

UNIVERSITÉ SAAD DAHLEB -BLIDA 1

Faculté de Technologie

Département de Génie Civil

Laboratoire de Géo matériaux et Génie Civil

MEMOIRE DE MASTER

Spécialité: Matériaux en Génie Civil.

**INFLUENCE DU SABLE DE FONDERIE SUR LES
PROPRIÉTÉS DES MORTIERS AUTOPLAÇANTS**

Réalisé par :

CHEREF Khaoula

OURRAG Bakhta

Encadré par :

MENADI Balkacem	Professeur, U de Blida 1	Promoteur
BENSACI Hamza	Docteur, U de Blida 1	Co-promoteur

ملخص

تهدف هذه الدراسة إلى استخدام المخلفات من صناعة المسابك على شكل ركام ناعم في الملاط مرصوص ذاتيًا من بين خصائصه التأثير بواسطة الجاذبية ويتطلب صنعه الكثير من الركام الناعم من أجل الحصول على تناسق وتجانس جيد وفي هذا السياق فإن الجزء الأول يدرس تأثير رمل المسبك عن طريق الاستبدال الجزئي للرمل الطبيعي بنسب مختلفة (0، 5، 10، 20، 30%) على خصائص الملاط مرصوص ذاتيًا في الحالة الطازجة والصلبة. يهتم الجزء الثاني من هذا البحث العلمي بدراسة وتقييم تأثير المضاف الأسمنتي الخبث على سلوك الملاط مرصوص ذاتيًا في الحالة الطازجة والصلبة.

أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها في الجزء الأول من هذه الدراسة التجريبية أن دمج الرمل المسبك في الملاط المرصوص ذاتيًا له تأثير كبير على سلوك الملاط المرصوص ذاتيًا في الحالة الطازجة والصلبة حيث سجل انخفاض في قابلية تشغيل الملاط المرصوص ذاتيًا في الحالة الطازجة من 317 مم إلى 100 مم بزيادة نسب الرمل المسبك من 0% إلى 30% على التوالي، إذا اقتصر الاستبدال الجزئي للرمل الطبيعي بالرمل المسبك على نسبة 10% يتم استقاء متطلبات التوجيهات الأوروبية المتعلقة بقابلية تشغيل الملاط المرصوص ذاتيًا، لوحظ أيضًا زيادة في مقاومة الانضغاط وانخفاض في مقاومة الشد بالانثناء مع زيادة نسبة الرمل المسبك في الملاط المرصوص ذاتيًا من 0% إلى 30%. بالإضافة إلى ذلك يوجد خطر حدوث انخفاض كبير في متانة الملاط عند دمج الرمل المسبك به، يكون هذا التأثير ضئيلاً حتى نسبة 10% من الاستبدال.

أظهر الجزء الثاني من هذه الدراسة التجريبية أن إضافة الخبث يزيد من قابلية تشغيل الملاط المرصوص ذاتيًا و ترتبط النسبة المئوية للخبث المضاف بشكل إيجابي بقابلية تشغيل الملاط المرصوص ذاتيًا في الحالة الطازجة، أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها باستبدال الاسمنت بواسطة الخبث بنسبة 15% تأثيراً سلبياً على قطر انتشار الملاط المرصوص ذاتيًا أي انخفاض قابلية تشغيله قد يرجع السبب وراء ذلك إلى المناخ الحار أثناء الصنع والاختبار.

الكلمات المفتاحية : رمل مسبك ، الملاط المرصوص ذاتيا ، الخبث ، قابلية التشغيل ، المقاومة.

RÉSUMÉ

Cette étude vise à valoriser le déchet de l'industrie de fonderie sous forme des granulats fins dans le mortier autoplaçant (MAP). Parmi les caractéristiques de MAP sa mise en place par l'effet de la gravité. Sa formulation nécessite beaucoup de fines pour avoir une bonne cohérence et homogénéité; dans ce contexte la première partie de cette recherche consiste à étudier l'effet de l'incorporation les granulats de sable de fonderie par substitution partielle du sable naturel à différents pourcentages (0, 5, 10, 20 et 30%), sur les propriétés des MAP à l'état frais et durci. La deuxième partie de ce travail de recherche s'intéresse à l'étude et à l'évaluation de l'effet de l'ajout cimentaire « laitier » sur le comportement des MAP à l'état frais.

Les résultats obtenus dans la première partie de cette étude expérimentale ont montrés que la l'incorporation du sable de fonderie a un effet significatif sur le comportement des mortiers autoplaçants à l'état frais et durci. Ils ont montré une diminution de l'ouvrabilité des MAP de 317 à 100 mm avec l'augmentation du pourcentage du sable de fonderie de 0% à 30% respectivement. Si la substitution de sable par sable de fonderie est limitée à 10%, les exigences des directives européennes relatives à l'ouvrabilité des MAP sont satisfaites. Une augmentation la résistance à la compression et une réduction de la résistance à la traction par flexion est aussi remarquée avec l'augmentation du dosage en sable de fonderie de 0% à 30%. De plus, il existe un risque de réduction significative de la durabilité du mortier lors l'incorporation du sable de fonderie dans le MAP, cet effet devrait être insignifiant jusqu'à 10 % de remplacement.

La deuxième partie de cette étude expérimentale à montré que l'addition de laitier augmente l'ouvrabilité du MAP, le pourcentage de laitier ajouté est corrélé positivement à la maniabilité du MAP. Les résultats du diamètre d'étalement des MAP à base du sable de fonderie obtenus pour un taux substitution du ciment par le laitier de 15% ont montré un effet négatif sur le du diamètre d'étalement des MAP, Cela peut être dû au climat chaud durent la formulation et l'essai.

Mots-clés: Sable de fonderie, laitier, mortier autoplaçant, ouvrabilité, résistance, absorption capillaire.

ABSTRACT

This study aims to study the effect of the waste obtained from the local foundry industry, known as foundry sand in the form of fine aggregates on the properties of self-compacting mortar (SCM). One of the characteristics of SCM, it can be placed into formwork under their own weight without any external vibration and its formulation requires high content of fines to have a good workability and homogeneity. In this context the first part of this thesis is to study the effect of incorporating the fines aggregates of foundry sand as substitution of natural sand at various percentages (5%, 10%, 20% and 30%), on the properties of SCM at the fresh and the hardened state. The second part of this research work is concerned for the evaluation of the effect of slag addition as cement substitution on the behavior of SCM containing foundry sand at the fresh state.

The results obtained in the first part of this experimental study indicate that the incorporation of foundry sand has a significant effect on the behavior of self-compacting mortars in the fresh and hardened state. They showed a decrease in the workability of the SCM from 317 to 100 mm with the increase in the percentage of foundry sand from 0% to 30% respectively. If the substitution of sand by foundry sand is limited to 10%, the requirements of European directives relating to the workability of SCM are met. An increase in compressive strength and a reduction in flexural tensile strength are also noticed with the increase in foundry sand dosage from 0% to 30%. In addition, there is a risk of significantly reducing the durability of the mortar when incorporating foundry sand into the MAP, this effect should be insignificant up to 10% replacement.

The second part of this experimental study showed that the addition of slag increases the workability of SCM, the percentage of added slag correlates positively with the workability of the SCM. The results of the spreading diameter of the SCM based on foundry sand obtained for a cement substitution rate by the slag of 15% showed a negative effect on the spreading diameter of the SCM. This may be due to the hot climate during formulation and testing.

Key words: foundry sand, slag, self-compacting mortar, workability, compressive strength, flexural strength, water capillary absorption.

REMERCIEMENTS

*Nous remercions **ALLAH** qui nous a donné la force et la patience nécessaires pour terminer ce travail.*

Nous exprimons nos sincères remerciements:

*A nos chers **PARENTS** pour leur soutien dans chaque travail que nous avons effectués.*

*A nos encadrant Pr. **MENADI BELKACEM** et Dr. **BENSACI HAMZA** qui nous ont guidé avec leur précieux conseils et suggestions, et la confiance qu'ils nous ont témoigné tout au long de ce travail.*

*Aux **membres de jury** pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail.*

*A Pr **KENAI SAID** Directeur du Laboratoire Géo -matériaux et Génie Civil de l'Université de Blida.*

*Au **Directeur** de l'entreprise **POVAL du Berrouaghua**.*

Enfin, on adresse nos sincères sentiments de gratitude et de reconnaissance à toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Dédicaces

A l'homme, a la femme, qui doit ma vie, ma réussite et tout mon respect

Mes chers parents, ma mère et mon père

Pour leur patience, leur amour, leur soutien et leur encouragement.

*A mon frère **Mohamed** et mes sœurs **Akila** et **Oumaima**.*

*A mes amies **kenza** et **Aicha**.*

Pour leur aides et support dans les moments difficiles.

*A toute **ma famille**.*

A tous mes camarades de promotion 2021.

CHEREF KHAOULA

TABLE DES MATIERES

ملخص	1
RESUME	2
ABSTRACT.....	3
REMERCIEMENTS	4
DÉDICACES.....	5
TABLE DES MATIERES	6
LISTE DES FIGURES	10
LISTE DES TABLEAUX	13
LISTE DES ILLUSTRATIONS ET DES ABREVIATIONS	14
INTRODUCTION GENERALE	15
CHAPITRE 1: ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE	
1.1 Introduction.....	17
1.2 Généralités sur les MAP et BAP.....	17
1.3 Le mortier autoplaçant (MAP).....	18
1.3.1 Définition du mortier autoplaçant (MAP).....	18
1.3.2 Principaux constituants du MAP ou BAP	18
1.3.3 Formulation MAP/BAP.....	19
1.3.4 Les essais de caractérisations des MAP à l'état frais	21

1.4 Le sable de fonderie	23
1.4.1 Introduction	23
1.4.2 Définition du sable de fonderie	23
1.4.3 Procédure de production du sable de fonderie	25
1.4.4 Avantages et inconvénients du sable de fonderie.....	27
1.4.5 Propriétés du sable de fonderie	27
1.4.6 Application du sable de fonderie dans le monde.....	31

CHAPITRE 2: INFLUENCE DU SABLE DE FONDERIE SUR LES PROPRIETES DES MORTIERS ET BETONS AUTOPLACANTS

2.1 Introduction.....	32
2.2 Utilisation de sable de fonderie dans la confection du MAP et BAP	32
2.3 Effet de sable de fonderie sur les propriétés des MAP et BAP à l'état frais	32
2.3.1 Ouvrabilité	32
2.3.2 Rhéologie.....	38
2.4 Effet de sable de fonderie sur les propriétés des MAP et BAP à l'état durci	39
2.4.1 Propriétés mécaniques	39
2.4.2 Propriétés de durabilité.....	47
2.5 conclusion.....	50

CHAPITRE 3: MATERIAUX ET ESSAIS

3.1 Introduction.....	51
3.2 Caractéristiques des matériaux	51

3.2.1 Ciment	51
3.2.2 Laitier	52
3.2.3 Sable	52
3.2.4 Superplastifiant	54
3.2.5 Eau de gâchage.....	55
3.3 Formulation du mortier autoplaçant	55
3.4 Essais réalisé sur le MAP.....	56
3.4.1 Essais à l'état frais	56
3.4.2 Essais à l'état durci.....	57
3.4.3 Essais de durabilité.....	58
3.5 Récapitulatif des essais réalisés	60
 CHAPITRE 4 : RESULTATS ET DISCUSSION	
4.1 Introduction.....	62
4.2 Optimisation de dosage du superplastifiant.....	62
4.3 Effet de sable de fonderie sur les propriétés des MAP à l'état frais.....	64
4.3.1 Ouvrabilité	64
4.4 Effet de sable de fonderie sur les propriétés mécaniques des MAP à l'état durci.....	67
4.4.1 Résistance à la compression	68
4.4.2 Résistance à la traction par flexion	68
4.4.3 Corrélation entre la résistance à la compression et la traction par flexion.....	69

4.5 Effet de sable de fonderie sur la durabilité des MAP à l'état durci	70
4.5.1 Absorption capillaire	70
4.6 Amélioration des propriétés des MAP à base de sable de fonderie par l'ajout cimentaire (laitier).....	72
4.6.1 Effet du laitier sur l'ouvrabilité des MAP à l'état frais	72
4.6.2 Effet du laitier sur les résistances mécaniques des MAP à l'état durci	75
4.7 conclusion	76
CONCLUSION GENERALE	78
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	79
ANNEXE A : EXEMPLE DE CALCULE DE LA COMPOSITION DU MORTIER	84
ANNEXE B : EXEMPLE DES RESULTATS DES ESSAIS SUR LE MORTIER	86

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1: Constituants des mortiers et des bétons.....	18
Figure 1.2: Constituants des bétons ordinaires et des bétons autoplaçants	19
Figure 1.3: Cône pour mesurer l'étalement des mortiers.....	22
Figure 1.4: V- funnel pour mesurer le temps d'écoulement des mortiers	23
Figure 1.5: Apparence de sable de fonderie	24
Figure 1.6: Apparence de sable de fonderie usé	24
Figure 1.7: Morphologie de sable de fonderie (SFU)	24
Figure 1.8: Moulage au sable.....	25
Figure 2.1: Effet de sable de fonderie sur la fluidité des mortiers.....	33
Figure 2.2: Ouvrabilité des MAP étudiés par substitution de sable.....	33
Figure 2.3: Ouvrabilité des BAP étudiés par substitution de sable	34
Figure 2.4: Influence de la variation de la quantité de sable de fonderie et la quantité d'eau sur l'étalement.....	36
Figure 2.5: Influence de la variation de la quantité de sable de fonderie et la quantité d'eau sur le temps d'écoulement en T 500	37
Figure 2.6: Influence de la variation de la quantité de sable de fonderie et la quantité d'eau sur le temps d'écoulement en v-funnel.....	38
Figure 2.7: Résultats des essais de résistance à la flexion (a) à la compression (b)	40
Figure 2.8: Développement de la résistance mécanique des mortiers autoplaçants étudiés (a) flexion (b) compression.....	41

Figure 2.9: Résistance à la compression à 7(a), 28 (b) et 90(c) jours.....	42
Figure 2.10: Résistance à la compression des BAP a différents âges.....	43
Figure 2.11: Variation de la résistance à la compression des BAP a différents âges	44
Figure 2.12: Résistance à la traction par fendage des mélanges des BAP.....	45
Figure 2.13: Variation de résistance à la traction par fendage des BAP a différents âges ..	46
Figure 2.14: Module d'élasticité en fonction du sable de fonderie utilisé.....	47
Figure 2.15: Résultats d'absorption d'eau et perméabilité à l'eau à 7, 28 et 90 jours	48
Figure 2.16: Perméabilité aux ions chlorures (RCP) à 28(a) et 90(b) jours	49
Figure 2.17: Influence du gel-dégel sur la résistance à la compression et l'élasticité.....	50
Figure 3.1: Échantillons de laitier d El'Hadjar	52
Figure 3.2: Échantillon des différents sables : sable corrigé, sable de Baghlia, sable boughzoul et sable de fonderie	53
Figure 3.3: Courbes granulométriques des sables utilisés	53
Figure 3.4: Superplastifiant.....	54
Figure 3.5: Séquence malaxage de mortier autoplaçant	55
Figure 3.6: Essai d'Etallement pour Mortier	56
Figure 3.7: Essai V- funnel pour mortier autoplaçant	57
Figure 3.8: Essai de la résistance a la compression	57
Figure 3.9: Essai de la résistance a la traction par flexion.....	58
Figure 3.10: Dispositif expérimentale de mesure d'absorption capillaire d'eau	59
Figure 3.11: Organigramme de la procédure expérimentale	61

Figure 4.1: Variation d'étalement en fonction de dosage en SP.....	63
Figure 4.2: Variation de temps d'écoulement en fonction de dosage en SP	64
Figure 4.3: Effet de l'incorporation du sable de fonderie dans le MAP sur le diamètre d'étalement.....	65
Figure 4.4: Effet de l'incorporation du sable de fonderie dans le MAP sur l'étalement	66
Figure 4.5: Effet de l'incorporation du sable de fonderie dans le MAP sur le temps d'écoulement.....	67
Figure 4.6: Effet de l'incorporation du sable de fonderie dans le MAP sur la résistance à la compression à 28 jours	68
Figure 4.7: Effet de l'incorporation du sable de fonderie dans le MAP sur la résistance à la flexion à 28 jours	69
Figure 4.8: Corrélation entre la résistance à la compression et la résistance à la flexion....	70
Figure 4.9: Effet de l'incorporation du sable de fonderie dans le MAP sur l'absorption capillaire à 90 jours.....	71
Figure 4.10: Sorptivité des grands pores des MAP en fonction de taux de substitution sable naturel par sable de fonderie à 90 jours	71
Figure 4.11: Effet du laitier sur le diamètre d'étalement du mortier témoin.....	73
Figure 4.12: Effet de l'incorporation du laitier dans le mortier témoin sur l'étalement.....	74
Figure 4.13: Effet du laitier sur le diamètre l'étalement des MAP à base du sable de fonderie	74
Figure 4.14: Effet du laitier sur la résistance à la compression des MAP à base du sable de fonderie	75
Figure 4.15: Effet du laitier sur la résistance à la traction par flexion des MAP à base du sable de fonderie	76

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1: Propriétés de sable de fonderie selon différents auteurs.....	29
Tableau 1.2: Propriétés chimiques de sable de fonderie selon différents auteurs	30
Tableau 2.1: Propriétés frais des BAP	35
Tableau 2.2: Propriétés des mélanges de béton autoplaçant à l'état frais.....	39
Tableau 2.3: Propriétés des mélanges de béton autoplaçant à l'état durci	46
Tableau 3.1: Analyse chimique et Minéralogiques de ciment.....	51
Tableau 3.2: Caractéristiques physiques et mécaniques du ciment	51
Tableau 3.3: Composition chimique de laitier.....	52
Tableau 3.4: Composition physique de laitier	52
Tableau 3.5: Caractéristiques physiques et mécaniques des sables.....	54
Tableau 3.6: Caractéristiques du superplastifiant.....	54
Tableau 4.1: Composition des MAP en fonction du dosage en SP	62
Tableau 4.2: Composition des MAP à base de sable de fonderie.....	65
Tableau 4.3: Composition des MAP à base de laitier.....	72

LISTE DES SYMBOLES ET DES ABREVIATIONS

BAP	Béton autoplaçant
MAP	Mortier autoplaçant
BO	Béton ordinaire
LCPC	Laboratoire central des ponts et chaussés
E/C	Eau/Ciment
SP	Superplastifiant
SCC	Self-Compacting Concrete
SCM	Self-Compacting Mortar
G/S	Gravier/sable
Rp	L'étalement relatif
d	Diamètre d'étalement moyen de la galette de pâte.
SFU	Sable de fonderie usé
SF	Sable de fonderie
WFS	Waste foundry sand
VMA	Viscosity modifying agent
RCP	Rapid Chloride Permeability
FA	Fly ash

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

La demande croissante des chantiers en matières premières épuise les ressources naturelles en matériaux. En plus, les distances de transport posent des problèmes de compétitivité évidents, aussi à réglementation de plus en plus sévère vis-à-vis de l'ouverture de nouvelles carrières, sont des raisons parmi d'autres, qui ont poussé les scientifiques et industriels à conjuguer leurs efforts, pour trouver de nouvelles sources de matières premières. Il convient par conséquent d'optimiser l'utilisation des matériaux standards et surtout les matériaux alternatifs qui sont les sous-produits industriels, dans une optique d'écologie industrielle.

Parmi ces déchets, la fumées de silice, le laitier granulé de haut fourneau, les cendres volantes, ...etc. Ces déchets peuvent être incorporés dans le béton comme ajout minéral ou granulats fin, afin d'améliorer certaines propriétés à l'état frais ou durci. Cependant, il existe d'autres types de déchets qui nécessitent d'être recyclés, à savoir les sables de fonderie. Les sables de fonderie sont des sous-produits de l'industrie de la fonderie. Ce sable peut être recyclé mais le nombre de réutilisation de celui-ci est limité. Quand le sable n'est plus réutilisable pour l'industrie de la fonderie, il est mis en décharge. A ce stade là, il est concédé comme une matière première d'un coût assez faible pour la fabrication des bétons.

Le but de cette étude est de voir la possibilité de réutiliser le sable de fonderie (POVAL Berrouaghia) en tant que sable pour produire du mortier autoplaçant. Ce travail présente une étude expérimentale sur la formulation et la caractérisation physico-mécanique des mortiers autoplaçants à base de ce type de déchet. Cette étude expérimentale a été réalisée pour évaluer les propriétés à l'état frais et durci des mortiers autoplaçants (MAP). Nous nous intéressons dans la première partie à étudier l'effet de l'incorporation des granulats de sable de fonderie par substitution de sable naturel à différents pourcentages sur les propriétés des MAP à l'état frais et durci. La deuxième partie s'intéresse à l'amélioration des propriétés des MAP à base de sable de fonderie par l'ajout cimentaire "laitier d'El hadjar" comme substitution du ciment.

Notre mémoire est décomposée en quatre chapitres dont le premier chapitre présente l'étude bibliographique sur les mortiers et bétons autoplaçants et le sable de fonderie. Le deuxième est dédié à l'étude de l'influence du sable de fonderie sur les propriétés des mortiers autoplaçants.

Le troisième chapitre présente la caractérisation des matériaux utilisés, à savoir les caractéristiques chimiques, physiques et mécaniques des matériaux utilisés (ciment, sable de fonderie, sable ordinaire, laitier et superplastifiant), le quatrième présente les résultats des différents essais et l'interprétation des résultats.

Enfin, une conclusion générale qui regroupe les principaux résultats obtenus de cette étude expérimentale.

CHAPITRE1
ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE 1: ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

1.1 Introduction

Le premier chapitre est consacré à l'étude bibliographique, nous allons essayer de faire une description générale issue de notre recherche sur toutes les principales notions à traiter dans notre étude. Les propriétés de mortier et béton autoplaçant des différents types de sables utilisés dans le domaine de construction en génie civil seront présentées. Nous allons également donner un aperçu sur les mortiers et bétons autoplaçants; notamment leurs différents types et leurs principales caractéristiques.

1.2 Généralités sur les MAP et BAP

Les mortiers autoplaçants sont comme les bétons autoplaçants, à la différence des mortiers ordinaires, ce sont des mortiers très fluides qui remplissent des moules complexes sans l'aide de moyens de compactage ou de vibration. La mise en œuvre s'effectue par le seul effet du poids du mortier [1]. La grande majorité des méthodes de formulation utilisées pour béton et mortier autoplaçant ne sont pas directement applicables. Quel que soit la méthode de formulation utilisée, un mélange de béton et mortier autoplaçant doit se conformer à quelques exigences particulières. Grace à leur formulation, il offre des caractéristiques exceptionnelles d'écoulement et de remplissage des coffrages tout en résistant parfaitement à la ségrégation. Ils présentent des résistances et une durabilité analogue à celle des bétons traditionnels dont ils se différencient par leurs propriétés à l'état frais.

La rhéologie du béton frais est autant reliée à la composition de la pâte de ciment qu'à celle du mélange de bétons lui-même, l'un des avantages des bétons autoplaçants sera d'améliorer la maniabilité du mélange qui peut être évaluée par la mesure du diamètre d'étalement du béton afin qu'il puisse remplir facilement les coffrages sans utiliser un moyen de vibration. Cette mobilité peut être réalisée dans un milieu non confiné (décrite par l'essai d'étalement) et dans un milieu confiné (décrite par l'essai à la boîte en L).

La qualité de matériau autoplaçant confère au béton plusieurs avantages techniques et socio-économiques par rapport au béton ordinaire:

- Facilité et rapidité dans la mise en œuvre du béton.
- Amélioration de la qualité des parements et de l'enrobage des aciers.
- Meilleur enrobage des armatures.

- Réalisation de formes complexes.
- Suppression de la vibration: amélioration des conditions de travail des compagnons (santé et sécurité).
- Coulage dans un milieu fortement ferrillés avec une capacité de remplir tous les coins.

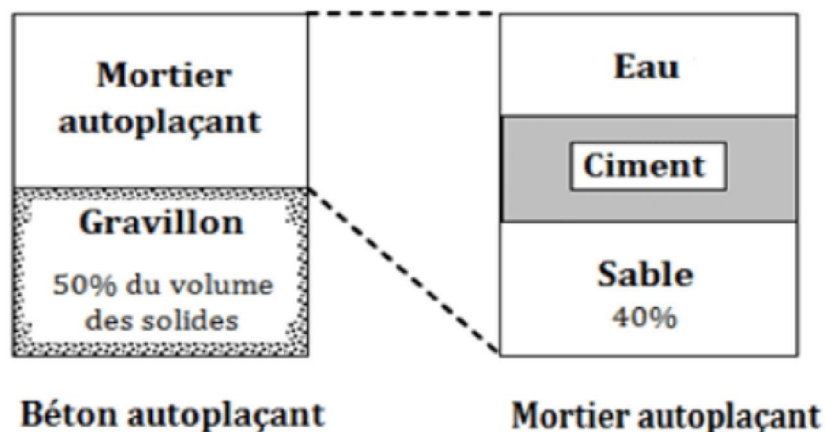


Figure 1.1: Constituants des mortiers et des bétons autoplaçants.

1.3 Le mortier autoplaçant (MAP)

1.3.1 Définition du mortier autoplaçant (MAP)

Le mortier est l'un des matériaux de construction que l'on utilise pour solidariser les éléments entre eux, assurer la stabilité de l'ouvrage, combler les interstices entre les blocs de construction. En général le mortier est le résultat d'un mélange de sable, d'un liant (ciment) et d'eau dans des proportions données, se différenciant selon les réalisations et de superplastifiant [2]. Dans cette partie, nous présenterons les différents types des mortiers autoplaçants ainsi que leurs propriétés principales, notamment l'ouvrabilité et les propriétés mécaniques et de durabilité.

1.3.2 Principaux constituants du MAP/BAP

Les constituants utilisés dans la formulation des bétons autoplaçants sont les mêmes pour les bétons ordinaires, mais différents en proportions et en nombre par deux éléments supplémentaires comme il est montré sur la figure 1.2.

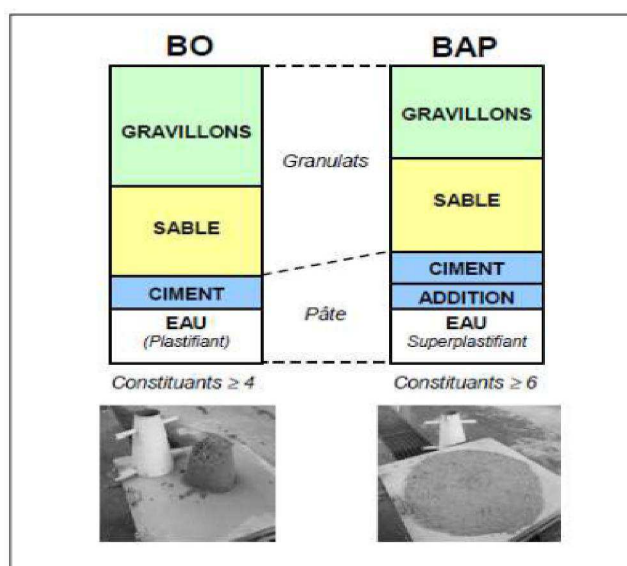


Figure 1.2 : Constituants des bétons ordinaires et des bétons autoplacants [3].

