

RÉPUBLIQUE ALGERIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ AMMAR TELIDJI À LAGHOAT



MEMOIRE DE FIN D'ETUDE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER

FACULTE DE GENIE CIVIL ET ARCHITECTURE

Département de Génie Civil

Options : Matériau de construction (MDC)

Réaliser par :

Redouane GHRIGA

Thème

**Influence de la substitution du sable alluvionnaire
par du sable recyclé et du sable dunaire sur
les propriétés des mortiers autoplacants**

Membres de Jury:

Mr. A. BOUCEDRA, MAA

Mr. A. BOUKHELKHAL, MAA

Mr. B. BENABED, MCA

Président

Examineur

Encadreur

Promotion 2017/2018

Remerciements

Ce travail a été réalisé au sein des laboratoires de département Génie civil de l'université Ammar TELIDJI de Laghouat.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude et ma reconnaissance à mon directeur de mémoire M^r : B. BENABED, qui a dirigé les travaux de ce mémoire, la confiance qu'il m'a témoigné et l'ensemble des moyens qu'il a mis à ma disposition, son soutien, son écoute, son aide durant toute la durée de ce mémoire.

Mes sincères remerciements vont également à M^r : A. BOUCEDRA, pour avoir accepté de me faire l'honneur de présider le jury.

Je tiens à remercier M^r : A. BOUKHEKHAL d'avoir répondu favorablement pour faire partie du jury.

Je saisis cette occasion pour exprimer mes sincères remerciements à toute l'équipe du département Génie civil.

Enfin, mes remerciements les plus sincères s'adressent à tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin à la réalisation et à l'aboutissement de ce modeste travail.

Sommaire

Résumé

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale..... 1

Chapitre I : Etude bibliographique sur le béton autoplaçant

1. Introduction.....	3
2. Historique du béton autoplaçant (BAP)	3
2.1. Sur la mise en œuvre :	3
2.2. Sur la qualité du béton :	3
2.3. Concernant la conception :	4
3. Définition d'un béton autoplaçant (BAP)	4
4. Domaine d'application	5
5. Mise en œuvre et précautions d'emploi du BAP	5
6. Cahier des charges d'un BAP	5
7. Matériaux constituant un BAP	6
7.1. Liant	7
7.2. L'eau	7
7.3. Superplastifiants	7
7.4. Agent de cohésion.....	9
7.5. Fines.....	9
7.6. Sable	11
7.7. Gros granulats.....	16
8. Méthodes de formulation des BAP	18
8.1. Méthode basée sur l'optimisation du mortier :	18
8.2. Méthode basée sur l'optimisation du volume de pâte :	20

8.3	Méthode basée sur l'optimisation de la compacité des mélanges granulaires.....	21
9.	Caractérisation à l'état frais	22
9.1.	Le remplissage	22
9.2.	La résistance à la ségrégation	23
9.3	La capacité de passage	24
10.	Propriétés du BAP durci	24
10.1	Propriétés mécaniques	24
11.	Conclusion	30

Chapitre II : Le béton de sable

1.	Introduction	31
2.	Historique	31
3.	Définition	32
4.	Les composants du béton de sable	32
4.1.	les sables	32
4.2.	Les fines d'ajout (ou additions)	32
4.3.	Les ciments	33
4.4.	L'eau	33
4.5.	Adjuvants	33
4.6.	Autres ajouts	34
5.	Propriété d'un béton de sable	35
5.1.	Quantité de pâte élevée	35
5.2.	Peu ou pas de gros granulats.....	35
5.3.	Simple mise en place	36
5.4.	Faible tendance à la ségrégation	36
6.	Domaines d'utilisation des bétons de sable	37
7.	Les bétons de sable fluides.....	38
7.1.	Le contexte des bétons fluides	38
7.2.	Principales caractéristiques des bétons fluides	38
7.3.	Champ d'application des bétons de sable fluides	39

Chapitre III : Caractérisation des matériaux utilisés

1. Introduction	42
2. Matériaux utilisés	42
2.1. Sables	42
2.2. Le superplastifiant (SP)	51
2.3. Ciment.....	52
3. Formulation du Mortier (MAP)	53
3.1. Rapport Eau/Liant (E/L)	54
3.2. Rapport Sable/Mortier (S/M).....	54
3.3. Variation du rapport Superplastifiant/Liant (Sp/L)	54
3.4. Confection des mortiers	54
4. Propriétés à l'état frais	57
4.1. Etalement au mini-cône	57
4.2. Ecoulement au mini entonnoir en V (V-Funnel test).....	58
5. Propriétés à l'état durci	59
6. Conclusion	61

Chapitre IV : Effet de sable sur les propriétés des mortiers

1. Introduction	62
2. Optimisation du rapport Sable/Mortier (S/M) et Sp/L.....	62
3. Effet du superplastifiant sur les mortiers frais	65
3.1. Etalement au mini-cone	65
3.2. Temps d'écoulement à travers le mini-entonnoir en V	67
4. Effet de type de sable sur les propriétés des mortiers	69
4.1. Effet de sable sur l'étalement des mortiers.....	71
4.2. Effet de sable sur le temps d'écoulement des mortiers.....	73
5. Conclusion	77
Conclusion général.....	78

الخلاصة

ان العمل المنجز في هذه المذكرة يركز حول تركيب و دراسة خصائص ملاط ذاتي التوضع (MAP) (المصنوعة من مواد محلية باستعمال طريقة في تركيب (MAP) وذلك باستخدام كل من رمل معاد رسكلته (SR) رمل الواد (SA) رمل الكثبان (SD). لتحضير مختلف الملاط استعملنا طريقة (Okamura) مع إجراء بعض التغيرات الطفيفة في ما يخص نسبتي الرمل و الملاط. بعد ذلك قمنا بتثبيت نسبة الرمل على الملاط ونسبة الماء على الاسمنت وذلك في كافة طرق تركيب ملاط ذاتي التوضع. بينت النتائج المتحصل عليها بان استعمال مزيج من SR و SA يسمح بتحسين الخصائص الريولوجية والميكانيكية للملاط. إلا أن هذه الخصائص تقل باستخدام SR وSD معا خصوصا إذا رفعا نسبة SD في الملاط بالنسبة للمزيج الثنائي الثلاثي.

Résumé

Le travail de recherche présenté dans ce mémoire s'articule autour de la formulation et l'étude des propriétés des mortiers autoplaçants (MAP) confectionnés à partir des matériaux locaux. La formulation de MAP est effectuée en utilisant la méthode dite «Okamura» et à partir de différents sables (sable recyclé (SR), sable alluvionnaire (SA) et sable dunaire (SD)) et un mélange binaire ou ternaire de ces sables.

La méthode d'Okamura a été utilisée pour la formulation des MAP, avec certaines modifications concernant l'optimisation du rapport sable - mortier (S / M) et la teneur en superplastifiant. Pour toutes les formulations des MAP, les rapports sable / mortier et eau / ciment ont été maintenus constants.

Les résultats expérimentaux montrent que les performances rhéologiques et mécaniques de MAP à base des sables binaires SR et SA sont meilleures que celles obtenues en utilisant des sables binaires SR et SD essentiellement pour des teneurs plus élevées en SD. Cette constatation est aussi observée pour les MAP contenant des sables ternaires

Abstract

The research work presented in this report is articulated around the mix design and the study of the properties of self-compacting mortars (MAP) made starting from local materials. The mix design of MAP is carried out by using the method known as "Okamura" and from different sands (recycled sand (SR), river sand (SA) and dune sand (SD)) and a binary or ternary mixture of these sands.

The mixture proportions were based on Okamura's method, with improvements made on the methods of selecting the sand–mortar (S/M) ratio and the superplasticizer content. For all mixtures the sand/mortar and water/cement ratios were kept constant.

The experimental results indicate that the rheological and mechanical performances of mortars improve with mixtures of SR and SA but decrease with mixtures of SR and SD especially for higher SD content. This effect was also observed with mortar containing ternary sands.

Liste des figures

Figure 1:Phénomène de blocage des granulats au droit d'un obstacle [4]	6
Figure 2:Action des superplastifiants - Déflocculation des grains de ciment [10]	8
Figure 3:Influence de la quantité du superplastifiant sur l'étalement et la viscosité d'un béton [09]	8
Figure 4:Propriétés des BAP avec différents types du sable [25]	12
Figure 5:Effet de module de finesse du sable sur l'étalement du BAP [26].....	13
Figure 6:Effet de module de finesse du sable sur la capacité de remplissage en U-box [27]	13
Figure 7:Effet de volume du sable sur la capacité de remplissage en U-box [28]	14
Figure 8:Effet de volume du sable sur la demande en eau du mortier [30]	14
Figure 9:Effet de volume du sable sur l'ouvrabilité du mortier [30]	15
Figure 10:Effet de sable de dunes sur : (a) le temps d'écoulement au v-funnel et (b) la viscosité d'un béton de sable fluide [39].....	16
Figure 11:Résultats de mesures d'étalement et d'écoulement à la boîte LCPC en fonction de la fraction volumique granulaire [43].....	17
Figure 12: Variation de la résistance mécanique à la compression en fonction du rapport G/S [43].	18
Figure 13:Proportions du gravillon et du sable d'un béton autoplaçant selon la méthode générale [42].	19
Figure 14:Caractérisation du mortier : (a) essai d'étalement au mini-cône (b) essai d'écoulement au mini-entonnoir [47].....	20
Figure 15:Notion d'excès de pâte.....	21
Figure 16: Evolusion de la résistance mécanique d'un BAP (SCC) et d'un BV (REF) correspondant[59].....	25
Figure 17: Résistance mécanique d'un béton vibré et de deux BAP (de formulation différente) [60].	26
Figure 18: Comparaison des modules élastiques théoriques de BAP et de béton vibrés avec leurs valeurs expérimentales [63].....	27
Figure 19:Evaluation du module du béton en fonction de sa résistance, d'après le modèle réglementaire et un modèle d'homogénéisation [64].	27
Figure 20: Comparaison des retraits endogènes d'un béton vibré et cinq BAP [65]	28

Figure 21: Comparaison des retraits de dessiccation d'n BV et de cinq BAP [65]	29
Figure 22: Relation entre le dosage en ciment et le pourcentage des granulats fins dans un béton [72]	35
Figure 23: Schéma explicatif de l'apparences des bétons (1) , (2) et (3) [71]	36
Figure 24: Relation entre la capacité de remplissage et risques de ségrégation [73].....	37
Figure 25: Série de tamis utilisée.	43
Figure 26: Courbes granulométrique des sables utilisés (SA, SD,SR)	46
Figure 27: Schéma de l'essai équivalent de sable à vue et à piston.	48
Figure 28: Procédure de malaxage du mortier autoplaçant	56
Figure 29: Malaxeur pour mortier autoplaçant.....	57
Figure 30: Essai d'étalement au min-cône : (a) exécution de l'essai , (b) mesure de l'étalement	58
Figure 31: Essai d'écoulement au mini-entonnoir en V	58
Figure 32: Remplissage des moules	59
Figure 33: Démoulage des éprouvettes	59
Figure 34: Détermination de la résistance à la compression	60
Figure 35: Etalement en fonction du dosage en superplastifiant pour le mortier de sable recyclé	66
Figure 36: Etalement en fonction du dosage en superplastifiant pour le mortier de sable alluvionnaire.....	66
Figure 37: Etalement en fonction du dosage en superplastifiant pour le mortier de sable dunaire	67
Figure 38: Temps d'écoulement en fonction du dosage en superplastifiant pour le mortier de sable recyclé	68
Figure 39: Temps d'écoulement en fonction du dosage en superplastifiant pour le mortier de sable alluvionnaire.....	68
Figure 40: Temps d'écoulement en fonction du dosage en superplastifiant pour le mortier de sable dunaire.....	68
Figure 41: Etalement des mortiers en fonction de type de sable (a) , (b) , (c) , (d).....	71-72
Figure 42: Temps d'écoulement des mortiers en fonctions de type de sable.....	73-74
Figure 43: Résistance à la compression des mortiers en fonction de type de sable	75-76

Liste des tableaux

Tableau 1: Analyse granulométrique par tamisage à sec du sable alluvionnaire	44
Tableau 2: Analyse granulométrique par tamisage à sec pour le sable dunaire	45
Tableau 3: Analyse granulométrique par tamisage à sec pour le sable recyclé	45
Tableau 4: Composition chimique de notre ciment.....	52
Tableau 5: Composition minéralogique du ciment	52
Tableau 6:Mortier de sable alluvionnaire (SA) F1	63
Tableau 7:Mortier de sable recyclé (SR) F2	63
Tableau 8:Mortier de sable dunaire (SD) F3	64
Tableau 9:Mortier avec sable mélange (SR +SA).....	69
Tableau 10:Mortier avec sable mélange (SR +SD).....	69
Tableau 11:Mortier avec sable mélange (SA +SD).....	70
Tableau 12:Mortier avec sable mélange (SR+SA+SD)	70

The background features several abstract, three-dimensional purple rectangular blocks of varying sizes and orientations. Some blocks are light purple, while others are a darker shade. A flag with three horizontal stripes is visible on a pole in the upper right. At the bottom center, there are three vertical lines of varying heights.

Introduction générale

Introduction générale

Le béton est le matériau structural le plus utilisé pour la construction des infrastructures sociales et industrielles. Toutefois, pour construire des structures durables et fiables, il est nécessaire, non seulement de développer un béton de qualité, mais aussi d'assurer une mise en place correcte afin de répondre aux exigences demandées pour la mise en service de la structure.

Les structures actuelles se caractérisent par la complexité de leurs modèles telles que les formes variables et les courbures multiples, ainsi que leur forte concentration en armatures, ce qui rend l'application des bétons usuels à ces types d'ouvrages très difficiles avec des défaillances structurales très probables.

Les bétons autoplaçants constituent une nouvelle génération de béton qui s'adapte bien à l'état actuel du développement des structures face à une main-d'œuvre de moins en moins qualifiée. Cette gamme de béton se caractérise par une grande ouvrabilité et une grande déformabilité tout en étant stable et garantit des structures et durables. Ces bétons peuvent être mis en place sans vibration, au travers de zones confinées seulement sous l'effet de la gravité, tout en développant une bonne compacité sans exiger une main-d'œuvre spécialisée durant la consolidation. Ces propriétés contribuent à assurer un béton durable de qualité. Selon la densité du ferrailage et la complexité des éléments structuraux, le besoin de vibration peut diminuer considérablement et même être éliminé, ce qui représente une économie de main-d'œuvre considérable.

C'est dans ce contexte que le présent travail s'inscrit et il a pour objectif en premier lieu, est d'utiliser différents types des sables pour la fabrication des MAP. A cet égard, nous avons utilisé trois types de sables de différentes origine et morphologie, il s'agit de: sable recyclé, sable dunaire et sable alluvionnaire. Nous avons aussi utilisé ces sables dans des mélanges binaires et ternaires.

En deuxième lieu, est d'étudier l'influence de la nature et de la qualité de ces sables sur le comportement rhéologique (étalement, écoulement), mécanique (résistance à la compression et à la flexion).

Le travail est présenté en quatre chapitres :

➡ Le premier chapitre est consacré à l'étude bibliographique regroupant trois parties : dans la première partie, nous présentons les différents impacts des bétons autoplaçants, ainsi que l'influence des principaux constituants sur les propriétés des BAP. Ensuite, nous exposons les

Introduction générale

méthodes de formulation utilisées pour les BAP. Dans la deuxième partie nous avons abordé les différentes propriétés à l'état frais et à l'état durci des BAP.

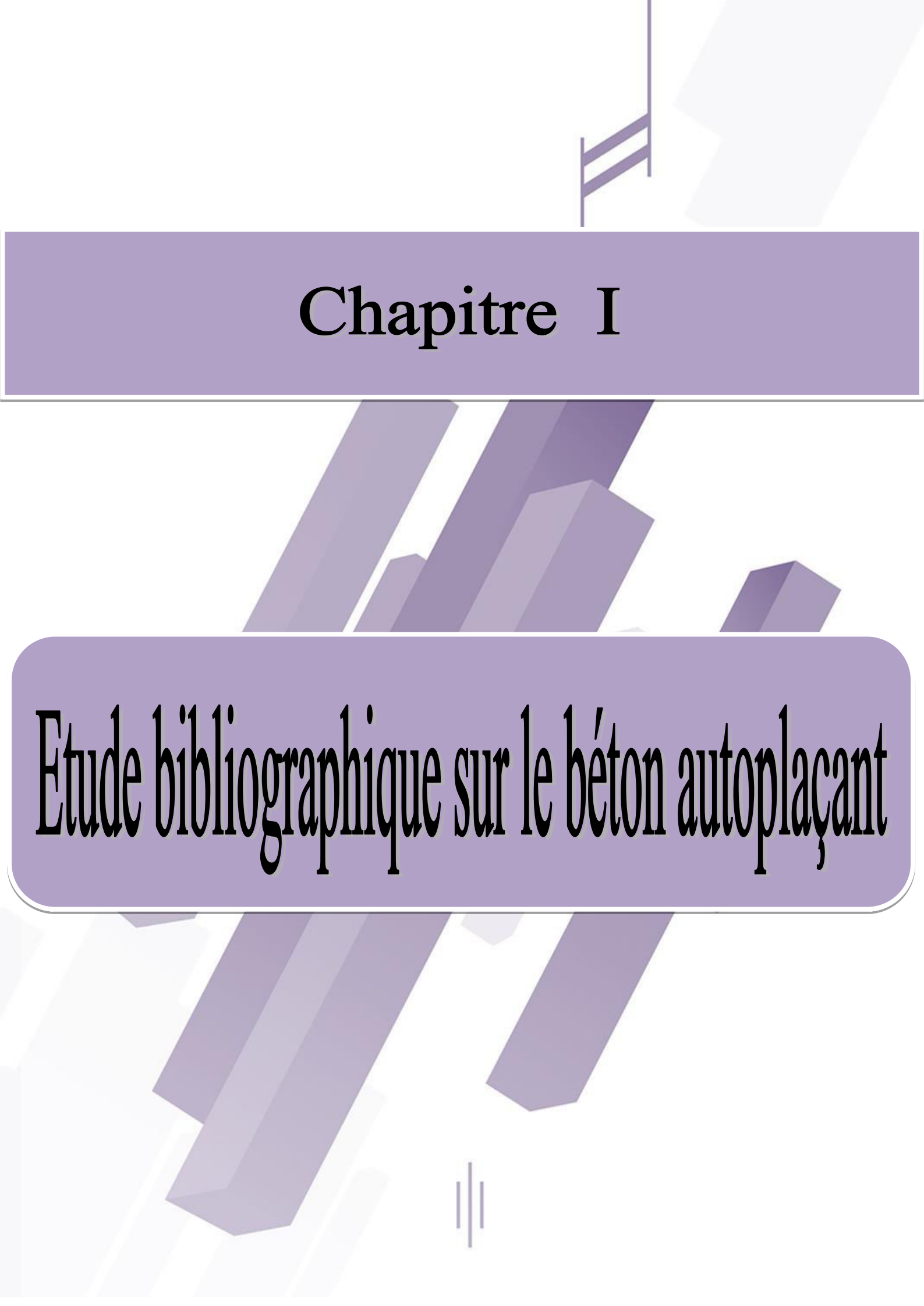
- ➡ Le deuxième chapitre, nous présentons les particularités des bétons de sable (BS).
- ➡ Le troisième chapitre décrit les caractéristiques des matériaux de base et les techniques expérimentales utilisées durant cette étude pour évaluer les propriétés à l'état frais (étalement par le mini-cône, écoulement via l'entonnoir V), les propriétés mécaniques (résistance à la compression et à la flexion).
- ➡ Le quatrième chapitre présente les résultats et les analyses de la campagne expérimentale menée sur les différentes formulations de notre programme. Ce chapitre comporte deux parties. La première partie nous avons étudié l'effet de type du sable sur les propriétés à l'état frais et durci des MAP. Et la deuxième partie, nous exposons les résultats des essais rhéologiques et mécaniques des MAP confectionnés avec différents types des sables.

Enfin, nous présentons une conclusion générale sur nos travaux ainsi que d'éventuelles perspectives et recommandations.

Alors que de nombreuses études visant à développer l'utilisation du BAP étaient (et sont encore) menées par différentes entreprises ou laboratoires universitaires, plusieurs questions posées par les maîtres d'ouvrage et les maîtres d'œuvre restaient sans réponse :

Quelle est l'influence de la substitution du sable alluvionnaire par du sable recyclé et du sable dunaire sur les propriétés des mortiers autoplaçant ?

L'objectif de notre étude est, autant que possible, de donner une réponse claire à cette question et peut être, ainsi, de contribuer au développement de ce mortier à partir des matériaux locaux.



Chapitre I

Etude bibliographique sur le béton autoplaçant

1. Introduction

Les bétons autoplaçants (BAP), ou en anglais, pour Self-Compacting Concrete SCC ont été utilisés pour la première fois au Japon vers la fin des années 1980 afin d'améliorer la rentabilité de la construction, d'assurer constamment une mise en place correcte avec un béton de qualité et de diminuer les nuisances sonores.

Le béton autoplaçant est également dénommé béton autocompactant pour les parois verticales, ou encore autonivelant pour les parois horizontales, mais l'appellation la plus courante en Algérie est : béton autoplaçant notée BAP. [1]

Ce chapitre fait l'objet d'un état de l'art sur les bétons autoplaçants, il comporte des notions fondamentales relatives aux caractéristiques des BAP.

2. Historique du béton autoplaçant (BAP)

Au Japon, le nombre d'ouvriers qualifiés dans la construction n'a cessé de diminuer depuis le début des années 1980, engendrant une perte de connaissance, notamment dans les techniques de vibration du béton. L'utilisation de bétons très fluides, ne nécessitant pas d'apport d'énergie extérieure pour le serrage, est apparue comme une solution possible à ce problème [2]. C'est ainsi qu'est né le concept des bétons autoplaçants. Outre leur facilité de mise en œuvre, de tels bétons présentent aussi l'intérêt de réduire le temps de travail sur chantier.

L'essor important de ce type de bétons se justifie par le fait qu'ils présentent de nombreux avantages :

2.1. Sur la mise en œuvre :

- ✓ Diminution du temps de coulée ;
- ✓ Suppression de la vibration et donc diminution notoire des nuisances sonores et de l'usure des moules métalliques et des coffrages ;
- ✓ Meilleures conditions de travail, ce qui permet d'attirer une main d'œuvre qui n'appréciait pas toujours les conditions de travail « bruyantes » ;
- ✓ Possibilité de couler des bétons dans des endroits inaccessibles ;
- ✓ Possibilité de couler des voiles de grande hauteur en une seule opération ;

2.2. Sur la qualité du béton :

- ✓ Parfait remplissage des éléments fortement ferrailés;
- ✓ Obtention d'une bonne qualité de parement (surface de béton lisse et donc moins de pores en surface);

- ✓ Et d'une manière générale, obtention d'une meilleure qualité du béton, in situ, pratiquement indépendante du savoir-faire des ouvriers durant la réalisation; cela va dans le sens d'une durabilité accrue des ouvrages;

2.3. *Concernant la conception :*

- ✓ Permet d'envisager de nouveaux types d'éléments en béton ;
- ✓ Possibilité d'intégrer des réservations dans le coffrage.

Cependant, ces avantages s'accompagnent fatalement de certains inconvénients:

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

3. Définition d'un béton autoplaçant (BAP)

Par définition, un(BAP) est un béton très fluide, homogène et stable, qui se met en place par gravitation et sans vibration. Il ne doit pas subir de ségrégation et doit présenter des qualités comparables à celles d'un béton vibré classique. Le terme de béton autonivelant peut aussi être utilisé mais il concerne plutôt des applications horizontales (dallage par exemple).

Les (BAP) se distinguent donc des bétons dits ordinaires (BO) leurs propriétés à l'état frais [3]. Ils sont capables de s'écouler sous leur propre poids, quel que soit le confinement du milieu, et restent homogènes au cours de l'écoulement (absence de ségrégation dynamique) et une fois en place (absence de ségrégation statique).

Pour obtenir un béton autoplaçant il ne s'agit pas d'ajouter de l'eau, au contraire, une telle manipulation conduit à des phénomènes de ségrégation entraînant une chute des performances. Ils'agit de trouver la composition optimale entre les différents constituants (gravier, sable, ciment, eau, ajouts et adjuvants), et de garantir l'absence de ségrégation et de ressuage.

Pour parvenir à ce cahier des charges, les BAP sont formulés différemment des BO. Dans leur cas, la pâte, définie comme le mélange du ciment, de l'eau et d'une addition, est privilégiée au détriment des gravillons. En général, les BAP possèdent un même dosage en ciment et en eau que les BO, ainsi qu'un volume de sable assez proche. C'est donc principalement l'ajout d'une addition qui sert de substitutaux gravillons ou au ciment. Les proportions exactes de chaque constituant dépendent bien sûr de la méthode de formulation choisie. [3]

4. Domaine d'application

Le béton autoplaçant est une solution bien adaptée pour :

- ✓ Tous types de dalles y compris dalles de compression sur poutrelles hourdis,
- ✓ Radiers,
- ✓ Plancher dalle pleine et plancher chauffant,
- ✓ Rattrapage de niveau en rénovation,
- ✓ Voiles, poteaux, poutres.

5. Mise en œuvre et précautions d'emploi du BAP

La fabrication, le transport et la mise en œuvre du BAP se font avec le matériel habituellement utilisé pour les bétons ordinaires. Il faudra néanmoins porter une attention particulière aux points suivants :

- ✓ Pour tous types d'utilisation :
- ✓ La vitesse de bétonnage (pas trop rapide pour éliminer l'air excédentaire)
- ✓ Ajouts d'eau interdits
- ✓ Une bonne étanchéité du coffrage, sa résistance à la poussée hydrostatique
- ✓ Bonne fixation des mannequins de réservations
- ✓ Protection du béton frais par des conditions de cure adaptées.
- ✓ Pour les ouvrages verticaux, architectoniques ou Génie civil :
- ✓ La hauteur de chute du béton (utilisation d'un tube plongeur conseillée).
- ✓ Pour les ouvrages horizontaux en particulier:
- ✓ Nécessité d'un calepinage des joints (retrait, dilatation...)
- ✓ Mise en place de renforts d'armatures aux droits des angles rentrants, en prolongation des murs, réservations et seuils de portes.

6. Cahier des charges d'un BAP

La spécificité des BAP réside dans leur comportement à l'état frais. En effet ce type de béton doit se caractériser par une grande ouvrabilité et une grande déformabilité tout en restant stable. Ces propriétés contribuent à assurer des structures durables et de qualité [4].

Le cahier des charges suivant décrit les propriétés rhéologiques exigées pour un BAP :

- Un BAP doit s'écouler naturellement sous son poids propre (avec un débit suffisant), c'est-à-dire avoir un étalement et une vitesse d'étalement importants,

Chapitre I : Etude bibliographique sur le béton autoplaçant

- Un BAP doit aussi pouvoir remplir, sans vibration, des zones confinées et une grande fluidité du béton peut ne pas être suffisante pour cela. En effet, lors de son écoulement au droit d'un obstacle, les gravillons cisailent le mortier et ont tendance à entrer en contact les uns avec les autres si ce dernier ne résiste pas suffisamment au cisaillement (figure 1). Ainsi, des arches peuvent se former et interrompre l'écoulement par colmatage. Pour éviter ceci, il est nécessaire qu'un BAP ait une bonne résistance à la ségrégation en phase d'écoulement en zone confinée,
- Un BAP doit présenter une bonne résistance à la ségrégation statique jusqu'à la prise du béton, pour des raisons évidentes d'homogénéité de ses propriétés mécaniques.
- De plus, le ressuage d'un BAP ne doit pas être trop fort car ceci peut générer une chute d'adhérence des armatures en partie supérieure des levées, par rapport à celles situées en zone inférieure lors du coulage, ainsi que l'apparition de fissures.

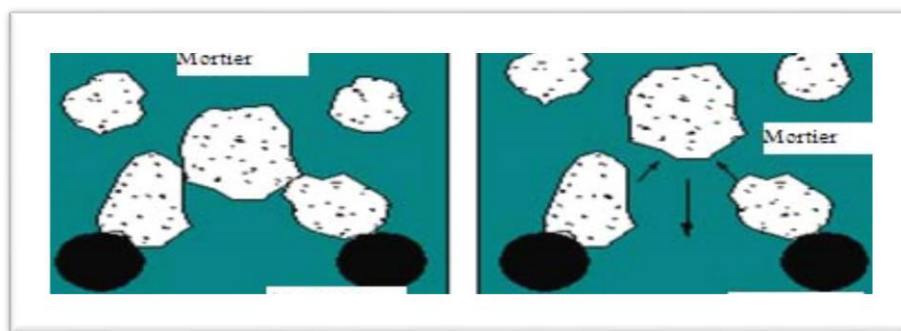


Figure 1. Phénomène de blocage des granulats au droit d'un obstacle [4]

7. Matériaux constituant un BAP

Toute formulation passe par la compréhension de l'influence de chaque constituant sur les propriétés d'écoulement du béton. Le rôle d'un constituant dépend essentiellement de son état (fluide, solide) et de sa nature minéralogique, chimique et morphologique. Ainsi, nous allons décrire, dans cette partie, les caractéristiques des différents constituants entrant dans la composition du béton autoplaçant (ciment, agrégats, eau, ajouts minéraux et adjuvants), et les paramètres influents.

Les constituants de base d'un béton ordinaire sont le ciment, l'eau et les granulats. Les différents constituants proposés pour composer les bétons autoplaçants, en plus du ciment et de l'eau dosés de manière à obtenir une résistance mécanique donnée, sont: les granulats, les fines, le superplastifiant et parfois l'agent de viscosité. Les nombreux constituants des rendent leur dosage complexe. Tous les constituants d'un béton créent des interactions complexes. La variabilité des matériaux et des dosages, particulièrement du sable et du super plastifiant, peuvent facilement affecter les propriétés et causer des problèmes lors de la production des

Chapitre I : Etude bibliographique sur le béton autoplaçant

BAP. C'est pourquoi ces bétons spéciaux nécessitent une bonne analyse de ses propriétés à l'état frais et durci.

7.1. Liant

Les BAP nécessitent un dosage plus élevé par rapport aux bétons conventionnels. Le ciment peut être remplacé par des ajouts. Les raisons sont nombreuses : diminution du prix, meilleur contrôle de la température d'hydratation, contrôle du retrait, meilleure compacité du mélange de béton.

7.2. L'eau

L'eau de gâchage doit être propre et ne doit pas contenir de matière en suspension au-delà des tolérances réglementaires suivantes [5]:

-  2 g/l pour les bétons à haute résistance ;
-  5 g/l pour les bétons à faibles résistances.

L'eau de gâchage ne doit pas contenir des sels dissous au delà de :

-  15 g/l pour les bétons à haute résistance ;
-  30 g/l pour les bétons à faibles résistances.

La pâte doit assurer une mobilité suffisante mais doit aussi inhiber tout risque de ségrégation et de ressuage. Un BAP sera dès lors composé d'une quantité de fines élevée et d'une quantité d'eau relativement faible (eau/ciment rarement supérieur à 0,55 voire 0,50). La fluidité souhaitée sera obtenue par l'utilisation de superplastifiants [6].

