

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement
Supérieur et de la Recherche
Scientifique



UNIVERSITE
Mouloud MAMMERY
Tizi Ouzou

Mémoire de Fin D'études

*En vue de l'obtention du Diplôme de Master Académique en
Génie Civil*

Faculté : Génie de la Construction

Département : Génie Civil

Option : Structures

Thème

*Etude du comportement physico-
mécanique d'un mortier écologique
renforcé par des fibres métalliques*

Etudié par :

- Mr LACHEMOT Omar
- Mr BAIK Mounir

Devant le jury:

- M^r ALLICHE Amar
- M^{me} CHAHOUR Kahina
- M^r ILLOULI Said
- M^r SAFI Brahim

Sujet Proposé et suivi par :

- Mme. CHAHOUR.K

MCA	UMMTO	Président
MCA	UMMTO	Promotrice
MCA	UMMTO	Examinateur
Professeur	UMBB	Co-promoteur

Date de soutenance : 11 / 12 /2022

Promotion : 2021/2022

REMERCEMENTS

En premier lieu, on remercie Dieu tout puissant pour nous avoir donné la force le courage et la persévérance qui nous a permis d'accomplir ce travail.

*Nous exprimons nos sincères remerciements
A nos PARENTS pour leur soutien dans chaque travail que nous
avons effectués.*

Ce travail de recherche n'aurait pas pu être mené à bien sans le soutien et les conseils de nombreuses personnes qu'on tient à remercier aujourd'hui.

*Nos remerciements s'adressent en deuxième lieu à notre promotrice
Mme. CHAHOUR KAHINA d'avoir accepté de diriger ce travail et de nous
avoir suivis et soutenu tout au long de cette recherche.*

*A notre Co-encadreur Mr. SAFI BRAHIM, Professeur à l'Université de
BOUMERDES Pour son aide et son suivi, ses orientations et
nombreuses interventions qui ont permis l'aboutissement de ce travail.*

*Toute notre gratitude et reconnaissance vont également aux membres
de jury qui nous ont fait l'honneur d'accepter d'examiner et évaluer ce
travail.*

*Nous remercions également aux responsables et personnels du
laboratoire Génie Civil, Université Mouloud MAMMER de TIZI
OUZOU, en particulier à Monsieur BOUHERAOUA. R, pour sa précieuse
aide à la réalisation de la partie expérimentale ainsi que Mme
MEDJBER Fadhila, ingénieur de laboratoire.*

*Enfin, nos remerciements vont à l'ensemble des enseignants du
département de Génie civil et à nos amis pour leurs soutiens
indéfectibles.*

*A tous ceux qui nous ont aidés, de près ou de loin, dans la réalisation
de ce projet de fin d'études.*

Dédicaces

Je dédie ce travail a :

A mon cher père .ma source de force et de tendresse, aucun hommage ne pourrait être à la hauteur de l'amour Dont il ne cesse de me combler. Que dieu lui procure bonne santé et longue vie.

A la mémoire de ma mère Noura

A ma chère femme Ouardia

A mon cher frère : Ahcen, mes sœurs : Lydia, Ouardia, Hayet

A mes petites nièce Analisse et acil et juba que j'aime beaucoup

A la mémoire de mes grands-parents

A ma tante Chabha

A mon binôme mounir, qui a su être patient avec moi et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce travail soit réalisé, je vous dis merci

Omar

Dédicaces

Je dédie ce travail à :

*A mes chers parents .ma source de force et de tendresse,
aucun hommage ne pourrait être à la hauteur de l'amour
Dont ils ne cessent de me combler. Que dieu leur procure
bonne santé et longue vie.*

A mon cher frère : Iyes, ma sœur : Nardjessse

A mes grands-parents

A la mémoire de ma grand-mère Mahjouba

A mes oncles et tantes

A mes cousins et cousines

*A mon binôme omar, qui a su être patient avec moi et à tous
ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce travail
soit réalisé, je vous dis merci*

mounir

Sommaire

Liste des figures

Liste des tableaux

Résumé

Introduction Générale.....	1
Etude bibliographique	3
Le béton autoplaçant	3
I.1. Introduction.....	3
I.2.Définition des bétons autoplaçants	4
I.3.Avantages des BAP :	5
I.4. Classification des BAP	6
I.5. Domaine d'utilisation des BAP	6
I.6. Les critères de composition des BAP	8
I.6.1. Un volume de pâte important	8
I.6.2. Une quantité de fines (<80 µm) importante	8
I.6.3. L'utilisation des superplastifiants	8
I. 6.4. Utilisation éventuelle d'un rétenteur d'eau (dit agent de viscosité)	9
I. 6.5. Un faible volume de gravillon.....	10
I.7. Constituants d'un béton autoplaçant	10
I.7.1) Les ciments	11
I.7.2) L'eau	12
I.7.3) Les granulats	13
I.7.4) Les ajouts minéraux	14
I.7.5. Les Superplastifiants	22
I.8. Les propriétés des bétons autoplaçants à l'état frais et l'état durci.....	24
I.8.1. Les propriétés principales d'un BAP à l'état frais	24
I.8.2) A l'état durci	28
I.9. Méthodes de formulations des BAP	32
I.9.1. Introduction	32
I.9.2) Les trois principes de formulation des bétons.....	32
I.9.3. Méthode japonaise.....	33
I.9.4) Méthode suédoise :	34
I.9.5) Méthode française	34
I.9.6) Méthodes basées sur l'optimisation des mortiers	35

Sommaire

I.9.7. Méthodes basées sur l'optimisation du volume de pâte	35
I.9.8) Méthodes basées sur l'optimisation du squelette granulaire.....	36
I.10. Les mortiers autoplaçants.....	36
I.10.1. Introduction.....	36
I.10.2. Définition	37
I.11. Les type de mortiers.....	38
I.12. La composition des mortiers	39
I.13. Structure du MAP	40
I.14. L'utilisation des mortiers.....	41
I.15. Méthode de formulation du Mortier de Béton Equivalent (MBE).....	41
I.16. Méthode du mortier équivalent	41
I.17. Technique du mortier de béton équivalent "MBE"	42
I.18. Formulation d'un mortier autoplaçant	43
I.18.1. Composition du mortier autoplaçant	43
I.19. Conclusion	45
formulatin des matériaux	46
II.1. Introduction	46
II.2. Caractéristiques des matériaux	46
II.2.1. Le ciment	46
II.2.2. Eau de gâchage	49
II.2.3. Adjuvant (superplastifiant)	49
II.2.4) Les fibres	52
II.2.5. Fillers de calcaire	54
II.2.6. Le sable	55
a) Essai d'équivalent de sable.....	56
b) Masse volumique absolue	59
c) Masse volumique apparente	61
II.2.7. Poudre de marbre	62
a) Equivalent de la poudre de marbre	63
b)Masse volumique absolue	63
c)Masse volumique apparente	64
II.3. Analyse granulométrique du sable et de la poudre de marbre	64
II.4. Module de finesse	67
II.5. Formulation du mortier Autoplaçant	68

Sommaire

II.5.1. Substitution du sable	68
II.5.2. Mortier témoin sans fibres	68
II.5.3. Mortier fibré.....	69
II.6. Le protocole de mélange des mortiers autoplacants (MAP).....	69
Essais et interprétations des résultats.....	71
III.1. Introduction	71
III.2. Eprouvettes utilisées.....	71
III.3. Propriétés à l'état frais.....	71
III.4. Propriétés à l'état durc	74
III.4.1. Propriétés physiques.....	75
a. Masse volumique apparente.....	75
b. Essai ultrasonore.....	76
c. Résistance à la flexion.....	78
d. Module d'élasticité dynamique.....	81
e. La porosité	82
f. Absorption d'eau	84
III. 5. Etude rhéologique.....	86
Conclusion générale	91
Bibliographie	

Liste des figures

Etude bibliographique

Figures I. 1 : Comparaison entre la mise en place d'un béton traditionnel et d'un BAP	4
Figures I. 2. Composition et aspect d'un BAP et d'un BO	5
Figures I. 3 : Le pont Akashi Kaikyo	7
Figures I. 4 : La tour Landmark Tower (Yokohama, près de Tokyo).....	7
Figures I. 5 : dispersion des granulats par excès de pâte.....	8
Figures I. 6 : Mode d'action des super-plastifiants - Défloculation des grains de ciment.....	9
Figures I. 7 : Etalement et viscosité en fonction du dosage en super plastifiant.	9
Figures I. 8 : Constituants des bétons Ordinaires et des BAP.....	10
Figures I. 9 : Le ciment.	11
Figures I. 10 : L'eau.....	12
Figures I. 11 : les Granulats utilisé dans le béton.	13
Figures I. 12 : Les types de granulats selon leurs formes.	13
Figures I. 13 : La fumée de silice.....	16
Figures I. 14 : Laitier de hauts fourneaux.	17
Figures I. 15 : Gisement de marbre.....	18
Figures I. 16 : Poudre de marbre.....	19
Figures I. 17 : Les utilisations des superplastifiants.	23
Figures I. 18 : Essai d'étalement (SLUMP FLOM).....	24
Figures I. 19 : Essai de stabilité au tamis.....	25
Figures I. 20 : Essai de la boîte en L.....	26
Figures I. 21 : Essai de boîte en u ('u-box test').	26
Figures I. 22 : Essai d'entonnoir.	27
Figures I. 23 : essai d'étalement modifié.	27
Figures I. 24 : Essai de compression.....	28
Figures I. 25 : Essai de traction directe.	28
Figures I. 26 : Essai de traction par fondage.....	29
Figures I. 27 : Essai de traction par flexion.....	29
Figures I. 28 : Réduction du volume de gravillon a la moitié de sa compacité.	32
Figures I. 29 : Essais d'optimisation des dosages en eau et en superplastifiant sur mortiers.....	33
Figures I. 29 : Mortier autoplaçant.....	36

Formulation des matériaux

Figures II. 1 : le ciment utilisé.....	45
Figures II. 2 : l'eau du robinet	47
Figures II. 3 : superplastifiant TEMPO12.	47
Figures II. 4 : Fibres DRAMIX 30mm	49

Liste des figures

Figures II. 5 : Fibres DRAMIX 15mm.	49
Figures II. 6 : les fillers du calcaire	51
Figures II. 7 : Le sable de rivière.	52
Figures II. 8 : Agitateur manu.	52
Figures II.9 : essai de l'équivalent de sable.	53
Figures II.10 : essai de la masse volumique absolue.	55
Figures II.11 : essai de la masse volumique apparente.	56
Figures II.12 : la poudre de marbre (0/3).	57
Figures II.13 : Essai de la masse volumique apparente.	59
Figures II.14 : tamiseur électrique.	60
Figures II.15 : Colonne de tamis.	60
Figures II.16 : la courbe de l'analyse granulométrique du sable et de la poudre du marbre de classe (0/3).	61
Figures II.17 : Un malaxeur pour des mortiers	64

Essais et interprétations des résultats

Figures III.1 : Moule prismatique (4×4×16) cm ³	65
Figures III. 2 : Essai d'étalement sur mortier autoplaçant frais	66
Figures III. 3 : Essai d'étalement MT.	67
Figures III. 4 : Essai d'étalement 1%.	67
Figures III. 5 : Essai d'étalement 2%	67
Figures III. 6 : Essai d'étalement 3%	67
Figures III. 7 : fluidité des mortiers étudiés.	68
Figures III. 8 : Eprouvettes d'un mortier autoplaçant à l'état frais et durci.	69
Figures III. 9 : Masse volumique apparente des mortiers étudiés à 2 jours et 28 jours.	70
Figures III. 10 : Vitesse longitudinale de propagation de son.	71
Figures III. 11 : Essai de traction par flexion.	71
Figures III. 12 : Diagramme de flexion TM.	72
Figures III. 13 : Diagramme de flexion 1%.	72
Figures III. 14 : Diagramme de flexion 2%	73
Figures III. 15 : Diagramme de flexion 3%.	73
Figures III. 16 : Diagramme de flexion	73
Figures III. 17 : Influence du dosage de fibres sur la résistance à la traction par flexion.	74
Figures III. 18 : L'évolution de la résistance à la traction par flexion des mortiers étudiés.	74
Figures III. 19 : module d'élasticité dynamique des mortiers étudiés.	75
Figures III. 20 : module d'élasticité dynamique des mortiers étudiés.	76
Figures III. 21 : Evolution de la porosité des mortiers étudiés en fonction du dosage en fibres... ..	78
Figures III. 22 : Evolution de l'absorption des mortiers étudiés en fonction du dosage en fibres... ..	79
Figures III. 23 : Evolution de la contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement des pâtes cimentaires à différents dosages du Superplastifiant.	80
Figures III. 24 : Evolution de la viscosité en fonction du taux de cisaillement des pâtes cimentaires à différents dosages du Superplastifiant.	81
Figures III. 25 : Variation des paramètres rhéologiques (τ , η) en fonction du dosage du SP.	82

Liste des tableaux

Etude bibliographique

Tableau I. 1 : Différents types de retraits	24
Tableau I. 2. Qualité du béton en fonction de la vitesse de propagation des impulsions.....	25
Tableau I. 3 : Intervalles pour chaque constituant selon la méthode Japonaise	34
Tableau I. 4 : Composition pour 1m ³ deBAP	34
Tableau I. 5 : Composition pour 1m ³ deMAP.	35

Formulation des matériaux

Tableau II. 1 : caractéristiques physiques	38
Tableau II. 2 : Composition chimique du ciment.....	38
Tableau II. 3 : Composition minéralogique.	38
Tableau II. 4 : Résistance à la compression et à la flexion du ciment.....	38
Tableau II. 5 : composition chimiques du calcaire.....	42
Tableau II. 6 : composition minéralogique du calcaire.	43
Tableau II. 7 : caractéristiques physiques du calcaire.	43
Tableau II. 8 : les valeurs d'équivalent des sable indiquent la nature et qualité du sable.	45
Tableau II.9 : Caractéristiques pétrographiques de la poudre de marbre.	48
Tableau II.10 : Composition minéralogique de la poudre marbre.	48
Tableau II.11 : Caractéristiques physico-mécaniques de la poudre de marbre	48
Tableau II.12 : Caractéristiques chimiques de la poudre marbre.	49
Tableau II.13 : Analyse granulométrique par tamisage du sable (NF P 18-560).....	51
Tableau II.14 : Analyse granulométrique par tamisage de la poudre du marbre	52
Tableau II.15 : La composition du mortier autoplaçant témoin « MSF » sans fibres	54
Tableau II.16 : Le Dosage Des Différents Pourcentages De Fibres.....	54

Liste des tableaux

Essais et interprétations des résultats

Tableau III.1 : Essai d'étalement.....	68
Tableau III. 2 : Masse volumique apparente des mortiers étudiés	69
Tableau III.3 : Vitesse longitudinale de propagation de son	70
Tableau III.4 : Résistance à la traction par flexion des mortiers étudiés.....	72
Tableau III. 5 : Module d'élasticité dynamique des mortiers étudiés à 28 jours	75
Tableau III. 6 : Porosité des mortiers étudiés effectués à 2 et 28 jours	77
Tableau III. 7 : Absorption des mortiers étudiés effectués à 2 et 28 jours	79

Résumé :

Les mortiers autoplaçants sont caractérisés par leur fluidité élevée de sorte qu'ils puissent être mis en place sous l'effet de leur poids propre. En effet, leur composition avec un volume de pâte supérieur à celui des mortiers ordinaires augmente leur sensibilité à la fissuration.

Le but de ce travail est d'étudier l'influence de l'introduction des fibres métalliques sur le comportement des mortiers autoplaçants à l'état frais et à l'état durci et d'améliorer ainsi, la compréhension du comportement de ce type de mortiers du point de vue caractéristiques mécaniques (essais à l'ultrason, essai de résistance la flexion) et caractéristiques rhéologiques (viscosité dynamique et thixotropie).

Cette étude consiste également à déterminer les propriétés physico-mécaniques, le module de young, la masse volumique, la porosité et l'absorption d'eau. Avec un mortier écologique composé de 70% de poudre de marbre. Les résultats obtenus permettent de conclure que l'ajout des fibres métalliques engendre une nette amélioration des propriétés physico-mécaniques du matériau. Aussi, la ductilité est nettement améliorée en présence des fibres. Ainsi l'utilisation des fibres métalliques dans le mortier autoplaçant est avantageux du point de vue économique et écologique et permet d'améliorer la durabilité de ce type de mortiers.

Mots-clés : mortier autoplaçant, mortier écologique, fibres métalliques, poudre de marbre, rhéologie.

Abstract :

Self-compacting mortars are characterized by their high fluidity so that they can be placed under the effect of their own weight. Indeed, their composition with a paste volume greater than that of ordinary mortars increases their sensitivity to cracking.

The purpose of this work is to study the influence of the introduction of metal fibers on the behavior of self-compacting mortars in the fresh state and in the hardened state and thus to improve the understanding of the behavior of this type of mortar. mortars from the point of view of mechanical characteristics (ultrasound tests, bending strength test) and rheological characteristics (dynamic viscosity and thixotropy).

This study also consists in determining the physico-mechanical properties, the Young's modulus, the density, the porosity and the water absorption. With an ecological mortar composed of 70% marble powder. The results obtained lead to the conclusion that the addition of metal fibers leads to a marked improvement in the physico-mechanical properties of the material. Also, the ductility is significantly improved in the presence of fibers. Thus the use of metal fibers in self-compacting mortar is advantageous from an economic and ecological point of view and improves the durability of this type of mortar.

Keywords: self-compacting mortar, ecological mortar, metal fibers, marble powder, rheology.

Introduction
Générale

Introduction Générale

Une structure de Génie Civil, est un élément dont le matériau constitutif est soumis à des contraintes de nature et d'intensité diverses. Il y a les contraintes normales de traction et de compression dues au moment de flexion. Il existe également des contraintes de cisaillement dues à l'effort tranchant liées au moment de flexion.

L'un des matériaux les plus utilisés pour la réalisation de bâtiments et ouvrages de génie civil est le béton. Sa mise en œuvre nécessite peu de moyens. Composé de liants, de granulats, d'eau et éventuellement d'adjuvant. Quand il s'agit de structures en béton, comme celui-ci résiste mal en traction, il est cousu par des armatures d'acier dans ses parties tendues par la flexion qui permet des contraintes de traction grandement supérieures à celles que peut supporter le béton seul. On a alors un comportement en section fissurée d'un matériau composite.

Le béton présente des performances mécaniques qui ont connu d'importantes avancées dans les années 1980 des nouvelles techniques et méthode ont été développées sur la base des thèses et des théories basées sur l'incorporation des fibres métalliques que plastiques ou autres ont été incorporées dans les bétons. L'utilisation de ces bétons renforcés de fibres a connu diverses applications. On peut citer les dallages industriels, la réparation des canalisations d'assainissement, la projection sous voûte dans les tunnels, la réalisation de chaussées entièrement faites en béton de fibres, des chaussées d'autoroutes ou chaussées de parkings aéronautiques

On peut situer la naissance des bétons renforcés de fibres métalliques (BFM), en tant que véritable matériau de construction, au début des années 60. Les travaux de Romualdi, sur l'arrêt de la propagation des fissures dans une matrice fragile par des fibres réparties, [1] en sont à l'origine et ont conduit au dépôt d'un brevet. Depuis, les chercheurs se sont principalement intéressés au fonctionnement des fibres et à leur interaction avec la matrice. Ces travaux ont été complétés avec succès par les industriels producteurs de fibres qui ont développé des géométries et des matériaux constitutifs plus performants. Il est très vite apparu qu'en fonction de la fibre utilisée, de son dosage, de la qualité de la matrice mais aussi de la mise en œuvre, les propriétés obtenues pouvaient varier de manière significative.