Toutefois, certains points restent à contrôler dans l'utilisation du BAP, la formulation des BAP implique un dosage délicat des matières premières tel que (ciment, adjuvant et des différentes additions minérales). Il faut aussi noter l'augmentation du coût des matières premières, par la présence des nouveaux adjuvants. La fluidité des BAP nécessite des coffrages étanches, de plus, il y a risque de non compatibilité des matériaux.

1.3.3 Formulation MAP/BAP

Dans la littérature différentes méthodes de formulation du MAP ou BAP peuvent être utilisées pour déterminer les proportions des différents constituants du MAP ou BAP:

1. Méthode d'Okamura :

La formulation des BAP par l'approche japonaise est développée à l'université de Kochi au Japon par Okamura et al. [4], elle se fait de manière sécuritaire, en privilégiant le volume de pâte au détriment des granulats. Cette méthode de formulation est à la fois forfaitaire pour les dosages des granulats et expérimentale pour le dosage en eau et en adjuvant. Pour formuler un BAP par cette méthode baptisée « méthode japonaise », on doit passer par les étapes suivantes :

- a) Choix du dosage en ciment : La quantité du ciment dépend du cahier des charges et des performances désirées (résistance, durabilité...).
- b) Désignation du volume d'air : Le volume d'air occlus est pris égal à 2 %.
- c) Détermination du dosage du sable : Le volume de sable est posé forfaitairement égal à 40% du volume du mortier.

d) Détermination du dosage minimal en eau : La demande en eau passe par la conception de la composition de la pâte. En effet des essais d'étalement au mini-cône sont réalisés en faisant varier le rapport Eau/Liant avec le dosage choisi en liant.

En traçant la courbe d'Eau/Liant en fonction de l'étalement relatif « Rp » (équation.1), on détermine le point d'intersection avec l'axe des ordonnées « βP » qui permet de déterminer le besoin en eau minimale nécessaire pour le ciment et les additions minérales [4].

$$Rp = \frac{d^2 - 100^2}{100^2} = \left(\frac{d}{100}\right)^2 - 1 \quad (1.1)$$

Avec « Rp » l'étalement relatif et « d » le diamètre d'étalement moyen de la galette de pâte.

2. L'approche suédoise

La méthode suédoise est basée sur le principe de fluidité dans un milieu confiné. En fait ils ont repris l'approche d'évaluation du risque de blocage et l'ont intégré dans le processus de formulation. Ils estiment pour un confinement donné et pour chaque rapport G/S, le volume de la pâte critique pour le blocage. Le rapport G/S final est celui qui donne le même volume de pâte pour avoir les propriétés recherchées.

Les fines, l'eau et le superplastifiant sont ajustés par la suite pour obtenir une viscosité suffisante, un faible seuil de cisaillement et la résistance à la compression visée. Cette méthode propose une meilleure optimisation du squelette granulaire, mais le critère de blocage n'est pas général pour tout type de granulat [3].

3. Méthode Française (LCPC) :

Proposée par De Larrard et al [5] Au LCPC, un modèle mathématique a été développé à partir d'un modèle de suspension solide (RENE LCPC). Ce modèle est basé sur les interactions granulaires entre les différents constituants du mélange. Il permet de prévoir la compacité d'un mélange granulaire entre les différents constituants du mélange. Il permet de prévoir la compacité d'un mélange granulaire avec une précision inférieure à 1% à partir des constituants ci-après :

- Les distributions granulaires
- Les proportions du mélange
- La compacité propre

- La densité apparente

La procédure à adopter pour déterminer les proportions des divers constituants est la suivante:

- ◆ La proportion du liant est fixée à priori (70% du ciment, 30% d'addition par exemple).
- ◆ Le dosage, à saturation, du superplastifiant est déterminé. Selon l'expérience du LCPC, ce dosage pourrait conférer au béton une viscosité élevée, la moitié de ce dosage serait plus pertinente.
- ◆ Le besoin en eau de ce mélange (en présence de superplastifiant) est déterminé.
- ◆ Les calculs sont effectués avec le logiciel en tenant compte du confinement (effet de paroi).

La viscosité est fixée de manière arbitraire à 5.104. La teneur en eau est réduite en conséquence et la proportion liant/filler est maintenue constante. Les proportions granulats /phase liante sont optimisées.

Une formulation de béton autoplaçant est donc proposée basée sur les prévisions du modèle. La teneur en eau ajustée pour obtenir la résistance ciblée. Le dosage en superplastifiant est ajusté également afin d'obtenir d'étalement et le seuil de cisaillement souhaités et par conséquent les propriétés requises pour le béton autoplaçant sont atteintes.

1.3.4 Les essais de caractérisations des MAP à l'état frais

- Fluidité et déformabilité de MAP :

La déformabilité du mortier est définie comme étant la capacité de mortier de subir un changement de forme sous son propre poids. La déformabilité élevée est exigée de sorte que le mortier autoplaçant Afin d'obtenir une déformabilité adéquate, il est important de réduire au minimum le frottement inter sable du mélange. La réduction de la quantité du gros sable et l'augmentation du volume de pâte sont exigées pour obtenir la déformabilité désirée des MAP. Une autre manière de réduire le frottement inter sable est obtenu avec l'incorporation d'additions minérales telles que les fillers [6].

La déformabilité du béton est directement liée à la déformabilité de la pâte. Pour augmenter la déformabilité de la pâte et réduire le frottement inter sable, des superplastifiants hauts réducteurs d'eau sont incorporés dans les mélanges des MAP. Ces SPRE permettent de maintenir un rapport eau-matières cimentaires relativement bas tandis que la fluidité reste élevée. La déformabilité de la pâte est augmentée aussi en réduisant la viscosité. Un mortier fortement fluide peut être obtenu sans réduction significative de sa

cohésion en améliorant sa résistance à la ségrégation [6]. En général, le critère de fluidité-stabilité est assez difficile à résoudre, mais, au moyen d'agents colloïdaux, de teneurs élevées en ajouts minéraux ou de teneurs appropriés en sable, la stabilité et la déformabilité peuvent être assurées.

➤ Essais de l'étalement au Mini cône de mortier

La recommandation EFNARC [1] impose que l'étalement du mortier autoplaçant soit compris entre 27 cm et 33 cm. La fluidité est contrôlée par la mesure de l'étalement d'un tronc de cône de mortier ayant pour dimensions : 6 cm de hauteur, 7 cm de diamètre intérieur en partie supérieure et 10 cm de diamètre intérieur à sa base. L'étalement est la moyenne de deux diamètres perpendiculaires. Cette mesure permet de contrôler que le mortier est suffisamment fluide pour être mis en œuvre. Cependant, les résultats de l'étalement des mélanges des MAP sont basés sur les plages recommandées par Domone et al. [7].

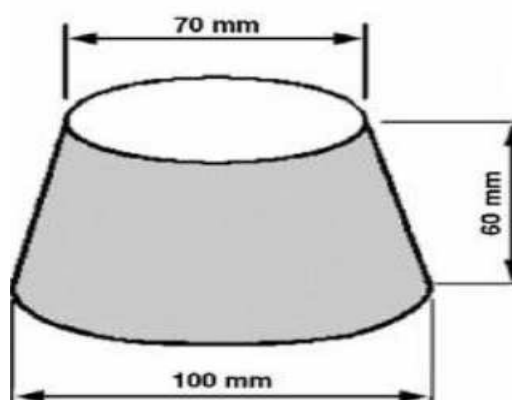


Figure 1.3 : Cône pour mesurer l'étalement des mortiers.

➤ Essais de déformabilité de l'Entonnoir en V (V-funnel) :

L'essai d'écoulement à l'entonnoir (ou V-funnel test) est utilisé pour évaluer la fluidité et la viscosité des MAP. Un entonnoir de dimensions définies est rempli de mortier jusqu'en haut. Le clapet de fermeture situé à sa base est ensuite ouvert, on mesure le temps (T_v) que met le mortier à sortir de l'entonnoir jusqu'à ce que cet entonnoir soit entièrement vide. Ce temps d'écoulement, qui doit être compris entre 2 et 10 secondes, caractérise la viscosité du mortier. Si le mortier s'écoule plus rapidement, c'est que sa viscosité est trop faible [8].

Bien que l'essai soit conçu pour mesurer la fluidité, le résultat est affecté par d'autres propriétés du MAP que celle de l'écoulement. La forme de cône inversée fera bloquer

l'écoulement du mortier si, par exemple il y a trop gros granulat. Par contre un temps élevé d'écoulement peut être associé à une faible déformabilité due à une viscosité élevée de la pâte et ou un frottement inter-granulaire élevé. L'EFNARC [1] définit deux classes de viscosité selon le temps d'écoulement mesuré à l'entonnoir (V-funnel) : $T_v \leq 6$ secondes, pour une bonne capacité de remplissage même avec des renforts denses et $9 \leq T_v \leq 25$ pour les autres cas.

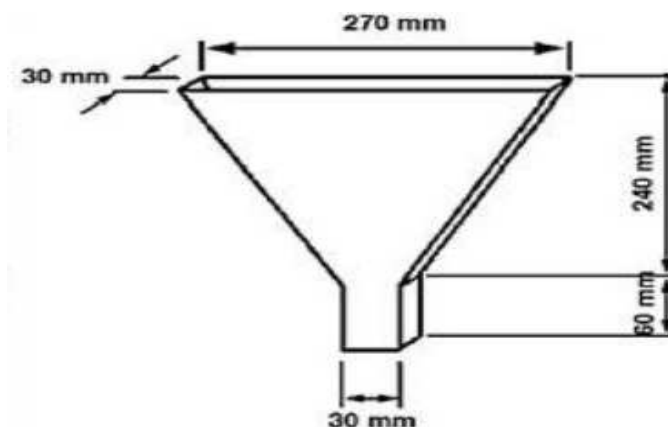


Figure 1.4 : V- funnel pour mesurer le temps d'écoulement des mortiers.

1.4 Le sable de fonderie

1.4.1 Introduction

Dans les fonderies, le sable est réutilisé à plusieurs reprises jusqu'à ce qu'il ne soit plus acceptable comme moule de coulée et soit transporté pour être éliminé dans des décharges [9] Des quantités importantes de sable de fonderie sont donc produites chaque année, dont la majorité ont fini dans des décharges.[10] L'utilisation de sable de fonderie usé dans domaine de la construction serait donc un pas en avant vers la durabilité. Cela réduira non seulement les coûts de mise en décharge et les préoccupations environnementales associées à ces déchets, mais contribuera également à minimiser la consommation de sable naturelle ainsi que les empreintes carbone dans les projets de construction [11].

1.4.2 Définition du sable de fonderie

Les sables de fonderie sont des sous-produits de l'industrie de la fonderie, Il est utilisé depuis des siècles comme matériau de moulage en raison de sa conductivité thermique pour confectionner des moules et des noyaux dans lesquels sont coulés les

métaux en fusion, les fonderies utilisent un sable fin siliceux associé à d'autres matériaux tels que l'argile ou des liants organiques (figure 1.5), ce sable peut être recyclé mais le nombre de réutilisations de celui-ci est limité et dans ce cas-là il est considéré comme un déchet (Figure 1.6) (Figure 1.7) et une matière première d'un coût assez faible pour la fabrication des bétons hydrauliques [12].



Figure 1.5: Apparence de sable de fonderie.

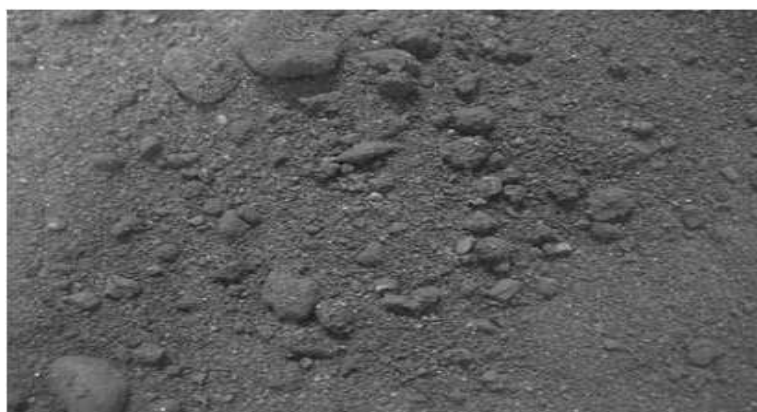


Figure 1.6 : Apparence de sable de fonderie usé [13].

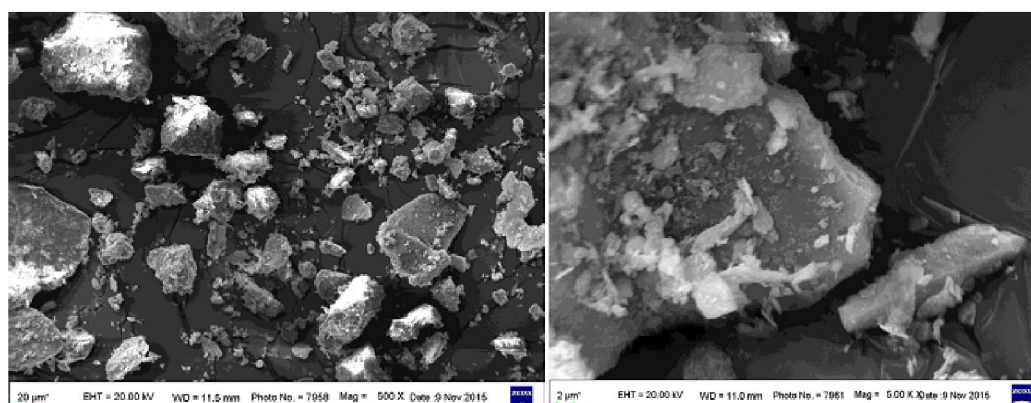


Figure 1.7: Morphologie de sable de fondrie (SFU) [14].

1.4.3 Procédure de production des pièces de fonderie avec le moulage au sable

La fonderie consiste à couler un métal ou un alliage liquide dans un moule afin de reproduire une pièce dans ses formes intérieures et extérieures, en limitant autant que faire se peut les travaux de finition après refroidissement. Ce procédé de formage des métaux est utilisé dans de nombreux secteurs, les techniques utilisées dépendent du matériau, des dimensions et des caractéristiques géométriques de la pièce à obtenir, et des quantités à produire. Cependant quelque soit le procédé employé, les pièces issues de moulage suivent les mêmes règles de tracé.

Le système de moulage au sable est le processus de coulage le plus commun utilisé et l'un des plus anciens processus métallurgiques dans l'industrie de la fonderie, Le moulage au sable est un procédé de fonderie qui utilise une empreinte réalisée dans du sable dont la composition le rend à la fois facile à mouler et suffisamment figé pour pouvoir y couler le matériau fondu. Il convient pour des matériaux de fonderie dont le point de fusion est élevé type fonte et acier. Ce sont souvent des petites séries, des prototypes ou des pièces de grandes dimensions. Le moule comporte les châssis qui contiennent le sable, le sable + ses additifs, l'empreinte créée à partir du modèle et de noyaux, le modèle ou plaque modèle, les noyaux pour le moulage au sable, il existe plusieurs types de sables: si la silice est le plus répandu de par son faible coût, on trouve également d'autres sables aux caractéristiques variées et adaptées au type de pièces (matériau, forme et résistance), ainsi il est fréquent de trouver des sables complexes types chromite, zircon ou kerpahlite. [15].



Figure 1.8 : Moulage au sable.

Il existe principalement dans le processus de moulage au sable six étapes :

- La fabrication des moules :

La première partie consiste à concevoir et préparer les moules. Les moules sont faits de sable compacté à l'intérieur d'un moule selon un modèle (qui suit la forme extérieure de votre pièce). La conception d'un moule de sable peut être très simple ou très complexe, selon les spécifications du projet. Il y a souvent des composantes conçues pour prendre place à l'intérieur d'une pièce ou des noyaux uniques caractéristiques à la coulée. Le temps requis pour concevoir et préparer les moules dépend de la complexité de la coulée. Les moules sont souvent chauffés ou cuits au four avant l'ajout des métaux en fusion.

- Le serrage :

Une fois que le moule de fonte initial en sable est fait et préparé, il est temps d'ajouter le métal fondu. À ce stade, un lubrifiant est ajouté afin de faciliter le retrait de la coulée finale. Une fois lubrifié, des carottes sont ajoutées au moule, mises en place et fixées. Le moule est mis en serres très étroitement pour s'assurer qu'aucune matière ne puisse s'en échapper.

- La coulée :

La coulée est assez simple : le métal fondu est coulé dans le moule de sable. Le métal fondu doit être maintenu à une température constante et versé adéquatement pour remplir le moule et tous ses coins et racoins. La durée du remplissage est généralement assez rapide, car la température peut chuter rapidement, causant ainsi la solidification d'une ou plusieurs parties du moule avant les autres.

- Le refroidissement :

Le refroidissement est une étape importante pour la qualité de la finition de la coulée. Selon l'épaisseur de la fonte et la température de la matière, temps de refroidissement peut varier. Il est important d'assurer un refroidissement complet et adéquat, puisque celui-ci affectera la qualité du produit fini. Un refroidissement trop rapide peut entraîner un rétrécissement des pièces, des fissures ou des pièces incomplètes; il est donc essentiel d'avoir un environnement de refroidissement contrôlé.

- Le démoulage :

Retirer la pièce coulée du moule se fait généralement en brisant le moule. Ce processus s'appelle «shakeout» et est habituellement fait à l'aide d'une machine spéciale qui vibre et enlève le sable et la coulée du moule. Une fois enlevé, le morceau de fonte est souvent grenailé pour enlever toute oxydation ou sable sur la surface interne.

- La finition :

Parce qu'il existe des canaux à l'intérieur du moule, il y aura du matériel excédentaire rattaché à la pièce finie qu'il faut enlever. À l'aide d'une presse de parage, d'une scie ou d'autres méthodes de coupe, tout matériel supplémentaire pourra être enlevé. Selon le type de coulée, cela peut être très rapide ou prendre plus de temps.

- Avantages et inconvénients du moulage en sable :

- Faibles coûts d'outillage et faible investissement en capital
- Les cœurs permettent une grande variété de formes à mouler
- Approprié pour les pièces de grande taille
- Des économies substantielles pour les moulages à usage unique utilisant du polystyrène [16].

1.4.4 Avantages et inconvénients du sable de fonderie

- Avantages :

1. Processus de fabrication simple : le processus de production du moulage au sable vert est une comparaison très simple, donc facile à manipuler. Les matériaux sont simples et facilement accessibles.

2. Coûts de production réduits : étant donné que les matériaux sont simples et que les prix sont relativement bas, la production de moulage au sable vert est faible, Par conséquent, les moulages en sable vert sont moins chers que la résine de moulage au sable et la coque de moulage.

- Inconvénients :

1. Plus de défauts de coulée : la moisissure verte du sable est une sorte de mildiou, mais pas aussi dur que les moules à sable et les coquilles de résine coulée. Que de défauts de coulée tels que les déchets de sable, les trous dans le sable, les trous d'air et les retraits.

2. Qualité de la surface rugueuse : les surfaces du processus du moulage au sable vert sont très rugueuses et épaisses.

1.4.5 Propriétés du sable de fonderie

- Propriétés physiques

Le sable de fonderie est de forme sous-angulaire à ronde [17]. Comme le sable ordinaire, le sable de fonderie se compose également principalement de silice, mais sa teneur en silice s'est avérée inférieure à celle du sable ordinaire. Selon le secteur industriel

dont il est issu, le type de procédé de coulée, le type d'additifs utilisés pour le moulage, le nombre de fois que le sable est recyclé et le type et la quantité de liant utilisé, ses caractéristiques physiques et chimiques peuvent varier [18]. Environ 85-90% de ses particules sont inférieures à 100 μm . Il est principalement constitué de sable comme en témoigne la granulométrie (0,05-2 mm) du sable de fonderie, obtenu auprès de 39 fonderies, allant de 76,6 % à 100 %, avec une médiane de 90,3 % [19]. Puisqu'il s'agit essentiellement d'agrégats fins, on peut s'attendre à ce qu'il soit utilisé dans de nombreuses applications comme substitut du sable naturel [20].

Cependant, le sable de fonderie est trop fin pour être utilisé en remplacement complet du sable ordinaire. Le module de finesse du sable de fonderie a été trouvé dans la plage de 0,9 à 1,6 par rapport à 2,3 à 3,1 pour le sable normal. Selon la distribution granulométrique du sable de fonderie, la taille correspondant à 50 % du passage (d_{50}) était d'environ 33 μm et le diamètre moyen des particules de sable de fonderie était de 28,8 μm [21,22]. La distribution granulométrique du sable de fonderie est très uniforme, avec environ 85 à 95 % du matériau entre 0,6 mm et 0,15 mm de taille de tamis [30].

Alors que 5 à 12 pour cent du sable de fonderie peut être inférieur à 0,075 mm [23]. La forme des particules est généralement sous-angulaire à ronde et ne répond pas aux exigences de gradation pour les agrégats fins selon la norme ASTM C33 [24]. Par conséquent, seul un remplacement partiel par du sable plus grossier est recommandé pour répondre aux spécifications standard des granulats fins [23]. Les résultats de l'analyse par tamisage de sable de fonderie tel que rapporté par divers auteurs [25-26] par rapport à l'ASTM C33 [24] montre les limites supérieure et inférieure (UL et LL) pour les granulats fins [27].

Les valeurs rapportées d'absorption de sable de fonderie varient considérablement, généralement sur la face supérieure du sable normal, ce qui peut être attribué à la présence de liants et d'additifs. La densité du sable de fonderie varie de 2,39 à 2,55 [28]. Cette variabilité a été attribuée à la variabilité des fines et des teneurs en additifs dans différents échantillons [23]. Plusieurs fonderies utilisent encore des liants tels que l'argile, la sciure de bois et la farine de bois pour le moulage. La présence de ces particules réduit la densité spécifique du matériau et diminue également la densité du béton en créant des vides d'air dans le béton. Le tableau 1.1 montre certaines propriétés physiques des sable de fonderie utilisées par différents auteurs [21, 24,29-30] pour leurs études de recherche [27].

Tableau 1.1 : Propriétés de sable de fonderie selon différents auteurs [27].

Authors	Naik et al. [29]	Guney et al. [31]	Siddique et al. [21]	Naik et al. [25]	Singh and Siddique [32]	Prabhu et al. [30]
Specific gravity	2.79	2.45	2.61	1.97	2.18	224
Density (kg/m ³)	1784	-	1638	1538	-	1576
Fineness modulus	2.32	-	1.78	132	1.89	-
Water absorption(%)	5	-	1.3	320	0.42	1.13
Partical bellow(75µm) %	1.08	24	18	5490	8	8
Moisture content(%)	-	3.25	-	-	0.11	-
Clay lumps and friable particles	0.40	-	0.90	-	0.80	-
- test not performed for the specific property						

- **Composition chimique**

Selon le type de métal, le type de liant et de combustible utilisé, la composition chimique des déchets de sable de fonderie peut varier et elle influe sur leurs performances. Les sables obtenus à partir d'une seule fonderie, cependant, peuvent ne pas montrer de variation significative avec le temps. En plus, les sables mélangés produits par des consortiums de fonderies produisent souvent des sables avec toujours la même composition. [27].

Les déchets de sable de fonderie sont riches en silice et sont recouverts d'un film mince de carbone brûlé, de poussière et de liant résiduel tel que la bentonite, le charbon marin ou des produits chimiques ou des résines. En raison de la présence de silice, il est hydrophile, ce qui lui permet d'attirer l'eau à sa surface [33]. Généralement, la teneur en silice du sable de fonderie est inférieure à celle du sable ordinaire en raison de la présence d'additifs [33]. La composition chimique du sable de fonderie telle que rapportée par divers chercheurs [26,33-34] est donnée dans Tableau 1.2.

Tableau 1.2 : Propriétés chimiques de sable de fonderie selon des différents auteurs [30].

Constituants	American Foundrymen's society [35]	Etxeberria et al. [36]	Sahmaran et al. [37]	Basar et al. [33]	Singh and Sqiddique [38]	Prabhu et al. [26]	Thaarrini et al. [34]
SiO ₂	87.91	84.90	76.0	81.85	83.8	87.48	83.93
Al ₂ O ₃	4.70	5.21	4.45	10.41	0.81	4.93	0.021
Fe ₂ O ₃	0.94	3.32	5.06	1.82	5.39	1.31	0.950
CaO	0.14	0.58	3.56	1.21	1.42	0.22	1.03
MgO	0.30	0.67	1.98	1.97	0.86	0.18	1.77
SO ₃	0.09	0.29	-	0.84	0.21	0.07	0.057
MnO	-	0.08	0.46	-	0.047	-	-
TiO ₂	0.15	0.19	0.17	-	0.22	-	-
K ₂ O	0.25	0.97	1.20	0.494	1.14	-	-
P ₂ O ₅	-	0.05	0.04	-	-	-	-
Na ₂ O	0.19	0.50	0.38	0.764	0.87	-	-
LOI	5.15	2.87	5.85	6.93	-	5.81	2.19

Les déchets de sables de fonderie provenant de différentes étapes de traitement de fonderie présentent différentes propriétés physiques et chimiques [39]. L'analyse XRD sur sable de fonderie plus fine que 75 µm a confirmé la présence de quartz et de carbonates (calcite et dolomite) ainsi que de montmorillonite[27].

L'analyse thermique différentielle réalisée sur deux sables de fonderie verts, collectés dans la même fonderie italienne, a représenté différentes quantités d'additif carboné, environ 2,8% dans sable de fonderie provenant de l'élimination des moules1 et 5,1% dans sable de fonderie provenant du processus d'aspiration pendant l'écrasement du moule [27]. Les déchets de sable de fonderie ayant une teneur en carbone plus élevée ont montré une plus grande absorption d'eau (5,4%) que l'autre ayant une teneur en carbone moindre (3,3%) [27].

- Propriétés mécaniques

Des tests menés sur sable de fonderie pour vérifier sa résistance et sa durabilité, tels que la faible abrasion Micro-Deval [40] et la perte de solidité au sulfate de magnésium (ASTM C88-05) [41] ont montré de bons résultats, indiquant une bonne durabilité. La perte par abrasion a été trouvée inférieure à 2% alors que; La perte de solidité du sulfate de magnésium était comprise entre 5 et 15 % [42].

Javed et Lovell [43] ont rapporté une perte de solidité relativement élevée, qui peut être due aux échantillons de perte de sable lié et non à une décomposition de particules de sable individuelles [44]. L'angle de résistance au cisaillement ou l'angle de frottement

interne du sable de fonderie a été trouvé comparable à la résistance au cisaillement des sables normaux, c'est-à-dire entre 33° et 40° [43].