7.3. Superplastifiants

L'apparition des bétons autoplaçants et des bétons à Hautes performances (BHP) est fortement liée aux progrès réalisés dans le domaine des adjuvants et plus particulièrement celui des superplastifiants [7]. L'action principale des superplastifiants est de défloculer les grains de ciment. Une action de répulsion électrostatique agit en neutralisant les charges électriques présentes à la surface des grains et/ou par répulsion stérique en écartant les grains les uns des autres, grâce à des chaînes moléculaires très longues. L'eau piégée par les floccs est de nouveau disponible pour la maniabilité du béton (Figure 2). Il est alors possible de mettre en oeuvre des bétons très fluides, avec des rapports E/C faibles [8].

L'ajout d'un superplastifiant aide à augmenter la fluidité. La figure 3 montre par exemple que l'étalement augmente très fortement à partir d'un certain dosage en superplastifiant [9].

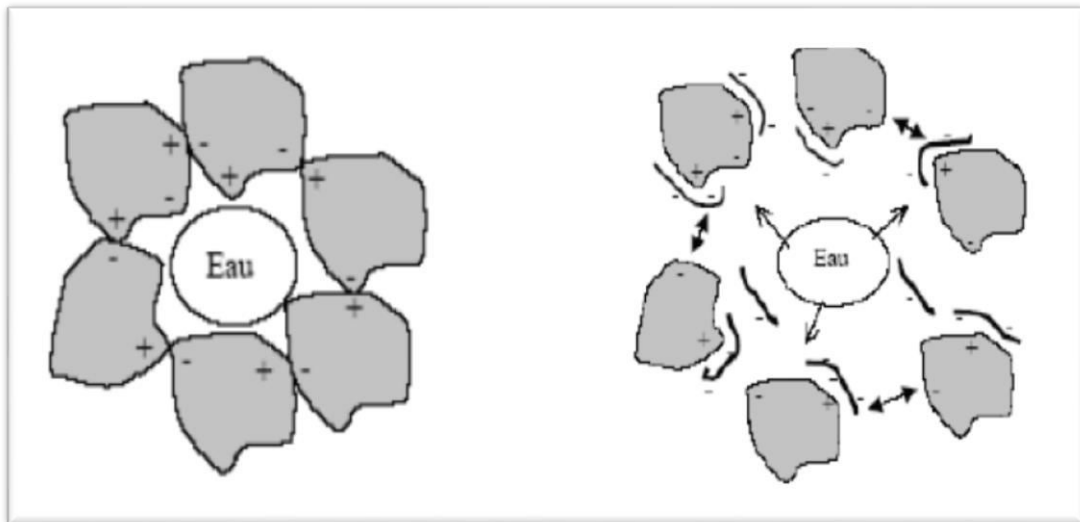


Figure 2. Action des superplastifiants - Défloculation des grains de ciment [10]

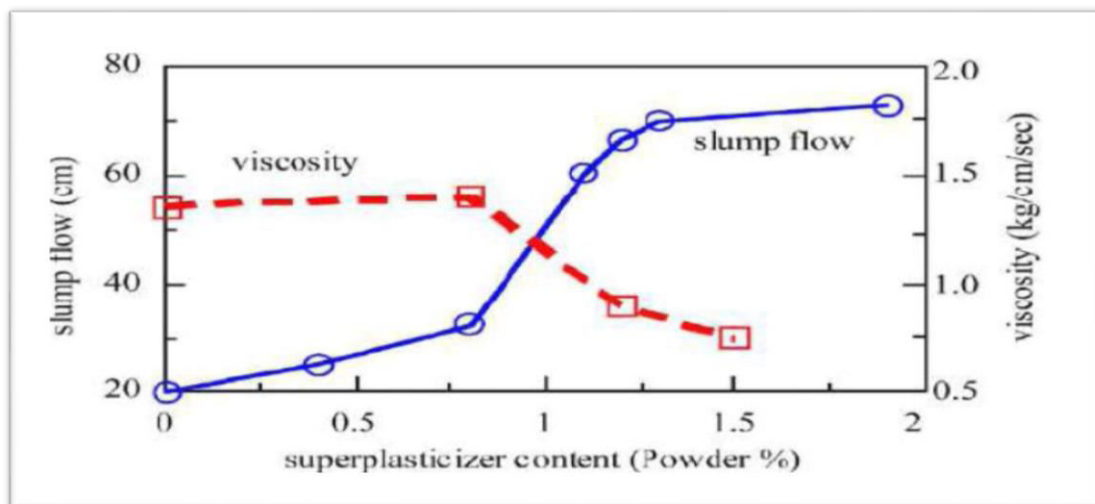


Figure 3. Influence de la quantité du superplastifiant sur l'étalement et la viscosité d'un béton [9]

Flatt et Houst [11] définissent l'action des superplastifiants en trois mécanismes :

- Une partie est adsorbée ;
- Une partie est consommée par les réactions avec les hydrates ;
- Une partie, en excès, reste en solution.

Ces auteurs montrent qu'une couche de gel ou de monosulfo-aluminate peut se former autour du ciment ce qui augmente la surface que doit recouvrir le superplastifiant pour disperser les grains. Donc, plus le ciment est réactif plus la quantité de polymère à ajouter sera importante [11].

Sugamata et al. [12] ont étudié l'influence de différents superplastifiants et de leurs dosages sur le maintien rhéologique dans le temps d'un mortier. Leurs résultats montrent que l'augmentation du dosage de superplastifiants n'a plus d'influence sur la fluidité du mortier à partir d'une certaine valeur.

Chapitre I : Etude bibliographique sur le béton autoplaçant

Cette caractéristique est maintenant bien connue. Il s'agit du dosage à saturation, c'est-à-dire le dosage au-dessus duquel l'adjuvant ne permet plus de modifier de façon significative la fluidité du mélange. Actuellement, les superplastifiants sont donc utilisés à un dosage proche du dosage à saturation. Différents auteurs [12] ; [13] ont montré que le moment d'introduction du superplastifiant lors du malaxage joue un rôle sur le dosage à saturation. Si l'introduction est retardée, le dosage à saturation est plus faible, il est obtenu pour une plus faible quantité de superplastifiant. Ceci est en accord avec ce que nous avons vu, car si l'hydratation du ciment est amorcée alors la consommation du superplastifiant par les hydrates sera moins importante [10]. Ainsi, le fait de retarder son introduction, permet au superplastifiant d'être plus efficace et d'obtenir des mélanges plus fluides que s'il avait été introduit en début de malaxage.

Les BAP contiennent des superplastifiants permettant d'obtenir la fluidité souhaitée. Toutefois un dosage trop élevé (proche ou supérieur au dosage de saturation) [14] peut augmenter la sensibilité du béton à des variations de teneur en eau vis-à-vis du problème de la ségrégation et du ressuage. Il est possible d'utiliser un plastifiant en synergie avec un superplastifiant.

7.4. Agent de cohésion

Ce sont généralement des dérivés cellulositiques, des polysaccharides ou des suspensions colloïdales. 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. De façon schématique, l'utilisation de ces produits semble se justifier dans le cas des bétons ayant des rapports eau/fines élevés, car les fines ne sont pas toujours suffisantes pour fixer l'eau dans le béton. Ils peuvent s'avérer superflus dans le cas de BAP ayant des rapports eau/fines faibles (notamment BAP de résistance supérieure à 50 MPa).

Pour la gamme intermédiaire des bétons, leur utilité est à étudier au cas par cas. Les agents de cohésion ont la réputation de rendre les BAP moins sensibles à des variations d'eau vis-à-vis du problème de ressuage et de la ségrégation [15]. Par contre, leur utilisation peut conduire suivant les produits à des problèmes de dosage en centrale (dosage faible), à des entraînements d'air excessifs et à une diminution de la fluidité [16].

7.5. Fines

Les superplastifiants permettent donc d'obtenir des bétons très fluides en réduisant les frottements entre grains de ciment et en libérant une certaine quantité d'eau. Leur utilisation n'est pas suffisante dans le cas des BAP. Nous avons vu que la fluidité de la pâte avait une certaine influence sur le comportement du matériau mais que la quantité de pâte jouait également un rôle vis-à-vis la fluidité du mélange. Les interactions entre les plus gros grains

Chapitre I : Etude bibliographique sur le béton autoplaçant

doivent aussi être réduites. Pour augmenter la quantité de pâte d'un BAP, on peut alors envisager d'augmenter la quantité de ciment. Or ceci conduirait à une augmentation significative du coût du matériau mais également à des problèmes de retrait dus à l'élévation de la température lors de l'hydratation du ciment. Il est donc nécessaire de remplacer une partie du ciment par des additions minérales. Différentes additions sont citées dans la littérature : cendres volantes, laitiers de hauts fourneaux, fumées de silice et filler calcaire. Ces matériaux peuvent avoir une influence chimique et/ou un rôle physique selon leur nature [17].

a. Les fumées de silice

L'influence des fumées de silice n'est pas très claire. Pour Ferraris et al. [18], les fumées de silice augmentent le seuil de viscosité en augmentant la compacité des mélanges. Par contre, pour Carlsward et al. [19], les fumées de silice ne modifient pas la viscosité. Par rapport à la rhéologie d'un mélange de référence, Ferraris et al. [18] montrent que l'utilisation de fumées de silice augmente la demande en eau et en super- plastifiant que ce soit pour des pâtes de ciment ou pour des bétons.

b. Les fillers calcaires

Zhu et Gibbs [20] ont étudié l'influence de différents types de filler calcaire. Dans le cas des pâtes de ciment, le type de filler utilisé ne semble pas avoir d'influence sur l'étalement. Par contre, si on s'intéresse au béton, ils montrent que le type de filler a une forte incidence sur la quantité de superplastifiant pour un étalement donné. En effet, le filler à base de craie demande plus d'adjuvantation que le filler calcaire. La différence intervient dans la présence d'impuretés, la compacité et le processus d'absorption. Malgré cela, quel que soit le type de filler utilisé, leurs résultats montrent que plus il y a de filler en remplacement du ciment, moins il faut de superplastifiants pour atteindre un étalement donné.

c. Les cendres volantes

Le remplacement d'une partie du ciment par des cendres volantes a une faible influence sur le seuil et la viscosité des pâtes de ciment. Certains auteurs remarquent cependant que leur utilisation peut améliorer la fluidité, car leur forme sphérique permet de réduire les frottements entre les grains de ciment. Ferraris et al. [18] montrent par ailleurs que le diamètre moyen des cendres volantes a une légère influence sur la valeur du seuil d'écoulement, les mélanges les plus fluides étant obtenus avec les particules les plus fines. Associées à un superplastifiant, les cendres volantes permettent de réduire le dosage en adjuvant nécessaire à l'obtention d'une

Chapitre I : Etude bibliographique sur le béton autoplaçant

certaine fluidité, mais le rapport E/C doit être suffisamment important (équivalent au rapport utilisé pour l'échantillon témoin) sinon la demande en adjuvant augmente fortement.

d. Le quartz

Le quartz est un minéral composé de dioxyde de silicium (SiO_2), composant important du granite dont il remplit les espaces résiduels et des roches métamorphiques granitiques (gneiss, quartzite) et sédimentaires (sable, grès). Le quartz est généralement chimiquement quasi-inerte du fait de sa structure cristallisée, mais un broyage très fin peut le rendre pouzzolanique et le rendre ainsi actif. Cette réaction complexe de dissolution-précipitation dépend de la taille des particules de quartz [21].

e. Les laitiers de hauts fourneaux

Les laitiers de hauts fourneaux sont des résidus minéraux de la préparation de la fonte dans les hauts fourneaux à partir du minerai et du coke métallurgique. Ils contiennent de la chaux (45 à 50%), de la silice (25 à 30%), de l'alumine (15 à 20%) et environ 10% de magnésie. Trempé à l'air ou à l'eau, le laitier est principalement vitreux. Il est broyé et ajouté en proportions variables au clinker. Le laitier peut non seulement améliorer les propriétés rhéologiques mais aussi augmenter significativement les performances mécaniques et la durabilité à long terme du béton.

Le remplacement d'une partie du ciment par des laitiers de hauts fourneaux permet globalement de réduire le seuil et la viscosité des pâtes de ciment [18] et [22].

Shi et al. [22] montrent par exemple que les laitiers de hauts fourneaux adsorbent le superplastifiant. Il est donc possible que la demande en superplastifiant soit plus importante pour obtenir une même fluidité ou valeur de seuil.

f. La pouzzolane naturelle

La pouzzolane naturelle est un matériau d'origine volcanique. Krachai et al. [23] ont étudié l'influence de la pouzzolane naturelle sur les performances mécaniques des BAP. Ces auteurs ont montré que 15% de teneur en pouzzolane naturelle engendre une augmentation importante des résistances mécaniques après 28 jours.

7.6. Sable

Un sable avec une bonne distribution granulométrique et un faible coefficient d'absorption d'eau convient parfaitement à la fabrication du BAP de bonne qualité. En effet, l'utilisation des

Chapitre I : Etude bibliographique sur le béton autoplaçant

sables dans la BAP dépend de leur disponibilité locale [24]. Le type du sable et son module de finesse ont un effet important sur les propriétés des bétons.

Kim et al. [25] ont étudié l'influence de type du sable et son module de finesse sur les propriétés à l'état frais des mortiers. Ils ont utilisé trois types des sables: sable alluvionnaire roulé, sable concassé et sable de mer avec des modules de finesse différents de 2.64, 2.87 et 3.38 respectivement. Les résultats sont montrés dans la figure 4, les auteurs ont trouvé que le temps d'écoulement en V-funnel est plus important en utilisant le sable concassé et sable de mer. L'essai de l'écoulement à travers la boîte en (U) montre que la capacité de passage est plus faible pour les BAP contenant du sable concassé par rapport à ceux contenant du sable alluvionnaire ou du sable de mer.

Hirata et al. [26] ont rapporté que l'utilisation du sable moyen avec un module de finesse de 2.4 – 2.9, donne une meilleure performance rhéologique du BAP en termes d'étalement. Cependant, le temps d'écoulement augmente avec l'utilisation du sable grossier (Figure 5)

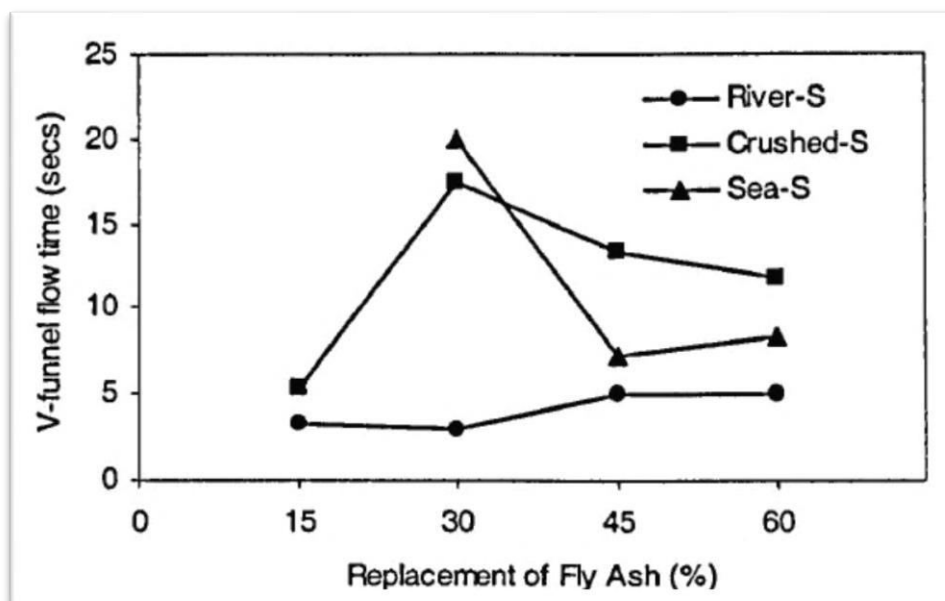


Figure 4. Propriétés des BAP avec différents types du sable [25]

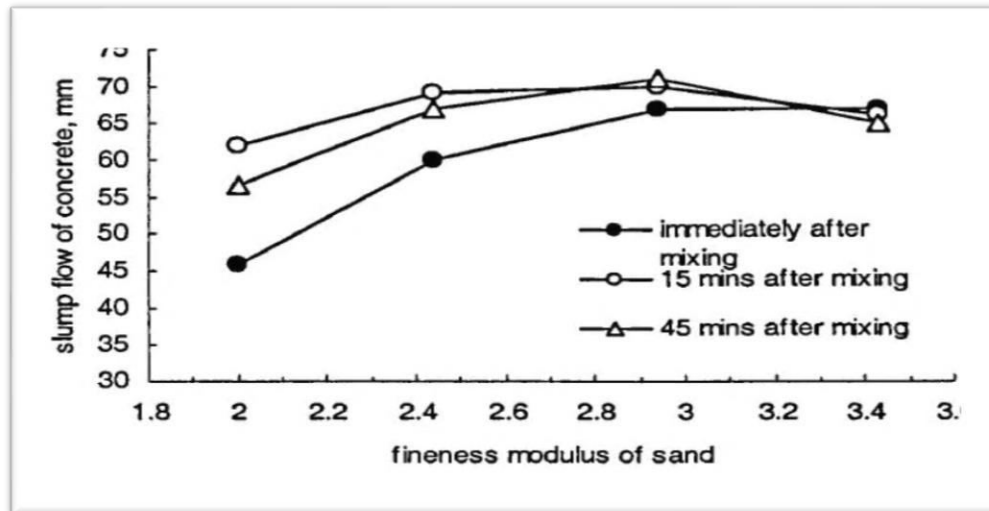


Figure 5. Effet de module de finesse du sable sur l'étalement du BAP [26]

Sudo et al. [27] ont utilisé l'essai de la boîte en L pour comparer des BAP avec des sables de différentes granulométries. Les meilleurs résultats ont été obtenus pour les BAP contenant du sable de granulométrie moyenne. Cependant, cette qualité diminue lorsqu'on utilise du sable concassé et sable grossier (Figure 6).

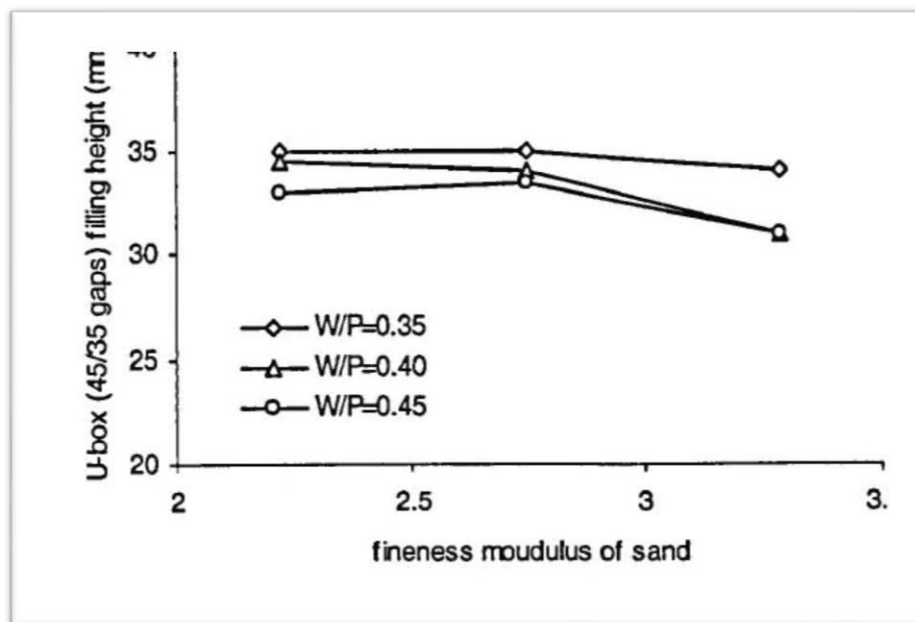


Figure 6. Effet de module de finesse du sable sur la capacité de remplissage en U-box [27]

Edamatsu et al. [28] ont trouvé que la capacité de remplissage des BAP diminue si on utilise un volume du sable supérieur à 50 % dans la composition du BAP (Figure 7). Cependant, Chai [29] a suggéré que la teneur en sable doit être comprise entre 40 à 47 % pour obtenir un BAP.

Chapitre I : Etude bibliographique sur le béton autoplaçant

Naoki et al. [30] ont étudié l'effet de volume du sable sur la demande en eau et en superplastifiant des mortiers. Ils ont remarqué que la demande en eau et en superplastifiant augmente avec l'augmentation de volume du sable dans le mortier (figure 8). Ils ont aussi rapporté que l'ouvrabilité mesurée par l'essai d'étalement augmente avec l'augmentation du pourcentage de sable dans le mortier (Figure 9).

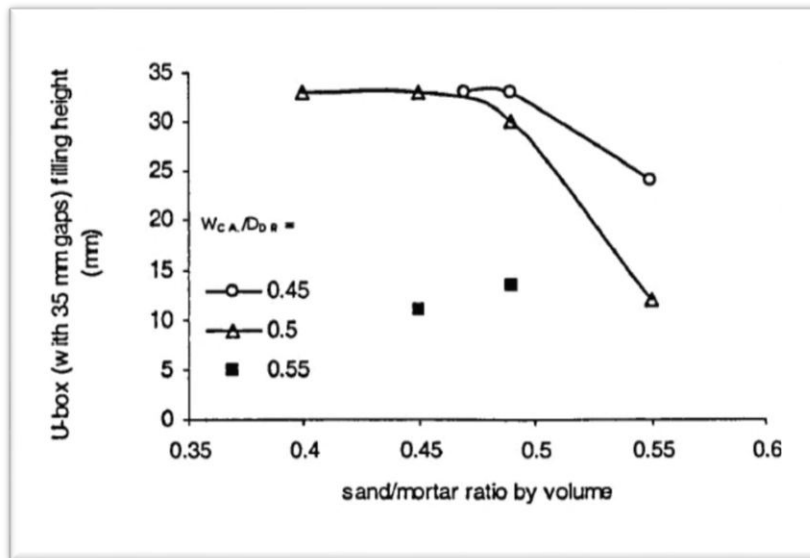


Figure 7. Effet de volume du sable sur la capacité de remplissage en U-box [28]

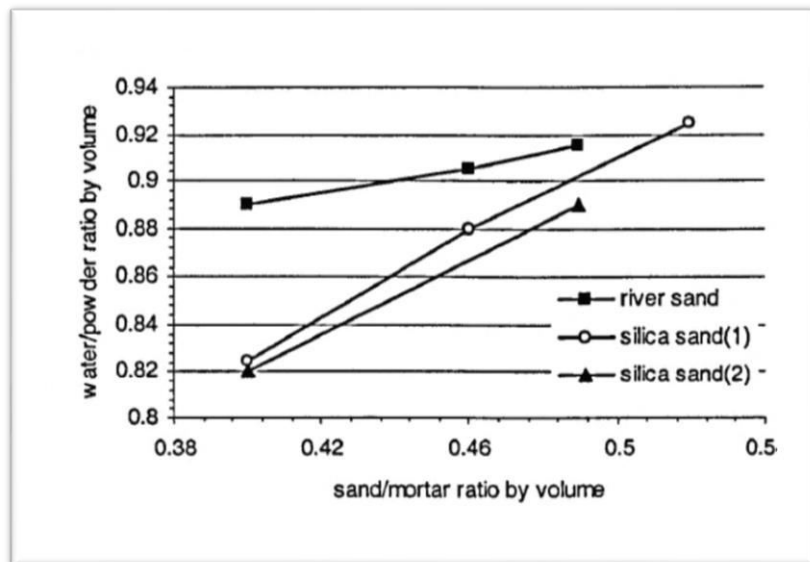


Figure 8. Effet de volume du sable sur la demande en eau du mortier [30]

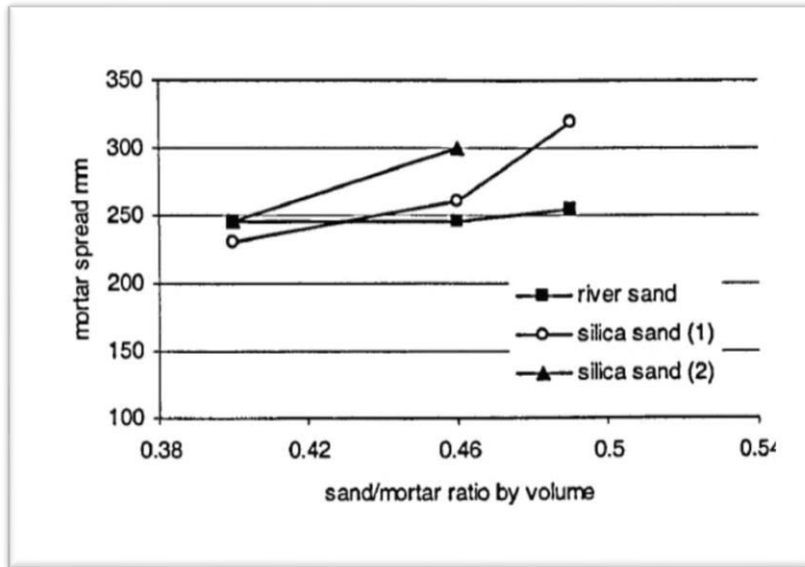


Figure 9. Effet de volume du sable sur l'ouvrabilité du mortier [30]

Westerholm et al. [31], ont utilisé un sable concassé de mauvaise distribution granulométrique pour fabriquer un BAP, le but c'est d'augmenter le volume de pâte et la viscosité du BAP. Billberg [32] a montré que les variations dans le sable affectent les performances du BAP. Il a remarqué que la finesse influe sur l'étalement et la capacité de passage du BAP.

L'humidité du sable a un effet important durant la formulation et la fabrication du BAP. Une erreur dans le calcul de la teneur en eau de l'ordre de 0.5% peut causer un changement de la quantité d'eau de 8 kg/m^3 dans le béton, ce qui conduit à un changement de l'étalement de 45 mm [33].

La proportion fine dans le sable influe sur les propriétés du BAP d'une manière significative [24]. L'augmentation de la teneur en fines augmente la viscosité du béton, le rapport E/C et retarder l'hydratation du ciment ce qui influe sur la stabilité volumétrique et la résistance à la compression [34].

Selon Felekoglu [34] et Benabed et al. [35], afin de renforcer la contenance des fines dans le mélange du BAP, du sable riche en fines (15-20% en poids) peut être utilisée, mais la sélection du type de sable est très importante pour obtenir une bonne résistance à la compression avec un minimum de superplastifiant. La valeur d'adsorption du bleu de méthylène est un bon indicateur de la contenance du sable en argile, cet essai peut être utilisé pour la sélection du type de sable contenant un grand volume de fines. De leur part, Menadi et al. [36] trouvent que l'utilisation des sables contenant jusqu'à 15% de fines n'affectent pas la résistance du béton.

Shobha et al. [37] ont remplacé 20% de sable par du laitier, ils ont trouvé que la résistance à la compression a augmenté dans les sept premiers jours comparativement à un BAP de référence

mais a rechuté à 28 jours. Pour une substitution de 10% en laitier, la résistance à la compression à 28 jours est plus élevée que celle du BAP de référence.

Dans une étude plus récente sur des bétons de sable fluides, Harini et al. [38] et Bouziani et al. [39] ont trouvés qu'une substitution massive de sable alluvionnaire par un sable de dunes à environ de 10 %, permet d'améliorer la fluidité (par la diminution du temps d'écoulement au v-funnel) et de diminuer la viscosité du béton de sable fluide étudié (Figure 10)

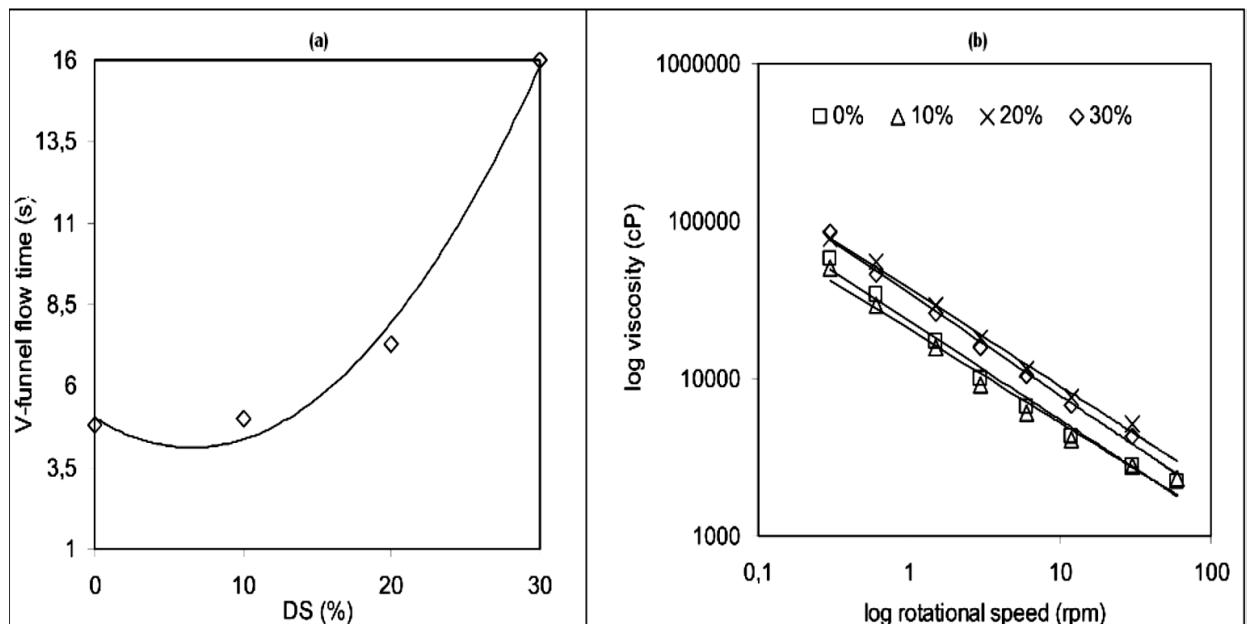


Figure 10. Effet de sable de dunes sur : (a) le temps d'écoulement au v-funnel et (b) la viscosité d'un béton de sable fluide [39]

7.7. Gros granulats

Les gros granulats sont un facteur très important pour la formulation des BAP. La quantité, la granulométrie, la forme, la porosité et les caractéristiques pétrographiques des gros granulats sont à considérer lors de la formulation d'un BAP. Le choix des granulats roulés ou concassés dépend de la disponibilité locale des matériaux [40].

Des granulats légers et recyclés ont également été utilisés pour la fabrication des BAP [41]. La taille maximale des gros granulats est un facteur non négligeable et peut provoquer le blocage du BAP. Le risque de blocage, pour un ferrailage donné, augmente lorsque le diamètre des granulats augmente [10]. La plupart des applications des BAP ont utilisé des gros granulats avec un diamètre maximal de 16 à 20 mm.

Okamura and Ouchi [42] ont rapporté que la diminution de la capacité de remplissage est due à l'augmentation de la quantité des gros granulats dans le béton.