Introduction générale

Si on cherche à faire un bilan sur le plan de l'utilisation industrielle, on s'aperçoit que les fibres se sont imposées là où existaient des problèmes technologiques qui rendaient l'emploi du béton armé coûteux ou aléatoire. Les principales applications sont ainsi les dallages industriels, le béton projeté et les pieux forés. Prenons l'exemple du béton projeté en tunnel ou en canalisation. La solution traditionnelle consiste à fixer un treillis soudé à la paroi et à projeter un béton en couverture. Cependant, la pose du treillis est longue et coûteuse, et cette technique peut entraîner des défauts de remplissage dans la mesure où le treillis fait écran au béton. Le béton projeté de fibres métalliques est donc, dans ce cas, une solution à la fois économique et de meilleure qualité.

Il convient de noter que ces applications concernent des domaines où le support est un garant de la sécurité. Cette situation a permis de se satisfaire de l'empirisme qui préside à l'utilisation de ces matériaux. Néanmoins, l'utilisation accrue des BFM ainsi que la volonté d'étendre leurs domaines d'utilisation posent le problème du dimensionnement des structures. Ceci explique que, malgré un nombre important d'essais réalisés sur des éléments de structures porteurs, peu d'applications ont vu le jour au plan industriel.

C'est dans ce contexte que se situe ce travail dont l'objectif est étude du comportement en flexion d'un mortier écologique renforcé par des fibres métalliques

De ce fait, notre travail est réparti en trois chapitres :

Le premier chapitre constitue une étude bibliographique (définitions, généralités sur les bétons autoplaçants et les mortiers autoplaçants) ainsi que les travaux existant dans la littérature sur les mortiers autoplaçants fibrés.

Le deuxième chapitre présente les différentes formulations des matériaux utilisés et leurs caractérisation (ciment, sable, eau, superplastifiant, fibres, fillers) ainsi que la formulation des mortiers fibrés et non fibrés. Le mortier avec poudre de marbre (MPM) est confectionné avec différents pourcentages de fibres à mi- crochets (1%, 2%, et 3%), avec des fibres de longueur égale à 1.5 cm. Celui-ci est constitué de 70% de poudre de marbre et 30% de sable, on l'appellera mortier écologique.

Introduction générale

Le **troisième chapitre** est consacré aux différents essais réalisés et à l'interprétations des résultats obtenus. Les résultats de la caractérisation à différents âges des mortiers confectionnés avec différents dosages en fibre métallique à l'état frais et à l'état durci seront présentés.

Enfin, nous terminerons ce travail par une conclusion générale et d'éventuelles perspectives.

CHAPITRE I

Etude

bibliographique

Le béton autoplaçant

I.1. Introduction

De nos jours, le béton fait partie de notre cadre de vie, c'est l'un des matériaux de construction les plus utilisés dans le monde. En effet, la simplicité de sa fabrication et de sa mise en place, son aspect durable et économique en plus des performances mécaniques qu'il assure, ont légitimé son utilisation pour réaliser les ouvrages les plus divers.

Le béton est utilisé dans tous types de construction : bâtiments, ouvrages d'art, monuments et éventuellement dans les éléments de décoration... Il permet également la réalisation de produits de préfabrication, d'éléments de structures et autres ; tels que : tuyaux, blocs, poutrelles, pavés, planchers, cloisons, escaliers...

Le béton autoplaçant (BAP) occupe une place dans le domaine du bâtiment et du Génie- Civil depuis son invention. En 1986, L'idée de produire des BAP est apparue pour la première fois au Japon, où Okamura a proposé l'utilisation des BAP après avoir effectué une étude fondamentale sur la fluidité du béton et avoir développé un mélange fortement liquide qui a une grande déformabilité. Depuis, le Japon fût pionnier dans le développement de cette nouvelle technique [1].

En 1988, les premiers prototypes pratiques du BAP ont été produits en utilisant des matériaux déjà disponibles sur le marché. Afin de satisfaire les conditions habituellement contradictoires (déformabilité et résistance à la ségrégation), on a fait appel à la technique des bétons coulés sous l'eau. En effet, la première génération des BAP est formulée de la même manière que les bétons destinés aux structures submergées, mais avec une viscosité plus faible et donc une maniabilité plus élevée. Ensuite, en 1996, les pays européens ont commencé à formuler ces bétons et les utiliser dans la construction des ponts, des murs et des tunnels [2].

Et en 2003, les instituts de production et de la préfabrication américaine ont pu définir les BAP comme : [3]

- Un béton fluide et non ségrégeable qui peut remplir le coffrage sans consolidation.
- Un béton fortement réalisable pour les structures complexes.
- Un béton qui tient son homogénéité dans n'importe quel type de coffrage.

L'utilisation des BAP a permis l'élimination d'énormes problèmes de mise en œuvre tels que la vibration, le blocage et la ségrégation.

Ce premier chapitre comporte des généralités sur les bétons autoplaçant, il traitera le concept et la caractérisation des BAP.

I.2. Définition des bétons autoplaçants

Le béton autoplaçant est défini selon l'Annexe Nationale NA de la norme SN EN 206-1 comme suit : Le béton frais est appelé autoplaçant lorsqu'il se compacte suffisamment grâce à son poids propre tout en ne présentant pas de ségrégation.

Le BAP est un béton très fluide, homogène et stable sa mise en œuvre s'effectue sans vibration mécanique, il est principalement caractérisé par son comportement à l'état frais tel que la fluidité élevée (décrite par l'essai d'étalement) et la résistance suffisante à la ségrégation (la stabilité). [4].

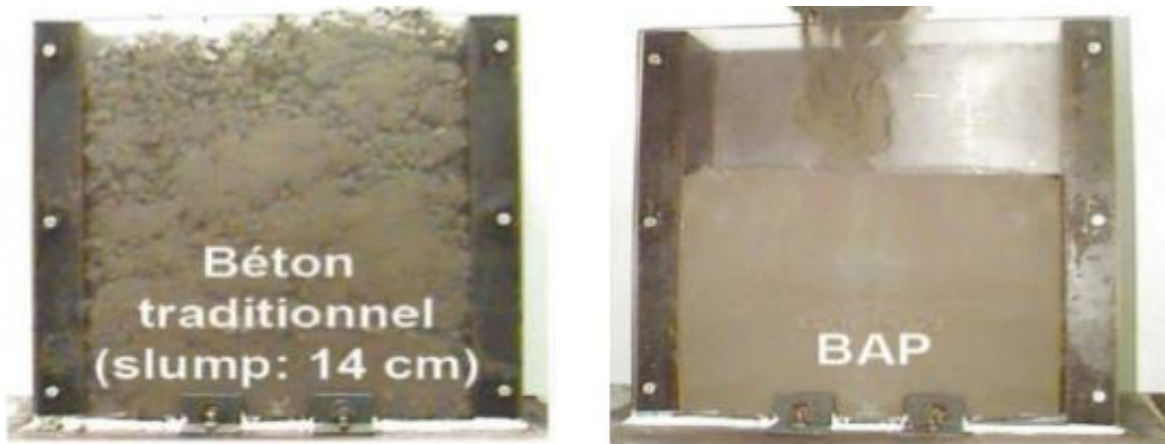


Figure I.1 : Comparaison entre la mise en place d'un béton traditionnel et d'un BAP [5]

La formulation des BAP se différencie par rapport à celle du béton ordinaire. En effet, les BAP possèdent un même dosage en ciment et en eau que les bétons ordinaires (BO), ainsi qu'un volume de sable assez proche. C'est donc principalement l'ajout d'une addition qui sert de substitut aux gravillons. Les proportions exactes de chaque constituant dépendent de la méthode de formulation choisie.

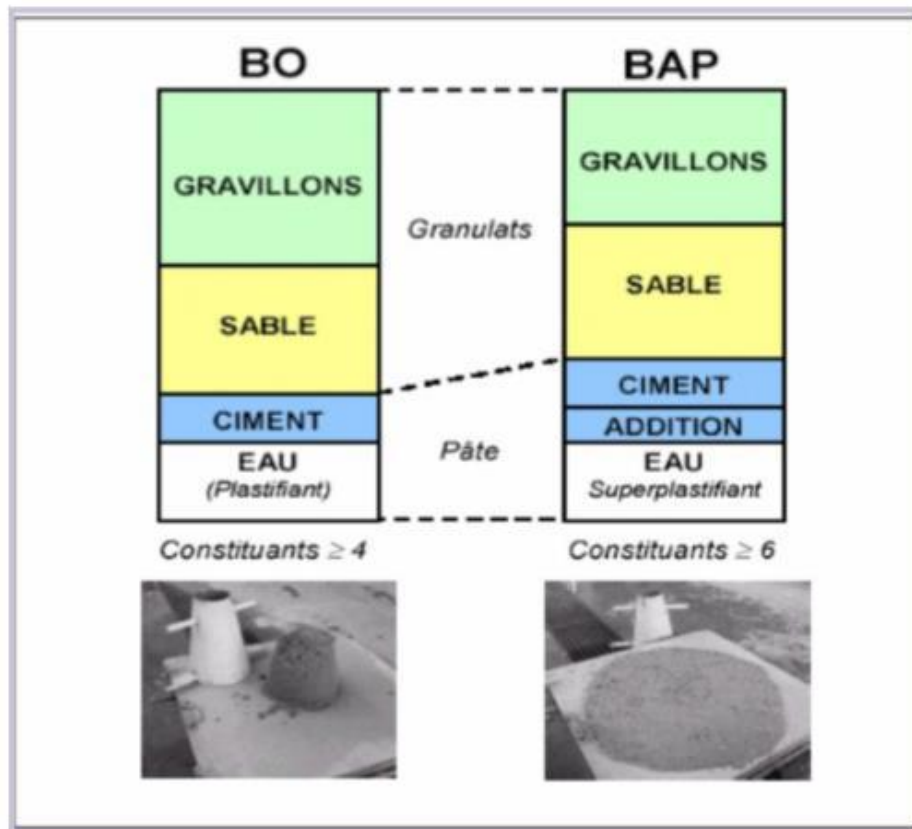


Figure I.2 : Composition et aspect d'un BAP et d'un BO. [6]

I.3. Avantages des BAP :

Les BAP peuvent être considérés comme des matériaux de construction innovants qui offrent beaucoup d'avantages par rapport aux autres bétons, parmi ces avantages on peut citer [7] :

- Mise en œuvre sans vibration qui réduit les nuisances sonores ;
- Réduction du coût de la main d'œuvre ;
- Durée de construction plus courte ;
- Une diminution de risque de fissuration ;
- Bétonnage de zones fortement ferrillées et à géométrie complexe ;
- Une pénibilité réduite pour les maçons ;
- Coulage de murs verticaux de grande hauteur ;
- Des aspects de surface d'une bonne régularité.

Malgré tous ces avantages, les BAP présentent aussi certains inconvénients :

- Augmentation du coût des matières premières (additions, adjuvants) ;
- Modifications des outils de fabrication (outils de mise en place).

I.4. Classification des BAP

La notion de classification des BAP est apparue tardivement et constitue pourtant un paramètre essentiel du développement de ces bétons.

À l'origine, la formulation de BAP, imaginée par les Japonais (et, plus particulièrement, le professeur Okamura à la fin des années 1980), est conçue pour réaliser des ouvrages de génie civil, à forte densité d'armatures, pour lesquels des anomalies de mise en œuvre étaient redoutées. Aujourd'hui, et plus particulièrement en Europe, l'utilisation des BAP se développe dans le domaine de la préfabrication et dans celui du béton de bâtiment coulé en place, nécessitant des formulations de BAP différentes : pour le bâtiment elles doivent être moins performantes techniquement (en termes de caractéristiques mécaniques à 28 jours et de qualités d'ouvrabilité) et plus économiques.

Par contre, la problématique spécifique de la capacité à donner de beaux parements est à prendre en compte pour les applications verticales.

On distingue donc aujourd'hui, en France (conformément aux Recommandations pour l'emploi des BAP éditées par l'AFGC et le PN BAP), trois catégories :

- **Catégorie 1** : il s'agit des ouvrages horizontaux de faible épaisseur (planchers, dallages) pour lesquels le ferrailage est léger et le béton peut être facilement réparti sur toute la surface
- **Catégorie 2** : elle couvre les ouvrages horizontaux épais pour lesquels les risques de ségrégation statique sont importants, et les ouvrages verticaux courants (on exclut le cas des ouvrages à très forte densité de ferrailage) ;
- **Catégorie 3** : ce sont les ouvrages exigus ou très fortement ferrillés (pour lesquels l'écoulement du béton dans le coffrage est le plus difficile).

I.5. Domaine d'utilisation des BAP

Les BAP sont utilisables aussi bien pour la réalisation d'ouvrages horizontaux que verticaux, sur tous les types de chantier, de bâtiments ou de génie civil et pour la réalisation de nombreux produits préfabriqués en béton [8]. La plupart des ouvrages peuvent être réalisés en BAP (voiles, poteaux, piles, poutres, planchers, dalles, dallages, fondations, éléments de façade, mobiliers urbains, etc.).

Les BAP sont particulièrement adaptés à la réalisation de structures pour lesquelles la mise en œuvre d'un béton classique est délicate, c'est-à-dire, présentant des :

– densités de ferrailage importantes ;

- formes et géométries complexes : voiles, courbes, ... ;
 - voiles minces et de grande hauteur : piles de ponts, ... ;
 - voiles complexes avec de nombreuses réservations ou de grandes ouvertures ;
- exigences architecturales et qualité de parement particulière. A titre d'exemple, nous citons quelques réalisations avec les BAP :
- Le pont Akashi Kaikyo (figure I.3), le plus long pont suspendu au monde (3910 m de longueur) où 390 000 tonnes de béton autoplaçant ont été versés dans les coffrages des fondations et des piliers très congestionnés sans vibration. [9]



Figure I.3 : Le pont Akashi Kaikyo [9].

- La tour Landmark Tower (Figure I-4), où un béton autoplaçant d'une excellente déformabilité a été mis en place avec succès dans 66 colonnes de 40 m de hauteur chacune [10].



Figure I.4 : La tour Landmark Tower (Yokohama, près de Tokyo) [10].

I.6. Les critères de composition des BAP

Après plusieurs recherches effectuées en laboratoires [11], les essais ont montré que pour répondre aux exigences du cahier des charges, la composition d'un béton autoplaçant doit avoir certaines caractéristiques [12], soit :

I.6.1. Un volume de pâte important

Les frottements entre granulats sont source de limitation vis-à-vis de l'étalement et de la capacité au remplissage des bétons. Le rôle de la pâte (ciment + additions + eau efficace + air) étant précisément d'écarter les granulats les uns des autres, son volume dans les BAP est donc élevé [13]

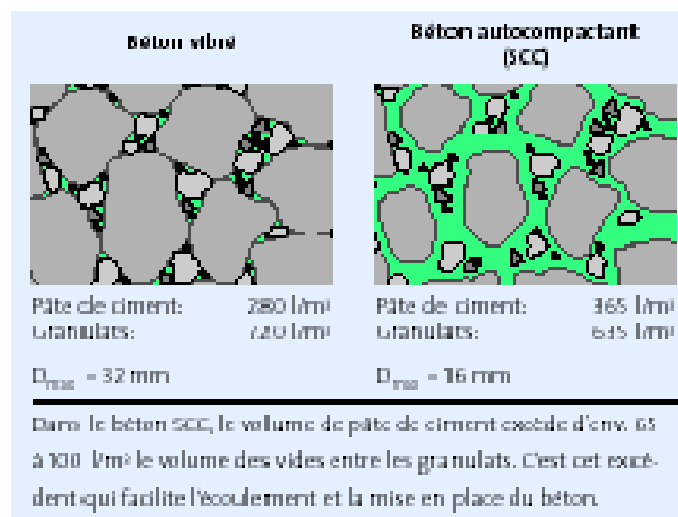


Figure I.5 : dispersion des granulats par excès de pâte

I.6.2. Une quantité de fines (<80 µm) importante

Afin de garantir le compromis entre stabilité et maniabilité tout en limitant les risques de ségrégation et de ressuage, les BAP contiennent une quantité de fines (de l'ordre de 500 kg/m³) supérieure à celle des bétons conventionnels.

Le choix des additions et de leur teneur respective dans les BAP est déterminé en fonction des exigences de résistance à la compression à 28 jours, des critères de durabilité et des paramètres d'ouvrabilité telles qu'imposées par les normes applicables (DTU 21, norme XP P 18-305, normes produit préfabriqué en usine, etc.).

I.6.3. L'utilisation des superplastifiants

Les superplastifiants permettent d'obtenir des bétons très fluides. Ces fluidifiants ont le rôle de défloculants, ainsi les particules solides sont dispersées par combinaison d'effets

électrostatiques et stériques et la proportion d'eau libre est plus importante. Toutefois un dosage trop élevé (proche ou supérieur au dosage de saturation) peut augmenter la sensibilité du béton à des variations de teneur en eau vis-à-vis du problème de la ségrégation et du ressuage.

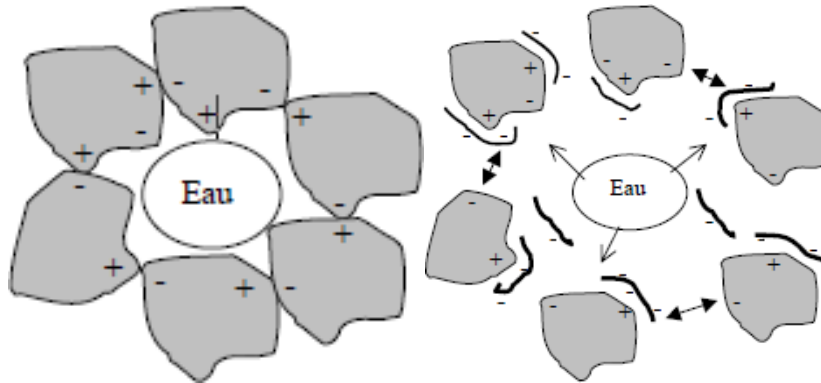


Figure I.6 : Mode d'action des super-plastifiants - Défloculation des grains de ciment [14]

La Figure I.6 illustre l'effet d'introduction d'un superplastifiant sur l'ouvrabilité du béton ; plus le dosage en superplastifiant est grand plus le béton devient fluide jusqu'à une certaine valeur où l'augmentation du dosage en superplastifiant n'a plus d'effets sur l'étalement. De la même manière, la viscosité du BAP change faiblement jusqu'à un dosage à partir duquel elle commence à baisser d'une manière significative.