1.4.6 Application du sable de fonderie dans le monde

La pratique consistant à éliminer le sable de fonderie dans les décharges devient défavorable en raison de l'augmentation des coûts d'élimination (Figure 1.9). En outre, les préoccupations environnementales croissantes ont poussé le gouvernement à adopter des réglementations strictes pour contrôler l'élimination des déchets des industries et les rendre responsables de l'assainissement des déchets. Tous ces problèmes peuvent être résolus en réutilisant et en recyclant les déchets produits. Les applications potentielles du sable de fonderie dans les ouvrages de génie civil peuvent être - le remplissage des remblais d'autoroute [43-45] ; remblais fluides ; dans la construction de routes; dans la stabilisation et le renforcement des sols [46]; barrière ou liner hydraulique [47,48] dans la fabrication du ciment ;fabrication de mortier [49] ;pavés, blocs de briques [50,20,21,31,36,51-52] ;béton bitumineux [52]. La réutilisation bénéfique des sables de fonderie couvre une variété d'applications liées à l'ingénierie des infrastructures et aux travaux de réhabilitation, par exemple, la construction de remblais d'autoroute, l'amélioration des sols, etc. L'utilisation de sable de fonderie dans des applications aussi diverses que les matériaux traditionnels peut aider de multiples façons à conserver les matériaux conventionnels, réduisant les coûts et réduisant la charge sur l'environnement, bénéficiant ainsi au pays et à l'environnement[27].

CHAPITRE 2

INFLUENCE DU SABLE DE

FONDERIE SUR LES PROPRIETES

DES MORTIERS ET BETONS

AUTOPLACANTS

CHAPITRE 2 : INFLUENCE DU SABLE DE FONDERIE SUR LES PROPRIETES DES MORTIERS ET BETONS AUTOPLACANTS.

2.1 Introduction

L'élimination de certains déchets est un enjeu important sur l'environnement. Une possibilité est d'utiliser ces déchets comme granulats dans les bétons. Cette étude porte sur le déchet de l'industrie de fonderie et ce présent chapitre consiste à donner des généralités sur l'utilisation des différents sables de fonderie qui existent dans l'industrie de métallurgie dans la confection des mortiers et des bétons autoplaçants. De même nous présentons ici, un état de l'art sur l'utilisation des sables de fonderie en tant que sable dans la composition des mortiers et bétons autoplaçants.

2.2 Utilisation de sable de fonderie dans la confection du mortier et béton autoplaçant

Plusieurs études ont été menées sur l'utilisation de sable de fonderie en remplacement partiel et total des granulats fins dans le béton. Bien que le sable utilisé dans les fonderies ait un pourcentage très élevé de silice mais en raison de la granulométrie plus fine et uni modale, l'augmentation de la teneur en sable de fonderie dans le béton au-delà d'un certain niveau entraîne des effets négatifs sur le béton. La présence d'additifs en tant qu'impuretés provoque également des effets négatifs sur les propriétés à l'état frais ainsi qu'à l'état durci du béton.

2.3 Effet de sable de fonderie sur les propriétés des mortiers et des bétons autoplaçants à l'état frais

2.3.1 Ouvrabilité

L'ouvrabilité d'un béton ou un mortier est un facteur important. Elle peut se définir comme la facilité offerte à la mise en œuvre du béton pour le remplissage parfait du coffrage et du ferrailage ; elle est caractérisée par la valeur de l'affaissement au cône d'Abrams, l'étalement au mini cône et le temps d'étalement au V-funnel.

- Mortier (MAP) :

Des recherches ont été faites par Safi et al. [53] dont l'objectif d'étudier la fluidité des mortiers en fonction de la substitution du sable par du sable de fonderie. (Figure 2.1) L'ouvrabilité des MAP a été mesurée par l'essai d'écoulement réalisé à l'aide d'un mini

CHAPITRE 2 : INFLUENCE DU SABLE DE FONDERIE SUR LES PROPRIETES DES MORTIERS ET BETONS AUTOPLACANTS.

cône. Les résultats montrent une diminution de l'ouvrabilité du mortier avec la substitution du sable naturel par du sable de fonderie. Par rapport au mortier de référence SCM0, cette réduction de la fluidité est due à la finesse du sable de fonderie qui présente une surface spécifique élevée par rapport au sable naturel.

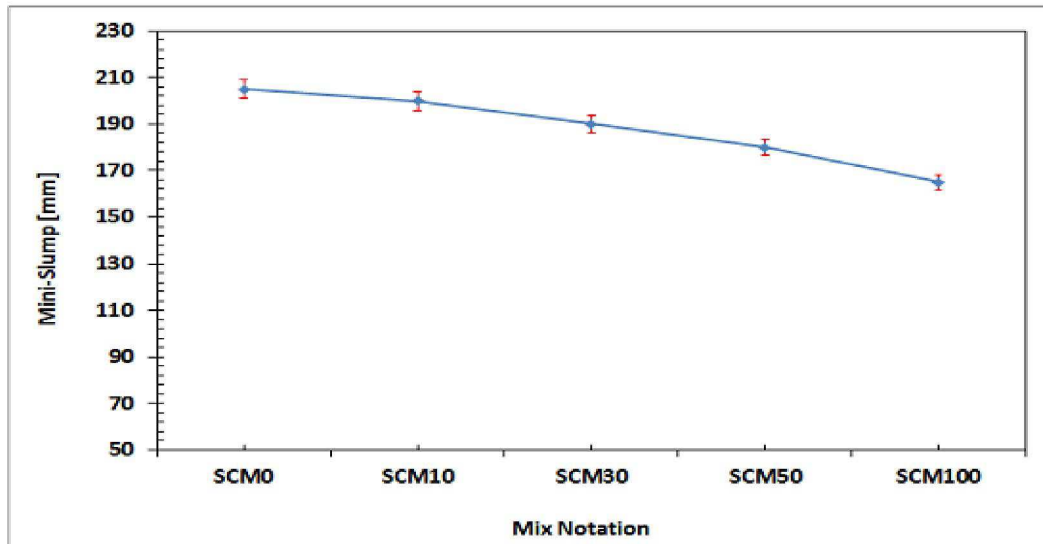


Figure 2.1 : Effet de sable de fonderie sur l'ouvrabilité des mortiers [53].

D'après les résultats des essais à l'état frais fait par Sebkie al. [54] l'ouvrabilité des MAP diminue avec l'augmentation du taux de substitution du sable par des déchets de sable de fonderie (Figure 2.2) En effet, jusqu'à 50% de substitution, la diminution n'est pas importante ; le mortier répond aux exigences du mortier autoplaçant. Au-delà de 50 % de substitution les mortiers autoplaçants perdent leur ouvrabilité.

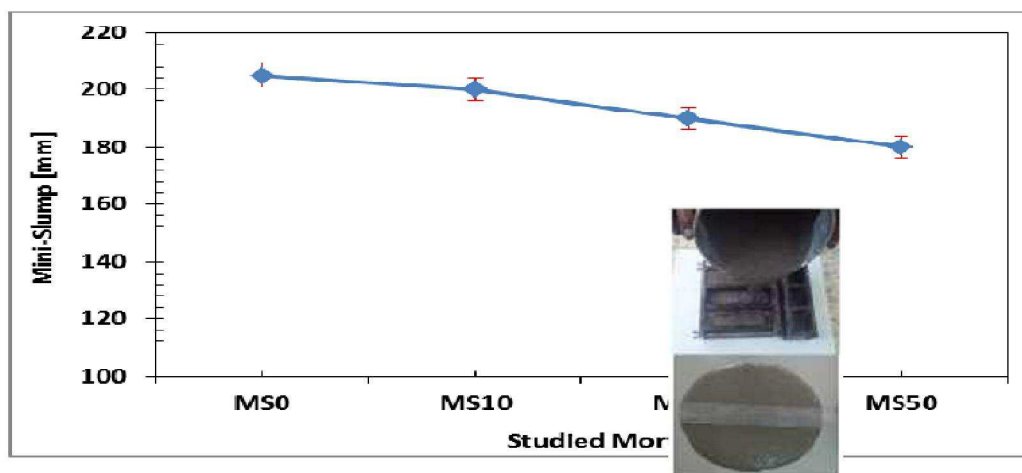


Figure 2.2 : Ouvrabilité des MAP étudiés par substitution de sable [54].

- Béton (BAP) :

Les valeurs de diamètre de l'écoulement montrées dans la Figure 2.3 de la recherche faite par Sandhu.R.K et al. [55] variaient entre 774 mm et 608 mm et se situent dans les limites prescrites par l'EFNARC [1]. Les résultats de l'écoulement ont révélé que l'incorporation du WFS dans le SCC diminue l'ouvrabilité. La forme et la texture des particules sont un paramètre important de l'ouvrabilité. La morphologie des WFS indique des particules rugueuses, angulaires et sphériques, ce qui crée un obstacle à la capacité d'écoulement et interrompt l'écoulement régulier en raison de l'effet interne ce qui entraîne une diminution de la maniabilité.

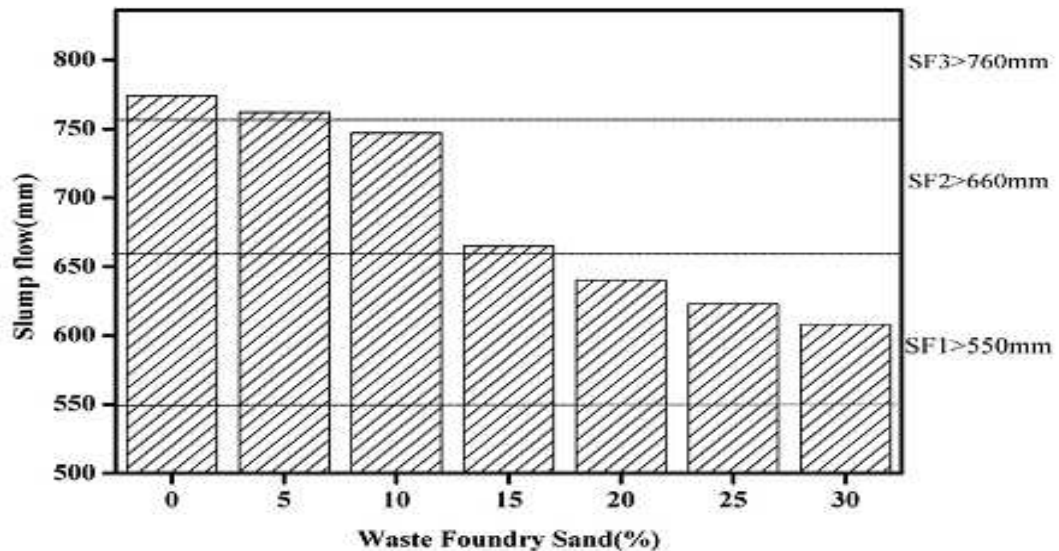


Figure 2.3 : Ouvrabilité des BAP étudiés par substitution de sable de fonderie [55].

Selon les travaux de Parashar et al. [56], une perte considérable de la maniabilité a été observée avec l'augmentation de la teneur en WFS, comme le montre le tableau 2.1. Cela peut être dû à la forme angulaire ou à la teneur en fines particules de WFS [57]. En outre, selon le type de liant utilisé, l'absorption d'eau par les WFS peut être élevée dans le cas de liants naturels et faible dans le cas de liants chimiques, qui peuvent avoir un effet hydrofuge [58]. Sur la base des résultats, tous les mélanges ont été qualifiés de SCC, mais la classe d'écoulement et la classe de viscosité varient en fonction de la teneur en WFS dans le mélange. En outre, avec le remplacement par le WFS, la couleur du béton a été trouvée en transition vers le gris foncé [59]. Il a été observé que remplacement par le WFS

CHAPITRE 2 : INFLUENCE DU SABLE DE FONDERIE SUR LES PROPRIETES DES MORTIERS ET BETONS AUTOPLACANTS.

a amélioré la cohésion des mélanges de béton, ce qui souligne l'utilisation potentielle du WFS pour réduire la ségrégation.

Tableau 2.1 : Propriétés frais des BAP [56].

Mix	Slump flow		L box (H2/H1) (mm)	V funnel (sec)	U box (H2-H1) (mm)
	T (sec)	Final Dia. (mm)			
FS0	5.88	633.3	0.78	12.33	0.8
FS10	8.16	606.6	0.77	15.4	0.6
FS20	8.33	596.6	0.83	16.72	1.2
FS30	9.64	610	0.87	14.71	1.5
FS40	10.8	593	0.85	17.52	2.2

Les chercheures Ashish et al. [60] ont montré que le remplacement du sable naturel par du sable de fonderie affecte négativement le comportement d'affaissement du béton BAP (figure 2.4), Un affaissement accru a été remarqué à mesure que la quantité d'eau augmente, tandis que la diminution de la teneur en eau a augmenté la cohésion du mélange de BAP.

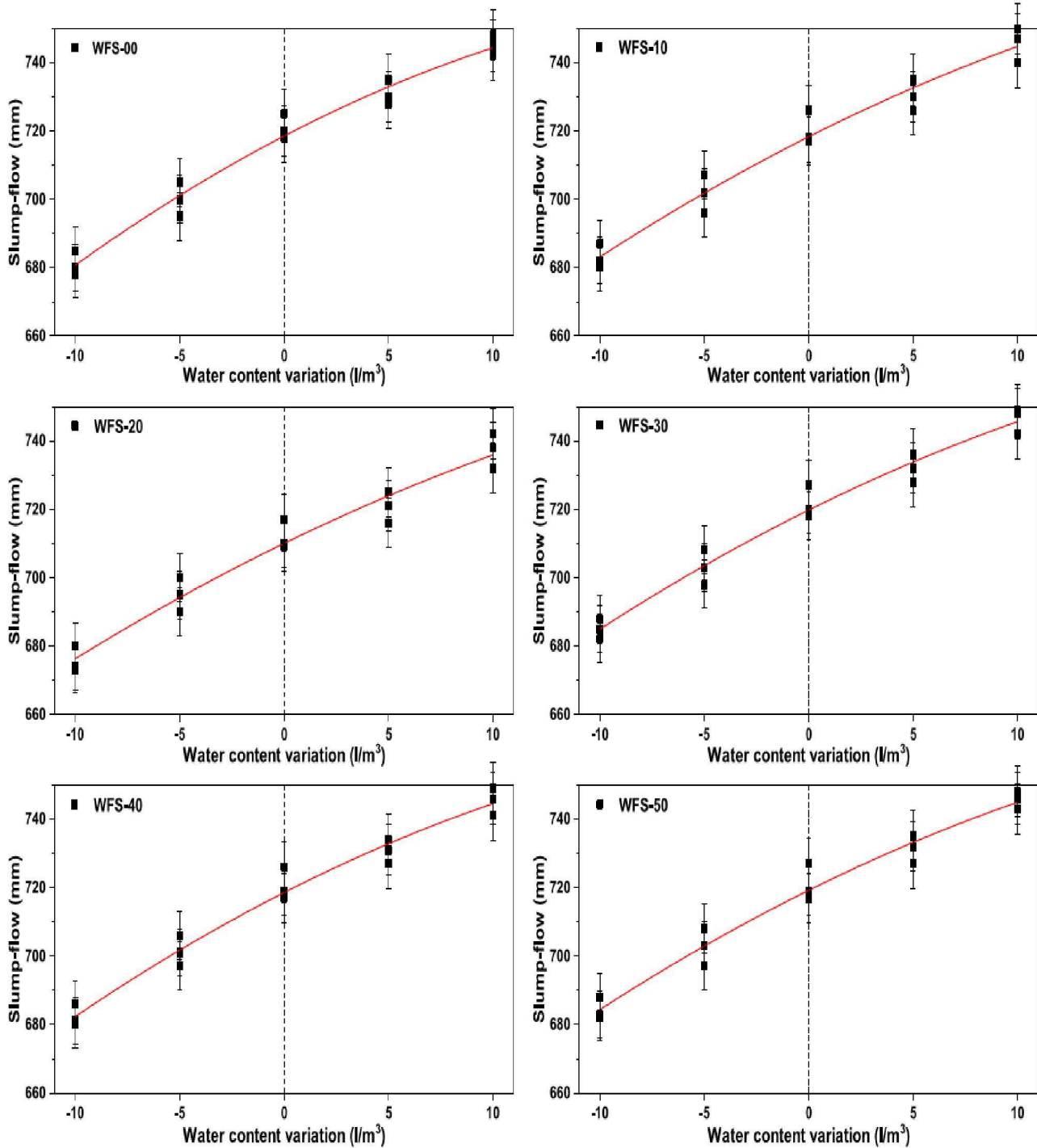


Figure 2.4: Influence de la variation de la quantité de sable de fonderie et la quantité d'eau sur l'étalement [60].

Ashish et al. [60] ont montré que le remplacement du sable naturel par sable de fonderie, lorsque le rapport eau / liant et le dosage de VMA (en plus du métakaolin) ont été maintenus constants, (figures (2.5) (2.6)) ; il a été observé que le remplacement du sable naturel par sable de fonderie n'a montré aucun effet sur le comportement de viscosité du

CHAPITRE 2 : INFLUENCE DU SABLE DE FONDERIE SUR LES PROPRIETES DES MORTIERS ET BETONS AUTOPLACANTS.

béton SCC, ainsi que là n'a pas augmenté la demande de VMA. Les raisons derrière cela est la densité apparente plus élevée du sable de fonderie, la présence de matériau de type argile dans les sable de fonderie [13] et la nature hydrophile de sable siliceux présent dans le sable de fonderie qui attire l'eau à sa surface.

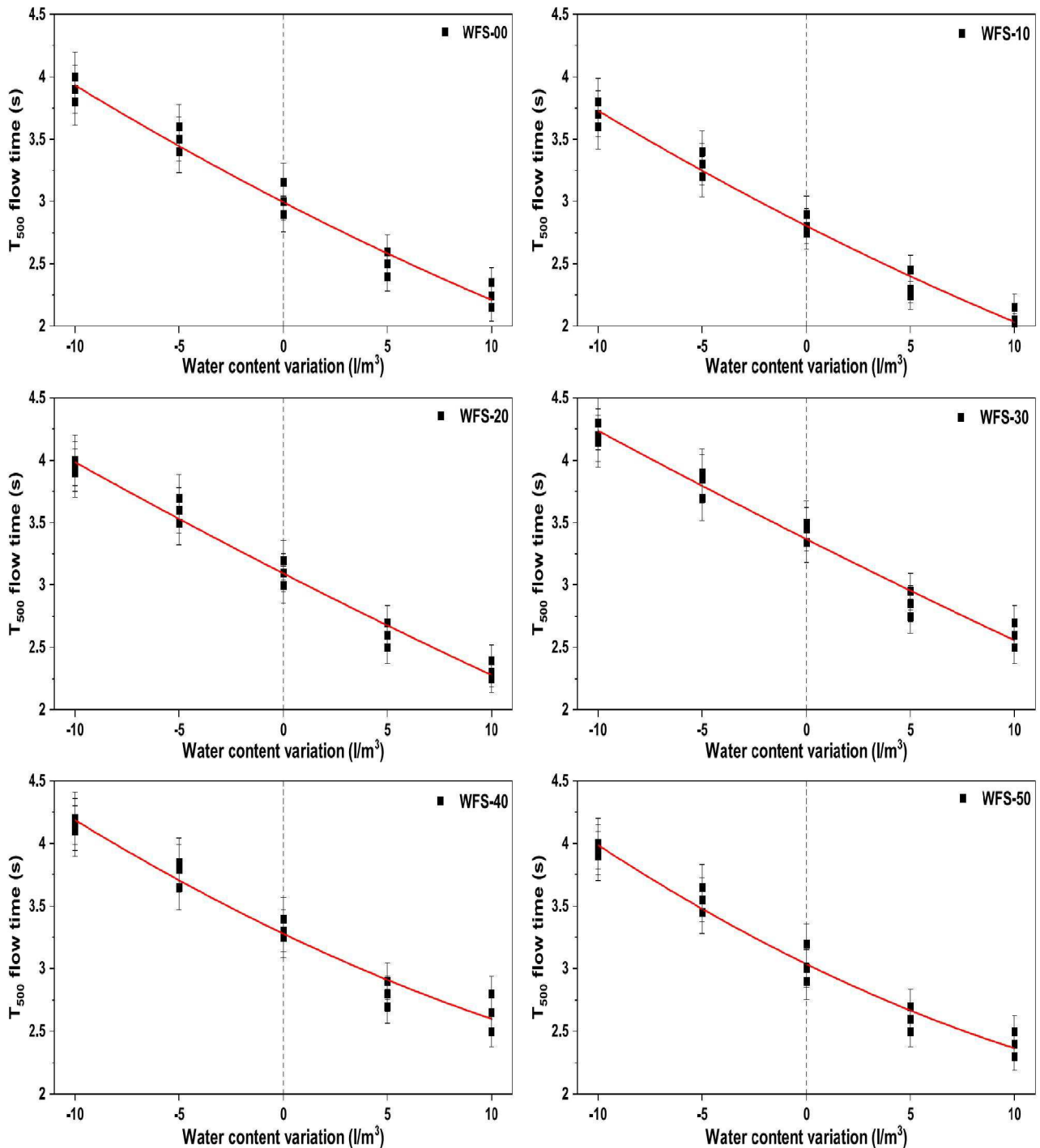


Figure 2.5: Influence de la variation de la quantité de sable de fonderie et la quantité d'eau sur le temps d'écoulement en T 500 [60].

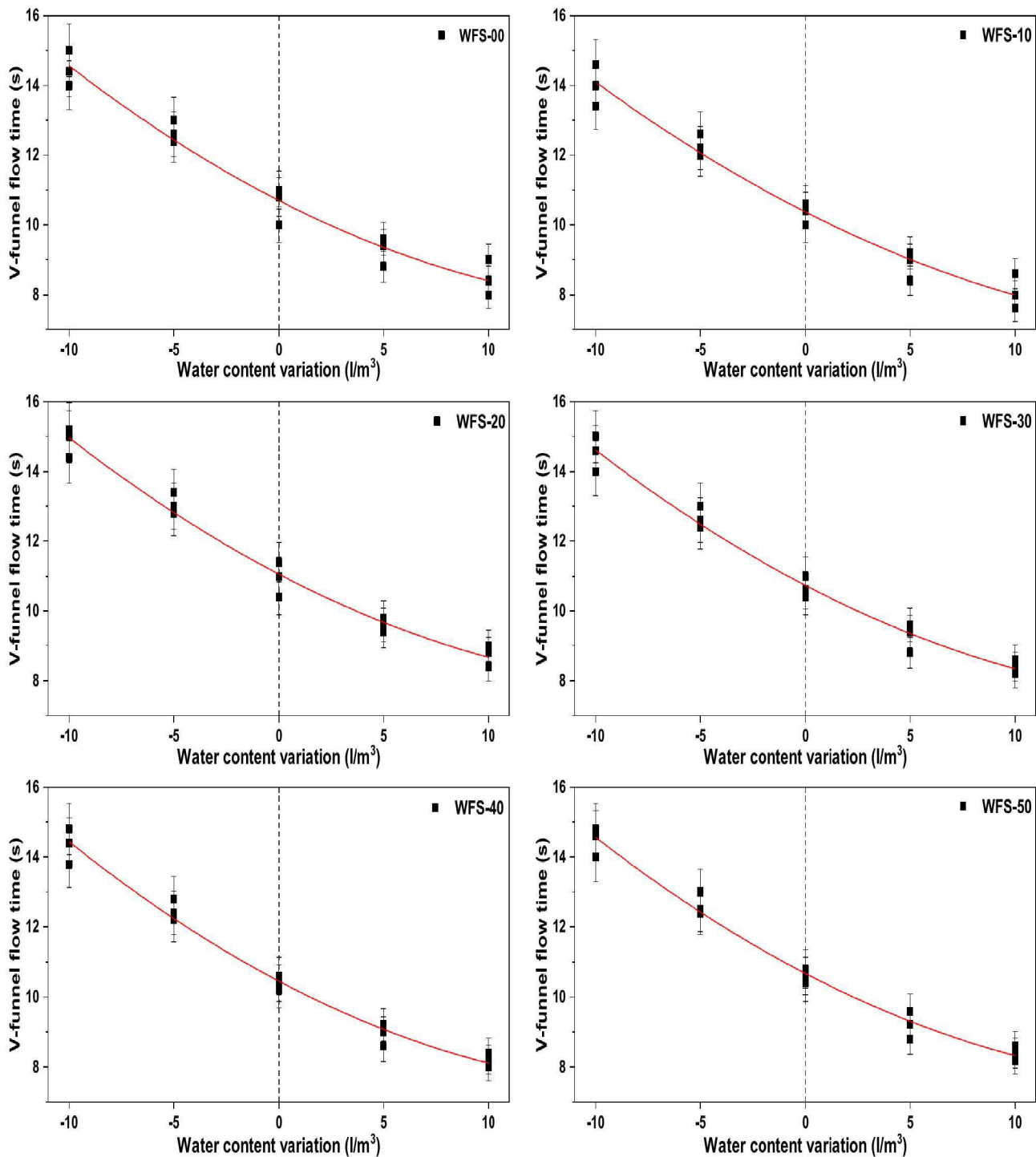


Figure 2.6: Influence de la variation de la quantité de sable de fonderie et la quantité d'eau sur le temps d'écoulement en v-funnel [60].

2.3.2 Rhéologie (viscosité, seuil de cisaillement)

La rhéologie est un outil de haute qualité, sert à évaluer l'effet des variations des constituants des mélanges à base de ciment sur ses propriétés à l'état frais. En effet,

CHAPITRE 2 : INFLUENCE DU SABLE DE FONDERIE SUR LES PROPRIETES DES MORTIERS ET BETONS AUTOPLACANTS.

l'interprétation des mesures rhéologiques est corrélativement compliquée, et certains pièges peuvent conduire à des mauvaises conclusions.

- Béton :

Shahraman [13] a trouvé des résultats concernant le diamètre d'écoulement, le temps d'écoulement, temps d'écoulement dans V-funnel, et les paramètres rhéologiques (limite d'élasticité et viscosité relative) des mélanges SCC qui sont présentés dans le tableau 2.2. Il a été observé que le remplacement du sable naturel par le sable de fonderie affecte positivement le comportement d'affaissement du béton BAP.

Tableau 2.2: les propriétés des mélanges de béton autoplaçant à l'état frais [13].

Mix ID	Slump flow diameter (mm)	Slump flow time (s)	V-funnel flow time (s)	Yield stress (Pa)	Relative viscosity (Nm s)
0FA-0SFS	605	3.83	7.7	23	4.06
0FA-25SFS	657	2.02	5.6	18	3.75
0FA-50SFS	655	2.71	7.3	15	5.66
0FA-100SFS	675	1.70	9.0	6	6.01
30FA-0SFS	707	3.10	2.6	8	1.36
30FA-25SFS	710	1.50	4.6	4	1.26
30FA-50SFS	685	0.91	3.1	20	3.22
30FA-100SFS	745	1.10	7.0	4	5.12
50FA-0SFS	612	1.60	3.5	19	3.15
50FA-25SFS	605	2.20	5.5	70	3.99
50FA-50SFS	717	1.10	1.9	5	0.76
50FA-100SFS	739	1.30	6.5	5	4.44
70FA-0SFS	695	1.20	2.5	8	2.24
70FA-25SFS	615	1.50	3.5	48	3.02
70FA-50SFS	702	0.90	2.4	5	1.05
70FA-100SFS	710	0.90	2.5	6	3.12

2.4 Effet de sable de fonderie sur les propriétés des mortiers et des bétons autoplaçants à l'état frais et durci

2.4.1 Propriétés mécaniques :

- Mortier (MAP) :
 - Résistance à la compression et à la flexion

Safi et al. [53] ont examiné l'influence de sable de fonderie sur la résistance à la compression et à la flexion, Les résultats des essais de résistance à la flexion et à la compression sont donnés dans la Figure 2.7. Il a été observé que la résistance à la flexion et à la compression augmente en fonction de l'âge de maturation pour tous les mortiers. Cependant, le mortier SCM10% (à 10% de substitution de sable) à la même valeur de

CHAPITRE 2 : INFLUENCE DU SABLE DE FONDERIE SUR LES PROPRIETES DES MORTIERS ET BETONS AUTOPLACANTS.

résistances. Alors que, jusqu'à 30% de substitution de sable par des mortiers FWS, les mortiers ont une résistance à la compression de 40 MPa, ce qui est acceptable. 40 MPa qui a une résistance acceptable en tant que matériaux de construction.