Dans les travaux de Yammine et al. [43], il a été montré aussi que la fraction volumique granulaire (G+S) a une influence sur la fluidité des BAP. En fait, pour une fraction volumique

Chapitre I : Etude bibliographique sur le béton autoplaçant

granulaire inférieure à environ 62%, le BAP reste dans les limites de fluidité exigée, car son étalement au cône d'Abrams et son écoulement à la boîte LCPC seront supérieurs à 550 mm (Figure 11) ; ce qui correspond à une capacité de passage inférieure à 0.8, limite recommandée par l'AFGC (mesurée par la boîte en L).

L'effet du rapport G/S sur la résistance mécanique à la compression, représenté sur la (Figure 12), montre qu'elle diminue en fonction de la diminution du rapport G/S [43]. Parallèlement à une diminution du volume des gros granulats, la granularité des grains (distribution granulaire) influence fortement l'ouvrabilité du BAP. La combinaison de plusieurs granulats ayant des granularités différentes permet d'améliorer la compacité du mélange et d'obtenir une granularité continue. Cela a pour conséquence de favoriser la stabilité du BAP vis-à-vis du phénomène de ségrégation tout en améliorant sa fluidité.

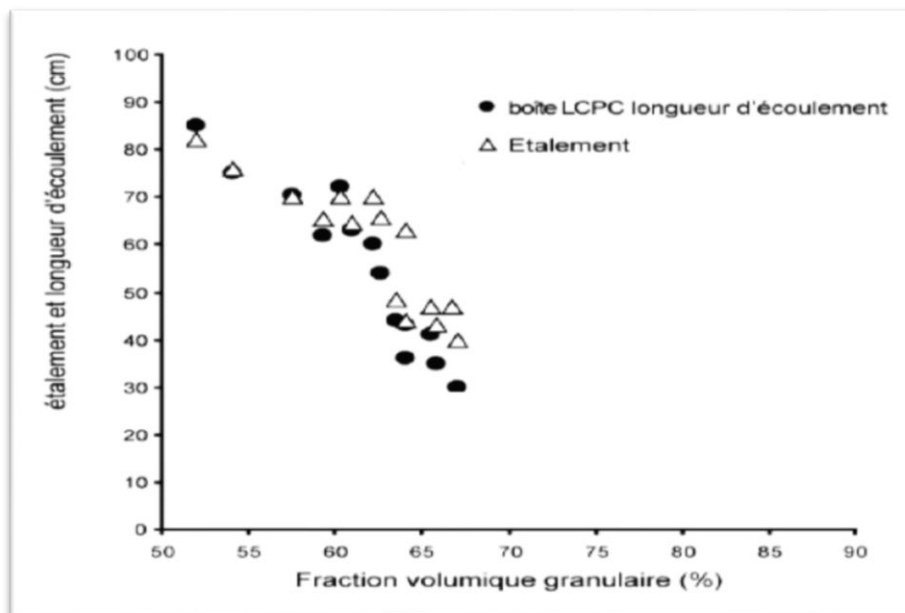


Figure 11. Résultats de mesures d'étalement et d'écoulement à la boîte LCPC en fonction de la fraction volumique granulaire [43]

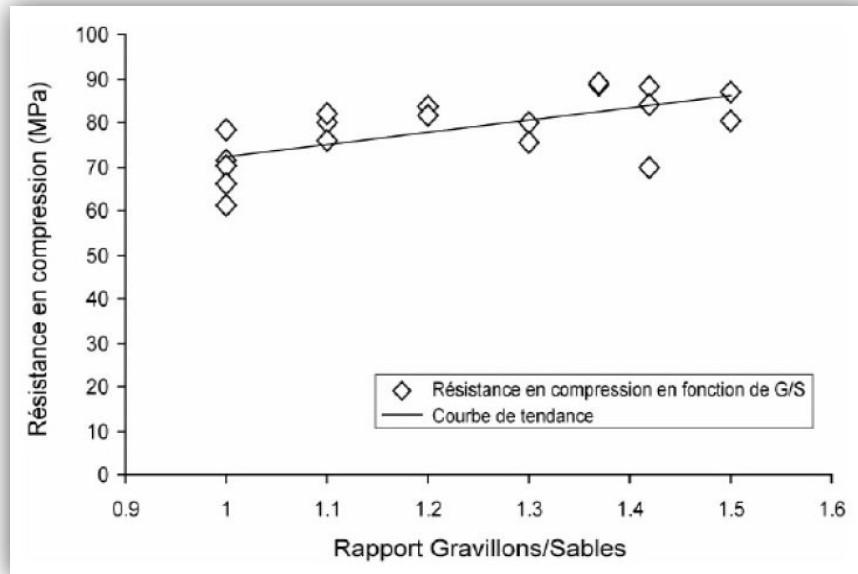


Figure 12. Variation de la résistance mécanique à la compression en fonction du rapport G/S [43]

8. Méthodes de formulation des BAP

Les BAP sont caractérisés à l'état frais par trois propriétés exceptionnelles: déformabilité, capacité de passage et résistance à la ségrégation. La satisfaction de ces caractéristiques contradictoires en même temps complique la formulation de ce type de béton. Néanmoins, une méthode de formulation qui s'appelle " méthode générale " ou "méthode japonaise " a été développée au Japon, pour satisfaire ces trois caractéristiques à la fois [44]. D'autres méthodes de formulation ont été ensuite publiées dans divers pays du monde. Dans ce qui suit, nous allons exposer trois méthodes de formulation des BAP les plus répandues.

8.1. Méthode basée sur l'optimisation du mortier :

Cette méthode a été développée par Okamura et Ozawa, deux chercheurs de l'université de Kochi au Japon [44]. L'idée principale des deux chercheurs est basée sur l'obtention d'un béton autocompactant. Celui-ci nécessite une grande déformabilité et une viscosité appropriée de la pâte ou du mortier pour que le béton puisse s'écouler à travers des sections étroites sans ségrégation entre les gros granulats et le mortier [44]. Pour obtenir un BAP, la première démarche de cette méthode consiste à limiter le volume du gravillon à 50% du volume des solides contenus dans le béton, c'est-à-dire :

$$VG = \frac{50}{100} VG_{lim}(1 - A) \quad \text{Équation 1}$$

Où V_{Glim} : volume absolu d'un mètre cube de gros granulats ;

A : teneur en air choisie en fonction de la résistance au gel-dégel.

Chapitre I : Etude bibliographique sur le béton autoplaçant

De même, le volume du sable est fixe a 40% du volume total du mortier (Figure 13). Les propriétés du mortier recherchées (grande déformabilité, viscosité adéquate) sont obtenues grâce a l'utilisation d'une forte teneur en poudre et d'un SP avec un dosage efficace [42]. Les étapes fondamentales de cette méthode sont résumées comme suit :

- Le volume d'air est suppose égal a 1% en absence de l'adjuvant entraîneur d'air, et 4 a 7% dans le cas contraire;
- La quantité de gravillons est fixe a 50% de leur compacité;
- La teneur en sable est limitée a 40% du volume du mortier;
- Le rapport Eau/poudre (E/P) est suppose égal a 0,9 a 1% par volume, tout dépend des propriétés de la poudre;
- Le dosage en super plastifiant et le rapport E/P final sont ajustés dans les mortiers.

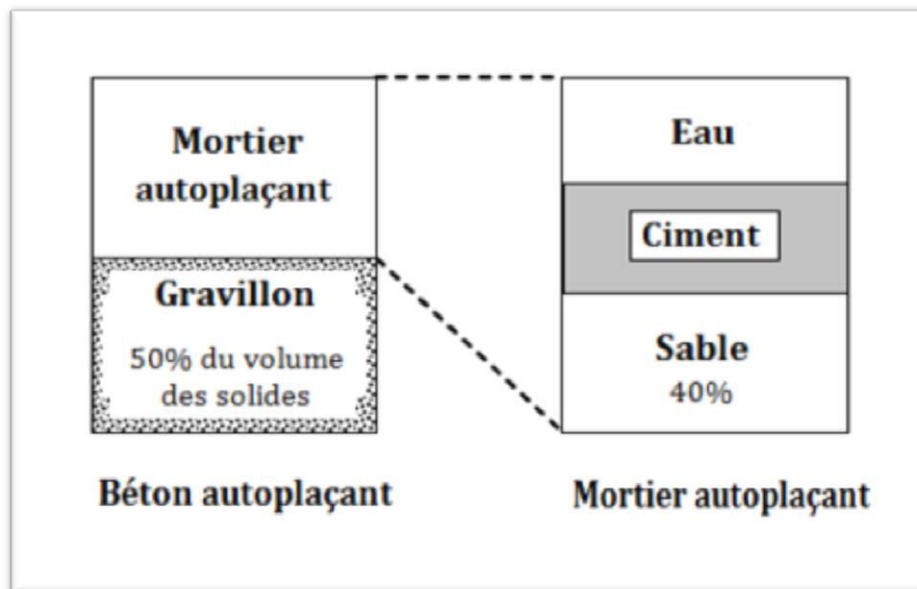


Figure 11. Proportions du gravillon et du sable d'un béton autoplaçant selon la méthode générale [42].

L'ajustement du rapport E/P et du dosage en SP passe par la réalisation des essais préliminaires sur le mortier : essai d'étalement au mini-cône et essai d'écoulement au mini-entonnoir suggérés par plusieurs chercheurs (Figure 14) [32]. A travers ces essais, on mesure le diamètre final d'étalement et le temps d'écoulement, puis on calcule les deux paramètres suivants :

- ✓ Etalement relatif :

$$\Gamma_m = \frac{(D)^2 - (D_o)^2}{(D_o)^2} \quad \text{Équation 2}$$

- ✓ Vitesse d'écoulement relative :

$$R_m = \frac{10}{t} \quad \text{Équation 3}$$

Ou Γ_m : étalement relatif ;

Chapitre I : Etude bibliographique sur le béton autoplaçant

D: diamètre d'étalement en cm ;

D_0 : diamètre inférieur du mini-cône en cm ;

R_m : vitesse d'écoulement relative ;

t : temps d'écoulement en seconde.

L'étalement relatif permet d'identifier la déformabilité du mortier (plus Γ_m est grand, plus le mortier est déformable), alors que la vitesse d'écoulement relative représente la viscosité (plus R_m est petit, plus le mortier est visqueux). Pour obtenir un béton autoplaçant de bonnes caractéristiques à l'état frais, de nombreux chercheurs [3] et [45] ont recommandée des valeurs d'étalement relatif et de vitesse d'écoulement relative respectivement de $\Gamma_m = 5$ et $R_m = 1 \pm 0,1$.

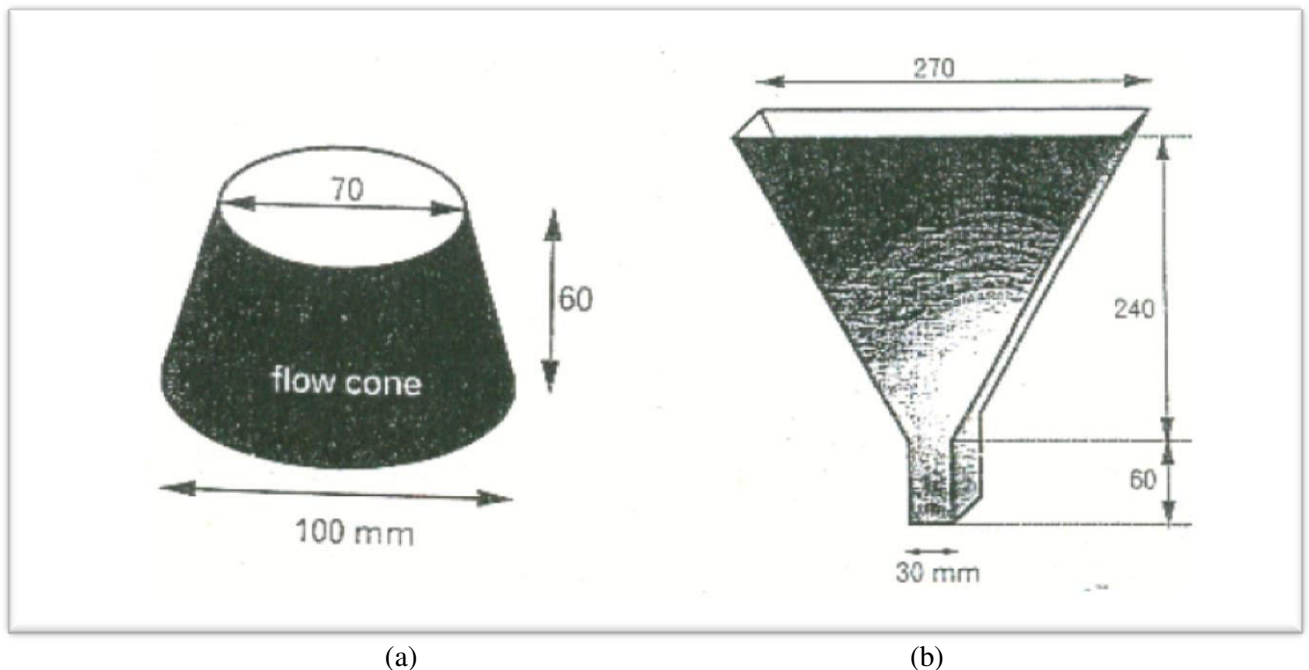


Figure 12. Caractérisation du mortier : (a) essai d'étalement au mini-cône (b) essai d'écoulement au mini-entonnoir [46].

8.2. Méthode basée sur l'optimisation du volume de pâte :

Méthodes basées sur l'optimisation du volume de pâte : Le béton est considéré ici comme un mélange bi-phasique, avec une phase solide, les granulats, et une phase liquide, la pâte. Dans le cas d'un BAP, la pâte joue un rôle prédominant. Oh et al. [47] introduisent la notion d'excès de pâte. La formulation consiste à déterminer la quantité de pâte en excès optimale pour fluidifier le BAP et limiter les problèmes de blocage.

Oh et al. [47] ont obtenu par l'expérience des équations reliant l'épaisseur de la pâte autour des granulats et les constantes du modèle de Bingham (seuil de cisaillement et viscosité) du béton, exprimées par rapport à celles de la pâte. Lors de la formulation, il faut d'abord optimiser et

Chapitre I : Etude bibliographique sur le béton autoplaçant

caractériser la rhéologie de la pâte, puis déterminer à l'aide de ces équations la proportion minimale de pâte nécessaire pour fluidifier le béton. Les auteurs ne proposent pas de méthode pour doser la pâte par rapport au blocage.

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 Basuyaux [48] dans une méthode de formulation des bétons de sable.

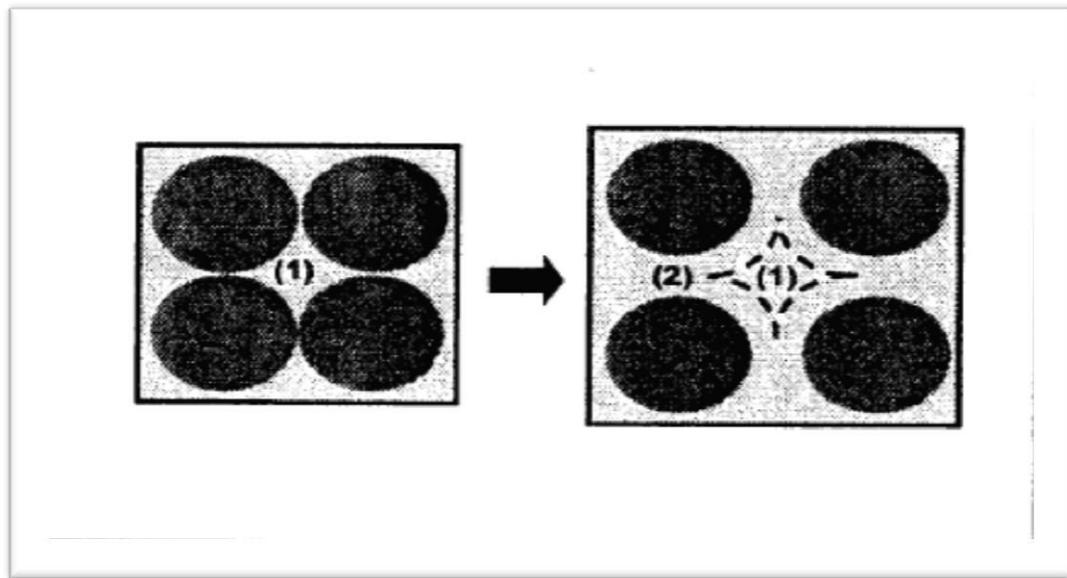


Figure 13. Notion d'excès de pâte
La pâte remplit la porosité (1) et écart les granulats (2)

8.3. Méthode basée sur l'optimisation de la compacité des mélanges granulaires

Cette méthode, qui a été développée au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) par Sedran et De Larrard, vise à économiser la production des BAP tout en cherchant la compacité optimale des grains solides (des poudres aux gravillons) permettant d'obtenir un béton de grande ouvrabilité, de meilleure résistance en utilisant un volume de pâte moins important [49]. La méthode française est basée sur le modèle d'empilement compressible du squelette granulaire [50]. Ce modèle prédit la compacité réelle du squelette granulaire à partir des propriétés des ses constituants (poudre, sable et gravillons) telles que la granulométrie, la densité, les proportions du mélange et la compacité propre. Le comportement du béton à l'état frais est modélisé à partir de sa compacité granulaire [49].

Cette méthode nécessite de faire quelques essais pour déterminer la teneur en eau et le dosage en superplastifiant et le dosage à saturation du SP. Connaissant ces paramètres et ceux cités en haut et de l'effet de paroi, et grâce au logiciel Betonlab-Pro2, les dosages des constituants sont déterminés [49].

Chapitre I : Etude bibliographique sur le béton autoplaçant

Pour pouvoir utiliser de façon pratique le modèle d'empilement compressible, les auteurs l'ont fait intégrer dans un logiciel nommé Betonlab-Pro2 [49]. Le comportement rhéologique du béton est évalué en utilisant un rhéomètre appelé BTRHEO qui a été développé au LCPC. Cependant, comme cette méthode est développée sur la base de l'utilisation du rhéomètre BTRHEOM et du logiciel RENE-LCPC. Il est difficile donc aux autres chercheurs de l'utiliser sans avoir ces deux moyens [51].

9. Caractérisation à l'état frais

Les bétons ordinaires sont des matériaux qui se mettent en place sous l'effet de sollicitations extérieures ou intérieures telles que la vibration. Les bétons autoplaçants de leur côté se comportent comme des fluides plus ou moins visqueux et se mettent en place sans sollicitation. De ce fait, les deux bétons se comportent de façon très différente. Sur chantier, le test d'affaissement au cône d'Abrams est très utile pour caractériser les bétons ordinaires, alors qu'il n'est utilisé que pour mesurer l'étalement de la galette d'un BAP et le temps de passage à une galette intermédiaire de 50 cm de diamètre. Or, un seul test ne suffisant pas à prédire la qualité d'un béton autoplaçant, plusieurs tests ont été développés pour caractériser les propriétés du BAP. Les propriétés générales d'un béton autoplaçant frais sont la fluidité et l'homogénéité. Ces propriétés sont étudiées sur plusieurs aspects, et peuvent se diviser en trois critères mesurables par des tests empiriques :

- Le remplissage;
- La résistance à la ségrégation;
- La capacité à passer à travers les obstacles que nous appellerons capacité de passage [52].

9.1. Le remplissage

Le remplissage du béton est un critère qui découle directement de sa fluidité. Le BAP est capable de remplir les vides et les espaces difficiles dans un milieu confiné, en se déformant sous l'effet de son propre poids et sans vibrations. Le remplissage est observé sous deux aspects : la capacité de remplissage et la vitesse de remplissage. Le premier aspect est lié à la capacité de déformation du béton, il traduit le pourcentage rempli ou la distance atteinte dans l'espace. Le second est lié à la vitesse de déformation, il traduit ainsi la vitesse d'écoulement du béton. Le test d'étalement au cône d'Abrams donne des indications sur les deux aspects [52] et [53], puisque le diamètre final atteint par la galette de béton correspond à la capacité de déformation, et le temps de passage à un certain diamètre (50 cm) correspond à la vitesse de la déformation du béton.

Chapitre I : Etude bibliographique sur le béton autoplaçant

La fluidité d'un BAP est contrôlée par l'état de contrainte existant entre les particules qui le constituent. En effet, pour que le béton s'écoule bien, il est primordial de réduire les frictions et les frottements existants entre les particules solides qui génèrent des contraintes empêchant l'écoulement. Si on considère que pendant son écoulement, le béton est un matériau diphasique, et que les granulats baignent dans une suspension fluide (phase liquide) formée de la pâte de ciment (ou du mortier), il est nécessaire d'augmenter le volume de pâte (ou diminuer le volume de granulats) pour favoriser l'écoulement du béton [54].

L'utilisation de granulats roulés (de forme plus ou moins sphérique) peut aussi être avantageuse lorsqu'on désire réduire les frictions entre les granulats. Il est à noter que la réduction des frictions et frottements entre les particules fines n'est possible qu'en augmentant le volume d'eau dans le béton. Or une utilisation excessive d'eau diminue considérablement la résistance à la ségrégation, et conduit à des faibles performances mécaniques du béton à l'état durci.

Par conséquent, un bon équilibre est nécessaire entre la résistance à la ségrégation du béton et la fluidité par réduction des frictions entre les granulats. Pour ce faire, il ne suffit pas seulement d'augmenter le volume de la pâte qui doit avoir en outre des propriétés autoplaçantes. En effet, la pâte du béton doit présenter une bonne fluidité et conférer au béton une grande résistance à la ségrégation [53]. Du point de vue rhéologique, cela se traduit par un faible seuil de cisaillement, et une viscosité suffisante pour assurer le maintien des granulats dans la suspension. La fluidité de la pâte peut être assurée par l'ajout d'un super-plastifiant qui agit en baissant fortement le seuil de cisaillement de la pâte, et celui du béton si les frottements intergranulaires sont minorés par un volume suffisant de pâte.

9.2. *La résistance à la ségrégation*

La ségrégation d'un mélange correspond à l'absence d'homogénéité dans la distribution des constituants ce qui provoque généralement une séparation de phases solide et liquide ou bien une séparation des phases solides en fonction de leurs dimensions [53] et [55].

La ségrégation peut donc se manifester dans un béton de façons différentes, comme la séparation entre la pâte et les granulats, la séparation entre le gravier et le mortier qui peut conduire à un blocage en zones confinées, et une répartition non homogène de l'air occlus.

Pour éviter la ségrégation, il faut réduire la quantité d'eau libre dans le béton en réduisant le rapport E/C du béton. L'eau libre dans le béton est généralement mobile et peut trouver son chemin vers la surface du béton par effet de gravité et de densité indépendamment des solides dans le mélange. Ceci à l'extrême se traduit par une couche de laitance en surface libre du béton. Des matériaux de surface granulaire plus élevée, peuvent par absorption et adsorption retenir

Chapitre I : Etude bibliographique sur le béton autoplaçant

une quantité supplémentaire d'eau libre. La résistance à la ségrégation du béton peut aussi être augmentée en élevant la viscosité de l'eau dans la suspension, avec certains agents de viscosité.

Les autres aspects de ségrégation sont évités en utilisant une pâte capable de maintenir les particules solides et l'air distribués uniformément en suspension. Ceci nécessite une forte interaction entre les phases du béton, qui correspond à des forces résultant des frictions entre les particules. Or, on ne peut pas augmenter les interactions entre les particules du béton puisque l'écoulement du béton sera fortement influencé, et les risques de blocages de gravier seront importants pendant un passage dans un milieu confiné ou encombré par les armatures. On a donc intérêt à augmenter la cohésion entre les phases, plutôt que les interactions [53]. Ceci est possible avec une pâte de rapport E/C réduit, ou l'utilisation d'un agent de viscosité.

9.3. *La capacité de passage*

Le béton autoplaçant doit réunir à la fois la capacité de remplissage et la résistance à la ségrégation pour produire un bon écoulement sur un chantier. Cependant, dans les milieux confinés et les zones fortement ferraillées, il faut que le béton puisse s'écouler dans les espaces étroits et entre les armatures. En effet, le blocage des granulats est provoqué d'une part par la quantité importante de gros granulats dans le béton, et d'autre part par la taille des plus gros granulats par rapport à l'ouverture entre armatures ou dans un confinement.

A l'approche des armatures, une différence se crée entre la vitesse des granulats et celle de la pâte. Plus rapide, la pâte précède les granulats en passant à travers les armatures [56]. Ainsi, la quantité de granulats est considérée localement plus grande avant les armatures et tend à augmenter avec l'écoulement du béton. Ce phénomène s'explique par le lessivage de la pâte à travers les granulats au niveau du passage entre les armatures [3]. Par conséquent, les frictions et les collisions entre les granulats sont plus importantes, et créent des contacts entre les granulats à l'amont de l'ouverture entre les armatures, ce qui provoque la formation éventuelle d'un arc stable de granulats bloquant l'écoulement du béton.

Le béton autoplaçant doit posséder donc une bonne capacité de passage à travers les armatures et dans les confinements. Ceci nécessite une quantité de gravier inférieure à celle d'un béton ordinaire, et de taille maximale plus petite.

10. Propriétés du BAP durci

Les particularités de composition des bétons autoplaçants conduisent à étudier les différentes propriétés mécaniques de ces bétons et plus particulièrement les déformations instantanées et différées, supposées différentes de celles des bétons vibrés.

Chapitre I : Etude bibliographique sur le béton autoplaçant

10.1. Propriétés mécaniques

De nombreux travaux ont montré que les déformations des bétons sont sensibles à la proportion de granulats qui entre dans leur composition [57]. Plus précisément, le béton peut être représenté comme une combinaison de deux phases : la pâte de ciment durcie, ou matrice, et les granulats, ou inclusions. Les propriétés de ce mélange dépendent alors des caractéristiques élastiques respectives de chaque phase, de leur proportion, de leur fluage et de leur retrait.

10.1.1. Résistance à la compression

L'utilisation de fillers dans une formulation de béton génère une accélération de sa résistance mécanique aux jeunes âges [58]. Les particules fines du filler, lorsqu'elles sont bien défloculées par les superplastifiants, favorisent l'hydratation du ciment, principalement par un effet physique, et conduisent à une matrice cimentaire dont la structure est plus dense. Ces effets ont une influence sensible sur la résistance mécanique jusqu'à 28 jours puis deviennent moins significatifs par la suite. Différentes données ont été publiées [59] sur l'évolution de la résistance mécanique des BAP contenant des fillers calcaires comparée à celle des bétons vibrés et soutiennent les affirmations précédentes (voir Figure 16).

De plus, certains auteurs [60] affirment que cette augmentation de résistance est d'autant plus marquée pour les BAP que la finesse du filler est grande (Figure 17). Cet effet tend lui aussi à s'annuler au-delà de 28 jours.

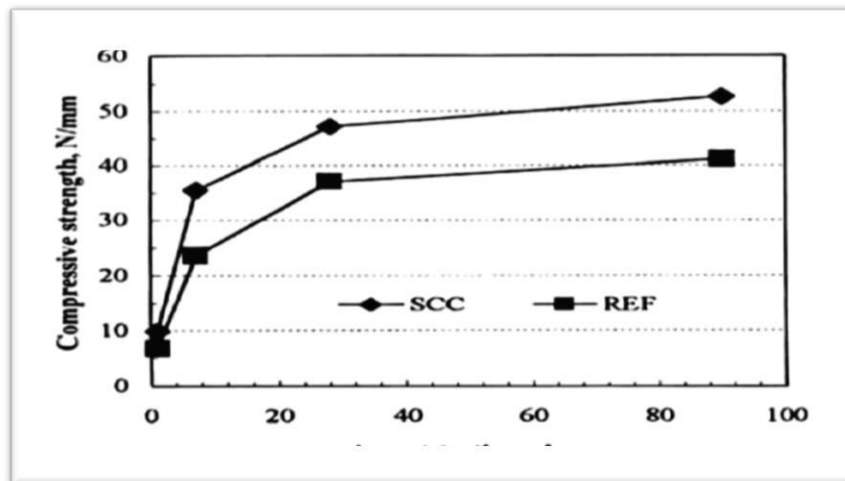


Figure 16. Evolution de la résistance mécanique d'un BAP (SCC) et d'un BV (REF) correspondant [59]

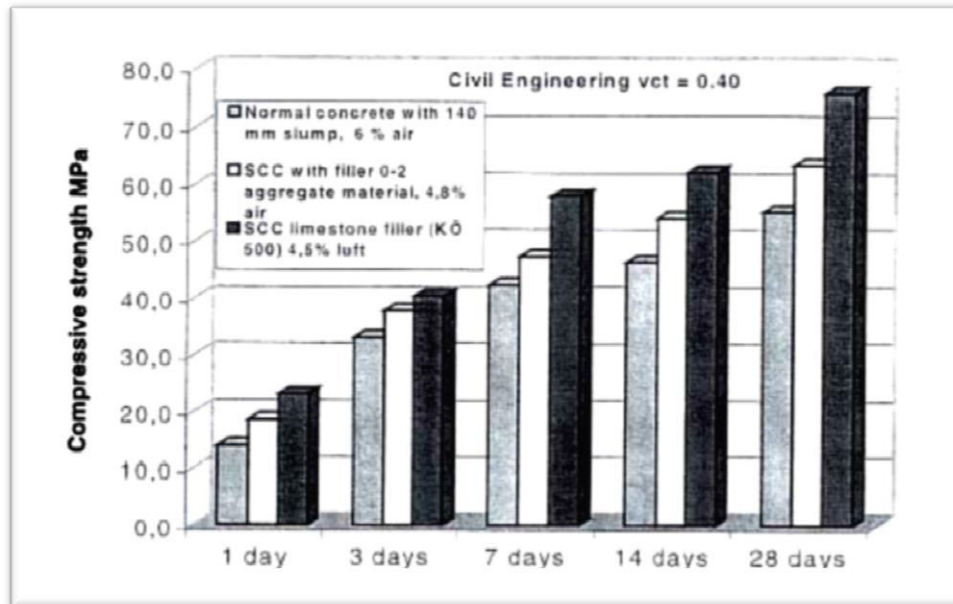


Figure 17. Résistance mécanique d'un béton vibré et de deux BAP (de formulation différente) [60]

Le dosage plus ou moins important en adjuvants dans les formulations de BAP peut aussi avoir une influence sur l'évolution de la résistance mécanique du béton.

Ainsi, l'introduction d'un agent de viscosité peut diminuer sensiblement la résistance mécanique d'un BAP aux jeunes âges [61].

De même, certains super-plastifiants utilisés pour contrôler la fluidité des formulations ont pour effets secondaires de retarder le temps de prise et d'augmenter le développement de la résistance mécanique [62]. Etant donné la défloculation du liant hydraulique qu'ils engendrent, leur dosage important dans les BAP conduit à considérer que ceux-ci seront plus résistants que des bétons vibrés supposés similaires au départ.

