

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES



**Faculté de Technologie
Département Génie des Procédés**



Mémoire

**Présenté pour l'obtention du diplôme Master
Spécialité : Génie des Procédés des Matériaux
Filière : Génie des Procédés**

THEME

**Elaboration et caractérisation des mortiers autoplaçants fibrés à
base du déchet de sable de fonderie**

Réalisé Par :

**CHITOUR Asma
DJABALI Hiba Erahmane**

Proposé et suivi par :

Pr. SAFI B.

Devant le Jury :

Membres du jury	Grade	Qualité	Etablissement
BENHAOUA Fayrouz	MCB	Présidente	Univ. Boumerdes
LAMRI Younes	MCB	Examineur	Univ. Boumerdes
SAFI Brahim	Pr	Encadrant	Univ. Boumerdes
BOUCHOUK Hilal	ING. Mast	Invité	LNHC- Oued Smar

Boumerdes : 2022-2023

Remerciements

Nous remercions tout premièrement Dieu, le tout puissant pour la volonté, la santé et la patience, qu'il nous a donné durant toutes ces Longues années.

*En second lieu, J'exprime toute ma reconnaissance à mes encadreurs de mémoire Pr. **SAFI IBRAHIM** Je les Remercie de m'avoir encadré, orienté, aidé et conseillé*

*Ce travail a été réalisé au laboratoire national de l'Habitant et de la Construction (LNHC)/Oued Smar –
Alger*

*On remercie infiniment monsieur **HILAL** et monsieur **NASSIM** qu'on remercie de nous avoir aidés et conseillés tout au long de la préparation.*

En fin nous remercions tous ceux qui nous ont aidés, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail tout au long de notre parcours pédagogique.

Dédicace

*A l'homme de ma vie, mon exemple éternel, mon soutien moral et
Source de joie et de bonheur, celui qui s'est toujours sacrifié pour
me voir réussir,
mon père.*

*A la lumière de mes jours, la source de mes efforts, la flamme de
mon cœur, ma vie et mon bonheur ; maman que j'adore.*

*Aux personnes dont j'ai bien aimé la présence dans ce jour, à
tous mes frères et mes sœurs Layan, Alaâ et Wissam , je dédie ce travail dont
le grand plaisir leurs
revient en premier lieu pour leurs conseils, aides, et encouragements. Aux
personnes qui m'ont toujours
aidé et encouragé, qui étaient toujours à mes côtés, et qui m'ont
accompagné durant mon chemin
d'études université, mes aimables amis surtout ma belle Nesrine*

Djabali hiba Errahmene

Dédicace

*A mon modèle de sacrifice, et l'étoile de ma vie : à ma
mère*

*Parce qu'elle est la seule digne de merci et
appréciation*

Asma chitour

Sommaire

Remerciement

Déicace

Abstract

ملخص

RESUME

Partie I Etude bibliographique

Introduction	14
Chapitre I : Généralités sur les mortiers de ciment	
I.1 Introduction	15
I.2 les bétons autoplaçants	15
I.3 Définition de béton autoplaçant fibré	16
I.4 Caractéristique des BAP à l'état frais	17
I.4.1 Essais d'Etalement (Slump Flow)	17
I.4.2 L'essai de stabilité au tamis [NF EN 12350-11]	17
I.4.3 Essai de la boîte en L	18
I.5 Caractéristique des BAP à l'état durci	19
I.5.1 Essai de résistance à la compression	19
I.5.2 Essai de résistance à la traction par flexion	19
I.6 les mortiers autoplaçants	20
I.6.1 les différents types de mortier	20
I.6.1.1 Le mortier-ciment	20
I.6.1.2 Le mortier de chaux	20
I.6.1.3 Le mortier bâtard	21
I.7 Constituants des mortiers autoplaçants fibrés	21
I.7.1 Le ciment	21
I.7.2 L'eau de gâchage	22
I.7.3 Les fibres	22
I.7.3.1 Les différents types de fibres.	22
I.7.3.1.1 Les fibres métalliques	22
I.7.3.1.2 Les fibres de polypropylène	23
I.7.3.2 Le rôle des fibres	23

I.7.4 Superplastifiant	24
I.7.5 Sable	25
I.7.6 Les additions	25
1.8 Les domaines d’application des bétons fibrés	25
1.9 Méthodes de formulation des BAP	26
Chapitre II: Sable de fonderie	
II.1 Introduction	27
II.2.1 Définition de sable de fonderie	27
II.3 Les sables de fonderie à haute réfractarité	28
II.3.1 Sable naturel	28
II.3.2 sable synthétique	29
II.4 Sable de fonderie en Algérie	29
II.4.1 Sable à vert	29
II.4.2 Sable au silicate de soude	30
II.4.3 Sable au silicate de soude avec bentonite	30
II.4.4 Sable à la résine furanique	30
II.4.5 Sables au ciment	30
II.5 Caractéristiques du sable de fonderie	30
II.5.1 Caractéristiques chimiques	31
II.6 Le moulage	31
II.6.1 Le moulage en sable	32
II.6.2 Sable utilisé	32
II.6.3 Sable à noyaux	33
II.6.4 les étapes des moules de sable	33
II.7 Les types des moules en sable	34
II.8 Les machines à mouler	34
II.9 Recycler le sable de fonderie	35

Partie II Etude Expérimentale

Chapitre III : Méthodologie et choix de matériaux

III.1	Objectif du travail	36
III.2	Caractéristique des matériaux utilisés	36
III.2.1	Ciment	36
III.2.2	Fillers de calcaire	37
III.2.3	Sable	38
III.2.4	Déchet du sable de fonderie	39
III.2.4.1	Caractéristiques du sable de fonderie	40
III.2.4.2	Caractéristiques chimiques	40
III.2.5	Superplastifiant	41
III.2.5.1	Agréments / normes	41
III.2.5.2	Domain d'application	42
III.2.5.3	Caractère généreux et avantages	42
III.2.5.4	Description du produit	42
III.2.5.5	Propriétés et effets	43
III.2.6	Eau de gâchage	43
III.2.7	Les fibres métalliques	43
III.2.7.1	Agréments / normes	43
III.2.7.2	Domaines d'application	43
III.2.7.3	Caractéristiques / Avantages	44
III.2.7.4	Description des fibres métalliques	44

Chapitre IV : Formulation des mortiers auto plaçant

IV.1	Introduction	46
IV.2	Composition du mortier auto plaçant	46
IV.3	Calcul des proportions	46
IV.4	Optimisation de la composition du béton	47
IV.4.1	Formulation du mortier auto plaçant	48
IV.4.2	Formulation du mortier auto plaçant fibrés à base de sable de fonderie	48

IV.5 Préparation de la gâchée	48
IV.6 Conservation des éprouvettes	49
IV.7 Conduite d'essais	50
IV.8 Notation des mélanges	52
Chapitre V : Résultats et interprétation	
V.1 Introduction	53
V.2 Substitution partielle de sable	53
V.2.1 Etat frais	53
V.2.2 Etat durci	56
V.2.2.1 Résistance mécaniques	56
V.2.2.a) Résistance à la traction par flexion	56
V.2.2.b) Résistance à la compression	57
V.3 Ultrason (Essai de la vitesse d'impulsion ultrasonique)	58
Conclusion Générale	
	61
Références Bibliographiques	
	62

Liste des figures

- Figure I.1** Différence entre le BAP et le BO
- Figure I.2** Béton autoplaçant fibré
- Figure I.3** Schématisation d'essai d'étalement
- Figure I.4** Schématisation d'essai de stabilité de tamis
- Figure I.5** Schématisation d'essai de boîte en L
- Figure I.6** Essai de compression d'un béton non armé
- Figure I.7** Essai de résistance à la traction par flexion
- Figure I.8** les différents types de mortier
- Figure I.9** Différents types de fibres métalliques
- Figure I.10** Fibres de polypropylènes
- Figure I.11** Illustration de l'apport du renfort par des fibres
- Figure I.12** Action des superplastifiants-Défloculation des grains de ciment
- Figure I.13** Influence de la qualité de superplastifiant sur l'étalement et la viscosité d'un béton
- Figure II.1** Déchets de sable de fonderie
- Figure II.2** Grains de sable de chromite
- Figure II.3** Grains de sable de zircon
- Figure II.4** Grains de sable de l'olivine
- Figure II.5** une boîte de moulage est remplie de sable de fonderie
- Figure II.6** Le châssis supérieur le châssis inférieur en entier
- Figure II.7** Un moule au sable fermé
- Figure III.1** Analyse granulométriques par tamisage du sable de fonderie
- Figure III.2** Déchet de sable fonderie utilisé dans cette étude
- Figure III.3** Analyse granulométrique du sable de fonderie
- Figure III.4** Les fibres métalliques et le superplastifiant utilisés
- Figure III.5** Fibres DRAMIX 50mm
- Figure III.6** Fibres DRAMIX 25mm
- Figure IV.1** Malaxeur pour des mortiers autoplaçants
- Figure IV.2** Moules de mortier autoplaçant
- Figure IV.3** conservation des éprouvettes
- Figure IV.4** Mini-cône pour mortier
- Figure IV.5** La machine d'écrasement et de flexion
- Figure IV.6** Eprouvette cubiques et prismatique
- Figure v .1** Essais d'étalement sur le mortier autoplaçant frais
- Figure v .2** Essais d'étalement sur le mortier autoplaçant (100%)
- Figure v .3** Fluidité des mortiers étudiés en fonction du taux de substitution du déchet sable de fonderie
- Figure V.4** Essai de traction par flexion
- Figure V.5** Essai de compression (Machine de l'écrasement)

Figure V.6 Evolution de la résistance à la traction par flexion des mortiers en fonction du taux de substitution de sable par déchet sable de fonderie à différent âge (28 jours)

Figure V.7 Evolution de la résistance à la compression des mortiers en fonction du taux de substitution de sable par déchet sable de fonderie à différent âge (2 et 28 jours)

Figure V.8 Appareil d'ultrason

Figure V.9 Evolution de coefficient d'élasticités dynamique des mortiers en fonction de taux de substitutions de sable par déchets sable de fonderie à différent âge (2J et 28J)

Liste de tableaux

Tableau III.1 Caractéristiques physiques du ciment

Tableau III.2 Composition chimique du ciment par diffraction des rayons X

Tableau III.3 Composition minéralogique du ciment par fluorescence X

Tableau III.4 Caractéristiques mécaniques du ciment

Tableau III.5 Analyse chimique du calcaire par fluorescence X

Tableau III.6 Propriétés physiques du calcaire

Tableau III.7 Caractéristiques physiques du sable a norme NF EN 933-1

Tableau III.8 Analyse granulométrique par tamisage du sable selon NF EN 933-1

Tableau III.9 Caractéristiques physiques du déchet des sables de fonderie

Tableau III.10 Analyse chimique de sable de fonderie par fluorescence X

Tableau III.11 Analyse granulométrique du déchet (la norme NF P 18-560)

Tableau III.12 Description de Superplastifiant

Tableau III.13 Description des fibres métalliques

Tableau IV.1 Composition pour 1 m³ du BAP

Tableau IV.2 Composition pour 1 m³ du mortier autoplaçant

Tableau IV.3 Composition du mortier autoplaçant (témoin)

Tableau IV.4 Composition du mortier autoplaçant à 10% de sable de fonderie

Tableau IV.5 Composition du mortier autoplaçant à 20% de sable de fonderie

Tableau IV.6 Composition du mortier autoplaçant à 50% de sable de fonderie

Tableau IV.7 Les quantités des constituants en g pour 1.6L du mortier

Tableau V.1 L'essai de l'étalement pour substitution de sable

Tableau V.2 Essais de traction par flexion des mortiers étudiés effectués à 28 jours

Tableau V.3 Essais d'écrasement des mortiers étudiés effectués à 2 et 28 jours

Tableau v.4 Les masses et les vitesses d'impulsion ultrasonique des mortiers étudiés effectués à 2 et 28 jours

Tableau v.5 Essai de la vitesse d'impulsion ultrasonique des mortiers étudiés effectués à 2 et 28 jours.

Résumé

Les déchets industriels ont trouvés leur place comme matériaux cimentaires dans la fabrication des mortiers ou des mortiers de ciment. 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 fins (sable), afin d'améliorer certaines propriétés à l'état frais telles que la fluidité ou durcissement telles que la durabilité du matériau béton. Cependant, il existe d'autres types de déchets qui nécessitent d'être recyclés, à savoir les déchets de sable de fonderie. Les déchets de sables de fonderie sont des sous-produits de l'industrie de la fonderie. Dans le procédé de moulage de pièces métalliques, les fonderies utilisent un sable fin siliceux associé à d'autres matériaux tels que l'argile ou des liants organiques. Ce sable peut être recyclé mais le nombre de réutilisations de celui-ci est limité. Quand le sable n'est plus réutilisable pour l'industrie de la fonderie, il est mis en décharge. Les sables de fonderie sont donc susceptibles de constituer une matière première d'un coût assez faible pour la fabrication des mortiers hydrauliques. Pour cette raison, les recherches continues pour trouver des constituants rentrant dans la formulation des mortiers spéciaux afin de diminuer le coût de la fabrication de ces mortiers.

A cet effet, le but de cette étude est de voir la possibilité de réutiliser le déchet du sable de fonderie (SNVI-Rouiba) en tant qu'agrégats fins (par une substitution partielle du sable naturel) pour produire du béton autoplaçant fibré (fibres métalliques). Ce travail présente une étude expérimentale sur la formulation et caractérisation physico-mécanique des mortiers auto plaçants à base de ce type de déchet.

Mots clés : Déchets de sable de fonderie, Ciment Mortier autoplaçant, Fluidité, propriétés physiques et propriétés mécaniques.

Abstract

Industrial wastes have found their place as cement materials in the manufacture of concrete or cement mortars. Among these wastes, silica fume, granulated blast furnace slag, fly ash, etc. This waste can be incorporated into the concrete as a mineral additive or fine aggregate (sand) in order to improve certain properties in the fresh state, such as fluidity or hardness, such as the durability of the concrete material. However, there are other types of waste that need to be recycled, namely the foundry sands. Foundry sands are by-products of the foundry industry. In the molding process of metal parts, foundries use siliceous fine sand combined with other materials such as clay or organic binders. This sand can be recycled but the reuse number of it is limited. When the sand is no longer reusable for the foundry industry, it is dumped. The foundry sands are therefore likely to constitute a raw material at a relatively low cost for the manufacture of hydraulic concretes. For this reason, continuous research to find constituents involved in the formulation of special concretes in order to reduce the cost of manufacturing these concretes.

To this end, the aim of this study is to reuse sand foundry (SNVI-Rouiba) as sand (by total substitution of natural sand 0-5mm) and as a cement-based addition (by partial substitution of Cement) to produce self-compacting concrete. This work presents an experimental study on the formulation and physic-mechanical characterization of self-cracking mortars and concretes based on this type of waste.