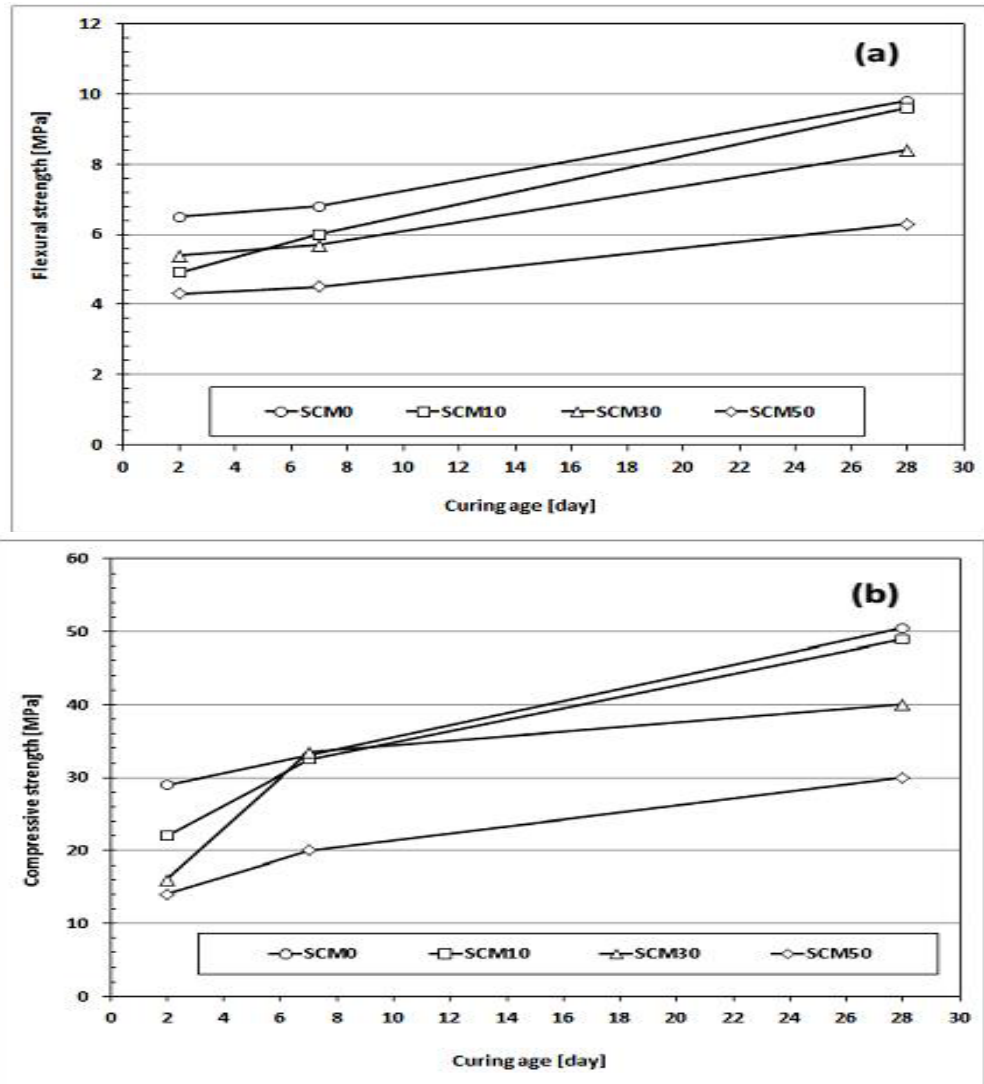


Figure 2.7 : Résultats des essais de résistance à la flexion (a) à la compression (b) [53].

D'après les résultats obtenus par Sebki et al. [54], la résistance à la flexion est constante pour le cas de la substitution de sable 10% et 30% par rapport au mortier témoin, la diminution de la résistance pour la substitution de 50% n'est pas importante. Il y a également une réduction significative de la résistance pour une substitution de 100% par rapport au mortier témoin (figure 2.8(a)). Les résultats de la résistance à la compression des mortiers sont donnés dans la figure 2.8(b), la résistance augmente en fonction du temps de cure, on constate que la valeur de la résistance des mortiers est pratiquement la même

CHAPITRE 2 : INFLUENCE DU SABLE DE FONDERIE SUR LES PROPRIETES DES MORTIERS ET BETONS AUTOPLACANTS.

pour les mortiers MS0 et MS10 substitution du sable. Cependant, au-delà de 30% et 50% de substitution de sable, la résistance diminue, la valeur de la plus haute résistance à la compression est de l'ordre de 49 MPa pour le mortier de 10% de substitution de sable. La valeur de la résistance pour 100% de substitution du sable est très faible par rapport au mortier témoin.

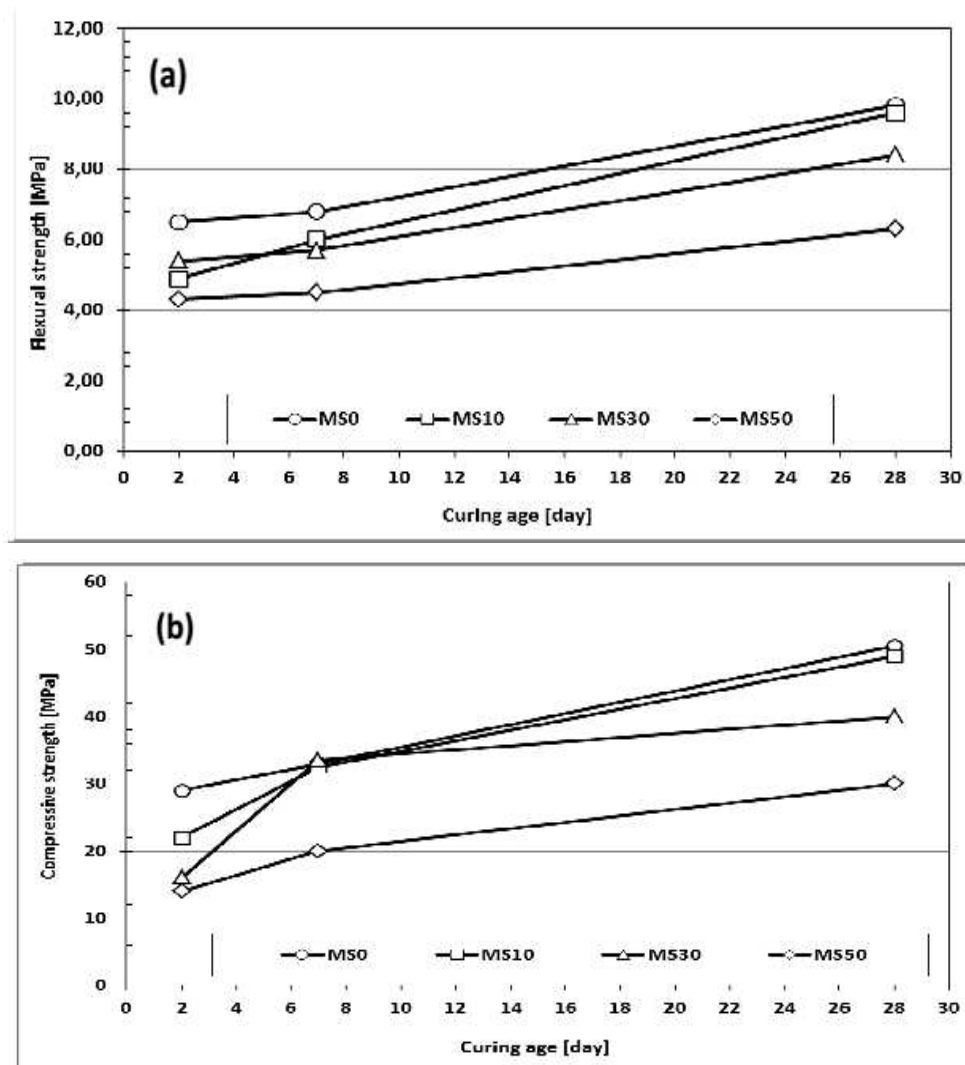


Figure 2.8 : Développement de la résistance mécanique des mortiers autoplaçants étudiés (a) flexion (b) compression [54].

- Béton (BAP) :
 - Résistance à la compression

Shahraman et al. [13] a étudié l'effet du SF sur la résistance à la compression à 7, 28 et 90 jours est illustré par les figures 2.9a, b et c respectivement. Les écarts types pour chaque valeur de résistance à la compression sont également indiqués dans tous les

CHAPITRE 2 : INFLUENCE DU SABLE DE FONDERIE SUR LES PROPRIETES DES MORTIERS ET BETONS AUTOPLACANTS.

graphiques. Les analyses statistiques ont montré que le coefficient de variation était inférieur à 10% pour toutes les données. La valeur maximale du coefficient de variation était de 8,5%, ce qui indique que les données ont montré une faible dispersion. Dans tous les âges de maturation, la résistance à la compression des mélanges de contrôle avec 0% de SF était plus élevée que celle qui contient du SF.

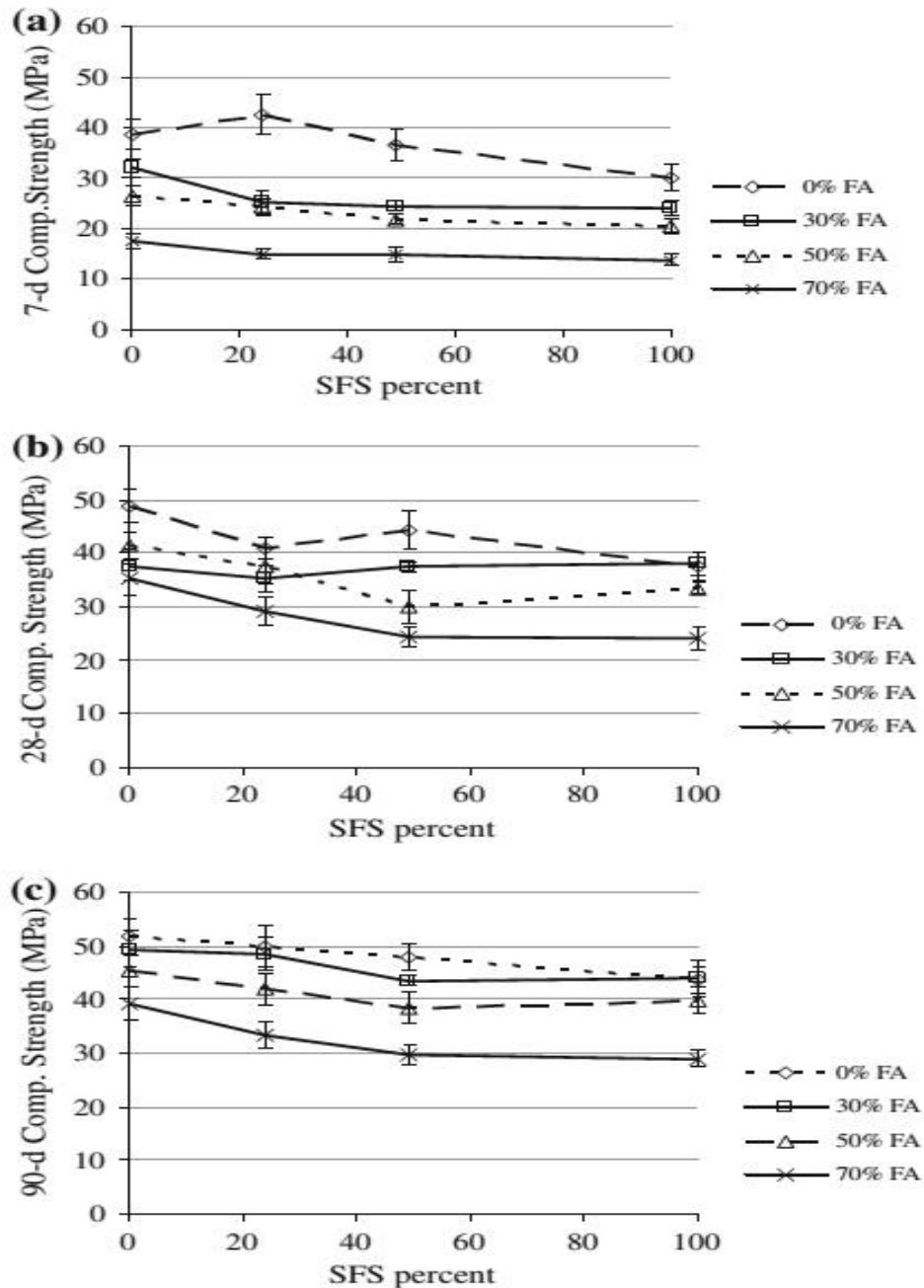


Figure 2.9 : Résistance à la compression à 7(a), 28 (b) et 90(c) jours [13].

Sandhu et al. [55] à montrer une réduction de la résistance à la compression à tous les âges d'essai (figure 2.10) avec l'incorporation de WFS dans le SCC. Pour le SCC0, la

CHAPITRE 2 : INFLUENCE DU SABLE DE FONDERIE SUR LES PROPRIETES DES MORTIERS ET BETONS AUTOPLACANTS.

résistance à la compression est de 44.61 MPa, 58.25 MPa, 63.67 MPa, et 75,56 MPa à 7, 28, 91 et 365 jours, respectivement. Les mélanges SCC avec une substitution de 5%, 10%, 15%, 20%, 25% et 30% de WFS ont un effet négatif sur la résistance à la compression et subissent une perte de résistance de 6.38%, 8.19%, 11.18%, 14.25%, 16.05% et 18.76% respectivement, par rapport au mélange témoin à l'âge d'essai de 28 jours. Le WFS est un sable de silice recyclé qui a des propriétés médiocres par rapport au sable naturel. Dans cette recherche, le sable naturel plus grossier a été remplacé par du WFS plus fin, tout en maintenant le volume du mélange constant.

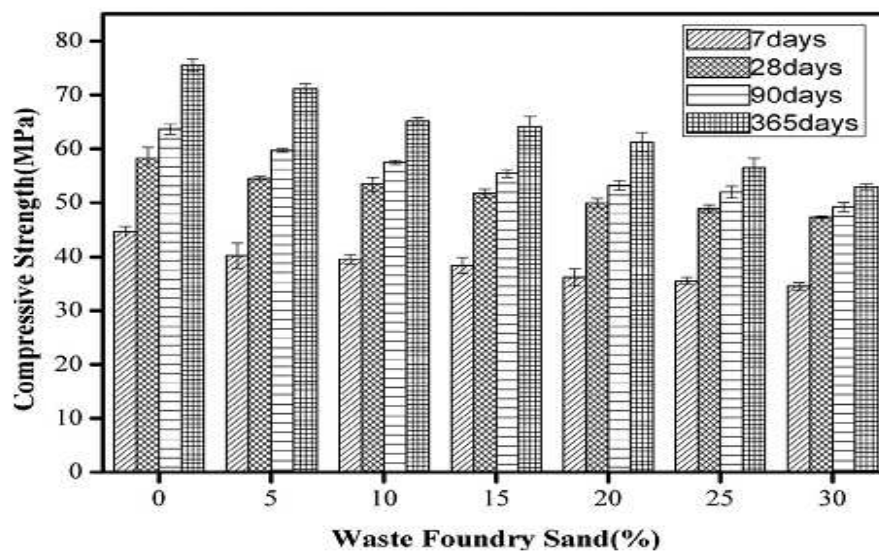


Figure 2.10 : Résistance à la compression des BAP a différents âges [55].

Parashar et al. [56] ont examiné la résistance à la compression des BAP, elle a été mesurée comme une moyenne de trois cubes et les résultats sont représentés avec les barres d'erreur dans la Les résultats sont représentés avec les barres d'erreur dans la Figure 2.11 et également rapportés dans le Tableau 2.3 les mélanges FS10 à FS40 ont atteint une résistance de 40 MPa. Les mélanges FS10 à FS40 ont atteint une résistance inférieure de 5.8%, 23.2%, 36.6% et 37.4%, respectivement, par rapport à l'échantillon du mélange témoin. Il a été observé que l'ajout de WFS entraîne une réduction de la résistance à 7 et 28 jours pour tous les mélanges. Cependant, seulement à l'âge de 90 jours, le mélange FS10 présente une résistance supérieure de 8.2% à celle du mélange témoin. Au-delà du niveau de remplacement de 10%, la résistance tend à diminuer [57,31]. Les mélanges FS20- FS40 donnent des valeurs de résistance inférieures de 8.9%, 14.6% et 20.6% respectivement,

CHAPITRE 2 : INFLUENCE DU SABLE DE FONDERIE SUR LES PROPRIETES DES MORTIERS ET BETONS AUTOPLACANTS.

mais la résistance du mélange FS20 était similaire à celle du mélange de contrôle. Le gain de résistance au niveau de remplacement de 10% peut être attribué à la densification du mélange de béton [38].

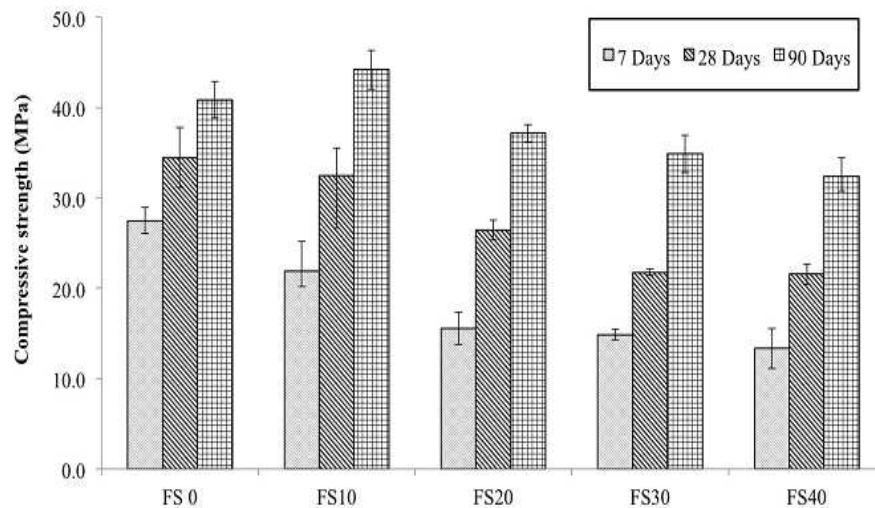


Figure 2.11 : Variation de la résistance à la compression des BAP a différents âges [56].

➤ Résistance à la traction par fendage

Sandhu et al. [55] ont étudié l'effet du WFS en remplacement des agrégats fins sur la résistance à la traction par fendage du béton, (Figure 2.12) La résistance à la traction par fendage de SCC0 était de 4,19 MPa, 4,56 MPa, 5,27 MPa et 5,41 MPa à 7, 28, 90 et 365 jours de maturation respectivement. A 28 jours de cure la résistance à la traction par fendage de SCC5 à SCC30 montre une tendance à la baisse, c'est-à-dire 3.63%, 4.69%, 6.44%, 8.28%, 9.36%, et 11.03% respectivement Les mélanges témoins présentent des valeurs maximales de résistance à la traction par fendage à tous les âges de la cure. A 90 jours de cure, on observe une diminution du pourcentage de la résistance à la traction par fendage était de 6,08 %, 9,15%, 10,73%, 11,52%, 15,67% et 19,03% pour les différents niveaux de remplacement. A 365 jours, le pourcentage de diminution de la résistance à la traction par fendage par rapport au mélange témoin était de 6.67%, 6.97%, 11,05 %, 16,81 %, 17,24 % et 19,85 %. La résistance à la traction par fendage a montré une tendance similaire à celle de la résistance à la compression. La résistance à la traction par fendage diminue avec l'augmentation du pourcentage de WFS, Les valeurs maximales du taux d'augmentation de la résistance à la traction avec l'âge étaient de 12,78% et 15,07% à 90 et

CHAPITRE 2 : INFLUENCE DU SABLE DE FONDERIE SUR LES PROPRIETES DES MORTIERS ET BETONS AUTOPLACANTS.

365 jours dans le cas de SCC5. Tandis que les valeurs minimales ont été observées à SCC30, soit 5.31% & 7.03% à 90 et 365 jours.

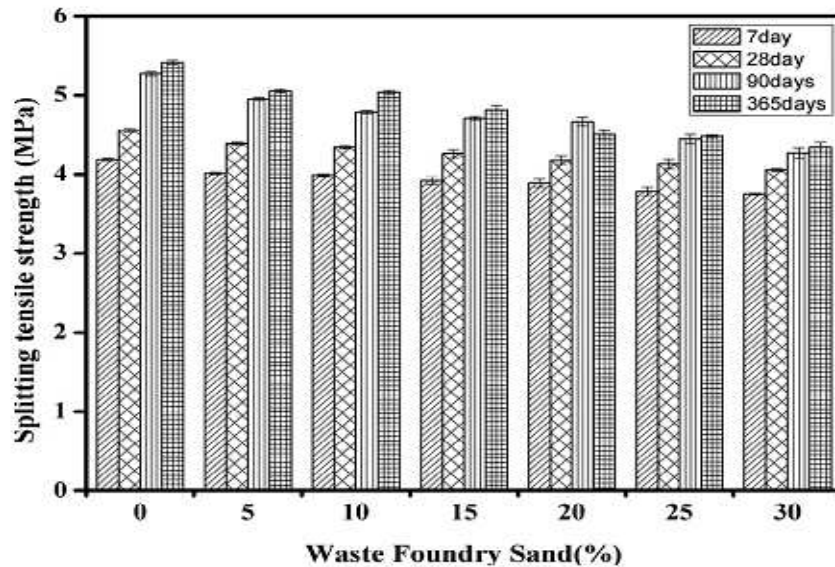


Figure 2.12: Résistance à la traction par fendage des mélanges des BAP [55].

Des recherches ont été menées par Parashar et al. [56] sur la variation de la résistance à la traction par fendage avec le WFS, les résultats sont présentés dans la Figure 2.13 et Tableau 2.3. En comparaison avec le mélange témoin, il a été observé que les mélanges FS10, FS20 et FS30 présentent une résistance à la traction par fendage plus élevée à l'âge de 7 et 28 jours. Cette considération s'est avérée de la résistance à la compression. Il a été observé que l'augmentation de la résistance était de 42.7%, 23.7%, 5.3% pour les mélanges FS10 à FS30, et très légère pour les mélanges FS10 à FS30 et une très légère diminution de 3.8% a été observée dans le mélange FS40 à l'âge de 7 jours. De même, à 28 jours, une augmentation de la résistance de 42.8%, 36.4%, 8.4% et 4.1% a été observée pour les mélanges FS10 à FS40 respectivement, par rapport au mélange témoin. A l'âge de 90 jours, une légère augmentation de 8.9% de la résistance par rapport au mélange témoin a été observée uniquement pour le mélange FS10. Pour les mélanges FS20, FS30 et FS40, une diminution de la résistance a été observée. Les résultats ci-dessus sont en accord avec les résultats de la résistance à la compression.

CHAPITRE 2 : INFLUENCE DU SABLE DE FONDERIE SUR LES PROPRIETES DES MORTIERS ET BETONS AUTOPLACANTS.

Tableau 2.3: les propriétés des mélanges de béton autoplaçant à l'état durci [56].

Mix ID	Compressive strength (MPa)			Splitting tensile strength (MPa)			Density of concrete (kg/m ³)		
	7 day	28 day	90 day	7 day	28 day	90 day	7 day	28 day	90 day
FS 0	27.4	34.4	40.8	0.87	1.08	1.60	2505.6	2490.8	2497.7
FS 10	21.8	32.4	44.2	1.24	1.55	1.75	2410.2	2448.6	2435.1
FS 20	15.5	26.4	37.2	1.08	1.48	1.65	2364.3	2366.4	2367.5
FS 30	14.8	21.8	34.9	0.92	1.17	1.51	2360.2	2356.5	2352.7
FS 40	13.3	21.5	32.4	0.87	1.13	1.47	2288.4	2338.3	2318.3

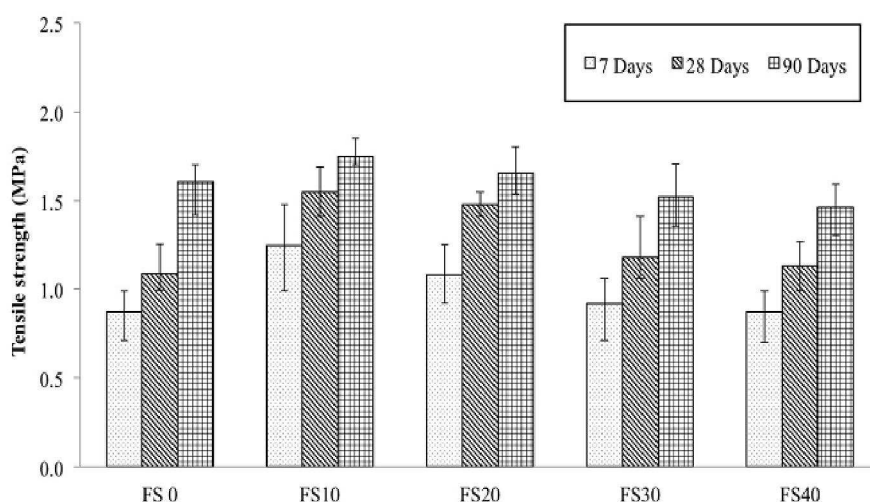


Figure 2.13 : variation de résistance à la traction par fendage des BAP a différents âges [56].

➤ Module d'élasticité

Siddique et al. [23] ont déterminé l'effet du sable de fonderie utilisé comme remplacement partiel des agrégats fins sur le module d'élasticité du béton. Les proportions de granulats fins ont été remplacées par 10, 20 et 30 %. Les tests ont été effectués à l'âge de 28 et 56 jours. Les résultats du module d'élasticité sont présentés dans les figures 2.14. Le résultat a permis de conclure que le module d'élasticité des bétons de cendres volantes de sable de fonderie avec 0, 10, 20 et 30% de fines Le remplacement des agrégats (sable) a été plus élevé que le mélange témoin à tous les âges. Il est également évident que le module d'élasticité de tous les mélanges continuait à augmenter avec l'âge.