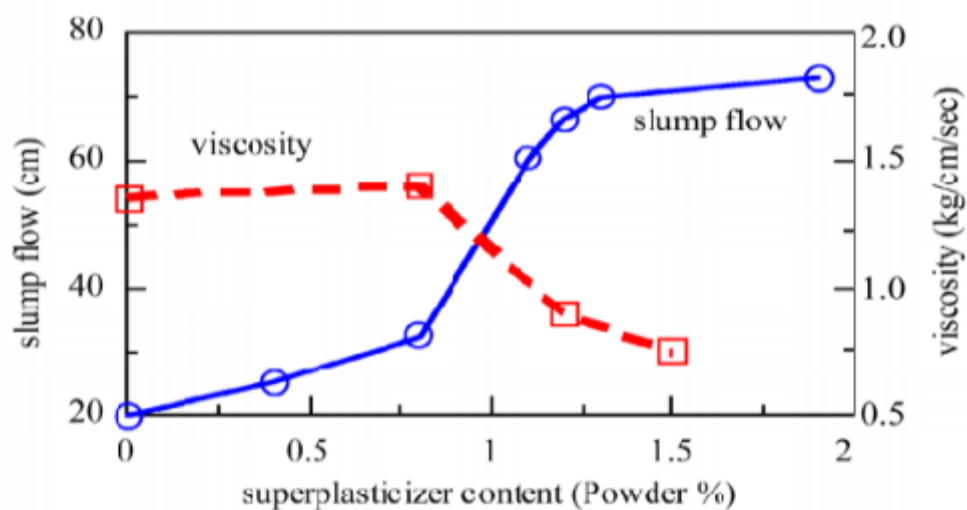


Figure I.7 : Etalement et viscosité en fonction du dosage en super plastifiant [15]

I. 6.4. Utilisation éventuelle d'un rétenteur d'eau (dit agent de viscosité)

L'ajout d'un superplastifiant ayant pour effet d'augmenter l'ouvrabilité du béton mais également de réduire sa viscosité, afin de minimiser ce dernier point, les BAP contiennent souvent des agents de viscosité. Ce sont généralement des dérivés cellulosiques, des polysaccharides ou des suspensions colloïdales, qui interagissent avec l'eau et augmentent la

viscosité de celle-ci. Ces produits, comme les fines, ont pour rôle d'empêcher le ressuage et de limiter les risques de ségrégation des granulats en rendant la pâte plus épaisse [16].

L'utilisation de ces produits semble se justifier dans le cas des bétons ayant des rapports eau/liant élevés car les fines ne sont pas toujours suffisantes pour fixer l'eau dans le béton.

I. 6.5. Un faible volume de gravillon

Il est possible d'utiliser des granulats concassés ou roulés de diamètre maximal compris entre 10 et 20 mm pour la formulation des BAP. Toutefois, comme les gravillons sont à l'origine du blocage du béton en zone confinée, il faut en limiter le volume. D'un autre côté, la présence de gravillons permet d'augmenter la compacité du squelette granulaire du béton, ils permettent de réduire la quantité de liant nécessaire pour obtenir l'ouvrabilité et la résistance souhaitées. En général, ces considérations conduisent à adopter un rapport gravillon/sable de l'ordre de 1 dans les BAP.

I.7. Constituants d'un béton autoplaçant :

Un béton est constitué de deux parties principales : les granulats et la pâte (figure I.8). Par rapport aux bétons classiques, les BAP ont deux constituants supplémentaires qui doivent être présent, dans la composition du béton. [17]

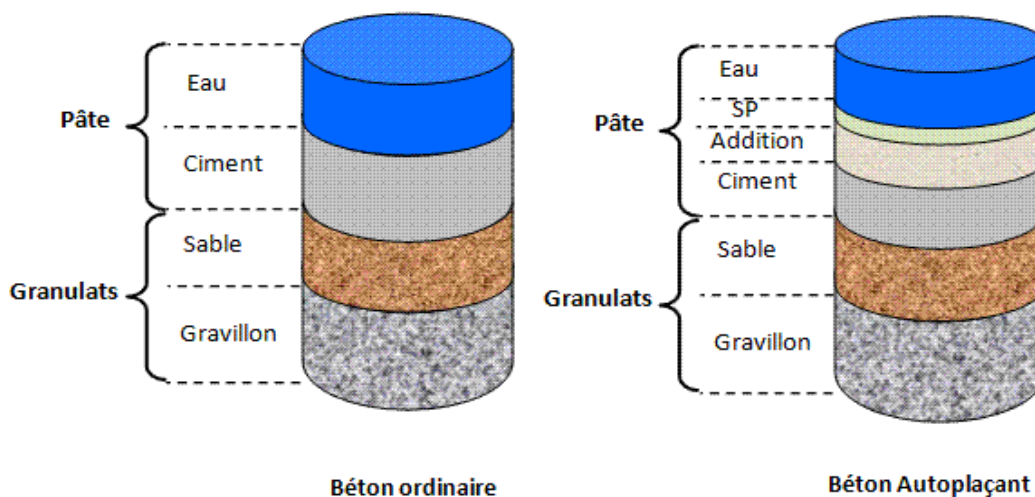


Figure I.8 : Constituants des bétons Ordinaires et des BAP [17]

Les constituants du BAP ont un rôle très important dans la détermination des propriétés des BAP à l'état frais et durci. Donc, il est nécessaire de connaître le rôle que peut jouer chaque constituant ainsi que leur influence sur les propriétés des BAP. Cependant, les constituants d'un BAP, sont les mêmes que celui d'un béton ordinaire et qui sont :

- Ciment

- Granulats
- Eau
- Les ajouts minéraux
- Les superplastifiants

Les deux derniers constituants sont considérés comme des composants nécessaires pour un tel béton.

I.7.1) Les ciments

Le ciment est un liant hydraulique, une matière inorganique finement moulue qui, gâchée avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit en réaction au processus d'hydratation. Après durcissement, cette pâte conserve sa résistance et sa stabilité, même sous l'eau. Le ciment est un constituant de base du béton. Le ciment hydraté constitue un liant entre des gravillons (dans les bétons), entre des blocs (mortiers de pose de blocs béton, mortier-colle de carrelages...). [18]



Figure I.9 : Le ciment Portland.

Le ciment portland donne au mortier de maçonnerie sa résistance mécanique, en particulier la résistance initiale, qui est indispensable à une époque où la vitesse de construction est telle que l'on exige qu'un mur puisse supporter une charge importante le lendemain même de sa construction. Les mortiers de ciment portland manquent de plasticité, ont un faible pouvoir de rétention d'eau et sont difficiles à travailler. Le dosage du rapport entre le ciment et le sable est en général volumétrique de 1,3 et le rapport de l'eau sur ciment est environ 0,35. De plus, un dosage en ciment les rend pratiquement imperméables.

Dans la plupart des cas, on utilise du ciment Portland avec ou sans constituants secondaires (CPJ CEM I et CPJ-CEM II/A ou B).

Les ciments sont essentiellement constitués de clinker auquel on peut ajouter les autres constituants suivants :

- Calcaires.
- Laitiers granulés de haut fourneau.
- Cendres volantes.
- Fines calcaires.
- Pouzzolanes naturelles.
- Schistes calcinés.
- Fumées de silice.

Il existe cinq types de ciments courants qui sont :

- Le ciment portland.
- Le ciment portland composé.
- Le ciment de haut fourneau.
- Le ciment pouzzolanique.
- Le ciment au laitier et aux cendres.

En principe tous ces ciments conviennent pour la fabrication de BAP.

I.7.2) L'eau

Le dosage en eau est un facteur très important de la composition du béton, on bien l'influence qu'il a sur la propriété du béton par les vides créés, lorsque l'eau s'élimine pour différentes raisons (évaporation, combinaison chimique, absorption par les granulats) [19].



Figure 1.10 : L'eau

Ce constituant peut en influencer la qualité du béton, en fonction de sa qualité et quantité pour cela il ne doit pas contenir de matière de suspension au-delà des tolérances réglementaires :

[20]

- 2g/l pour les bétons à haute résistance,
- 5g/l pour les bétons à faible résistance.

L'eau introduite lors du gâchage remplit deux fonctions [21] :

- l'une physique qui confère au béton les propriétés rhéologiques d'un liquide ;
- et l'autre chimique qui contribue au développement de la réaction dite d'hydratation.

I.7.3) Les granulats



Gravier



Sable

Figure I.11 : les Granulats utilisés dans le béton

Sables, graviers ou cailloux constituent le squelette du béton. Ils doivent être chimiquement inertes vis-à-vis du ciment. Les formations géologiques à partir desquelles il est possible de produire des granulats à béton peuvent être d'origine détritique (essentiellement alluvionnaire), sédimentaire, métamorphique ou éruptive [22].

Selon leur origine on distingue des granulats roulés, extraits de ballastière (ou sablière) naturelles ou dragués en rivière ou en mer, et concassés, obtenus à partir des roches exploités en carrière [23].

Ces matériaux sont quelques fois encore appelés « agrégats ». Ils sont compris entre 0 et 125 mm [21].

Voici deux types de granulats (Roulés et concassés) selon la forme :



Granulats roulés.



Granulats concassés.

Figure I.12 : Les types de granulats selon leurs formes

Les BAP sont réalisés avec des granulats roulés ou concassés, toutefois, comme pour un béton ordinaire, la forme des granulats a une influence sur le comportement rhéologique. Le coefficient de frottement est plus faible entre les granulats roulés qu'entre les granulats concassés [21].

Les granulats roulés présentent par ailleurs un plus petit vide intergranulaire, ce qui nécessite une plus petite quantité de pâte de ciment pour le remplir. Cependant pour le sable, et face au problème de la surexploitation des gisements, il est préférable d'utiliser un sable concassé qu'un sable roulé. Le sable concassé est un produit fini obtenu au bout d'une succession d'opérations de concassage appliquée à des roches extraites en carrière. Sa granulométrie peut être rendue quasi uniformément riche sur une étendue granulaire imposée par criblage. De plus, le sable concassé apporte au mélange une part non négligeable de fines qui améliorent la maniabilité, la compacité, la résistance et la durabilité du béton [24].

D'autre part la flottabilité des granulats concassés dans la pâte de ciment est meilleure, raison de leur plus grande surface spécifique à masse identique. Afin d'empêcher tout risque de blocage lors du coulage, on limite en général le diamètre maximal des granulats à 16 mm [22].

Les granulats sont classés en plusieurs catégories avec des spécifications particulières pour chacune d'elles :

- **La catégorie A** correspond aux granulats destinés à la confection du béton de qualité tels que ceux destinés à la construction d'ouvrages d'art ou de bâtiments pour lesquels la résistance caractéristique est supérieure ou égale à 35 MPa ; éventuellement certaines caractéristiques des catégories B ou C étant tolérées [22].
- **Les granulats de catégorie B** sont destinés à de bons bétons ainsi qu'à ceux pouvant être situés dans un environnement agressif, à condition que leur coefficient d'absorption respecte les spécifications imposées aux granulats de catégorie A [22].
- **Les granulats de catégorie C et D** conviennent pour les bétons courants à condition, dans le cas d'utilisation de granulats D, que seuls deux de leurs caractéristiques soient présentés et que les autres correspondent à celle de catégories supérieures, faute de quoi ils ne doivent pas être utilisés dans la courante confection de béton [22].

Le choix d'une granularité continue appropriée est très important, étant donné la forte incidence du volume des vides sur la quantité nécessaire de pâte de ciment.

I.7.4) Les ajouts minéraux

Les ajouts cimentaires sont des contributeurs aux propriétés des coulis frais et durcis par action hydraulique où pouzzolanique où les deux à la fois. Les pouzzolanes naturelles, les cendres volantes, le laitier de haut fourneau granulé broyé et les fumées de silice en sont des exemples courants.

Ces ajouts sont incorporés aux mélanges de coulis où de béton pour différentes raisons :

- Améliorer Les caractéristiques rhéologiques des coulis (viscosité et stabilité).
- Améliorer la résistance du coulis durci et augmenter sa durabilité.

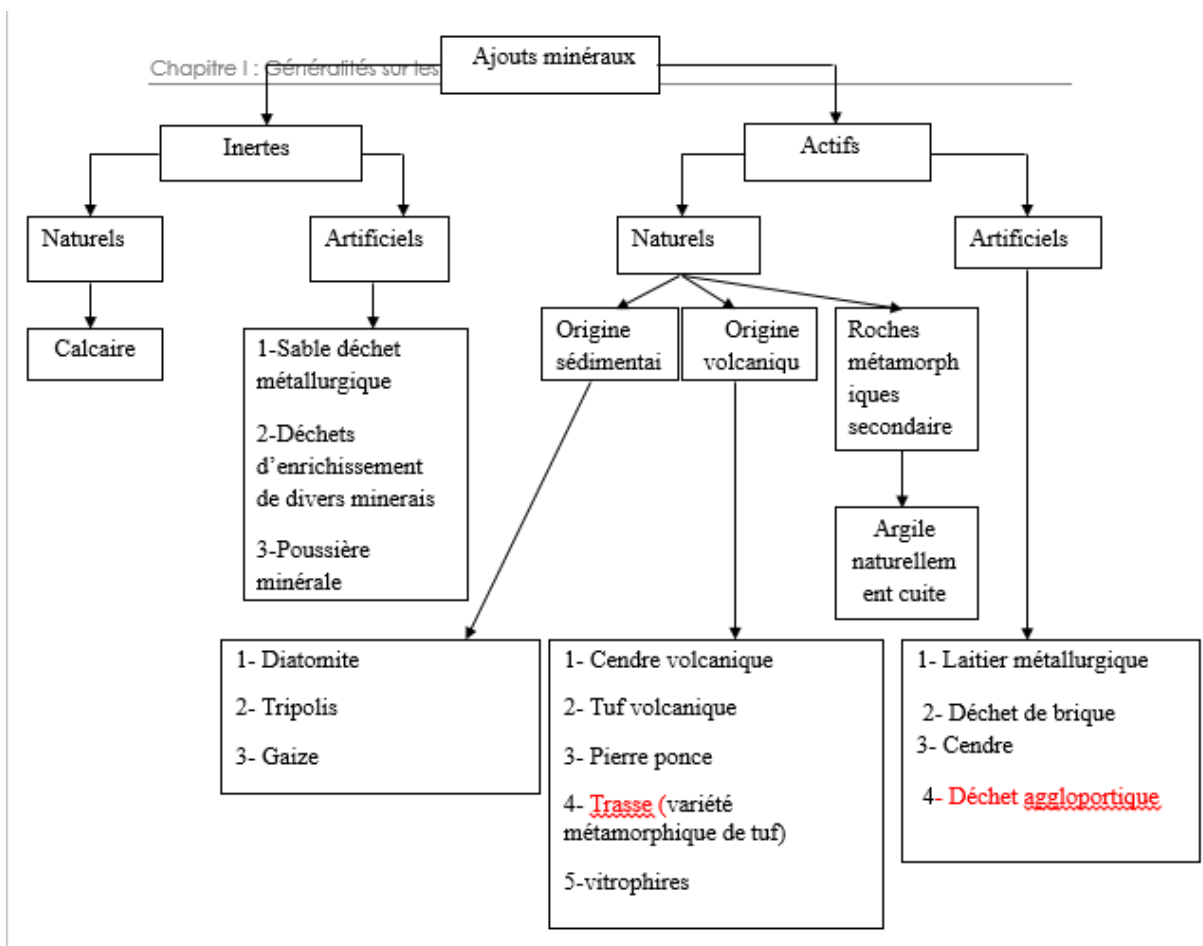
- Réduire le coût de la matière liante : ces ajouts étant le plus souvent des sous-produits d'autres industries, leur incorporation dans le ciment avec des proportions pouvant atteindre les 30% permet de réduire le prix de revient de la matière liante.
- Favoriser la pénétrabilité dans les fissures fines : certains de ces ajouts sont plus fins que le ciment (fumée de silice).

L'utilisation croissante d'ajouts cimentaires dans le béton de ciment Portland a entraîné la publication en 1982 d'une nouvelle norme CSA- A23.5, qui fut révisée en 1986. La norme CSA A23.5 reconnaît trois groupes d'ajouts cimentaires : les fumées de silice, les pouzzolanes, les Laitiers granulés.

a) Origine et classification

Il existe deux types d'ajouts selon leurs origines :

- Ajouts minéraux inertes
- Ajouts minéraux actifs (naturels ou artificiels).



b) Ajouts cimentaires actifs :

On appelle additifs minéraux actifs (hydrauliques), substances naturelles ou artificielles, qui sont finement broyées, mélangées à de la chaux et mélangées à de l'eau pour lui conférer des propriétés hydrodynamiques. Lorsqu'il est mélangé avec du ciment, il augmente sa résistance à l'eau, les additifs actifs du ciment contiennent une substance capable de réagir chimiquement avec l'oxyde de calcium hydraté dans des conditions normales et de produire des composés insolubles.

❖ Fumée de silice :

Selon la norme NF P 18-502 « fumées de silice » : il s'agit de : Poudre amorphe divisée résultant de la production d'alliages de silicium. Elle est entraînée par les gaz, depuis la zone de combustion des fours, vers le système de captage. La fumée de silice est un sous-produit de la fabrication du silicium métallique ou des différents ferroalliages contenant du silicium (comme : FeSi, CaSi) Lors de la réduction du quartz en silicium dans un four à 2000° C, il y a production des vapeurs de SiO, au moment de leur passage par les parties les plus froides du four et dès leur contact avec l'air, ces vapeurs s'oxydent et se condensent sous forme de microsphères de silice. Selon la norme, on distingue deux classes A et B les fumées de silice de classe A étant les plus riches en silice et les plus fines. Compte tenu de leur très grande finesse et de leur très grande réactivité avec la portlandite libérée par l'hydratation du ciment, la proportion des fumées de silices est limitée à 10% du poids de ciment. Leur emploi est réservé aux bétons contenant un superplastifiant [25].



Figure I.13 : La fumée de silice

❖ Laitier de hauts fourneaux :

Le laitier de hauts fourneaux est généralement broyé et ajouté en quantité variables au clinker, le laitier améliore les propriétés rhéologiques des matériaux cimentaires et aussi augmenté les performances mécaniques et la durabilité du béton. Le remplacement d'une partie du ciment par des laitiers de hauts fourneaux permet de diminuer le seuil et la viscosité des pâtes de ciment



Figure I.14 : Laitier de hauts fourneaux

❖ La pouzzolane naturelle :

Les pouzzolanes naturelles, substances finement broyées ont une finesse à peu près identique à celles du ciment, sont généralement d'origine volcanique ou des roches sédimentaires. Elles n'ont pas des propriétés hydrauliques intrinsèques mais, en présence d'eau avec de l'hydroxyde de chaux libéré par le clinker à la cour de son hydratation, elles forment, elles aussi des hydrates stables et peu solubles dans l'eau. Les constituants qui, par le même processus que les pouzzolanes, conduisent également à la formation d'hydrates stables sont réputés avoir des propriétés pouzzolaniques [25].

Les pouzzolanes naturelles sont essentiellement composées de silice réactive (dans des proportions supérieures à 25 %), d'alumine et d'oxyde de fer [26].

