :

Il faut que l'échantillon analysé soit en quantité suffisante pour être mesurable et pas trop importante pour éviter de saturer les tamis.

En pratique un échantillon de masse 2kg fonctionne bien. Il est essentiel que l'échantillon soit sec (température de 105° maximum).

Empiler la série de tamis suivant leur module croissant.

- Placer un récipient à fond plein (appelé fond étanche) sous le dernier module.
- Fixer la série constituée sur le cadre vibrant.
- Tamiser par vibration pendant 2 minutes.
- Peser les quantités de granulat refus retenues dans chaque module

- **La pouzzolane :**

La pouzzolane naturelle utilisée d'origine volcanique est extraite du gisement de Bouhamidi situé à 2,5 km de Béni-Saf, dans l'ouest algérien. Ce gisement se présente sous forme d'une montagne appelée El-Kalcoul dont la côte absolue est de 236m (N. Belas et col, 2003). Cette pouzzolane se trouve en quantités considérables et mérite d'être valorisée.

La pouzzolane est broyée et criblée afin d'obtenir les étendues granulaires utilisées dans la présente recherche, à savoir un sable concassé 0/3, et gravier 3/8 ., le tableau 1 montre l'analyse chimique de la pouzzolane, tandis que le tableau 2 regroupe les caractéristiques physiques des granulats pouzzolaniques.



Fig.6- sable pouzzolanique préparé

Composants	Symbole	Teneurs en %
La silice	SiO₂	45,67
L'alumine	Al₂O₃	15,10
L'oxyde de fer	Fe₂O₃	10,14
La chaux	CaO	8,98

La magnésie	MgO	3,45
Les sulfates	SO₃	0,19
Les chlores	C₁	Nul
des de potassium	K₂O	0,4
des de sodium	Na₂O	0,68

Tab.7- : Analyse chimique de la pouzzolane naturelle (N. Belas et col, 2003)

Caractéristiques	Valeurs
Masse volumique absolue (g/cm ³)	2,22
Porosité (%)	57,1
Absorption (%)	32
humidité(%)	2,5
Pouzzolanité (%)	85

Tab.8- : Caractéristique physiques de la pouzzolane naturelle

✓ **Réactivité :**

c'est l'aspect chimique de la fixation de la chaux alors que l'activité pouzzolanique s'intéresse à l'aspect mécanique qui se traduit par l'évaluation de la résistance. Généralement les pouzzolanes se divisent en trois catégories :

- Constituants actifs : phase vitreuse plus ou moins altérée ;
 - Constituants inertes : phase cristallisée ;
 - Constituants nocifs : substances organiques et argiles gonflantes
- la réactivité des pouzzolanes est fonction de plusieurs facteurs :
- composition chimique et minéralogique;
 - état de division ;
 - structure et état de surface ;

dans les ciments pouzzolaniques l'activité est expliquée par une attaque lente de la silice et de l'alumine des pouzzolanes par l'hydroxyde de chaux formée, lors de l'hydratation.

Les tests chimiques basés sur la quantité de chaux absorbée ou sur la vitesse de fixation des silicates et d'aluminates de chaux hydratés ne suffisent pas à déterminer la réactivité pouzzolanique. En outre la connaissance séparée des propriétés de chacun des constituants ne permet pas de prévoir le comportement du mélange. Vu sa complexité seuls les résultats des essais mécaniques peuvent nous renseigner d'une façon adéquate sur l'évolution des résistances dans le temps.

La pouzzolane comme ajout dans le ciment peut contribuer à l'amélioration de la résistance, car elle renferme des oxydes actifs (SiO₂ Al₂O₃ Fe₂O₃) permettant la formation des silicates et aluminates.

- **Détermination de la masse volumique apparente de pouzzolane :**

But de l'essai

Cette manipulation a pour but de déterminer la masse volumique du pouzzolane avec la méthode d'un récipient jaugé, et pour plus de précision dans notre calcul de cette masse volumique, nous effectuerons les essais trois fois de suite .

Principe de l'essai:

On remplit un récipient dont on connaît le volume, en prenant de grandes précautions pour éviter les phénomènes parasites provoqués par le tassement.

On pèse ensuite l'échantillon en prenant soin de déduire la masse du récipient.

la masse de l'échantillon est divisée par le volume du récipient pour donner la masse volumique apparente du matériau

$$Mv_{app} = M/V$$

Mv app=masse volumique apparente en g/L

M=masse du matériau étudié en g

V=volume du récipient en cm³

Matériel utilisé :

- Récipient jaugé d'un volume de 1L .
- Entonnoir.
- Balance mécanique.
- pouzzolane .
- Règle à raser.

Mode opératoire :

On pèse le récipient vide .

On remplit le récipient avec le pouzzolane à raz bord, On s'aidera de l'entonnoir pour verser le granulat sans déborder, il est muni d'une sorte de vanne pour maîtriser le débit de granulat qu'on verse.

Avec la règle à raser, on arase de sorte à remplir exactement le récipient de 1L.

On pèse l'ensemble : récipient+ pouzzolane.

Récipient vide	récipient+ pouzzolane.		
1395.17 g	M1	M2	M3
	2222 g	2214 g	2226 g

Résultats de l'essai :

$$Mv_{app} = \left(\frac{M1+M2+M3}{3} \right) \cdot \frac{1}{V}$$

$$Mv_{app} = \left(\frac{2222+ 2214+ 2226}{3} \right)$$

3

$$Mv_{app} = 2220 \text{ g/cm}^3$$

- **Détermination de la masse volumique de pouzzolane avec pycnomètre:**

But de l'essai :

Cette manipulation a pour but de déterminer la masse volumique du pouzzolane avec la méthode de pycnomètre.