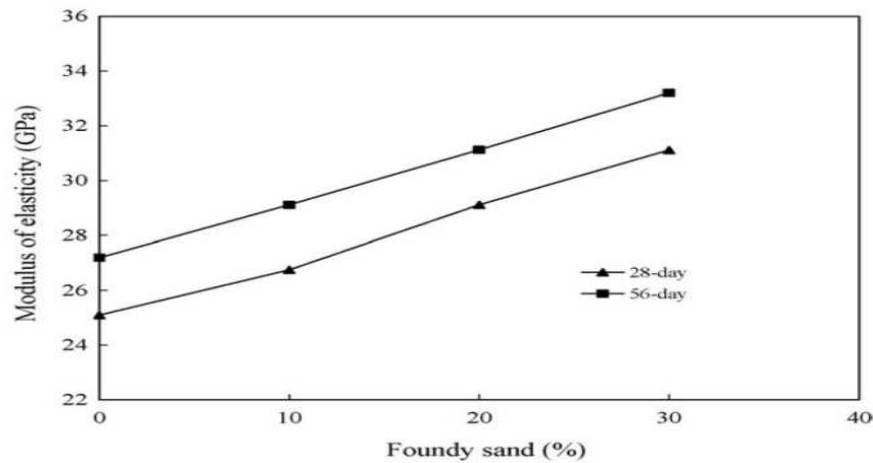


Figure 2.14 : Module d'élasticité en fonction du sable de fonderie utilisé [23].

2.4.2 Propriétés de durabilité

- Béton (BAP) :
 - Absorption capillaire et perméabilité

Parashar et al. [56] ont examiné les propriétés d'absorption capillaire et perméabilité du SCC ont été testées sur la surface d'un échantillon rectangulaire de 250 mm x 255 mm x 75 mm en utilisant l'appareil Autoclam. L'appareil Autoclam peut être utilisé dans deux modes : le mode perméabilité et le mode absorption capillaire d'eau. Lorsqu'une pression est appliquée, la perméabilité est mesurée et lorsqu'aucune pression externe n'est appliquée, l'absorption capillaire d'eau est mesurée. Les résultats pour la perméabilité à l'eau et les tests de sorptivité cumulative (appelée absorption capillaire d'eau) à 7, 28 et 90 jours sont représentés sur la figure 2.15. Il a été constaté que le remplacement par WFS entraînait une augmentation de la perméabilité et de la sorptivité des spécimens.

À 7 et 28 jours, l'augmentation de la teneur en sable sec entraîne une augmentation de la perméabilité à l'eau et absorption capillaire à l'eau. La valeur minimale a été observée pour le mélange témoin et la valeur maximale pour le FS40. Il a été observé que les valeurs de perméabilité et d'absorption du mélange FS10 étaient proches du mélange témoin à tous les âges. Étant donné que le rapport eau/liant a été maintenu uniforme à travers les spécimens, ces résultats indiquent que la connectivité des pores est augmentée lors du remplacement par WFS [56].

Cela pourrait également indiquer l'affaiblissement de la zone de transition interfaciale autour des particules WFS, expliquant également la réduction des mesures de résistance à la compression. Les résultats montrent que, bien qu'à des niveaux de

CHAPITRE 2 : INFLUENCE DU SABLE DE FONDERIE SUR LES PROPRIETES DES MORTIERS ET BETONS AUTOPLACANTS.

remplacement plus élevés, il existe un risque de réduction significative de la durabilité du béton, cet effet devrait être insignifiant jusqu'à 10 % de remplacement [56].

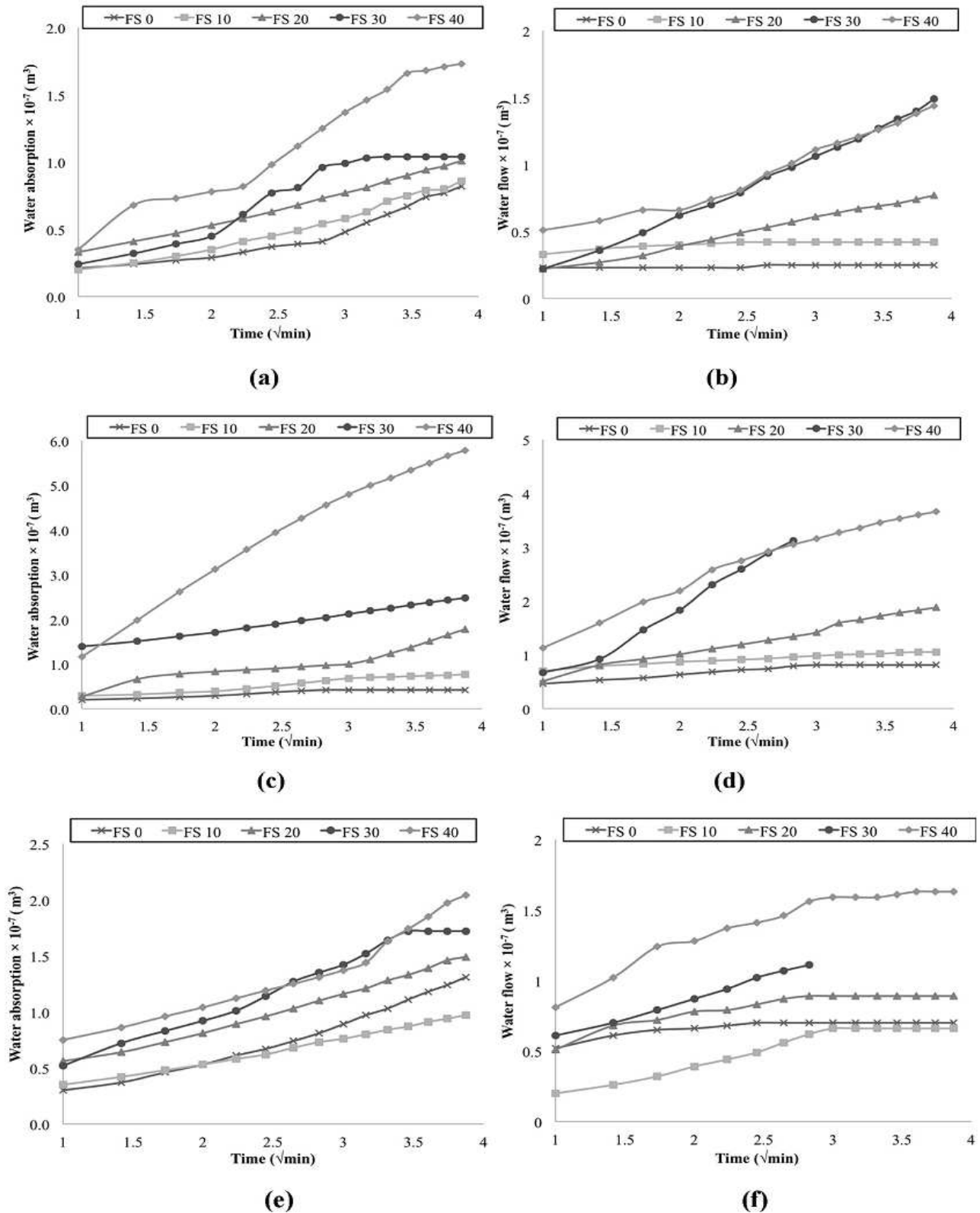


Figure 2.15 : Résultats d'absorption d'eau et perméabilité à l'eau à 7, 28 et 90 jours [56].

CHAPITRE 2 : INFLUENCE DU SABLE DE FONDERIE SUR LES PROPRIETES DES MORTIERS ET BETONS AUTOPLACANTS.

➤ Perméabilité aux ions chlorures (RCP)

Shahraman et al. [21] a montré que Les résultats des essais de RCP effectués à 28 et 90 jours sont présentés dans les Figures 2.16 a et b respectivement. Ils sont exprimés en termes de charge électrique totale en coulombs, ce qui fournit une mesure indirecte de la résistance des mélanges SCC à la pénétration des ions chlorure significativement la perméabilité aux chlorures des mélanges de SCC durcis par rapport aux bétons témoins avec 0% de FA. Pour toute teneur donnée en SFS, la réduction était généralement supérieure à 80 pour des niveaux de remplacement d'AF de 50 et 70 % à la fois à 28 et 90 jours.

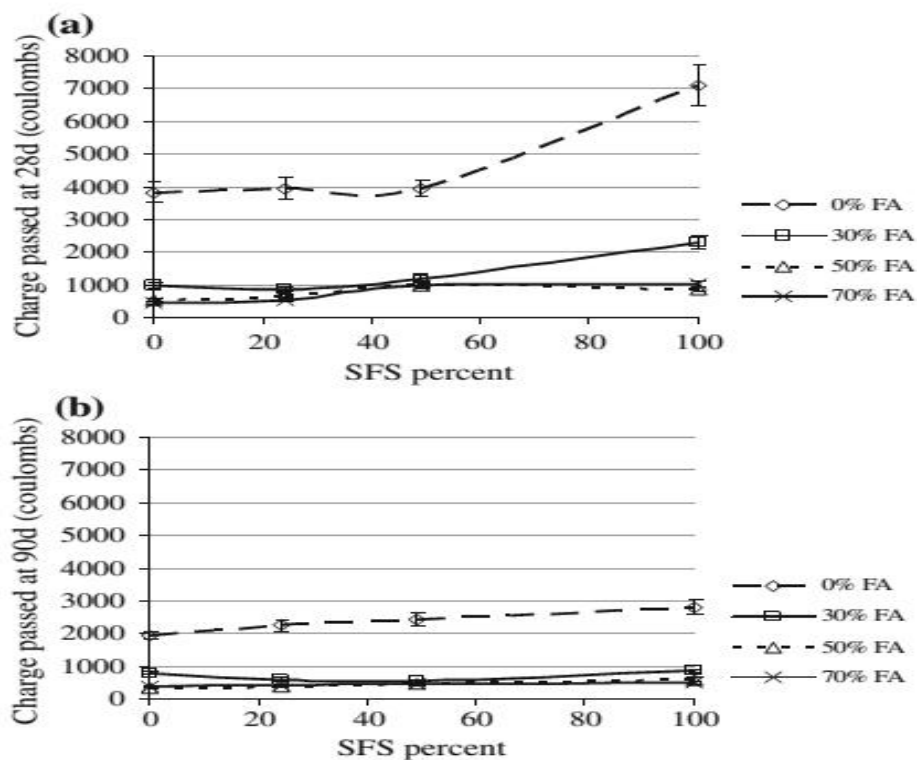


Figure 2.16 : Perméabilité aux ions chlorures (RCP) à 28(a) et 90(b) jours [21].

➤ Résistance au gel et dégel

Guney et al. [31], ont étudié la réutilisation potentielle des déchets de sable de fonderie dans la production de béton à haute résistance. Le sable fin naturel est remplacé par des déchets de sable de fonderie (0%, 5%, 0% et 15%). Après 120 jours de durcissement, les échantillons ont été congelés dans une chambre de température à -24 ± 1 OC pendant 24 h, puis décongelé selon la norme ASTM C666. La durabilité du béton dans des conditions climatiques variables est une condition essentielle pour son application dans les sections extérieures des bâtiments et des structures. Des tests de résistance au gel-dégel

CHAPITRE 2 : INFLUENCE DU SABLE DE FONDERIE SUR LES PROPRIETES DES MORTIERS ET BETONS AUTOPLACANTS.

du béton ont 50 été effectués selon la norme ASTM C 666 sur des cubes de 100 mm soumis à une congélation et une décongélation cycliques dans la plage de températures de -24 à +24. La résistance à la compression non confinée a été mesurée avant et après 80 cycles de congélation et de décongélation. Les résultats obtenus pour le module d'élasticité dynamique, sont représentés sur la figure 2.17. On peut observer que la résistance à la compression et le module d'élasticité dynamique diminuent avec les cycles de congélation et de décongélation. La même tendance a été constatée dans tous les mélanges ; De plus, les échantillons de béton contenant 10% de mélange de sable de fonderie sont légèrement influencés par les cycles de congélation et de décongélation par rapport aux autres taux de remplacement du sable de fonderie.

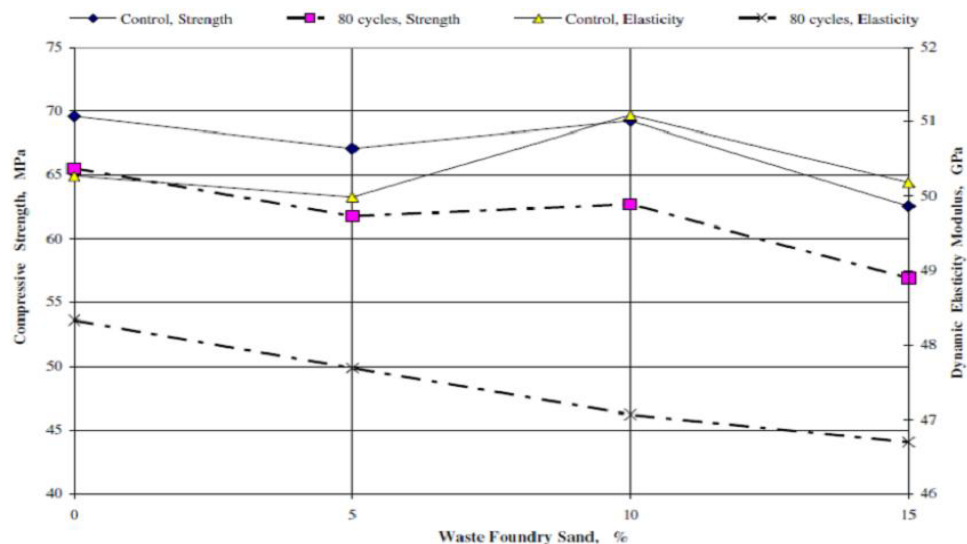


Figure 2.17: Influence du gel-dégel sur la résistance à la compression et l'élasticité dynamique [31].

2.5 Conclusion.

Dans ce chapitre nous avons présenté une synthèse bibliographique sur l'effet de sable de fonderie sur les propriétés à l'état frais et durci du mortier et béton autoplaçant. Un aperçu sur la procédure d'obtention du sable de fonderie est aussi présenté. D'après les différents travaux de recherche réalisés sur le sable de fonderie, on peut conclure que l'utilisation du sable de fonderie comme substitution du sable a un effet remarquable sur les propriétés à l'état frais et durci des mortiers et bétons. Malgré le nombre important des travaux réalisés dans le cas du béton à base de sable de fonderie, son effet sur les propriétés du mortier autoplaçant reste à éclaircir.

CHAPITRE 3
MATERIAUX ET ESSAIS

CHAPITRE 3 : MATERIAUX ET ESSAIS

3.1 Introduction

Le présent chapitre s'intéresse dans sa première partie à la présentation des résultats de l'identification des matériaux utilisés pour la confection des MAP étudiées dans ce projet, la deuxième partie présente les méthodes de formulation adoptées de la méthodologie suivie pour réaliser les différents essais expérimentaux de ce travail.

3.2 Caractéristiques des matériaux

Dans le cadre de cette étude, nous avons confectionné les MAP en se basant sur les matériaux locaux suivants :

3.2.1 Ciment

Nous avons utilisé un seul type de ciment Portland CEM II/B 42,5 provenant De la cimenterie de Lafarge à M'sila en Algérie. Ainsi, la qualité de ce ciment constitue une constante au niveau des paramètres d'étude. Sa résistance minimale en compression à 28 jours est de 42,5MPa avec une résistance à la compression à 28jours de 45.55MPa. La résistance à la compression a été réalisée sur un mortier normalisé [EN 196-1] [61]. les résultats analyses chimiques et Minéralogiques physiques et mécaniques sont présentées dans le tableau 3.1 et 3.2 respectivement.

Tableau 3.1: Analyses chimiques et Minéralogiques de ciment.

Composition chimique (%)											
Element	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO ₃	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	PAF	P ₂ O ₅	TiO ₂
(%)	61.59	1.66	4.59	2.85	1.68	2.16	0.15	0.67	7.87	0.15	0.22
Composition Minéralogique (%)											
C ₃ S			C ₂ S			C ₃ A			C ₄ AF		
67.85			2.29			7.33			8.67		

Tableau 3.2: Caractéristiques physiques et mécaniques du ciment.

	ρ app (kg/m ³)	ρ abs (kg/m ³)	Finesse SSB	Début de prise (min)	Fin de prise (min)
CEM II/B 42,5	1089	2900	4464	150	425

3.2.1 Le laitier

Dans cette étude nous avons utilisé le laitier granulé de haut fourneau du complexe sidérurgique d'El Hadjar (W. Annaba) comme ajout. (Figure 3.1). Le laitier est obtenu après refroidissement brusque avec le jet d'eau et chute dans un grand bassin, il se présente sous forme de grains sphériques de classe granulométrique 0/5 mm, de couleur jaune claire. L'analyses chimiques (tableau 3.4) et physique (tableau 3.5) ont été fourni par le laboratoire de chimie de la cimenterie de Hadjar Soud.



Figure 3.1: Échantillons de laitier d'El Hadjar.

Tableau 3.3: composition chimique de laitier.

Element	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	K ₂ O	SO ₃	Na ₂ O
(%)	40.10	6.0	2.00	42.20	4.70	2.60	1.20	0.15	1.20

Tableau 3.4: composition physique de laitier.

	classe granulométrique (mm)	ρ_{app} (kg/m ³)	ρ_{abs} (kg/m ³)	Le taux de vitrification [%]
Laitier d'El Hadjar	0/5	1000	2800	97

3.2.2 Sable

Les sables utilisé dans cette étude sont destiné à la confection du mortier autoplacant, les échantillons des différents types de sables sont donnés sur la figure 3.1, le premier est de baghlia (S₁), il se caractérise par sa granulométrie dont la dimension maximale D n'excédant pas à 5 mm, sont module de finesse de 3,225 a été corriger par le sable de boughzoul qui est un sable fin (S₂) de granulométrie 0/2.5 et de module de finesse

1,775 , le sable corrigé est un mélange de 50% du sable (S_1) et 50% du sable (S_2) a un module de finesse de 2,5. Le troisième sable est un sable de fonderie usé (S_3) , il provient de l'entreprise POVAL de Berrouaghuaia, de classe granulaire 0/2.5 et un module de finesse de 1,55. La figure 3.3 présente la courbe granulométrique des sable testé après séchage et tamisage par une tamiseuse électrique. Les autres caractéristiques physiques et mécaniques des sables sont données dans le tableau 3.6.



Figure 3.2: Échantillon des différents sables : sable corrigé, sable de Baghlia, sable boughzoul et sable de fonderie.

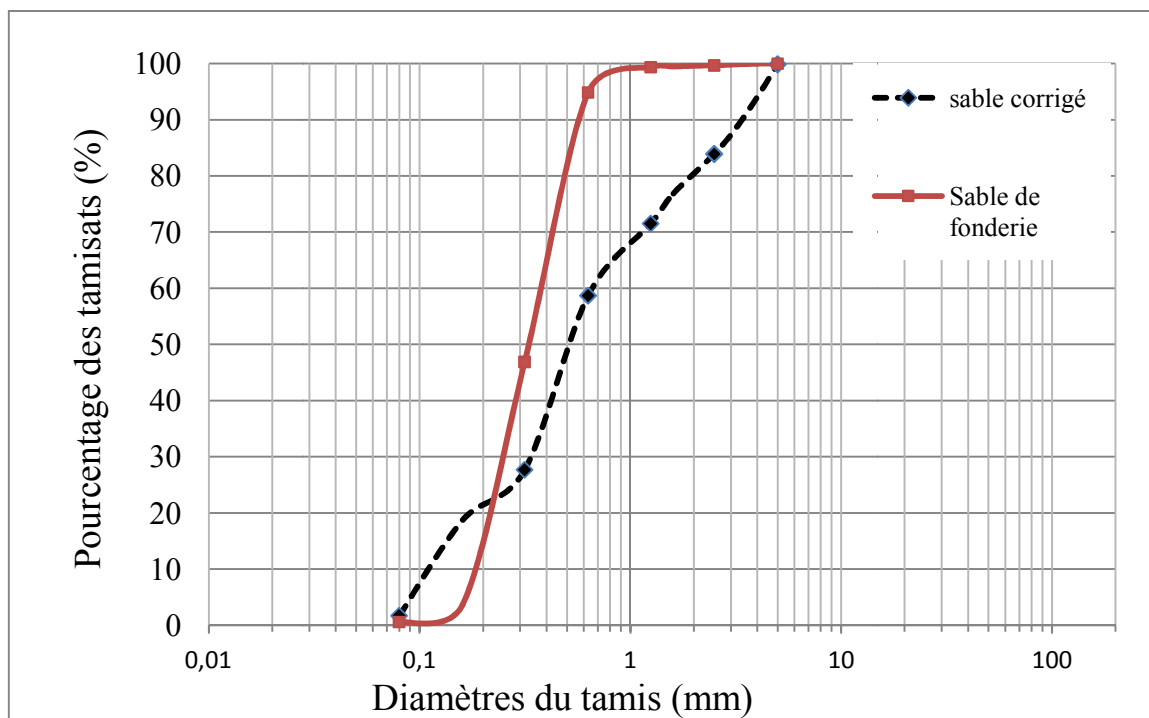


Figure 3.3: Courbes granulométriques des sables utilisés.

Tableau 3.5: Caractéristiques physiques et mécaniques des sables.

Granulats	Sable de bougezoul	Sable de baghlia	Sable corrigé	Sable de fonderie	Norme
Masse volumique apparente (kg/m ³)	1500	1680	1660	1351	NF P 18-554
Masse volumique absolue (kg/m ³)	2600	2680	2600	2316	NF P 18-555
Module de finesse(MF)	1.66	3.39	2.5	1.51	NF P 18-598
Equivalent de sable piston(%)	69.87	70.63	/	7.63	NF P 18-598
Equivalent de sable visuel(%)	72.43	72.43	/	/	NF P 18-598
Coefficient d'absorption	1,5	1,5	1,5	1.8	NF P 18-554

3.2.3 Superplastifiant

Nous avons utilisé le super-plastifiant MEDAFLOW 30 (GRANITEX) sous forme de liquide brune, conçu à base de polycarboxylates, il est un haut réducteur d'eau de la troisième génération (Figure3.4). Les caractéristiques de ce superplastifiant sont données par le tableau 3.7.



Figure 3.4: Superplastifiant.

Tableau 3.6: Caractéristiques du superplastifiant.

Masse volumique	1100 kg/m ³
PH	6-6.5
Teneur en chlores	< 0.1 g/l
Pourcentage d'extrait sec en masse	30 %
Plage de dosage recommandée	0.5 à 2.0 %

3.2.4 Eau de gâchage

Nous avons utilisé l'eau de robinet, qui contient peu de sulfate et dont la température est de $20^{\circ} \pm 1^{\circ}C$. Nous supposons que sa qualité répond à toutes les prescriptions de la norme [EN 1008] en matière de béton.

3.3 Formulation du mortier autoplaçant

On a utilisé la méthode japonaise d'OKamora pour formuler le mortier autoplaçant cette méthode est basée sur l'optimisation des mortiers.

Cette méthode consiste d'abord à fixer le dosage de sable dans le mortier, ensuite de procéder à l'optimisation de la pâte de ciment afin de donner au mortier résultant les meilleures performances et pour satisfaire les critères d'ouvrabilité.

On détermine par précision la quantité nécessaire pour chaque matériau. Le rapport Eau/Liant étant considéré comme le plus important dans la formulation, il est fixé à 0.40, ensuite nous avons abordé l'optimisation de dosage du SP par l'essai de mini cône et l'essai de V-funnel afin d'obtenir un mortier autoplaçant homogène et stable, puis on passe directement à la confection des MAP à base de sable de fonderie et de laitier. la formulation des MAP est déterminé à partir d'un programme Excel d'aide à la formulation Annexe A. La méthode de malaxage est la même pour tous les mélanges du mortier dont la procédure est comme suivie (Figure 3.5) :

- On a utilisé un malaxeur à mortier pendant une minute pour malaxer à sec le ciment et le sable.
- Malaxage du mélange avec la première quantité d'eau (70%) pendant une minute.
- Malaxage pendant une minute avec le mélange de superplastifiant et le restant de l'eau (30%).
- Malaxage du mélange pendant 3 minutes.

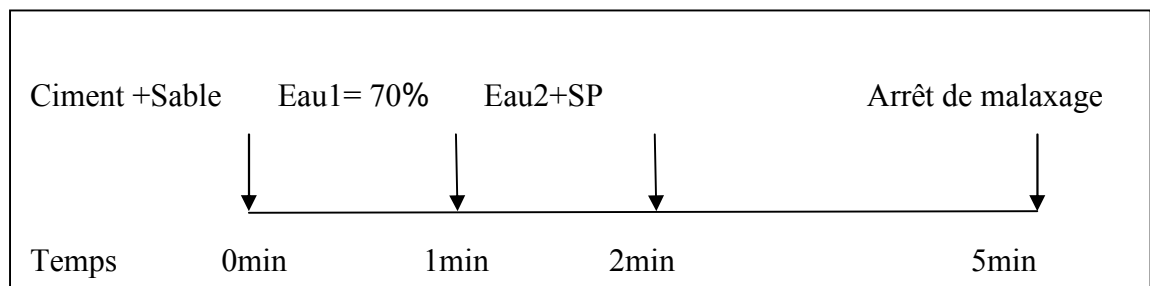


Figure 3.5: Séquence malaxage de mortier autoplaçant.

3.4 Essais réalisés sur MAP

3.4.1 Essais à l'état frais

- Essai d'étalement au Mini-cône :

Selon les recommandations de l'EFNARC [62], l'essai d'étalement consiste à remplir le mini cône placé sur une surface horizontale lisse, une fois le cône est soulevé, le diamètre d'étalement du mortier est mesuré suivant deux directions perpendiculaire pour retenir la moyenne, la figure 3.6 montre le dispositif de l'essai d'étalement pour mortier. Le diamètre de l'étalement du mortier doit être compris entre 270 et 330 mm pour avoir un mortier autoplçant.

Le D_{moyen} est calculée comme suit :

$$D = \frac{D_1 + D_2}{2} \quad (3.1)$$



Figure 3.6: Essai d'étalement pour mortier autoplçant.

- Essai V- funnel :

L'objectif de cet essai est de mesuré le temps d'écoulement entre l'instant de l'ouverture de l'orifice de l'entonnoir rempli avec 1.1 litres et l'instant de l'apparition de la première lumière en regardant verticalement vers le bas de l'entonnoir. La figure 3.7 montre le dispositif de l'essai de V-funnel pour mortier.



Figure 3.7: Essai V- funnel pour mortier autoplaçant.

3.4.2 Essais à l'état durci

Après les tests sur mortier autoplaçants à l'état frais, le mortier est versé dans des moules pour fabriquer des éprouvettes prismatiques de (4x4x16 cm³) puis arasé et recouvert avec de film en plastique pour les protéger de l'évaporation de l'eau. 24 heures après, les éprouvettes sont démoulés et conservés dans l'eau au laboratoire à une température moyenne de $20\text{C}^{\circ} \pm 2\text{C}^{\circ}$ jusqu'au moment d'essai.

