

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA DE BOUMERDES



Faculté des Sciences de l'Ingénieur
Département de Génie des Matériaux

Mémoire de fin d'étude

En vue de l'obtention du diplôme Master

Spécialité : Génie de matériaux

Option : Sciences des Matériaux pour la Construction Durable(MCD)

THEME

**Recyclage du sable de fonderie dans les mortiers autoplaçants:
Utilisation en tant que sable et ajout cimentaire**

Réalisé Par :

**OMIRI ABDELLAH
BOUAZOUNI LOUNIS**

Sujet Proposé et suivi par :

**Dr. K. CHAHOUR
Dr. SAFI B.**

Devant le jury :

CHAID R.	Pr	U. BOUMERDES	Président
CHAHOUR K.	MCB	U. TIZI OUZOU	Encadreur
SAFI B.	MCA	U. BOUMERDES	Co-Encadreur
GHERNOUTI Y.	Pr.	U. BOUMERDES	Examineur
RABEHI B.	MCA	U. BOUMERDES	Examineur
HAMZA S.M.	MCA	U. BOUMERDES	Examineur

Boumerdes 2016 – 2017

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 PARENTS pour leur soutien dans chaque travail que nous avons effectués.

A notre encadreur Madame Chahour Kahina et aussi à notre Co-encadreur Mr. SAFI.BRAHIM. Pour leur aide et leur suivi, leurs orientations et nombreuses interventions qui ont permis l'aboutissement de ce travail.

A l'ensemble des enseignants du département de Génie Matériaux,

Mes remerciements vont également aux responsables et personnels du Département de Génie Civil Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou (UMMTO) et aux ingénieurs de laboratoire de béton Mr Bouhraoua Rachid et Mme Fadhila pour leur bon accueil et leurs orientations durant toute la durée du stage.

Nous remercions très vivement Mme Sebki Ghania et les deux mademoiselles Ghanem Fadhila et Aldjia pour leur aide précieuse, leur grande disponibilité, et leur gentillesse qui ont nos permis d'élaborer ce travail

Nous ne manquerions pas non plus de dire un grand merci aux membres du jury qui ont acceptés, sans aucune réserve, d'évaluer ce mémoire à sa juste valeur, et de nous faire part de leurs remarques surement pertinentes qui, contribueront, sans nul doute, au perfectionnement du présent travail

Enfin nous remercions tous ceux qui nous encouragés, aidés et contribués de ce mémoire.

Merci à tous

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

A la mémoire de mon père, et à celle qui m'a donnée la vie et l'envie de vivre, à celle qui m'a entouré de sa tendresse, à celle qui a attendu avec patience les fruits de sa bonne éducation, à ma chère mère

Merci pour avoir veillée sur moi

A mes frères, Azzedine, Sofiane et Brahim

A mon frère, Farid et ma belle-sœur Nadia et leur enfant Abdellah

A ma chère sœur Nora et son mari Farhet et leur belle fille Nihel

A la plus personne que j'aime dans ce monde, à qui a été toujours derrière moi et qui a m'a changé ma vie, ma chérie

Sans oublier mes ancêtres et mes tantes sans exception

Ainsi qu'à toute ma famille

*A tous mes frères de cœur, Ali Farid Walid Mohamed Azwaw Karim Mahdi
Saïd Hamza Lamine Bilal Fouad Dadah Rabah Rafik Abdenour Aissa Arezki
Omar Younes Sami et Nabil*

A mon frère, Lounis et à toute la famille Bouazouni

Toute la promotion de MCD 15

Particulièrement, à tous les gens avec qui j'ai passé du très bon moment et à tous ceux qui j'ai oublié de citer leur nom et qu'ils connaissent leur importance dans ma vie.

ABDELLAH

Dédicace

Je dédie ce mémoire à :

Tous ceux qui se sont donné toutes les peines et les sacrifices,

Pour me voir réussir dans la vie.

Les deux personnes les plus chères à mon cœur, mon père et ma mère, qui m'ont apporté soutien et réconfort tout au long de mes études.

A Mes sœurs et Mon binôme «Abdellah OMIRI» et la famille «Bouazouni» et «Ziane» et Tous mes amis sans exception.