10.1.2. Module d'élasticité (en compression)

Si on se réfère à la formule réglementaire du module ($E_{ij} = 11000 f_{CJ1/3}$), celui-ci ne dépend que de la résistance du béton. Ainsi, à résistance égale, un béton autoplaçant aurait donc le même module qu'un béton vibré. Or, si ceci est vrai dans certains cas à la précision des mesures près [63] (voir figure 18). D'autre auteur indique que les modules des BAP sont plus faibles que ceux des bétons vibrés [52].

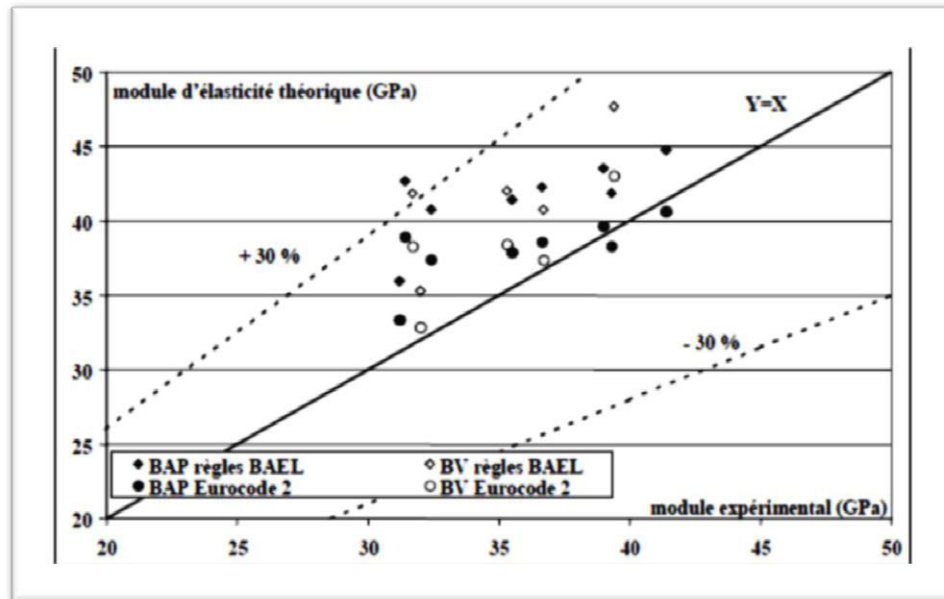


Figure 18. Comparaison des modules élastiques théoriques de BAP et de bétons vibrés avec leurs valeurs expérimentales [63]

Leur volume de pâte plus élevé peut expliquer ce phénomène. En effet, dans un béton formulé avec des granulats classiques, le module de la matrice (6000-25000 MPa) est environ de 3 à 15 fois plus faible que celui des granulats E_g (60000 à 100000 MPa).

A partir d'un calcul prenant en compte le volume respectif des différentes phases (pâte, granulats), les modules résultants peuvent être comparés aux prévisions réglementaires [64] (Figure 19).

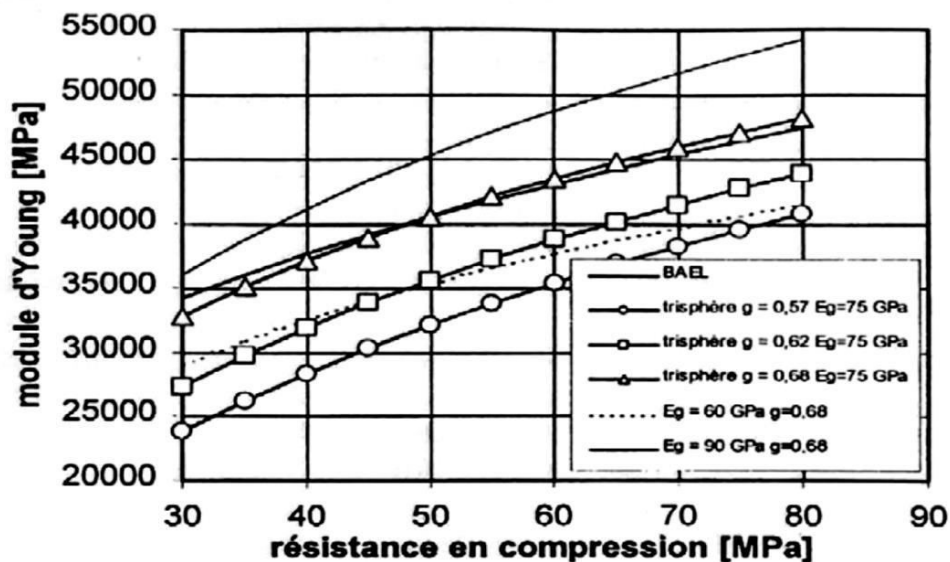


Figure 19. Evaluation du module du béton en fonction de sa résistance, d'après le modèle réglementaire et un modèle d'homogénéisation [64]

10.1.3. Retrait

A la vue du volume de pâte plus important dans un BAP que dans un béton traditionnel, on peut penser que le retrait de dessiccation serait plus important. Les données de la littérature spécifique sont contradictoires même si les communications traitant du problème montrent une tendance d'un retrait plus important pour les BAP.

A) - Retrait endogène

En ce qui concerne le retrait endogène, les BAP présentent des déformations comparables à celles des bétons vibrés. En effet, même si certains auteurs [65] attribuent aux BAP un retrait endogène inférieur ou égal à celui des bétons vibrés (figure 20).

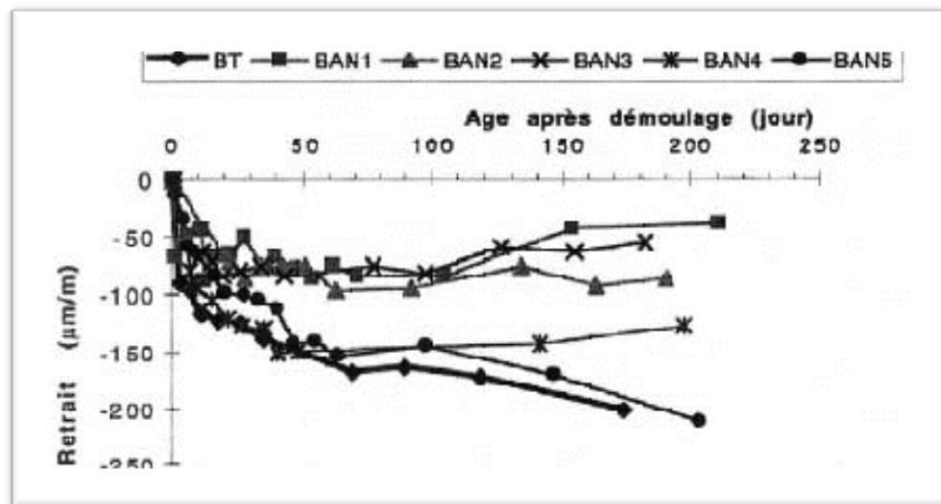


Figure 20. Comparaison des retraits endogènes d'un béton vibré et cinq BAP [65]

L'évolution des réactions d'hydratation, à l'origine du retrait endogène, dépend de la quantité d'eau disponible dans le béton pour faire réagir les différents réactifs. Par conséquent, l'amplitude de ce retrait chimique va être directement liée au rapport E/C (autrement dit à la résistance mécanique). Le retrait endogène d'un béton sera d'autant plus fort que son rapport E/C sera faible (ou sa résistance en compression élevée). Ce phénomène existe pour tout type de béton, en particulier les BAP qui ne se distinguent pas des bétons vibrés sur ce point. De plus, pour des bétons à faible rapport E/C, le retrait endogène des BAP est comparable à celui des bétons vibrés [63].

B) Retrait de dessiccation

Les données de la littérature sur le retrait de dessiccation des BAP sont très contradictoires. Certains auteurs [65] trouvent des déformations pour ces bétons plus importantes que celles mesurées sur des bétons vibrés (voir Figure 21). Ce retrait apparaît être d'autant plus faible que le rapport G/S des BAP est élevé.

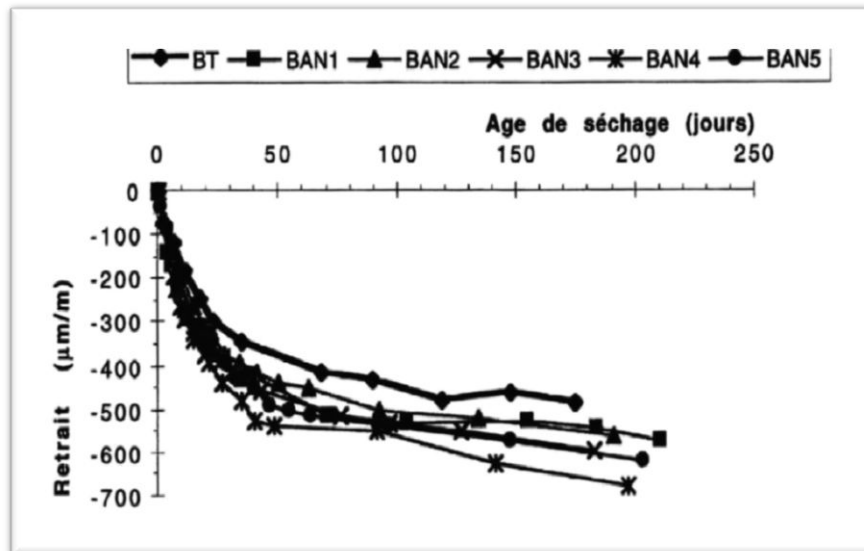


Figure 21. Comparaison des retraits de dessiccation d'un BV et de cinq BAP [65]

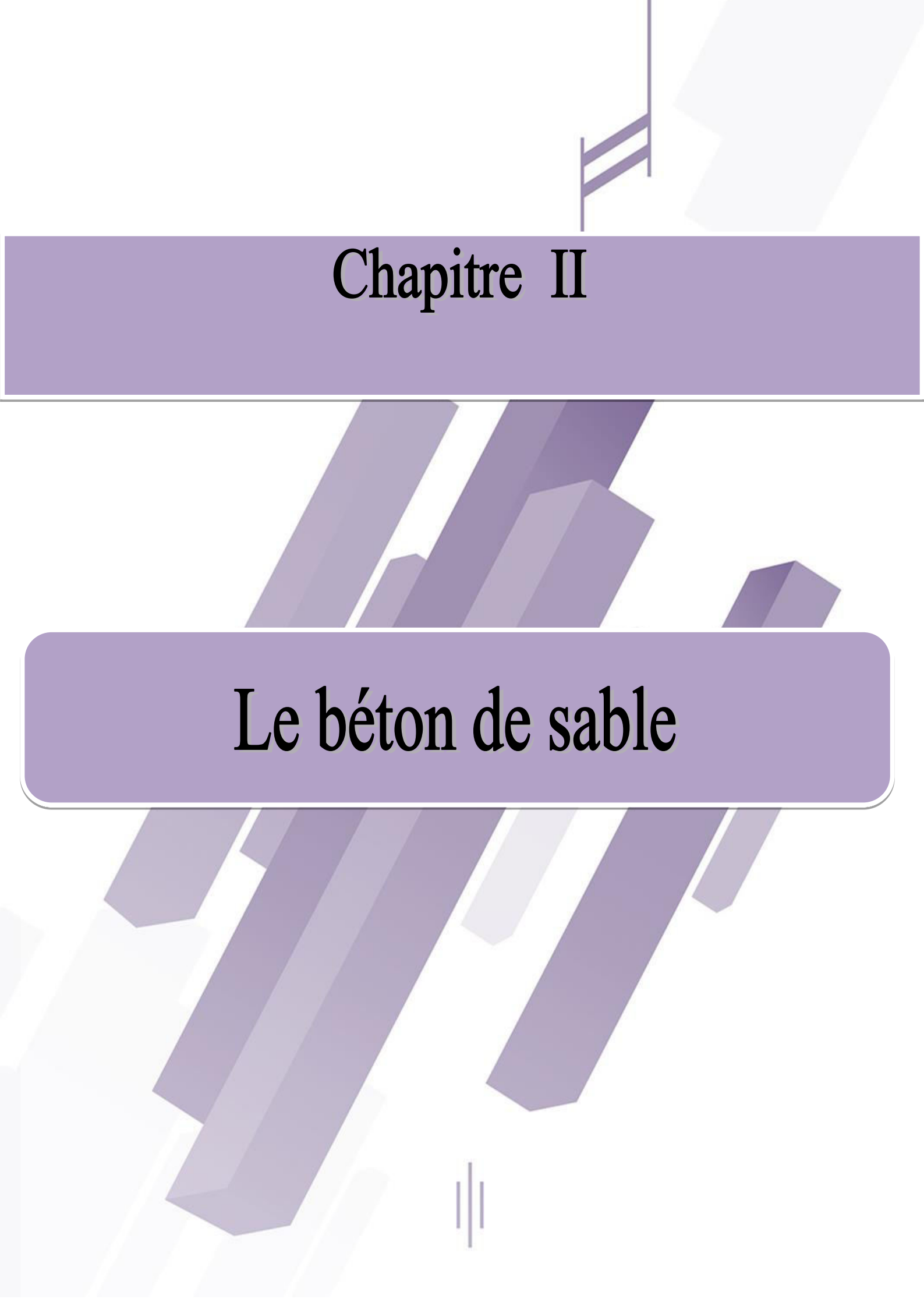
D'autre auteur annonce des retraits équivalents pour les deux types de béton à résistance mécanique constante [66]. D'après ces données, l'ordre de grandeur du retrait de dessiccation des BAP varie de 550 à 700 $\mu\text{m/m}$ (à 180 jours).

Enfin, d'autre auteur [67] observe des retraits de séchage des BAP moins importants que ceux des bétons vibrés auxquels ils sont comparés (quantité de ciment et rapport E/C équivalents, volume de pâte différent).

11. Conclusion

Les BAP se développent maintenant en Europe et semblent être amenés à remplacer, à terme, les bétons vibrés classiques dans de nombreuses applications. Ils présentent en effet des intérêts à la fois techniques et économiques : absence de nuisances sonores en milieu urbain, possibilité de bétonner des zones fortement ferraillées ou à géométrie complexe et l'obtention d'une meilleure qualité du béton (pratiquement indépendante du savoir-faire des ouvriers) d'une part, diminution du temps de personnel lors de la mise en place et réduction des coûts des processus industriels, d'autre part.

Malgré les aspects intéressants que les BAP proposent, en particulier à l'état frais, et leur utilisation en constante augmentation. Les BAP ne disposent pas encore une bonne connaissance sur leurs propriétés à l'état durci, son développement est freinée par une formulation complexe et un comportement sous sollicitations extrêmes (comportement différé, comportement au feu, durabilité) mal connu



Chapitre II

Le béton de sable

1. Introduction

Le besoin en granulats connaît, en Algérie, une croissance considérable en rapport avec les travaux de construction et de développement du pays dans cette dernière décennie. Dans le sud d'Algérie, gros ou petits granulats sont peu disponibles et coûteux en raison de leur transportation d'autres régions, une exploitation rationnelle des agrégats dont disposent le pays et une valorisation des ressources existantes s'imposent : sable de dunes et sable alluvionnaire [68].

Etant donné l'abondance de sable de dunes, particulièrement dans le Sahara qui représente plus de 60% du territoire Algérien, l'idée de promouvoir le béton de sable de dunes est apparue dans la fin des années 80.

En plus de cet aspect économique, le béton de sable de dunes présente des caractéristiques mal assurées par le béton ordinaire, telles que la pompabilité et l'aspect esthétique [69].

2. Historique

En France, des mélanges confectionnés par F. COIGNET au XIX siècle à partir de sable, de ciment, de chaux et d'eau, font la première apparition intéressante de béton de sable. Plusieurs applications de ce béton ont été réalisées à l'époque, restent jusqu'à nos jours en service : la maison COIGNET à Saint Denis et le mur de soutènement à Passy (France), le phare de Port-Saïd (Egypte) et le pont de New York.

En ex-URSS, le béton de sable a été mis au point au début de XX siècle, en trouvant leur application dans le port de Kaliningrad et le pont de CHERNAVSKIF.

A la fin de la deuxième guerre mondiale, le professeur REBINDER trouvât des applications dans nombreux domaines (chaussées, pistes d'aviation, murs architecturaux, etc..). Par suite, ce matériau a tombé en désuétude en raison de meilleures performances mécaniques obtenues par l'utilisation de gros granulats dans la formulation de béton [70].

Le béton de sable a connu un renouveau en la matière recherches et développements à la fin des années 80 en France, poussé par l'épuisement progressif des ressources en gros granulats. Dans ce contexte, un projet appelé « SABLOCRETE » (inscrit dans le cadre du programme d'utilisation optimale des matériaux locaux) a été créé en 1988. Ce projet a mis en évidence des propriétés

Chapitre II: Le béton de sable

spécifiques du béton de sable mal assurées par un béton traditionnel et lui donne une place entière dans la gamme des bétons [71].

3. Définition

Le béton de sable a fait l'objet d'une norme française NF P 18-500 ; c'est un béton fin constitué par mélange de sable(s), de ciment, d'addition(s) et d'eau ; outre ces composants de base, le béton de sable comporte habituellement un (ou plusieurs adjuvants).

4. Les composants du béton de sable

Un béton de sable est composé de sable, fines d'ajout, de ciment et d'eau. Par rapport à cette composition de base et pour répondre aux besoins de certains usages, d'autres ajouts spécifiques peuvent être envisagés : gravillons, fibres, adjuvants...

4.1. *les sables*

Par sables on entend tous granulats 0/D conformes aux définitions des normes NF P 18-101 et NF P 18-301. Il peut s'agir soit d'un sable naturel alluvionnaire ou de ballastière, soit d'un sable de carrière issu du concassage d'une roche massive ou détritique.

Aucun critère granulométrique n'est a priori exigible pour réaliser un béton de sable : on peut aussi bien utiliser un sable fin (même homométrique, type sable de dune) qu'un sable alluvionnaire moyen ou grossier, ou un 0/d de concassage.

4.2. *Les fines d'ajout (ou additions)*

Une qualité essentielle du béton de façon générale est sa compacité.

Les paramètres essentiels qui vont jouer sur la compacité sont :

- La granulométrie du mélange et sa teneur en eau ;
- L'énergie de mise en place.

La différence entre un béton classique et un béton de sable réside principalement dans la différence granulométrie.

L'optimisation de la compacité, en relation avec la granulométrie, obéit à certaines règles. Le principe est simple : les éléments les plus fins se logent dans les vides des éléments les plus gros ; c'est en quelque sorte le principe des tables gigognes.

Chapitre II: Le béton de sable

Regardons le cas du béton classique ; on part des éléments les plus gros (10 à 20 mm) : ils créent des macros vides que l'on peut remplir par du sable et les vides du sable par les fines. Et ces fines sont du ciment, puisque la quantité nécessaire de ciment pour assurer la résistance coïncide avec celle qu'il faut en fines pour obtenir la bonne compacité.

4.3. *Les ciments*

Comme pour le béton classique, le ciment utilisé pour la confection d'un béton de sable est conforme à la norme NF 15-301. Le choix du ciment est fait à partir de sa classe de résistance, de ses caractéristiques d'hydratation, de l'agressivité du milieu...et, d'une façon plus générale, de la composition du béton et de l'usage auquel on le destine.

Pour bénéficier pleinement de l'activité hydraulique des fines d'addition, on privilégiera souvent les CPA par rapport CPJ.

4.4. *L'eau*

L'eau utilisée pour la confection des bétons de sable est conforme à la norme NF P 18-303.

L'eau efficace comprend, en plus de l'eau de gâchage, une quantité non négligeable d'eau apportée par les additions, adjuvants et autres, et surtout par les sables.

4.5. *Adjuvants*

On utilise dans les bétons de sable les mêmes adjuvants que dans les bétons traditionnels, et pour en exploiter les mêmes propriétés.

La spécificité du béton de sable privilégie toutefois l'usage de plastifiants ou de superplastifiants : ils améliorent la maniabilité, le plus souvent avec augmentation de résistance par suite d'une diminution de la teneur en eau et de la défloculation des éléments fins.

On utilise également pour certains usages des entraîneurs d'air dont l'objectif est de créer un réseau de microbulles dans le béton de sable pour protéger du gel (dans la mesure où la formulation employée est sensible au gel).

La nature et le dosage en adjuvant doivent systématiquement faire l'objet d'une vérification de laboratoire.

Les adjuvants employés devront par ailleurs être conformes à la norme NF P 18-103.

Chapitre II: Le béton de sable

4.6. *Autres ajouts*

A) *Les fibres*

Elles sont surtout utilisées dans le but de réduire le retrait au premier âge : dosage et nature sont des paramètres très importants pour assurer l'efficacité de cet ajout.

On utilise dans la plupart des cas des fibres organiques (polypropylène) pour contrecarrer les effets du retrait de prise et éviter la fissuration qui en résulte.

Si l'on veut améliorer la ductilité, on pourra utiliser des fibres d'acier ou des fibres de fonte amorphe.

B) *Les gravillons*

On considère qu'un béton de sable peut contenir un certain pourcentage de gravillons et conserver sa dénomination de béton de sable. En effet, tant que les gravillons sont dispersés dans le sable et ne constituent pas un squelette structuré, le comportement reste le même ; l'ajout de gravillons en faible dosage peut améliorer sensiblement, certaines caractéristiques (fluage, retrait, résistance, maniabilité).

D'une façon pratique, on pourra considérer qu'on a affaire à un béton de sable tant que le rapport massique G/S (gravillon sur sables) reste inférieur à 0.70 : $G/S < 0.70$

Il s'agit alors de béton de sable chargé : cette notion sous-entend une forte discontinuité entre le diamètre maximum D_1 du sable $0/D_1$ et le diamètre minimum d_2 du gravillon d_2/D_2 : $d_2 \gg D_1$

En outre, l'expérience montre que l'on peut considérer des matériaux à granulométrie continue $0/D$, avec $D \leq 8$ mm, comme des bétons de sable à partir du moment où le dosage pondéral d'éléments supérieurs à 4 mm (appelés G) satisfait la règle précédente $G/S < 0.70$, S représentant dans ce cas les éléments inférieurs à 4 mm.

C) *Les colorants*

Les colorants habituellement utilisés dans les bétons traditionnels peuvent également être employés pour certains usages de bétons de sable : ils nécessitent toutefois un soin particulier dans l'homogénéisation et une formulation appropriée du béton de sable pour conserver une stabilité de la teinte au cours du temps.

5. Propriété d'un béton de sable

5.1. Quantité de pâte élevée

Le béton de sable se distingue d'un béton traditionnel par un fort dosage en pâte et en sable au détriment du dosage en gravillons. Lorsque le diamètre maximal des granulats diminue, le dosage du ciment dans un béton de sable devient relativement important par rapport aux bétons traditionnels. La figure 22 montre la relation entre le dosage en ciment et le pourcentage des granulats fins dans un béton.

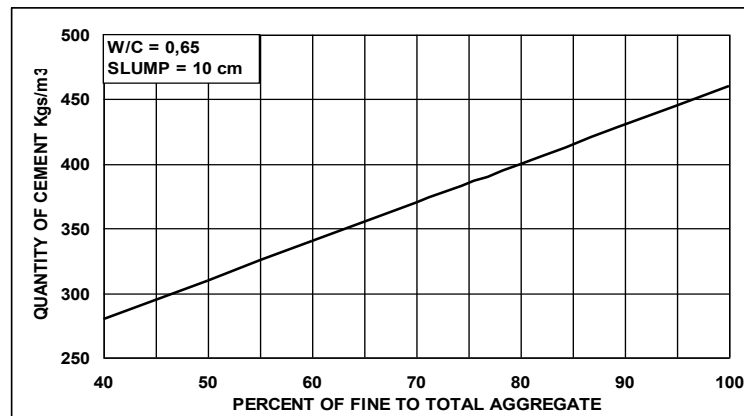


Figure 22. Relation entre le dosage en ciment et le pourcentage des granulats fins dans un béton [72].

Pour éviter le dosage élevé en ciment, une addition de granulométrie voisine de celle de ciment doit être introduite. Les éléments fins jouent un rôle important dans la rhéologie de la pâte de ciment. Des études ont montré qu'au-delà d'une certaine teneur, les fines jouent le rôle de lubrifiant et cela est d'autant plus important qu'elles sont finement broyées [68]. Ainsi, que l'ajout d'une addition, permet de diminuer le coût de béton et d'améliorer considérablement sa compacité.

Dans le cas du béton de sable, le dosage en additions est souvent important : entre 70 et 220 Kg/m³ et plus. Alors, le choix du type et la finesse d'addition doit s'effectuer soigneusement, car il va influencer considérablement sur les caractéristiques du béton de sable.

5.2. Peu ou pas de gros granulats

La différence entre un béton de sable et un béton traditionnel réside principalement dans la différence granulométrie. Un béton de sable peut contenir un certain pourcentage de gravillons (figure 23), on l'appelle béton de sable chargé ; l'ajout de gravillons en faible dosage peut améliorer certaines caractéristiques (maniabilité, retrait, résistance, fluage).

Chapitre II: Le béton de sable

Pour qu'un béton de sable chargé se distingue d'un béton traditionnel, une condition doit être satisfaite : rapport massique G/S (Gravillons sur Sable) reste inférieur à 0.7 [71].

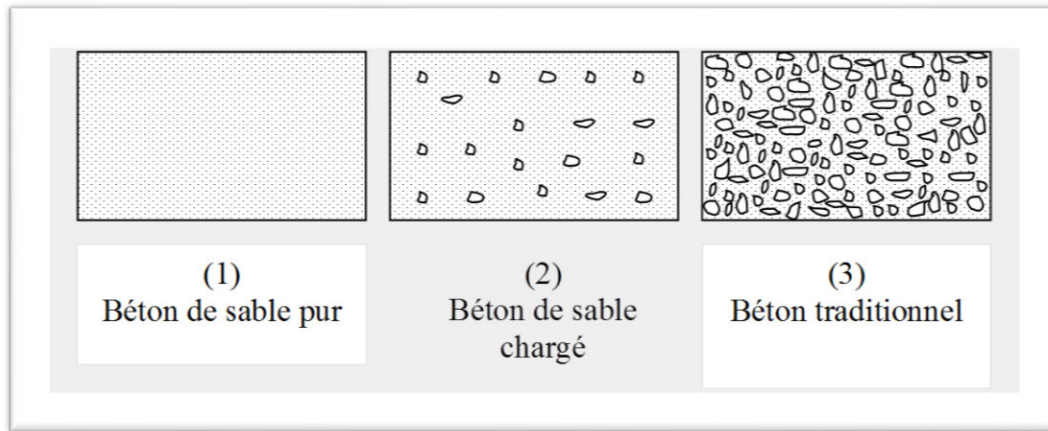


Figure 23. Schéma explicatif de l'apparence des bétons (1), (2) et (3) [71].

5.3. Simple mise en place

La petite granulométrie et la consistance plastique et très plastique du béton de sable favorisent une simple mise en place notamment dans les zones très ferraillées, par rapport au béton traditionnel. La présence de fines dans le béton de sable joue un rôle important dans son comportement rhéologique, en lui confère plus de fluidité. En plus, l'aspect de parement et l'esthétique des ouvrages sont plus assurés par l'utilisation d'un béton de sable.

5.4. Faible tendance à la ségrégation

La granulométrie serrée du béton de sable et l'absence de gravillons, et donc leur plus grande homogénéité, confèrent à ce dernier un meilleur comportement que les bétons traditionnels vis-à-vis des phénomènes de ségrégation. De LARRARD [73] a trouvé qu'un excès de gravillons ou de fluidité et la discontinuité granulométrique dans un béton favorisent le risque de ségrégation, par contre une distribution bien équilibrée de la structure granulaire minimise les risques de ségrégation.

La figure 24 donne la relation entre le risque de ségrégation de quelques mélanges et les diagrammes de remplissage correspondants.

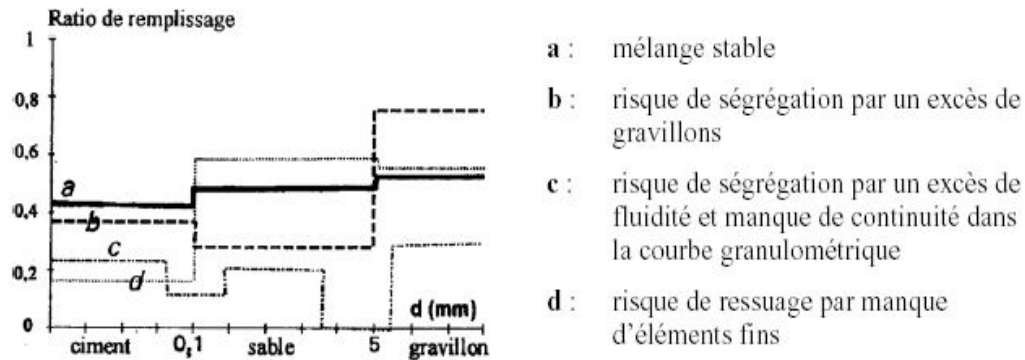


Figure 24. Relation entre la capacité de remplissage et risques de ségrégation [73].

6. Domaines d'utilisation des bétons de sable

Les applications qui ont concerné des domaines aussi larges que le bâtiment et le génie civil ont mis en évidence l'intérêt que peut présenter l'utilisation du béton de sable, tant techniquement qu'économiquement [74].

Il existe plusieurs domaines où les propriétés particulières du béton de sable en font le matériau convenable :

a) En raison de sa fluidité :

- A la fabrication des pieux forés,
- A la réalisation de dallages autonivelants,
- Au renforcement de structure par projection.

b) En raison de sa faible tendance à la ségrégation :

- A une facile mise en œuvre sous l'eau,
- A la réparation de fondations,
- Au comblement de cavités.

Toute fois, presque toutes les applications du béton traditionnel sont également réalisables en béton de sable. Seuls les critères technico-économiques font la différence de choix.

7. Les bétons de sable fluides

7.1. *Le contexte des bétons fluides*

Les bétons traditionnels de consistance ferme à très plastique couvrent un large éventail d'usages possibles, nécessitant des performances variées, assez facilement obtenues, et des moyens de mise en œuvre relativement courants.

Ces bétons là se révèlent toutefois mal adaptés dans certaines conditions d'utilisation telles que notamment :

- ✓ L'impossibilité de vibrer (cas des bétons pour pieux) ou la difficulté de vibrer et régler.
- ✓ La difficulté à garnir parfaitement des moules et coffrages de formes complexes ou de faible accessibilité, supportant de fortes densités de ferrailage, avec des risques subséquents de ségrégation, mauvais enrobages d'aciers, défauts d'aspect sur les parements.
- ✓ La nécessité de pomper le béton sur des longueurs ou hauteurs importantes.

On cherche à améliorer les conditions d'exécution et la productivité des chantiers, sans nuire à la qualité des ouvrages. C'est ainsi que s'est développée au début des années 90, en France, la technologie des bétons fluides (dits aussi autonivelants), technologie à laquelle le concept du béton de sable répond parfaitement.