Matériel utilisé :

Pour se faire nous utiliserons le matériel suivant

- Une balance électronique pour peser
- Pycnomètre
- Pouzzolane
- L'eau distillée
- Plaque chauffante

Mode opératoire :

On procédera comme suit :

On pèse le pycnomètre vide

On prend le pycnomètre et on le remplit d'eau distillée,

On pèsera le tout : pycnomètre + eau

Ensuite, on prend une poignée de pouzzolane et on le met dans le pycnomètre.

On pèsera le tout : pycnomètre + eau + pouzzolane.

Il faut éliminer les bulles d'air

M1.....	108,86 g
M2.....	158,28 g
M3.....	381,5 g
M4.....	354,3 g

masses volumiques de pycnomètre+pouzzolane+eau

Résultats de l'essai :

$$\rho_s = \frac{\rho_w(m_2 - m_1)}{m_4 + m_2 - m_1 - m_3}$$

$$\rho_s = \frac{1(158,28 - 108,86)}{354,3 + 158,28 - 108,86 - 381,5}$$

$$\rho_s = 2,22$$

- **Essai analyse granulométrique de sable pouzzolanique par voie sèche :**

But de l'essai :

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

principe de l'essai :

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

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

Tamis (mm)	Masses cumulé en (g)	Masses cumulé en (%)	% passe
8	10	0,2	99,8
5	660	15,8	83,9
2,5	1665	39,9	44
125	1795	43,1	0,9

Tab.9- : tamisage des granulas pouzzolanique 2.5/8

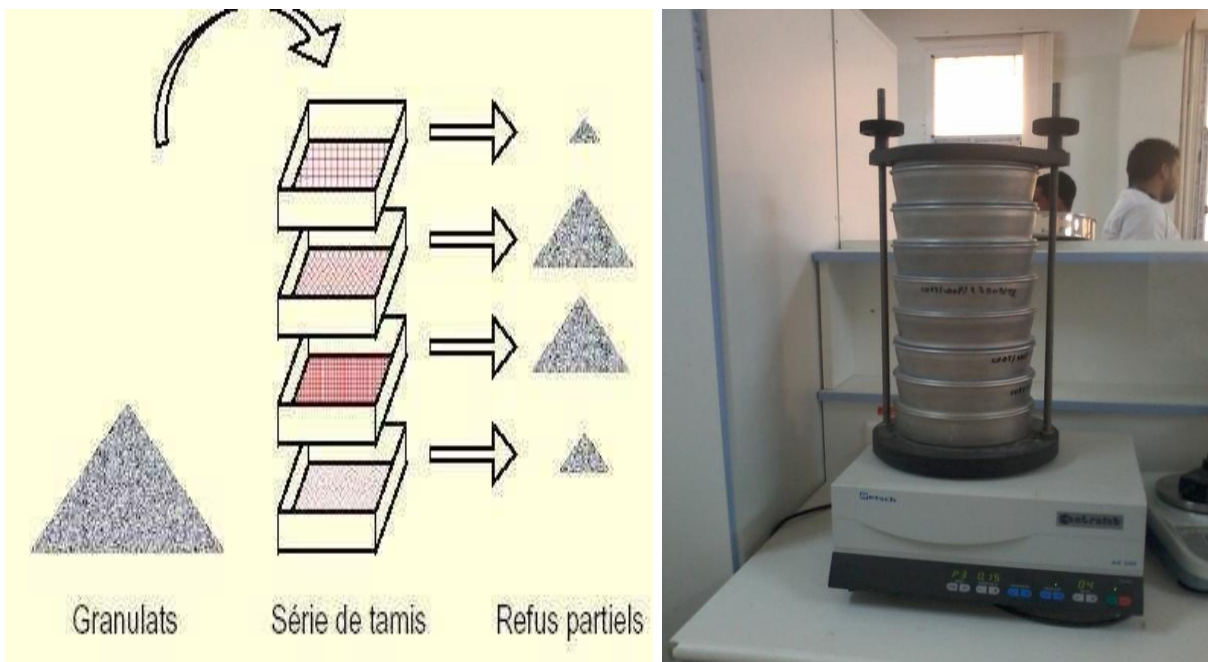


Fig.8- : Le Tamis électrique au niveau de laboratoire de [C.U.A.T]