Mes amis du groupe MCD₁₅.

Et sans oublier mes enseignants qui m'ont soutenu durant

Toutes mes années d'études.

LOUNIS

SOMMAIRE

Introduction générale.....	7
----------------------------	---

Chapitre I Les bétons autoplaçants

I.1.Introduction.....	8
I.2.Constituants des BAP.....	9
I.3.Essais de Caractérisation des BAP à l'état frais.....	10
I.4. Classification des BAP.....	14
I.5. Méthodes et techniques de formulation des BAP.....	16

Chapitre II : les Sables de la Fonderie

II.1.Introduction.....	18
II.2. Définition Sable de fonderie.....	18
II.3. Particularités des sables usés.....	19
II.4. Les sables de fonderie en Algérie.....	20
II.5.Caractéristiques des différents sables utilisés en fonderie.....	21
II.6. Moulage au sable.....	22
II.7. Les pièces pour le moulage au sable.....	23
II.8. Les étapes du moulage au sable pour choisir les meilleurs matériaux.....	24
II.9. Les solutions pour les sables de fonderie.....	24
II.10. Caractéristiques environnementales.....	25
II.11. Aspects sanitaires.....	25
II. 12. Etat de l'art sur l'utilisation des sables de la fonderie dans les mortiers et bétons.....	26
II. 13. Conclusion.....	29

Chapitre III : Méthodologie et Choix des Matériaux

III.1.Objectif du travail.....	30
III.2.Méthodologie du travail pratique.....	30
III.3.Caractéristique des matériaux utilisés.....	31
3.1. Ciment.....	31

3.2. Fillers de calcaire.....	32
3.3. Sable.....	33
III.4. Superplastifiant.....	34
III.5. Déchet du sable de fonderie.....	36
III.6. Caractéristiques des sables de fonderie.....	37
III.7. Analyse granulométrique par laser.....	38

Chapitre IV : Formulation des Mortiers

IV.1. Introduction.....	39
IV.2. Formulation du mortier autoplaçant.....	41
IV.2.1. Composition sèche et imbibé du béton et du MBE.....	41
IV.2.2. Composition du mortier autoplaçant (MBE) dans 1 m ³	42
IV.2.3. Vérification de la composition du MBE dans 1 m ³	42
IV.2.4 Protocole de mélange des mortiers autoplaçants (MAP).....	43
IV.2.5. Conduite d'essais.....	45

Chapitre V : Résultats et Interprétations

V.1. Substitution partielle de ciment.....	46
V.1.a) Etat frais.....	47
V.1.b) Etat durci.....	47
V.2. Substitution partielle de sable.....	48
V.2.a) Etat frais.....	53
V.2.b) Etat durci.....	53
V.3. Comportement mécanique des mortiers étudiés.....	54
V.3.Cas de substitution de sable.....	55
Conclusion Générale.....	56
Références.....	

Liste des figures

- Figure I.1 :** *Constituants des bétons Ordinaires et des BAP.....*
- Figure I.2 :** *Le mécanisme d'action du superplastifiant à base de polycarboxilate (ACI).....*
- Figure I.3 :** *Essai d'étalement.....*
- Figure I.4 :** *Schéma de la boîte en L (toutes les dimensions en mm)*
- Figure I.5 :** *Entonnoir à mortier.*
- Figure I.6 :** *Essai d'étalement modifié*
- Figure II.1 :** *Moule au sable*
- Figure II.2 :** *Les pièces pour moulage au fer et acier*
- Figure II.3 :** *les moules au sable*
- Figure II.4 :** *Résistance à la compression des mortiers avec rapport $E/C = 0,50$*
- Figure II.5 :** *Résistance à la compression des mortiers avec rapport $E/C = 0,55$*
- Figure II.6 :** *Résistance à la compression des bétons avec rapport $E/C = 0,50$*
- Figure II.7 :** *Résistance à la compression des bétons avec rapport $E/C = 0,46$ [*
- Figure III.1 :** *Filler calcaire*
- Figure III.2 :** *Analyse granulométrique de sable de keddara 0/5.*
- Figure III.3 :** *Déchet de sable fonderie utilisé dans cette étude*
- Figure III.4 :** *Analyse granulométrique des deux sables*
- Figure III.5 :** *Distribution granulométrique en fraction volumique*
- Figure III.6 :** *Distribution granulométrique du ciment et de sable de fonderie*
- Figure IV.1 :** *Malaxeur pour des mortiers autoplacants (MAP).*
- Figure IV.2 :** *Mini- cône pour mortier et pâte de ciment*
- Figure IV.3 :** *Confection des éprouvettes du mortier autoplacant*
- Figure IV.4 :** *La machine d'écrasement et de flexion*
- Figure V.1 :** *Essais d'étalement sur le mortier autoplacant frais*
- Figure V.2 :** *Fluidité des mortiers étudiés en fonction du taux de substitution du ciment par déchet sable de fonderie*