➤ Essai de compression

Les essais des résistances à la compression sont effectués conformément à la norme NF EN 196-1 sur des demi-prismes d'après rupture en flexion avec les faces latérales du moulage sous une section de 40x40 mm² à deux échéances 28 et 90 jours à l'aide d'une presse hydraulique (CONTROLAB) dont la capacité maximale est de 250 kN en compression. L'essai de compression consiste à soumettre l'éprouvette de mortier à l'écrasement par compression uni-axiale, la mise en charge doit se faire d'une manière continue jusqu'à la rupture de l'éprouvette (Figure 3.8).



Figure 3.8: Essai de la résistance à la compression.

➤ Essai de flexion :

L'essai de flexion a été mené sur les éprouvettes de mortier prismatiques ($4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$) avec une presse de la société CONTROLAB d'une capacité de 250 kN (Figure 3.9).

Deux échantillons ont été testés par formulation, imposer une vitesse de chargement de 50 N. s-1. Suivant la norme NF EN 196-1 [61] l'éprouvette est placée sur le bâti de la presse avec une distance de 100 mm entre les deux appuis, elle est ensuite sollicitée jusqu'à sa rupture.



Figure 3.9 : Essai de la résistance à la traction par flexion.

3.4.3 Essai de durabilité

➤ Absorption capillaire

L'essai de l'Absorption capillaire consiste à mesurer le taux d'absorption de l'eau des éprouvettes de mortier sans pression hydraulique, mais avec succion capillaire des éprouvettes prismatiques de ($4 \times 4 \times 16$) cm^3 . L'essai est effectué selon les recommandations de la procédure d'ASTM C1585-11[63] (Figure 3.10). Le résultat est la moyenne de 2 mesures pour chaque échantillon. Après une cure humide d'un âge approprié, les éprouvettes ont été séchées dans une étuve ventilée à $80 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$, jusqu'à ce que la variation de la masse entre deux pesées soit inférieure à 0.1%. Les faces latérales des éprouvettes ont été surfacées par une résine de type Meda Poxxy colle, pour assurer un écoulement unidirectionnel et éviter l'évaporation latérale de l'eau absorbée. Après le séchage les échantillons sont posés sur leur base, à l'aide des cales d'au moins 1cm d'épaisseur, dans un bac où le niveau d'eau est maintenu constant (environ 2 à 3 mm au-dessus de la base de l'éprouvette) pendant toute la durée de l'essai. L'absorption est mesurée après (1, 5, 10, 20, 30min, 1, 2, 3, 4, 5, 6h, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 jours), on relève le poids de chaque éprouvette

après l'avoir essuyée d'un chiffon humide, Enfin le coefficient d'absorption capillaire est défini par l'équation suivante :

$$I = \frac{(M_x - M_0)}{a \times d} \text{ [mm]} \quad (3.2)$$

Où :

I : coefficient d'absorption capillaire (mm).

M_x : masse de l'éprouvette à une échéance donnée (g).

M_0 : masse initial de l'éprouvette (g).

a : section de l'éprouvette (mm^2)

d : densité de l'eau (g/mm^3)

Le coefficient de sorptivité (s) du mortier peut être déterminé de l'expression suivante :

$$S = \frac{(Q/A)}{\sqrt{t}} \quad (3.3)$$

Où :

S : coefficient de sorptivité du spécimen ($\text{cm}/\text{s}^{1/2}$).

Q : le volume d'eau adsorbé (cm^3).

A : surface du spécimen en contact avec l'eau (cm^2).

t : temps écoulé (s).

On trace $\frac{Q}{A}$ en fonction de \sqrt{t} , puis on trace la régression linéaire entre $\frac{Q}{A}$ et \sqrt{t} .

Ensuite on calcule la pente de la ligne droite qui donne le coefficient de sorptivité (s) des grands pores.

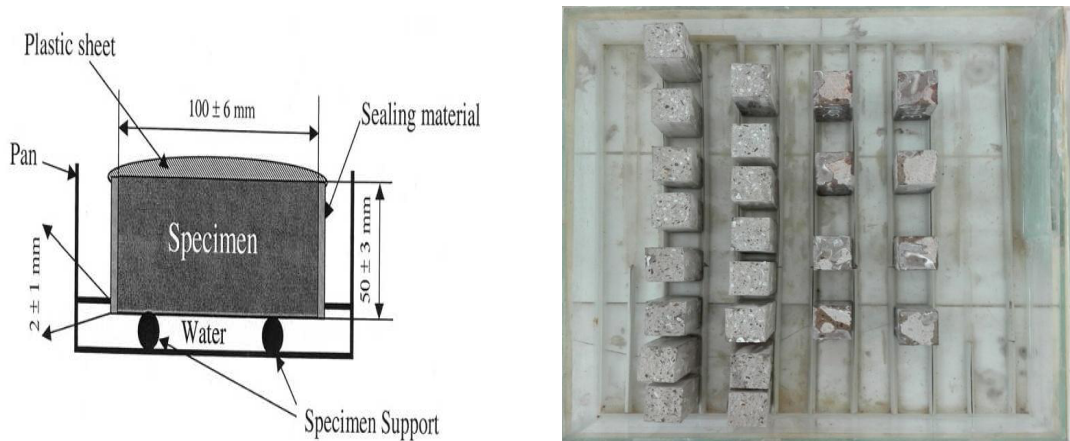


Figure 3.10 : Dispositif expérimentale de mesure d'absorption capillaire d'eau.

3.5 Récapitulatif des essais réalisés

Après caractérisation des matériaux utilisés, les proportions des mélanges ont été déterminées suivant la méthode japonaise d'okamura qui est basé sur l'optimisation de dosage en superplastifiant. Le programme expérimental réalisé et les variables étudiées sont résumés dans cette section. Cette étude expérimentale est divisée en plusieurs parties. Dans la première partie expérimentale nous avons étudié l'effet de dosage en superplastifiants sur le mortier autoplaçant à base de sable naturel. L'objectif est d'optimiser le dosage du SP par l'essai de mini cône et l'essai de V-funnel sur mortier afin d'obtenir un bon mortier autoplaçant. La procédure consiste à faire varier le de dosage en superplastifiant de 0.8 % à 1.2% de poids du ciment jusqu'à avoir l'étalement et le temps d'écoulement souhaité sans présence de ressuage.

La deuxième partie expérimentale a été consacré à l'analyse des effets de sable de fonderie utilisé comme substitution du sable en volume avec les pourcentages 0%, 5%, 10%, 20%, 30% sur les propriétés du MAP à l'état frais et durci.

Dans la troisième partie expérimentale, on va étudier l'effet de l'ajout cimentaire « laitier » sur le comportement des MAP à l'état frais et durci. Pour le mélange de mortier témoin quatre pourcentages de laitier 0%, 15%, 20%, 25% sont étudié pour savoir la limite de pourcentage de laitier utilisé. Ensuite, pour chaque autre mélange, une substitution de ciment par laitier en poids est de 0%, 15%, 20% afin de pouvoir étudier l'effet de laitier sur les propriétés des MAP à l'état frais et durci.

Des essais sur mortier pour chaque mélange ont été réalisés à courte et a long terme, notamment les essais rhéologiques sur MAP (Etalement au mini cône, Temps d'écoulement en V-funnel), les résistances mécaniques (Résistance à la flexion et Résistance à la compression) et la durabilité (Absorption capillaire).

La figure 3.11 représente l'organigramme de programme des différents essais réalisé sur MAP.

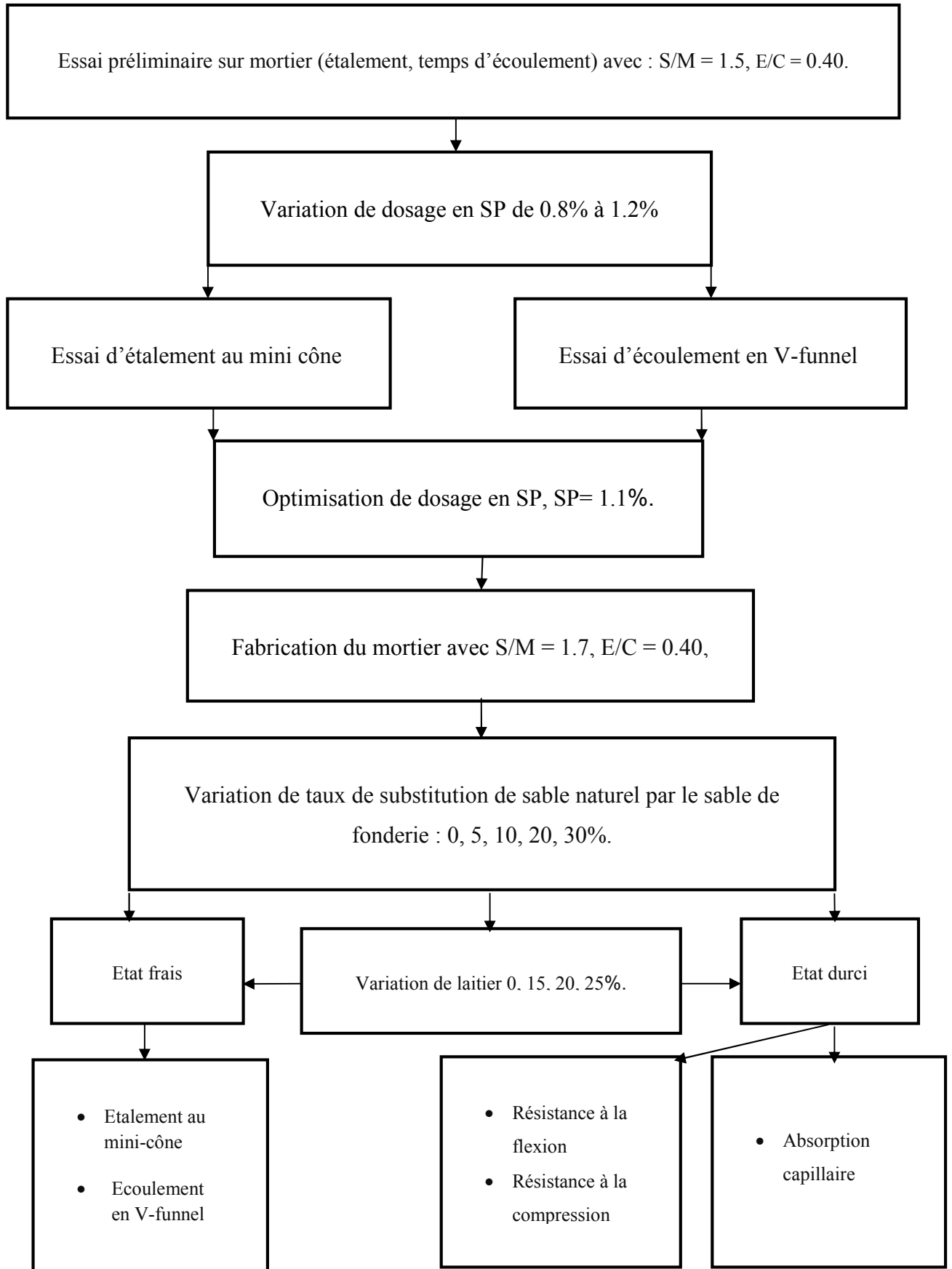


Figure 3.11 : Organigramme de la procédure expérimentale.

CHAPITRE 4
RESULTATS ET DISCUSSION

CHAPITRE 4 : RESULTATS ET DISCUSSION

4.1 Introduction

Dans ce chapitre on s'intéresse à la présentation des résultats obtenus expérimentalement. En premier lieu, nous avons commencé par présenter les résultats des essais d'ouvrabilité réalisés sur le mortier autoplacant (MAP) dans le but d'optimiser, en premier lieu, le dosage du superplastifiant afin obtenir un MAP de référence, en second lieu, pour déterminer les potentialités de la valorisation des sables de fonderie usés. L'effet de l'incorporation des granulats de sable de fonderie sur les propriétés des MAP sera présenté et discuté.

4.2 Optimisation de dosage du superplastifiant

L'utilisation des superplastifiants dans les BAP et MAP est devenue une technique indispensable pour toute application à cause des complications relatives à leurs formulations et à l'obtention des propriétés souhaitées. Cependant, leurs utilisations nécessitent une connaissance des mécanismes d'action et des précautions d'emploi, parce qu'un excès de dosage en superplastifiant provoque un risque de ressuage et de ségrégation. En revanche un dosage insuffisant de SP provoque une diminution dans la fluidité du BAP ou du MAP. Dans ce contexte nous avons abordé l'optimisation de dosage du SP par l'essai de mini cône et l'essai de V-funnel sur mortier. En effet nous avons fixé le rapport E/L à 0.40 et le rapport S/M à 0.5 et nous avons varié le dosage en superplastifiant de 0.8 % à 1.2% de poids du ciment avec différentes quantités d'eau E1 et E2. Nous avons ensuite, étudié la variation d'étalement et le temps d'écoulement d'un coulis de mortier pour chaque dosage en superplastifiant. Les différentes compositions obtenues pour 1.5 litres de mortier en fonction du rapport optimale SP/L sont présentés dans le tableau 4.1.

Tableau 4.1 : Composition des MAP en fonction du dosage en SP.

dosage en SP (%)	SP (g)	Ciment (g)	Sable (g)	Eau (g)	
				E1	E2
0.8%	6	806	1590	239	102
0.9%	7	806	1590	239	102
1%	8	806	1590	238	102
1.1%	9	806	1590	238	102
1.2%	10	806	1590	238	102

➤ Effet de superplastifiant sur l'étalement

Les résultats de l'essai d'étalement des mortiers autoplacants sont illustrés dans la figure 4.1.

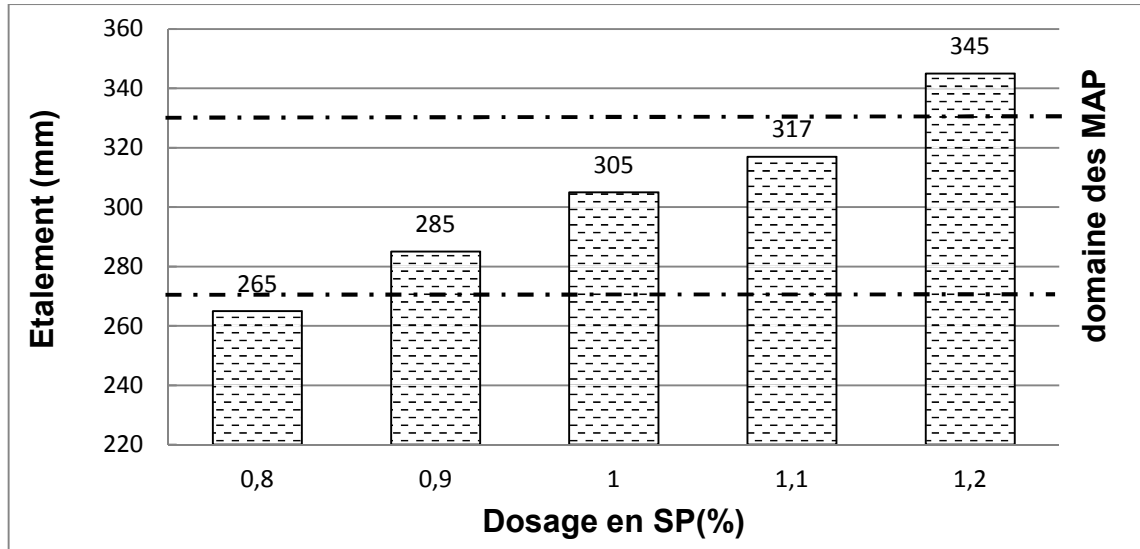


Figure 4.1 : Variation d'étalement en fonction de dosage en SP.

D'après la figure 4.1.les résultats montrent que l'étalement d'un mortier au mini cône augmente avec l'augmentation de la teneur en superplastifiant, le diamètre d'étalement augmente de 265 à 317 mm lorsqu'on augmente le SP de 0.8 à 1.1 % ce qui est acceptable sachant que pour le dosage de 1.2% l'étalement a été d'ordre de 334 mm. Donc il est dehors de l'intervalle des MAP défini par Domone et Jim [5] (280 à 330mm). En plus il a été accompagné d'un ressuaage et d'une légère ségrégation.

➤ Effet du superplastifiant sur le temps d'écoulement (V-funnel)

Les résultats de l'essai de temps d'écoulement des mortiers autoplacants sont illustrés dans la figure 4.2. Nous constatons que le temps d'écoulement en V-funnel que tous les dosages vérifient les exigences normatif ($2 < T_{vf} < 10$) et que le mortier devient plus fluide avec l'augmentation du dosage en SP, mais un excès de dosage en superplastifiant de l'ordre de 1.2% provoque une fluidité accrue et conséquemment conduit à un risque de ségrégation et de ressuaage. Ces effets négatifs affectent probablement les propriétés mécaniques du béton à l'état durci.

D'après Les résultats obtenus par les essais réalisés sur le MAP pour voir l'effet de dosage en SP sur leur comportement à l'état frais, nous allons optimiser le dosage en

superplastifiant du MAP à 1.1% de poids de ciment, lequel représente la limite supérieure admissible pour les MAP.

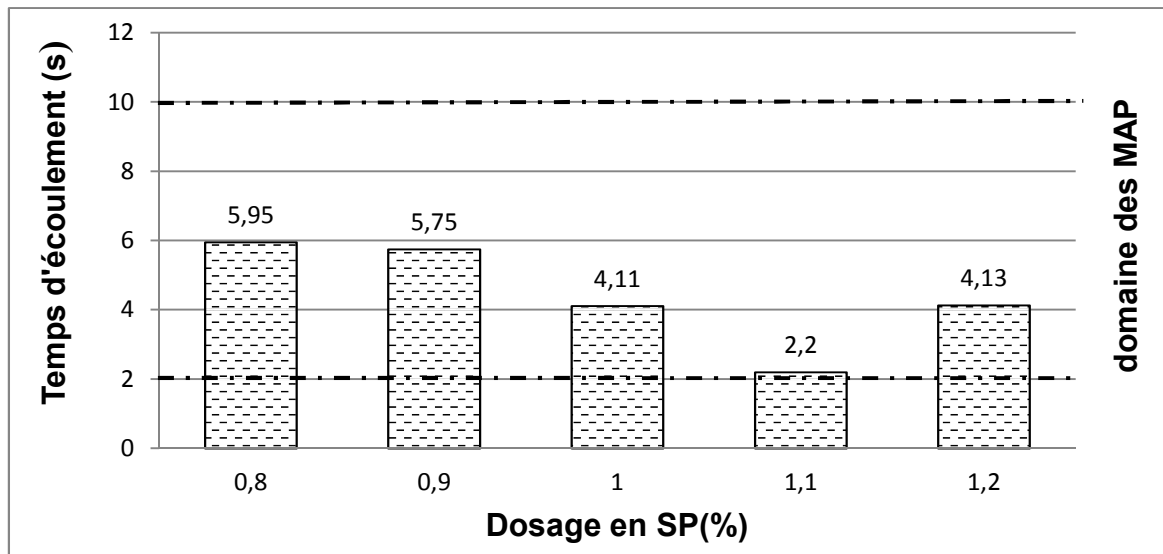


Figure 4.2 : Variation de temps d'écoulement en fonction de dosage en SP.

4.3 Effet de sable de fonderie sur les propriétés des mortiers autoplaçants à l'état frais

4.3.1 Ouvrabilité

Dans cette partie, nous allons présenter, l'effet des granulats de sable de fonderie sur les performances du MAP. Après l'optimisation de dosage du superplastifiant, nous allons commencer par la formulation du mortier autoplaçant de référence. Tout d'abord nous avons fixé le dosage du superplastifiant à 1.1% de poids du ciment. Le rapport E/L à 0.40 et le rapport S/M à 0.5 pour obtenir 1.7 litres de mortier. Ensuite, pour étudier le potentiel de l'incorporation du sable de fonderie dans la composition du MAP. Le pourcentage de sable de fonderie étant le seul paramètre variable dans tous les mélanges, nous avons partiellement substitué en volume le sable naturel par le sable de fonderie. Cinq compositions ont été élaborées dans cette partie en changeant le taux de substituant sable de fonderie de 0, 5, 10, 20 et 30%. Le tableau 4.2 récapitule tous les compositions de MAP étudiées.

Tableau 4.2: Composition des MAP à base de sable de fonderie.

Mélanges	Composition				
	Ciment(g)	Sable naturelle(g)	Sable de fonderie(g)	SP(g)	Eau(g)
MAP0	1141	2219	0	11	E1=338 E2=145
MAP5		2122.04	96.96		
MAP10		2025.1	193.9		
MAP20		1831.2	387.8		
MAP30		1637.3	518.7		

➤ L'étalement (mini cône) :

En vue d'étudier l'effet de l'incorporation du sable de fonderie dans le mortier autoplacant sur sa fluidité et sa capacité de remplissage en milieux sans obstacles, l'essai d'étalement au mini cône été réalisé (Figure 4.3).

Les résultats de l'essai d'étalement effectués sur les mortiers à base de sable de fonderie, sont présentés dans la figure 4.4. D'après cette figure, nous constatons que la fluidité du MAP a été affecté par l'ajout du sable de fonderie, le diamètre d'étalement change de 317 mm pour le mélange de référence à 204 mm pour le mélange qui contient 20% du sable de fonderie. Cela peut être dû à la morphologie des WFS qui indique des particules rugueuses, angulaires et sphériques, ce qui crée un obstacle à la capacité d'écoulement et interrompt l'écoulement régulier en raison de l'effet interne ce qui entraîne une diminution de la maniabilité [55]. En outre, selon le type de liant utilisé, l'absorption d'eau par les WFS peut être élevée dans le cas de liants naturels et faible dans le cas de liants chimiques, qui peuvent avoir un effet hydrofuge [57].

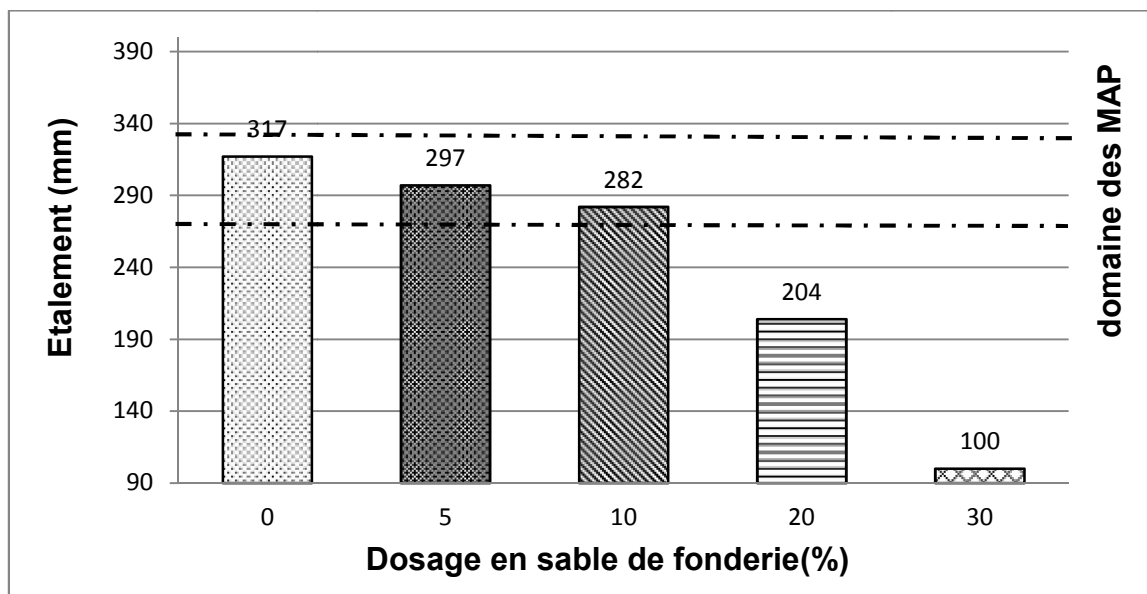
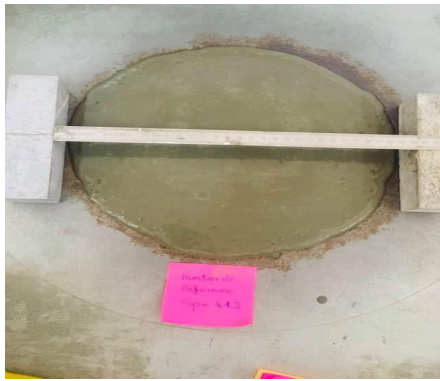


Figure 4.4 : Effet de l'incorporation du sable de fonderie dans le MAP sur l'étalement.



0% de sable de fonderie



5% de sable de fonderie



10% de sable de fonderie



20% de sable de fonderie



30% de sable de fonderie

Figure 4.3: Effet de l'incorporation du sable de fonderie dans le MAP sur le diamètre d'étalement.

D'après les résultats des essais à l'état frais, diminution de la fluidité des mortiers avec l'augmentation du taux de substitution du sable par le déchet sable de fonderie. En effet, jusqu'à 10 % de substitution la diminution n'est pas importante, le mortier répond aux exigences des mortiers autoplaçants de point de vue fluidité et mise en œuvre. Au-delà de 20 % de substitution, les mortiers ne sont plus considérés des MAP. Donc, le taux de substitution du sable de fonderie doit être limité à 10% pour assurer la maniabilité requise.

➤ Le temps d'écoulement (V-funnel) :

Les résultats de la variation du temps d'écoulement des mélanges de MAP avec le V-funnel en fonction de dosage en sable de fonderie sont présentés dans la figure 4.5. Le temps d'écoulement varie de 2.2 à 10.15 s, ce comportement corrobore les résultats précédents obtenus sur les différents tests caractérisant le mortier autoplaçant à l'état frais. En effet, la fluidité du mortier se réduit sous l'effet de la présence du sable de fonderie alors que la viscosité augmente. L'abaissement de la fluidité et l'augmentation de la viscosité du MAP peuvent être expliquées par la finesse du sable de fonderie qui présente une surface spécifique élevée par rapport au sable naturel. [53] En plus la morphologie des WFS indique des particules rugueuses, angulaires et sphériques, ce qui crée un obstacle à la capacité d'écoulement et interrompt l'écoulement régulier en raison de l'effet interne ce qui entraîne une diminution de la maniabilité [55].

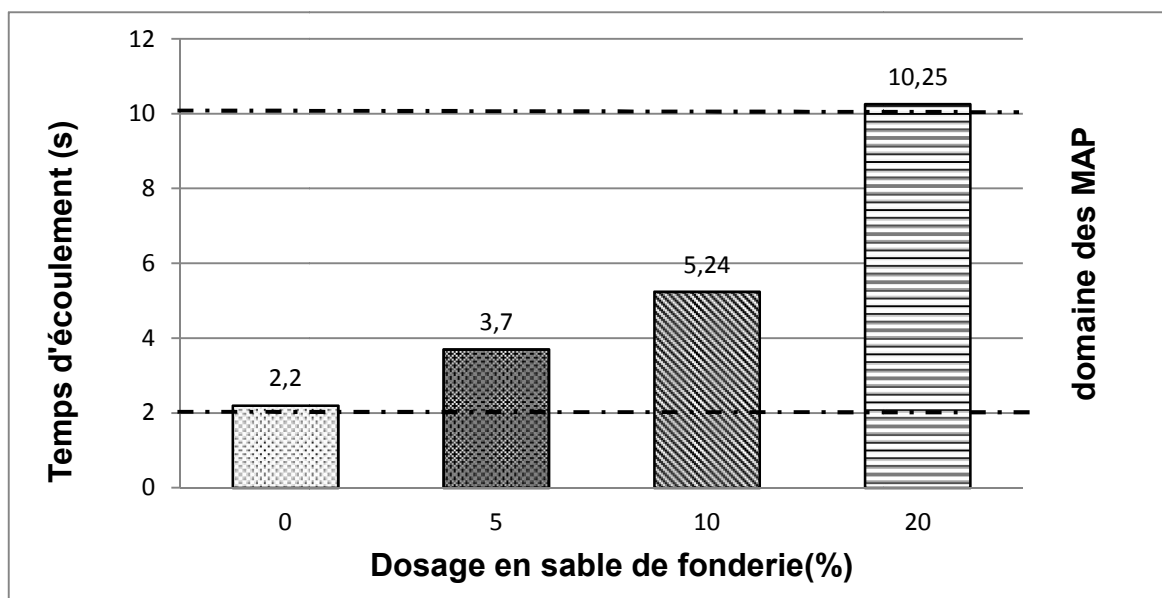


Figure 4.5 : Effet de l'incorporation du sable de fonderie dans le MAP sur le temps d'écoulement.