Néanmoins, il faut prendre en considération les précautions suivantes :

- ✓ Support plan : au-delà de 1 % de pente, il n'est plus possible de mettre en œuvre des bétons de sable fluides, on parle alors d'autocompactants, nécessitant un réglage manuel.
- ✓ Étanchéité des coffrages : fluidité et finesse granulométrique exigent une bonne exécution de l'étanchéité des coffrages.
- ✓ Qualité de surface des coffrages : un des buts recherchés par l'utilisation de bétons de sable est l'aspect et la qualité de finition des parements, il faut donc être exigeant avec les coffrages.

7.2. *Principales caractéristiques des bétons fluides*

- ✓ Plasticité : le caractère fluide d'un béton de sable (non mesurable par l'évaluation de l'affaissement au cône d'Abrams) correspond à un étalement à la plaque de l'ordre de 55 à 60 cm. Pour la voirie ou les dallages industriels légèrement en pente (de 1 à 1.5 %), il convient de ramener cet étalement autour de 40, ce qui peut nécessiter des interventions manuelles lors de la mise en œuvre, et notamment en réglage de surface.

Chapitre II: Le béton de sable

- ✓ Les performances mécaniques et de retrait sont très corrects et autorisent une large gamme d'utilisations.
- ✓ La tenue au gel est bonne mais la résistance aux sels de déverglaçage est insuffisante.
- ✓ Le maintien rhéologique est un paramètre sensible à la teneur en fines, mais aussi à leur nature : les cendres volantes semblent mieux convenir que les fillers calcaires.
- ✓ Influence de la fibrillation : les fibres polypropylène contribuent à la tenue du béton frais et limitent le retrait plastique, ce qui tend à améliorer la durabilité. Les fibres aciers sont quant à elles beaucoup plus bénéfiques grâce à leur influence sur la ductilité.
- ✓ Traitement de surface : il n'est pas possible de strier par balayage ces bétons de sable fluidifiés, du fait de leur thixotropie. Il est préférable de ne retoucher ces bétons après leur coulage. Ne serait-ce que pour débuller les bétons très liquides par les essais de striages ou les talochages ponctuels provoquent systématiquement du ressuage avec formation ultérieure de croûtes ou de faïençage.

7.3. *Champ d'application des bétons de sable fluides*

7.3.1. *sur le plan des performances mécaniques*

Les résultats élevés, effet pouzzolanique de certaines additions, notamment les cendres volantes, accroît les résistances au-delà de 28 jours.

Plus surprenantes sont les faibles valeurs des retraits : elles tiennent à la qualité des formulations (ces bétons de sable, riches en fines mais pas seulement en ciment, se révélant aptes à retenir l'eau) mais aussi au soin et à la rigueur dans la fabrication et la mise en œuvre (durées de malaxage en centrale et en toupie, efficacité de la cure...).

Dans la mesure où les performances des produits durcis sont suffisantes par rapport à l'usage, tout l'intérêt des bétons de sable fluidifiés va résider dans les améliorations qu'ils apportent à l'état frais.

7.3.2. *En bâtiment*

Tous les dallages intérieurs constituent le champ d'application privilégié des bétons de sable fluidifiés : dalles coulées sur terre-plein, sur prédalles, dalles de compression...

S'agissant d'éléments horizontaux, la fluidité convient donc et l'autoplaçant, voire autolissant, est un atout considérable.

Tout l'intérêt réside dans les avantages suivants :

Chapitre II: Le béton de sable

- ✓ Pompabilité, rapidité et simplicité d'exécution.
- ✓ Moyens en personnel et matériels limités.
- ✓ Nuisances réduites : pas de vibration, réglage et talochage mécanique inutiles.
- ✓ Produit fini, utilisable directement, quel que soit le revêtement ultérieur.

La fibrage (fibres métalliques surtout) peut limiter la fréquence des joints.

7.3.3. *En voirie*

La fluidité est peu compatible avec les pentes et dévers observés en technique routière. De même, la finition lisse de surface est un handicap par rapport à la glissance, d'autant plus que le traitement de surface est délicat à réaliser.

Par contre, certains aménagements peu dénivelés (places, aires de stationnement ou de service, voies piétonnes, pistes cyclables...) se prêtent parfaitement à la technique du béton de sable fluidifié autoplaçant

7.3.4. *En génie civil*

Les bétons de sable fluidifiés sont intéressants pour certaines applications comme les pieux forés, injections, reprises en sous-œuvre.

7.3.5. *Plus généralement*

Les bétons de sable fluides présentent des performances comparables aux bétons fluides classiques dont l'utilisation semble se développer. Indépendamment de la disponibilité locale en sables et gravillons on pourra privilégier l'usage du béton de sable dans les cas suivants.

- Risques de ségrégation préjudiciable ;
- Forte densité de ferrailage ;
- Recherche d'une texture fine.

Assurer la fluidité, avec nécessairement des teneurs en eau élevées, semble contradictoire avec l'obtention de bonnes performances mécaniques, de faibles valeurs de retrait et d'une bonne maîtrise de la durabilité. Pourtant, avec une certaine expérience et un minimum de précautions et de savoir-faire, de la formulation à la fabrication et à la mise en œuvre, il est possible de réaliser de très bons dallages, avec des bétons présentant des performances courantes ou plus techniques.

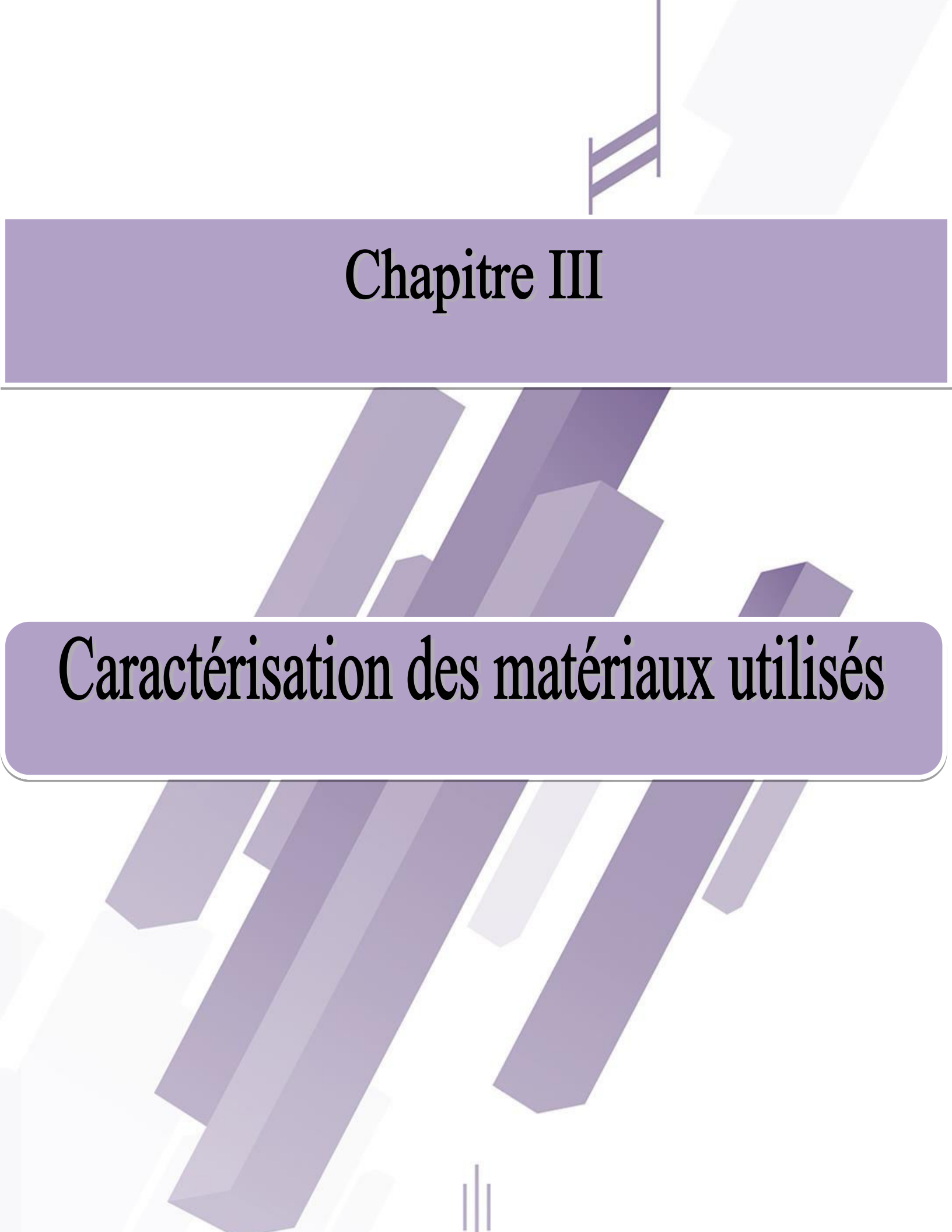
Actuellement, avec l'apparition des nouvelles générations de superplastifiants (comme MEDAFLOW-30 de Granitex : superplastifiants hauts réducteur d'eau de troisième génération), il

Chapitre II: Le béton de sable

est possible de réaliser des bétons de sable très fluides (autoplaçants) tout en améliorant les performances mécaniques.

Pour la formulation de ce type de béton, le choix du sable est important : une courbe granulométrique large, continue et « pleine » garantit un bon squelette. Il est possible d'ajouter une charge en gravillons pour le cas échéant, améliorer certaines performances.

Le dosage en ciment est généralement de l'ordre de 550 kg/m^3 (compte tenu de la forte proportion des additions telles que les fillers calcaires). Le rapport eau / ciment (E/C) peut être minimisé (par exemple $E/C=0.35$ pour un dosage de 0.8% de MEDAFLOW-30 [55]) par rapport aux bétons de sable fluides (où le rapport E/C est plus élevé, et proche de 1).



Chapitre III

Caractérisation des matériaux utilisés

1. Introduction

Ce chapitre a pour objectif de présenter les différents matériaux de notre étude et les techniques expérimentales utilisées. On présente les caractéristiques et les propriétés des matériaux de base utilisés dans la composition des mortiers. Ensuite, on présente les essais réalisés au cours de notre investigation sur les mortiers à l'état frais et à l'état durci.

Le MAP est caractérisé à l'état frais par les essais spécifiques suivants :

- ✓ L'essai d'étalement
- ✓ L'essai de rapidité d'écoulement avec le V-funnel

A l'état durci nous avons évalué la résistance à la compression et la résistance à la flexion.

2. Matériaux utilisés

Les caractéristiques physico-chimiques des matières premières utilisées pour la confection des mortiers sont présentées ci-après.

2.1. Sables

Le sable est l'un des composants importants dans la réalisation des bétons autoplaçants, il s'agit d'une utilisation d'un sable naturel alluvionnaire (SA), un sable des dunes (SD), un sable recyclé (SR).

Les essais effectués sont

- Analyse granulométrique.
- Module de finesse.
- Teneur en eau.
- Capacité d'absorption d'eau.
- Equivalent de sable.
- Masse volumique apparentes.
- Masse volumique spécifique.
- Porosité de sable.
- Essai au bleu de méthylène.

A)- Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique a été réalisée conformément à la norme NFP18-560 ou le sable passe à travers une série des tamis décroissante des mailles en (mm) 5, 4, 3.15, 2.5, 2, 1.6, 1.25, 1, 0.8, 0.63, 0.5, 0.4, 0.315, 0.2, 0.16, 0.125, 0.1, 0.08, 0.063, 0.05, 0.04.



Figure 25. Série de tamis utilisée

La préparation des échantillons se fait suivant la norme NFP 18-553

Selon cette norme la masse de l'échantillon étudié doit vérifier la condition suivante :

$$200 D < M < 500 D$$

Où :

M : la masse de l'échantillon exprimée en gramme.

D : la dimension maximale exprimée en millimètre.

Dans ce cas on a $D = 5 \text{ mm}$.

D'où on aura : $1000 < M < 2500 \text{ g}$

On prendra dans notre cas $M = 2000 \text{ g}$

Outils

- ✓ Une série de tamis dont les dimensions des mailles en (mm).
- ✓ Une balance.
- ✓ Une machine de vibration automatique (tamiseuse).
- ✓ Les bacs pour mettre le matériau, et pour récupérer les éléments fins.
- ✓ Une étuve.

Mode opératoire

- ✓ On dessèche l'échantillon.
- ✓ On pèse la masse sèche MS du sable.
- ✓ On met du sol sec sur la série des tamis.

Chapitre III : Caractérisation des matériaux utilisés

- ✓ On met l'ensemble de la série de tamis sur la machine vibrante.
- ✓ Faire marcher la machine jusqu'au moment ou on considère que chaque tamis n'a retenu que La fraction granulométrique qui lui est due.
- ✓ On pèse les refus dans chaque tamis.

Les résultats de tamisage, pour les sables alluvionnaire et des dunes et recyclé sont récapitulés dans les tableaux 1, 2 et 3 respectivement.

Tableau 1:Analyse granulométrique par tamisage à sec du sable alluvionnaire

Echantillon : sables alluvionnaire				
Référence dossier : NFP 18-560 [19]			température : 25°C	
M= 2000 g				
Dimension des tamis (mm)	Masse refusée partielle (g)	Masse refusée cumulée (g)	Le refus cumulé (%)	Passant (%)
5	0.9	0.9	0.045	99.95
4	57.2	58.1	2.905	97.09
2.5	270.8	328.9	16.44	83.54
1.25	405.8	734.7	36.73	63.22
0.63	586.3	1303	65.15	34.77
0.315	424	1727	86.35	13.55
0.16	224.3	1951.3	97.56	2.32
0.08	30	1981.3	99.06	0.82
Le reste	16.3	1997.6	100	0

Chapitre III : Caractérisation des matériaux utilisés

Tableau 2: Analyse granulométrique par tamisage à sec pour le sable dunaire

Echantillon : sable dunaire				
Référence dossier : NFP 18-560 [19]			température : 25°C	
M= 2000 g				
Dimension des tamis (mm)	Masse refusée partielle (g)	Masse refusée cumulée (g)	Le refus cumulé (%)	Passant (%)
0.63	1.3	1.3	0.065	99.935
0.5	2.5	3.8	0.192	99.8
0.4	54.9	58.7	2.97	97.03
0.315	75	133.7	6.77	93.23
0.25	396.7	530.4	26.88	73.12
0.2	434.3	964.7	48.89	51.11
0.125	923.7	1888.4	95.71	4.29
0.063	81.3	1969.7	99.83	0.17
0.05	2	1971.7	99.93	0.07
0.04	1	1972.7	99.98	0.02
Le reste	0	1973	100	0

Tableau 3: Analyse granulométrique par tamisage à sec pour le sable recyclé

Echantillon : sable recyclé				
Référence dossier : NFP 18-560 [19]			température : 25°C	
M= 2000 g				
Dimension des tamis (mm)	Masse refusée partielle (g)	Masse refusée cumulée (g)	Le refus cumulé (%)	Passant (%)
2	0	0	0	100
1.25	40.33	484.00	12.85	60
1.00	64.54	774.50	19.57	35
0.8	76.17	914.00	27.21	24
0.5	84.96	1019.50	43.78	15
0.2	96.07	1152.80	63.9	04
0.16	98.35	1180.20	73.5	02
0.125	98.87	1186.40	79.42	01
0.08	99.18	1190.10	94.07	01

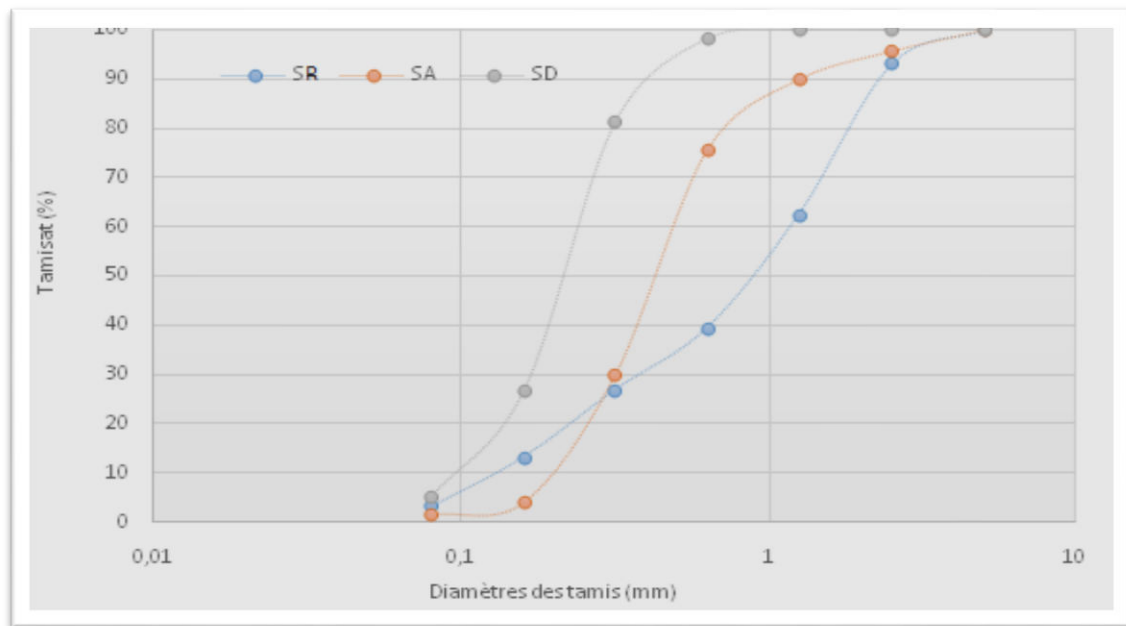


Figure 26. Courbes granulométriques des sables utilisés (SA, SD, SR)

B) Module de finesse

Le module de finesse M_f d'un sable est égal au centième (1/100) de la somme des refus cumulés exprimé (en % sur les tamis de module 23, 26, 29, 32, 35, 38)

Ce paramètre utilisé pour caractériser la finesse des sables.

Le module de finesse d'un granulat est donné par la relation suivante :

$$M_f = \frac{\sum \text{refus cumulée}\%}{100} \quad \text{Équation 4}$$

Dans notre cas les résultats des essais effectués sur les trois sables, sable des dunes et sable alluvionnaire et sable recyclé donnent les valeurs suivantes :

Pour le sable des dunes : $M_f = 0.78$

Pour le sable recyclé : $M_f = 4.14$

Pour le sable alluvionnaire : $M_f = 3.02$

C) Teneur en eau

Est le rapport du poids de l'eau d'un échantillon par rapport au poids du sol sec.

Le teneur en eau est donné en (%) par la relation:

$$W = \frac{P_h - P_s}{P_s} \times 100 \quad \text{Équation 5}$$

Avec :

Chapitre III : Caractérisation des matériaux utilisés

Ph : Masse d'échantillon avant séchage.

Ps : Masse d'échantillon sec.

Outils

- ✓ Etuve de séchage
- ✓ Balance
- ✓ Echantillon

Mode opératoire

- ✓ Peser et noter le poids Ph (en déduit la tare du bécher utilisé).
- ✓ Introduire l'échantillon dans l'étuve réglée à 105°C.
- ✓ Retirer de l'étuve 24h plus tard.
- ✓ Peser l'échantillon soit Ps (en déduit la tare du bécher utilisé).
- ✓ On calcul la teneur en eau exprimée en pourcentage (%) selon la relation (5).

Expression des résultats

Dans notre cas on trouvé :

W=0.22 % pour le sable alluvionnaire.

W=0.4% pour le sable recyclé.

W=0.16 % pour le sable des dunes.

D)- Coefficient d'absorption

Le coefficient d'absorption d'eau du sable est en fonction de sa porosité relative, il donne par la formule suivante :

$$C_{abs} = \frac{M_h - M_s}{M_s} \times 100 \quad \text{Équation 6}$$

M_h : masse de l'échantillon humide, à surface sèche.

M_s : masse de l'échantillon sèche.

Dans notre cas, nous avons trouvé que :

C_{abs} = 0.58 % pour le sable alluvionnaire.

C_{abs} = 9 % pour le sable recyclé.

C_{abs} = 2 % pour le sable des dunes.

E) *Equivalent de sable*

L'équivalent de sable (E_s) permet de contrôler la propreté d'un sable et de déterminer le pourcentage des poussières nuisibles. L'essai a été fait conformément à la norme NFP 18-598.

Deux valeurs sont déterminées: E_s à vue et E_s à piston (figure -24)

L'équivalent de sable est donné par:

$$E_s = 100 \times \frac{h_2}{h_1} \quad \text{Équation 7}$$

Mode opératoire

Une solution lavant est versée dans l'éprouvette jusqu'au premier repère, puis on verse la prise d'essai 120g de sable sec.

On laisse reposer 10 min l'éprouvette est soumise par la machine d'agitation à 90 cycles en 30 s et laissée au repos 10 min.

Le mélange est lavé jusqu'à ce que le niveau atteigne le deuxième repère.

On laisse reposer 20 min et on procède aux mesures.

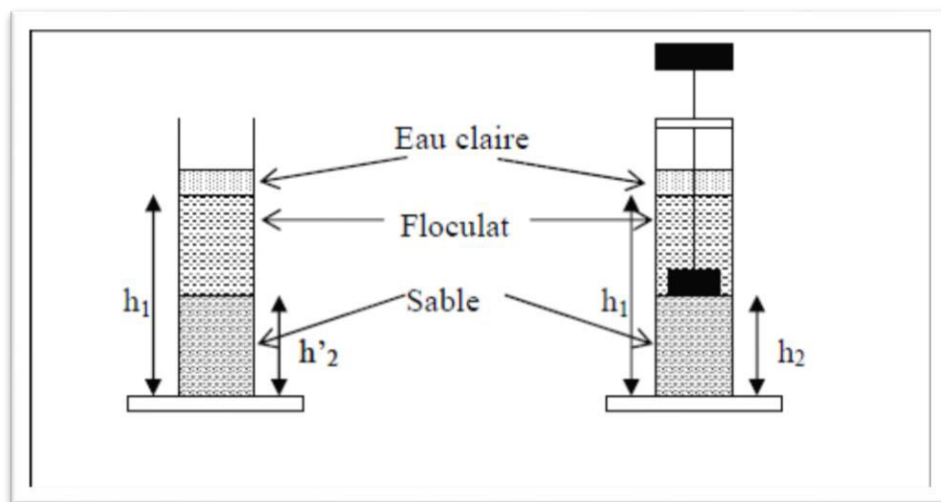


Figure 27. Schéma de l'essai équivalent de sable à vue et à piston

Pour le sable alluvionnaire :

E_s à vue = 87.18

E_s à piston = 78.74

Pour le sable des dunes :

E_s à vue = 93.88

E_s à piston = 91.13

Chapitre III : Caractérisation des matériaux utilisés

Pour le sable recyclé :

Es à vue = 86

Es à piston = 83

F) Masse volumique apparente

La masse volumique apparente est calculée d'après la norme NFP18-555.

C'est le rapport de la masse d'échantillon (m) sec sur le volume total apparent (V_{tot})

V_{tot} = volume des grains + volume de vide

La masse volumique apparente (γ_{app}) est donnée par la relation suivante :

$$\gamma_{app} = \frac{m}{V_{tot}} \quad \text{Équation 8}$$

Outils

- ✓ Récipient d'un volume connu V_{tot}.
- ✓ Matériaux.
- ✓ Règle à raser.

Mode opératoire

- ✓ On pèse un récipient vide (soit m₁ son poids).
- ✓ On remplit le récipient avec du matériau dont on veut déterminer sa masse volumique.
- ✓ A l'aide de la spatule et l'entonnoir normalisé (afin d'éviter tout tassement).
- ✓ On arase sans tasser à l'aide de la règle.
- ✓ On pèse le récipient plein (soit m₂ son poids).
- ✓ On déduit la masse de l'échantillon m = m₂ - m₁.

Expression des résultats

Pour les sables des dunes nous avons trouvé :

$$\gamma_{app} = 1556 \text{ Kg/m}^3$$

Pour le sable recyclé :

$$\gamma_{app} = 1213 \text{ kg/m}^3$$

Pour le sable alluvionnaire :

$$\gamma_{app} = 1758 \text{ Kg/m}^3$$

G) Masse volumique spécifique

On entend par masse spécifique la masse de l'unité de volume absolue d'un corps (volume matière plein). La Masse volumique spécifique du gravillon peut être calculé par la formule suivant:

$$\gamma_{abs} = \frac{M_a}{V_s} \quad \text{Équation 9}$$

M_a : la masse de sable a l'aire

V_s : $V_2 - V_1$, volume absolue de sable

V_1 - Volume d'eau initial

V_2 - Volume d'eau après l'introduction de l'échantillon.

Outils

- ✓ Éprouvette gradué.
- ✓ Balance
- ✓ Echantillon.

Mode opératoire

- ✓ Peser et noter le poids M_a (en déduit la tare du bécher utilisé).
- ✓ Remplir l'éprouvette avec de l'eau jusqu'au volume V_1
- ✓ Introduire l'échantillon dans l'éprouvette gradué.
- ✓ Noter le volume V_2 de l'échantillon.
- ✓ On calcul la masse volumique absolue a partir de relation (9).

Expression des résultats

Dans notre cas, nous avons trouvé :

$\gamma_{abs} = 2.74 \text{ g/cm}^3$ pour le sable des dunes.

$\gamma_{abs} = 2.415 \text{ g/cm}^3$ pour le sable recyclé.

$\gamma_{abs} = 2.56 \text{ g/cm}^3$ pour le sable alluvionnaire.

H)- Porosité des sables

La porosité (P) est le rapport du volume du vide (v) au volume total V (relation 10)

$$P = \frac{v}{V} = 1 - c \quad \text{Équation 10}$$

Où la compacité (c) représente le volume du solide (V_s) sur le volume total V (relation 11)

$$c = \frac{V_s}{V} \quad \text{Équation 11}$$

Chapitre III : Caractérisation des matériaux utilisés

Dans notre cas nous avons, trouvé que :

Pour le sable des dunes : $C=0,56$, donc $P=0,44$.

Pour le sable recyclé : $C=0,5$, donc $P=0,5$.

Pour le sable alluvionnaire : $C=0,69$, donc $P=0,31$.

1) Essai au bleu de méthylène

Cet essai, utilisé de manière courante pour caractériser l'activité des argiles contenues dans les sols, est également utilisé pour évaluer l'influence des fines d'origines argileuses contenues dans les sables.

Il rend compte ainsi de l'activité de surface des argiles, des matières organiques ainsi que des hydroxydes de fer contenus dans les fines. Cet essai est un test performant pour quantifier de manière sûre et simple la propreté des granulats.

A nature de fines donnée, plus la teneur en fines sera importante plus la valeur du bleu sera forte. A teneur en fines donnée, plus les fines seront 'actives' plus la valeur de bleu sera également forte.

$$VB = \frac{V}{M_s} \quad \text{Équation 12}$$

M_s : la masse sèche de la prise d'essai

V : volume de bleu injecté dans la prise

Dans notre cas nous avons, nous avons trouvé que :

Pour le sable des dunes : $VB = 0.17$

Pour le sable recyclé : $VB = 0.13$

Pour le sable alluvionnaire : $VB = 0.16$

2.2. Le superplastifiant (SP)

Le MEDAFLOW 30[®] est un superplastifiant haut réducteur d'eau de troisième génération fabriqué par Granitex (ALGER). Il est conçu à base de polycarboxylates d'Ether qui améliorent considérablement les propriétés des bétons.

Le MEDAFLOW 30[®] permet d'obtenir des bétons et mortier de très haute qualité.

En plus de sa fonction principale de superplastifiant, il permet de diminuer la teneur en eau du béton d'une façon remarquable.

Chapitre III : Caractérisation des matériaux utilisés

Les caractéristiques du MEDAFLOW 30 sont :

- ✚ Formeliquide.
- ✚ Couleur.....Brun clair.
- ✚ Densité1,07 ± 0,01.
- ✚ pH6 - 6,5.
- ✚ Teneur en chlore.....< 1 g/l.
- ✚ Extrait sec 30%

2.3. Ciment

Un seul type de ciment est utilisé dans toute l'étude : un ciment CEM I 42,5 de la société Lafarge. Le choix de ce type de ciment est justifié par l'étude de l'effet du sable sur les performances des bétons autoplaçants.

Sa surface spécifique est de 300 m²/kg, sa densité est de 3,15 et sa résistance à la compression à 28 jours est de 42,5. La composition chimique et minéralogique de ce ciment sont données dans les tableaux (4) et (5). L'analyse minéralogique montre que le ciment utilisé est fortement alitique (pourcentage élevé en C₃S et C₂S) et plus ou moins résistant aux sulfates (pourcentage un peu faible du C₃A).

Composition chimique (%)

Tableau 4: Composition chimique de notre ciment

oxydes	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	CaO libre	Cl ⁻	Ins	P,F
Teneur (%)	21.9	4.80	3.50	65.90	1.60	0.40	0.70	0.48	0.42	–	–	0.30

Tableau 5: La composition minéralogique du ciment

oxydes	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	CaOI	Ajouts
Teneur (%)	64.70	14.50	6,80	10.60	-	sans

Caractéristiques physiques

Densité	3.15
Finesse de Blaine (m ² /kg)	300
Temps de prise (hh.mm)	1.45
Résistance mécanique (MPa)	42.5

3. Formulation du Mortier (MAP)

Les propriétés requises pour que le mortier puisse être considéré comme autoplaçant, une fluidité élevée et une résistance suffisante aux ségrégations statiques et dynamiques. En termes de rhéologie, cela revient à abaisser le seuil de cisaillement du mortier, tout en maintenant la viscosité plastique du mélange. La fluidité élevée du mortier autoplaçant (MAP) peut être obtenue en ayant recours à des superplastifiants sans augmenter le rapport eau/ciment. L'ajout d'un superplastifiant peut provoquer une diminution significative du seuil de cisaillement mais n'aura qu'une influence limitée sur la viscosité plastique, tandis qu'une quantité supplémentaire d'eau peut diminuer le seuil de cisaillement et la viscosité plastique.

Selon Jin et Domone [75] des tests sur les mortiers sont réalisés car :

- ✓ Le BAP a un volume en gros granulats moins important que le béton ordinaire, et donc les propriétés du mortier sont dominants.
- ✓ L'évaluation des propriétés du mortier est une partie intégrale de la formulation des BAP, et donc la connaissance des propriétés du mortier est utile.
- ✓ Tester un mortier est beaucoup plus commode et simple que tester un béton.

Dans le BAP, la phase du mortier fournit la lubrification entre les particules des gros granulats, et la stabilité globale du béton. Les propriétés du mortier sont semblables à celle du BAP lui-même, c'est-à-dire un faible seuil de cisaillement pour assurer l'écoulement sous le seul effet de la gravité et une viscosité plastique suffisante afin d'assurer la non ségrégation du béton durant l'écoulement [76].

En l'absence d'un rhéomètre pour mesurer le seuil de cisaillement et la viscosité plastique, la fluidité du mortier a été évaluée par l'essai d'étalement et l'essai de l'entonnoir (V-funnel) qui, ont été utilisés par plusieurs chercheurs [76].