❖ Les ajouts cimentaires inertes :

Les roches carbonatées, telles que le calcaire, la craie, la dolomite et la marne, sont largement utilisées comme additifs naturels au ciment, cependant, cette propriété est conférée aux roches plus dures car les roches tendres sont considérées comme difficiles à broyer (matériau colmatant les milieux de broyage).

❖ Le calcaire :

Selon la norme **NF P18-508**, les additions calcaires sont des produits secs finement divisés, obtenus par broyage et /ou sélection, provenant de gisement de roches calcaire pouvant être dolomitique, massives ou meubles, d'origine sédimentaires carbonatées, elles sont principalement constituées de carbonate de calcium CaCO_3 et de magnésium MgCO_3 , elles sont rayable par le canif, et leur densité varie entre **2,4 ÷ 2,9**. Le calcaire est formé par du carbonate de calcium, fait effervescence à froid, avec les acides, suivant leurs origine les calcaires subdivisent en :

- Calcaires détritiques ;
- Calcaires d'origine chimique ;
- Calcaire dolomitique et dolomies.

❖ Fillers :

Ils sont élaborés à partir de matériaux calcaires, de dolomites ou de calcites finement écrasés. Ce sont de bons correcteurs de courbes granulométriques utilisés aussi pour augmenter la quantité de fines. La taille dans une gamme inférieure à 0,125mm sera un très grand avantage [7].

Il est à noter que la dolomite peut présenter des problèmes de durabilité à cause de la réaction alcali - carbonate. Le filler calcaire intervient dans la rhéologie des pâtes de ciment par sa granularité et sa réactivité chimique. Il forme avec la pâte de ciment une liaison qui améliore les résistances mécaniques par comparaison à l'effet d'un filler inerte comme le quartz. Cette liaison peut être renforcée par l'utilisation de fillers mixtes (calcaire + silice réactive) ou de rapports eau/ciment plus faibles [23].

❖ Le marbre

Le marbre est une roche métamorphique résultant de la transformation d'un calcaire pur (figure I.15), souvent veinée de couleurs variées. Mis en œuvre dans la construction et la décoration, le marbre se révèle être une matière noble et durable très recherchée.



Figure I.15 : Gisement de marbre

Les roches métamorphiques sont issues de la transformation de roches préexistantes par une chaleur intense ou/et de très fortes pressions.

Le degré de pureté du marbre est responsable de sa couleur et de son aspect : il est blanc si la roche dont il provient était uniquement composée de calcite (figure I.16).



Figure I.16 : Poudre de marbre

Cette pierre est souvent parcourue de veines et veinules de teintes très variées : de la grise pale au rouge vif qui donne l'aspect marbré. La classification des marbres est fondée sur les teintes ou les dessins : outre le marbre blanc, il existe des variétés beiges, bleues, roses, grises, jaunes, rouges, vertes, violettes ou noires. Selon l'aspect des rayures, on a des produits veinés, zonés, bigarrés, ramagés, etc.

Très souvent, des inclusions variées de minerais métalliques leur donne des couleurs très vives (sels de plomb, de zinc, d'antimoine, de molybdène, de magnésium ou d'étain).

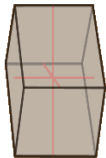
Les géologues distinguent deux formes de métamorphismes :

- Le métamorphisme de contact provoqué par la
- Chaleur d'une remontée magmatique.

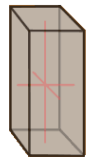
- Le métamorphisme régional qui se produit à l'occasion du plissement des chaînes de montagne.

Le marbre est du carbonate de calcium plus ou moins pur, de densité de 2.7 à 2.9. Selon ses configurations cristallines hexagonales ou orthorhombiques, on observe une transformation de l'ortho vers l'hexagonal autour de + 520°C. Le point de fusion est de +1340°C (+/-10°C)

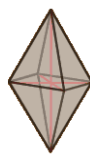
Système orthorhombique



Prisme

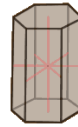
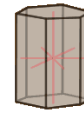


Prisme



Bipyramide

Système hexagonal

Prisme
hexagonalPrisme
hexagonalPyramide
hexagonale

- **Composition minéralogique :**

Le marbre contient surtout de la calcite; mais peut contenir plus ou moins de la dolomite. On peut y trouver de la brucite, de l'olivine, de la serpentine, de la trémolite, du phlogopite en cas

Connue que sous son nom de spath calcaire ou de chaux carbonatée. Peut-être est-ce de transition vers les calcaires à silicates et la skarn. Les marbres sont facilement rayés par le canif, ce qui sert à les distinguer des quartzites blancs qui sont beaucoup plus durs. Le marbre a des cristaux généralement rhomboédriques.

Le marbre blanc est une roche de calcaire très pur (CaCO_3), aussi c'est une calcite, qu'elle est l'un des minéraux les plus communs avec la dolomite représente 22% des roches sédimentaires c'est-à-dire 237 millions de kilomètres cubes...de roches carbonatées. Pendant très longtemps la calcite n'était Haidinger qui lui a donné le nom de calcite sous lequel elle est maintenant universellement connue.

- **Quelques-unes des propriétés physico-chimiques de la calcite :**

✚ **Dureté :** 3

✚ **Trace :** blanche

✚ **Couleur :** incolore, blanche, jaune, brune, rouge, noire

- ✚ **Transparence** : transparente, translucide
- ✚ **Eclat** : vitreux, nacré
- ✚ **Densité** : 2,6 à 2,8
- ✚ **Indice de réfraction** : de 1,48 à 1,65
- ✚ **Luminescence** : blanche, jaunâtre, bleuâtre, rougeâtre, orange, verdâtre
- ✚ **Composition chimique** : 100% CaCO₃
- ✚ **Propriétés chimiques** : Éclate dans la flamme et libère CO₂, le CaO naissant colore la flamme en orange, bouillonne dans HCl

- **Domaines d'utilisation**

La poudre de marbre est une matière calcaire d'un blanc pur, au grain légèrement plus gros que la craie. Elle est utilisée comme fond, pour les fresques en raison de son imperméabilité parfaite. La poudre de marbre peut également servir de matière de charge pour apprêts, pâtes de modelage et pigments.

- ✦ **Le Tadelack :**

Généralement, Le Tadelack est un enduit composé d'un volume de chaux, deux volumes de poudre de marbre et de l'eau à obtention d'une pâte plastique qui a pour propriété de les rendre étanches. Il prouvera donc son utilité dans toutes les pièces d'eau, murs de salle de bain, sanitaires...

Son côté décoratif appelé aujourd'hui le Tadelack a dévoilé ses appareils (pompes, siphons) sur tous les supports muraux mais aussi sur les objets de décoration.

- ✦ **Le Stuc :** Ces techniques d'origine italienne, permettent de retrouver toute la noblesse du marbre, la richesse et la finesse de son nuançage.

Aujourd'hui, tout enduit mince ou peinture lissée, au rendu brillant et à usage décoratif est appelé communément « stuc ». Il existe pourtant traditionnellement plusieurs techniques :

Stucs en plâtre, plâtre et chaux ou simplement avec chaux.



Dans son pays d'origine, l'enduit marmorino ou « Marmorino » est un mélange de poudre de marbre et de chaux, passé en plusieurs couches fines et resserré jusqu'à brillance.

On le trouve aussi bien dans les intérieurs humides romains qu'en extérieur entre de solides modénatures.

Le stuc vénitien, très utilisé dans les plus belles maisons vénitiennes, reflète la noblesse du marbre. Sa combinaison de transparences et de reliefs se décline en teintes chaleureuses et authentiques.

❖ La Peinture Acrylique

La peinture acrylique s'applique sur tous supports, pour créations et applications. Elle s'applique indifféremment sur le métal, PVC, polystyrène, verre, bois, plâtre, pâte à sel, papier, carton.



Pour 10 kg de peinture, mélanger ensemble : 1 litre d'eau, 1 cuillère à café d'agent mouillant, 200 g de rétenteur d'eau préparé et 3 litres de liant acrylique.

Mélanger, puis ajouter 3 kg de poudre de marbre, 3,2 kg de pigments au choix et 400 g de talc.

I.7.5. Les Superplastifiants

Les superplastifiants sont des produits organiques qui, ajoutés à de faibles proportions (de 0.2 à 2% environ) au béton frais permettent de modifier les propriétés rhéologiques durant une période plus en moins longue. L'utilisation de superplastifiants nous permet d'obtenir un béton très liquide pouvant être mis en place sans vibration ni ressuage ou ségrégation.[27]

En tant qu'adjuvant, le superplastifiant peut avoir plusieurs fonctions dans un mélange cimentaire. La fonction de base est la fluidification, puisqu'il provoque un important gain d'ouvrabilité d'un mélange. Le superplastifiant est responsable d'un effet de plastification : à même teneur en eau, il permet d'augmenter l'ouvrabilité, sans diminuer les résistances à long terme de la pâte, du mortier ou du béton. La fonction « réducteur d'eau » se manifeste par la

réduction du rapport E/C pour une même ouvrabilité. Ceci permet donc d'augmenter les performances mécaniques du mélange.

L'utilisation de superplastifiant dont l'action est schématisée sur (figure I.17) permet de concilier la diminution de la teneur en eau et la fluidité du béton tout en conservant de bonnes performances mécaniques du matériau.[28]

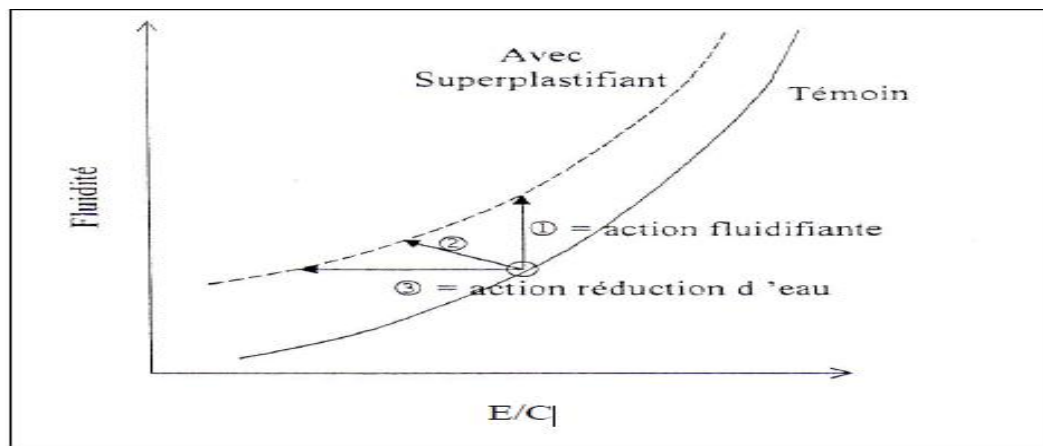


Figure I.17 : Les utilisations des superplastifiants

- 1 – augmentation de la fluidité (teneur en eau égale)
- 2 – diminution de la teneur en eau et augmentation de la fluidité
- 3 – diminution de la teneur en eau (à fluidité égale).

➤ Influence sur le moment d'addition du SP dans le béton

L'addition du superplastifiant ne doit jamais se faire sur un béton sec (c'est-à-dire avant l'ajout de l'eau). Il sera absorbé par les agrégats et le sable d'où son inefficacité avec le ciment. Le superplastifiant est plus efficace lorsqu'il est ajouté après l'humidification du béton (environ 75% de l'eau de gâchage) ou fractionné dans le cas d'un E/C très bas : 1/3 dans l'eau de gâchage 2/3 vers la fin du malaxage. Le temps optimal d'addition du superplastifiant dans le béton est 2minutes après le mélange eau ciment agrégats. A ce moment, le superplastifiant reste suffisamment disponible pour jouer son rôle de dispersant C3S et C2S, et ce qui explique l'augmentation de la fluidité.

➤ La compatibilité

Jusqu'à présent, on a toujours utilisé les expressions compatibles et non compatibles pour décrire l'interaction des ciments et des superplastifiants. Une combinaison

ciment/superplastifiant est dite non compatible quand un mortier ou un béton peuvent perdre leur affaissement initial en moins de 15min, tandis que dans d'autres cas des bétons peuvent conserver un affaissement supérieur à 200mm pendant 1h ou même 1h30min, sans phénomène de ressuage, de ségrégation et sans perte de résistance à 24 heures.

I.8. Les propriétés des bétons autoplaçants à l'état frais et l'état durci

I.8.1. Les propriétés principales d'un BAP à l'état frais

a) Essai d'étalement

Pour la détermination de l'étalement (Slump Flow) on utilise le même cône que celui normalement utilisé pour l'essai d'affaissement. Ce cône est placé sur une plaque d'étalement, à surface propre et humidifiée et de dimension suffisante, puis il est rempli de béton BAP. Le cône est ensuite soulevé et le BAP en sort en formant une galette qui s'élargit sous sa propre énergie, sans qu'il soit nécessaire de soulever et de laisser retomber la plaque, comme dans l'essai classique d'étalement. La valeur de l'étalement correspond au diamètre moyen de la galette de béton ainsi obtenue, qui devrait être comprise entre 600 et 800mm. La tendance à la ségrégation peut être évaluée qualitativement. Les granulats grossiers devraient être répartis uniformément et aucune concentration ou séparation de fines ne devrait apparaître sur les bords de la galette. Il est utile de documenter le résultat de cet essai au moyen de photographies. La façon de disposer le cône n'est pas réglementée en Suisse par une norme. L'important est de procéder toujours de la même manière.

Lorsque la petite ouverture se trouve en bas, le remplissage du cône avec le BAP est facilité et son soulèvement est empêché. Dans ce cas il en résulte une valeur d'étalement plus élevée de 20 à 40 mm, par rapport à celle obtenue avec le cône disposé en sens contraire pour le même béton

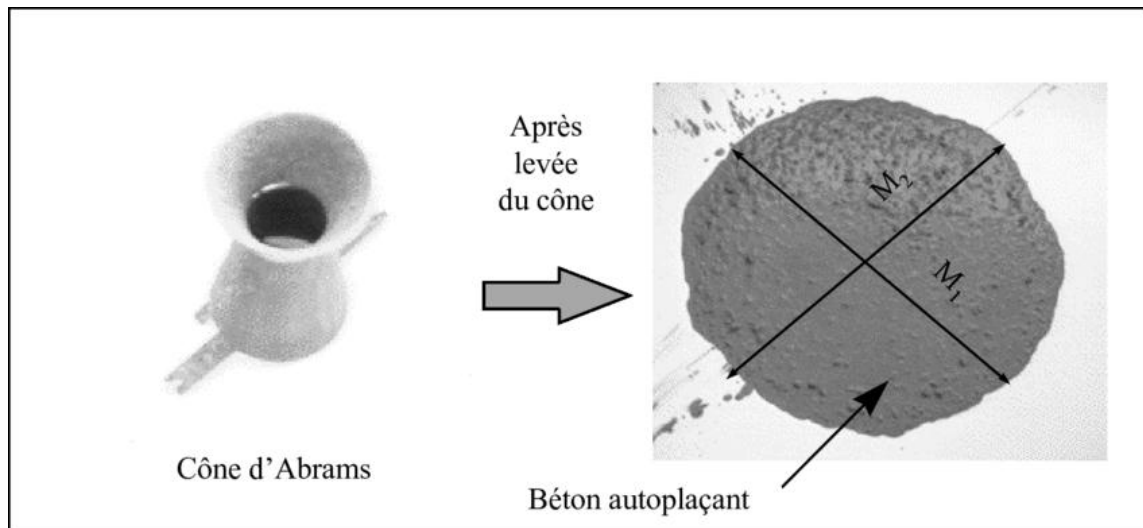


Figure I.18 : Essai d'étalement (SLUMP FLOM)

En 2002, les recommandations en termes d'étalement admissible définissaient la fourchette : 600-750 mm. Depuis, différentes classes de BAP ont été désignées en fonction du type d'application. Ainsi, différentes classes d'étalement ont été définies : [29]

- Classe SF1 : étalement compris entre 550 et 650 mm.
- Classe SF2 : étalement compris entre 660 et 750 mm.
- Classe SF3 : étalement compris entre 760 et 850 mm.

b) Essai stabilité au tamis

A la fin du malaxage, dix litres de béton sont versés dans un seau. Après une attente de quinze minutes, une masse 4,8 kg de béton est versée du seau sur un tamis de maille 5 mm.

Deux minutes plus tard, on pèse la quantité de pâte (laitance) ayant traversé le tamis.[2].Il consiste à mesurer la proportion π d'éléments fins de béton (laitance) passant au travers le tamis pour qualifier le béton vis-à-vis du risque de ségrégation et de déduire si le béton testé possède une stabilité satisfaisante ou non.

Les critères d'acceptabilité d'une formulation de BAP sont divisés en trois classes : [30]

- $0 \% < \pi \text{ (laitance)} < 15 \%$: stabilité satisfaisante,
- $15 \% < \pi \text{ (laitance)} < 30 \%$: stabilité critique,
- $\pi \text{ (laitance)} > 30 \%$: stabilité très mauvaise (ségrégation systématique, Béton inutilisable)



Figure I.19 : Essai de stabilité au tamis

c) Essai de la boîte en L

La boîte en « L » permet de tester la mobilité du béton en milieu confiné et de vérifier que sa mise en place ne sera pas contrariée par des phénomènes de blocage. 13 litres de béton sont mis dans la partie verticale puis on laisse le béton se reposer pendant 1 minute. La trappe est ensuite levée et le béton s'écoule dans la partie horizontale de la boîte à travers le ferrailage. A la fin de l'écoulement, on mesure les hauteurs H_1 , H_2 et le résultat est exprimé en termes de taux de remplissage H_2/H_1 . Ce rapport permet de caractériser la dénivellation et doit être supérieur à 0,8. [31].

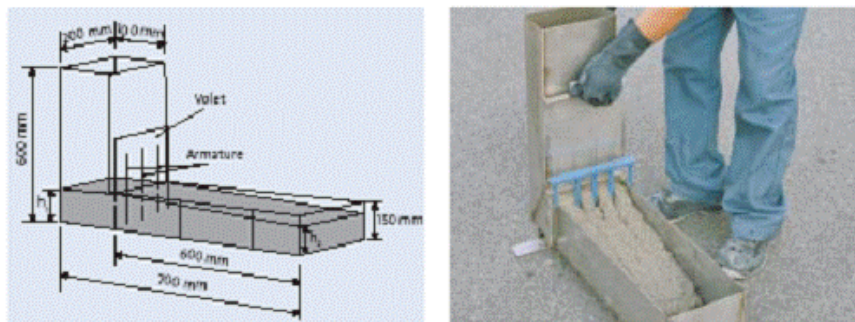


Figure I.20 : Essai de la boîte en L [32].

d) Essai de boîte en u ('u-box test')

L'essai de la boîte en U permet de caractériser la mobilité du béton en milieu confiné et de vérifier que la mise en place du béton ne sera pas contrariée par des phénomènes de blocages inacceptables.