Keywords: Foundry sand, self-placing mortar, self-compacting concrete, physical and mechanical tests.

ملخص

وجدت النفايات الصناعية مكانها كمواد أسمنتية في صناعة الخرسانة أو الملاط الأسمنتي. ومن بين هذه النفايات أبخرة السيليكا وخبث أفران الصهر المحبب والرماد المتطاير... يمكن دمج هذه النفايات في الخرسانة كإضافة معدنية أو ركام ناعم (رمل) ، من أجل تحسين خصائص معينة في الحالة الجديدة مثل السيولة أو الصلابة مثل متانة مادة الخرسانة ومع ذلك ، هناك أنواع أخرى من النفايات التي يجب إعادة تدويرها ، وهي رمال المسبك.

رمال المسبك هي منتجات ثانوية لصناعة المسبك. في عملية تشكيل الأجزاء المعدنية ، تستخدم المسابك رملًا سيليسياً ناعماً مرتبطاً بمواد أخرى مثل الطين أو المواد اللاصقة العضوية. رمال المسبك هي منتجات ثانوية لصناعة المسبك. في عملية تشكيل الأجزاء المعدنية ، تستخدم المسابك رملًا سيليسياً ناعماً مرتبطاً بمواد أخرى مثل الطين أو المواد اللاصقة العضوية. لذلك من المحتمل أن تشكل رمال المسبك مادة خام منخفضة التكلفة نسبيًا لتصنيع الخرسانة الهيدروليكية. لهذا السبب يتم البحث المستمر لإيجاد المكونات التي يمكن استخدامها في صياغة الخرسانة الخاصة من أجل تقليل تكلفة تصنيع هذه الخرسانة.

ولهذه الغاية، فإن الغرض من هذه الدراسة هو رؤية إمكانية إعادة استخدام رمل المسبك (SNVI-Rouiba) كرمال (عن طريق الاستبدال الكلي للرمال الطبيعي 0-5 مم) وإضافة إسمنتية (عن طريق الاستبدال الجزئي للأسمنت) لإنتاج الخرسانة ذاتية الدمج. يقدم هذا العمل دراسة تجريبية حول التركيب والتوصيف الفيزيائي والميكانيكي للملاط والخرسانة المضغوطة ذاتيًا بناءً على هذا النوع من النفايات.

الكلمات المفتاحية: رمل المسبك ، ملاط مضغوط ذاتيًا ، خرسانة ذات ضغط ذاتي ، اختبارات فيزيائية وميكانيكية.

INTRODUCTION GENERALE

Dans le procédé de moulage des pièces métalliques, les fonderies utilisent des grandes quantités de sable, les fonderies recyclent en réutiliser avec succès le sable de nombreuse fois dans une fonderie lorsque le sable ne peu plus être réutilisé dans les fonderies il est retiré de la fonderie et est appelé ‘ sable de fonderie’. Les sables de fonderie usée sont classés comme déchets non dangereux et, par conséquent, il a une valeur économique intrinsèque importante, en particulier en termes de fer et d'acier Ces déchets peuvent être incorporés dans le béton comme ajout minéral ou granulats fin (sable)

Les sables de fonderie sont donc susceptibles de constituer une matière première d'un coût assez faible pour la fabrication des bétons hydrauliques. Pour cette raison, les recherches continues pour trouver des constituants rentrant dans la formulation des bétons spéciaux afin de diminuer le cout de fabrication de ces bétons et d'utiliser d'autres ressources afin de minimiser l'utilisation du sable de mer (cas du nord Algérie).

Le but de cette étude est de voir la possibilité de réutiliser le sable de fonderie (SNVI-Rouiba) en tant que sable (par substitution totale du sable naturel 0-5mm) 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. Une étude expérimentale a été réalisée pour évaluer les propriétés à l'état frais et durcis des mortiers autoplaçants (MAP) avec substitution ciment et sable par déchet sable de fonderie à différents rapport Le présent manuscrit est subdivisé en cinq (5) chapitres, répartis comme suit :

- Le **chapitre I** est consacré aux généralités sur les BAP et les mortiers autoplaçants.
- Le **chapitre II** décrit des notions générales sur les sables de fonderie.
- Le **chapitre III** présente la caractérisation des matériaux utilisés, à savoir les caractéristiques chimiques, physiques et mécaniques des matériaux utilisés (ciment, filler calcaire, superplastifiant, déchet sable de fonderie).
- Le **chapitre IV** est consacré à la formation des mortiers autoplaçants par la méthode des mortiers de béton équivalent (MBE).
- Le **Chapitre V** présente les résultats des différents essais et l'interprétation des résultats.

Enfin, une conclusion générale clôturera ce mémoire en synthétisant les principaux résultats obtenus dans notre travail

Chapitre I : Généralités sur les mortiers de Ciment

I.1 Introduction

Dans ce premier chapitre, Nous allons présenter une description générale sur les bétons et les mortiers autoplaçants, leur constituant et leurs propriétés essentielles ainsi que leurs particularités du point de vue propriétés à l'état frais et durci. Egalement, les mortiers autoplaçants et le béton équivalent, leurs définitions et leurs méthodes de formulation seront présentés dans ce même chapitre.

I.2 les bétons autoplaçants

Par définition, un béton auto plaçant (BAP) est un béton très fluide, homogène et stable, qui se met en place par gravitation et sans vibration se distinguent des bétons ordinaires principalement par leurs propriétés à l'état frais, qui sont le résultat d'une formulation spécifique. Cette dernière doit pouvoir concilier deux propriétés à priori contradictoires : une très grande fluidité et une bonne résistance à la ségrégation (stabilité). L'Association Française de Génie-Civil définit dans ses recommandations provisoires les BAP comme des bétons « très fluides, homogènes et stables » [1].

Un BAP doit être assez fluide pour pouvoir être mis en place avec un débit suffisant et remplir les coffrages sans apport de vibration sous l'effet de son propre poids tout en restant homogène. Cependant, lors de l'écoulement d'un béton fluide au droit d'un obstacle (par exemple, une armature de ferrailage), les gravillons ont tendance à venir en contact pour former des voûtes solides qui bloquent l'écoulement. C'est ce que l'on appelle le risque de blocage. Ainsi, le béton doit présenter une bonne résistance à la ségrégation en phase d'écoulement y compris au droit des armatures [2].

Un béton autoplaçant doit aussi avoir une bonne résistance à la ségrégation statique (une fois mis en place) jusqu'à sa prise et rester homogène afin de satisfaire aux propriétés mécaniques souhaitées. Ainsi la difficulté du cahier des charges d'un BAP est la recherche d'un compromis satisfaisant entre une grande fluidité et une bonne résistance à la ségrégation aussi bien au repos qu'en écoulement» [2].

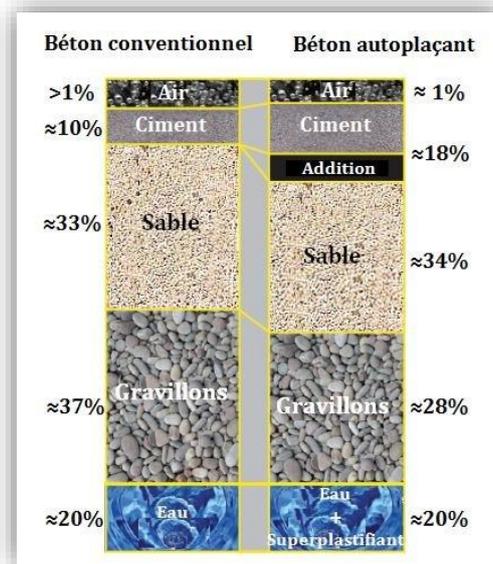


Figure I.1. Différence entre le BAP et le BO

I.3 Définition de béton autoplaçant fibré :

On appelle béton de fibres, le mélange homogène d'une matrice minérale (mortier ou béton) et d'éléments de renfort discontinu sous forme de fibres. C'est un matériau composite qui se présente sous forme d'un solide polyphasé dans lequel deux ou plusieurs constituants sont associés en vue de lui conférer, à l'échelle macroscopique et au moins dans certaines directions, un ensemble original de propriétés que les constituants pris isolément ne permettent pas d'atteindre [3].

L'incorporation de ces renforts se fait par l'inclusion directe de fibres isolées au moment de gâchage (béton de fibres) ou de la projection (cas de béton de fibres projeté). Il peut aussi contenir des ajouts minéraux ou autres adjuvants généralement utilisés avec le béton autoplaçant qui présente une solution prometteuse. En effet, ce béton de dernière génération se caractérise par une excellente maniabilité qui lui permet de se mettre en place sous l'effet de la simple gravité [3].



Figure I.2. Béton autoplaçant fibré[3].

I.4 Caractéristique des BAP à l'état frais

I.4.1 Essais d'Étalement (Slump Flow)

Il s'agit certainement le premier essai, aussi le plus simple et le plus largement pratique. Il s'agit certainement de l'essai le plus connu pour ce type de béton (figure I.3). L'étalement est mesuré sur deux diagonales. On note également le temps nécessaire pour atteindre un étalement de 500 mm (T50 en secondes). Les résultats de nos recherches et l'étude de la littérature font apparaître la bonne reproductibilité de cet essai, de même qu'une corrélation avec les valeurs d'écoulement et de viscosité. On prêtera une attention particulière au matériau constitutif de la plaque d'étalement, à sa planéité, à son humidification ainsi qu'au savoir-faire de l'opérateur [4].

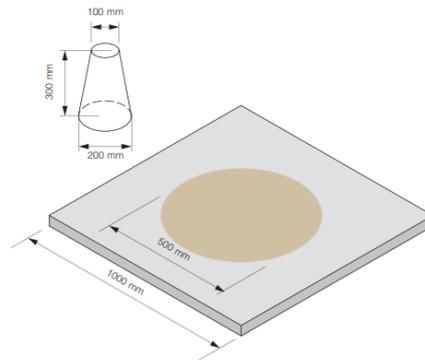


Figure I.3 Schématisation d'essai d'étalement [4].

I.4.2 L'essai de stabilité au tamis [NF EN 12350-11]

▪ Résistance à la ségrégation et stabilité du mélange.

Cet essai permet d'évaluer le risque de ségrégation « statique » et d'étudier le ressuage du BAP, qui doit être stable et conserver une composition homogène sous l'effet de la gravité. Il consiste à déverser une quantité de béton sur un tamis (de maille 5 mm) avec une hauteur de chute de 50 cm. Au bout de 15 min, on pèse le volume de laitance qui a traversé le tamis.

Le pourcentage en masse de laitance passée à travers le tamis, par rapport à la masse de l'échantillon initial, exprime la stabilité du béton. Ce rapport doit être compris entre 10 % et 20 %. Plus il est faible, plus le béton est stable. Au-delà de 20 %, le béton présente un risque de ségrégation.

Cet essai permet l'optimisation d'une formulation de BAP [5]

Les critères d'acceptabilité d'une formulation de BAP sont subdivisés en trois classes:

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

Norme d'essai : NF EN 12350-11. [5]

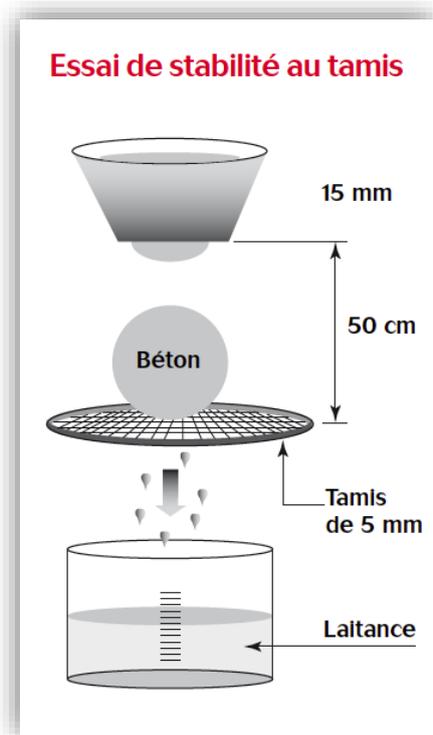


Figure I.4 Schématisation d'essai de stabilité de tamis [5]

I.4.3 Essai de la boîte en L

La boîte en « L » permet de tester la mobilité du béton en milieu confiné et de vérifier que sa mise en place ne sera pas contrariée par des phénomènes de blocage. 13 litres de béton sont mis dans la partie verticale puis on laisse le béton se reposer pendant 1 minute. La trappe est ensuite levée et le béton s'écoule dans la partie horizontale de la boîte à travers le ferrailage. A la fin de l'écoulement, on mesure les hauteurs H_1 , H_2 et le résultat est exprimé en termes de taux de remplissage H_2/H_1 [5]

Notons que les distances entre les barres d'acier représentent un ferrailage standard pour des ouvrages de génie civil très ferrillés. Selon le groupe association française de génie civil AFGC [11], le taux de remplissage doit être supérieur à **0,8**. Lorsque le béton s'écoule mal à travers le ferrailage et qu'il se produit un amoncellement de granulats en aval de la grille, c'est le signe d'un problème de blocage ou de ségrégation, il convient donc de diminuer le rapport G/S (augmenter la quantité de sable, ou diminuer celle des graviers), ou d'augmenter le volume de la pâte en maintenant le rapport E/C constant. [6]

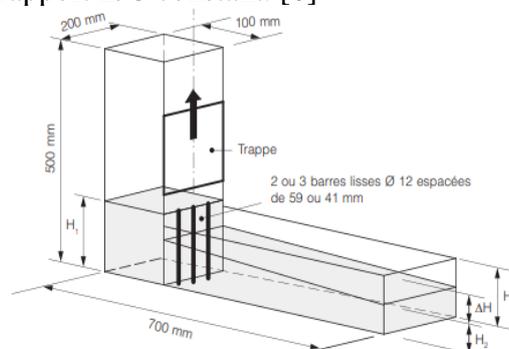


Figure I.5 Schématisation d'essai de boîte en L [4]

I.5 Caractéristique des BAP à l'état durcis

I.5.1 Essai de résistance à la compression

Selon la norme SIA 162 (Société suisse des Ingénieurs et des Architectes)

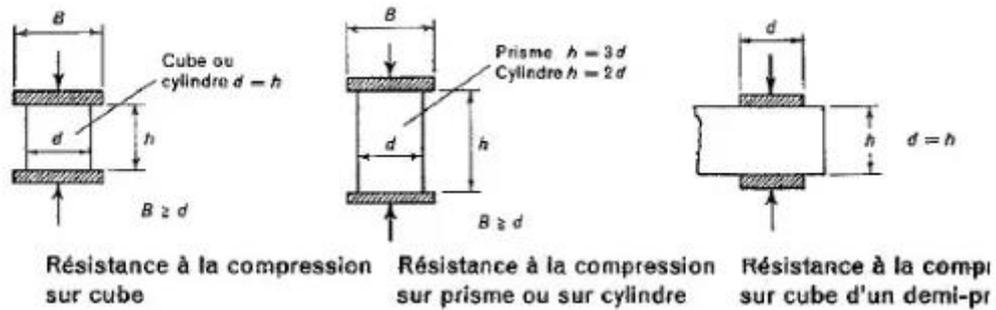


Figure I.6 Essai de compression d'un béton non armé [7].