Pour la formulation du mortier autoplaçant, on s'est basé sur la méthode Okamura avec une amélioration au niveau de la teneur en sable, le rapport Eau/Liant (E/L) et le rapport Superplastifiant/Liant (Sp/L) pour s'adapter aux propriétés des matériaux locaux et en particulier le sable. La sélection du rapport sable/mortier et du rapport Sp/L est ajustée par l'essai d'étalement, dont le diamètre de la galette obtenu doit être compris entre $270 \text{ mm} \leq d \leq 330 \text{ mm}$, et par l'essai de l'entonnoir en V (V-funnel), dont le temps d'écoulement obtenu doit être compris entre $2 \text{ sec} \leq t \leq 10 \text{ sec}$ [76].

3.1. *Rapport Eau/Liant (E/L)*

Nous avons effectué beaucoup d'essais préliminaires de mesure d'étalement et de temps d'écoulement afin de fixer le rapport eau/liant (E/L). Felekoglu et al. [77] ont montré que le rapport E/C optimum pour produire un BAP est compris dans l'intervalle 0,84 et 1,07 en volume qui correspond à l'intervalle 0,28 et 0,45 en masse. Les rapports E/C au-dessus et en dessous de cet intervalle peuvent causer un blocage ou une ségrégation du mélange.

Les différents essais préliminaires ont montré qu'il faut aller jusqu'au rapport 0,40 afin d'avoir un mortier autoplaçant satisfaisant ayant un étalement supérieur à 270 mm surtout dans le cas de faibles dosages en superplastifiants.

Pour tous les essais de mortier nous avons fixé le rapport eau/liant à 0,40.

3.2. *Rapport Sable/Mortier (S/M)*

L'optimisation du rapport Sable/Mortier consiste à développer les meilleures caractéristiques du mortier à l'état frais pour assurer par la suite de bonnes caractéristiques du béton autoplaçant à l'état frais et durci. Le principe de la méthode consiste à rechercher la composition optimale pour les rapports Sable/Mortier (S/M) de 0,60; 0,55 et 0,50 tout en faisant varier le rapport superplastifiant/liant (Sp/L).

3.3. *Variation du rapport Superplastifiant/Liant (Sp/L)*

Pour déterminer l'effet de la variation de la teneur en superplastifiants sur le mortier à l'état frais, nous avons étudié la variation du diamètre d'étalement (cône d'Abrams) et du temps d'écoulement (V-funnel), en fonction du dosage en superplastifiants Sp/L variant de 0.6% à 2%.

3.4. *Confection des mortiers*

Pour la confection du mortier, les proportions du mélange (ciment, sable, eau et superplastifiant) ont été calculées d'après l'exemple de composition de mortier :

✓ **Les Données**

Pour un volume du mortier de $V=1.5\ell$ (par exemple)

Les masses volumiques absolues des constituants :

- Ciment: $\rho_C = 3150 \text{ kg/m}^3$
- Sable : $\rho_S = 2600 \text{ kg/m}^3$
- Superplastifiant : $\rho_{Sp} = 1070 \text{ kg/m}^3$
- Eau : $\rho_E = 1000 \text{ kg/m}^3$

Coefficient d'absorption du sable $A_b = 0.58$

On fixe le rapport Sable/Mortier $S/M = 0.50$ (Par exemple)

On fixe le rapport (par poids) $E/C = 0.40$ ou (par volume) $E/C = 1.7325$

Chapitre III : Caractérisation des matériaux utilisés

Le superplastifiant (MEDAFOW 30) est de 30% extrait (contient 70% d'eau), le dosage en superplastifiant sera de : %Sp = 0.9% du poids de ciment.

✓ Calcul d'humidité du sable

On pèse un échantillon de sable par exemple de masse M1=200.4 gr (par exemple), on le met dans l'étuve à 105°C pendant 8 minutes puis on le pèse une deuxième fois on obtient une masse M2 = 200 gr et on calcule l'humidité du sable mS

$$\mu S = \frac{M1-M2}{M2} * 100 \quad \text{Équation 13}$$

Donc le sable contient une certaine quantité d'eau qu'on doit retrancher de son coefficient d'absorption on l'appelle correction :

Correction = mS - Ab

✓ Calcul des quantités de chaque constituant

• Le ciment

Le pourcentage en volume du ciment C %

$$C_{vol}\% = \frac{(1-\frac{S}{M})}{(1+\frac{E}{C_{parvolume}})} * 100 \quad \text{Équation 14}$$

La quantité de ciment C en kg

$$C(kg) = \frac{(V * \frac{E}{C_{parvolume}})}{100} \rho c \quad \text{Équation 15}$$

• Le Sable

La quantité du sable en kg est S

$$S(kg) = \left(1 + \frac{Correction}{100}\right) * \left(\frac{V * S}{M * \rho s}\right) \quad \text{Équation 16}$$

• Le superplastifiant

La quantité du superplastifiant est Sp

$$Sp(kg) = \frac{Sp\% * C}{100} \quad \text{Équation 17}$$

• L'eau

L'eau ajoutée au mortier (E) est divisée en deux parties une première partie E1, qui est de 70% de la quantité d'eau globale, qu'on ajoute lors du malaxage durant la première minute et la

Chapitre III : Caractérisation des matériaux utilisés

deuxième quantité E2 (30% de la quantité d'eau globale) est mélangée avec l'adjuvant est ajouté au mélange du mortier dans la deuxième minute du malaxage qui suit la première.

Le pourcentage d'eau en volume : $E_{vol}\%$

$$E_{vol}\% = \frac{\left(1 - \frac{S}{M}\right) * 100 * \left(\frac{E}{C_{parvolume}}\right)}{\left(1 + \frac{E}{C_{parvolume}}\right)} \quad \text{Équation 18}$$

La quantité d'eau globale E en litre

$$E = \left(\frac{V * E_{vol}\%}{100} * \frac{\rho_E}{1000}\right) - \left(\frac{Sp * 70}{100}\right) - \left(\frac{\left(\frac{V * S}{M * \rho_s}\right) * \frac{correction}{100}}{1000}\right) \quad \text{Équation 19}$$

Avec $E1 = E * 0.70$ et $E2 = E * 0.30$

Aiad et al. [78] trouvent que le retard dans l'addition du superplastifiant améliore la rhéologie du mélange. Pour eux le temps optimal pour introduire le superplastifiant est de 10 minutes après avoir ajouté de l'eau au mélange. Par contre, Jin [13] et Domone et al. [79] proposent l'introduction du superplastifiant à partir de la 2^{ème} minute après le commencement du malaxage.

Dans nos essais nous avons opté pour la proposition de Domone et Jin [76]. La séquence de malaxage est la même pour tous les mélanges du mortier.

- ✓ Malaxer à sec le ciment et le sable pendant environ une (1) minute afin d'homogénéiser le mélange (on a utilisé un malaxeur à mortier de 5 litres de capacité)
- ✓ Malaxer pendant une (1) minute avec la première quantité d'eau (Eau1 = 70% Eau)
- ✓ Malaxer pendant une (1) minute avec le restant de l'eau de gâchage (Eau2 = 30% Eau) mélangé avec le superplastifiant
- ✓ Malaxer le mélange pendant 3 minutes.

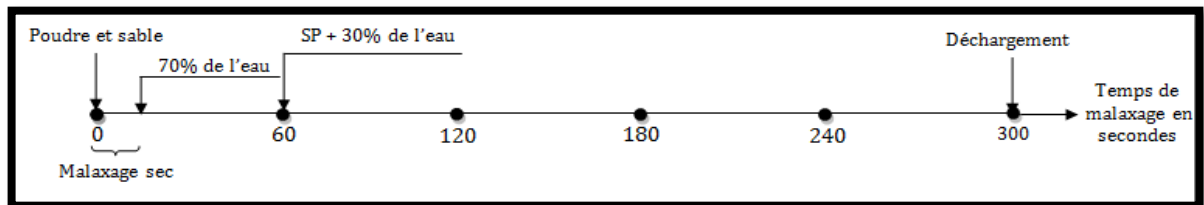


Figure 28. Procédure de malaxage du mortier autoplaçant.

Notons ici qu'on a utilisé un malaxeur fixe à axe vertical de capacité de 5 l pour le malaxage du mortier (Figure 29).



Figure 29. Malaxeur pour mortier autoplacant

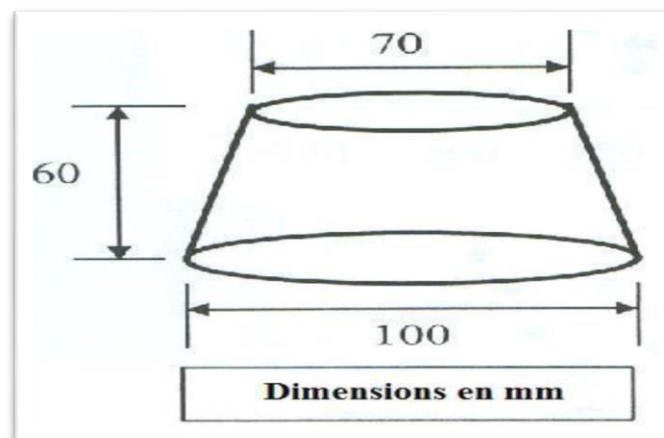
4. Propriétés à l'état frais

Les différents essais effectués à l'état frais sont :

- Etalement au mini-cône.
- Ecoulement au mini entonnoir en V (v-funnel).

4.1. Etalement au mini-cône

L'essai d'étalement consiste à remplir un moule tronconique placé sur une surface horizontale lisse, une fois le moule soulevé, le diamètre d'étalement du mortier est mesuré suivant deux directions perpendiculaire, la moyenne est retenue. La figure 30 montre l'essai d'étalement pour les mortiers.



(a)

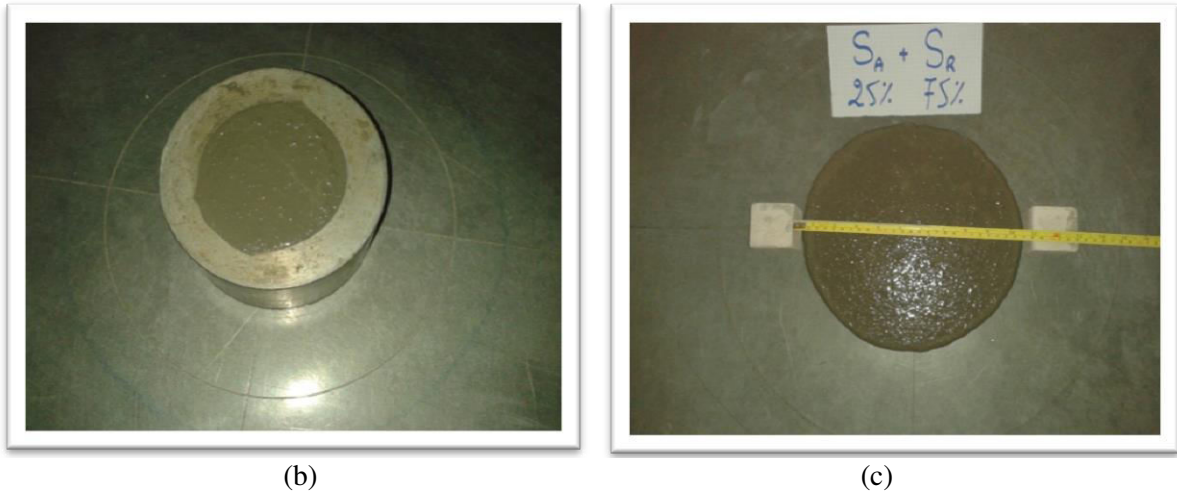


Figure 30. Essai d'étalement au mini-cône : (a) mini-cône, (b) exécution de l'essai, (c) mesure de l'étalement.

4.2. *Ecoulement au mini entonnoir en V (V-Funnel test)*

Dans l'essai de l'entonnoir en V (V-funnel), l'entonnoir est rempli de 1.1 litre de mortier, et un temps d'écoulement est calculé entre l'instant de l'ouverture de l'orifice de l'entonnoir et l'instant de l'apparition de la première lumière en regardant verticalement vers le bas de l'entonnoir (Figure 31).

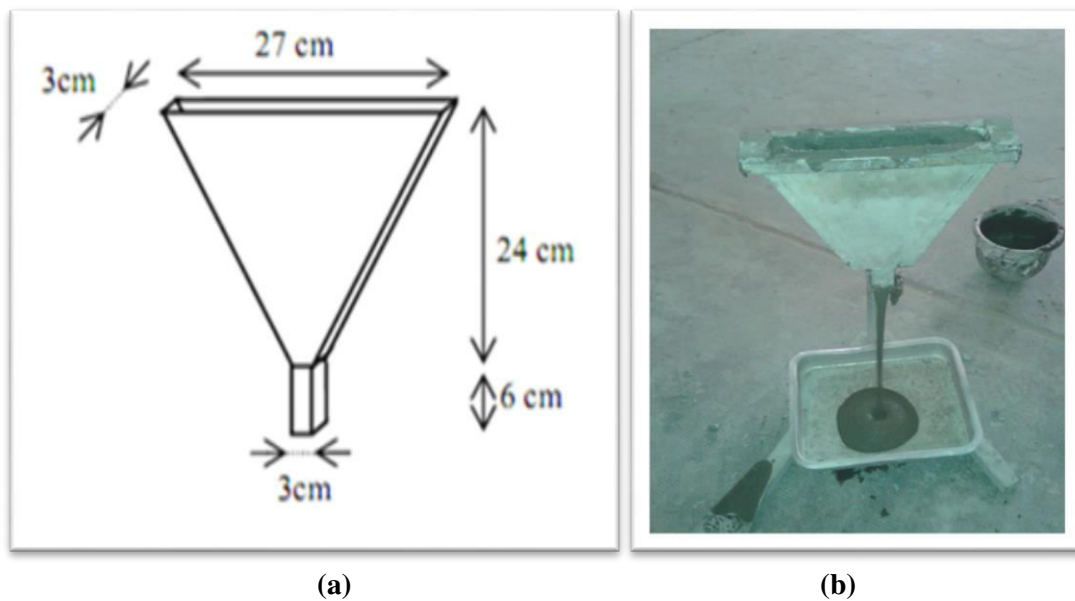


Figure 31. Essai d'écoulement au mini-entonnoir en V: (a) dimensions du mini- Entonnoir en V, (b) comptage du temps d'écoulement

Okamura et Ozawa [80] ont proposé, d'après des expériences réalisées avec des matériaux japonais, que l'obtention simultanée d'une valeur d'étalement comprise entre $270 \text{ mm} \leq d \leq 330 \text{ mm}$. Quand à Chai [29], qui a travaillé avec des matériaux anglais, a suggéré une valeur d'étalement minimale de 300 mm et un temps d'écoulement compris entre $2 \text{ sec} \leq t \leq 10 \text{ sec}$.

• Coulage et démoulage de MAP :

Lorsque la procédure de malaxage est achevée, et après avoir fait tous les essais relatifs aux mortiers à l'état frais, des éprouvettes de type prismatiques sont coulés sans compactage pour réaliser les essais relatifs aux mortiers à l'état durci (Figure 32).



Figure 32. Remplissage des moules

Après 24 heures, les éprouvettes sont démoulées (Figure 33),

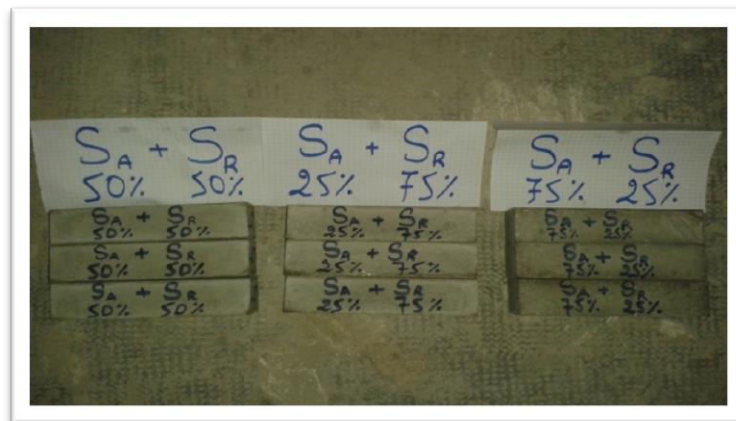


Figure 33. Démoulage des éprouvettes.

5. Propriétés à l'état durci

5.1. Résistances mécaniques

Les mortiers ont été confectionnés dans des moules prismatiques (4 x 4 x 16 cm) sans compactage et sans vibration. Après moulage, les moules contenant les spécimens ont été couverts de film plastique et conservés dans l'environnement de laboratoire dans une température d'environ de 20 °C. Après 24 heures les échantillons ont été démoulés et conservés dans l'eau saturée en chaux à une température de 20 °C jusqu'à l'âge de l'essai.

Chapitre III : Caractérisation des matériaux utilisés

L'essai de la résistance à la compression s'effectue sur des demi – prismes des éprouvettes obtenus après rupture en flexion, l'essai a été réalisé à l'âge de 28 jours.

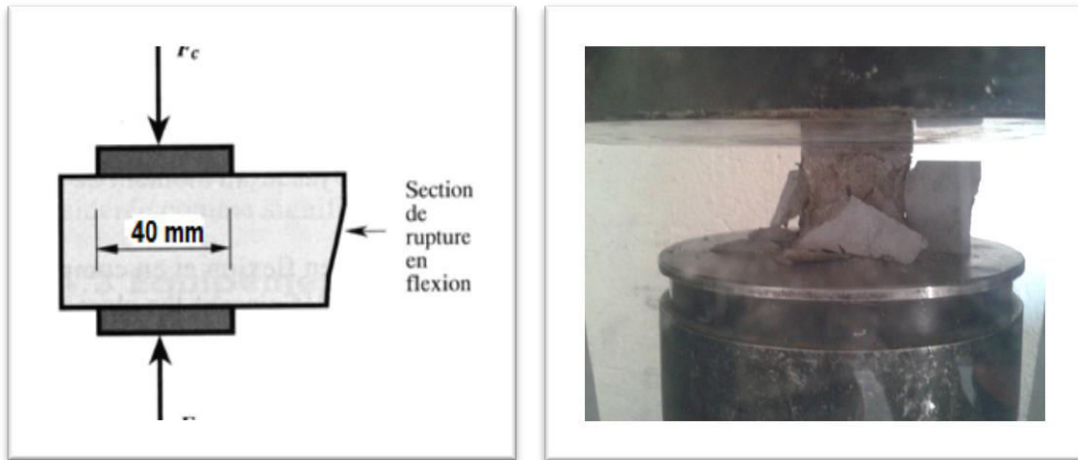


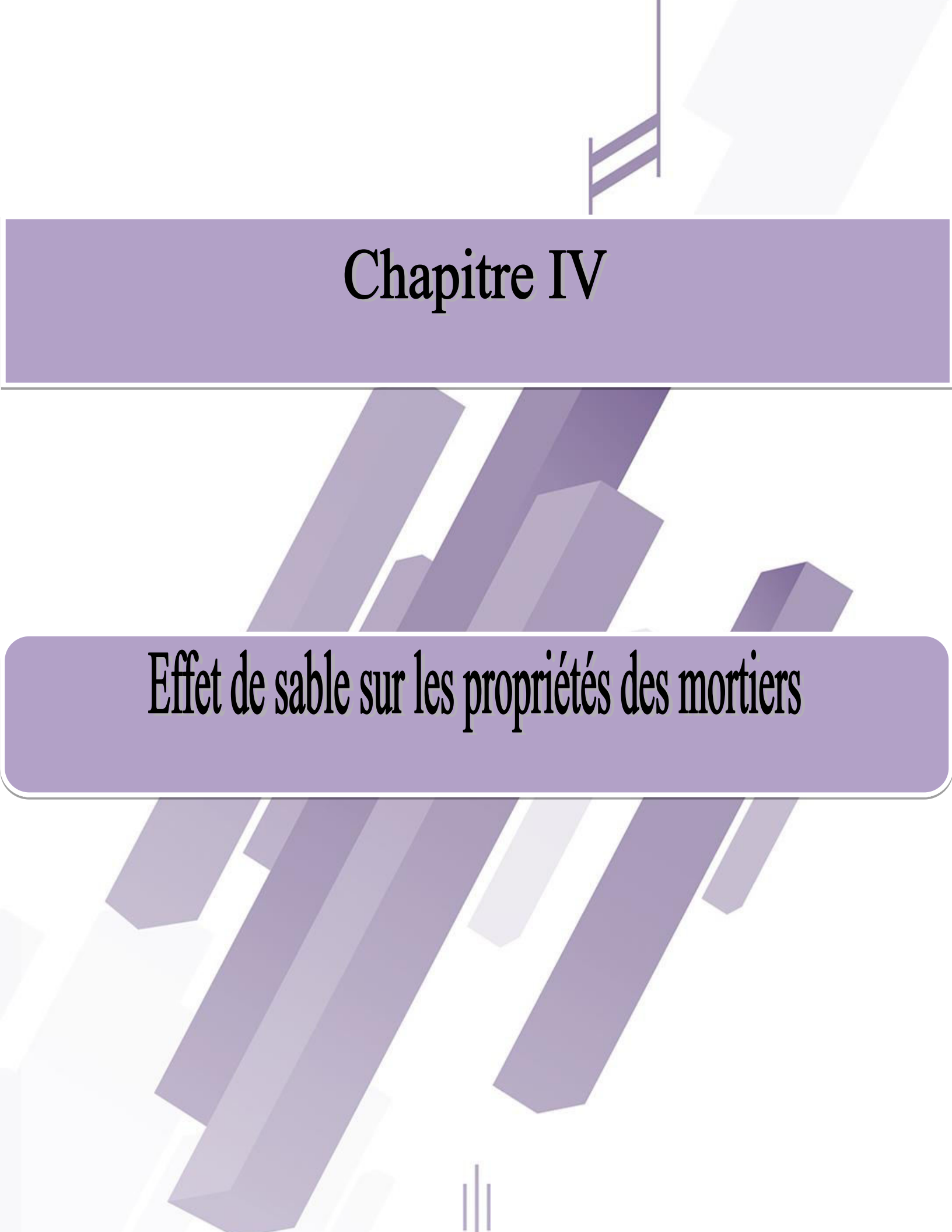
Figure 34. Détermination de la résistance a la compression

6. Conclusion

L'utilisation des matériaux locaux dans la fabrication du béton est constituée une alternative économique et technologique importante dans certains pays en voie de développement. Cette recherche présente une contribution à l'étude de l'effet du sable sur les propriétés rhéologique, mécaniques des mortiers autoplaçants. Trois types de sables de nature et de morphologie différente, ont été utilisés, il s'agit du sable recyclé, sable alluvionnaire et sable dunaire.

Cette partie de l'étude a successivement traité les points suivants :

- Caractérisation physique et chimique des matériaux utilisés dans les compositions des MAP ;
- La méthode de formulation utilisée, cette méthode appelée méthode générale ou méthode d'Okamura. L'objectif de cette méthode est d'optimiser les dosages en superplastifiant et en sable à l'échelle du mortier avant de passer à l'échelle du béton ;
- Les procédures expérimentales et les essais réalisés sur les mortiers à l'état frais et à l'état durci au cours de cette étude.



Chapitre IV

Effet de sable sur les propriétés des mortiers

1. Introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter et analyser les résultats des différents essais effectués sur les mortiers en fonction de type de sable utilisé. On commencera par les essais effectués sur le mortier afin d'optimiser le rapport sable sur mortier S/M et le rapport superplastifiant sur liant Sp/L et étudier son comportement rhéologique, mécanique. Les propriétés des mortiers ont été évaluées à l'aide des essais d'étalement au mini-cône, l'écoulement via le mini-entonnoir en V.

2. Optimisation du rapport Sable/Mortier (S/M) et Sp/L

Les auteurs [81] de la méthode générale ont limité le volume du sable à 40% ($S/M = 0,4$) du celui du mortier pour obtenir un MAP à base de matériaux locaux japonais. Or, ceci est loin d'être toujours le cas, puisque l'utilisation du BAP à travers le monde a montré qu'il est nécessaire de modifier ce volume, pour qu'on puisse produire un MAP de grande déformabilité [41].

Petersson [82] a analysé 68 cas où le BAP a été utilisé dans divers pays du monde. Cet auteur a rapporté que dans plus de 80% des cas étudiés le volume du sable utilisé est compris entre 41 et 52%. En Algérie, Boukendakdji [83] et Belaidi [84] ont testés des BAP à base de matériaux locaux. Ils ont montré qu'un rapport S/M égal à 0.5 est adéquat pour obtenir un bon BAP.

L'optimisation du rapport S/M consiste à rechercher la composition optimale pour les rapports 0.4, 0.5 et 0.6 tout en faisant varier le dosage en SP. Les différentes compositions des mortiers autoplaçants obtenus pour les différents types de sable utilisés, en fonction du rapport S/M sont présentées dans les tableaux 5, 6 et 7 ainsi que les résultats des essais d'étalement au mini-cône (Slump test) et du temps d'écoulement à l'entonnoir en V (V-funnel test)

Chapitre IV : Effet de sable sur les propriétés des mortiers

Tableau 6: Mortier de sable alluvionnaire (SA) F1

E/C = 0.4	S/M = 0.6	S/M = 0.5					S/M = 0.4
Ciment (kg/m ³)	548.6	696.6					822.7
Sable (kg/m ³)	1656	1333.5					1104
Eau (kg/m ³)	219.6	278.8	278.8	278.8	278.8	278.8	329.4
Superplastifiant (%)	2.0	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	0.6
Etalement (mm)	100	268.5	287.5	290.5	291.5	294.0	444
Temps d'écoulement (sec)	-	10.77	5.37	5.72	5.30	5.08	3.67
Observation		Pas de ressuage Pas de ségrégation	Pas de ressuage Pas de ségrégation	ressuage Pas de ségrégation	ressuage Pas de ségrégation	ressuage ségrégation	ressuage ségrégation

Tableau 7: Mortier de sable recyclé (SR) F2

E/C = 0.4	S/M = 0.5				
Ciment (kg/m ³)	696.9				
Sable (kg/m ³)	1200				
Eau (kg/m ³)	278.8	278.8	278.8	278.8	278.8
Superplastifiant (%)	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
Etalement (mm)	260	280	320	---	390
Temps d'écoulement (sec)	3.80	3.10	2.85	---	1.90
Observation	Pas de ressuage Pas de ségrégation	Ressuage Pas de ségrégation	Ressuage Ségrégation	---	---

Chapitre IV : Effet de sable sur les propriétés des mortiers

Tableau 8: Mortier de sable dunaire (SD) F3

E/C = 0.4	S/M = 0.5				
Ciment (kg/m ³)	696.9				
Sable (kg/m ³)	1250.0				
Eau (kg/m ³)	278.8	278.8	278.8	278.8	278.8
Superplastifiant (%)	0.8	1.2	1.4	1.5	1.6
Etalement (mm)	100	252	274	290	291
Temps d'écoulement (sec)		18.08	09.63	07.10	06.85
Observation	Blocage du mortier	Pas de ressuage Pas de ségrégation	Pas de ressuage Pas de ségrégation	Pas de ressuage Pas de ségrégation	Pas de ressuage Pas de ségrégation

Les résultats obtenus montrent que les mortiers confectionnés avec un rapport S/M de 0.5 sont caractérisés par une meilleure fluidité. Avec un rapport S/M de 0.4, les mortiers obtenus sont très fluides et ne respectent pas les recommandations de Domone et Jin, [76]. Ces mélanges possèdent une faible viscosité, ce qui peut nuire l'homogénéité du BAP.

Lorsque le volume du sable est limité à 40% du celui du mortier, la teneur en ciment utilisé est élevée, ce qui engendre une diminution de la résistance à l'écoulement du mortier en écartant les particules du sable les unes des autres conduisant par conséquent à une augmentation de la déformabilité. Pour un rapport S/M de 0.6 le mortier était très ferme même avec l'augmentation du dosage en superplastifiant. L'augmentation du volume du sable et la diminution du volume du ciment conduisent à une augmentation des forces de frottement générées par les particules du sable [85]. En outre, l'augmentation du volume de sable mène à une diminution de l'eau libre dans le mélange dû à l'augmentation de la quantité absorbé par le sable, qui dépend de la teneur en sable du mélange lui-même [81]. La diminution de l'eau libre du mélange conduit à une diminution de la déformabilité.

La diminution du rapport S/M conduit à une réduction du volume de sable, et par conséquent l'augmentation du volume de pâte de ciment, ce que influe positivement à la fluidité des mortiers. Westerholm et al. [31] montrent que l'utilisation d'une large quantité de sable fin dans le mélange de mortier influe sur les paramètres rhéologiques de ce dernier, elle augmente le seuil de cisaillement ainsi que la viscosité plastique.

Fang et al. [86] ont rapporté que, pour la confection d'un béton autoplaçant à haute performance, il recommandé d'utiliser un rapport Sable/Mortier entre 45% et 48%.

Chapitre IV : Effet de sable sur les propriétés des mortiers

Spengler et Schiessel [87] ont pu obtenir un bon BAP quatre fois plus riche en sable qu'en gravier (Sable 80% et 20% Gravier) avec un rapport E/C de 0.5.

Su et al. [88] ont proposé un volume de sable de 50% permettant d'obtenir un béton autoplaçant avec des bonnes propriétés rhéologiques.

Remarque : le rapport sable / mortier (S/M) est fixé à 0.5 pour les essais sur mortier.

3. Effet du superplastifiant sur les mortiers frais

Les superplastifiants agissent par adsorption à l'interface solide-eau, ce qui permet aux grains de ciment d'acquiescer des charges identiques et créer ainsi un phénomène de dispersion des particules par répulsion électrostatique. Ceci permet de libérer une partie de l'eau qui a été piégée par les grains de ciment floculés et diminue ainsi les frictions intergranulaires. On assistera alors à une amélioration de l'ouvrabilité du béton. En général, les superplastifiants utilisés dans les formulations des BAP sont du type polyméline sulfoné, polycarboxylate ou de naphthalène sulfonate.

Miura et al. [89] ont étudié les propriétés d'un mortier autoplaçant avec un nouveau fluidifiant constitué d'un mélange de deux polymères. Les auteurs ont comparé les propriétés rhéologiques d'un mortier de E/C = 0,5 adjuvanté par le FPC, un fluidifiant de type polycarboxylate (PC) et un fluidifiant de type naphthalène sulfonate (NS). Pour un étalement de 240 mm, ils ont constaté que le dosage en (PC) et en (FPC) est plus faible que celui d'un (NS). Par ailleurs, la viscosité plastique est plus élevée avec le (FPC).

A partir des essais sur mortiers, on optimise le rapport Superplastifiant/Liant (Sp/L) et par conséquent on fixe ce rapport au niveau des essais sur béton. Cette optimisation a été faite à partir des deux essais sur mortier, la mesure d'étalement par le mini-cône et la mesure du temps d'écoulement à travers le mini-entonnoir en V. Les résultats des essais d'étalement sont donnés par les figures 35, 36 et 37.

3.1. Etalement au mini-cône

L'utilisation du superplastifiant permet une meilleure lubrification des surfaces des particules conduisant par conséquent à une diminution de la résistance à l'écoulement, ce qui améliore l'étalement du mortier. En outre, l'effet dispersant du SP, qui libère l'eau piégée entre les grains du ciment, résulte une quantité d'eau libre dans le mélange qui augmente au fur et à mesure que le dosage en SP augmente, ce qui contribue aussi à l'augmentation de l'étalement du mortier.