Figure I.21 : Essai de boîte en u ('u-box test')

e) Essai d'entonnoir

La procédure d'essai avec l'entonnoir est la suivante: l'entonnoir dont les dimensions sont définies. La figure est remplie de béton jusqu'en haut. Le clapet de fermeture située sa base est ensuite ouverte, ce qui provoque l'écoulement du béton, dont on mesure le temps nécessaire jusqu'à ce que l'entonnoir se soit entièrement vidé. Dans la littérature scientifique, ce temps d'écoulement est souvent le critère utilisé pour définir la viscosité du béton auto compactant. Plus le béton s'écoule rapidement hors de l'entonnoir, plus sa viscosité est faible. Un temps d'écoulement compris entre 8 et 14 secondes est recommandé pour le BAP. [33]

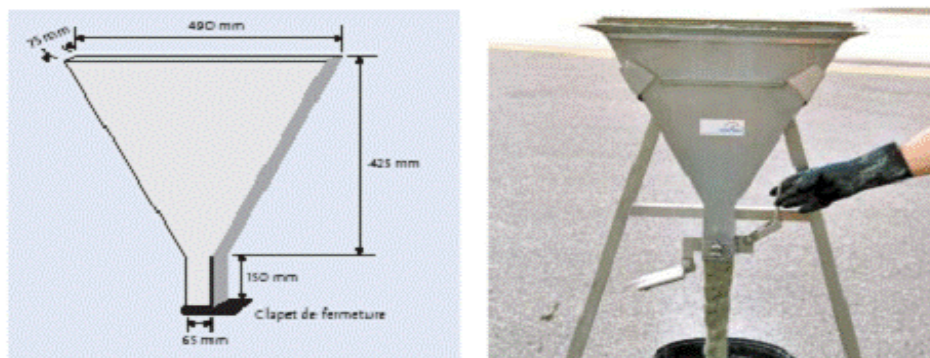


Figure I.22 : Essai d'entonnoir

f) Essai d'étalement modifié

L'essai d'étalement modifié (**J-Ring**) fut développé au Japon et consiste à faire s'écouler le béton au travers de barres d'armature afin de pouvoir évaluer sa tendance au phénomène de blocage. A cet effet, le béton s'écoule à partir du cône disposé au centre d'un anneau métallique. Sur cet anneau de 300 mm de diamètre sont soudées des barres d'armature \varnothing 16 à 18 mm, espacées régulièrement d'environ deux fois et demi leur diamètre. Le béton BAP

satisfait pleinement aux performances recherchées de fluidité avec faible tendance à la ségrégation et d'enrobage complet des armatures, lorsqu'il s'écoule de manière uniforme au travers de cet anneau et lorsque la répartition des granulats paraît homogène, aussi bien à l'intérieur qu'à l'extérieur de l'anneau. [34]

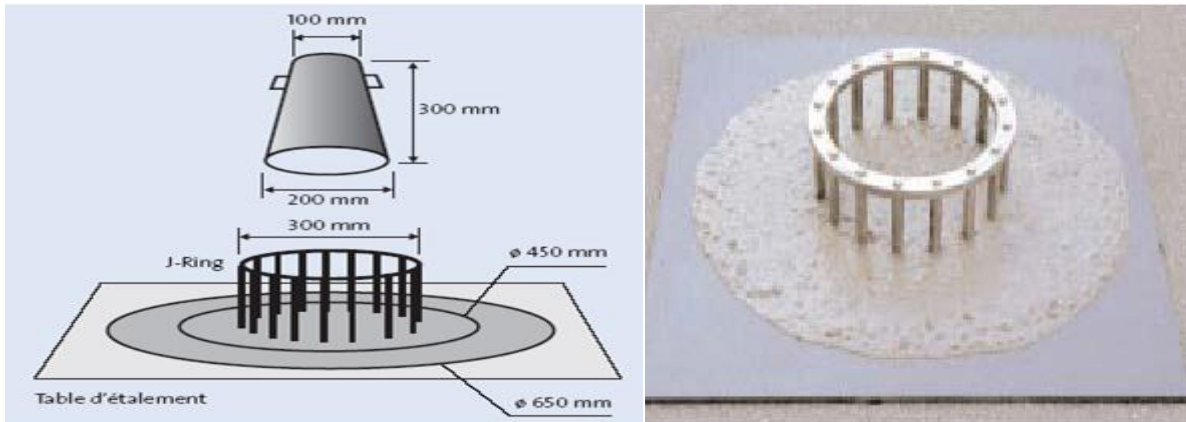


Figure I.23 : essai d'étalement modifié [2]

I.8.2) A l'état durci

a) Résistance en compression

On peut définir la résistance en compression comme la mesure de la résistance maximale d'une éprouvette cylindrique ou cubique de béton ou de mortier sous une charge axiale. Elle est généralement exprimée en méga pascals (MPa).

- **Principe de l'essai**

Les éprouvettes étudiées sont soumises à une charge croissante jusqu'à la rupture. La résistance à la compression est le rapport entre la charge de rupture et la section transversale de l'éprouvette.



Figure I.24 : Essai de compression

b) Résistance en traction

Généralement le béton est un matériau travaillant bien en compression, mais on a parfois besoin de connaître la résistance en traction, en flexion, au cisaillement. La résistance en traction à 28 jours est désignée par f_{t28} .

Plusieurs essais peuvent être réalisés :

► **En traction directe**

La mesure se fait par mise en traction de cylindres identiques à celle de la résistance en traction par fendage, mais l'essai est assez délicat à réaliser car il nécessite, après sciage des extrémités, le collage de têtes de traction parfaitement centrées, l'opération devant avoir lieu sans aucun effort de flexion parasite.



Figure I.25 : Essai de traction directe

► **Résistance en traction par fendage**

L'essai consiste à écraser un cylindre de béton suivant deux génératrices opposées entre les plateaux d'une presse. Cet essai est souvent appelé "Essai Brésilien". Si P est la charge de compression maximale produisant l'éclatement du cylindre par mise en traction du diamètre vertical, la résistance en traction sera (voir fig.I.26) :

$$f = \frac{P}{\pi DL}$$

Avec : j = âge du béton (en jours) au moment de l'essai ;

D et L = diamètre et longueur du cylindre.

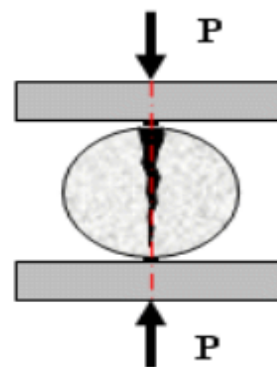


Figure I.26 : Essai de traction par fendage

► **Résistance en traction par flexion**

Les essais les plus courants sont des essais de traction par flexion. Ils s'effectuent en général sur des éprouvettes prismatiques de côté a et de longueur $4a$, reposant sur deux appuis : • Soit

sous charge concentrée unique appliquée au milieu de l'éprouvette (moment maximal au centre).

- Soit sous deux charges concentrées, symétriques, égales, appliquées au tiers de la portée (moment maximal constant entre les deux charges) (figure I.27)

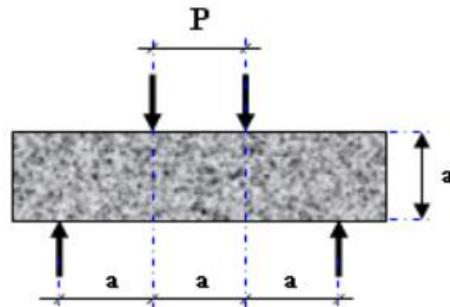


Figure I. 27 : Essai de traction par flexion

c) Le retrait

C'est un phénomène de raccourcissement qui accompagne la prise du ciment, on peut l'assimiler à l'effet d'un abaissement de température entraînant un raccourcissement. Pendant les périodes de prise et de durcissement le béton peut subir des déformations résultantes de plusieurs types du retrait.

Causes et constatation	Remèdes
-Le retrait avant-prise est causé par l'évaporation d'une partie de l'eau que contient le béton. Des fissures peuvent s'ensuivre car le béton se trouve étiré dans sa masse.	Il s'agit de s'opposer au départ brutal de l'eau par : - la protection contre la dessiccation. - l'utilisation d'adjuvants ou de produits de cure.
Après la prise, il se produit : - Le retrait thermique dû au retour du béton à la température ambiante après dissipation de la chaleur de prise du ciment. On constate une légère diminution de longueur.	Il faut éviter de surdoser en ciment. Les ciments de classe 45 accusent moins de retrait que ceux de classe 55 de durcissement plus rapide.
- Le retrait hydraulique est dû à une diminution de volume résultant de l'hydratation et du durcissement de la pâte de ciment. Le retrait croît avec la finesse de ciment et le dosage.	Le béton aura d'autant moins de retrait qu'il sera plus compact ; ce qui dépend de la répartition granulaire, car un excès d'éléments fins favorise le retrait ainsi que les impuretés (argiles, limons).

Tableau I.1 : Différents types de retraits

Le retrait dû à plusieurs paramètres tels que : le type et le dosage du ciment, la cure, le rapport E/C, l'utilisation, dosage et type des ajouts cimentaires... etc.

c) Le fluage

Lorsqu'il est soumis à l'action d'une charge fixe de longue durée, le béton se comporte comme un matériau VISCO-ELASTIQUE. La déformation instantanée qu'il subit au moment de l'application de la charge est suivie d'une déformation lente ou différée qui se stabilise après quelques années. C'est ce que l'on appelle le fluage.

Le fluage est pratiquement complet au bout de 3 ans. Au bout d'un mois, les 40 % de la déformation de fluage sont effectués et au bout de six mois, les 80%.

d) Module d'élasticité

Élasticité du béton Le module d'élasticité E est défini par le rapport :

$$E = \frac{\text{contrainte unitaire}}{\text{déformation relative}}$$

Le module d'élastique est d'autant plus élevé que le béton est plus résistant. Pour les projets courants, on admet :

$$E_{ij} = 11000 f_{cj}^{1/3}$$

(E_{ij} : Module de déformation longitudinale instantanée du béton).

Avec : f_{cj} = résistance caractéristique à « j » jours

$$E_{vj} = 3700 f_{cj}^{1/3}$$

(E_{vj} Module de déformation différée).

Avec: f_{cj} = 1,1 f_{c28}.

Il s'ensuit que : E_{vj} = 1/3 E_{ij}

Notes : E_{ij}, E_{vj}, f_{c28}, f_{cj} sont exprimés en Mpa.

e) Les ultrasons

Le principe de la méthode des ultrasons consiste à mesurer le temps de propagation des impulsions ultrasoniques traversant le béton. L'essai ultrasonique peut être effectué sur des éprouvettes de laboratoire, comme sur des ouvrages en béton terminés.

Qualité du béton	Vitesse de propagation (m/s)
Excellente	Supérieure à 4575
Bonne	3660 à 4575
Douteuse	3050 à 3660
Mauvaise	2135 à 3600
Très mauvaise	Inférieure à 2135

Tableau I.2. Qualité du béton en fonction de la vitesse de propagation des impulsions

I.9. Méthodes de formulations des BAP

I.9.1. Introduction

Le choix des proportions de chacun des constituants d'un béton afin d'obtenir les propriétés désirées et de mise en œuvre souhaitées s'appelle la formulation.

La diversité des bétons actuels, aux propriétés extrêmement variables, ne permet pas d'imaginer un principe de formulation commun. Généralement, la formulation sera orientée vers les propriétés principales demandées au matériau et adaptée en fonction des propriétés secondaires recherchées.

I.9.2) Les trois principes de formulation des bétons

La formulation de la majorité des bétons est généralement établie pour atteindre trois objectifs principaux :

- Obtenir une rhéologie : Le béton frais doit pouvoir facilement être mis en œuvre avec les moyens et méthodes utilisées sur le chantier.
- Obtenir une résistance mécanique : Le béton doit présenter, après durcissement, une certaine résistance à la compression.
- Limiter les effets secondaires : Le béton doit présenter un faible retrait et un fluage peu important, le coût du béton doit rester le plus bas possible et toutes les propriétés seront améliorées lorsque le squelette granulaire est de compacité maximale.

Une formule donne un béton qui présente au mieux des propriétés désirées et satisfasse aux essais de convenance pour tel ouvrage sur tel chantier, avec ses matériaux et son matériel et dans les conditions pratiques de l'exécution.

Les différentes propriétés du béton autoplaçants (fluidité, viscosité à la ségrégation, aptitude au ressuage...) rendent la formulation de ces derniers difficile. Actuellement, il n'existe pas de méthode de formulation précise.

Il existe différentes méthodes de formulation, les principales sont les suivantes :

I.9.3. Méthode japonaise

La formulation des BAP par l'approche développée à l'université de Kōchi se fait de manière sécuritaire, en privilégiant le volume de la pâte au détriment des granulats. Les bétons obtenus sont sous dosés en granulats et par conséquent loin d'un optimum économique. Le surcoût engendré sur le matériau est compensé, au Japon, par les économies sur la main d'œuvre. Les principes de la formulation et leur application sont les suivants :

a) Dosage des gravillons

Les chercheurs japonais ont montré que le risque de blocage est minimisé lorsque le volume du gravillon pour 1m^3 de béton est limité à ma moitié de sa compacité. Par définition, la compacité d'un mélange de grains est le rapport du volume de grains et le volume total du système grains+vides. Elle dépend bien sûr du mode de compactage.

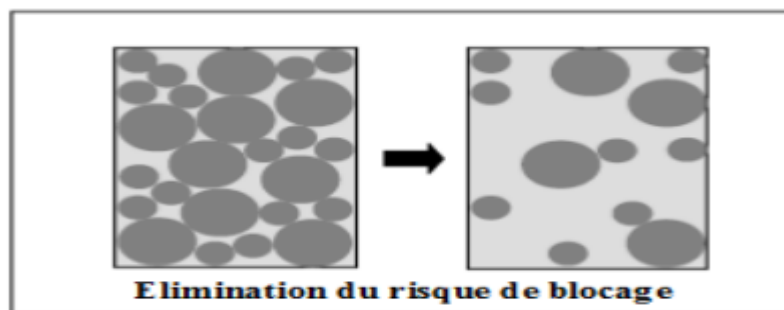


Figure I. 28 : Réduction du volume de gravillon a la moitié de sa compacité

A défaut d'indication, nous avons choisi de la mesure en suivant la procédure du LCPC. La compacité est pour chaque gravillon d'environ 0.57. Dans le cas de la formule de granulométrie 0/10 mm, le volume du gravillon est donc posé à 285 l/m^3 . Dans le cas de la formule de granulométrie 0/14 mm, nous choisissons de répartir ce volume pour moitié en 6/10 et en 10/14.

b) Dosage en sable

Le volume de sable est posé forfaitairement à 40% du volume de mortier du béton. La fluidité du béton est garantie par la réduction des frictions granulaires.

c) Dosage en liant

La méthode ne précise pas comment doser le liant. Néanmoins la quantité de ciment peut être fixée, par exemple, en respectant la donnée des normes (soit ici une masse minimale de ciment de 350 kg/m^3)

Les rapports massiques eau sur ciment et filler sur ciment peuvent également être choisis sur des critères de résistance.

d) Dosage de l'eau et du superplastifiant

Le dosage en l'eau et en superplastifiant sont déterminés au moyen d'essais sur mortiers, dont le volume de sable est fixé à 40%.



(a) Cône à mortier



(b) Entonnoir à mortier

Figure I. 29 : Essais d'optimisation des dosages en eau et en superplastifiant sur mortiers

I.9.4) Méthode suédoise :

Proposée par [Peterson et al, 1996], la méthode suédoise est basée sur l'étude effectuée par [Tangtermsirikul et al, 1995]. En fait, ils ont repris l'approche d'évaluation du risque de blocage et l'ont intégrée dans le processus de formulation. Le rapport G/S final est celui qui donne le même volume de pâte pour avoir les propriétés recherchées.

Les fines, l'eau et le superplastifiant sont ajustés par la suite pour obtenir une viscosité suffisante, un faible seuil de cisaillement et de résistance à la compression visée.

Cette méthode propose une meilleure optimisation du squelette granulaire mais le critère de blocage n'est pas général pour tout type de granulat.

I.9.5) Méthode française

Méthode française (LCPC) [De l'Arad et al, 1994], au LCPC, un modèle mathématique a été développé à partir d'un modèle de suspension solide (RENE LCPC). Ce modèle est basé sur les interactions granulaires entre les différents constituants du mélange. Il permet de prévoir la compacité d'un mélange granulaire avec une précision inférieure à 1% à partir des constituants ci-après :

- ❖ Les distributions granulaires
- ❖ Les proportions du mélange
- ❖ La compacité propre*la densité apparente
- ❖ La procédure à adopter pour déterminer les proportions des divers constituants est la suivante :

- ❖ La proportion de liant est fixée a priori (70% de ciment, 30% d'addition par exemple) ;
- ❖ Le dosage, à saturation, des superplastifiant est déterminé. Selon l'expérience de LCPC, ce dosage pourrait conférer au béton une viscosité élevée, la moitié de ce dosage serait plus pertinente ;
- ❖ Le besoin en eau de ce mélange (en présence du superplastifiant) est déterminé ;
- ❖ Les calculs sont effectués avec le logiciel en tenant en compte de confinement (effet de paroi).
- ❖ La viscosité est fixée de manière arbitraire à $5 \cdot 10^4$ la teneur en eau est réduite en conséquence et la proportion liant/filler est maintenue constante. Les proportions granulats/phase liante sont optimisées.

Une formulation de béton autoplaçant est donc proposée basée sur les prévisions du modèle.

La teneur en eau est ajustée pour obtenir la résistance ciblée. Le dosage en superplastifiant est ajusté également afin d'obtenir la valeur d'étalement et le seuil de cisaillement souhaités et par conséquent les propriétés requises pour le béton autoplaçant sont atteintes.

I.9.6) Méthodes basées sur l'optimisation des mortiers

OK AMURA, le concepteur des BAP, propose de les formuler en composant en premier lieu le mortier du béton. Dans le mortier, la proportion de sable est posée arbitrairement. Il reste ensuite à trouver expérimentalement les dosages en eau et en superplastifiant, pour un liant donné (rapport massique ciment sur addition fixé), et suivant certains critères de rhéologie. La formule finale est obtenue en ajoutant au mortier un volume de gravillons limité, de manière sécuritaire, à la moitié de leur compacité. A la suite d'une optimisation identique du mortier, Ouchi et al proposent de doser les gravillons en cherchant expérimentalement leur volume limite menant à un blocage. Ce volume est évalué en comparant l'écoulement du mortier dans un entonnoir avec et sans gravillons. La formulation d'un BAP par le biais de son mortier trouve sa justification dans quelques publications. Billberg et Jacobs et al montrent à cet effet que la rhéologie d'un béton se corrèle bien avec celle de son mortier.

I.9.7. Méthodes basées sur l'optimisation du volume de pâte

Le béton est considéré comme un mélange bi basique, avec une phase solide, les granulats, et une phase liquide, la pâte. Dans le cas d'un BAP, la pâte joue un rôle prédominant.

La formulation consiste à déterminer la quantité de pâte en excès optimale pour fluidifier le BAP et limiter les problèmes de blocage. Et al ont obtenu par l'expérience des équations reliant l'épaisseur de la pâte autour des granulats et les constantes du modèle de Bing Ham (seuil de cisaillement et

viscosité) du béton, exprimées par rapport à celle de la pâte, puis déterminer à l'aide de ces équations la proportions minimale de pâte nécessaire pour fluidifier le béton. Les auteurs ne proposent pas de méthode pour doser la pâte par rapport au blocage.