Figure V.3 : *Essai de compression (Machine de l'écrasement)*

Figure V.4 : *Essai de traction par flexion*

Figure V.5: *L'essai de compression uni-axiale*

Figure V.6: *Evolution de la résistance à la traction par flexion des mortiers en fonction du taux de substitution de ciment par déchet sable de fonderie à différent âge (2, 7, et 28 jours)*

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

Figure V.8: *Fluidité des mortiers étudiés en fonction du taux de substitution du sable par déchet sable de fonderie*

Figure V.9: *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 (2, 7, et 28 jours)*

Figure V.10: *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, 7, et 28 jours)*

Figure V.11: *Contraintes-déformations des mortiers étudiés à 28 jours*

Liste des tableaux

Tableau I.1 : *Propriétés requises des BAP à l'état frais pour chaque catégorie*

Tableau II.1 : *Caractéristiques des différents sables utilisés en fonderie*

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 : *Résistance à la compression et à la flexion du ciment Norme NF EN 196-1*

Tableau III. 5: *Analyse chimique du calcaire par fluorescence X*

Tableau III. 6 : *Propriétés physiques du calcaire*

Tableau III. 7 : *Caractéristiques physiques du sable concassé (0/5) selon la norme NF EN 933-1*

Tableau III.8 : *Analyse granulométrique par tamisage du sable Keddara 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) pour 3000g*

Tableau IV.1 : *Intervalles pour chaque constituant selon la méthode Japonaise*

Tableau IV.2 : *Composition pour 1 m³ du BAP*

Tableau IV.3 : *Composition sèche et imbibée du béton et du MBE*

Tableau IV.4 : *Composition du MBE dans 1 m³*

Tableau IV.5 : *Vérification de la composition du MBE dans 1 m³*

Tableau V.1 : *L'essai de l'étalement pour substitution ciment*

Tableau V.2 : *Essais de traction par flexion des mortiers étudiés effectués à 2, 7, et 28 jours*

Tableau V.3 : *Essais d'écrasement des mortiers étudiés effectués à 2, 7, et 28 jours*

Tableau V.4 : *L'essai de l'étalement pour substitution sable*

Tableau V.5 : *Essais de traction par flexion des mortiers étudiés effectués à 2, 7, et 28 jours*

Tableau V.6 : *Essais d'écrasement des mortiers étudiés effectués à 2, 7, et 28 jours*

Résumé

Les déchets industriels ont trouvés leur place comme matériaux cimentaires dans la fabrication des bétons 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 granulat fin (sable), afin d'améliorer certaines propriétés à l'état frais telles que la fluidité ou durcie telles que la durabilité du matériau béton. Cependant, il existe d'autres types de déchets qui nécessitent d'être recycler, à savoir les sables de la fonderie.

Les 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 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 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 la fabrication de ces bétons.

A cet effet, 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) et comme ajout cimentaire (par une substitution partielle de ciment) pour produire du béton autoplaçant. Ce travail présente une étude expérimentale sur la formulation et caractérisation physico-mécanique des mortiers et bétons autoplaçants à base de ce type de déchet.

Mots-clés : sable de fonderie, mortier autoplaçant, béton autoplaçant, essais physique et mécanique.