4.4 Effet de sable de fonderie sur les propriétés mécaniques des mortiers autoplaçants à l'état durci

La détermination des propriétés mécaniques est une étape essentielle dans un processus de caractérisation des matériaux cimentaires. De ce fait la résistance à la compression et à la traction par flexion à 28 et 90 jours a été respectivement déterminée pour chacune des teneurs en sable de fonderie sur des éprouvettes prismatiques de (40*40*160) cm².

4.4.1 Résistance à la compression

Les résultats obtenus de l'essai de la résistance à la compression à 28 et 90 jours sont présentés dans la figure 4.6.

D'après les résultats obtenus, on remarque que la résistance à la compression augmente en fonction de temps et avec l'augmentation du dosage en sable de fonderie. la valeur de la résistance à la compression la plus élevée enregistrée est de l'ordre de 54.275 MPa, 68.925 MPa pour le mortier de 20% de substitution de sable à 28 et 90 jours respectivement.

A 28 jours, pour les MAP à base de 0%, 5%, 10%, 20% de sable de fonderie la résistance à la compression augmente de 51.25 MPa à 54.275 MPa.

A 90 jours, pour les MAP à base de 0%, 5%, 10%, 20% de sable de fonderie la résistance à la compression augmente légèrement de 57.112 MPa à 68.925 MPa.

L'augmentation de la résistance à la compression avec l'inclusion de SFU pourrait probablement être due au fait que SFU est plus fin que le sable naturel, ce qui se traduit par une matrice de béton plus dense, et aussi à la teneur en silice présente dans SFU [50].

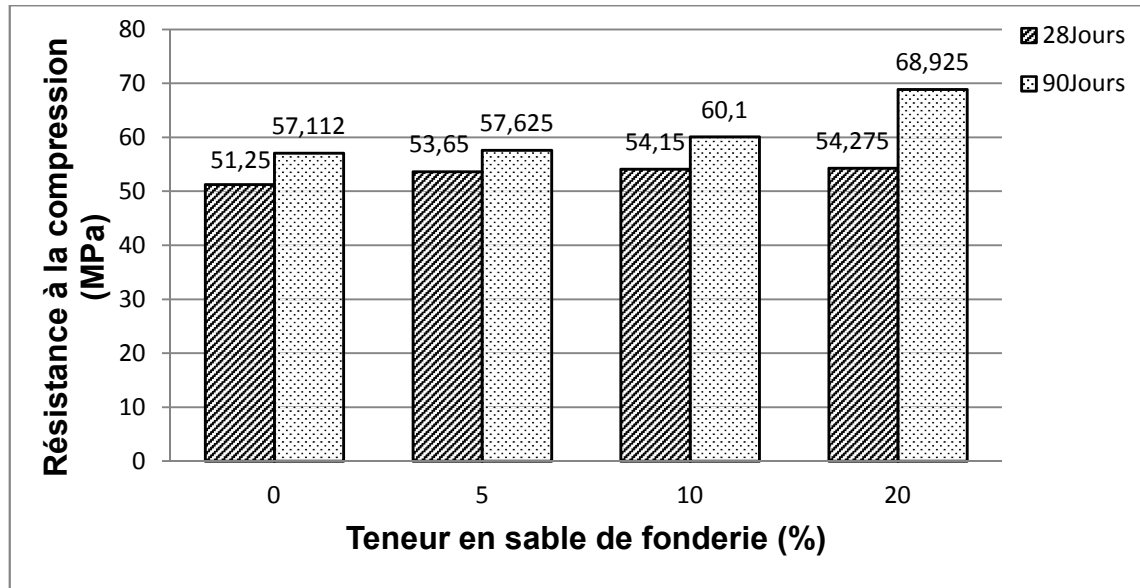


Figure 4.6 : Effet de l'incorporation du sable de fonderie dans le MAP sur la résistance à la compression à 28 et 90 jours.

4.4.2 Résistance à la traction par flexion

Les résultats de la résistance à la flexion des mortiers, sont donnés dans la figure 4.7.

D'après les résultats obtenus, on remarque que la valeur de la résistance à la flexion la plus élevée enregistrée à 28 jours est de l'ordre de 8.105 MPa pour le mortier de 5% de substitution de sable, pour le cas de la substitution du sable 10% et 20% par rapport au mortier témoin on remarque une diminution de la résistance à 7.675 MPa et 7.83 MPa respectivement.

A 90 jours, on remarque que la résistance à la flexion diminue de 10.1955 MPa à 8.3198 MPa avec l'augmentation de la substitution de sable par le sable de fonderie de 0% à 20% sauf que pour 10% de sable de fonderie la résistance à la flexion augmente de 10.69 MPa.

Le gain de résistance au niveau de remplacement de 5% à 28 jours et 10% à 90 jours peut être attribué à la densification du mélange [38].

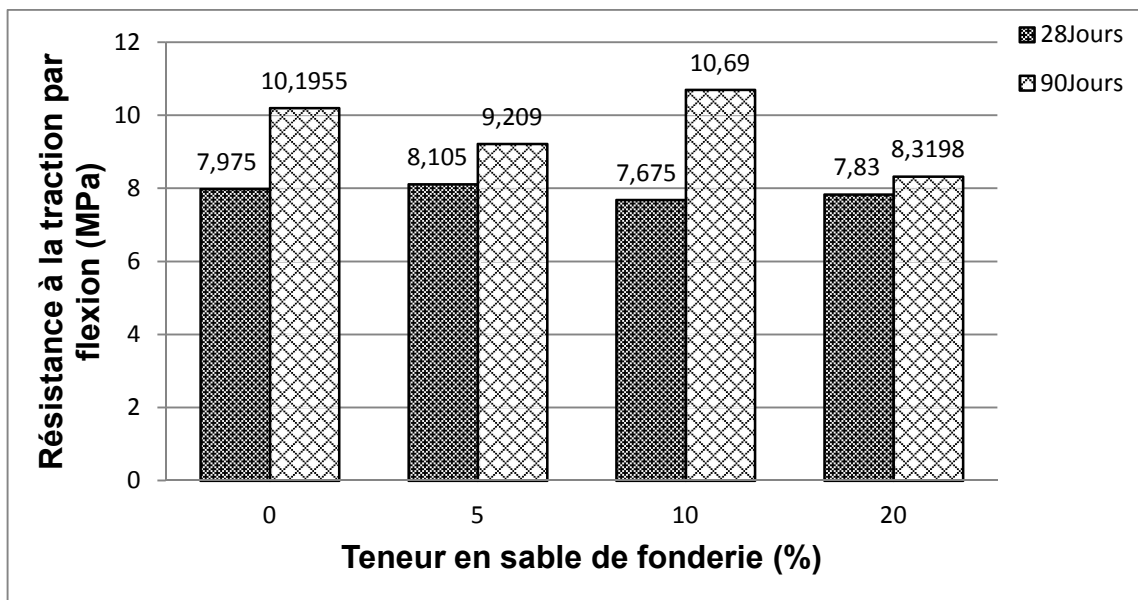


Figure 4.7: Effet de l'incorporation du sable de fonderie dans le MAP sur la résistance à la flexion à 28 et 90 jours.

4.4.3 Corrélation entre la résistance à la compression et la traction par flexion

Pour étudier l'effet de la résistance à la compression sur la résistance à la flexion, la relation entre ces deux propriétés a été présentée dans la figure 4.8.

Une corrélation linéaire est proposée entre les deux paramètres mécaniques des MAP à l'état durci à 28 et 90 jours avec un coefficient de corrélation R de 0,7376 et 0,489 respectivement.

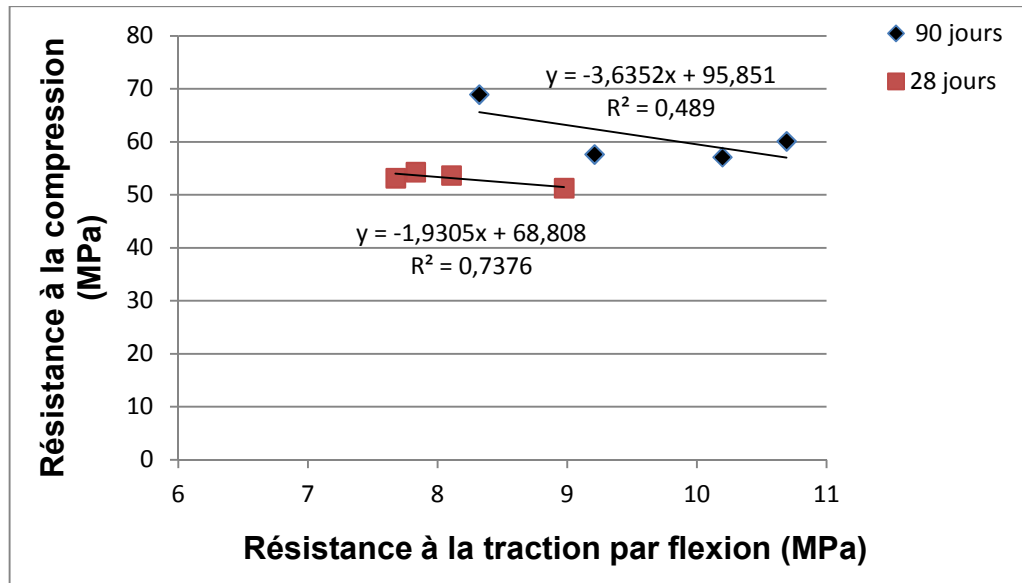


Figure 4.8: Corrélation entre la résistance à la compression et la résistance à la flexion.

4.5 Effet de sable de fonderie sur la durabilité des mortiers autoplaçants à l'état durci

4.5.1 Absorption capillaire

La figure 4.9 représente l'effet des granulats de sable de fonderie sur le coefficient d'absorption capillaire à 90 jours et la figure 4.10 représente les valeurs expérimentales de la sortivité en fonction de taux de substitution de sable naturel par le sable de fonderie, les résultats montrent que l'absorption capillaire des MAP augmente proportionnellement avec l'augmentation de la substitution de sable naturel par sable de fonderie. La valeur maximale a été observée pour le mélange de 20% SF, ces résultats indiquent que la connectivité des pores est augmentée lors du remplacement par WES [56].

Les résultats montrent que, bien qu'à des niveaux de remplacement plus élevés, il existe un risque de réduction significative de la durabilité du béton, cet effet devrait être insignifiant jusqu'à 10 % de remplacement [56].

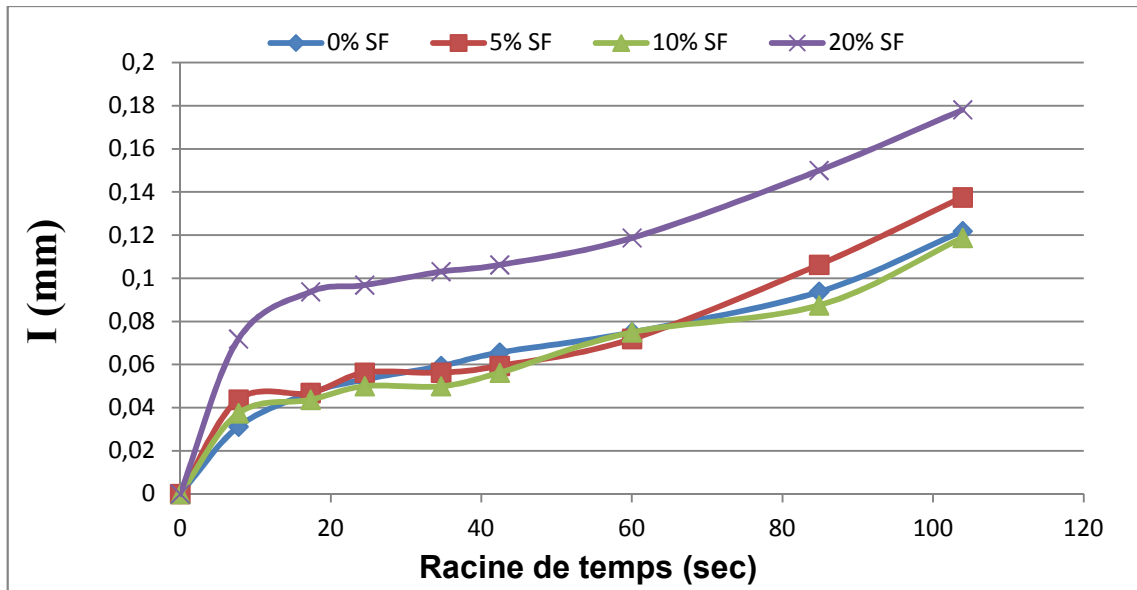


Figure 4.9: Effet de l'incorporation du sable de fonderie dans le MAP sur l'absorption capillaire à 90 jours.

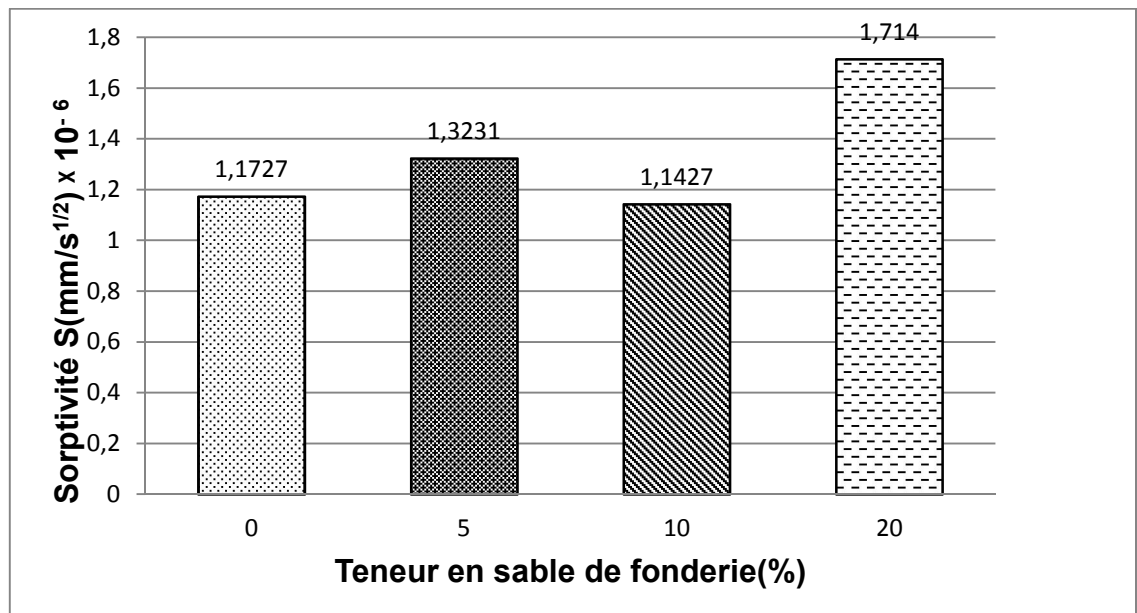


Figure 4.10: Sorptivité des grands pores des MAP en fonction de taux de substitution sable naturel par sable de fonderie à 90 jours.

4.6 Amélioration des propriétés des MAP à base de sable de fonderie par l'ajout cimentaire « laitier ».

Vu les effets négatifs de l'utilisation de sable de fonderie sur les propriétés rhéologique et mécaniques du MAP, et afin d'améliorer l'efficacité de l'utilisation de sable de fonderie dans la fabrication du MAP. Nous nous intéressons dans cette partie à l'étude et à l'évaluation de l'effet de l'ajout cimentaire « laitier » sur le comportement des MAP à l'état frais.

En effet nous avons fixé le dosage en superplastifiant à 1.1% de poids du ciment, le rapport E/L à 0.40 et le rapport S/M à 0.5 et nous avec différentes quantités d'eau E. Nous avons ensuite, étudié la variation d'étalement et le temps d'écoulement d'un coulis de mortier pour chaque dosage de substitution de ciment par le laitier. Les différentes compositions obtenues des quatre séries étudié (0%, 15%, 20%, 25% de laitier) pour 1.5 litres de mortier sont présentés dans le tableau 4.3.

Tableau 4.3: Composition des MAP à base de laitier.

Mélanges	Composition kg/m ³					
	Ciment (g)	Laitier (g)	Sable naturelle (g)	Sable de fonderie (g)	SP (g)	Eau (g)
ML0 SF0	1141	-	2219	-	11	E1=338 E2=145
ML15 SF0	969.85	171.15				
ML20 SF0	912.8	228.2				
ML25 SF0	855.75	285.25				
ML0 SF5	1141	-	2122.04	96.96		
ML15 SF5	969.85	171.15				
ML20 SF5	912.8	228.2				
ML0 SF10	1141	-	2025.1	193.9		
ML15 SF10	969.85	171.15				
ML20 SF10	912.8	228.2				
ML0 SF20	1141	-	1831.2	387.8		
ML15 SF20	969.85	171.15				
ML20 SF20	912.8	228.2				

4.6.1 Effet du laitier sut l'ouvrabilité des MAP à l'état frais

En vue d'étudier l'effet de l'incorporation du laitier sur la fluidité dans le mortier autoplacant à l'état frais, l'essai d'étalement au mini cône été réalisé (Figure 4.11).

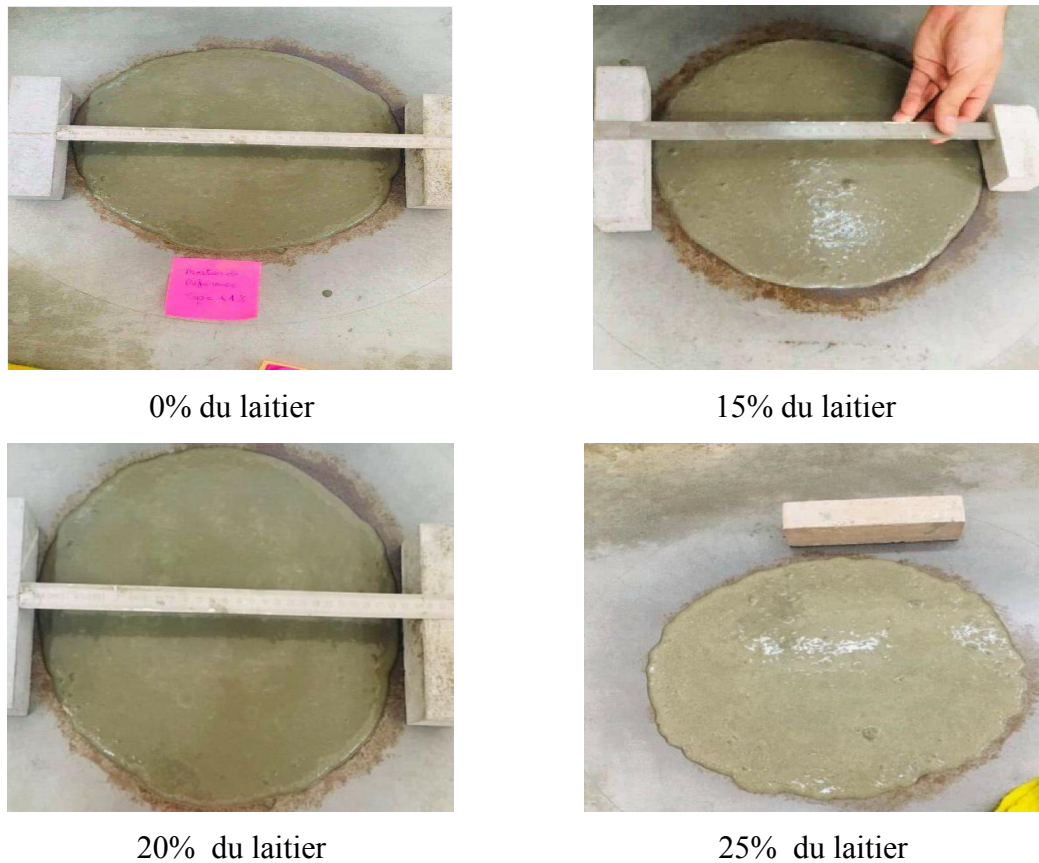


Figure 4.11 : Effet du laitier sur le diamètre d'étalement du mortier témoin.

Les figures 4.12 et 4.13 présentent respectivement la variation du diamètre d'étalement pour le mortier témoin seul et les MAP avec différents dosages en sable de fonderie en fonction du taux de substitution du ciment par le laitier.

D'après la figure 4.12 on constate que la substitution de du ciment par le laitier améliore considérablement la fluidité des MAP, pour le mortier témoin nous notons que le taux de 25% de laitier donne la plus grande valeur d'étalement mais avec un ressuage et une ségrégation. Donc on limite le taux de substitution du ciment par le laitier à 20% car il donne un bon résultat de 325 mm sans ségrégation ni ressuage, tout en restant dans la marge des valeurs correspondantes aux MAP.

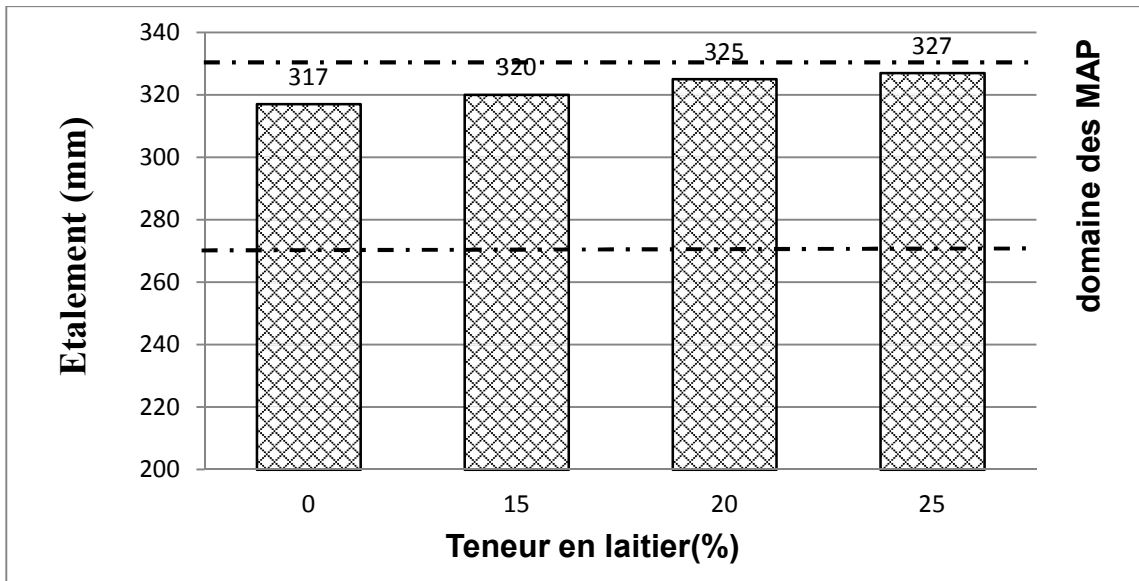


Figure 4.12: Effet de l'incorporation du laitier dans le mortier témoin sur l'étalement.

Les résultats du diamètre d'étalement des MAP à base du sable de fonderie obtenus pour un taux substitution du ciment par le laitier de 15% sont illustré dans la figure 4.13, on remarque que le laitier avec ce taux substitution à un effet négatif sur le du diamètre d'étalement des MAP, le diamètre d'étalement varie respectivement de 320, 285, 236, 200, 100 mm pour 0%, 5%, 10%, 20%, 30%, Cela peut être dû au climat chaud durent la formulation et l'essai.

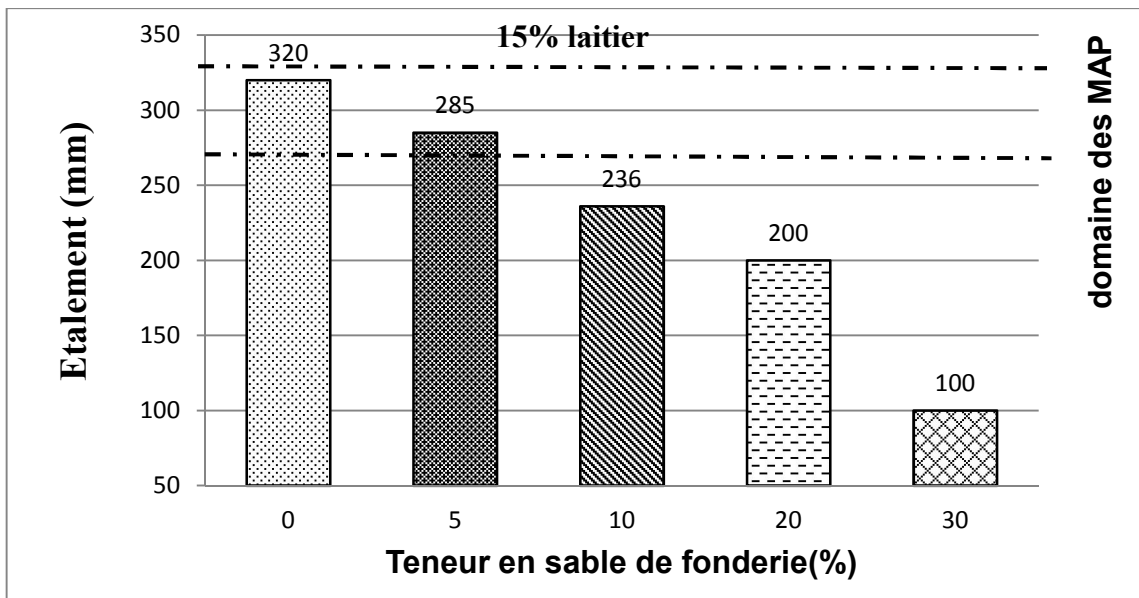


Figure 4.13: Effet du laitier sur le diamètre l'étalement des MAP à base du sable de fonderie.

4.6.2 Effet du laitier sur les résistances mécaniques des MAP à l'état durci

➤ Résistance à la compression

La variation de la résistance à la compression des MAP en fonction de la teneur en laitier (0%, 15%) et du taux de substitution de sable par sable de fonderie à 90 jours est représentée par la figure 4.14.