Il existe une approche similaire du dosage de la pâte mise au point par Tangtermsirikul, Petersson et Bui. Cette fois, deux critères, calés aussi expérimentalement, sont proposés : un volume de pâte minimal vis-à-vis de la fluidité, et un volume de pâte minimal vis à vis du blocage. La notion d'excès de pâte a également été proposée par Chanvillard et al dans une méthode de formulation des bétons de sable.

I.9.8) Méthodes basées sur l'optimisation du squelette granulaire

La formulation des bétons peut passer par une optimisation de la porosité du système formé par les grains solides, du ciment aux gravillons. Il est connu par exemple que la résistance à la compression augmente avec la compacité de la pâte. L'ouvrabilité est elle aussi tributaire de l'arrangement du squelette granulaire, en considérant maintenant que la phase interstitielle est l'eau de gâchage, et non plus la pâte. Plus la quantité d'eau qui écarte les grains est importante, plus la suspension est fluide. A quantité d'eau constante, si on minimise la porosité de l'empilement de grains, on maximise en conséquence le volume d'eau disponible pour fluidifier le mélange. Cet exemple simple nous montre dans le lien entre compacité et rhéologie. Sedran et De l'Arad ont développé un modèle décrivant mathématiquement un empilement, à partir des caractéristiques des grains qui le composent (forme, granulométrie). Le modèle permet le calcul de la compacité du béton et d'un indice représentatif de son degré de serrage. A l'aide de ces variables sont modélisées la viscosité et le seuil de cisaillement du béton. Le modèle est implanté dans un logiciel (Béton lab. Pro2), qui permet de plus de simuler les autres propriétés du béton (résistance, déformation différées, etc...). Ses auteurs proposent un cahier des charges spécifique pour les BAP, avec des indices pour estimer la capacité de remplissage et la stabilité du béton. Roshavelvo a également développé un modèle d'empilement granulaire, qui semble néanmoins être resté à un stade plus théorique.

I.10. Les mortiers autoplaçants

I.10.1. Introduction

Le mortier est l'un des matériaux de construction les plus indispensables et les plus utilisés pour les travaux de tous types, ces derniers se déclinent en divers produits, qu'ils soient de ciment, de chaux ou de résine, tous ne s'utilisent pas de la même façon. On l'utilise pour solidariser les éléments entre eux, assurer la stabilité de l'ouvrage, combler les interstices entre les blocs de construction. En général le mortier est le résultat d'un mélange de sable, d'un liant (ciment ou chaux) et d'eau dans des proportions données, se diffèrent selon les

réalisations et d'adjuvant. Dans ce chapitre, nous présenterons les caractéristiques principales et généralités des mortiers autoplaçants, tel que sa structure, sa formulation en vérifiant sa composition, également définir le béton équivalent ainsi que sa méthode de formulation.

I.10.2. Définition :

Le **mortier autoplaçant** est une alternative économique au coulis de ciment en plus d'offrir une stabilité volumétrique supérieure. Ce produit est de très grande fluidité. Il est composé de ciment, d'eau, de sable, et d'adjuvants spécialisés. Ce produit peut être pompé pour être mis en place.



Figure I-24: Mortier autoplaçant

➤ Applications

Le **mortier autoplaçant** est habituellement utilisé pour remplir des conduites, des tunnels, des réservoirs souterrains, des espaces vides ou des chambres désaffectées. Le **mortier autoplaçant** peut être injecté pendant 2 heures sur des distances allant jusqu'à 100 mètres (maximum 3 heures).

➤ Données techniques

Voici quelques données techniques sur le mortier autoplaçant:

- La masse volumique est d'environ 2100 kg/m³;
- La résistance à la compression à 28 jours visé est de 35MPa;
- La résistance à la compression à 7 jours est de > 2MPa;
- Le produit est très fluide;
- Le produit est pompable stable et fluide.

➤ **Précautions particulières**

Le **mortier autoplaçant** est très fluide et s'écoulera facilement s'il y a des ouvertures ou des pentes. Considérer les pressions hydrostatiques dans les calculs des coffrages. Le sable contient jusqu'à environ 5% de granulat > 5 mm. Dans le cas où un grand volume est pompé dans une très petite ouverture, une crépine peut être employée [35].

I.11. Les type de mortiers

Dans les Travaux Publics, on utilise différents types de mortier selon les tâches qui sont à réaliser.

➤ **Les mortiers de ciments :**

Les mortiers de ciments sont très résistants, prennent et durcissent rapidement. Le dosage entre le ciment et le sable est, en général, un rapport volumétrique de 1:3 : - 1/3 de ciment
- 2/3 de sable

Le dosage de l'eau correspond au rapport (en kg) Eau/Ciment (E/C) qui est environ égal à 0,35. Il faut savoir qu'un dosage optimum en ciment rend les mortiers pratiquement imperméables.

➤ **Les mortiers de chaux :**

Les mortiers de chaux sont moins résistants par rapport aux mortiers de ciment (gras et onctueux). La durée du durcissement des mortiers de chaux est plus lente que pour les mortiers de ciments.

➤ **Les mortiers bâtards :**

Ce sont les mortiers dont le liant est un mélange de ciment et de chaux. Généralement, on utilise la chaux et le ciment par parties égales (50/50). Des fois, on prend une quantité plus ou moins grande de l'un ou de l'autre suivant l'usage et la qualité recherchée.

➤ **Les mortiers gras :**

Le mortier gras (dosage en ciment plus élevé : 1/3 de liant pour 2/3 de sable) possède une structure beaucoup plus dense et laisse à peine passer l'eau. Il est quasiment imperméable. Il est utilisé pour la réalisation de joints, d'enduits, etc

➤ **Les mortiers maigres :**

Le mortier maigre (dosage en ciment peu élevé : 1/4 de liant pour 3/4 de sable) est plus facile à travailler. Néanmoins il est légèrement perméable. Il est utilisé pour maçonner les agglos, la pierre, etc. [36]

➤ **Les mortiers rapides :**

Ils sont fabriqués avec du ciment prompt, ils sont rapides et résistants pour les scellements

➤ **Les mortiers industriels :**

Ce sont des mortiers que l'on fabrique à partir de constituants secs, bien sélectionnés, conditionnés en sacs contrôlés en usine et parfaitement réguliers Pour utiliser ce type de mortier.

Les fabricants de mortiers industriels proposent une gamme complète de produits répondant à tous les besoins :

- Mortiers pour enduits de couleur et d'aspect varié.
- Mortiers d'imperméabilisation.
- Mortier d'isolation thermique.
- Mortier de jointoiement.
- Mortier de ragréage.
- Mortier de scellement, mortier pour chapes.
- Mortier-colle pour carrelages, sur fond de plâtre ou de ciment.
- Mortier de réparation [36].

I.12. La composition des mortiers

Le mortier se compose de granulats, de liants, d'eau et d'adjuvants.

- **Les granulats**

Sont des sables issus de rivières (sable rond) ou de carrières (sable angulaire). Le sable se compose de grains durs et arrondis ayant des calibres différents. Dans le cadre de la réalisation d'un mortier, le sable choisi est un mélange de divers sables. Le mélange obtenu doit être propre et ne doit contenir ni éléments végétaux ni autres particules nocives. Certains granulats sont dits « légers » : billes d'argile ou de polystyrène.

- **Les liants**

Sont constitués de ciments normalisés (ciment de Portland, ciment au laitier, ciment de haut-fourneau), de ciments spéciaux (ciment blanc, ciments à maçonner, etc.), de chaux hydraulique naturelle et de chaux éteinte, de plâtre.

- **L'eau**

Utilisée doit être propre, sans débris ni huile. Elle a pour rôle d'assurer l'hydratation du ciment et de le rendre plus malléable

- **Les adjuvants**

Sont des produits chimiques ajoutés au mortier en faible quantité, afin de modifier ses propriétés. Ces additifs ont différentes fonctions : diminuer la teneur en eau afin d'augmenter son ouvrabilité, accélérer la prise afin de diminuer le temps de prise du mortier notamment en cas de gel, faire office de retardateurs de prise en cas de températures élevées et/ou d'entraîneurs d'air afin d'augmenter la résistance de l'ouvrage face au gel, d'hydrofuges qui améliorent l'imperméabilité du mortier, de colorants pour réaliser des travaux décoratifs.

I.13. Structure du MAP

La structure du MAP est basée sur la formulation d'une pâte et d'un mortier cimentaire autoplaçants qui offrira un comportement optimal vis-à-vis de la stabilité et de l'écoulement, en utilisant les matériaux de notre région avec les pourcentages adéquats de chaque constituant. Nous mettrons en oeuvre un programme expérimental où nous délimiterons un domaine expérimental qui offrira un ensemble de mélanges homogènes et stables, aux propriétés d'écoulement mesurables. Cependant, pour avoir le mélange de constituants possédant les réponses optimales, nous élaborerons un plan de mélanges qui permet d'avoir un nombre important d'informations (rôle des constituants, interactivité) avec un minimum d'essais.

Le rôle de l'expérimentateur ainsi que la démarche expérimentale de l'élaboration de la pâte de ciment sont deux éléments importants, compte tenu de la sensibilité du comportement de cette dernière.

La pâte de ciment est confectionnée à partir des quatre composantes (ciment, fillers, plastifiant, eau).

- **Un volume de pâte élevé :**

Les frottements entre les gravillons limitent l'écoulement des bétons. C'est pourquoi, le MAP contient un volume de pâte important dont le rôle est d'écarter les gravillons les uns des autres [2].

- **Une quantité importante de fines :**

Pour leur assurer une maniabilité suffisante tout en limitant les risques de ségrégation et de ressuage, les MAP contiennent une quantité de fines supérieures à celle des mortiers. Toutefois, pour éviter des problèmes d'élévation excessive de la température lors de l'hydratation ainsi que pour abaisser leur coût global, le liant est souvent un composé binaire [36], voire ternaire [37] composé de ciment portland mélangé avec des cendres volantes, du laitier, des fillers de calcaire, des pouzzolanes naturelles ou de la fumée de silice.

- **Un fort dosage de super plastifiant :**

L'introduction de dosage relativement important de super plastifiant dans les BAP permet en premier lieu de réduire la teneur en eau tout en conservant leur grande maniabilité. Toutefois, un dosage trop élevé (proche ou supérieur au dosage de saturation [38]), peut augmenter la sensibilité du béton à des variations de teneur en eau vis-à-vis du problème de la ségrégation et du ressuage.

- **Une utilisation éventuelle d'agent colloïdal :**

Bien que ce ne soit pas systématique, les BAP contiennent la plupart du temps un agent colloïdal [39]. Ce produit, comme les fines, a pour rôle d'empêcher le ressuage et de limiter les risques de ségrégation des granulats en rendant la pâte plus épaisse. De façon schématique l'utilisation de ce

produit semble se justifier dans le cas des bétons ayant des rapports eau/liant élevés car les fines ne sont pas toujours suffisantes pour fixer l'eau dans le béton. Il semble par contre inutile dans le cas de MAP ayant des rapports massique eau/liant faible qui donne des résistances supérieures à 50 MPa. Pour la gamme des bétons intermédiaire, leur utilité est à étudier au cas par cas. L'agent colloïdal a la réputation de rendre les BAP moins sensibles à des variations d'eau vis-à-vis aux problèmes ségrégation et ressuage [40, 41]

I.14. L'utilisation des mortiers :

Le mortier a pour rôle de solidariser les éléments entre eux, d'assurer la stabilité de l'ouvrage, de combler les interstices entre les blocs de construction. Le mortier de ciment peut être utilisé pour la réalisation de maçonnerie de blocs de béton, d'enduits traditionnels intérieurs ou extérieurs, de chape, de joints de maçonnerie.

I.15. Méthode de formulation du Mortier de Béton Equivalent (MBE) :

Lors de présentation des principales caractéristiques des BAP nous avons mis en évidence l'influence des différents constituants et établit certains critères permettant d'obtenir les propriétés visées [41].

Les gammes de valeurs généralement employées sont issues des recommandations provisoires de l'AFGC et présentées ci-dessous :

- Une quantité de pâte élevée (de l'ordre de 40% du volume total)
- Une quantité de fines élevée (de l'ordre de 500 Kg/ m³)
- Utilisation d'un superplastifiant (à un dosage proche du dosage à saturation)
- Un faible volume de gravillons (rapport G/S de l'ordre de 1)
- Un diamètre maximal réduit
- Eventuellement utilisation d'un agent de viscosité.

I.16. Méthode du mortier équivalent :**• Principe de la méthode**

La méthode de MBE débute nécessite une parfaite connaissance et qui des caractéristiques de béton qui sont liées à sa destination et qui sont en général connues quand on part d'un béton existant. Il est donc nécessaire pour établir les grandes lignes de la formule, de connaître les points suivants :

- **Caractéristiques du béton :**
 - Composition de béton ;
 - Catégorie du béton ;
 - Classe de consistance....

- **Ses constituants :**

- Ciment ;
- Sable, gravillons ;
- Eau de gâchage ;
- Adjuvant ;
- Additions.

- **Sa mise en œuvre :**

- Températures du béton frais et extérieur ;
- Condition de coulage et de serrage ;
- Durée et conditions de transport.

Une fois le béton défini (cahier des charges établi), on calcule le mortier équivalent correspondant “MBE”.

I.17. Technique du mortier de béton équivalent “MBE” :

- **But de la technique :**

La technique du mortier de béton équivalent n’a pas vocation à remplacer les techniques traditionnelles de la détermination granulaire de composition des bétons, mais vient favorablement améliorer les conditions d’études paramétriques pour choix des types et dosages en adjuvant d’un béton.

En ce sens, elle constitue une méthode rapide et faible pour la mise au point des bétons adjuvants et permet de détecter les éventuels incidents rhéologique pouvant survenir sur chantier.

- **Principe de la technique :**

Pour éviter la difficulté à reproduire en laboratoire en utilisant des conditions exacte du malaxage du béton en centrale et pour limiter la lourdeur des études sur le béton, il est avéré nécessaire d’utiliser une technique d’essai rapide et capable de fournir des résultats pouvant être reliés avec ceux qui seraient obtenus sur le béton. La méthode retenue consiste à travailler sur la phase mortier du béton avec prise en compte de la surface développée des gravillons écartés. Pour cette raison, la technique a été appelée technique du mortier de béton équivalent (MBE).

Pour utiliser cette technique, il convient de connaître au préalable les éléments d’identification des constituants et les bases de composition suivants ;

- La granulométrie de chaque classe de granulats,

- Leurs masses volumiques,
- Leur taux d'absorption d'eau,
- Leurs teneurs en eau totales,
- La nature et le dosage en ciment (ou en liant équivalent),
- Les caractéristiques des adjuvants,
- La composition granulaire du mélange,
- Le ou les rapports eau efficace-liant (ciment ou liant équivalent) fixés par le chantier.

Ces éléments préalables peuvent être complétés par la connaissance des contraintes particulières imposées par le chantier (durées de transport, variations de températures, conditions de coulage,.....).

Les différents essais rhéologiques qui seront appliqués sur le mortier restent du même type que ceux appliqués sur le béton correspondant. Ainsi, les essais d'affaissement et d'étalement au cône d'Abrams du béton correspondant les essais d'affaissement et d'étalement au mini cône du mortier de béton équivalent.

I.18. Formulation d'un mortier autoplaçant

I.18.1. Composition du mortier autoplaçant:

La composition du mortier autoplaçant témoin a été déterminée à partir de la composition d'un béton autoplaçant (BAP) par la méthode du mortier de béton équivalent. Tout d'abord, la composition du BAP a été calculée. Le calcul des dosages des constituants du BAP est basé sur le principe de la méthode japonaise qui définit des intervalles pour chaque constituant donnés. Ces intervalles sont donnés par le tableau suivant :

Constituant	Intervalle Préconisé
Volumedelapate	330 à400 (l/m3)
Lamassedeciment	300 à400 (Kg/m3)
Ledosagede calcaire	10% depoidsduciment
Levolumedegravillons	G /S prochede1

Led dosage en super plastifiant	Prochedesonpoint desaturation
---------------------------------	-------------------------------

Tableau I. 3 : Intervalles pour chaque constituant selon la méthode Japonaise

Après l'application de la méthode japonaise, les dosages des constituants pour 1m³ du béton sont tel que:

- Eau=173.12 L
 - Ciment=430 Kg
 - Filler=43 Kg
 - Sable=820.27 Kg /m³
 - Gravier=914.42 Kg/m³
1. Classe 3/8=457.21 Kg/m³
 2. Classe 8/15=457.21 Kg/m³
- SP=1.3% = 8.6 Kg

Constituants	Masse volumique [Kg/m ³]
Ciment	430
Fillers Calcaire	43
Sable	820.27
Graviers G(3/8)	475.21
G (8/15)	475.21
Eau	173
Super plastifiants	8.6

Tableau I. 4 : Composition pour 1m³ de BAP

Constituant	Masse [Kg]
Ciment	664.1
Eau	256
Sable	1372.4
Filler	66.41

Superplastifiant	8.6
------------------	-----

Tableau I. 5 : Composition pour 1m³deMAP.

I.19. Conclusion

Aujourd'hui, les bétons autoplaçants constituent une véritable révolution culturelle : de nombreuses structures actuelles se caractérisent par la complexité de leur architecture (formes variables et courbures multiples), ainsi que par une forte concentration en armatures, ce qui rend souvent difficile l'utilisation des bétons de plasticité conventionnelle. Afin d'adopter les bétons à ces ouvrages, des recherches ont été menées au cours des dernières années dans le but de développer des formulations de béton se caractérisant par une haute ouvrabilité, tout en étant stables (ségrégation, étalement et air occlus), avec de bonnes caractéristiques mécaniques et de la durabilité. Ainsi, des bétons autoplaçants (BAP) ont été développés afin que la mise en place soit réalisée sans vibrations, seulement sous l'effet de la gravité, d'où le qualificatif d'autoplaçants.

CHAPITRE II

Formulation des matériaux

II.1. Introduction :

Ce chapitre, présente les différentes caractéristiques de matériaux utilisés lors de la confection des mortiers autoplaçants, ainsi que les différents essais expérimentaux effectués sur ces mortiers.

II.2. Caractéristiques des matériaux :

II.2.1. Le ciment

Dans ce travail nous avons utilisé le ciment de marque MATINE. C'est un ciment gris de haute résistance. C'est le résultat final de la mouture du clinker obtenu par cuisson jusqu'à l'affusion partielle (clinkérisation) et d'un mélange convenablement dosé et homogénéisé de calcaire et d'argile conformément à la norme NA 442, EN 197 1 et à la norme NF P 15 301/94.