L'essai sur cubes ou prismes se fera toujours transversalement par rapport au sens de remplissage. Les faces des éprouvettes sur lesquelles on applique la charge devront être rectifiées ou apprêtées avec un mortier si elles ne sont pas planes ou parallèles. L'apprêtage devra être aussi mince que possible et ne devra pas éclater pendant l'essai.

La résistance doit être égale ou supérieure aux valeurs exigées par les normes pour le type de béton correspondant. Les résistances sur cylindres (hauteur = 2 x diamètre) ou sur prismes (hauteur = 3 x largeur) peuvent être estimées à partir des formules suivantes.

$$f_{c,cylindre} = 0.80 \cdot f_{c,cube} \quad (h = 2d) \quad (I.1)$$

$$f_{c,prisme} = 0.75 \cdot f_{c,cube} \quad (h = 3d) \quad (I.2) [7].$$

I.5.2 Essai de résistance à la traction par flexion :

Cet essai permet de contrôler la qualité du béton ; il donne une indication sur la résistance à la traction par flexion du béton et donc sur sa résistance à la fissuration. Selon la norme SIA 162

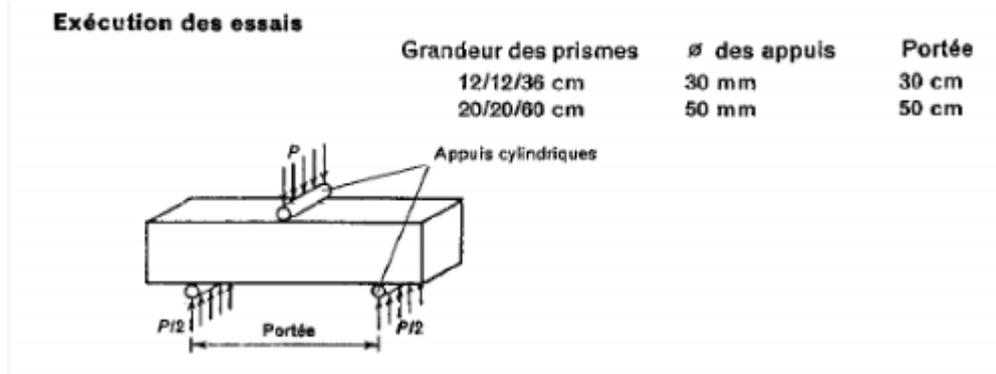


Figure I.7 Essai de résistance à la traction par flexion [7].

L'essai se fera toujours transversalement par rapport au sens de remplissage. Les faces des éprouvettes sur lesquelles on applique la charge devront être rectifiées ou apprêtées. La résistance à la traction par flexion se calcule comme suit :

$$f_{cbt} = (3 P l) / (2 b h^2) \quad (I.3)$$

Avec P: la charge maximale, l: la portée libre, b: la largeur et h: la hauteur du prisme

Les normes ne donnent pas de valeurs minimales à obtenir pour la résistance à la traction par flexion ; les exigences doivent être précisées de cas en cas. Pour le contrôle de l'aptitude au service, la norme SIA 162/1993 recommande d'utiliser pour les bétons de qualité supérieure à B35/25 une résistance à la traction valant $f_{ct}=2.5 \text{ N/mm}^2$.

$$f_{cbt} = 0.80 \text{ à } 1.0 \sqrt{f_{c,cube}}$$

$$f_{cbt} = 2.0 f_{ct} \text{ (I.4)}$$

f_{cbt} Résistance à la traction par flexion sur prisme, f_c cube résistance à la compression et f_{ct} résistance à la traction simple en N/mm^2 [7].

I.6 les mortiers auto plaçant

Une construction est généralement réalisée par éléments, dont il faut assurer la liaison ou qu'il faut protéger par un revêtement. On doit alors effectuer des scellements ou divers travaux de reprise, de bouchage, etc. Toutes ces opérations se font à l'aide d'un liant toujours mélangé à du sable, de l'eau et éventuellement un adjuvant pour obtenir un « mortier », qui se distingue du béton par l'absence de gravillons. Des compositions multiples de mortiers peuvent être obtenues en jouant sur les différents paramètres: liant (type et dosage), adjuvants et ajouts, dosage en eau. En ce qui concerne le liant, tous les ciments et les chaux sont utilisables; leur choix et le dosage sont fonction de l'ouvrage à réaliser et de son environnement [8].

I.6.1 les différents types de mortier

I.6.1.1 Le mortier-ciment

Le mortier-ciment est le produit le plus basique qui soit, indispensable pour construire un mur et lier les pierres ou briques entre elles. Il s'agit d'un mélange classique de ciment, de sable et d'eau. Pour les jointements et les scellements, on peut envisager de se passer de sable.

Ce matériau vous sera utile pour toutes les constructions classiques (murs, chapes, etc.), qui ne nécessitent pas l'usage d'un mortier spécifique. L'avantage du ciment est qu'il profite d'une excellente résistance à la compression. Il sèche également plus vite que la plupart des autres solutions.

Voici quelques recommandations pour le dosage du mortier ou du béton, en fonction de vos besoins de constructions [9].

I.6.1.2 Le mortier de chaux

La chaux est l'un des liants les plus utilisés dans les anciennes constructions. À tel point qu'on utilise encore fréquemment des mortiers à la chaux.

Il faut dire que ce type de mortier permet au mur de mieux respirer et dispose également de capacités hydrofuges (idéales pour les pièces humides). On trouve deux types de chaux :

- **La chaux aérienne** : elle a l'avantage de durcir lentement, et uniquement au contact de l'air.
- **La chaux hydraulique** : elle durcit au contact de l'eau, puis de l'air.

L'usage de chaux dans un mortier permet généralement une application plus facile, grâce à un temps de séchage un peu plus long. Ces mortiers sont cependant plus complexes à doser que le ciment [9] .

I.6.1.3 Le mortier bâtard

Ce nom qui peut sembler vulgaire désigne tout simplement un mortier qui utilise à la fois du ciment et de la chaux. L'intérêt d'ajouter de la chaux à un mortier en ciment est qu'elle rend le mélange nettement plus souple, et donc généralement plus facile à manipuler. L'inconvénient principal (mais qui n'en est pas toujours un !) est qu'un mortier bâtard met plus de temps à sécher qu'un mortier-ciment [9]

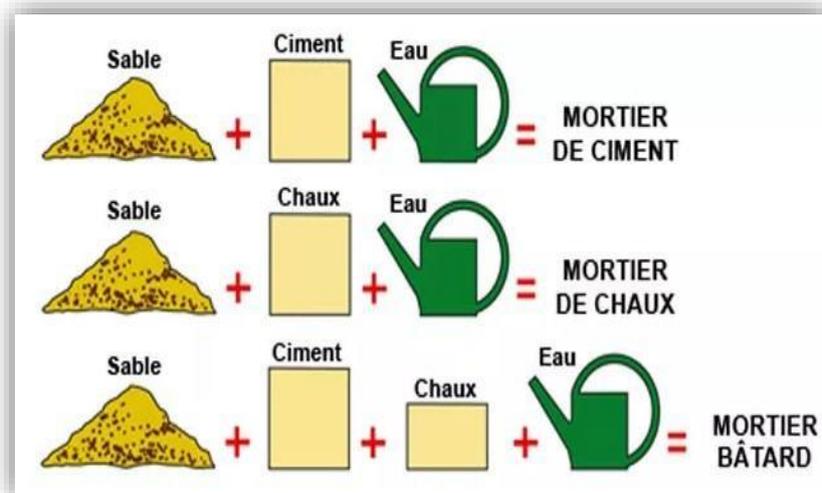


Figure I.8 les différents types de mortier [9]

I.7 Constituants des mortiers autoplaçants fibrés

I.7.1 Le ciment

Le ciment est un liant hydraulique c'est-à-dire : il est capable de faire prise, de durcir et de développer des résistances à l'air comme dans l'eau.

En principe, tous les types normalisés de ciment conviennent pour la fabrication de BAP. Cependant, l'utilisation du ciment portland (contenant seulement le clinker) nous donne toute latitude pour varier et contrôler les quantités introduites des additions minérales. Les analyses chimiques et minéralogiques du ciment sont d'une grande importance, mais elles sont souvent transparentes à l'utilisateur puisque celles-ci sont effectuées à la cimenterie et sont des critères d'assurance qualité [10].

Les ciments peuvent être classés en cinq grands principaux types à savoir :

- CEM I: Ciment Portland (CPA);
- CEM II: Ciment Portland (CPJ);
- CEM III : Ciment de haut fourneau (CHF) ;
- CEM IV : Ciment Pouzzolanique (CPZ) ;
- CEM V : Ciment au laitier et aux cendres (CLC) ;

I.7.2 L'eau de gâchage

Toute eau du réseau public d'eau potable convient pour la fabrication de béton autoplaçant.

- Les eaux usées.
- Les eaux de vannes ou contenant du détergent.
- Les eaux industrielles

I.7.3 Les fibres

Les fibres présentent, selon leur nature, des caractéristiques spécifiques, tant géométriques que mécaniques, et un comportement contrainte-déformation très différent. La capacité de renforcement d'une fibre dépend en particulier de son ancrage, de sa résistance en traction et de son module d'Young.

Chacune a une influence particulière sur les lois de comportement mécanique du béton, ce qui se traduit par des applications adaptées et spécifiques. Le choix du type de fibres est donc fonction du domaine d'application et des performances souhaitées.

Les fibres ne sont utiles que si le béton est soumis à des tractions supérieures à sa propre résistance. Si des fissures apparaissent dans le béton, elles permettent de transmettre les efforts à travers les fissures [11].

Les fibres utilisées dans la confection des bétons sont classées en quatre grandes familles selon leurs caractéristiques chimiques, physiques et mécaniques :

- fibres minérales : verre, carbone, wollastonite, basalte, mica
- fibres métalliques : acier, inox, fonte.
- fibres organiques : polypropylène, polyamide, acrylique, mélange polypropylène/ polyéthylène, kevlar, aramide, carbone.
- fibres naturelles : Hévéa, Sisal

I.7.3.1 Les différents types de fibres.

I.7.3.1.1 Les fibres métalliques

Les fibres métalliques caractérisées par un module d'élasticité élevé, par conséquent, offre au béton une meilleure résistance à la traction, au choc et améliore sa ductilité en augmentant son pouvoir de résister aux déformations dues à la rupture, de même donne une ténacité appréciable, leurs formes et leurs dimensions améliorent leur ancrage et leur adhérence (fibres, copeaux, fibres tréfilées, ondulées, déformées aux extrémités, en tête de clou) [3].



Figure I.9 fibres métalliques

I.7.3.1.2 Fibres de polypropylène

Ce sont des fibres industrielles minces, de différents couleurs, chimiquement calmes et ne réagissent pas avec les composants de mélange du béton. La résistance des fibres de polypropylène à la tension est très forte, ainsi son élasticité. Le poids spécifique est faible et ces fibres n'absorbent pas de l'eau.



Figure I.10 Fibres de polypropylènes

I.7.3.2 Le rôle des fibres

Au début, les chercheurs ont essayé, par l'addition de fibres, d'augmenter les caractéristiques mécaniques du béton comme la résistance à la compression et la résistance à la flexion, mais le résultat obtenu était limité. Il a été constaté que, le rôle principal des fibres dans un matériau cimentaire peut-être apprécié sous deux volets :

- Le contrôle de la propagation d'une fissure dans un matériau en état de service en réduisant l'ouverture des fissures (figure. I.11)
- La transformation du comportement fragile d'un matériau en un comportement ductile qui accroît la sécurité lors des états de chargement ultimes (figure I.11) [11]

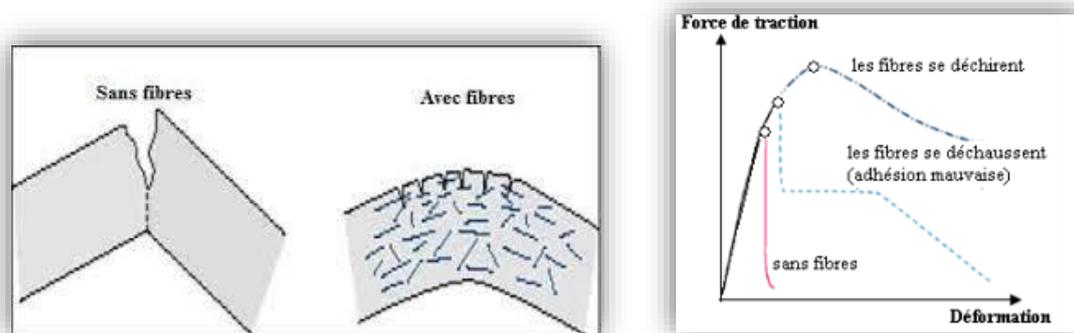


Figure. I.11 Illustration de l'apport du renfort par des fibres [11].

I.7.4 superplastifiant

Superplastifiants sont des additifs chimiques qui peuvent être ajoutés aux mélanges de béton pour les rendre plus faciles à travailler. Ils sont composés de longues molécules organiques de masse élevée. L'action principale des superplastifiants est de dé-floculer les grains de ciment. Une action de répulsion électrostatique agit en neutralisant les charges électriques présentes à la surface des grains et /ou par répulsion stérique en écartant les grains les uns des autres, grâce à des chaînes moléculaires très longues. L'eau piégée par les flocs est de nouveau disponible pour la maniabilité du béton (Figure 1). Il est alors possible de mettre en œuvre des bétons très fluides avec des rapports E/C faible [2].

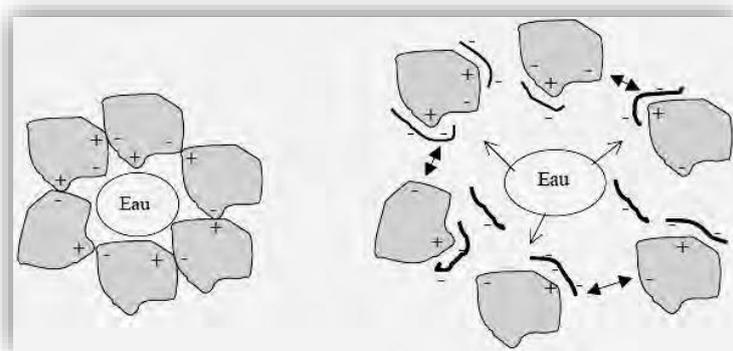


Figure I.12 Action des superplastifiants-Défloculation des grains de ciment [2].

L'ajout d'un superplastifiant aide à augmenter la fluidité. La figure 2 montre par exemple que L'étalement augmente très fortement à partir d'un certain dosage en superplastifiant [2].