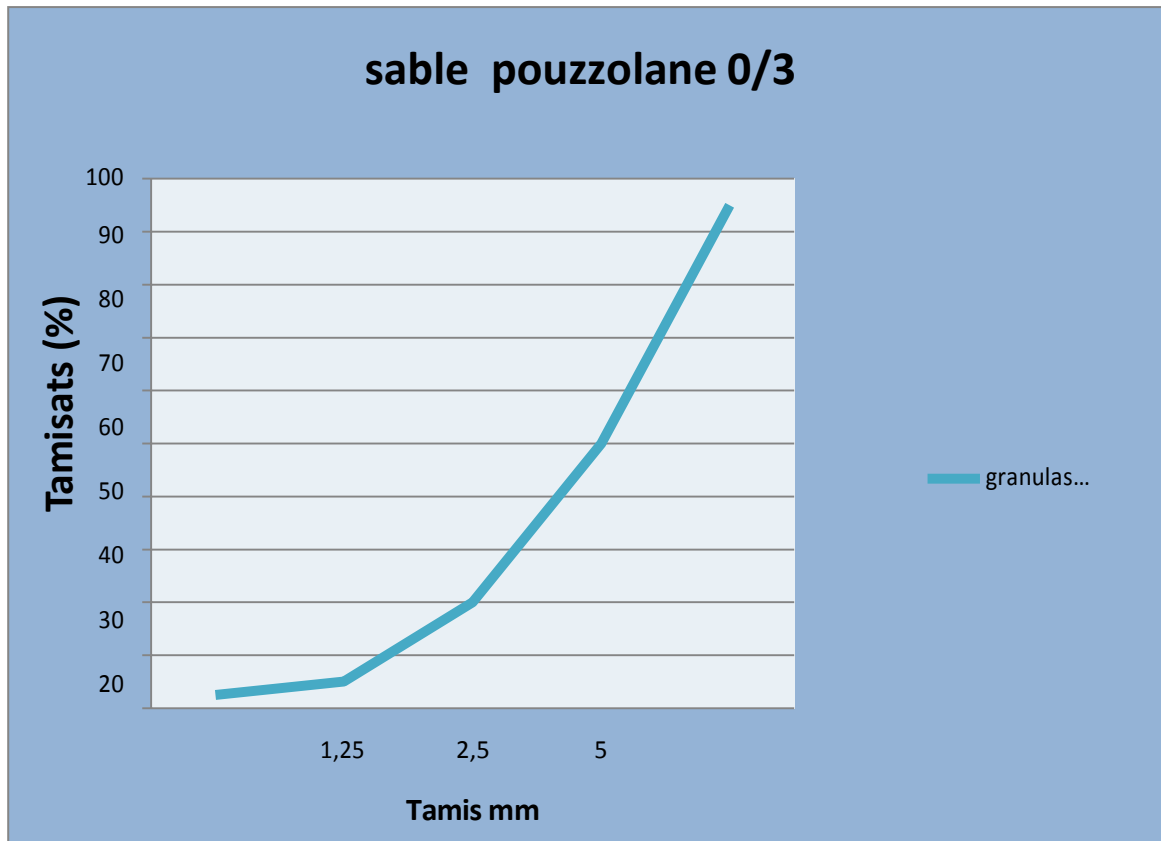


Fig.9- : Courbe granulométrique des sable pouzzolanique

- **L'eau de gâchage :**

Pour la confection des différentes éprouvettes de béton, nous avons utilisé l'eau Potable du robinet. Les résultats de l'analyse chimique de cette eau sont présentés dans le tableau

Chlorure (cl)(mg/l)	128
Matière en suspension (mg/l)	0,29
Matière organique (mg/l)	0,18
Sulfates (So4) (mg/l)	192,12
Nitrate (NO3) (mg/l)	0
Sodium (Na) (mg/l)	0

Tab.10- : des caractéristiques chimiques de l'eau

- **L'adjuvant :**

sont des matériaux actifs ajoutés en très petite quantité (souvent liquide) dans le but d'influencer certaines propriétés par une action chimique ou physique. Ils ne doivent pas modifier défavorablement la durabilité du béton ou toute autre propriété du béton.

✓ SIKA VISCORETE TEMPO 12 :

Caractères généraux : SIKA VISCORETE TEMPO 12 est un super plastifiant puissant qui confère aux bétons les propriétés suivantes :

- longue rhéologie (>2h).
- robustesse à la ségrégation.
- qualité de parement.

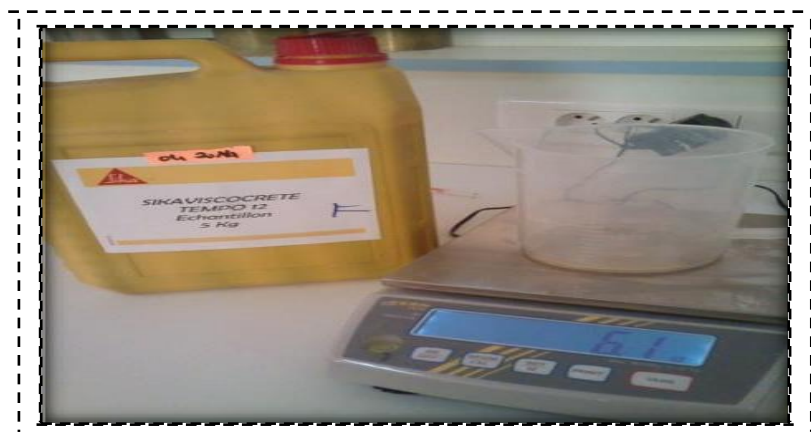


Fig.9- : Dosage de l'adjuvant.

SIKA VISCORETE TEMPO 12	
Forme	Liquide
Couleur	Brun clair
PH	6 ± 1
Densité	1.06 ± 0.01
Teneur en Na ₂ O	$\leq 1\%$
Teneur en ion de Cl ⁻	$\leq 0.1 \%$
Extrait sec	$30.2 \pm 1.3 \%$

Tab.11- : caractéristiques de l'adjuvant.

Dosage :

Plage d'utilisation recommandée de 0.2 à 3% du poids du liant ou du ciment selon la fluidité et les performances recherchées.

Mise en œuvre :

SIKA VISCORETE TEMPO 12 est ajouté, soit en même temps que l'eau de gâchage soit en différé dans le béton préalablement mouillé avec une fraction de l'eau de gâchage.

II.4.Caractéristiques des fumées de silice :

On rapporte quelques mauvaises expériences avec certaines fumées de silice et l'on décrit même une fumée de silice pouzzolane. D'après certains auteurs, cette situation s'explique par le fait que, dans l'industrie du silicium et du ferrosilicium.

La fumée de silice est essentiellement composée de silice vitreuse, la teneur en SiO_2 varie selon le type d'alliage produit. Plus la teneur en silicium de l'alliage est élevée, plus la teneur en SiO_2 de la fumée de silice est élevée. La fabrication d'alliages de silicium comprenant des métaux non ferreux telle que le ferrochrome et le ferromanganèse conduit également à la formation de fumées de silice, mais leur aptitude d'être utilisées dans la confection des bétons n'a pas encore été établie.

Les alliages de ferrosilicium courants ont des teneurs nominales en silicium de 50,75 et 90%. À 48%, le produit est considéré, comme silicium métal. Étant donné que le même four peut produire différents alliages, il est important de connaître la provenance des fumées de silice utilisées dans le béton. En parti culier, le ferrosilicium avec une teneur en silicium de 50 % donne une fumée de silice dont la teneur en silice est d'environ 80% seulement.

La densité de la fumée de silice est généralement de 2.2, une valeur usuelle pour la silice vitreuse, mais elle est un peu plus élevée lorsque la teneur en silice est plus faible. Elle est nettement moins dense que le ciment Portland dont la densité varie de 3 à 3.2.