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

Introduction Générale

Les déchets industriels ont trouvé leur place comme matériaux cimentaires dans la fabrication des bétons 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 granulat fin (sable), afin d'améliorer certaines propriétés à l'état frais (telles que la fluidité) ou durci (telles que la durabilité béton). 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. Dans le procédé de moulage des 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 réutilisation 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 bétons hydrauliques. Pour cette raison, les recherches continues pour trouver des constituants rentrant dans la formulation des bétons spéciaux afin de diminuer le coût 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) et comme ajout cimentaire (par une substitution partielle de ciment) pour produire du mortier autoplaçant. Ce travail présente une étude expérimentale sur la formulation et la caractérisation physico-mécanique des mortiers et bétons 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 rapports.

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 d'un BAP et différentes variantes 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 : les bétons autoplaçants (BAP)

Ce chapitre est consacré aux généralités sur les bétons 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.1.Introduction

L'idée de produire des bétons autoplaçants est apparue pour la première fois au Japon en 1986, le Japon fut le pionnier dans le développement de cette nouvelle technique. Afin de satisfaire les conditions habituellement contradictoires (déformabilité et résistance à la ségrégation), on a fait appel à la technique du béton coulé sous l'eau, En effet, la première génération des bétons autoplaçant est formulée de la même manière que les bétons destinés aux structures submergées, mais avec une viscosité plus faible et donc une maniabilité plus élevée.

Grâce à leurs avantages socio-économiques et grâce à la masse en produit des superplastifiants, les bétons autoplaçants (BAP) se développent rapidement dans le monde entier. Le BAP, par définition est ***un béton très fluide, homogène et stable, sa mise en œuvre s'effectue sans vibration mécanique (le compactage du béton se fait par son propre poids)*** [1-2]. Il est principalement caractérisé par son comportement à l'état frais tel que la fluidité élevée et la résistance suffisante à la ségrégation. Par rapport aux bétons vibrés, les avantages des BAP, sont [4-5] :

- Augmentation de la productivité en raison de la réduction du temps de réalisation ; Réduction des nuisances sonores dues à la vibration ;
- Milieu et conditions du travail au site, amélioré;
- Qualité extérieure améliorée ainsi que la bonne qualité de la surface des éléments en réduisant les défauts d'apparence;
- Facilité de bétonnage des éléments fortement ferraillés ;

- Remplissage des coffrages de grande hauteur ou de forme complexe, surtout, en cas de présence des parties difficilement accessibles ;
- Réduction des coûts de construction.

Toutefois, les BAP présentent aussi des inconvénients non négligeables, telles que:

- Augmentation du coût des matières premières à cause d'une quantité relativement élevée de fines et de l'utilisation des adjuvants ;
- Augmentation des déformations différées, comme le retrait et le fluage du béton ;
- Utilisation des coffrages plus étanches

Pour satisfaire les exigences d'un BAP, deux paramètres doivent être vérifiés, ce sont : Un faible taux de cisaillement et une haute résistance à la ségrégation. Ces deux paramètres sont interdépendants entre eux. Pour diminuer le taux de cisaillement du mélange béton, l'eau est ajoutée dans ce cas, mais ce constituant peut affecter la viscosité du mélange en diminuant ainsi la résistance à la ségrégation. De ce fait, le bon choix des constituants s'avère souvent nécessaire pour certaines formulations.

I.2. Constituants des bétons autoplaçants

Un béton est constitué de deux parties principales : les granulats et la pâte (voir figure 1). Par rapport aux bétons classiques, les BAP ont deux constituants supplémentaires qui doivent être présents dans la composition du béton. [3]