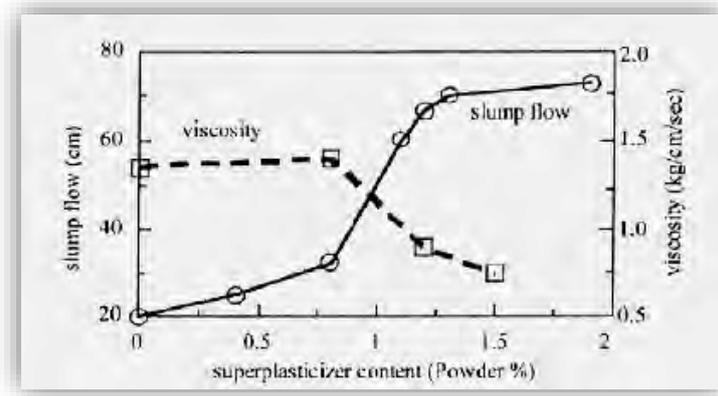


Figure I.13 Influence de la qualité de superplastifiant sur l'étalement et la viscosité d'un béton [2]

I.7.5 Le sable

Le sable, dans le domaine de la construction, avant d'être un matériau qu'on prend à la pelle ou à la truelle, fait l'objet de description et de prescriptions normatives. Pour la confection de mortiers, bétons et enduits, le sable est un granulat, qui doit être conforme à la norme NF EN 12620+A1 de juin 2008. Pour cette norme, le sable est une désignation des classes granulaires pour lesquelles D (dimension maximum) est inférieur ou égal à 4 mm. Le sable peut résulter de l'altération naturelle de roches massives ou meubles et/ou de leur concassage ou du traitement des granulats [12]

I.7.6 Les additions minérales

- **Les fillers calcaires**

Ce sont des produits secs, finement divisés, issus de la taille, du sciage ou du travail de la roche naturelle calcaire. Ce sont principalement des sous :

- produits générés
- dans l'industrie de la chaux
- lors de l'extraction de granulats calcaires
- dans l'industrie de la pierre ornementale

Les fillers calcaires peuvent être introduits à plus de 5% de la composition d'un ciment pour autant que leur teneur en calcaire soit supérieure à 75% en masse et qu'il ait une teneur en argile et en matières organiques compatible avec les exigences de la norme NBN B 12-001 .L'incorporation des fillers peut se faire en cimenterie (fabrication du ciment) ou dans la bétonnière. [13]

1.8 Les domaines d'application des bétons fibrés

Les bétons fibrés peuvent être utilisés pour une grande variété d'applications en bâtiment et en génie civil :

- béton coulé en place (dalles, planchers, fondations, voiles, pieux, etc.)
- béton préfabriqué (poutres, voussoirs, tuyaux d'assainissement, etc.)
- béton projeté (voie mouillée/voie sèche, construction et réparation de tunnels, confortement de parois, etc.)
- mortiers (prêts à l'emploi) de réparation et de scellement.

I.1.9 Méthodes de formulation des BAP

Plusieurs méthodes de formulation des bétons autoplaçants existent aujourd'hui

- **Méthode d'optimisation du mortier ou méthode « japonaise »**

Okamura and Ozawa 1995 sont les pionniers dans le développement des bétons autoplaçants de masse volumique normale (BAPN). Leur méthode de formulation considère le béton comme un composé diphasique constitué de gravillons et de mortier. Elle est basée sur l'approche volumique et vise à augmenter l'étalement et la viscosité apparente du béton en utilisant une grande quantité de fines et une adjuvantation adaptée. La méthode dite « japonaise » préconise un rapport volumique gravillons/sable autour de 1 pour limiter la quantité des gros granulats et suggère que les gravillons occupent 50 % de la densité volumique compactée du béton. De même, les auteurs fixent la quantité de sable dans le mortier à 40 % de la densité compactée du mortier afin d'assurer une ouvrabilité suffisante au mortier. [14]

Chapitre II : Sable de fonderie

II.1 Introduction

Les fonderies font fondre les métaux et alliages ferreux et non ferreux et les transforment en produits finis ou pratiquement finis en coulant et en solidifiant le métal ou les alliages en fusion dans des moules et des noyaux de sable. Le sable de fonderie est généralement un mélange de silice et argile qui, lorsqu'il est mouillé, doit prendre exactement la forme fournie par le mouleur. Pourtant, l'argile agit comme un liant et la silice est un élément réfractaire. Une fois formé, le moule doit avoir une résistance mécanique suffisante pour supporter les manipulations et résister aux chocs thermiques et à l'érosion provoqués par la coulée du métal en fusion. Après coulée, le sable doit pouvoir se séparer facilement de la pièce refroidie tout en restant le plus irréprochable possible [15].

II.2.1 Définition de sable de fonderie

Le sable de fonderie (aussi connu sous le nom de sable de moulage) est composé essentiellement de sable de silice propre de haute qualité et de granulométrie uniforme, qui est solidarisé pour former des moules destinés à couler des métaux ferreux (fer et acier) et non-ferreux (cuivre, aluminium et laiton). [16]

Le sable de fonderie est constitué de matériaux réfractaires en grains de formes différentes. L'étendue de sa plage granulométrique varie entre 0,063 mm et 2 mm (ou entre 0,075 mm et 1 mm pour d'autres auteurs). Les matériaux réfractaires peuvent être de la silice, de la chromite, du zircon, de l'olivine, de la Kerphalite ou un sable synthétique [17]. Le sable de fonderie est un élément essentiel de la préparation des moules qui concerne deux secteurs de la fonderie



Figure II.1 Déchets de sable de fonderie

II.3 Les sables de fonderie à haute réfractarité

II.3.1 Sable Natural

II.3.1.1 La chromite

La chromite est un produit minéral dont la formule générale est $FeO \cdot Cr_2O_3$. Les sables de chromite proviennent de différents gisements, sous forme de produits broyés ou naturellement sous forme de sable. La température de fusion de la chromite est de $2180^\circ C$. Le sable de chromite se présente sous la forme de grains anguleux plus ou moins sphériques [17].

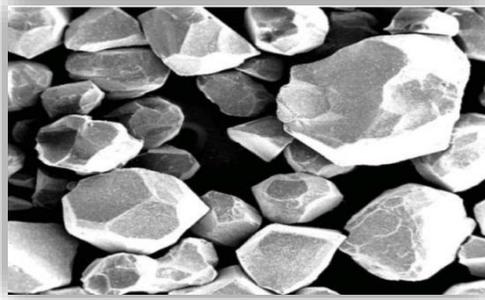


Figure II.2 Grains de sable de chromite [17].

II.3.1.2 Le zircon

Le zircon est un minéral accessoire présent dans la plupart des roches ignées et métamorphiques. Le zircon est un minéral lourd qui se concentre dans le sable des rivières à cause de sa grande dureté (7,5) et de sa tenacité [18]



Figure II.3 Grains de sable de zircon [18]

II.3.1.3 L'olivine

L'olivine est un cristal mixte formé un minéral de silicate de magnésium (Mg_2SiO_4) et de fer (Fe_2SiO_4), dans lequel le membre magnésium est généralement dominant. C'est le minéral majeur du manteau terrestre (50 %) et un des minéraux les plus courants de la Terre en volume.

Sable naturel d'origine volcanique à base de magnésie (48%) et d'oxyde de fer (8%). Adapté au sablage des monuments et façades. Sablage à sec ou humide. Ce sable ne contient pas de silice et remplace les sables silicieux ordinaires. Idéal pour les opérations de nettoyage en bâtiment [19].

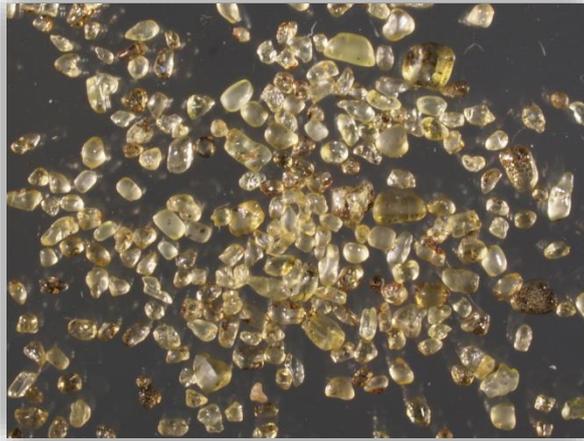


Figure II.4. Grains de sable de l'olivine [18].

II.3.1.4 La Kerphalite

La kerphalite est le nom commercial d'une qualité d'andalousite provenant du traitement des gisements de la mine de Glomel (Bretagne). L'andalousite de formule chimique $Al_2O_3 \cdot SiO_2$ est un minéral cristallin qui possède la caractéristique de développer un degré élevé de mullitisation dès $1300^\circ C$. La mullite peut être utilisée jusqu'à $1700^\circ C$ [17].

II.3.2 Sable synthétique

Le sable synthétique est un sable « fabriqué » par un dosage précis d'éléments connus précis. Ce sable se compose essentiellement :

- De silice (sable extra siliceux naturel à moins de 0,5% d'argile naturelle)
- D'argile (montmorillonites) ce pourrait être une argile de type Illites, mais en fait, cela reviendrait à fabriquer un sable naturel du point de vue caractéristique. Les Montmorillonites sont les argiles des sables synthétiques.
- D'eau
- D'impuretés
- D'ingrédients ou adjuvant : noir minéral ; farine de bois (stabilisateur d'humidité)

II.4 Sable de fonderie en Algérie

L'Algérienne des fonderies de Tiaret (ALFET) utilise de nombreux types de sables qui servent à confectionner des moules et des noyaux pour le moulage de ces pièces métalliques. Le plus souvent en sable siliceux (sable d'origine) complété par des liants selon les applications envisagées et le type d'alliage. Les principaux sables de moulage étudiés et utilisés par ALFET sont répertoriés comme suite :

II.4.1 Sable à vert

Le sable de base est constitué principalement de grains de silice pure (quartz), mélangés avec de la bentonite calcique (5 à 10%), avec du noir minéral et de l'eau. Le sable à vert est très utilisé pour la confection des moules, appelé moulage à vert. Ce procédé est employé pour la fabrication des pièces en fonte (Aissat et Kacimi, 2011). La préparation est réalisée dans la sablerie qui sert également au recyclage du sable à vert (Duquet, 2004). Le sable naturel utilisé dans l'ALFET provient de la wilaya de CHLEF (Algérie) ou de l'entreprise ADWAN

CHEMICALS COMPANY (Mostaganem-Algérie). L'argile utilisée par ALFET pour le moulage avec du sable à vert (S1) ou même le sable (S3) est une bentonite en montmorillonite qui provient du gisement de Hamam Boughrara (Maghnia - Algérie). C'est une bentonite sodique, de couleur blanche. Le noir minéral est un additif carboné (charbon pulvérisé) dont la taille des particules est de 80 µm. Son rôle, dans le sable de moulage, est d'éviter l'abreuvement, la pénétration de l'alliage entre les grains de sable [20].

II.4.2 Sable au silicate de soude

Les sables au silicate de soude (3 à 4% de silicate de soude), dénommés de remplissage, sont utilisés pour la confection de grandes séries de moules et de noyaux. Ces mélanges sont durcis, par injections de gaz carboniques. Ce type de sable est utilisé pour le moulage de pièces en acier. Le Silicate de soude est une substance chimique de formule Na_2SiO_3 , très soluble dans l'eau. C'est une base forte formant des solutions très alcalines, corrosive pour la peau et les muqueuses (pH 13 en solution à 1%). Le silicate de soude est fourni par ADWAN Chemicals Company (Mostaganem - Algérie) [20].

II.4.3 Sable au silicate de soude avec bentonite

Appelé aussi sable de contact. Sa composition est la même que celle du sable au silicate de soude (S2) mais on ajoute de la bentonite (4 % à 4.5 %) pour améliorer l'état de surface des pièces. [21]

II.4.4 Sable à la résine furanique

D'une manière générale, les résines sont utilisées à faible dosage, de l'ordre de 2 %, comme liant organique. La résine furanique est un mélange d'alcool furfurylique et d'alcool formaldéhyde. Cette résine thermodurcissable durcit en présence d'un catalyseur acide composé de l'acide xylène-sulfonique, de l'acide benzène-sulfonique et de l'acide sulfurique. Le sable à la résine furanique sert à la fabrication de pièces massives en fonte.

II.4.5 Sables au ciment

L'incorporation de 8% à 10% de ciment (généralement du ciment Portland) est utilisée pour la confection de moules de grande dimension. La vitesse de la prise peut être accélérée par des adjuvants appropriés [21]

II.5 Caractéristiques du sable de fonderie

Solidité: La capacité d'un moule au sable à maintenir sa forme géométrique sous contrainte mécanique.

Perméabilité: La capacité d'un moule au sable à laisser les gaz et la vapeur s'échapper pendant le procédé de moulage.

Teneur en humidité: La teneur en humidité a un impact sur la solidité d'un moule et sur sa perméabilité : un moule présentant une teneur en humidité trop basse risque de se briser, tandis qu'un moule présentant une trop haute teneur en humidité peut piéger les bulles de vapeur à l'intérieur de la pièce moulée.

Coulabilité: La capacité du sable à combler les petites cavités du modèle. Une bonne coulabilité engendre un moule plus précis et, par conséquent, est nécessaire à la création de pièces moulées détaillées.

Taille du grain: La taille des particules de sable.

Forme du grain: La forme des grains de sable est évaluée en fonction de leur rondeur. Habituellement, le sable de fonderie est présenté sous trois catégories de grains :

- Les grains arrondis présentent une force de liaison relativement basse, mais une bonne coulabilité et une bonne finition de surface.
- Les grains angulaires présentent une force de liaison plus élevée puisqu'ils s'agglomèrent, mais une coulabilité et une perméabilité plus faibles que les grains arrondis.
- Les grains aux arêtes arrondies (aussi appelés grains subangulaires ou subanguleux) se retrouvent à mi-chemin entre les deux. Ils présentent une force plus élevée et une perméabilité plus basse que les grains ronds, mais une force plus basse et une perméabilité plus élevée que les grains angulaires.

Déformabilité: La capacité du mélange de sable à se déformer sous la contrainte. Un moule à haute déformabilité permet à la pièce de métal moulée de rétrécir librement alors qu'elle se solidifie, sans courir le risque d'une fissuration à chaud ou d'un craquement.

Réfractarité: Le moule ne doit ni fondre, ni brûler, ni craquer lorsqu'on y verse le métal fondu. La réfractarité mesure la capacité du sable de fonderie à résister à une chaleur extrême.

Réutilisabilité: La capacité du sable de fonderie à être réutilisé (suite au conditionnement du sable) afin de produire d'autres moulages au sable lors d'opérations de fabrication subséquentes [22].