Les particules de fumée de silice sont extrêmement fines, elles se présentent sous forme de sphères ayant des diamètres compris entre $0.1\mu\text{m}$ et 1 ou $2\mu\text{m}$, de telle sorte que la dimension moyenne des sphères de fumée de silice est 100 fois plus faible que celle d'une particule de ciment moyen. Ces particules sont tellement fines que leur surface spécifique ne peut être déterminée en utilisant la méthode Blaine. Elle doit être déterminée par adsorption d'azote (méthode BET). Les valeurs typiques que l'on retrouve dans la documentation sont comprises entre 13 000 et 25 000 m^2/kg .

La fumée de silice est disponible sous forme de microboulettes, c'est-à-dire des agglomérations de particules individuelles produites par aération, dont la masse volumique est de 500 à 700 Kg/m^3 . La fumée de silice est aussi présentée sous forme de boue constituée à masse égale d'eau et de fumée de silice. La masse volumique de cette suspension est d'environ 1300 à 1400 kg/m^3 . La suspension est stabilisée et présente un pH d'environ 5,5, sans que cela n'entraîne de conséquences lorsqu'on l'utilise dans le béton.

4-1. Mode d'action des fumées de silice dans le béton :

Les caractéristiques très particulières de la fumée de silice en font une pouzzolane très réactive à cause de sa très forte teneur en silice, de son état amorphe et de son extrême finesse. Les effets bénéfiques de la fumée de silice sur la microstructure et les propriétés mécaniques du béton sont dus essentiellement aux deux fonctions suivantes :

A/ Effet physique :

Cet effet est connu aussi sous le nom d'effet filler ou encore effet granulaire, les particules de fumée de silice sont 50 à 100 fois plus fines que le ciment et agissent en qualité de filler entre les grains de ciments eux même et les petits vides entre les grains fins du sable et du ciment. Ceci rend la structure de la matrice du béton plus homogène et beaucoup plus étanche ; il en résulte une meilleure compacité et une plus faible porosité. La diminution de la perméabilité à l'eau augmente la résistance contre le gel/dégel et améliore la résistance contre les agressions chimiques (sulfates, chlorures, etc...).

B/ Effet pouzzolanique :

La fumée de silice est l'ajout pouzzolaniques le plus réactif. Contrairement aux cendres volantes, elle commence à réagir après 2 à 3 jours environ. Les particules SiO₂ amorphes de la fumée de silice se précipitent sous forme de silicate de calcium hydraté (C-S-H) avec l'hydroxyde de calcium libéré lors de l'hydratation du ciment. Ce qui se traduit par une forte augmentation de la résistance mécanique tant à jeune âge qu'à terme.

La consommation d'hydroxyde de calcium lors de la réaction pouzzolaniques conduit à une diminution du pH par rapport à un béton dégagé de silice. C'est la raison pour la quelle, il convient dans le cas du béton armé de limiter la quantité maximale de la fumée de silice à 10%, par rapport au poids du ciment, afin de garantir la protection anticorrosion des armatures.

4.2. Dosage en fumée de silice :

Du point de vue de la résistance à la compression et de la perméabilité, on peut démontrer que, tout au mois dans le cas des BHP de classe I, les gains de résistance n'augmentent plus de façon significative lorsque le dosage en fumée de silice augmente au-delà de 10%, au-delà d'un tel dosage, toute addition supplémentaire de fumée de silice entraîne des gains de résistance relativement faibles. En outre, au coût additionnel de cette fumée de silice, il faut ajouter le coût du superplastifiant qui sera nécessaire pour disperser cette fumée de silice additionnelle.

Même si l'on trouve dans la documentation des études scientifiques et économiques bien argumentées qui permettent de définir le dosage optimal en fumée de silice dans le BHP, il est bon de ne jamais dépasser un dosage compris entre 8 et 10% de la masse.

Les différents oxydes constitutifs de la fumée de silice utilisée sont représentés dans le tableau suivant :

Composition chimique en %						
SiO₂	Al₂O₃	Fe₂O₃	Na₂O	K₂O	SO₃	Impureté
92,1	0,25	0,79	0,17	0,96	0,36	5,37

Tab.12 - Résultat de l'analyse chimique de la fumée de silice.

Masse volumique apparente (g/cm³) SSB	0,271
Surface spécifique (BET) (cm²/g)	> 150000
Type	Ferro- silicium
Couleur	Grise

Tab.13 - Caractéristiques physiques de la fumée de silice.