Les résultats de l'étalement (figure 35) montrent que pour le mortier du sable recyclé, l'augmentation du dosage en SP de 0,6% à 1% conduit à une augmentation significative de

Chapitre IV : Effet de sable sur les propriétés des mortiers

l'étalement. On observe que le dosage en SP de 0,6% et 0,7%, la valeur de l'étalement est acceptable (entre 250 et 300 mm) selon Domone et Jin [76]. Au de là de 0.8%, valeurs de l'étalement sont hors de domaine cible et présentent un grand ressuage et une grande ségrégation.

L'effet du dosage en superplastifiant sur l'étalement pour les mortiers du sable alluvionnaire, est présenté sur la figure 36. Les dosages en superplastifiant de 0.8 et 0.9% donnent des mortiers fluides et stables. Les dosages supérieurs à 0.9% ont été rejetés car ils ont donnés des mélanges ségrégés.

La figure 37 montre l'effet du superplastifiant sur l'étalement du mortier de sable dunaire. Les dosages de SP de 1.2 à 1.8% offrent des valeurs d'étalement appartient du domaine préconisé entre 250 et 300 mm. Pour une teneur en superplastifiant de 0.8%, le mortier obtenu est un mortier ferme.

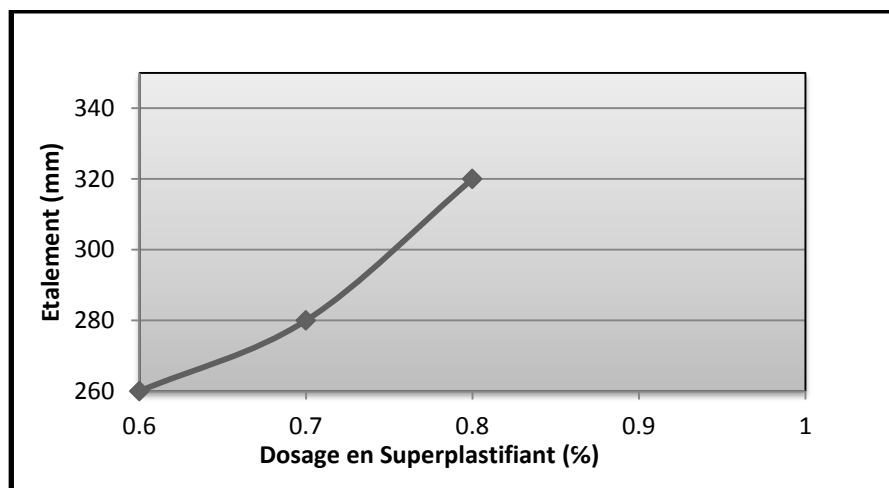


Figure 35. Etalement en fonction du dosage en superplastifiant pour le mortier de sable recyclé

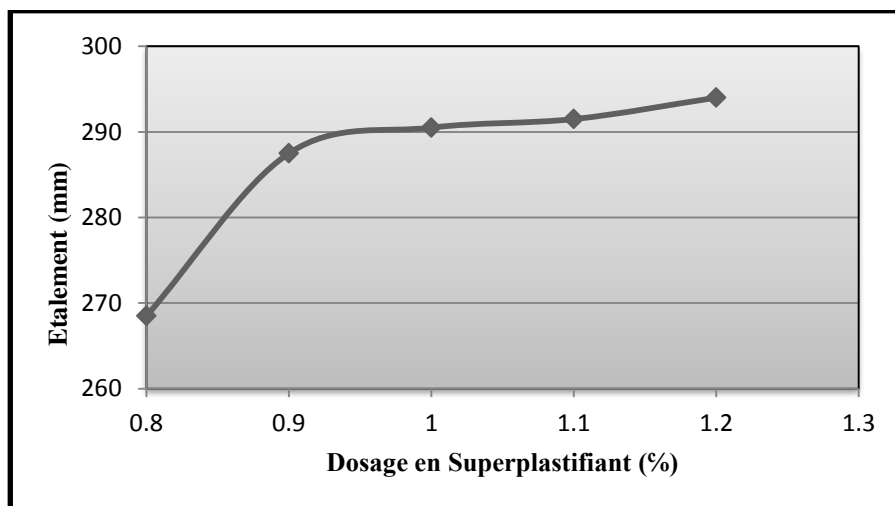


Figure 36. Etalement en fonction du dosage en superplastifiant pour le mortier de sable alluvionnaire

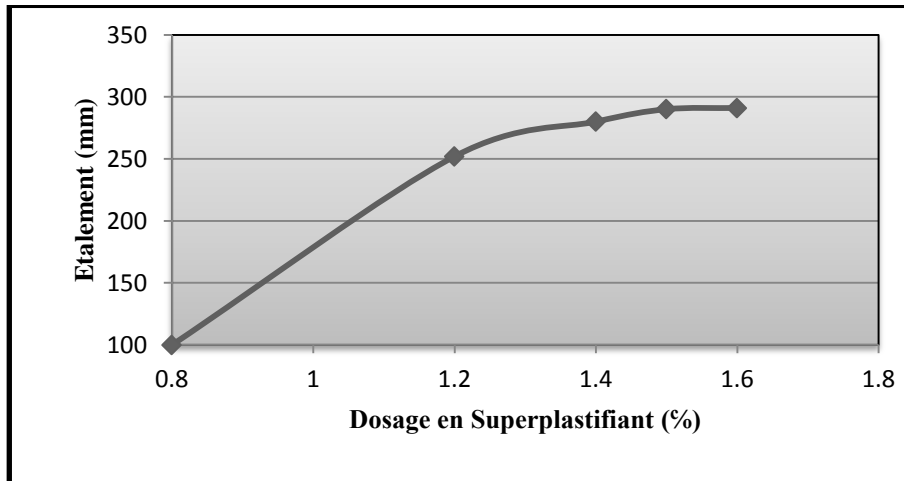


Figure 37. Etalement en fonction du dosage en superplastifiant pour le mortier de sable dunaire

3.2. Temps d'écoulement à travers le mini-entonnoir en V

La figure 38, 39 et 40 montrent l'effet du superplastifiant sur le temps d'écoulement en fonction de type du sable utilisé. On constate une diminution du temps d'écoulement avec l'augmentation du dosage en SP pour les différents mortiers. Pour le mortier de sable recyclé, on remarque que toutes les valeurs obtenues sont à l'intérieur de la fourchette recommandée 2 – 10 secondes [76]. Les mortiers de sable alluvionnaire avec un dosage en superplastifiant de 0.9 à 1.2% ont donné un temps d'écoulement compris entre 5 et 6 sec, et inscrit dans les limites de 2 – 10 secondes proposées par Domone et Jin [76].

La figure 40 représente l'effet du superplastifiant sur le temps d'écoulement de mortier du sable dunaire, les dosages 1.4 à 1.6% ont montré des temps d'écoulement compris entre 6 et 10 sec. Pour des dosages inférieurs à 1.4%, on remarque que les mortiers sont caractérisés par des temps d'écoulement élevés qui sont hors de l'intervalle de 2 à 10 secondes.

Les résultats d'essais d'étalement et du temps d'écoulement sur les mortiers, nous permettent de faire les conclusions suivantes :

- Un rapport S/M égale à 0.5 sera utilisé dans la suite de travail pour tous les mortiers, car il donne des mortiers fluides et homogènes ;
- Un dosage en superplastifiant égale à 0.6% est utilisé pour les mortiers du sable recyclé;
- Un dosage en superplastifiant égale à 0.9% est utilisé pour les mortiers du sable alluvionnaire;
- Un dosage en superplastifiant égale à 1.5% est utilisé pour les mortiers du sable dunaire

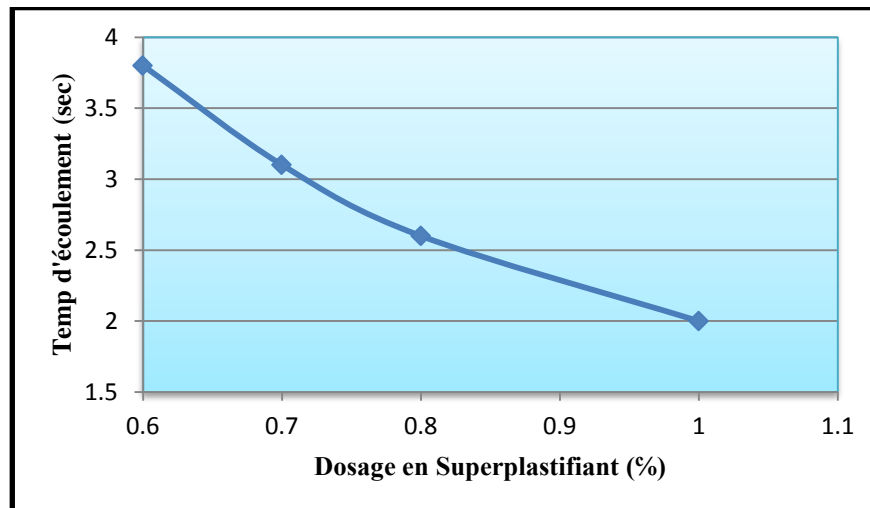


Figure 38. Temps d'écoulement en fonction du dosage en superplastifiant pour le mortier de sable recyclé

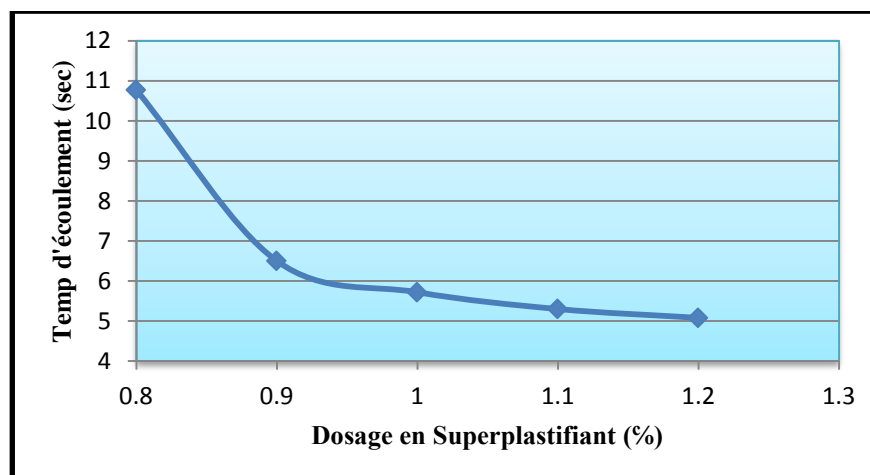


Figure 39. Temps d'écoulement en fonction du dosage en superplastifiant pour le mortier de sable alluvionnaire

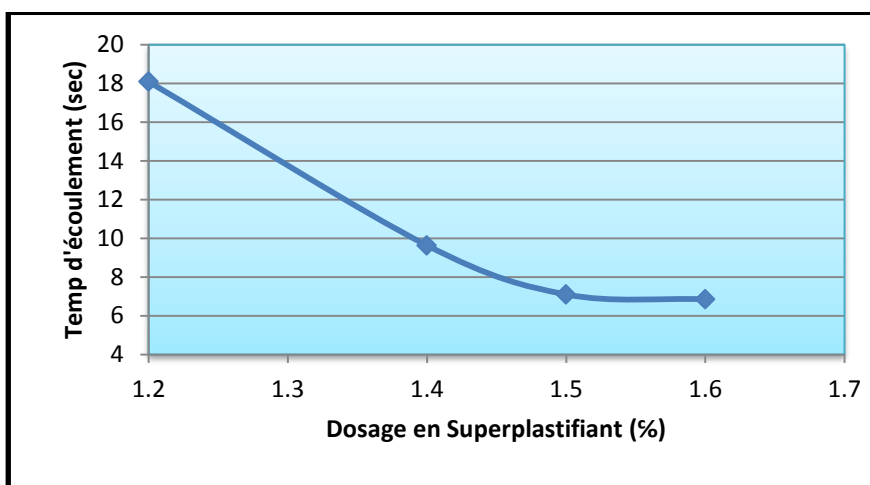


Figure 40. Temps d'écoulement en fonction du dosage en superplastifiant pour le mortier de sable dunaire

Chapitre IV : Effet de sable sur les propriétés des mortiers

4. Effet de type de sable sur les propriétés des mortiers

Dans cette partie nous avons étudié l'influence de différents sables utilisés dans les formulations des MAP sur les propriétés rhéologiques et mécaniques des mortiers. Les différentes compositions des mortiers autoplaçants en fonction de type du sable sont présentées dans les tableaux 9, 10, 11 et 12, ainsi que les résultats des essais d'étalement au mini-cône et du temps d'écoulement à l'entonnoir en V. Généralement, un étalement de mini-cône entre les limites de 25 – 30 cm [29] et un écoulement à l'entonnoir en V (V-funnel) entre de 2 à 10 secondes [76] permet d'avoir une fluidité satisfaisante d'un BAP.

Tableau 9: Mortier avec sable mélange (SR +SA)

E/C = 0.4, S/M = 0.5	F4	F5	F6
Ciment (kg/m ³)	1045.35		
SR (kg/m ³)	1358.44	905.63	452.81
SR (%)	75	50	25
SA (kg/m ³)	500.06	1000.13	1500.19
SA (%)	25	50	75
Eau (kg/m ³)	418.14		
Superplastifiant (%)	1.1		
Superplastifiant (kg/m ³)	11.5		
Etalement (mm)	280	270	240
Temps d'écoulement (sec)	3.2	3.85	4.5

Tableau 10: Mortier avec sable mélange (SR +SD)

E/C = 0.4, S/M = 0.5	F7	F8	F9
Ciment (kg/m ³)	1045.35		
SR (kg/m ³)	1358.44	905.63	452.81
SR (%)	75	50	25
SD (kg/m ³)	468.75	937.50	1406.25
SD (%)	25	50	75
Eau (kg/m ³)	418.14		
Superplastifiant (%)	1.3		
Superplastifiant (kg/m ³)	13.59		
Etalement (mm)	300	290	250
Temps d'écoulement (sec)	3.16	4.1	9.5

Chapitre IV : Effet de sable sur les propriétés des mortiers

Tableau 11: Mortier avec sable mélange (SA +SD)

E/C = 0.4, S/M = 0.5	F10	F11	F12
Ciment (kg/m ³)	1045.35		
SA (kg/m ³)	1500.19	1000.13	500.06
SA (%)	75	50	25
SD (kg/m ³)	468.75	937.5	1406.25
SD (%)	25	50	75
Eau (kg/m ³)	418.14		
Superplastifiant (%)	0.9		
Superplastifiant (kg/m ³)	9.41		
Etalement (mm)	293	283	213
Temps d'écoulement (sec)	4.32	4.65	27.50

Tableau 12: Mortier avec sable mélange (SR+SA+SD)

E/C = 0.4, S/M = 0.5	F13	F14	F15
Ciment (kg/m ³)	1045.35		
SR (kg/m ³)	905.63	452.81	452.81
SR (%)	50	25	25
SA (kg/m ³)	500.06	1000.13	500.06
SA (%)	25	50	25
SD (kg/m ³)	468.75	468.75	937.50
SD (%)	25	25	50
Eau (kg/m ³)	418.14		
Superplastifiant (%)	1.3		
Superplastifiant (kg/m ³)	13.59		
Etalement (mm)	260	250	210
Temps d'écoulement (sec)	7	7.4	11.38

4.1. Effet de sable sur l'étalement des mortiers

Les résultats d'étalement des mortiers avec les différents types de sable utilisés sont montrés sur la figure 41 (a, b, c et d) On constate que, les diamètres d'étalement des mortiers sont à l'intérieur de l'intervalle de 250 à 300 mm recommandé par Domone et Jin [76]. Par contre, les mortiers confectionnés avec un pourcentage supérieur de 50% de sable dunaires sont caractérisés par une diminution de l'étalement et par conséquent la perte de fluidité. Ceci est dû à la demande élevée en eau du sable dunaire pour obtenir la fluidité désirée d'une part, et d'autre part à l'augmentation de la surface spécifique des particules des sables. Les mortiers à base de sable mélange (recyclé alluvionnaire) présentent une bonne fluidité, ce qu'on peut expliquer par

Chapitre IV : Effet de sable sur les propriétés des mortiers

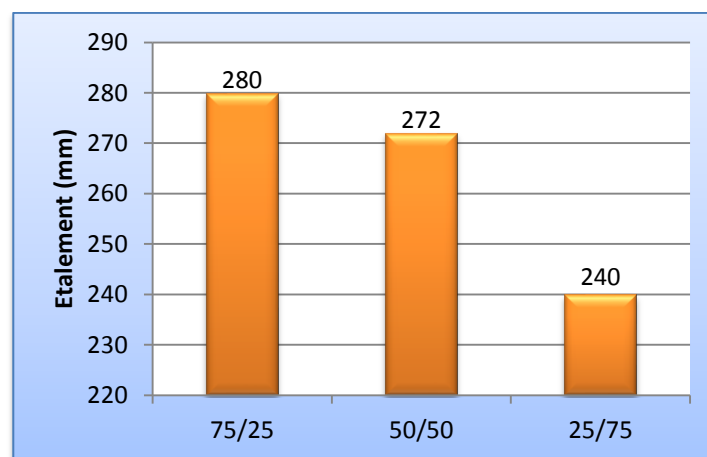
la distribution continue et uniforme des particules de sable alluvionnaire. D'où une amélioration de l'ouvrabilité des mortiers.

La taille des granulats fins affecte la fluidité et la résistance à la ségrégation des mortiers. Miyazawa et al. [90] ont remarqué que la fluidité et la résistance à la ségrégation augmentent avec la diminution de la taille des particules. Donc, il est possible de contrôler la fluidité et la ségrégation des mortiers à travers la taille des granulats fins.

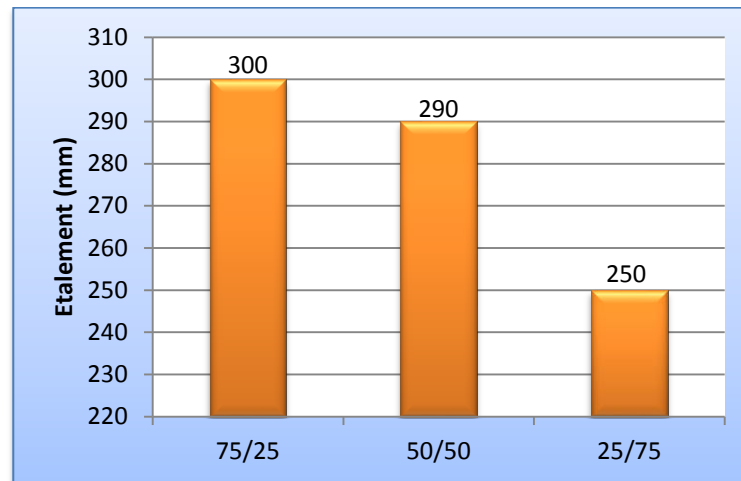
Bager et al. [91] ont étudié l'influence de la granulométrie de sable sur les paramètres rhéologiques des mortiers autoplacants (MAP). Ils ont utilisé Cinq type de sable avec différentes distributions granulométriques, dont leur module de finesse varié entre 1.5 et 3. Les résultats obtenus montrent l'effet de la granulométrie et la forme des grains sur les paramètres rhéologiques à savoir le seuil de cisaillement et la viscosité. L'augmentation de la finesse de sable conduit à l'augmentation du seuil de cisaillement, et par conséquent à la diminution de l'étalement des mortiers. Par contre, ces paramètres n'ont pas influencé par la texture des granulats fins.

Kiang et Hongjian [92] ont mené une étude sur l'influence de verre broyé utilisé comme un sable sur les propriétés des mortiers. Les résultats indiquent que l'incorporation des déchets de verre réduit l'ouvrabilité et la densité des mortiers.

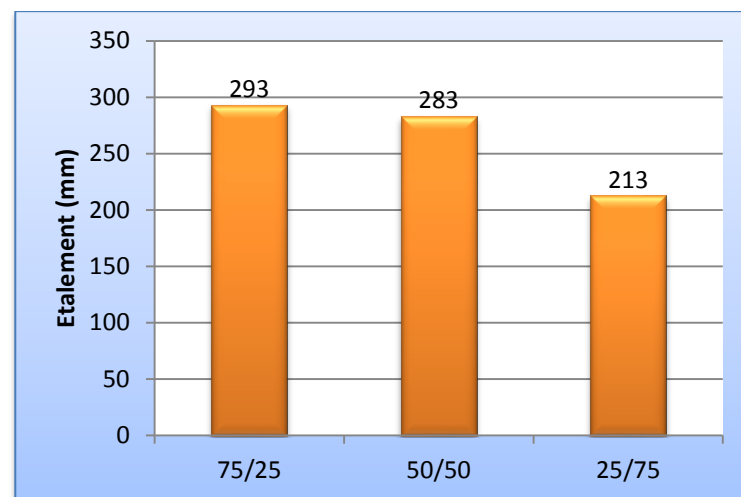
Etalement des mortiers en fonction de type de sable :



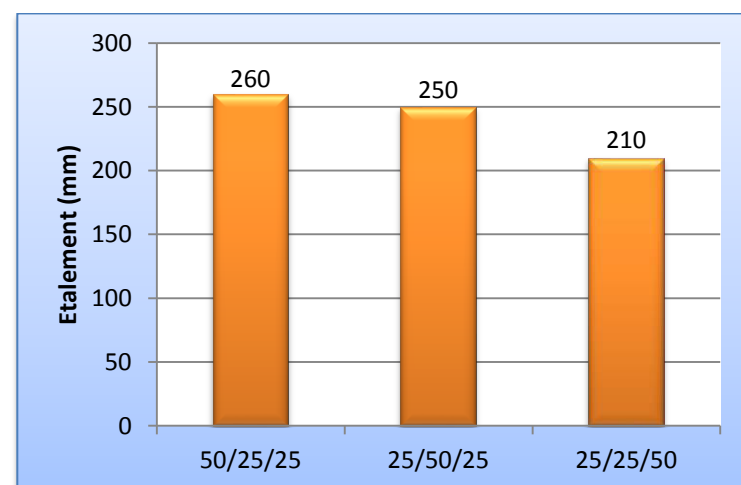
(a) Sable binaire (SR/SA)



(b) Sable binaire (SR/SD)



(c) Sable binaire (SA/SD)



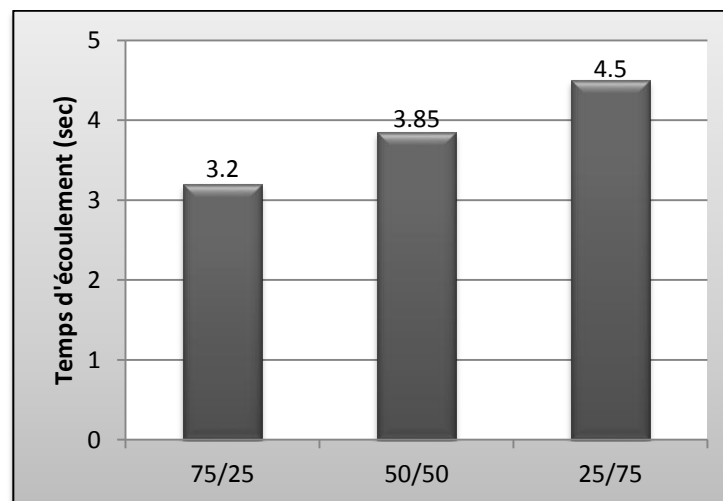
(d) Sable Ternaire (SR/SA/SD)

Figure 41. Etalement des mortiers en fonction de type de sable

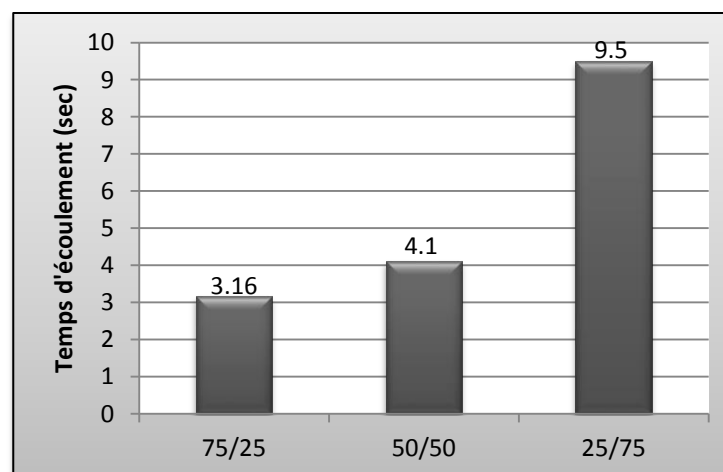
4.2. Effet de sable sur le temps d'écoulement des mortiers

La fluidité des mortiers autoplaçants confectionnés avec différents types de sable est évaluée moyennant le mini-entonnoir en V. les résultats sont présentés à la figure 42 (a, b, c et d). On remarque, que tous les mortiers enregistrent des valeurs du temps d'écoulement dans le domaine recommandé de 2 à 10 secondes [66]. Par contre, les mortiers qui contiennent 75% de sable dunaire, on a observé un blocage du mortier à travers l'entonnoir an V et une perte totale de fluidité. La perte d'ouvrabilité est relative à la grande surface spécifique du sable dunaire par rapport le sable recyclé ou alluvionnaire. Les résultats montrent que, le temps d'écoulement mesuré est principalement dépend de type de sable utilisé. Le sable dunaire demande beaucoup d'eau par rapport les sables grossier pour atteindre la même ouvrabilité ou fluidité.

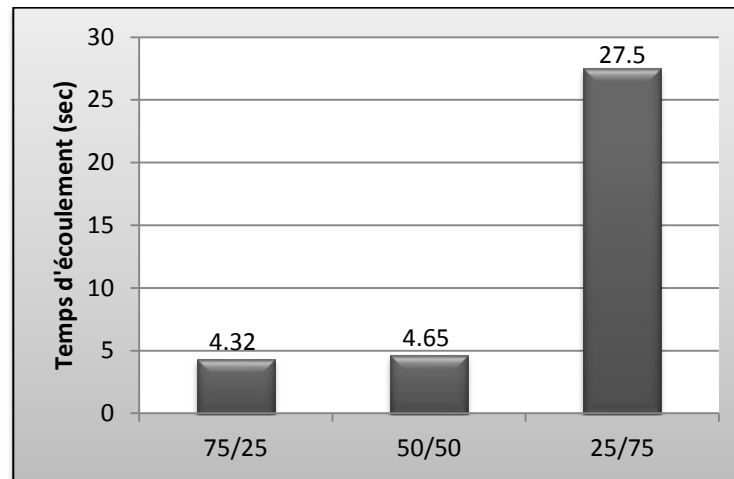
Tobes et al. [93] ont remarqué que l'influence des particules fines dans le sable est significative sur la fluidité des mortiers. Le temps d'écoulement augmente avec l'augmentation de la finesse du sable.



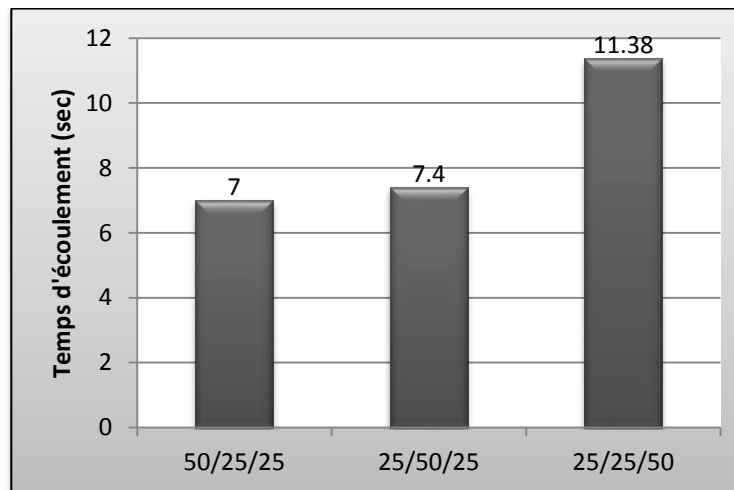
(a) Sable binaire (SR/SA)



(b). Sable binaire (SR/SD)



(c). Sable binaire (SA/SD)



(d). Sable Ternaire (SR/SA/SD)

Figure 42. Temps d'écoulement des mortiers en fonction de type de sable

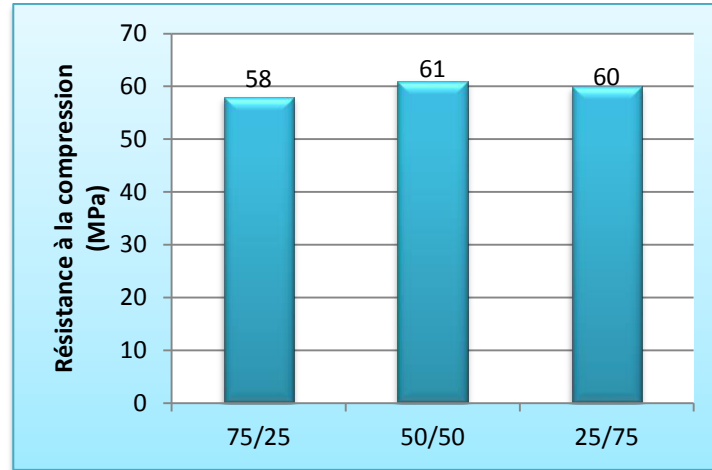
4.3. Effet de sable sur la résistance à la compression

Les résultats de la résistance à la compression des mortiers confectionnés avec les différents types des sables sont représentés sur les figures 43 (a, b, c et d). On constate d'après ces résultats que les mortiers contenant du sable mélange recyclé – alluvionnaire ont des résistances supérieures par rapport à ceux contenant du sable recyclé – dunaire.

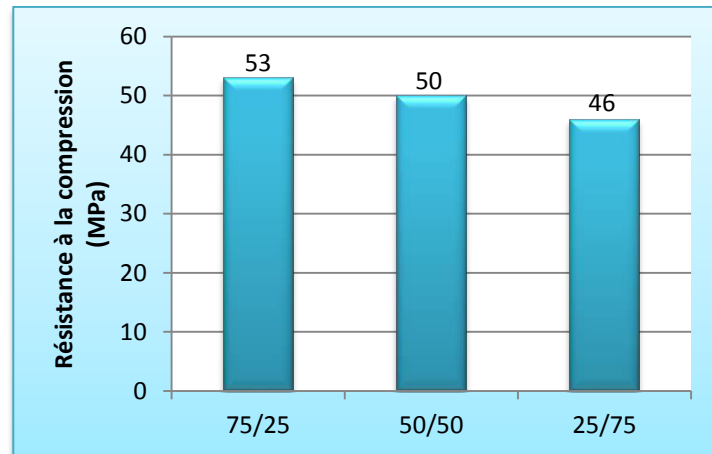
Les résultats montrent une réduction de la résistance en compression avec l'augmentation du pourcentage de sable dunaire dans les mélanges binaires et ternaires. On note une diminution de l'ordre de 15% à 28 jours avec l'augmentation de la teneur en sable dunaire de 25 à 50%. La chute de la résistance est liée aux propriétés particulières du sable dunaire, qui affecte la compacité des mortiers et par conséquent la résistance du matériau.