II.5.1 Caractéristiques chimiques

- Les déchets de sable de fonderie résultent d'une dégradation thermique des sables de moulage et de noyautage à haute température.
- Ces déchets présentent les caractéristiques minéralogiques semblables à celles des sables d'origine.
- Les sables sont constitués essentiellement par du sable siliceux lié à une fine couche de carbone brûlé, des résidus de liants (en provenance des noyaux) et de la poussière.
- Les teneurs en silice varient entre 90 % (sable à vert) et 98 % (sable à prise chimique).
- Les déchets de sable à vert comportent de la bentonite déshydratée (4 à 5 %), appelée chamotte et du noir de carbone (0,5 %).
- Les sables à prise chimique qui ont au moulage jusqu'à 2 % de résines, n'en comportent quasiment plus après la coulée du métal dans le moule.
- A noter que les sables usés devront être exempts de corps étrangers tels que des billes de métal (sables de dessablage), bavures et morceaux de noyaux (sables de criblage) [23].

II.6 Le moulage

Le moulage est l'action de prendre une empreinte qui servira ensuite de moule dans lequel sera placé un matériau et qui permettra le tirage ou la production en plusieurs exemplaires d'un

modèle. Le moulage consiste donc à placer un matériau (liquide, pâte, poudre, feuille, plaque, paraison, préforme, pastille, etc.) dans un moule dont il prendra la forme. On a plusieurs types de moulage :

- Moulage en sable.
- Moulage métallique ou moulage permanent.
- Procédés spéciaux de moulage.

II.6.1 Le moulage en sable

Le moulage au sable est un processus qui utilise des moules en sable consommables pour former des pièces métalliques coulées. D'une part, la mise en forme est un processus étonnamment simple à réaliser ; quiconque a déjà construit un château de sable sur la plage sait que le sable peut être utilisé pour créer des formes élaborées. D'autre part, dans une fonderie où la chaleur du métal en fusion doit être contrôlée, de nombreux facteurs doivent être pris en compte avant de pouvoir parler de succès. La fonderie permet de fabriquer des pièces métalliques de différentes tailles, allant de quelques dizaines de grammes à plusieurs tonnes. Des moules en sable peuvent être créés pour façonner des moulages avec des détails extérieurs fins, des noyaux intérieurs et autres formes. Presque tous les alliages métalliques peuvent être coulés au sable. Des cavités sont formées dans le sable humide, qui sont ensuite remplis de métal en fusion avant de refroidir [22].

- **Avantages** : permet de mouler des pièces de très grande taille et des matériaux dont le point de fusion est très élevé comme l'acier ou la fonte. C'est un procédé rentable pour les petites et moyennes séries.
- **Inconvénients** : les surfaces obtenues sont peu précises et le processus n'est pas rentable pour les grandes séries.

II.6.2 Sable utilisé

II.6.2.1 Les sables de fonderies

- Les sables utilisés en fonderie doivent répondre à un certain nombre d'impératifs :
- Reproduire fidèlement la pièce modèle.
- Avoir une surface aussi fine que possible.
- Ne pas se désagréger lors de l'extraction du modèle.
- Résister à la température de coulée élevée du métal.
- Résister à l'érosion par le métal liquide, lors de la coulée.
- Être suffisamment perméable pour permettre le passage des gaz produits pendant la coulée.
- Permettre un décochage aisé.

II.6.2.2 Composition des sables de fonderie

Elle est généralement de :

- 70 à 80% de silice => support

- 5 à 15% d'argile => agglutinant
- 7 à 10% d'eau
- 3 à 5% d'impuretés (oxyde de fer, matières organiques, etc.) [24].



Figure II.5 une boîte de moulage est remplie de sable de fonderie [19]

II.6.3. Sable à noyaux

Ils doivent résister aux efforts et manutention tout en étant facilement débourrables. Ils doivent avoir une compressibilité suffisante, permettant au retrait du métal de se manifester normalement sans pour cela trop résister sous peine de provoquer des tensions voire des criques dans la pièce. L'agglomération des grains de sable est réalisée par une réaction chimique sable + liant + catalyseur On distingue selon la nature des produits :

Les procédés à prise à froid

- sables auto-durcissants.
- sables à prise par gazage.

Les procédés à prise à chaud

- durcissement en dehors de l'outillage.
- durcissement en contact de l'outillage [24].

II.6.4 les étapes de moulage de sable

Fondamentalement, un moule est fabriqué par moulage d'un matériel réfractaire qui forme une empreinte avec forme souhaitée ou la masse fondue est coulée. Il est nécessaire que l'empreinte du moule maintient sa forme jusqu'au le métal se solidifie :

- **Étape 1** : Le procédé commence par un modèle lequel est une réplique de la pièce désirée, à l'exception d'une taille légèrement grande pour permettre le retrait du métal durant la solidification et le refroidissement. Ensuite, une matrice est placée autour du modèle et rempli de sable. Ensuite, une pression est appliquée pour compacter fermement contre la face du modèle.
- **Étape 2** : Le compacte du sable maintient et affiche la forme exacte du modèle après retiré du moule. L'étape suivante consiste à placer les noyaux ou les males dans la moitié inférieur du moule. Après la section ou moitié supérieur du moule est fixé à sa place, ensuite le moule est fermé et prêt pour verser le matériel fondu. Lorsque la pièce

est solidifiée, le sable est retiré et retourné pour sa réutilisation ultérieure. Un aspect important et économique du moulage au sable est sa réutilisation plusieurs fois, nécessitant des petits apports du sable, argile et de l'eau [25].

II.7 Types de moules en sable

Les différents types de moules en sable se distinguent par la méthode de liaison employée. Les deux types de moules en sable les plus courants sont les suivants :

II.7 .1 Moule en sable vert

De l'argile (bentonite) est ajoutée au sable de silice et la liaison du moule en sable est assurée par la force de liaison de l'eau. En tant que produit naturel, le sable de silice est peu coûteux mais il ne convient pas pour une production de masse.

II.7 .2 Moule en coquille

On utilise un mélange combinant une résine phénolique thermodurcissable et du sable de silice. Ce type de moule est appelé moule en coquille car il est aussi fin qu'un coquillage.

Ces moules en coquille particulièrement fins forment des surfaces lisses et sont souvent utilisés pour des moulages de pièces de moteur automobile ou d'autres pièces similaires nécessitant une certaine précision. Les moules en coquille peuvent être facilement détruits. Ils sont donc adaptés à une production de masse. Cependant, ils sont plus coûteux que les moules en sable vert car ils nécessitent des modèles en métal [26].

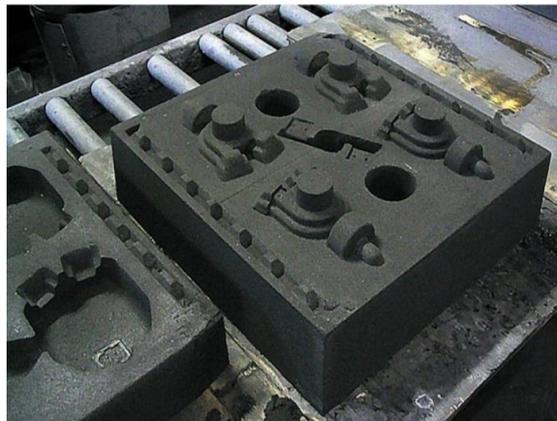


Figure II.6 Le châssis supérieur le châssis inférieur en entier [19]

II.8. Les machines à mouler

On distingue, selon la pression de serrage, les machines à mouler basse pression et celles à moyenne et haute pression. Les machines à mouler basse pression sont basées sur des principes combinés de serrage par secousses-pression ou vibrations-pression. Elles permettent l'utilisation de modèles en bois fixés sur une plaque-modèle. De par la nature de l'outillage, cette méthode est économique et donc bien adaptée aux petites et moyennes séries. Les machines à mouler à moyenne et haute pressions, avec lesquelles le serrage intense du sable, obtenu par pression hydraulique, soufflage, détente d'air comprimé ou impact par explosion, augmente la rigidité du moule. On obtient alors une amélioration de la précision dimensionnelle et géométrique des pièces ainsi moulées et de leur compacité. Cette technologie est en principe réservée à la production de pièces en moyennes et grandes séries. Elle nécessite d'employer des

modèles beaucoup plus résistants (en bois stratifiés ou bakélisés, en résines époxydes ou polyuréthanes, en métal...) [27].



Figure II.7 Un moule au sable fermé [19].

II.9 Recycler le sable de fonderie

Le recyclage du sable de fonderie usé et non dangereux peut permettre d'économiser de l'énergie, d'éviter l'extraction de matériaux vierges et de réduire les coûts tant pour les producteurs que pour les utilisateurs de sable de fonderie. Le sable de fonderie recyclé peut être utilisé dans le bâtiment, mais également pour les applications suivantes :

- Matières premières pour la fabrication de ciment Portland
- Remplacement partiel des agrégats fins pour la préparation d'asphaltes
- Utilisation dans les mélanges pour mortiers dans la maçonnerie

Une analyse individuelle des propriétés physiques et chimiques du sable de fonderie usé est indispensable pour déterminer son potentiel de recyclabilité et les applications les plus adaptées [28].

Chapitre III : Méthodologie et choix des matériaux

Les matériaux utilisés dans cette étude, ont un rôle très important dans la détermination des propriétés des bétons à l'état frais et durci. Donc, il est nécessaire de connaître les différentes caractéristiques des constituants rentrant dans la formulation des mortiers car chacun pourrait influencer considérablement sur les résultats d'étude. Pour cela dans ce chapitre, nous avons procédé à la caractérisation de chaque constituant du béton. La méthodologie suivie pour réaliser ce travail, sera aussi présentée dans ce chapitre.

III. 1 Objectif du travail

Notre objectif est d'étudier l'effet de la substitution du sable par le sable de fonderie sur les propriétés physico-mécaniques des mortiers autoplaçant. Le sable est substitué par le déchet sable de fonderie (0-5 mm) à des teneurs (0, 10, 20, 50, 100% par poids de sable). Objectif de travail économique en remplacement le sable par un déchet. Technique (avoir un mortier auto plaçant de qualité comparable à mortier témoins) et enfin environnementale (recyclage d'un déchet sable de fonderie).

III. 2 Caractéristique des matériaux utilisés

III.2. 1 Ciment

Le ciment utilisé dans ce travail, est un ciment composé de type CEM I /L42.5N-SR 3(MOKAOUEM DE LAFARGE) est un ciment gris résistant aux sulfates, résultat de la mouture d'un clinker contenant un faible taux d'aluminates de calcium avec une proportion de gypse inférieure à celle d'un ciment portland composé. Conformement à la norme NA 442 et à la norme EN 197-1II

III.2.1.1 Avantage produit

- Tout en étant un ciment de haute performance, Mokaouem protège la structure contre les agressions chimique de l'environnement externe
- Une meilleure durabilité pour les structures en béton
- Une faible chaleur d'hydratation

III.2.1.2 Applications recommandées

- Les fondations et les structures à réaliser dans un milieu agressif
- Les travaux maritimes
- Les stations de dessalement et d'épuration
- Les travaux hydrauliques
- Les barrages et les digues de soutènement collinaire

III.2.1.3 Caractéristiques physiques du ciment

Tableau III.1 Caractéristiques physiques du ciment

Caractéristiques	Résultats	Unités	Norme
Consistance normal	25 à 28	(%)	NA 442
Début de prise	> 60	(min)	NA 230
Fin de prise	240 à 400	(min)	NA 230
SSB	3200 à 3800	(Cm ² /g)	NA 231
Retrait à 28 jours	< 1000	(µm/mm)	NA 442

III.2.1.4 Caractéristiques chimiques

Tableau III.2 Composition chimique du ciment par diffraction des rayons X

Eléments	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	Cl	PAF	insoluble
(%)	63.62	21.0 3	3.49	4.45	1.9 1	0.13	0.56	1.79		≤4	≤3

III.2.1.5 Caractéristiques minéralogiques :

Tableau III.3 Composition minéralogique du ciment par fluorescence X

Eléments	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	CaO	gypse	Calcaire	pouzzolane
%	50	16	<5.0	12	01	06	1	-

III.2.1.6 Caractéristiques mécaniques du ciment

Tableau III.4 Caractéristiques mécaniques du ciment

Essais	Âge [J]	
	2 jours	28 jours
Résistance à la compression (MPa)	≥ 10	≥42.5

III.2.2 Fillers de calcaire

Le Calcaire est une roche sédimentaire facilement soluble dans l'eau et qui se compose principalement de calcite ou carbonate de calcium (CaCO₃) (au moins 50 %) et de carbonate de magnésium (MgCO₃). Suivant sa localisation, le calcaire peut également contenir de la dolomite et de l'argile (aragonite ou marne). les fillers calcaires utilisées sont commercialisées par l'Entreprise Nationale des Granulats (ENG) sous le nom d'ALCAL F50, du gisement El-

Khroub, constituées de calcaire d'origine biochimique néritique et caractérisées par une grande pureté chimique et une blancheur élevée.