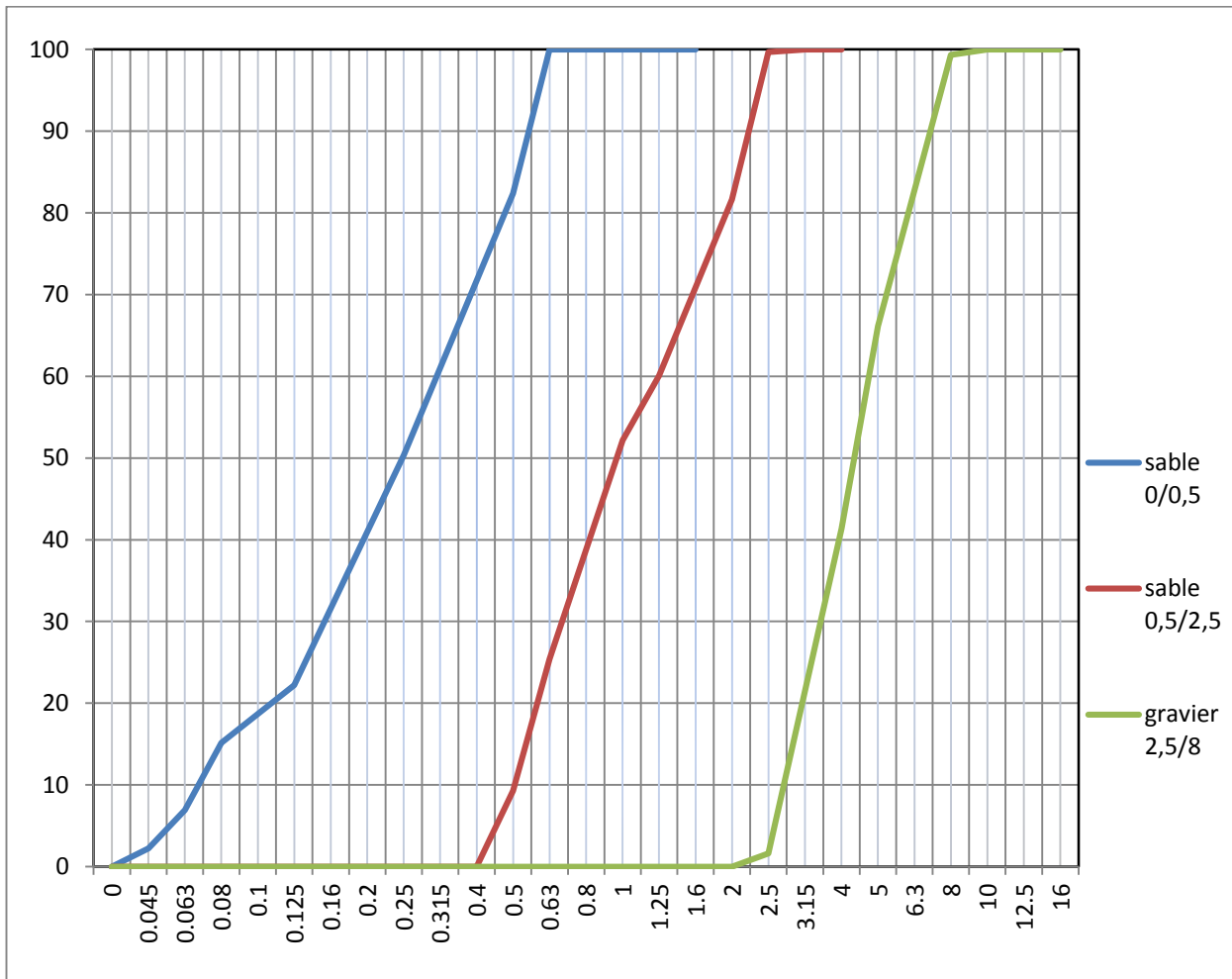


Fig.10-Courbe granulométriques des granulats.

II.5.Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté les différentes caractéristiques des matériaux utilisés dans notre travail et leurs constituants.

Les caractéristiques géométriques, mécaniques, physiques et chimiques des granulats nous permettant de conclure sur leur conformité.

La fumée de silice présente un effet pouzzolanique, néanmoins, c'est à court terme un matériau inerte. Les tailles très petites de ses grains $0.2\mu\text{m}$ en moyenne, lui fournissent un rôle rhéologique particulier.

La plupart des ajouts cimentaires ont en commun de contenir une forme de silice vitreuse réactive qui, en présence d'eau, peut se combiner à la température libérée par l'hydratation du C_2S et du C_3S avec la chaux pour former un silicate de calcium hydraté du même type que celui qui est formé l'hydratation du ciment Portland.

L'utilisation des fumées de silice et des ajouts cimentaires, lorsqu'ils sont disponibles à un prix compétitif, est bénéfique lorsque l'on fabrique des BHP parce que l'on peut ainsi réduire les coûts de fabrication du BHP. Le dosage de ces ajouts cimentaires dépend de la résistance à jeune âge.

Si tous les critères de sélection qui ont été présentés dans ce chapitre sont appliqués avec soin, on devrait diminuer la quantité de travail expérimental nécessaire pour développer une formulation rhéologique des BHP qui soit à la fois économique et qui satisfasse les exigences que l'on s'était fixées.

Chapitre III

Les essais et Les Résultats

III. Introduction :

Dans le présent chapitre, nous présenterons le programme expérimental réalisé et qui comporte deux parties:

Une première partie est consacrée à la présentation des modes opératoires des tests réalisés et la préparation des éprouvettes pour l'écrasement.

Une deuxième partie qui porte sur la caractérisation des mortiers, Nous détaillerons également la procédure expérimentale de détermination des résistances mécaniques du béton.

Enfin, nous clôturons ce mémoire par une conclusion, qui rappelle les objectifs de notre travail, ainsi que les principales constatations obtenues.

III.1. préparation des éprouvettes :

- *les compositions du béton :*

Ciment : 2,43kg

Sable : 5,076kg

Gravier 3/8 : 4,59kg

Pouzzolane : 0,243kg

L'eau de gâchage : 8.81L

Ceci correspond donc à un rapport sable/ciment égal à 3.

L'eau de gâchage à été maintenu constant pour l'ensemble des gâchées : $E/C = 0.5$.

Le béton est réalisé à l'aide d'un malaxeur HOBART, répandant aux caractéristiques de la norme NF P 15-411.



Fig.11- malaxeur hobart normalisé pour béton

La procédure de malaxage est :

Le ciment + la vitesse de 140 tours/min pendant une minute.

Le sable + gravier sont ensuite ajoutés.

Un malaxage de 3 minutes à la vitesse de 280 tours /min est réalisé.

Après l'arrêt du malaxage, on effectue un raclage manuel.

Enfin, le cycle se termine par un malaxage de trois minutes à 280 tours/min.

❖ Nous avons élaboré les séries d'éprouvettes suivantes :

Des moules normalisés permettant de réaliser 16 éprouvettes de section cubique 7cm x 7cm x 7cm (70 x 70 x 70 mm).



Fig.12- : Moules pour éprouvettes de béton(70×70×70mm)

Un appareil de chocs permettant d'appliquer 60 chocs aux moules en les faisant chuter d'une hauteur de 15 mm #177; 0.3 à la fréquence d'une chute par seconde pendant 60s.