Au regard de la figure 4.14 la résistance à la compression des MAP évaluée à 90 jours d'une façon similaire que le mortier témoin, cependant, elle augmente en fonction du pourcentage de substitution en sable de fonderie et du teneur en laitier.

Pour les MAP à base de 0%, 5%, 10%, 20% de sable de fonderie et sans laitier la résistance à la compression augmente de 57.112 MPa à 68.925 MPa. Les MAP à base de 0%, 5%, 10%, 20% de sable de fonderie avec 15% de laitier la résistance à la compression augmente de 58.65 MPa à 69.9 MPa.

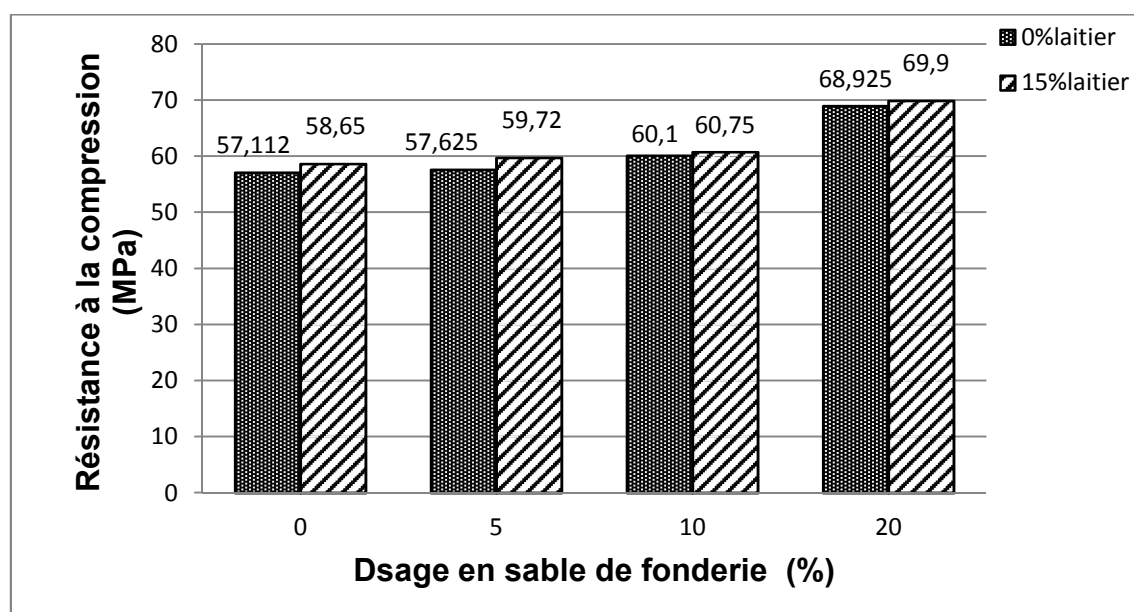


Figure 4.14: Effet du laitier sur la résistance à la compression des MAP à base du sable de fonderie.

➤ Résistance à la traction par flexion

Les résultats de la résistance à la traction par flexion à 90 jours des MAP en fonction de taux de sable de fonderie et avec 0%,15% de substitution de ciment par laitier sont donnés dans la figure 4.15.

D'après les résultats obtenus, on remarque que la valeur de la résistance à la flexion pour 0% de laitier diminue de 10.195 MPa à 8.319 MPa avec l'augmentation de la

substitution de sable par le sable de fonderie de 0% à 20% sauf que pour 10% la résistance à la flexion augmente à 10.69 MPa.

Pour 15 % de laitier, on remarque que la résistance à la flexion diminue de 8.476 MPa à 7.424 MPa avec l'augmentation de la substitution de sable par le sable de fonderie de 0% à 20% sauf que pour 5% la résistance à la flexion augmente à 12.055 MPa.

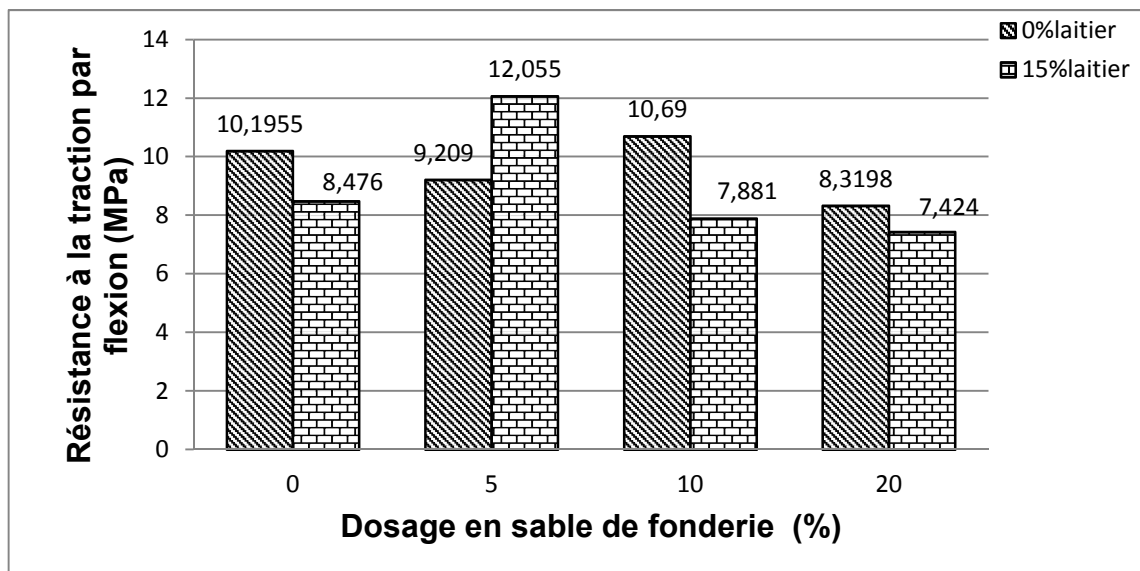


Figure 4.15: Effet du laitier sur la résistance à la traction par flexion des MAP à base du sable de fonderie.

4.7 Conclusion

Dans ce chapitre on a vu l'influence du sable de fonderie sur les propriétés des mortiers autoplaçants à l'état frais et durci, nous avons partiellement substitué en volume le sable naturel par le sable de fonderie, les résultats obtenus montrent que l'incorporation du sable de fonderie dans le MAP affecte ses propriétés à l'état frais et durci.

- ✓ Les essais d'ouvrabilités du mortier montrent que l'incorporation du sable de fonderie dans le MAP réduit son potentiel d'écoulement, si la substitution de sable naturelle par le sable de fonderie est limitée à 10% les exigences des directives européennes relative à l'ouvrabilité sont respectées.
- ✓ L'incorporation du sable de fonderie dans le MAP augmente la résistance à la compression des mélanges du MAP ce qui pourrait probablement être due au fait que SF est plus fin que le sable naturel, ce qui se traduit par une matrice de béton plus dense, et aussi à la teneur en silice présente dans SF.

- ✓ L'incorporation du sable de fonderie dans le MAP augmente la résistance à la flexion à 28 jours pour le mortier de 5% de substitution de sable, quand on dépasse ce pourcentage la résistance à la flexion diminue. En revanche, la résistance à la flexion à 90 jours diminue avec l'augmentation du taux de sable de fonderie sauf que pour 10% de substitution la résistance augmente.
- ✓ L'absorption capillaire des MAP augmente avec l'augmentation du taux de substitution de sable naturel par le sable de fonderie mais jusqu'à 10 % de remplacement l'effet est insignifiant.
- ✓ La substitution du ciment par le laitier améliore les paramètres rhéologiques des MAP avec un dosage optimal de 20%.
- ✓ L'incorporation de laitier dans les MAP améliore légèrement leurs résistances à la compression.
- ✓ La résistance à la traction par flexion avec 15% de laitier diminue avec l'augmentation de la substitution de sable par le sable de fonderie et sauf que pour 5% de sable de fonderie la résistance à la flexion augmente.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

L'objectif principal de la présente étude est d'étudier l'effet de sable de fonderie sur les propriétés du mortier autoplaçant et de déterminer l'intérêt de l'utilisation de ces derniers. Afin d'améliorer l'efficacité de l'utilisation de sable de fonderie dans la fabrication du MAP. Nous allons étudier l'effet de l'ajout cimentaire « laitier » sur le comportement des MAP. Les résultats obtenus à travers cette étude nous ont permis d'aboutir aux conclusions suivantes:

- Le dosage nécessaire pour la formulation des MAP était optimisé par l'essai de mini cône et celui de V- funnel. Le dosage optimal est de 1.1% de poids de ciment.
- L'ajout de sable de fonderie entraînait une diminution de l'ouvrabilité du mortier.
- Le sable de fonderie augmente les résistances mécaniques mais quand on dépasse certain pourcentage de sable de fonderie les résistances diminuent.
- Il existe un risque de réduction significative de la durabilité du mortier lors l'incorporation du sable de fonderie dans le MAP, cet effet devrait être insignifiant jusqu'à 10 % de remplacement.
- La substitution du ciment par le laitier améliore les paramètres rhéologiques des MAP avec un dosage optimal de 20%.
- L'incorporation de l'ajout cimentaire « laitier » dans les MAP à base de sable de fonderie améliore légèrement leurs résistances à la compression.
- Une chute dans la résistance à la traction par flexion avec 15% de laitier à été observée avec l'inclusion du sable de fonderie, sauf que pour 10% de substitution la résistance à la traction par flexion augmente.
- A travers cette étude, nous sommes limités à l'étude de l'effet de sable de fonderie sur les propriétés du MAP et à l'étude l'effet de l'ajout cimentaire « laitier » sur le comportement des MAP. Par conséquent, nous recommandons aux futurs travaux, ce qui suit :
- L'effet des ajouts cimentaires pour améliorer les propriétés rhéologiques du MAP à base de sable de fonderie reste à étudier.
- Des essais complémentaires sur le la module d'élasticité, résistance aux chocs, perméabilité, porosité.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] EFNARC, Guidelines for self-compacting concrete, London, UK Association House, (2002).
- [2] Diederiche, P., « contribution à l'étude de l'influence des propriétés des fillers de calcaires sur le comportement du béton autoplaçant », Thèse de doctorat d'Université de Toulouse III - Paul Sabatier, France, (2010).
- [3] AFGC, Recommandations pour l'emploi des bétons autoplaçants, Document scientifique et technique, (2008).
- [4] Okamura, H., Ouchi, M., Self compacting concrete development present use and future In Proceedings of the First International RILEM Symposium of Self Compacting Concrete,(1999).3-14.
- [5] De Larrard, F., Sedran, T., Hu, C., Sztikar, J., Joly, M., and Derkx, F., Evaluation of the workability of superplasticized concretes: "assessment with BTRHEOM rheometer Glasgow" Scotland, June 3-5, (1996).
- [6] Khayat, K.H., Assaad, J., and Daczko, J., Comparison of Field oriented Test Methods to Assess Dynamic Stability of Self-Consolidated Concrete, ACI Materials Journal (2004).
- [7] Domone, P.L.J., and Jin, J., proprieties of mortar for self compacting concrete, Proceeding of RILEM International symposium on self-compacting concrete, Stockholm, RILEM Proceeding PRO7, Paris, (1999), 109-120.
- [8] El-Barrak, M., « Contribution à l'étude de l'aptitude d'écoulement des bétons autoplaçants à l'état frais », Thèse de doctorat d'Université de Toulouse III - Paul Sabatier, France, (2005).
- [9] Abichou, T., Benson, C.H., and Edil, T.B., Foundry green sand as hydraulic barriers, laboratory study, J. Geotech. Geoenviron. Eng. 126 (12) (2000) 1174–1183.
- [10] Dyer, P.P.O.L., Gutierrez Klinsky, L.M., Silva, S.A., e Silva, R.A., and de Lima, M.G., Macro and microstructural characterisation of waste foundry sand reused as aggregate, Road Mater Pavement Design (2019) 1–14.
- [11] Yin, J., Soleimanbeigi, A., Likos, W.J., and Edil, T.B., Compression behavior of foundry sands, Geotechnical and Structural Engineering Congress 2016, Reston, VA, (2016), 1392-1403.
- [12] Maillard, J.L., « Evaluation de l'aptitude à l'emploi des sables de fonderie », Publication technique n°118 –CERIB (1997).

- [13] Sahmaran, M., Lachemi, M., Erdem, T.K., Yucel, H.E., and Yu, H.E., Use of spent foundry sand and fly ash for the development of green self-consolidating concrete, *Mater. Struct.*44 (2011) 1193–1204.
- [14] Parashar, A., Aggarwal, P., Saini, B., Aggarwal, Y., Bishnoi, S., Study on performance enhancement of self-compacting concrete incorporating waste foundry sand, *Constr. Build. Mater.*, 251 (2020) 118-875.
- [15] Khayat, K.H., Workability, testing, and performance of self-consolidating concrete, *ACI Materials Journal*, 96(1999) 346–353.
- [16] ACI. “ Processes, Self-Compacting Concrete”, *Advanced Concrete Technology III*, 203 (2003) 9-3.
- [17] Kaur, G., Siddique, R., and Rajor, A., Influence of fungus on properties of concrete made with waste foundry sand, *Journal .Mater. Civil Eng.* 25(2013) 484–490.
- [18] Naik, T.R., *Foundry industry by products utilization*, (1989).
- [19] Dayton, E.A., Whitacre, S.D., Dungan, R.S., and Basta, N.T., Characterization of physical and chemical properties of spent foundry sands pertinent to beneficial use in manufactured soils, *Plant Soil*, 329 (2010) 27–33.
- [20] Khatib, J.M., and Ellis, D.J., Mechanical properties of concrete containing foundry sand, *ACI Spec.Publ.*200 (2001) 733–748.
- [21] Siddique, R., Aggarwal, Y., Aggarwal, P., Kadri, E.H., and Bennacer, R., Strength, durability, and micro-structural properties of concrete made with waste foundry sand, *Constr.Build.Mater.* 25 (2011) 1916–1925.
- [22] Aggarwal, Y., and Siddique, R., Microstructure and properties of concrete using bottom ash and waste foundry sand as partial replacement of fine aggregates, *Constr.Build.Mater.* 54 (2014) 210–223.
- [23] Olutoge, F.A., Olawale, S.O.A., Gbadamosi, M.A., Strength behavior of concrete produced with foundry sand as fine aggregate replacement, *Int. J. Emerg .Technol. Adv. Eng.* 5 (2015) 35–38.
- [24] ASTM C33/C33M, *Standard Specification for Concrete Aggregates*, ASTM International. (2016) 1–11.
- [25] Naik, T.R., Kraus, R.N., Ramme, B.W., Canpolat, F., Effects of fly ash and foundry sand on performance of architectural precast concrete, *J. Mater. Civil Eng.* 24 (2012) 851-859.

- [26] Prabhu, G.G., Bang, J. W., Lee, B.J., Hyun, J.H., and Kim, Y.Y., Mechanical and durability properties of concrete made with used foundry sand as fine aggregate, *Adv. Mater. Sci. Eng.* (2015) 1–11.
- [27] Bhardwaj, B., and Kumar, P., “Waste foundry sand in concrete: A review”, *Constr. Build. Mater.* 156 (2017), 661–674.
- [28] Javed, S., Lovell, C.W., and Wood, L.E., Waste Foundry Sand in Asphalt Concrete, *Transp. Res. Rec.* 1437. (n.d.) 27–34
- [29] Naik, T.R., Singh, S.S., and Ramme, B.W., “Performance and leaching assessment of flowable slurry”, *J. Environ. Eng.* 127 (2001) 359–368
- [30] Prabhu, G.G., Hyun, J.H., and Kim, Y.Y., “Effects of foundry sand as a fine aggregate in concrete production”, *Constr. Build. Mater.* 70 (2014) 514–521.
- [31] Guney, Y., Sari, Y.D., Yalcin, M., Tuncan, A., and Donmez, S., Re-usage of waste foundry sand in high-strength concrete, *Waste Manage.* 30 (2010) 1705–1713
- [32] Singh, G., Siddique, R., Effect of waste foundry sand (WFS) as partial replacement of sand on the strength, ultrasonic pulse velocity and permeability of concrete, *Constr. Build. Mater.* 26 (2012) 416–422.
- [33] Basar, H.M., and Aksoy, N.D., The effect of waste foundry sand (WFS) as partial replacement of sand on the mechanical, leaching and micro-structural characteristics of ready-mixed concrete, *Constr. Build. Mater.* 35 (2012) 508–515.
- [34] Janardhanan, T., and Ramasamy, V., Properties of Foundry Sand, Ground Granulated Blast Furnace Slag and Bottom Ash Based Geopolymers under Ambient Conditions, (2016) 1–10.
- [35] AFS, American Foundrymen’s Society, Alternative utilization of foundry waste sand; Final Report (Phase I), 1991.
- [36] Etxeberria, M., Pacheco, C., Meneses, J.M., Berridi, I., Properties of concrete using metallurgical industrial by-products as aggregates, *Constr. Build. Mater.* 24 (2010) 1594–1600.
- [37] Sahmaran, M., Lachemi, M., Erdem, T.K., Yucel, H.E., and Yu, H.E., Use of spent foundry sand and fly ash for the development of green self-consolidating concrete, *Mater. Struct.* 44 (2011) 1193–1204.
- [38] Singh, G., Siddique, R., Abrasion resistance and strength properties of concrete containing waste foundry sand (WFS), *Constr. Build. Mater.* 28 (2012) 421–426.

- [39] Monosi, S., Tittarelli, F., Giosuè, C., and Ruello, M.L., Effect of two different sources and washing treatment on the properties of UFS by-products for mortar and concrete production, *Constr. Build. Mater.* 44 (2013) 260–266.
- [40] LS-619, Method of test for the resistance of fine aggregate to degradation by abrasion in the micro-deval apparatus, Ministry of Transportation, Ontario Laboratory Testing Manual. (1998) 1–6.
- [41] ASTM C88-05, Standard Test Method for Soundness of Aggregates by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate, ASTM International.
- [42] Naik, T.R., Patel, V., Parikh, D., Tharaniyil, M., “Utilization of used foundry sand, Characterization and product testing”, CBU-1992-20. (1992).
- [43] Javed, S., Lovell, C.W., and Wood, L.E., “Waste Foundry Sand in Asphalt Concrete”, *Transp. Res. Rec.* 1437. (n.d.) 27–34.
- [44] Fox, P.J., and Mast, D.G., “Geotechnical Performance of a Highway Embankment Constructed Using Waste Foundry Sand”, Indiana Department of Transportation, Purdue University. (1998) 1–110.
- [45] Ham, R.K., Boyle, W.C., and Blaha, F.J., Comparison of leachate quality in foundry waste landfills to leach test abstracts, *J. Hazard. Ind. Solid Waste Test. Disposal* 6(1986) 29–44.
- [46] Vipulanandan, C., Weng, Y., and Zhang, C., Designing Flowable Grout Mixes Using Foundry Sand, Clay and Fly Ash Foundry Sand, *Advances in Grouting and Ground Modification*. April (2012) 215–233.
- [47] Abichou, T., Edil, T.B., Benson, C.H., and Bahia, H., Beneficial use of foundry by products in highway construction, *Geotechnical Engineering for Transportation Projects*. (2004) 715–722
- [48] Goodhue, M.J., Edil, T.B., and Benson, C.H., Interaction of foundry sands with geosynthetics, *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 127 (2001) 353–362.
- [49] Korac, M., Possibility of used foundry sand exploitation in civil engineering, *Acta Metall. Slovaca* (2009) 620–627.
- [50] Siddique, R., De Schutter, G., and Noumowe, A., Effect of used-foundry sand on the mechanical properties of concrete, *Constr. Build. Mater.* 23 (2009) 976–980.
- [51] Naik, T.R., Kraus, R.N., Chun, Y., Ramme, B.W., Singh, S.S., and Ash, B., “Properties of field manufactured cast-concrete products utilizing recycled materials”, *J. Mater. Civil Eng.* 15 (2003) 400–407.

- [52] Bakis, R., Koyuncu, H., and Demirbas, A., An investigation of waste foundry sand in asphalt concrete mixtures, *Waste Manage. Res.* 24 (2006) 269–274.
- [53] Safi, B., Sebki, G., Chahour, K., and Belaid, A., Recycling of foundry sand wastes in self –compacting mortars: use as fine aggregates, 17th International Multidisciplinary Scientific Geo-Conference SGEM (2017)177-185.
- [54] Sebki, G., Safi, B., and Chahour, K., Recycling of foundry sand wastes in self –compacting mortars: use as cementitious materials and fine aggregates, *journal of applied engineering sciences*, 9(2019)195–200.
- [55] Sandhu, R.K., and Siddique, R., Strength properties and microstructural analysis of self-compacting concrete incorporating waste foundry sand, *Constr. Build. Mater*, 225 (2019) 371–383.
- [56] Parashar, A., Aggarwal, P., Saini, B., Aggarwal, Y., and Bishnoi, S., Study on performance enhancement of self-compacting concrete incorporating waste foundry sand, *Constr. Build. Mater*, 251 (2020) 118875.
- [57] Siddique, R., Kaur, G., and Rajor, A., Waste foundry sand and its leachate characteristics, *Resour. Conserv. Recycl.* 54 (2010) 1027–1036.
- [58] Mavroulidou, M., and Lawrence, D., Can waste foundry sand fully replace structural concrete sand, *J. Mater. Cycles Waste Manage.* 21 (2019) 594–605.
- [59] Kraus, R.N., Naik, T.R., Ramme, B.W., and Kumar, R., Use of foundry silica-dust in manufacturing economical self-consolidating concrete, *Constr. Build. Mater.*23 (2009) 3439–3442
- [60] Ashish, D.K., and Verma, S. K., Robustness of self-compacting concrete containing waste foundry sand and metakaolin: A sustainable approach, *Constr. Build. Mater.*40 (2021) 123329.
- [61] NF EN 196-1, Méthodes d'essais des ciments-Partie 1 : Détermination des résistances, (2016) P 15-471-1.
- [62] EFNARC, the European Guidelines for self-compacting concrete, in *Eur.Guidel. self-compacting concrete* (2005).
- [63] ASTM C1585-11, standard test methods for Measurement of rate of apportion of water by hydraulic-cement concrete, 41(2012)1- 6.

ANNEXE A

EXEMPLE DE CALCULE DE LA

COMPOSITION DE MORTIER

ANNEXE A

EXEMPLE DE CALCUL DE COMPOSITION DE MORTIER

A.1 Les données :

Pour un volume de mortier de $V=1.3$ l (par exemple)

Les masses volumiques absolues des constituants :

Ciment : $\rho_C = 2900 \text{ kg/m}^3$

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 $A_b = 1.5 \%$

On fixe le rapport sable/mortier $S/M = 0.5$ (exemple)

On fixe le rapport (par poids) $E/C = 0.4$

Le superplastifiant (MEDAFLOW 30) est de 30% extrait (contient 70% d'eau),

Le dosage en superplastifiant sera de : $SP\% = 0.8\%$ du poids de ciment (poudres).

A.2 Calcul d'humidité du sable :

On pèse un échantillon de sable par exemple de masse $M_1 = 100\text{g}$ (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 $M_2 = 100\text{g}$ et on calcul l'humidité du sable μ_s .

$$\mu_s = \frac{M_1 - M_2}{M_2} \times 100$$

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

$$\text{Correction} = \mu_s - A_b$$

A.3 Calcul des quantités de chaque constituant :

A.3.1 Le ciment

Le pourcentage en volume du ciment $\%C$:

$$\%C_{\text{vol}} = \frac{(1 - S/M)}{(1 + E/C \text{ par volume})} \times 100$$

La quantité de ciment C en kg :

$$C(\text{kg}) = \frac{(VXE/C_{par\ volume})}{100} \times \rho_C$$

A.3.2 Le Sable :

La quantité de sable S en kg :

$$S(\text{kg}) = \left(1 + \frac{\text{Correction}}{100}\right) X \left(\frac{VXS/MX\rho_S}{100}\right)$$

A.3.3 Le Superplastifiant

La quantité du superplastifiant Sp est :

$$Sp(\text{kg}) = \frac{\%SpXC}{100}$$

A.3.4 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 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} :

$$\%E_{vol} = \frac{(1-S/M)X 100XE/C_{par\ volume}}{(1+E/C_{par\ volume})}$$

La quantité d'eau globale E en litre :

$$E = \left(\frac{VX\%E_{vol}}{100} X \frac{\rho_E}{1000}\right) - \left(\frac{SpX70}{100}\right) - \left(\frac{VXS/MX\rho_S}{100} X \frac{\text{Correction}}{100}\right)$$

$$\text{Eau 1} \quad E_1 = E \times 0.70$$

$$\text{Eau 2} \quad E_2 = E \times 0.30$$

ANNEXE B

EXEMPLE DES RESULTATS DES

ESSAIS SUR MORTIER

ANNEXE B

EXEMPLE DE RESULTATS DES ESSAIS SUR MORTIER

**ENTREPRISE DE CONTRÔLE TECHNIQUE DES CONSTRUCTIONS
SARL TAMOUD LAB - LABORATOIRE ESSAIS DE BETON**

TELEPHONE 0771 69 68 23 - 0558 89 42 31
RC N° : 09 / 00 - 0804496 B 03 ARTICLE N° : 09077409032 - MF : 000309079028736
ADRESSE: CITE 1652 LOGTS AADL BT 04 N° 2A OULED YA'ICH BLIDA
AGREMENT N° R0311/0276/2019/03

**PROCES VERBAL D'ESSAI MECANIQUE
A LA COMPRESSION SUR PRISMES DE MORTIER
NORME NF EN 12 190**

CLIENT : ETUDIANT	N° REF: ECF 0000 / 05 - 21	
PROJET : DIVERS	FORME	PRISME
LIEU : BLIDA	EPROUV.	40X40X160mm

COMPOSITION DU MELANGE GRANULAIRE

Constituants	SABLE 1	SABLE 2	CIMENT	ADJUVANT 1	ADJUVANT 2	eau
Classe d/D	0/5					
Forme						
Provenance						PROPRE
Dosage en kg / m ³						
Dosage en L / m ³						

ESSAIS DEMANDES	ESSAIS SUR DIVERS TYPES D'EPROUVETTES	Lieu prélev.
		Mode de préle

remis au laboratoire le 18/07/2021

REFERENCES EPROUVETES	Date ESSAI	POIDS EPROUVETTES	CHARGE MAX FLEXION (KN)	COTRAINTE MAX FLEXION (MPA)	CHARGE MAX COMPRESSION(KN)	CONTRAINTE MAX COMPRESSION(MPA)
MR 0%	21/06/2021	577	15.33	6.54	80.3	50.0
		582	17.37	7.41	89.2	55.8
MR 5%		591	19.03	8.12	80.5	50.3
		593	18.96	8.09	78.2	48.9
MR 10%		591	17.65	7.53	80.6	50.4
		587	18.34	7.82	79.2	49.5
MR 20%		582	18.91	8.07	96.7	60.4
		587	17.81	7.59	87.0	54.3
					92.7	57.7
					89.9	56.1
			77.3	48.3		
			80.8	50.5		
			86.6	54.1		
			86.8	54.2		
			86.1	53.8		
			87.8	55.0		



LABORATOIRE

Les résultats des essais de la résistance à la compression et à la flexion à 28 jours.