Domaine d'utilisation :

MATINE est utilisé pour tous les projets de construction qui nécessitent des hautes résistances mécaniques tels que

- Logements et d'autres constructions civils.
- Tunnels, ponts, aéroports, etc.
- Les secteurs industriels.
- Barrage, châteaux d'eau, stations d'épuration, stations de dessalement,

Le ciment utilisé dans ce travail, est un ciment composé de type CEM II de classe de résistance 42,5, il provient de la cimenterie de L'AFARJ. Les caractéristiques de ce ciment sont comme suit



Figure II.1 : le ciment utilisé.

a) Caractéristiques physiques du ciment :

Caractéristiques	Résultats	Unités	Norme
Consistance normale	27.8	(%)	NF EN 196-3
Début de prise	190	(min)	NF EN 196-3
Fin de prise	265	(min)	NF EN 196-3
SSB	4410	(cm ² /g)	NF EN 196-6
Masse spécifique	2.99	(g/cm ³)	NF EN 196-5
Retrait à 28 jours	<1000	(µm/mm)	NF EN 196-7

Tableau II. 1 : caractéristiques physiques

b) Caractéristiques chimiques du ciment

CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO ₃	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	Chlorure	PAF	insoluble
60.4	20.71	5.45	3.63	2.37	0.23	0.65	2.15	0.007	4.28	-

Tableau II. 2 : Composition chimique du ciment

c) Caractéristiques minéralogiques du ciment :

Eléments	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	CaO	gypse	Calcaire	Pouzzolane
%	58	18	05	13	01	05	05	07

Tableau II. 3 : Composition minéralogique.

d) Caractéristiques mécaniques du ciment :

Essais	Age [J]		
	2 jours	7 jours	28jours
Résistance à la compression [MPa]	35.81	40.4	48.87
Résistance à la flexion [MPa]	4.41	6.37	8.35

Tableau II. 4 : Résistance à la compression et à la flexion du ciment, Norme NFEN196-

II.2.2. Eau de gâchage :

L'eau utilisée pour le gâchage des mortiers autoplaçants est une eau potable (eau de robinet) du réseau public de la ville de Tizi-Ouzou.



Figure II-2 : l'eau du robinet.

II.2.3. Adjuvant (superplastifiant) :

Le superplastifiant utilisé est un adjuvant de SIKA ® de type VISCOCRETE ® TEMPO 12 Superplastifiant/Haut Réducteur d'eau polyvalente pour bétons prêts à l'emploi. Conforme à la Norme NF EN 934-2. Cet adjuvant est un superplastifiant/haut réducteur d'eau polyvalente de nouvelle génération non chloré à base de copolymère acrylique.



Figure II.3 : superplastifiant VISCOCRETE TEMPO12

Domaines d'application :

- Béton à hautes performances.
- Béton autoplçant.
- Béton pompés.
- Béton précontraints.
- Béton architecturaux.

- SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 permet la fabrication de bétons plastiques à autoplçants transportés sur de longues distances et pompés.

- Dans les bétons autoplçants, SIK A VISCOCRETE TEMPO 12 améliore la stabilité, limite la ségrégation du béton et rend les formules moins susceptibles aux variations d'eau et des constituants.

- SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 permet de réduire significativement le rapport E/C ce qui amélioré la durabilité du béton durci (diminution de la perméabilité, augmentation des résistances mécaniques, diminution du retrait).

Caractères généraux :

SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 est un superplastifiant puissant qui confère aux bétons les propriétés suivantes :

- Longue rhéologie (>2h),
- Robustesse à la ségrégation,
- Qualité de parement.

Stockage :

Le stockage se fait dans un local fermé, à l'abri de l'ensoleillement direct et du gel, entre 5 et 30 °C. SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 peut geler, mais, une fois dégelé lentement et réhomogénéisé, il retrouve ses qualités d'origine. En cas de gel prolongé et intense, vérifier qu'il n'a pas été déstabilisé.

Caractéristiques :

- Aspect.....Liquide.
- Couleur.... Brun clair.
- PH....5.5±1.0.
- Densité.....1.060 ± 0.020.
- Teneur en chlorure.... ≤ 0.1 g/l.
- Teneur en Na₂OEq....≤ 1%.
- Extrait sec.....29.5 %±1.4%.
-

Conditions d'application :

Dosage Plage d'utilisation recommandée : 0,2 à 3 % du poids du liant ou du ciment selon la fluidité et les performances recherchées. Plage d'utilisation usuelle : 0,4 à 1,5 % du poids du ciment ou du liant.

Propriétés et effets :

Grace à ces propriétés le SIKA ® VISCOCRETE ® TEMPO 12 permet d'avoir les effets suivants

Sur béton frais

- Obtention d'un E/C très bas
- Béton plastiques à fluides
- Une très bonne maniabilité
- Un long maintenu de l'ouvrabilité
- De facilité la mise en œuvre du béton

Sur béton durci :

- Bonne résistances initiale et finales
- De diminuer la porosité
- Bel aspect de parement au décoffrage
- De diminuer le retrait

Délai de conservation :

Une année dans son emballage d'origine, à l'abri du gel et de la chaleur (5°C° t ° 35°C).

II.2.4) Les fibres

Les fibres utilisées dans cette étude sont les SIKA METAL FIBRES VISCOCHAPE DRAMIX 3D 55/30BG

Avec :

55 : rapport l/d

30 : la longueur

B: (Bright) acier nu

G : (Glue) fibre en collée



Figure II. 4 : Fibres DRAMIX 30mm**Figure II.5 :** Fibres DRAMIX 15mm**Domaine d'utilisation**

Les SIKA METAL FIBRES VISCOCHAPE sont utilisées pour le renforcement des chapes autonivelantes :

Caractéristiques

- Fibre fabriquée à partir de file d'acier tréfilé ;
- Résistance à la traction élevée ;
- Résistance optimale à l'arrachement grâce aux crochets situés aux extrémités de la fibre ;
- Répartition homogène dans le mortier sans augmentation du temps de malaxage ;
- Incorporation en centrale ou dans le camion toupie.

Mode d'emploi :

- Les fibres doivent être introduites simultanément au sable ;
- Ne jamais introduire les fibres en premier.

Propriétés :

Résistance à la traction.....	1,345Mpa
Elancement l/d.....	55
Module de Young.....	200, 000 (N/mm ²)
Ductilité du fil.....	0,8%

Géométrie :

Famille de fibre.....	3D
-----------------------	----

Formecrochets

Collage.....encollées

Longueur.....30mm

Diamètre.....0, 55mm

II.2.5. Fillers de calcaire :

Les fillers de calcaire sont des produits secs, très fins, issus du broyage, du sciage, de la taille ou du travail de la roche calcaire naturelle. Ils se présentent sous forme de poudres non abrasives. La dimension maximale des grains, déterminés conformément à la norme EN933-10 doit être inférieure à 2 mm Le passant au tamis de 63 μm doit, pour sa part, être supérieur à 70%. Leur surface spécifique est généralement proche de celle du ciment. Les fillers calcaires ne réagissent pas ou peu chimiquement avec les composants du ciment ou l'eau de gâchage.

Quand ils sont ajoutés aux matériaux cimentaires, ils constituent un lieu de nucléation et de germination pour les hydrates.

En France, ces fillers calcaires sont beaucoup utilisés dans la fabrication des ciments composés (CEMII/A OU B-L), mais ils peuvent aussi être directement incorporés lors de la fabrication des bétons, notamment des bétons autoplaçants. C'est un calcaire issu du gisement d'EL-KHAROUB qui occupe la partie Sud-Ouest du massif Oum Settas au Nord-Est de Constantine.



Figure II.6 : les fillers du calcaire.

Analyse chimique du calcaire :

Eléments	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	So ₃	K ₂ O	MgO	P ₂ O ₅	Na ₂ O	PAF
%	3.95	0.20	0.35	51.85	0.02	0.01	1.22	0.03	0.25	42.12

Tableau II. 5 : composition chimiques du calcaire.

Analyse minéralogique du calcaire :

Eléments	Quartz(SiO ₂)	Calcaire (CaCO ₃)	Dolomite CaMg(CO ₃) ₂
%	04	90	06

Tableau II. 6 : composition minéralogique du calcaire.

Propriétés physiques du calcaire :

Caractéristiques	Résultats
Masse volumique absolue (g/cm ³)	2.70
Finesse suivant la méthode Blaine (g/cm ²)	5831

Tableau II. 7 : caractéristiques physiques du calcaire.

II.2.6. Le sable :

Le sable utilisé pour la confection de nos mortiers est un sable roulé (de rivière), de classe granulaire (0/3 mm).



Figure II-7 : Le sable de rivière.

➤ **Les essais effectués pour caractériser le sable :**

a) Essai d'équivalent de sable:

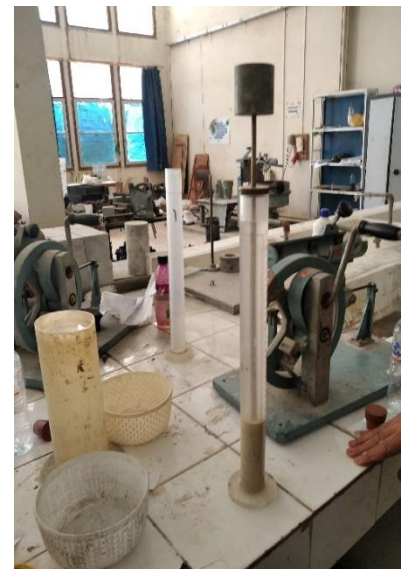
L'essai consiste à déterminer l'importance des fines ($<63\mu\text{m}$) floculables contenues dans le sable. L'équivalent sable indique le degré de pollution des éléments fins dans les sols en stabilisation mécanique.

-Principe de l'essai :

Pour cet essai on a besoin d'une éprouvette graduée munies d'un bouchon en caoutchouc, un agitateur manuelle et un piston avec un poids bien défini.

**FigureII-8 : Agitateur manu**

D'abord, on pèse un échantillon de sable de 120g. Entre temps, on remplit l'éprouvette graduée avec de l'eau jusqu'au trait repère inférieur figurant sur l'éprouvette puis on verse les 120g du sable dans cette dernière et on attend quelques minutes puis on la ferme avec le bouchon et on la fixe sur la machine d'agitation de façon horizontale en théorie 90 coups en 30 s, en finit par remplir l'éprouvette de l'eau jusqu'au trait supérieure puis on laisse reposer pendant 20 min sans perturbation. A l'issue de ce délai, on mesure la hauteur totale (sable+ fines) qu'on appellera h_1 et la hauteur du sable seul sans fine qu'on appellera h_2 .

**FigureII-9 : essai de l'équivalent de sable**

L'équivalent de sable est alors calculé par la formule suivante :

$$E_s = \frac{h_2}{h_1} * 100$$

Dans notre cas, nous avons : $h_1=9.9$ cm et $h_2 = 8.6$ cm, ce qui donne : $E_s = 86.8\%$

Interprétation des résultats :

Es au piston	Nature et qualité du sable
$E_s < 60\%$	Sable argileux : risque de retrait ou de gonflement. Sable à rejeter pour des bétons de qualité ou vérification plus précise de la nature des fines par un essai au bleu de Méthylène.
$60\% \leq E_s < 70\%$	Sable légèrement argileux de propreté admissible pour les bétons de qualité courante quand le retrait n'a pas de conséquence notable sur la qualité du béton.
$70\% \leq E_s < 80\%$	Sable propre à faible proportion de fines argileuses convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité
$E_s \geq 80\%$	Sable très propre. L'absence presque totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra compenser par une augmentation du dosage en eau.

Tableau II. 8 : les valeurs d'équivalent de sable indiquent la nature et qualité du sable.

D'après les résultats obtenus ($E_s=86.8\% > 80\%$), on constate que le sable utilisé est très propre. L'absence presque totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra compenser par une augmentation du dosage en eau.

b) Masse volumique absolue :

La masse volumique absolue ρ_s est la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat, sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre les grains. Il existe trois méthodes possibles :

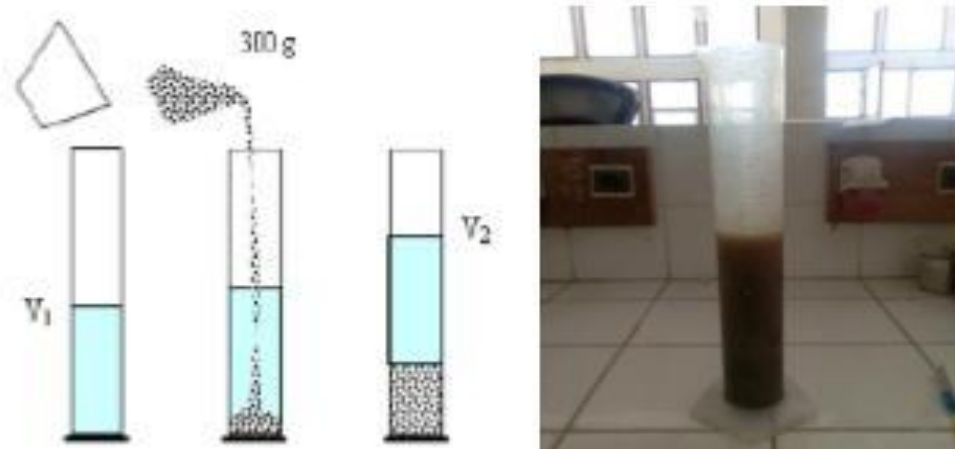
- Méthode de l'éprouvette
- Méthode du pycnomètre liquide
- Méthode de la pesée hydrostatique

Dans notre cas on a utilisé la méthode de l'éprouvette

Principe de la méthode de l'éprouvette :

Cette méthode est très simple et très rapide

- Remplir l'éprouvette d'un volume d'eau (V_1)
- Prise d'un échantillon de sable d'environ 300g. (M_s)
- Introduire cette masse d'échantillon dans l'éprouvette, éliminer toutes bulles d'air (Vibrer et secouer légèrement)
- Lire le nouveau volume(V)



FigureII-10 : essai de la masse volumique absolue.

La masse volumique absolue est donc calculé tel que :

$$\rho_s = M_s / V_s$$

Avec : M_s c'est le poids de l'échantillon

Et $V_s = V_2 - V_1$

$$M_s = 300 \text{ g}$$

$$V_1 = 400 \text{ ml}$$

$$V_2 = 510 \text{ ml}$$

$$V_s = 510 - 400 = 110 \text{ ml}$$

On aura donc notre : $\rho_s = 2.72 \text{ g/cm}^3$.

c) Masse volumique apparente :

La masse volumique apparente d'un matériau est la masse volumique d'un mètre cube du matériau pris en tas, comprenant à la fois des vides perméables et imperméables de la particule ainsi que les vides entre particules.

Mode opératoire :

En verse dans un récipient d'un volume V le sable par couches successives et sans tassement à l'aide seulement des mains, puis on arase avec une règle métallique puis on pèse le récipient rempli M_{total}



Figure II-11 : essai de la masse volumique apparente

Et on calcul par la suite la masse volumique apparente à l'aide de la formule suivante

$$V = (\pi * D^2 / 4) * H = 1695.6 \text{ cm}^3$$

$$D = 12 \text{ cm (diamètre du récipient)}$$

$$H = 15 \text{ cm (hauteur du récipient)}$$

$M_{totale}=2565 \text{ g}$

$\rho_a = 2565/1695.6 = 1.50 \text{ g/cm}^3$.

II.2.7. Poudre de marbre

L'addition minérale qu'on a utilisée dans nos essais est la poudre de marbre provenant de l'exploitation de l'Entreprise Nationale de Marbre « ENAMARBRE » de la carrière de Fil- Fila qui se trouve à 25 Km à l'est de la ville de Skikda. On a utilisé ce déchet en deux formes : en tant que poudre de marbre fine et en tant que sable de marbre à grains de classe granulaire (0/3).



FigureII-12 : la poudre de marbre (0/3).

Dans les tableaux qui suivent, on présente les caractéristiques pétrographiques-minéralogiques ; physico-mécaniques et chimiques de la poudre de marbre utilisé :

Nature pétrographique	Couleur	Aspect	Texture	Structure
Calcaire microcristallin	Blanche	Homogène	Massive	Microcristallin

Tableau II.9 : Caractéristiques pétrographiques de la poudre de marbre.

	Calcite	Quartz	Oxyde de fer
Composition minéralogique	100%	--	--

Tableau II.10 : Composition minéralogique de la poudre marbre.

Masse volumique [g/cm ³]	2.736
Compacité [%]	98.03
Porosité [%]	1.96
Coefficient d'absorption d'eau [%]	0.39
Coefficient de saturation [%]	0.87
Résistance à la compression à l'état sec [kg/cm ²]	961
Résistance à la compression après refroidissement [kg/cm ²]	966
Résistance à l'usure [g/cm ²]	1.82
Résistance au choc [kg/cm ²]	40

Tableau II.11 : Caractéristiques physico-mécaniques de la poudre de marbre.

Caco3	Mgo	Cao	Fe2O3	Al2O3	SiO2	P.C
99.05	1.03	54.86	0.04	0.08	0.15	44.26

Tableau II.12 : Caractéristiques chimiques de la poudre marbre.

Essai effectués sur la poudre de marbre (grains de classe 0/3) :

a) Equivalent de la poudre de marbre :

On suit la même procédure effectuée sur le sable pour déterminer Es. Après l'essai on a obtenu les résultats suivants :

$h_1=10.6 \text{ cm}$ et $h_2=8.2\text{cm}$

On aura donc notre $E_s=77 \%$.

$70\% \leq E_s < 80\%$ donc Sable propre à faible proportion de fines argileuses convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité

b) Masse volumique absolue :

Aussi ici on suit le même principe que le sable pour déterminer la masse volumique absolue.

Après l'essai, nous avons obtenu les résultats suivants :

$\rho_s = M_s/V_s$

$M_s=300\text{g}$

$V_1=400\text{ml}$

$$V_2=515\text{ml}$$

$$V_s=515-400=115\text{ml}$$

On aura donc notre $\rho_s = 2.60\text{g/cm}^3$.

c) Masse volumique apparente :



Figure II-13 : Essai de la masse volumique apparente

On suit le même cheminement que le sable pour déterminer la masse volumique apparente. Nous avons donc obtenu les résultats suivants :

$$\rho_a = M/V$$

$$V = (\pi * D^2 / 4) * H = 1695.6 \text{ cm}^3$$

D=12 cm (diamètre du récipient)

H=15 cm (hauteur du récipient)

M=2365.8 g

$$\rho_a = 2365.8 / 1695.6 = 1.39\text{g/cm}^3.$$

II.3. Analyse granulométrique du sable et de la poudre de marbre :

L'analyse granulométrique permet de déterminer et d'observer les différents diamètres de grains qui constituent un granulat. Pour cela l'analyse consiste à séparer et classer à l'aide de tamis ces grains selon leur diamètre. Les grains ainsi isolés peuvent être pesés pour déterminer la proportion de chacun dans le granulat. La représentation graphique de l'analyse permet d'observer et d'exploiter ces informations très simplement. Les manipulations et les conditions de manipulation sont décrites par la norme **NF P18-560**.

Objectif :

L'analyse granulométrique consiste à déterminer la distribution dimensionnelle des grains constituant un granulat dont les dimensions sont comprises entre 0,063 et 125mm. On appelle

-Refus : la quantité de matériau qui est retenue sur le tamis.