Fig.13- : appareil de chocs

❖ *Préparation des éprouvettes :*

La préparation des éprouvettes doit suivre le mode opératoire suivant :

- Le moule et sa hausse fermement fixés à la table de choc.
- Remplir avec précaution à l'aide d'une cuillère convenable, le moule à moitié et dans chaque compartiment de celui-ci.
- Etaler la couche uniformément en utilisant une spatule adéquate ; la tenir verticalement et avec des mouvements de vas et viens.
- Démarrer ensuite l'appareil de choc pour 30 coups.
- Introduire la seconde couche, niveler avec la spatule et démarrer l'appareil pour 30 autres coups.
- Retirer avec précaution le moule de la table, puis enlever immédiatement l'excès de béton avec une règle métallique plate.
- Lisser la surface des éprouvettes en tenant la règle presque à plat.
- Etiqueter les moules pour identification.
- Placer sans tarder, les moules dans une armoire humide, pendant 24 h.
- Après 24 heures de cure, faire sortir les moules et procéder au démoulage des éprouvettes.
- Immerger sans tarder, les éprouvettes dans un bain d'eau de température $20 \pm 1^{\circ}\text{C}$.



Fig.15- Bain d'eau pour la conservation des éprouvettes

Eprouvette N°	éprouvette sec	Eprouvette humide
01	800.6	865.9
02	802.8	869.1
03	798.1	865.6
04	795.6	854.3
05	804.2	894.1
06	803.5	878.9
07	795.6	888.1
08	799.9	886.9
09	804.3	867.1
10	809.1	892.3
11	806.6	890.1
12	808.8	892.2
13	806.2	886.1
14	791.2	890.1
15	797.0	889.1

Tab.14- de poids des éprouvettes

III.2. Essais de la résistance en compression :

- Résistance a la compression :**

L'essai de compression est l'essai le plus couramment pratiqué. Il s'effectue sur des éprouvettes cylindriques de différentes dimensions ou sur des cubes. Pour nos essais la mesure de la résistance à la compression a été effectuée sur des éprouvettes cubiques (7× 7 x 7) cm.

L'éprouvette, après avoir subit un surfaçage à base de soufre pour assurer la planéité des deux extrémités de l'éprouvette et une perpendicularité suffisante à son axe, est placée et centrée entre les deux plateaux de la presse puis chargée progressivement jusqu'à la rupture. à l'aide d'une presse de capacité de 3500 KN.

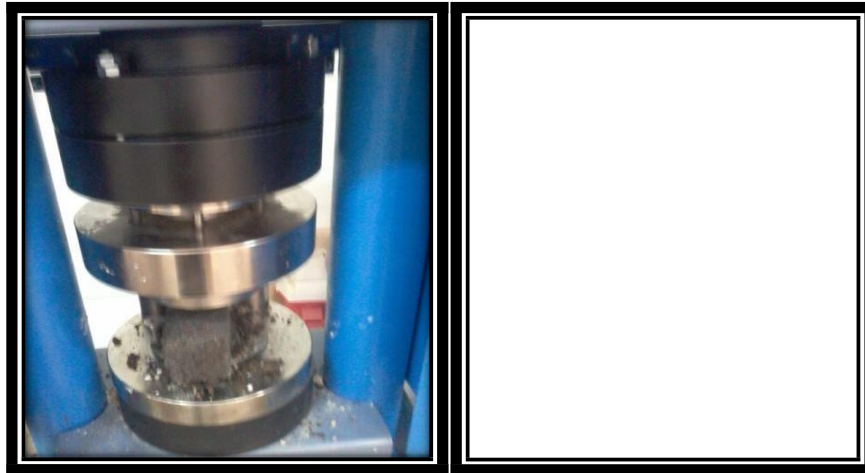


Fig.15- : écrasement des éprouvettes en béton a l'âge de j jours

N° d'éprouvette	Charge (KN)	Contrainte (Mpa)
01	107.67	21.97
02	114.50	23.36
02	112.65	22.99
La moyenne	111.61	22.77

Tab.15- Résultat d'écrasement de 7 jours

N° d'éprouvette	Charge (KN)	Contrainte (Mpa)
01	111.07	22.66
02	114.50	23.80
02	119.65	25.76
La moyenne	115.07	24.07

Tab.16- Résultat d'écrasement de 14 jours

N° d'éprouvette	Charge (KN)	Contrainte (Mpa)
01	117.2	24.26
02	120.50	25.80
02	119.05	24.91
La moyenne	118.91	24.99

Tab.17- Résultat d'écrasement de 21 jours

N° d'éprouvette	Charge (KN)	Contrainte (Mpa)
01	116.3	24.01
02	121.30	25.98
02	120.10	25.07
La moyenne	119.23	25.02

Tab.18- Résultat d'écrasement de 28 jours

N° d'éprouvette	Charge (KN)	Contrainte (Mpa)
01	118.3	24.92
02	122.10	26.98
02	117.61	23.97
La moyenne	119.34	25.29

Tab.19- Résultat d'écrasement de 60 jours

III.3.Interprétation :

Les BHP présentent des résistances en compression importantes aux jeunes âges, compte tenu de la rapidité de la cinétique de montée en résistance, et très élevées à long terme (avec une montée en résistance se poursuivant au-delà de 28 jours).

Un BHP de 25MPa à 28 jours peut offrir des résistances mécaniques élevées à 24 heures, et à 7 jours. Le gain est aussi important en termes de résistance en traction ou au cisaillement.