III.2.2.1 Caractéristique chimique

Tableau III.5 Analyse chimique du calcaire par fluorescence X

Eléments	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Mg O	Cl ⁻	PAF
Teneur(%)	54.37	0.7	0.15	0.09	0.01	0.13	0.01	1.22	0.001	43.24

III.2.2.2 Caractéristique physique

Tableau III. 6 Propriétés physiques du calcaire

Caractéristiques	Résultats
Masse spécifique (g/cm ³)	2.66
Surface spécifique (cm ² /g)	Variable

III.2.3 Sable

Le sable utilisé, provient de la carrière de Boussaâda. Ces caractéristiques sont données ci-dessous

III.2.3.1 Caractéristiques du sable

Les propriétés physiques de sable sont présentées dans le tableau

Tableau III.7 Caractéristiques physiques du sable a norme NF EN 933-1

Caractéristiques	Résultats	Unité
Masse volumique	1460	(Kg /cm ³)
Masse spécifique	2.51	(g /cm ³)
EVS	51%	(%)

Tableau III.8 Analyse granulométrique par tamisage du sable selon NF EN 933-

Tamis ouverture (mm)	Masse des refus cumulés Ri (g)	Pourcentage refus cumulés (%)	Pourcentage tamisât cumulés (%)
4	11.6	1.16	98.84
2	23.4	3.5	96.5
1	248	28.3	71.7
0.630	114.6	39.76	60.24
0.500	54.4	45.2	54.8
0.315	435.7	88.77	11.23
0.160	41.2	92.89	7.11
0.08	3.4	93.23	6.77
Fond de tamis	1.2	93.35	6.65
Module de finesse de sable $M_f = 3.76$			

❖ **Analyse granulométrique par tamisage NF EN 933-1 ENR. N° 0213/14**

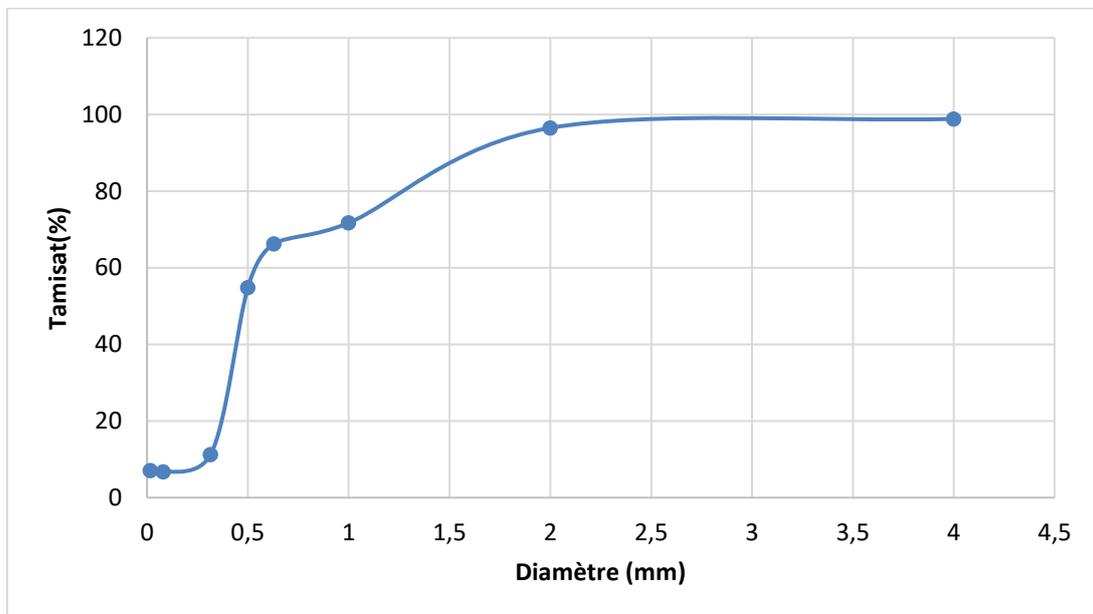


Figure III.1 Analyse granulométriques par tamisage du sable

III.2.4 Déchet du Sable de fonderie

Le déchet de sable de fonderie utilisé dans notre travail, est un déchet de recyclage de (SNVI-Rouiba). Ce déchet a été caractérisé afin de connaître les caractéristiques à savoir la masse volumique



Figure III.2 Déchet de sable fonderie utilisé dans cette étude

Dans notre travail, nous avons utilisé ce sable comme sable et comme ajout. Donc, les caractéristiques de ce sable ont été déterminées soit à l'état naturel ou broyer

III.2.4.1 Caractéristiques du sable de fonderie

Tableau III.9 Caractéristiques physiques du déchet des sables de fonderie

Caractéristiques	Résultats	Unité
Masse volumique apparente	1.24	(g /cm3)
Masse volumique absolue	2.4	(g /cm3)
Absorption	1.8	(%)

III.2.4.2 Caractéristiques chimiques

Tableau III.10 Analyse chimique de sable de fonderie par fluorescence X

Eléments	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Mg O	P ₂ O ₅
(%)	6.328	60.762	11.688	9.642	1.851	0.010	1.281	2.195	0.010

Tableau III.11 Analyse granulométrique du déchet (la norme NF P 18-560).

Tamis ouverture (mm)	Masse des refus cumulés Ri (g)	Pourcentage refus cumulés (%)	Pourcentage tamisât cumulés (%)
4	13.4	1.34	98.66
2	10.1	2.35	97.65
1	9	3.25	96.75
0.630	7.4	3.99	96.01
0.500	15.1	5.5	94.5
0.315	785	84	16
0.160	146	98.6	1.4
0.08	12.4	99.84	0.16
Fond de tamis	0.5	99.89	0.11
Module de finesse de sable $M_f = 2.07$			

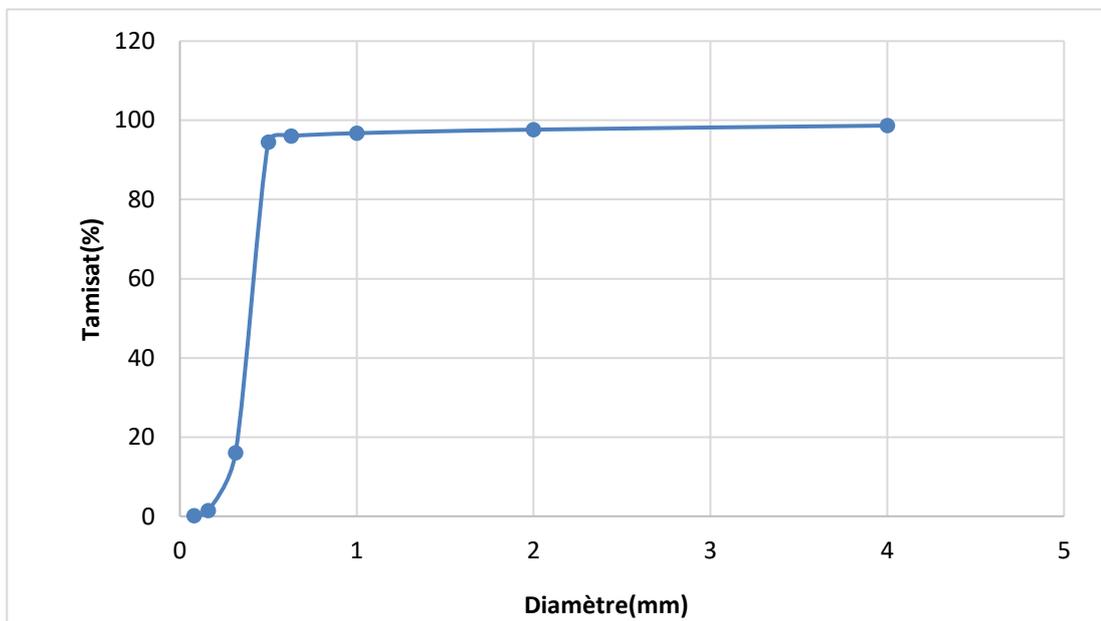


Figure III.3 Analyse granulométrique du sable de fonderie

III.2.5 Superplastifiant

Le superplastifiant utilisé est un adjuvant de SIKA ® de type VISCOCRETE ® TEMPO 12 le Superplastifiant/Haut Réducteur d'eau est un liquide brun clair à foncé **sans modifier la teneur en eau**, polyvalent de nouvelle génération non chloré à base de copolymère acrylique.

III.2.5.1 Agréments / normes

Les superplastifiants sont normés selon la NF EN 934-2.

III.2.5.2 Domain d'application

- Sika® ViscoCrete® TEMPO-12 permet la fabrication de bétons plastiques à autoplaçants transportés sur de longues distances et pompés.
- Dans les bétons autoplaçants, Sika® ViscoCrete® TEMPO-12 améliore la stabilité, limite la ségrégation du béton et rend les formules moins susceptibles aux variations d'eau et des constituants.

III.2.5.3 Caractère généreux et avantages

SikaViscoCrete TEMPO-12 est un superplastifiant puissant qui confère aux bétons les propriétés suivantes :

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

III.2.5.4 Description du produit

Cette tableau représente les propriétés de superplastifiant

Tableau III.12 Description de Superplastifiant

Conditionnement	<ul style="list-style-type: none"> • Fût de 230 kg • Cubi de 1100 kg • Vrac
Aspect/ couleur	Liquide brun clair à foncé
Durée de conservation	12 mois dans son emballage d'origine intact. à l'abri du gel et de la chaleur ($5^{\circ}\text{C} < t < 35^{\circ}\text{C}$).
Condition de stockage	A l'abri du gel. En cas de gel accidentel, le produit retrouve ses qualités d'origine une fois dégelé lentement et réhomogénéisé
Densité	$1,06 \pm 0,01$
Valeur ph	$4,5 \pm 1,0$
Teneur totale en ion chlorure	$\leq 0,1 \%$
Equivalent Oxyde de sodium	$\leq 1 \%$
Dosage	<ul style="list-style-type: none"> • Plage de dosage : 0,2 à 3,0% du poids du liant ou du ciment selon la fluidité et les performances recherchées. • Plage d'utilisation usuelle : 0,4 à 1,5 % du poids du ciment ou du liant.

III.2.5.5 Propriétés et effets

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

Sur béton frais

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

Sur béton durci

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

III.2.6 Eau de gâchage

L'eau utilisée pour le gâchage de béton est une eau potable du réseau publique de (Laboratoire national de l'habitat et de la construction (LNHC/ OUED SMAR_ ALGER)

III.2.7 Les fibres métalliques

Sika® Métal Fibres RC-80/50-BN est une fibre structurelle métallique fabriquées à partir de fils d'acier tréfilés en forme de baïonnette pour permettre un meilleur ancrage dans le béton. Selon le dosage employé et l'application, Sika® Métal Fibres RC-80/50-BN permet la réduction ou la suppression des armatures structurelles. Le conditionnement sous forme de plaquettes de fibres encollées permet d'assurer une bonne répartition dans le béton.

III.2.7.1 Agréments / normes

Les fibres Sika® Métal Fibres RC-80/50-BN bénéficient du marquage CE suivant la norme européenne harmonisée EN14889:1 «Fibres d'acier pour béton – Partie 1 : Définition, spécifications et conformité »

III.2.7.2 Domaines d'application

Renforcement des bétons:

- Semelles filantes (Avis Technique n°3.3/18-960_V1)*
- Dalles sur terre-plein (Avis Technique n°3/14-762)*
- Dalle de répartition (Avis Technique n°3/17-934)* Bâtiment pour la réalisation de dalles extérieures et intérieures, fondations, béton de remplissage (murs de clôture et poteaux)

III.2.7.3 Caractéristiques / Avantages

Grâce à la nature de l'acier qui les constitue et au système d'ancrage mécanique dont elles sont dotées aux extrémités, les fibres Sika® Métal Fibres RC-80/50-BN présentent des caractéristiques de grande résistance à l'arrachement et à la traction. Les fibres se dispersent très facilement et créent un réseau fibré haute densité qui a pour conséquence :

- Une amélioration de la ductilité grâce à la capacité des fibres à se déformer pour des efforts élevés
- Une augmentation de la ténacité liée à la redistribution des contraintes et l'amélioration de l'absorption d'énergie nécessaire à la rupture
- Un meilleur contrôle de la fissuration grâce à la reprise des contraintes qui permettent de maîtriser l'ouverture des fissures en s'opposant à leur propagation

III.2.7.4 Description des fibres métalliques

Tableau III.13 Description des fibres métalliques.

Conditionnement	Sacs papier de 10 kg, palette de 90 sacs
Aspect/ couleur	Fils d'acier carbone tréfilés à extrémités crochues
Durée de conservation	Cf. conditions de stockage
Condition de stockage	Ne pas gerber les palettes, conserver à l'abri de l'humidité
Densité	7.8
Dimensions	Longueur = 50 mm, Diamètre équivalent = 0,62 mm
Module d'Elasticité en Traction	200 GPa
Temps de Malaxage du Béton	<ul style="list-style-type: none"> • Il est recommandé d'ajouter Sika® Métal Fibres RC-80/50-BN directement dans le malaxeur en même temps que le sable et le gravier. • Malaxer le mélange sec (sable, gravier, ciment, et fibres) pendant au moins 15 secondes avant l'introduction de l'eau de gâchage. • Le temps de malaxage minimum recommandé est de 90 secondes.
Résistance à la Traction	1270 MPa
Dosage	<ul style="list-style-type: none"> • Pour les applications de renforcement du béton couvertes par un avis technique, Sika Métal Fibres RC-80/50-BN est employée au dosage de 10 kg/m³. • Pour les autres applications de renforcement du béton, Sika Métal Fibres RC-80/50-BN est employée au dosage minimum de 10 kg/m³. • Il est toutefois recommandé de procéder à des essais pour déterminer le dosage optimal selon la formule de béton utilisée et selon les performances recherchées.



Figure III.4 les fibres métalliques et le superplastifiant utilisés



Figure III.5 Fibres DRAMIX 50mm



Figure III.6 Fibres DRAMIX 25mm

Chapitre IV : Formulation des mortiers autoplaçants

Le présent chapitre consiste à donner la méthode de formulation des bétons autoplaçants à base de sable de fonderie comme substitution partielle au sable avec différents pourcentages (10%, 20%, 50% et 100%). Et pour ce là, nous avons opté la méthode japonaise pour l'ensemble des bétons que nous avons formulés.

IV.1 Introduction

On trouve un grand nombre d'approches et méthodes de formulation pour les bétons autoplaçants (méthode française (LCPC), méthode suédoise proposée par Peterson, méthode Taïwanaise proposée par Nan Su et méthode de LGC proposée par Shen Je ...) nous avons retenu pour notre formulation une méthode purement expérimentale dite « Japonaise » proposée par Okamura et al .

IV.2 Composition du mortier autoplaçant

La composition du mortier autoplaçant témoin a été déterminée à partir de la composition d'un béton autoplaçant (BAP) par la méthode du mortier de béton équivalent. Tout d'abord, la composition du BAP a été calculée. Le calcul des dosages des constituants du BAP sont calculés selon les règles de la méthode japonaise :

- Le volume de gravillons est limité en prenant un rapport G/S = 1
- Le dosage de calcaire est 10% de poids du ciment
- Le rapport volumique de l'eau/poudre est supposé entre 0.9 et 1. Dans notre cas, nous avons pris un rapport massique E/ (ciment+fine) égale à 0,38.
- Le dosage en superplastifiant est proche de son dosage à saturation

IV.3 Calcul des proportions

Volume total (VT) du béton est de 1m^3 qui est égale à 1000 L.

Le volume de la pâte pour 1m^3 du BAP égale à 340 ($1/\text{m}^3$).

Ciment = 430 Kg/ m^3

Le volume de la pâte Kg/ m^3 .