Chapitre IV : Effet de sable sur les propriétés des mortiers

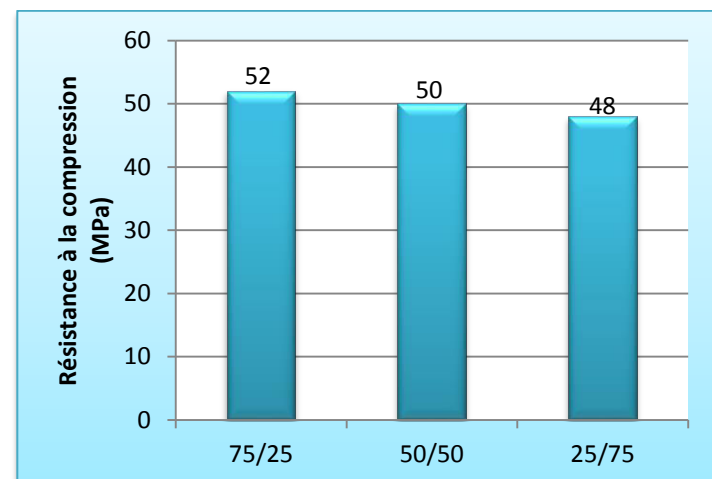
Al Hozaimy et al. [94] ont étudié l'effet de sable de dune comme addition cimentaire sur la résistance à la compression des mortiers. Ils ont remarqué que l'augmentation de la teneur en sable de dune permet de diminuer la résistance à la compression.



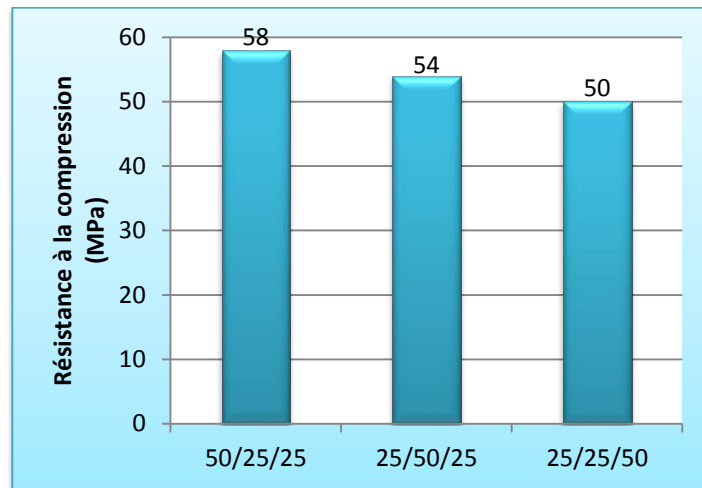
(a). Sable binaire (SR/SA)



(b). Sable binaire (SR/SD)



(c). Sable binaire (SA/SD)



(d). Sable ternaire (SR/SA/SD)

Figure 43. Résistance à la compression des mortiers en fonction de type de sable

5. Conclusion

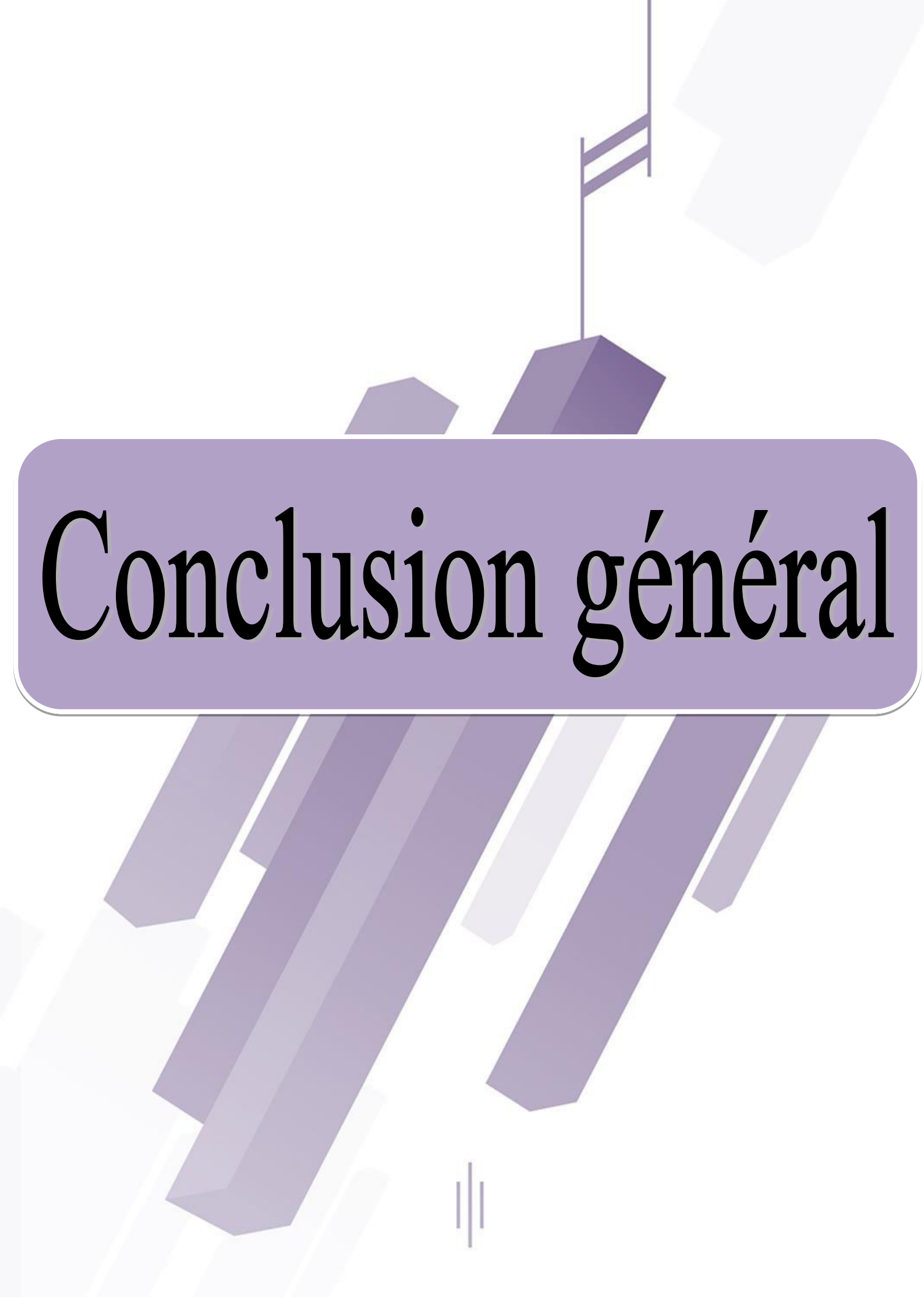
Pour les mortiers autoplaçants (MAP) on a déterminé l'étalement au mini cône et le temps d'écoulement à travers le mini V-funnel.

Les résultats a permis de conclure que la méthode Okamura pouvait être utilisée dans les formulations avec optimisation de la teneur en sable et en superplastifiant.

L'objectif pour cette d'étude l'influence de différent type de sable sur la rhéologie et la résistance mécanique des mortiers. A cet égard, trois qualités de sable ont été utilisées : sable recyclé, sable alluvionnaire et sable dunaire. Les résultats montrent une amélioration des caractéristiques rhéologiques et mécaniques avec l'utilisation du sable de recyclé et du sable alluvionnaire. Par contre, une diminution des propriétés des mortiers autoplaçantes a été remarquée si on augmente le dosage en sable dunaire dans la composition des mortiers.

L'étude a révélé que, l'utilisation du sable mélange binaire ou ternaire permet d'obtenir des mortiers ayant des bonnes propriétés rhéologiques et des performances mécaniques.

Les meilleures résistances mécaniques sont obtenues avec les mortiers avec des sables recyclées et sables alluvionnaires. Ceci est dû à la bonne répartition granulométrique de ces sables. Les résistances mécaniques diminuent en ajoutant le sable de dunes, mais elles atteignent des valeurs acceptables pour des dosages modérés en sable dunaire.

The background features abstract, overlapping purple geometric shapes, including rectangles and polygons, some with a 3D effect. A small flag icon is visible in the upper right area.

Conclusion général

CONCLUSIONS GENERALS

Les bétons autoplaçants représentent une nouvelle avancée pour la construction en béton car ils offrent de nombreux avantages aussi bien du point de vue économique, l'absence de vibration aide à la réduction des coûts de production permet d'avoir des éléments de géométrie complexe et fortement ferraillés.

L'objectif de ce travail consiste à étudier les comportements, à l'état frais et à l'état durci, des formulations de mortier autoplaçants (MAP) confectionnés à partir de trois types de sables locaux, à savoir : sable alluvionnaire, sable dunaire et sable recyclé.

Pour la formulation des mélanges étudiés dans ce travail, nous avons utilisé la méthode d'Okamura (approche japonaise) parce qu'elle ne nécessite pas d'outil informatique et sa procédure de réalisation est très simple. L'utilisation de superplastifiant et d'une grande quantité de pâte est alors nécessaire pour obtenir un matériau très fluide. L'étude menée a permis de conclure que cette méthode de formulation (Okamura) pouvait être utilisée pour la confection des MAP à base des matériaux locaux avec quelques modifications concernant l'optimisation de la quantité du sable dans le mélange. Dans notre cas nous avons utilisé un volume du sable de 50%.

En utilisant la méthode d'Okamura, nous avons déterminé quinze formulations de MAP avec les trois types de sables : MAP à base du sable recyclé, MAP à base du sable alluvionnaire, MAP à base du sable dunaire, MAP avec des sables mélanges binaires (recyclé- alluvionnaire, recyclé- dunaire, alluvionnaire- dunaire) et MAP avec sable mélange ternaire (recyclé- alluvionnaire- dunaire).

A l'état frais, les formulations du MAP ont été caractérisées à l'aide d'essais spécifiques des MAP, il s'agit des essais suivants : l'essai d'étalement et l'essai du temps d'écoulement avec le V-funnel. A l'état durci, divers essais relatifs aux domaines mécaniques ont été réalisés afin de mesurer la résistance à la compression et à la flexion.

Les résultats trouvés à l'issue de ce travail expérimental ont pour objectif d'étudier l'influence de différents types de sable sur la rhéologie et la résistance mécanique des mortiers. Les résultats montrent une amélioration des caractéristiques rhéologiques et mécaniques avec l'utilisation du sable recyclé et du sable alluvionnaire. Par contre, une diminution des propriétés autoplaçantes des mortiers a été remarquée si on augmente le dosage en sable dunaire dans la composition des mortiers.

Conclusions généraux

L'étude a aussi révélé que, l'utilisation du sable mélange binaire ou ternaire permet d'obtenir des mortiers ayant des bonnes propriétés rhéologiques et des performances mécaniques.

Références Bibliographiques

- [1].BATIMAG, revue spécial huitième salon BATIMATEC, Mai 2005.
- [2]. OKAMURA.H, OZAWA.K, and OUCHI.M « Self-compacting concrete. Structural concrete» March 2000
- [3]. SEDRAN.T. « Rhéologie et rhéométrie des bétons. Application aux bétons autonivellants ». Thèse de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, 1999.
- [4]. SEDRAN.T, Les bétons autonivelants (BAN) synthèse bibliographique, Bulletin de liaison LCPC, mars 1995.
- [5]. DREUX G. et Festa J.,« Nouveau guide du béton et de ses constituants», 8ème édition, Eyrolles, 1998.
- [6]. Produits de ciment Couillard, « Les superplastifiants», [http:// www.betoncouillard.com](http://www.betoncouillard.com), Internet, 2008
- [7].Sheinn, A.M.M, “Rheological modelling of self-compacting concrete”, Doctoral Thesis of NationalUniversity of Singapore, Singapore, 2007.
- [8]. Khayat K.H., Colloques sur les bétons autonivelants, Centre de recherche Interuniversitaire sur le béton (CRIB) Université de SHERBROOKE, Université LAVAL Québec, 1er Novembre 1996.
- [9].Shindoh T., Matsuoka Y.H., Development of combination type self-compacting concrete and evaluation test methods, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol. 1, N° 1, 2003, pp. 26 – 36
- [10]. Bethmont S., Mécanismes de ségrégation dans les bétons autoplaçants, Etude expérimentale des interactions granulaires, Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 2005, p. 166
- [11]. Flatt R.J., Houst Y.F., A simplified view on chemical effects perturbing the action of superplasticizer, Cement and Concrete Research, 31, 2001, pp. 1169 – 1176
- [12]. Sugamata T., Umezawa K., Okazawa S., A study of particle dispersing retention effect of polycarboxylate-based superplasticizers, Transactions of NMB Central Research Laboratories, Japan, Vol. 13, 2000, pp. 7 – 14
- [13]. Jin J., Properties of mortar for self-compacting concrete, PhD thesis, University of London, 2002, p.398
- [14]. De Larrard F., Bosc F., Catherine C., Deflorenne F., La nouvelle méthode des coulis de l'AFREM pour la formulation des bétons à hautes performances, Bulletin de Liaison des Ponts et Chaussées, 202, 1996, pp. 61 – 69

Références Bibliographiques

- [15]. Kuroiwa S., Matsuoka Y., Hayakawa M., Shindoh T., Application of super workable concrete to construction of 20-story building, American Concrete Institute SP140, High Performance Concrete in Severe Environments, Detroit, 1993, pp. 163 – 186
- [16]. Pleau R., Beaupré D., Khayat K., Bona B., Lacombe P., Entraînement de l'air et résistance au gel des bétons autonivelants, Colloque sur les bétons autonivelants, Ed. Kamal Khayat, Sherbrooke, Québec, 1996
- [17]. Neville A.M., Propriétés des bétons, Traduction de CRIB, Sherbrooke, Canada, Ed. Eyrolles, Paris, 2000, p. 806
- [18]. Ferraris C.F., Obla K.H., Hill R., Influence of mineral admixtures on the rheology of cement paste and concrete, Cement and Concrete Research, 31, 2001, pp. 245 – 255
- [19]. Carlsward J., Emborg M., Utsi S., Oberg P., Effect of constituents on the workability and rheology of self-compacting concrete, Proceedings of the 3rd International RILEM Conference on SCC, Island, Proceedings PRO 33, 2003, pp. 143 – 153
- [20]. Zhu W., Gibbs J.C., Use of different limestone and chalk powders in self-compacting concrete, Cement and Concrete Research, 35, 2005, pp. 1457 – 1462
- [21]. Benezet J.C., Benhassaine A., Grinding and pozzolanic reactivity of quartz powders. Powder Technology, Volume 105, Number 1, 1999, pp. 167 – 171
- [22]. Shi T.Y., Tanigawa Y., Mori H., Kurokawa Y., A study of effect of superfine powders on fluidity of cement paste, Transactions of the Japan Concrete Institute, 20, 1998, pp. 9 – 14
- [23]. Krachai R.M., Bouabdallah M.A., Abdelhadi H., Mamou K., Influence de la pouzzolane de Beni-Saf sur les performances mécaniques des bétons autoplacants, First International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries ENSET, Oran, Algeria, 2009.
- [24]. Skarendahl A., The present - The future. In The 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Wallevik O.H., Nielsson I., editors, RILEM Publications S.A.R.L., Bagneux, France, 2003, 6 – 14
- [25]. Kim M.H., Koh Y., Kamata E., Kim G.Y., An experimental study on the fluidity and evaluation of high fluidity concrete according to the kinds of fine aggregate, in Proceedings of the Japan Concrete Institute, Vol. 19, No. 1, 1997, pp. 67 – 72
- [26]. Hirata T., Takeda N., Miura N., Sogo S., The influence of the aggregate grading on fresh highly-workable-concrete, in Proceedings of the Japan Concrete Institute, Vol. 17, No. 1, 1995, pp. 81 – 86

Références Bibliographiques

- [27]. Sudo F., Masuda Y., Gomi S., The influence of fine aggregate grading on workability of high- fluidity concrete, in Proceedings of the Japan Concrete Institute, Vol. 18, No. 1, 1996, pp. 123-128
- [28]. Edamatsu Y., Yasumoto A., Mizukoshi M., NagaoKa S., Influence of sand or gravel volume on self-compactability of fresh concrete, in Proceedings of the Japan Concrete Institute, Vol. 19, No. 1, 1997, pp. 49 – 54
- [29]. Chai H., Design and testing of self-compacting concrete, PhD thesis, University College of London (UCL), April 1998, p. 259
- [30]. Naoki N., Ozawa K., Effect of fine aggregate on the filling ability of fresh concrete, in Proceedings of JSCE, Vol. 18, No. 1, 1996, pp. 105 – 109
- [31]. Westerholm Mikael, Lagerblad Bjorn, Silfwerbrand Johan, Forssberg Eric, Influence of fine aggregate characteristics on the rheological properties of mortars, Cement and Concrete Composites 30, 2008, pp. 274 – 282
- [32]. Billberg P., Fine mortar rheology in mix design of SCC. In Proceedings of the First International RILEM Symposium of Self-Compacting Concrete, Ed. Å. Skarendahl and Ö. Petersson, Stockholm, Sweden, 1999, pp. 47 – 58
- [33]. Bartos P.J.M., Testing-SCC: towards new European standards for fresh SCC. In: SCC'2005 – China, 1st International Symposium on Design, Performance and Use of Self-Consolidating Concrete, Ed. Yu Z.S.C., Khayat K.H., Xie Y., RILEM Publication SARL, Paris, 2005, pp. 25 – 44
- [34]. Felekoglu B., A comparative study on the performance of sands rich and poor in fines in self-compacting concrete, Construction and Building Materials, 22, 2008, pp. 646 – 654
- [35]. Benabed B., Kenai S., Azzouz L., Kadri E., Belaidi A.S.E., Effects of limestone quarry dust content on rheology and strength of self-compacting mortar, Eds. Holland T.C., Gupta P.R., Malhotra V.M., in Proceedings of Twelfth International Conference on Recent Advances in Concrete Technology and Sustainability Issues, ACI, , Prague, Czech republic, 2012, pp. 377 – 388
- [36]. Menadi B, Kenai S., Khatib J., Ait-Mokhtar A., Strength and durability of concrete incorporating crushed limestone sand, Construction and Building Materials, 23, 2009, pp. 625 – 633
- [37]. Shobha M., Mohan D.H., Raju P.S.N., Aggregate size and behavior of SCC, Proceedings of the Institution of Civil Engineers Construction Materials, 159, Issue CM4, 2006, pp. 147 – 152
- [38]. Harini M., Shaalini G., Dhinakaran G., Effect of size and type of fine aggregates on flowability of mortar, KSCE Journal of Civil Engineering, 16, 2012, pp. 163 – 168

Références Bibliographiques

- [39]. Bouziani T., Bederina M., Hadjoudja M., Effect of dune sand on the properties of flowing sand concrete (FSC), *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 6, 2012, pp. 59 – 64
- [40] Domone P.L., Self-compacting concrete: An analysis of 11 years of case studies, *Cement and Concrete Composites*, 28, 2006, pp. 197 – 208
- [41] Tu T.Y., Jann Y.Y., Hwang C.L., The application of recycled aggregates in SCC, In: *SCC'2005 - China 1st International Symposium on Design, Performance and Use of Self-Consolidating Concrete*, Editors: Yu Z., Shi C., Khayat K.H., Xie Y., RILEM Publications, Paris, France, 2005, pp. 145 – 152
- [42] Okamura H., Ouchi M., Self-compacting concrete, *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol. 1, N°1, 2003, pp. 5 – 15
- [43] Yammine J., Rhéologie des bétons fluides à hautes performances : relations entre formulations, rhéologie, physico-chimie et propriétés mécaniques, Thèse de l'Ecole Normale Supérieure de Cachan, Université Paris – 6, 2007, p. 198
- [44]. Okamura, H., and Ozawa, K, “Mix-design for self-compacting concrete ”, *Concrete Library of JSCE*1995; 25: 107-20.
- [45]. Jin, J, “Properties of mortar for self-compacting concrete”, Doctoral Thesis of University of London, United Kingdom, 2002.
- [46]. Ouchi, M., Hibino, M., and Okamura, H, “Effect of Superplasticizer on self compactability of Fresh Concrete”, *Transportation Research Board*, 76th annual meeting, Washington, D.C., 12-16 January, 1997.
- [47]. Oh S.G., Nogushi T., Tomosawa F., toward mix design for rhéology of self-compacting concrete, In *Proceedings of the First International RILEM Symposium of Self-Compacting Concrete*. RILEM, Ed. Å. Skarendahl and Ö. Petersson, Stockholm, Sweden, 1999, pp. 361 – 372
- [48]. Chanvillard G., Basuyaux O., Une méthode de formulation des bétons de sable à maniabilité et résistance fixées, *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées*, 205, 1996, pp. 49 – 63
- [49]. Sedran, T., and De Larrard, F, “Mix design of self-compacting concrete”, *Proceedings of the International RILEM Conference on Production Methods and Workability of Concrete*, Paisley. Eds. P.J.M. Bartos, D.L. Marr, and D.J. Cleland, 1996; 439–50.
- [50]. De Larrard, F., Hu, C., and Sedran, T, “Best Packing and Specified Rheology: Two Key Concepts in High-Performance Concrete Mix-Design”, *Adam Neville Symposium, Advances in Concrete Technology*, Las Vegas, June, 1995.

Références Bibliographiques

- [51]. Sheinn, A.M.M, “Rheological modelling of self-compacting concrete”, Doctoral Thesis of National University of Singapore, Singapore, 2007.
- [52] AFGC, Association française de Génie Civil, Bétons Autoplaçants ; Recommandations provisoires, documents scientifiques et techniques, 2002, p. 63
- [53] RILEM, Self-Compacting Concrete, State-of-the-art report of RILEM Technical Committee 174 – SCC, Edited by A. Skarendahl and O. Petersson, RILEM Publications, France, 2001, p. 168
- [54] Pedersen B., Smepllass S., The relationship between the rheological properties of SCC and the corresponding matrix phase, Proceedings of the Third International Symposium on Self-Compacting Concrete, Reykjavik, Iceland, 2003, pp. 106 – 116
- [55] Legrand C., La structure des suspensions de ciment, Chapitre 6 dans le béton hydraulique, Presses de l’ENPC, 1982, pp. 99 – 113
- [56] Noguchi T., Oh S.G., Tomosawa F., Rheological approach to passing ability between reinforcing bars of self-compacting concrete, Proceedings of the First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Edited by Å. Skarendahl and Ö. Petersson, Stockholm, Sweden, 1999, pp. 59 – 70
- [57] Le Roy R., De Larrard F., Pons G., Calcul des déformations instantanées et différées des bétons à hautes performances, Extension du domaine d’application des règlements de calcul BAEL/BPEL aux bétons à 80 MPa, Bulletin des LCPC, spécial XIX, mai 1996, pp.63 – 84
- [58] Pera J., Husson S., and Guilhot B., Influence of finely ground limestone on cement hydration, Cement and Concrete Composites, 21, 1999, pp. 99 – 105
- [59] Gibbs J.C., Zhu W., Strength of hardened self-compacting concrete , Proceedings of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO7), Stockholm, Sweden, 1999, pp. 199 – 209
- [60] Petersson Ö., Limestone powder as filler in self-compacting concrete – Frost resistance and compressive strength, Proceedings of 2nd International Symposium on Self-Compacting Concrete, Tokyo, Japan, 2001, pp. 277 – 284
- [61] Felekoglu B., Yardimci M.Y., Baradan B., A comparative study on the use of mineral and chemical types of viscosity enhancers in self-compacting concrete, Proceedings of 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 33), Reykjavik, Iceland, 2003, pp. 446 – 456

Références Bibliographiques

- [62] Shi C., Wu Y., Shao Y., Riefler M., Comparison of two design approaches for self-consolidating concrete, First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete, ACBM center, 2002, pp. 349 – 354
- [63] Pons G., Proust E., Assié S., Creep and shrinkage of self-compacting concrete: a different behaviour compared with vibrated concrete?, Proceedings of 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 33), Reykjavik, Iceland, 2003, pp. 645 – 645
- [64] De Larrard F., Le Roy R., Relation entre formulation et quelques propriétés mécaniques des bétons à hautes performances, Materials and structures, 25, 1992, pp. 464 – 475
- [65] Hu C., Barbieri B., Comparaison des retraits des bétons autonivelants et d'un béton fluide traditionnel, Science des matériaux et propriétés des bétons, 1ère Rencontre Internationale, Toulouse, 5-6 mars 1998, pp. 265 – 272
- [66] Sakata K., Durability of self-compacting concrete and low heat high performance concrete, International Conference CONSEC 98, Tromso, Norway, 1998, pp. 2057 – 2064
- [67] Sonebi M., Bartos P.J.M., Hardened SCC and its bond with reinforcement, Proceeding of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Edited by Å. Skarendahl and Ö. Petersson, Stockholm, Sweden, 1999, pp. 275 – 289
- [68]. CNERIB, Centre National d'Etudes et Recherches Intégrées du Bâtiment, « bétons de sable » Tipaza, Algérie, Décembre 1992.
- [69]. BATATA A. et MEROUANI Z., « Le béton de sable de dune : sa formulation et ses propriétés » séminaire international sur la qualité du béton en climat chaud, Ghardaia, Algérie, Mars 1994.
- [70]. BENAÏSSA A., MORLIER P. et TRAM V., « le béton de sable un matériaux non fissurant » Algérie équipement, N°6, Octobre 1992, p : 7-11.
- [71]. SABLOCRETE, projet national de recherche et développement, « Bétons de sable : caractéristiques et pratiques d'utilisation » presse de l'école nationale des ponts et chaussées, Paris 1994.
- [72]. STAMATOPOLOS A.C. et C.KOTZIAS P., « Concrete without coarse aggregate » ACI Journal, N° 68-60, Septembre 1971.
- [73]. De LARRARD « Structures granulaires et formulation des bétons », Etudes et Recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées, OA34, Paris.

Références Bibliographiques

- [74]. G. GLUAIS et J. P. BRU, « Confortement d'une digue en enrochements par injection de béton de sable ». Bulletin de liaison, laboratoire central des ponts et chaussées, LCPC, N° 183, Paris 1993.
- [75]. Jin J., Domone P.L., Relationships between the fresh properties of SCC and its mortar component, Proceedings of the first North American Conference on the design and use of Self-Consolidating Concrete, Centre for Advanced Cement Based Materials, North Western University, Chicago, November 2002, pp. 33 – 38
- [76]. Domone P.L., Jin J., Properties of mortar for Self-Compacting Concrete, Proceedings of the 1st International Symposium on Self-Compacting Concrete, RILEM Proceedings (PRO 7), Edited by Å. Skarendahl and Ö. Petersson Stockholm, Sweden, 1999, pp. 109 – 120
- [77]. Felekoglu B., Turkel S., Baradan B., Effect of water/cement ratio on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete, Building and Environment, 42, 2007, pp. 1795 – 1802
- [78]. Aiad I., Abd El-Aleem S., El-Didamony H., Effect of delaying addition of some concrete admixtures on the rheological properties of cement pastes, Cement and Concrete Research, 32, 2002, pp. 1839 – 1843
- [79]. Domone, P.L., Jin J., Chai H.W. Optimum mix proportioning of self-compacting concrete, Innovation in Concrete Structures: Design and Construction, Proceeding of creating with concrete, University of Dundee, Dundee, September 1999, pp. 277 – 285
- [80]. Okamura. H., Ozawa K., Self compactable high performance concrete in Japan, ACI, International Workshop on high Performance Concrete, Bangkok, Thailand, 1994
- [81]. Petersson O., Billberg P , Investigation on blocking of self-compacting concrete with different maximum aggregate size and use of viscosity agent instead of filler, Proceedings of the first International RILEM Symposium on Self Compacting Concrete, Edited by Å. Skarendahl and Ö. Petersson, Stockholm, Sweden, 1999, pp. 333 – 344
- [82]. Petersson O., Workability, In Final Report of Task 2, Brite EuRam project BRPR-CT96-0366, Swedish Cement and Concrete Research Institute, 1999, p. 56
- [83]. Boukendakdji O., Etude de l'influence des paramètres de formulation sur les propriétés d'un BAP: Optimisation des conditions opératoires, Thèse de doctorat, Université de Blida, 2010, p. 182
- [84]. Belaidi A.S.E., Contribution à l'étude rhéologique et durabilité des BAP: Apport des ajouts cimentaires ternaires et des fillers locaux et industriels, Thèse de doctorat, Université de Blida, 2013, p. 192

Références Bibliographiques

- [85]. Ngo T.T., Cussigh F., Kadri E.H., Bennacer, R., Duval R., Influence de la formulation des bétons fluides sur leur pompabilité, 25eme rencontre de l'AUGC, Bordeaux, France, 23-25 mai 2007
- [86]. Fang W., Jianxiong C., Changhui Y., Studies on Self-Compacting High Performance Concrete with high volume mineral additives, Proceeding of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete PRO 7, Edited by Å. Skarendahl and Ö. Petersson, Stockholm, Sweden, 1999, pp. 569 – 578
- [87]. Spengler A., Schiessl P., Sand-rich Self Compacting Concrete, Proceedings of 2nd International Symposium on Self-Compacting Concrete, Tokyo, Japan., 2001 pp. 387 – 392,
- [88]. Su J. K., Cho S. W., Yang C. C., Huang R., Effect of sand ratio on the elastic modulus of self-compacting concrete, Journal of Marine Science and Technology, Vol. 10, No. 1, 2002, pp. 8 – 13
- [89]. Miura, N., Takeda, N., Chikamatsu, R., Sogo, S., Application of super workable concrete to reinforced concrete structures with difficult construction conditions, High Performance Concrete in Severe Environments, Ed. P. Zia, SP-140, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., 1993, pp.163 – 186
- [90]. Miyazawa A., Ozawa M., Morimoto H., Experimental study on fine grain sand effect on mortar flow in high--performance concrete, 2nd Int. Symposium on Design, Performance and Use of Self Consolidating Concrete, Editor(s): C. Shi, Z. Yu, K.H. Khayat and P. Yan, China, 2009, pp. 262 – 269
- [91]. Bager D.H., Geiker M.R., Jensen R.M., Rheology of self-compacting mortar: Influence of particle grading. Nordic Concrete Research Publications, 26, 2001, pp. 1 – 16
- [92]. Kiang H.T., Hongjian D., Use of waste glass as sand in mortar; Part I: Fresh, mechanical and durability, Cement and Concrete Composites, 35, 2013, pp. 109 – 117
- [93]. Tobes J.M., Lopez A., Giaccio G., Barragan B.E., Zerbino R., Effect of sand particle size distribution on fluidity and passing ability of highly flowable mortars. 5th International RILEM symposium on SCC, Editors: G. De Shutter and V. Boel, 2007, pp. 163 – 168
- [94]. Al Hozaimy A., Al Neghmeish A., Alawad O.A., Binary and ternary effect of ground dune sand and blast furnace slag on the compressive strength of mortar, Cement and Concrete Composites, 34, 2012, pp. 734 – 738