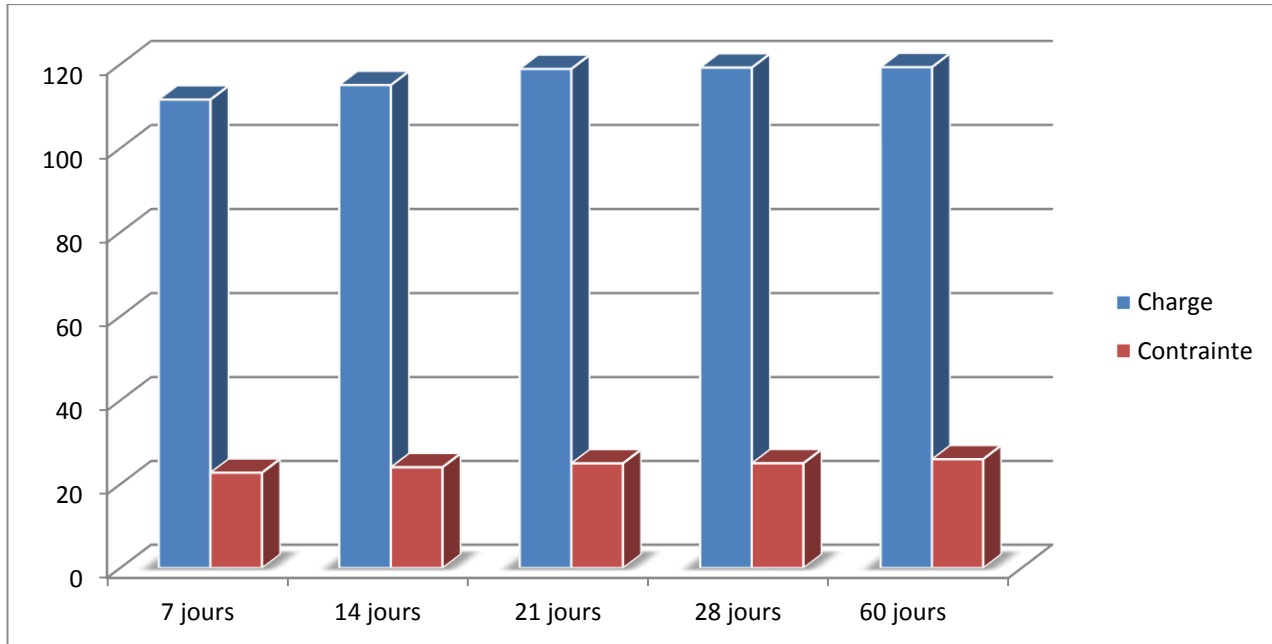


Fig.16-Résultats de l'évolution de la résistance en compression en fonction du temps du béton

III.4.Discussions et interprétations :

D'après les résultats obtenus on remarque une amélioration des résistances mécaniques, Béton avec superplastifiant réducteur d'eau constate un gain de résistance considérable.

La résistance à la compression du BHP est améliorée relativement élevées à jeune âge avec réducteur d'eau + pouzzolane.

Cette amélioration de résistances est attribuée d'un côté à la bonne qualité des matériaux locaux utilisés (gros granulats), les résistances en compression est bien satisfaisante, Et d'un autre côté l'introduction du superplastifiant et du pouzzolane, qui a conduit à une croissance appréciable de résistances.

II - Conclusion et perspective :

Cette recherche s'inscrit dans l'étude de valorisation du béton à hautes performances.

Les éléments bibliographiques, nous ont permis de mettre en évidence les paramètres qui d'influent sur les matériaux utilisés.

Il s'agit :

- de la nature des granulats.
- du dosage en adjuvant et plus précisément le super plastifiant, adjuvant spécifique des bétons à hautes performances.
- des qu'elles soient de nature minérales ou pouzzolaniques.

Dans cette étude, nous avons présenté les caractéristiques des matériaux sélectionnés pour nos essais : granulats, ciment, adjuvants.

Les programmes expérimentaux concernant la préparation des éprouvettes et l'essai d'écrasement.

L'influence de l'incorporation d'additions (pouzzolanes, fumées de silice, s'est traduite selon nos essais surtout par une compacité plus grande.

Les essais d'écrasement nous ont permis de déterminer la résistance à la compression en fonction d'âge.

Il n'y a pas des règles établies pour la composition d'un béton à hautes performances, comme nous l'avons vu dans l'étude bibliographique, il y a plusieurs propositions à trouver les universités du monde et surtout dans les laboratoires travaillant en collaboration, avec secteur des bâtiments et des travaux publics, il y a surtout des exigences à satisfaire concernant ce béton particulier.

L'exploitation des résultats expérimentaux obtenus dans ce modeste de travail nous pousse de mettre en évidence deux avantages majeurs de notre contribution :

Grâce à l'utilisation des additions et du superplastifiant, nous avons pu obtenir des résistances mécaniques élevée, exemple une résistance à la compression dépassant les 30MPa long terme, et donc une résistance à la traction qui augmente elle aussi suivant les relations émises par les règlements en vigueur.

Comme on a pu montrer dans ce mémoire, il existe de nombreuses variantes possibles pour la formulation d'un BHP. Il sera donc très intéressant d'étudier la possibilité de confectionner un BHP à partir des matériaux locaux qui existent en Algérie pour pouvoir par la suite réaliser une étude technico-économique.

Ces études nous permettront de définir avec exactitude les avantages d'utilisation du BHP dans le domaine de construction en Algérie.

Le domaine des BHP étant très vaste, fonctions de tous les paramètres existants dans les caractéristiques, des compositions, peut nous ouvrir d'autres axes de recherches, pour d'autres études aussi nous pouvons citer :

- Durabilité supérieure vis-à-vis des agressions physico-chimiques ;
- Fluidité importante du béton à l'état frais facilitant généralement la mise en œuvre ;
- Résistance élevée au jeune âge favorisant l'optimisation des cycles de décoffrage et de mise en tension des câbles de précontrainte ;
- Augmentation du module d'élasticité et amélioration de la stabilité aérodynamique des structures élancées ;
- Augmentation des valeurs de contrainte de tractions admissibles ce qui permet de réduire les sections d'armatures ;

- Majoration des contraintes de cisaillement admissibles. Il en résulte la possibilité de réduire, par exemple, les épaisseurs des âmes des poutres en BHP sans augmentation corrélative des armatures transversales.