Filler de calcaire (10 % du poids de ciment) = 43 Kg/ m^3

$E/(C + F) = 0.38$

$$E = 0.38 * (430 + 43)$$

$$E = 179.74 \text{ L/m}^3$$

Volume de granulats = 660 L/m^3 .

$$G/S = 1$$

$$G=S$$

$$G + S = 660$$

$$S = 660/2.1 \quad S=314.28 \text{ L/m}^3$$

$$G = 660-314.28 \quad G = 345.72 \text{ L/m}^3$$

Le dosage de superplastifiant est 1.5% de la masse de ciment

$$SP = 0.015 * 430$$

$$SP = 6.45 \text{ Kg/ m}^3$$

$$\rho_{\text{sable}} = 2.6 \text{ kg/cm}^3$$

IV .4 Optimisation de la composition du béton

Dosages des constituants pour 1 m^3 du béton

Après le calcul, les dosages de chaque constituant du BAP dans 1 m^3 du béton, sont les suivants

Ciment = 430 kg

Filler=43 kg

Eau=179.74 l

Sable= $314.28 * 2.6 = 817.12 \text{ Kg/m}^3$

Gravier= $345.72 * 2.6 = 898.87 \text{ Kg/m}^3$

1. Classe 3/8 = 449.43 Kg/m^3

2. Classe 8/15 = 449.43 Kg/m^3

Super Plastifiant = 1.5% = 6.45 Kg

Fibres métalliques $\rho = 7800 \text{ kg / m}^3$, $v_f = 2.5\%$

$m_f = 7800 * 0.025 = 195 \text{ Kg}$

Tableau IV.1 Composition pour 1 m^3 du BAP

Constituants	Quantité (Kg/m ³)
Ciment	430
Filler calcaire	43
Sable	817.12
Graviers (3/8)	449.43
Graviers (8/15)	449.43
Eau	179.74
Superplastifiant	6.45

IV.4.1 Formulation du mortier auto plaçant

Tableau IV.2 Composition pour 1 m³ du mortier autoplaçant

Constituants	Quantité (Kg/m ³)
Ciment	628.68
Filler calcaire	62.86
sable	1299.11
Eau	257.46
Superplastifiant	13.83
Fibres métalliques	195
Total	2456.94

IV.4.2 Formulation du mortier auto plaçant fibrés à base de sable de fonderie

Tableau IV.7 Les quantités des constituants en (Kg/m³) du mortier

Mortier	Ciment	Filler calcaire	Sable	Sable de fonderie	Eau	Superplastifiant	Fibres métalliques
MS0	1.006	0.1006	2.079	—	0.412	0.0221	0.312
MS10	1.006	0.1006	1.8707	0.2079	0.412	0.0221	0.312
MS20	1.006	0.1006	1.663	0.4157	0.412	0.0221	0.312
MS50	1.006	0.1006	1.0393	1.0393	0.412	0.0302	0.312

IV.5 Préparation de la gâchée

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

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

- Mettre l'eau et 2/3 de superplastifiant dans le récipient.
- Mettre le mélange de liant (Ciment + Fines).
- Mélanger à Vitesse lente pendant 1 mn 30 sec en suite racler le bord et mélangé 1mn30 sec.
- Verser le ½ de 1/3 de superplastifiant et le 1/3 de sable.
- Mélanger à Vitesse lente pendant 1mn.
- Rajouter le reste du 1/3 du sable et mélanger pendant 30 secs à Vitesse lente



Figure IV.1 Malaxeur pour des mortiers autoplaçants



Figure IV.2 Moules de mortier autoplaçant

IV.6 Conservation des éprouvettes

Après le gâchage, pour les mortiers autoplaçant, les moules sont conservés dans une pièce à température ambiante, et démoulés après 24h. Les éprouvettes sont conservées dans un bac d'eau à une température de 20°C.



Figure IV.3 Conservation des éprouvettes

IV.7 Conduite d'essais

- **Etat frais**

La fluidité du mortier peut être caractérisée par la mesure de test de mini-cône. Des valeurs cibles de l'ordre de 180 à 220 mm correspondent à l'étalement moyen conseillé d'un mortier. La valeur cible d'étalement doit être définie en fonction des caractéristiques de la formulation et des conditions et méthodes de mise en œuvre. Cet essai caractérise la mobilité du mortier en milieu non confiné. Il permet en particulier de vérifier la fluidité du béton lors de sa réception sur chantier.



Figure IV.4 Mini-cône pour mortier

- **Etat durci**

Pour réaliser cette étude, des éprouvette prismatiques ($4*4*16\text{ cm}^3$) et ($5*5*5\text{ cm}^3$) (Figure IV.3) ont été fabriqués pour des mortiers MAP. Un jour après du coulé, les éprouvettes ont été conservées dans l'eau à la température de 21 °C, divers tests et mesures ont été effectués afin d'étudier les propriétés physiques (Masse volumique apparente) et mécaniques (résistance à la traction par flexion et à la compression uni-axiale).

Enfin, les valeurs de module de Young dynamique, ont été déterminées pour chaque composition du mortier étudié à l'aide la formule.



Figure IV.5 La machine d'écrasement à la compression et de flexion



Figure IV.6 Eprouvette cubiques et prismatiques

IV.8 Notation des mélanges

MS0 : mortier autoplaçant témoin

MS10 : mortier autoplaçant à 10% de substitution de sable par déchet sable de fonderie

MS30 : mortier autoplaçant à 20% de substitution de sable par déchet sable de fonderie

MS50 : mortier autoplaçant à 50% de substitution de sable par déchet sable de fonderie

MS100 : mortier autoplaçant à 100% de substitution de sable par déchet sable de fonderie

Chapitre V : Résultats et interprétation

Dans ce chapitre sera présenté les différents conséquences des essais physico mécanique des mortiers autoplaçant concernant le sable de la fonderie et ce qu'on va voir aussi l'interprétation de ces résultats qui ont été réalisés d'après les règles en vigueur.

V.1 Introduction

Pour connaitre l'influence de l'incorporation du sable de fonderie dans les mortiers autoplaçant, notre étude a été menée sur volet ; utilisation comme sable (par substitution partielle du sable naturel) à différents rapports

V.2 Substitution partielle de sable

V.2.1 Etat frais

Pour chaque variante du mortier, nous avons mesuré l'étalement au mini cône. Les mélanges (0, 10, 20 et 50%) des mortiers étudiés ont été élaborés avec un étalement variant entre 180 à 220 mm de la galette. Les résultats de l'essai sont présentés dans le tableau (V.1).



Figure V.1 Essais d'étalement sur le mortier autoplaçant frais



Figure V.2 Essais d'étalement sur le mortier autoplaçant (100%)

- Au-delà de 100% de substitution de sable naturel, les mortiers autoplaçant perdent leur fluidité (La fluidité des mortiers autoplaçant a tendance à diminuer avec l'augmentation du pourcentage de sable de fonderie).

Tableau V.1 L'essai de l'étalement pour substitution de sable

Mortier	Etalement Diamètre (mm)	Mise en œuvre
MS0	220	Bonne
MS10	221	Bonne
MS20	195	Bonne
MS50	180	Acceptable
MS100	165	Mauvaise

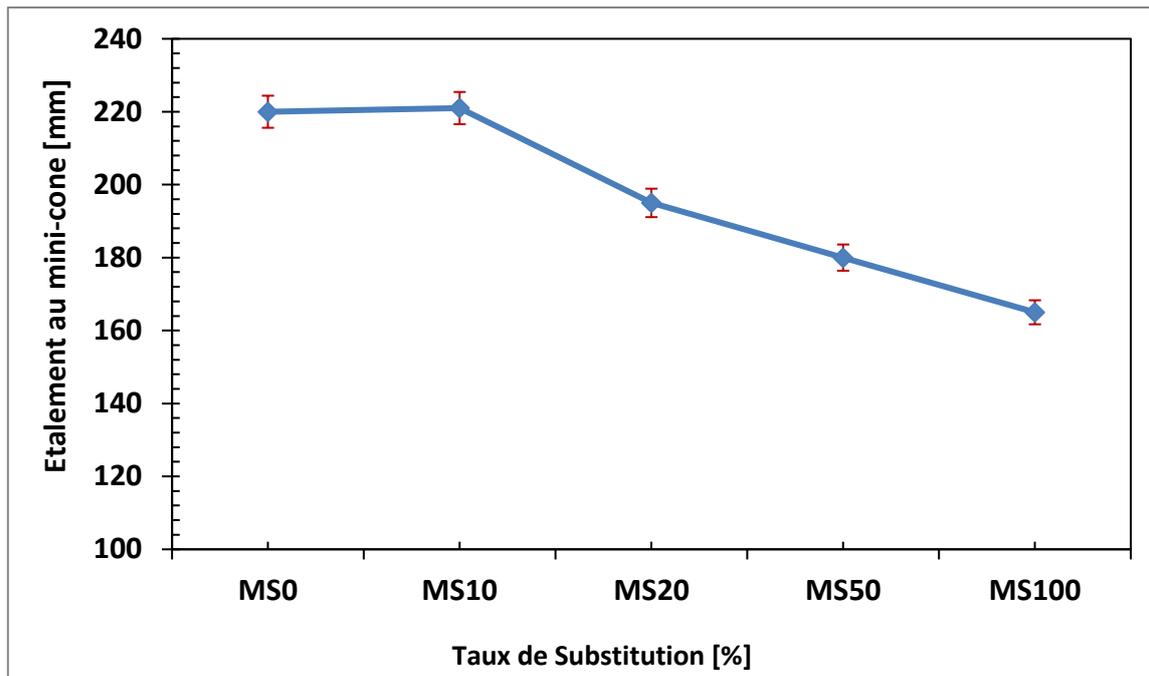


Figure V.3 Fluidité des mortiers étudiés en fonction du taux de substitution du déchet sable de fonderie

Figure (V.3) représente la fluidité des mortiers étudiés en fonction de taux de substitution du sable par le déchet de sable de fonderie. D'après les résultats des essais de l'étalement, on remarque bien une légère considérable de la fluidité des mortiers avec l'augmentation du taux de substitution du sable naturel par déchet sable de fonderie. En effet, jusqu'à 50% de substitution la diminution la fluidité des mortiers. Car le mortier reste toujours auto plaçant et ce dernier répond aux exigences des bétons auto plaçants de point de vue fluidité et mise en œuvre. Au-delà de 100% de substitution, les mortiers auto plaçant perdent leur fluidité.

V.2.2 Etat Durci

V.2.2.1 Résistance mécaniques

V.2.2.a) Résistance à traction par flexion

Les résultats des essais de traction effectués sur les mortiers autoplaçants fibrés à base de sable de fonderie, sont donnés sous forme de tableau et des histogrammes de la figure.

Tableau V.2 Essais de traction par flexion des mortiers étudiés effectués après 28 jours

Variante	R_{f28j} (MPa)
MS0	11.14
MS10	9.15
MS20	8.44
MS50	6.92
MS100	–

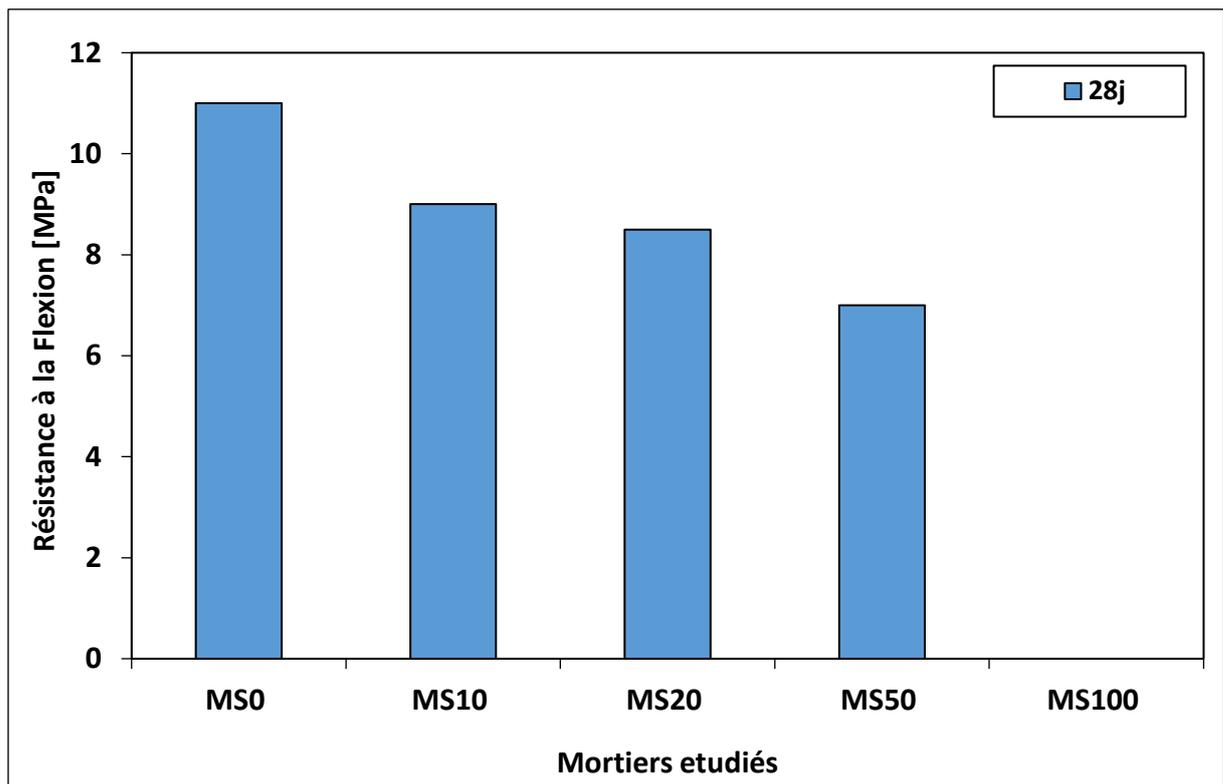


Figure V.4 Evolution de la résistance à la traction par flexion des mortiers étudiés (à 28j)

Les résultats de la résistance à la traction par flexion des mortiers fibrés sont donnés dans la figure (V.5). D'après les résultats obtenus, on remarque que la résistance à la traction par flexion diminue légèrement pour le cas de la substitution du sable 10% et 20% par rapport au mortier témoin et une diminution de la résistance pour le cas des mortiers de 50% de substitution plus au moins acceptable.

V.2.2.b) Résistance à la compression uni-axiale

Les résultats des essais de compression uniaxiale, effectués sur les mortiers autoplaçants fibrés à base de sable de fonderie, sont donnés sous forme de tableau et des histogrammes de la figure.