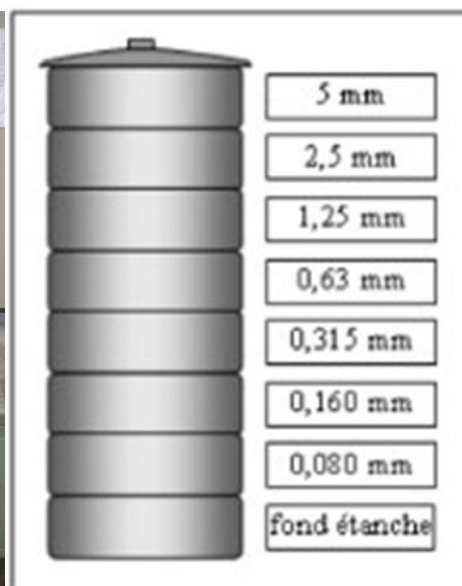
-Tamisat (ou passant) : la quantité de matériau qui passe à travers le tamis.

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 les classements des grains s'obtiennent par vibration de la colonne de tamis.



FigureII-14 : tamiseur électrique.



FigureII-15 : Colonne de tamis.

Les tableaux suivant présentent les résultats de l'analyse granulométrique effectuée sur nos matériaux (sable et poudre de marbre) :

ouverture des tamis (mm)	refus (gr)	refus cumulés (gr)	Refus cumulés(%)	Tamisat cumulés(%)
5	0	0	0	100
3.15	174	174	6.96	93.04
2.5	225	399	15.96	84.04
1.25	563	962	38.48	61.52
0.63	603	1565	62.60	37.4
0.315	490	2055	82.2	17.8
0.16	269	2324	92.96	7.04
0.08	134	2458	98.32	1.68
Fond des tamis	42	2500	100	0

Tableau II.13 : Analyse granulométrique par tamisage du sable (NF P 18-560).

Ouverture des tamis (mm)	Refus (gr)	refus cumulés (gr)	Refus cumulés(%)	Tamisat cumulés(%)
5	0	0	0	100
3.15	0	0	0	100
2.5	2	25	1	99
1.25	765	790	31.6	68.4
0.63	670	1460	58.4	41.6
0.315	550	2010	80.4	19.6
0.16	355	2365	94.6	5.4
0.08	110	2475	99	1
Fond des tamis	10	2485	99.4	0.60

Tableau II.14 : Analyse granulométrique par tamisage de la poudre du marbre (NF P 18-560).

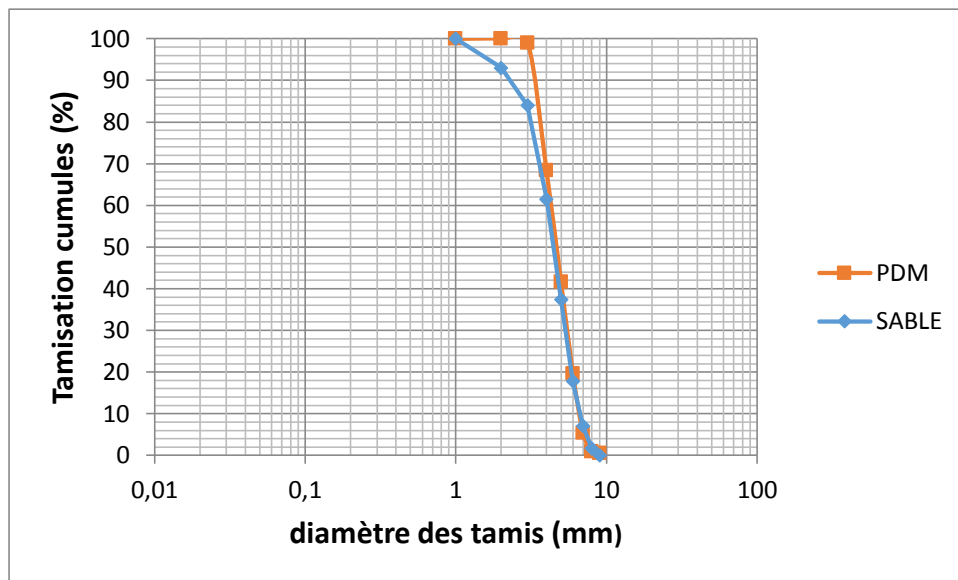


Figure II-16 : la courbe de l'analyse granulométrique du sable et de la poudre du marbre de classe (0/3).

II.4. Module de finesse :

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

Le caractère plus ou moins fin d'un sable peut être quantifié par le calcul du module de finesse (MF). Le module de finesse est d'autant plus petit que le granulat est riche en éléments fins.

Le module de finesse est égal au 1/100ème de la somme des refus cumulés exprimée en pourcentages sur les tamis de la série suivante : 0,16-0,315-0,63-1,25-2,5-5 mm (selon la norme française [NFP18-540]).

$$MF = \frac{1}{100} \sum \text{Refus cumulés en \% des tamis } \{0.16; 0.315; 0.63; 1.25; 2.50; 5\}$$

Lorsque M_f est :

- $1.8 < M_f < 2.2$: sable un peu trop fin : est à utiliser si l'on recherche particulièrement la facilité de mise en œuvre au détriment probable de la résistance.
- $2.2 < M_f < 2.8$: sable préférentiel : convient bien pour obtenir une ouvrabilité satisfaisant et une bonne résistance avec des risques de ségrégation limités

- 2.8 $<M_f < 3.2$: sable un peu trop grossier : correspond à des sables à utiliser pour la recherche de résistance élevées, mais on aura en général une moins bonne ouvrabilité et des risques de ségrégation.

Dans notre cas les résultats obtenus sont :

Pour le sable :

$M_f = 2.92$, donc notre sable est un peu grossier

Pour la poudre de marbre :

$M_f = 2.60$: la poudre de marbre est un sable préférentiel

II.5. Formulation du mortier Autoplaçant

La composition du mortier autoplaçant retenue pour réaliser ce travail, a été choisie comme référence. Selon un travail réalisé sur les mortiers autoplaçants, cette composition a été obtenue à partir de composition d'un béton autoplaçant en appliquant la méthode du Mortier du Béton Equivalent (MBE) établie par Schwartzentruber. Afin d'étudier l'influence du dosage et répartition des fibres dans une matrice cimentaire, dix compositions de mortier auto plaçant été confectionnés.

II.5.1. Substitution du sable

Après avoir étudié le cas de la substitution du ciment par la poudre de marbre finement broyée, nous avons procédé à la caractérisation des mortiers pour le cas de la substitution du sable de rivière par la poudre de marbre de granulométrie (0/3) qui est classée comme étant un sable. Nous avons utilisé l'appellation suivante, en fonction du taux de substitution :

Mortier écologique : mortier autoplaçant à 70 % de poudre de marbre et 30% de sable [42].

II.5.2. Mortier témoin sans fibres :

La première composition est un mortier témoin sans fibres « MSF » dont la formulation est illustrée dans le Tableau II.15 :

Constituants	Ciment	Filler	Sable	Poudre de marbre	Eau	Superplastifiant
Dosage (Kg/m ³)	730	73.05	452.88	1056.73	281.21	9.45

Tableau II.15 : La composition du mortier autoplaçant témoin « MSF » sans fibres

II.5.3. Mortier fibré :

Afin de voir l'influence du dosage et de la répartition des fibres dans une matrice cimentaire, différents dosages en fibres métalliques ont été incorporées au mortier témoin.

Pour les variantes 1%, 2% et 3%, toute l'éprouvette contient des différents dosages en fibres métalliques.

Sachant que la longueur des fibres : 1.5 cm, comme illustré dans les tableaux ci-après :

Constituants	Ciment	Filler	Sable	Poudre de marbre	Eau	Superplastifiant
Dosage (Kg/m ³)	730	73.05	452.88	1056.73	281.21	9.45

pourcentages de fibres à mi- crochets	Dosage en (Kg/m ³)
1%	78
2%	156
3%	234

Tableau II.16 : Le Dosage des fibres

II.6. Le protocole de mélange des mortiers autoplaçants (MAP)

Le protocole de mélange des mortiers autoplaçants (MAP), a été établi selon les caractéristiques recherchées (la fluidité du mortier). Ce protocole a été appliqué sur tous les mélanges des mortiers étudiés durant notre étude.

La procédure suivit le mélange des mortiers autoplaçants, est donnée comme suit :

- ▶ Mettre l'eau et 2/3 de superplastifiant dans le récipient
- ▶ Mettre le mélange de liant (ciment+ fines)
- ▶ Mélanger à vitesse lente pendant 1mn30sec ensuite raclé les bords et mélanger 1mn30sec
- ▶ Verser le 1/2 de 1/3 de superplastifiant et le 1/3 de sable
- ▶ Mélanger à vitesse lente pendant 1mn
- ▶ Rajouter encore le reste de 1/3 de superplastifiant et le 2^{ème} 1/3 de sable
- ▶ Mélanger à vitesse lente pendant 1mn
- ▶ Rajouter le reste de sable (1/3) et mélanger pendant 30sec à vitesse rapide
- ▶ Enfin rajouter les fibres et mélanger à vitesse lente pendant 1 min.



Figure II.17 : Un malaxeur pour des mortiers confectionnés

CHAPITRE III

Essais et interprétations des résultats

Conclusion
Générale

Conclusion générale :

La problématique traitée dans ce travail concerne l'influence d'utilisation des fibres métalliques sur la résistance mécanique des mortiers autoplaçants à l'état frais et l'état durci et optimiser une formulation des mortiers autoplaçants a base de poudre de marbre.

Les principaux résultats qu'on peut tirer de cette étude sont résumés comme suit :

- Plus le dosage de fibres augment plus la fluidité de mortier diminue.
- A chaque fois le dosage des fibres augmente la vitesse de propagation diminue ce qui donne la compacité des enchaînements confectionnés est excellente.
- Après avoir calculé le module d'élasticité dynamique (déterminer par la méthode ultrasonique), il a été constaté que tous les mortiers ont un module d'élasticité dépassant les 40Gpa peuvent être classé comme des mortiers de qualité. Le mortier TM il a un module d'élasticité 64.2 Gpa plus grand que le module d'élasticité des mortiers fibrées 1% ; 2% ; 3% donc les fibres métalliques non pas trop d'influence sur le module d'élasticité
- Les résultats de essai mécanique de résistance a la traction par flexion ont montrés que la résistance augmente en fonction de l'augmentation du dosage des fibres le mortier a 3% de fibre 16.301 Mpa .Les fibres métalliques améliorent la résistance a la traction par flexion .
- Les essais rhéologique nous ont permis de suivre l'évolution de la contrainte de cisaillement des pâtes cimentaires à base de fillers de calcaires à différents dosages de superplastifiant (SP= 0.5%, 1.0%, 1.5%, 2.0% et 2.5%). D'après ces résultats, il est clair que le SP a considérablement réduit la contrainte de cisaillement. Une réduction importante de la contrainte a été enregistrée pour les pâtes à 1.5% du SP, comparée à la pâte adjuvantée à 0.5%. Cela est expliqué par le rôle fluidifiant du SP. Toutefois, on remarque que plus le dosage du SP augmente plus la viscosité plastiques des pâtes diminue plus les pâtes cimentaires deviennent fluides et s'écoulent à des contraintes de cisaillement faibles.

Perspectives :

- Dans les travaux futurs , il serait utile d'étudier d'autres caractéristiques mécaniques des mortiers autoplaçants ,tel que le module de young ,ou le comportement a long terme, dans le but de mettre en évidence la contribution des additions minérales a l'amélioration des propriétés mécaniques de ce mélanges.

Conclusion générale

- Etudie le potentiel d'utilisation des pourcentages plus élevés avec la présence des additions et différents longueurs des fibres.

Bibliographie

Bibliographie

Bibliographie

- [1] **BENSEBT SALAH EDDINE**, Formulation et propriétés des bétons autoplaçants, thèse de Doctorat, 2008, Université Mantouri, Constantine.
- [2] **AFGC**: Groupe de travail Recommandation pour l'emploi des bétons autoplaçants, AFGC/PN B@P, Recommandations provisoires pour l'emploi des bétons autoplaçants, p 63, janvier 2008.
- [3] **MATA LUIS.A.** implementation of self-consolidating concrete (SCC) for prestressed concrete Grids, Master thesis of science in Civil engineering, Raleigh north Cardinal, 2004.
- [4] **OKAMURA.H.OZAWA** 1994, Self compacting concrete journal of advanced concrete technology.
- [5] **YAMMINE JOUMANA.**, rhéologie des bétons fluides à hautes performances relations entre formulations, propriétés rhéologiques, physico-chimie et propriétés mécaniques, thèse de doctorat, l'Ecole Normale Supérieure de Cachan, 262 p, 2007.
- [6] **PHILIPPE TURCRY** « retrait et fissuration des bétons autoplaçant influence de la formulation » Université de NANTES/ 03 Février 2004.
- [7] **OKAMURA H. AND OUCHI M.**, "Self-compacting concrete. Development, present and future", Proceedings of First International RILEM Symposium on Self- Compacting Concrete (PRO 7), Stockholm, Suède, pp. 3-14, 13-15 September 1999.
- [8] **Collection Technique CIM**, Fiches techniques, Tome 2 ", Les bétons, formulation, fabrication et mise en œuvre ", Édition octobre 2006.
- [9] **OKAMURA.H, OZAWA.K.**, "Self compactable high performance concrete in Japan ", ACI International Workshop on High Performance Concrete, Bangkok, Thailand, 1994.
- [10] **HAYAKAWA.M, MATSUOKA.Y, YOKOTA.K.**, "Application of Superworkable Concrete in the Construction of 70-Story Building in Japan ", ACI International Symposium on Advances in Concrete Technology, Las Vegas, 1995.
- [11] **Association Française de Génie Civil**, "Bétons autoplaçants - Recommandations provisoires", documents scientifiques et techniques, AFGC, juillet 2000.
- [12] **Abib.Z.**, "formulation et caractérisation des bétons autoplaçants", thèse de magister USTHB, 2004.
- [13] **Boukni.B.**, "tenue au feu des bétons autoplaçants", thèse de magister UMC, 2007.
- [14] **S. Bethmont.** « Mécanismes de ségrégation dans les BAP ». Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées. 2005.
- [15] **T. Shindoh and YH. Matsuoka.** "Development of combinaison type Self compacting concrete and Evaluation test methods". Journal of advanced concrete technology, Vol. 1 no 1: 26-36, 2003.

Bibliographie

- [16]- **Haddad.O**, "Contribution au développement d'outils d'aide à la formulation des BAP relatifs à la rhéologie à l'état frais et à la résistance au jeune âge ", thèse de doctorat, France, 2007.
- [17] **KHAYAT, K.H.** Workability, testing, and performance of self-consolidating concrete, *ACI Materials Journal*, 96, 346–353, (1999).
- [18]. Mémoire des Effets des fibres végétales sur les propriétés physico-mécaniques du béton
- [19] **ADAM.M.NEVILLE** ; propriétés des bétons, traduit par le CRIB, édition Eyrolles.
- [20] **DREUX .G.** « Le nouveau guide du béton ». Eyrolles 1976.
- [21] **J.BARON et J. OLLIVIER**, les bétons bases et données pour leurs formulations, EYROLLES, 1999.
- [22] **PROUST .E**, Retrait et fluage des bétons autoplacants, vers une meilleur compréhension des comportements diffères, thèse de doctorat de L'INSA de Toulouse 2002.
- [23] **DREUX .G & FESTA. J** : «Nouveau guide du béton et de ses constituants». 8ème Édition Eyrolles. Mai 1998.
- [24] **Abderrahmane. S**, «Etude de la durabilité des systèmes béton armé mortiers de réparation en milieu marin». Thèse de doctorat. Université de l'Université de La Rochelle, 2013.
- [25] Journée d'Information sur les Ciments, les Bétons et les Adjuvants, «Les adjuvants, définitions et opportunités d'utilisation», ERCE - CTC Est - GRANITEX, Alger, 2004.
- [26] **Brunetaud X. et Jausserand L.**, «Travaux pratiques ; Ciment et bétons», Ecole Polytechnique de l'Université d'Orléans, 2005.
- [27] **Association Française de Génie Civil**, “ Recommandations pour l'emploi des Bétons autoplacants ”, 2008.
- [28] **Association Française de Génie Civil «AFGC»**, Bétons autoplacants-Recommandations provisoires, p 63, Juillet 2002.
- [29] Produits de ciment Couillard, « Les superplastifiants », <http://www.betoncouillard.com>, Internet, 2008.
- [30] **SHEN Jie.**, "comportement mécanique des matériaux et des structures précontraintes en bétons autoplacants (BAP) ", Thèse de doctorat de l'Université de Reims Champagne-Ardenne-France, (2009)
- [31] NF EN 12350–9, Essai pour béton frais - Partie 9 : béton autoplacant - Essai d'écoulement à l'entonnoir en V, 2010.
- [32] Powers, properties of fresh concrete, 1988, edition Wiley, 664 pages.
- [33] **Division de groupe CRH Canada inc-Demix Béton--Mortier-autoplacant**, janvier 2016
- [34] **MAISON.OOREKA**, Type.des.mortiers, www.construction.maison.ooreka.fr
- [35] **M. YURUGI, N. SAKATA, M. IWAI & G. SAKAI** 1993:Mix proportion for highly

Bibliographie

workable concrete. Conference Concrete 2000. Dundee. 7-9 September 1993.

[36] **S. TANGTERMSIRIKUL, J. SAKAMOTO, T. SHINDOH, Y.H. MATSUOKA.** Evaluation of resistance to segregation of super workable concrete and role of a new type of viscosity agent. Taisei Technical Research Report. N° 24, pp 369-376. December 1991.

[37] **F. DE LARRARD, F. BOSC, C. CATHERINE & F. DE FLORENNE** 1996 : La nouvelle méthode des coulis de l'AFREM pour la formulation des bétons à hautes performances. Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées. N° 202, pp 61-69. Mars-Avril 1996.

[38] **SEDRAN T.** « Rhéologie et rhéométrie des bétons : Application à la formulation des bétons autonivelants », Thèse de Doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, France, Mars 1999.

[39] **S. KUROIWA, Y. MATSUOKA, M. HAYAKAWA & T. SHINDOH.** Application of super workable concrete to construction of a 20-story building. American Concrete Institute SP140, High Performance Concrete in Severe Environments. Detroit, Michigan. pp 147-161. 1993.

[40] **T. SHINDOH, Y. MATSUOKA, S. TANGTERMSIRIKUL, J. SAKAMOTO** « Effect of variation of material quality on properties of super workable concrete». Transactions of Japan Concrete Institute. V 14, pp 71-78. 1992.

[41] **WILFRIED KURZ, JEAN-PIERRE MERCIER ET GERALD ZAMBELLI,** Traité des matériaux - Volume 1- Introduction à la science des matériaux - PPUR - 1999.

[42] **DEHBI N et CHAIBET C.,** « Comportement rhéologique et physico-mécanique des mortiers autoplaçants avec ajouts minéraux ». Mémoire de Master en Génie Civil, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, juillet 2019.

[43] **Mellas M,** L'utilisation du Microscope électronique à balayage et les diffractions par rayons x dans l'étude des ciments et bétons (Thèse de doctorat), université de Biskra. 2003.

[44] **Ben cheikh M, Baali L;** Etude expérimentale sur la perméabilité, la porosité et la résistance d'un béton à base de matériaux locaux comme critère de sa durabilité colloque CMEDIMAT 2005, 6 et 7 décembre 2005.