Les bétons à hautes performances présentent une durabilité améliorée et une résistance accrue. Ils peuvent supporter des charges supérieures ou permettre des constructions plus élancées. Ils peuvent également présenter des formes plus complexes et permettent de réaliser de plus grandes portées.

Références Bibliographiques

- [1] www.controls-group.com/...php/url...62.../nomefile=6265_francia.
- [2] [Taylor, 1997] .Cementchemistry.Telford,NewYork.
- [3] Nicolas HYVERT : Application de l'approche probabiliste à la durabilité des produits préfabriqués en béton (Thèse de doctorat -l'Université Toulouse III - Paul Sabatier-2009).
- [4] kennouche.e-monsite.com/medias/.../cours-les-liants-hydrauliques-1.
- [5] J. P Olivier : livre de " Durabilité des bétons ". (A.NONAT :chapitre2 ; V. BAROGHEL-BOUNY, B. CAPRA, S. LAURENS : chapitre9 ; A. CARLES- GIBERGUES, H.HORNAIN :chapitre11 ; G. ESCADEILLAS, H. HORNAIN: chapitre
- 12) .(Edition :Presse de l'école nationales des ponts et chaussées -2008).
- [6] BERRAIH MIMOUN : Etude des mortiers contenant de la pouzzolane naturelle et des déchets de verre (Mémoire de Magister- l'ENSET d'Oran-2010).
- [7] (CNAT) les ciments rapport technique
- [8] Réunion d'ingénieur, matériaux de constricton , Edition Eyrolles 1979 [9] www.groupglobalcompany.com/ggf/tipos a.../production-de-ciment
- [10] CHIHAOUI Ramdane : Durabilité des matériaux cimentaires vis-à-vis d'un environnement chimiquement agressif (Mémoire de Magister- USTMB d'Oran -2008).
- [11]. H. Rumpf, Aufber. Techn., 1973. 2: p. 59-71.
- [12]. A. A. Griffith, The Phenomena of Rupture and Flow in Solids. Phil. Trans. Roy. Soc, 1921. 163-198.
- [13]. H. Dombrowe, B. Hoffman, and W. Scheibe, Mode of action and possibilities for use of grinding aids. ZKG International, 1982. 35(11): p. 571-580.
- [14]. P. Blazy, J. Yvon, and E. A. Jdid, Fragmentation : Généralité, Théorie. Techniques de l'ingénieur, 1992. A5050.
- [15]. H.F.W. Taylor, Cement chemistry. Thomas Telford publishing, 1998.
- [16]. Ciments Français, La fabrication des ciments. Eyrolles, 1993.
- [17] C. Guerandel, E. Moudilou, and S. Tusseau-Nenez and M. N. De Noirfontaine, Modélisation thermodynamique du diagramme de phases du système CaO-SiO₂-Al₂O₃. rapport de fin d'étude ESIREM/CTG-Italcementi Group, 2006.
- [18] Yassine SENHADJI : L'influence de la nature du ciment sur le comportement des mortiers vis-à-vis des attaques chimiques (acides et sulfatiques) (Mémoire de Magister-USTMB d'Oran -2006).

- [19] **NORME ALGERIENNE : « Liants hydrauliques - ciments courants : composition, spécifications et critères de conformité », NA 442 : 2000, Deuxième Edditions, IANOR**
- [20]. **I. Odler, hydratation, Setting, and Hardening of Portland Cement. Lea's Chemistry of Cement and Concrete, 1998.**
- [21]. **P. Faucon, Durabilité du béton: physico-chimie de l'altération par de l'eau. Thèse Université de Cergy-Pontoise, 1997.**
- [22]. **Z. Xu and D. Viehland, Observation of a mesostructure in calcium silicate hydrate gels of Portland. Physical Review Letter, 1996. 77: p. 952-955.**
- [23]. **E. Moudilou, Cinétiques et mécanismes de relargage des métaux lourds présent en traces dans les matrices cimentaires. Thèse Université d'Orleans, 2000.Pozz**
- [24] **L'activité pouzzolanique, Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, n° 93, 1978, pp. 66-69**
- [25] **Chemistry of pozzolanic additions and mixed cements, in 6th International Congress on the Chemistry of Cement, Mocow, September 1974**
- [26]**A.MEBROUKI «influence de la pouzzolane de Beni-Saf sur les caractéristiques mécaniques des mortiers » thèse de Magister- Université Mostaganem - juin 2003.**
- [27] **Réunion d'ingénieur, matériaux de construction, Edition Eyrolles 1979**
- [28] **Article Internet « les ciments » 2004.**
- [29] **J.M.GEOFFRAY, R.VALLADEAU : Morphologie et couleur des pouzzolanes. Bulletin de liaison des Laboratoires de ponts et chaussées-92 nov-déc, 1977- réf. 2116. pp91-94.**
- [30] **R.SERSALE : Structure et caractérisation des pouzzolanes et des cendres volantes. Sous thème IV-1.7^{eme} Congrès International de la chimie des ciments. Vol I. Paris, 1980.**
- [31] **Kaid Nouria 2002.**
- [32] **Publication du 01-01-1974 de l'institut de recherche de la construction « CBD-140-F. Comportement thermique des murs de maçonnerie en béton sous l'action du feu » de T. Z. HARMATHY et L. W. ALLEN date de publication 01-01-1974.**
- [34] **La pratique des ciments mortier et bétons « caractéristiques des liants des bétons mise en œuvre des coulis et mortiers » (chapitre 1) Michel Vénuat 1989.**
- [35] **Publication Internet mailto:philippe.montel@auvergne_volcan.com 2004.**
- [36] **Mémoire de Magister, Spécialité : présenté par BOUGLADA Mohamed Salah intitulé : « effet de l'activation du ciment avec ajout minéral par la chaux fine sur le comportement mécanique du mortier », Université de M'sila, faculté des sciences de l'ingénierat, Département de Génie Civil, Année 2007-2008.**