Tableau V.3 Essais d'écrasement des mortiers étudiés effectués à 2 et 28 jours

Variante	R _{c2j} (MPa)	R _{c28j} (MPa)
MS0	27.63	51.63
MS10	20.97	46.71
MS20	19.45	39.79
MS50	11.75	25.17
MS100	–	–

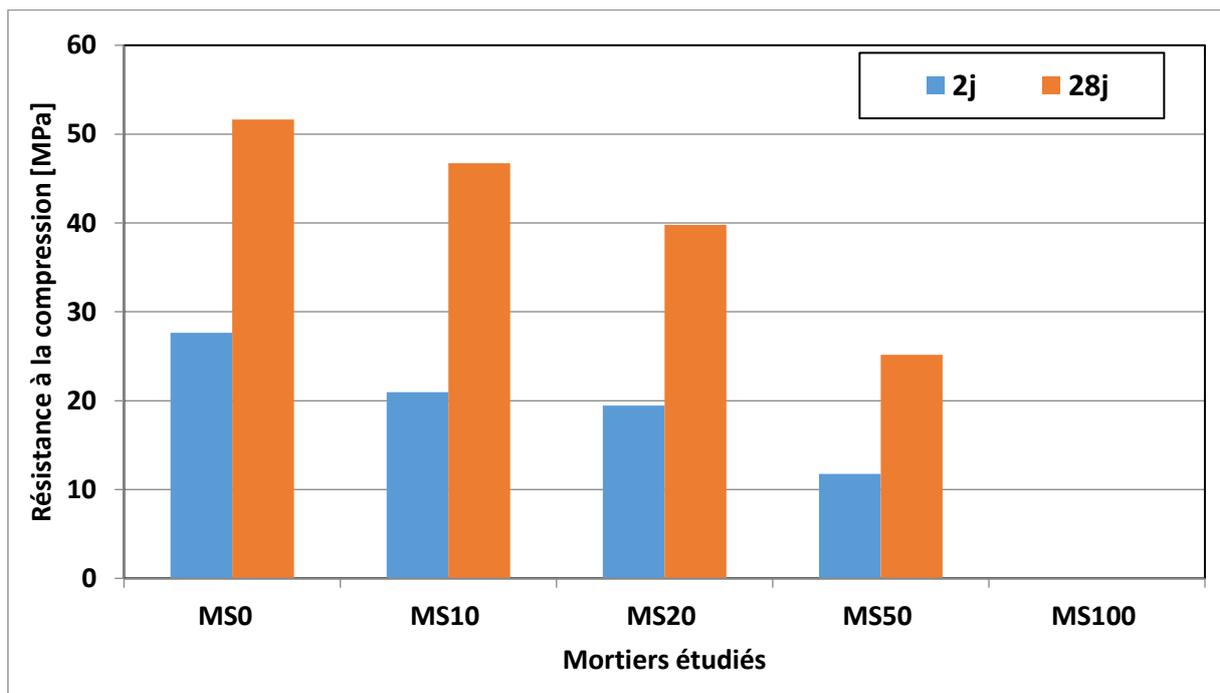


Figure V.7 Evolution de la résistance à la compression des mortiers en fonction du taux de substitution de sable par le déchet de sable de fonderie à différent âge (2 et 28 jours)

Les résultats des essais mécaniques à savoir la résistance en compression des mortiers étudiés sont présentés dans la figure (V.6). On constate que la résistance à la compression des mortiers fibrés diminue légèrement pour le cas de mortiers 10 et 20% de substitution de sable par le sable de fonderie. Cependant, jusqu'à 50% de substitution une chute importante de résistance à la compression environ 50% par rapport au mortier témoin.

V. 3 Ultrason (Essai de la vitesse d'impulsion ultrasonique)

Cet essai est une méthode de détermination de la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques longitudinales dans le béton durci. Elle consiste à mesurer le temps de propagation entre deux points désignés sur la surface de l'objet à essayer.

$$E_d = \rho \times v^2 \quad (\text{V.1})$$

V= La vitesse de d'ultrason en m/s.

ρ =la masse volumique en kg/m³



Figure V.8 Appareil d'ultrason

La valeur finale du module est calculée par la moyenne de trois éprouvettes de chaque substitutions). Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau (V.4)

Tableau v .4 Les masses et les vitesses d'impulsion ultrasonique des mortiers étudiés effectués à 2 et 28 jours

Eprouvette (5× 5 × 5)	2J		28J	
	La masse (g)	La vitesse (m/s)	La masse (g)	La vitesse (m/s)
MS0	296.43	3640.172	302.9	4178.9
MS10	306	2926.52	304.56	3792.93
MS20	290.5	2810	306.24	3907.4
MS50	297.9	3540.6	304.7	4002.67

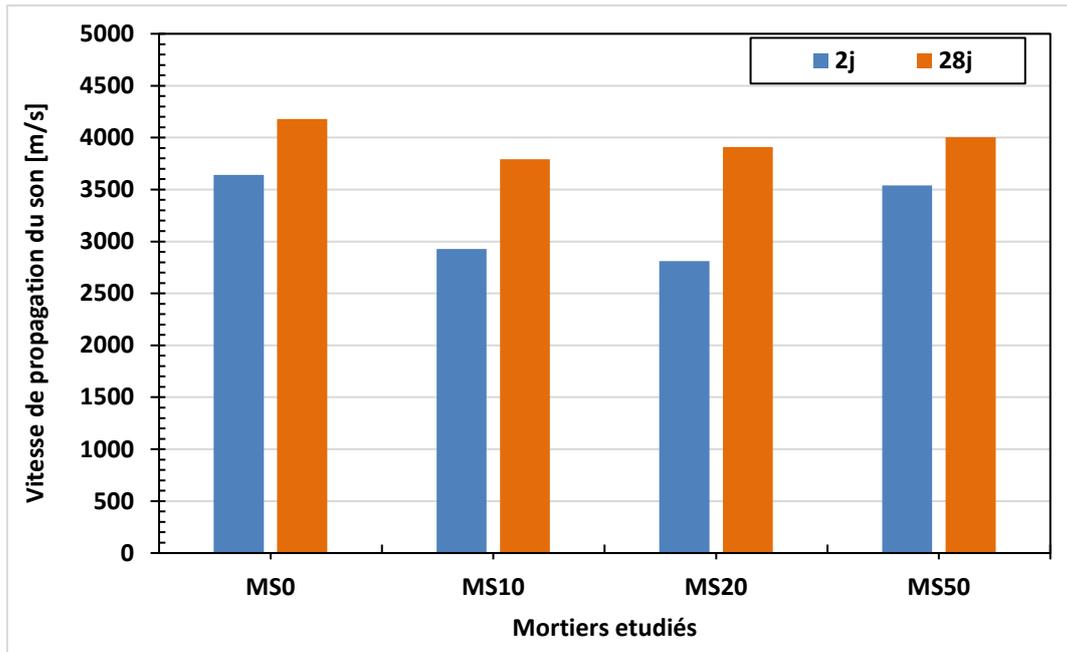


Figure V.8 Evolution de la vitesse de propagation du son des mortiers en fonction du taux de substitution de sable par le déchet de sable de fonderie à différent âge (2 et 28 jours)

Après avoir calculé les valeurs du module de Young en appliquant la formule (V.1), nous avons déterminés le module dynamique. Les résultats sont donnés dans le tableau (V.5) et figure (V.9).

Tableau V.5 Essai de la vitesse d'impulsion ultrasonique des mortiers étudiés effectués à 2 et 28 jours.

Eprouvette (5× 5 × 5)	Module d'élasticité dynamique (GPa)	
	2J	28J
MS0	31	42
MS10	21	35
MS20	18	37
MS50	29	39

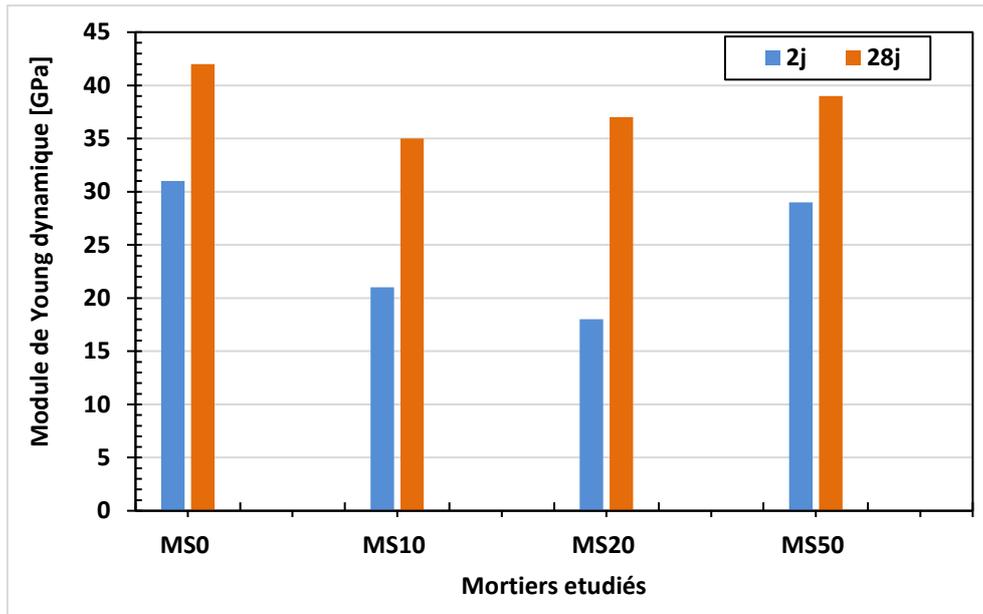


Figure V.9 Evolution du module d'élasticité dynamique des mortiers en fonction de taux de substituions de sable par déchets sable de fonderie à différent âge (2J et 28J)

Afin de vérifier l'effet de sable de fonderie sur la compacité des mortiers étudiés, des essais ultrasoniques ont été effectués sur les éprouvettes cubiques (5x5x5) cm³ pour mesurer la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques à travers le mortier après 28 jours de durcissement. Après avoir mesuré la vitesse, nous avons calculés les valeurs du module d'élasticité dynamique de chaque béton. Les résultats de cet essai sont représentés dans la figure V.9. Il est remarquable que tous les mortiers ont un module d'élasticité acceptable et il est d'environ de 40GPa et qui peuvent être classé comme des mortiers de qualité. Cela prouve que le sable de fonderie peut être utilisé comme sable sans avoir affecté la compacité et la résistance du béton toute en économisant jusqu'à 50% du sable naturel. En effet, jusqu'à 50% de substitution de sable naturel par le sable de fonderie peut donner un mortier (béton) autoplaçant de compacité acceptable.

Conclusion Générale

L'objectif de cette étude, était de voir la possibilité de réutiliser le déchet de sable de fonderie de la société SNVI-Rouiba, en tant que sable (par remplacement totalement ou partiellement le sable naturel) à différents taux de substitution (0, 10, 20, 50 et 100%) pour produire un mortier autoplaçant fibré par les fibres métalliques. Une étude expérimentale a été menée pour évaluer les propriétés à l'état frais et durci des mortiers autoplaçants.

Sur la base des résultats de l'étude expérimentale menée, on peut conclure :

- La réduction de sable naturel jusqu'à 20% grâce à l'utilisation de sable de fonderie est possible. L'importance de la fluidité des mortiers est négligeable, tant qu'ils répondent aux exigences du béton. Du point de vue de la fluidité et de l'application pratique, l'expression "Au-delà de 50 % de substitution" prend un sens significatif. Il est important de noter que les mortiers autoplaçants subissent une perte de fluidité. Cependant, il est possible de compenser cette perte de fluidité en ce faisant, la quantité de superplastifiant est augmentée
- Concernant l'utilisation de sable de fonderie en tant que sable, jusqu'au 50% de substitution la diminution n'est pas considérable. Au-delà de 100% de substitution de sable naturel, les mortiers auto plaçant perdent leur fluidité (La fluidité des mortiers auto plaçant a tendance à diminuer avec l'augmentation du pourcentage de sable de fonderie).
- La substitution du sable à 20% et 50% dans les mortiers s'est traduite par une diminution de la résistance n'est pas importante, comme l'observe la diminution de la valeur de la résistance à la compression maximale est d'environ 49 MPa.
- Le module d'élasticité dynamique du mortier MS10 contenant 10% de sable de fonderie est identique à celui de mortier témoin. Cependant, le mortier fibrés à 20% de sable de fonderie avait des caractéristiques mécaniques à savoir le module est acceptable. Ce mélange permet de remplacer jusqu'à 20 % du sable par le déchet de fonderie.

Références Bibliographiques

- [1] AFGC, «Bétons Autoplaçants - Recommandations Provisoires », page 63,2000
- [2] H FARES, « propriétés mécaniques et physico-chimiques de béton autoplaçants exposés à une température élevée », Thèse de doctorat, l'Université de Cergy-Pontoise, Décembre 2009
- [3] HADADOU NAIMA, «Elaboration et caractérisation de béton autoplaçant fibré avec ajout de poudre de marbre», Thèse de doctorat, UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES, 2015
- [4] N. Cauberg, Caractériser et contrôler un béton autocompactant in situ, n novembre 2006
- [5] PATRICK GUIRAUD, « Essais de caractérisation spécifiques au BAP», 2008
- [6] N. BOUHAMOU, « Influence des paramètres de composition sur le comportement du béton autoplaçant a l'état frais »
- [7] « Essais sur béton durci et d'un élément en béton arme », Ecole polytechnique fédérale de Lausanne département des matériaux, Laboratoire de Matériaux de Construction.
- [8] « Les bétons formulation fabrication et mise en œuvre », FICHES TECHNIQUES, centre d'information sur le ciment et ses application
- [9] les différent type de mortier , par Travaux Maçonnerie, 26 août 2019
- [10] BRAHIM NÉCIRA, «Etude des propriétés rhéologiques et mécanique des bétons autoplaçants », Thèse de magister, université de Mohamed Khider –Biskra, 2006
- [11] BOUAZIZ MOHAMED HAMZA, Formulation d'un BAP : influence du rapport G/S et de la fibre de palmier dattier de 30 mm de longueur, mémoire de master, UNIVERSITE BA DJI MOKHTAR-ANNABA, 2019
- [12] PHILIPPE SOUCHU , Le sable pour la construction , 13 Juillet 2012
- [13] Nawel DOUNANE , Étude de l'influence de différents types de fillers calcaires sur les performances du béton autoplaçant BAP , Mémoire du Projet de Fin d'Etudes d'Ingénieu , Ecole Nationale Polytechnique /2010
- [14] Latifou Bello, Méthodologie de formulation des Bétons Auto-Plaçants Légers. RAPPORT D'ÉTUDES ET RECHERCHES .Septembre 2015
- [15] Hadj BEKKI , Aouali HEMMAM,"VALORIZATION OF FOUNDRY SAND IN CIVIL ENGINEERING FIELD" .Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur – Champs-sur-Marne 2018
- [16] <https://www.cdegroupp.com>. sable de fonderie
- [17] Fabiola Addini , "Les différents sables de fonderie",10 juin 2019
- [18] Pierre Bédard , "identification des grains de sable",2016
- [19] Pierre Bédard , " clef identification des grains de sable",2013
- [20] Hadj BEKKI , Aouali HEMMAM,"VALORIZATION OF FOUNDRY SAND IN CIVIL ENGINEERING FIELD" .Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur – Champs-sur-Marne 2018
- [21] Sahraoui AISSATet Amine KACIMI,"Caractérisation physico-chimique des sables usés de la fonderie de Tiaret (Algérie), en vue de leur valorisation".Afrique SCIENCE 07(3) (2011) 97 – 107
- [22] Le moulage au sable, c'est quoi, Reliance Foundy co.Ltd, 2023
- [23] Cerema,"Acceptabilité environnementale de matériaux alternatifs en technique routière Les sables de fonderie".CS 92 803 F-69674 Bron Cedex
- [24] Delmilka , "le moulage en sable.pdf"
- [25] C/Marzo , Gestion de compras , le moulage au sable.
- [26] Observation et analyse de moulages en sable, kayence.fr
- [27] Patrick Hairy , "Les différents procédés de moulage en sable", 16 décembre 2019
- [28] cdegroupp.com , sables de fonderie, 2023
- [29] Bruno, Menja , "Le béton fibré"11avril2017