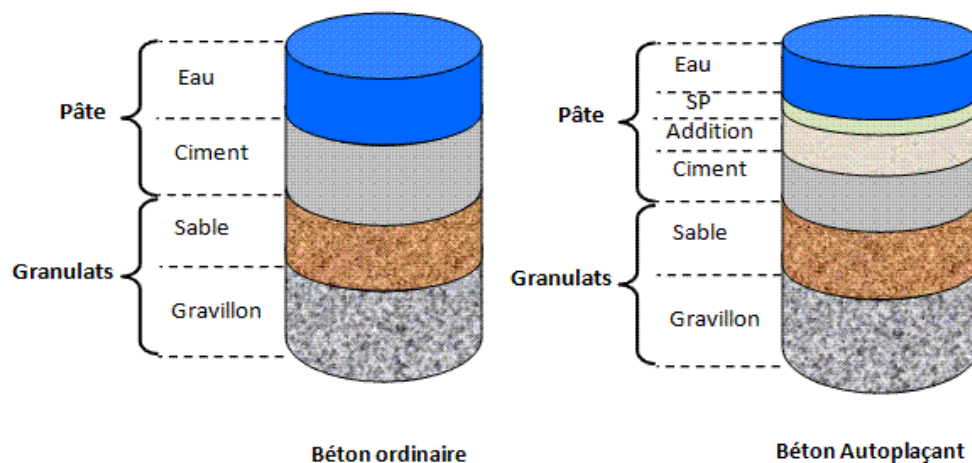


Figure I.1 : Constituants des bétons Ordinaires et des BAP [3]

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

- Ciment
- Granulats
- Eau

- Les ajouts minéraux
- Les superplastifiants

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

Additions minérales

L'utilisation des additions minérales dans les BAP, a fait l'objet de plusieurs travaux de recherche [4]. Les résultats de ces travaux ont montré que l'intégration des additions minérales dans la composition des BAP, présente des avantages, du point de vue économique, environnementale et technique. Les additions minérales possèdent souvent une finesse comparable à celle du ciment, voire une finesse beaucoup plus grande. Parmi ces additions, le filler calcaire, la cendre volante, le laitier de haut fourneau et la fumée de silice sont les plus utilisées. Du fait que la plupart des additions minérales sont des sous-produits industriels, leurs utilisations dans la fabrication du béton peuvent réduire le coût de traitement des déchets industriels et limiter les impacts environnementaux.

Les additions minérales sont aussi connues par leur influence sur les propriétés du béton à l'état frais et à l'état durci [5]. Les additions minérales améliorent considérablement la fluidité dans certains cas d'addition, elles améliorent aussi la granulométrie du squelette dans le béton en remplissant les vides entre les grains grâce à leurs petites tailles. Toutefois, l'influence des additions minérales sur l'écoulement des BAP à l'état frais dépend principalement du dosage, du type et de la finesse des additions minérales [8-9].

Les effets de ces matériaux, telles que les teneurs réduites en ciment portland et la chaleur inférieure d'hydratation, ont été également exploitées dans des situations pratiques (Khayat et al, 2000 ; Henderson, 2000) [10-11]. Des matériaux ultrafins tel que le CSF (Condensed silica fume) ont été également employées dans le BAP. De telles additions ont pour rôle la réduction de la fluidité et l'abaissement de l'étalement. Cependant, un certain nombre de chercheur (Petersson et al, 1996 ; Khayat et al, 2000) ont employé le CSF dans le BAP, pour maintenir la fluidité du BAP désiré en augmentant le dosage en superplastifiant [10-12]. La plus grande condition du dosage de fines dans le BAP, a été également compensée en employant les matériaux de remplissage. Le matériau le plus utilisé généralement est la poudre de calcaire appelée ainsi filler du calcaire car il est généralement admis en tant qu'ajout économiquement fiable [12-15].

Superplastifiants

Les superplastifiants sont apparus à la fin des années 1970 au Japon et en Allemagne. Ce sont généralement des sels sulfoniques de formaldéhydes, naphthalènes ou mélamines, qui ont la propriété de pouvoir améliorer notablement la fluidité d'une gâchée, et donc de diminuer la quantité d'eau nécessaire à sa mise en œuvre. Leur arrivée sur le marché a permis le

développement des bétons à "hautes performances". Ces superplastifiants assurent une défloculation de la suspension de ciment en solution aqueuse, ce qui améliore caractéristiques rhéologiques du mélange [4]. La défloculation serait obtenue par répulsion électrostatique des nuages de molécules ainsi formés en périphérie des grains et/ou par l'encombrement stérique de ces molécules qui empêcherait les contacts entre les particules de ciment. Le niveau élevé de la cohérence (ouvrabilité) requis par les BAP tout en maintenant la stabilité du mélange, a mené à l'utilisation d'un certain nombre d'adjuvants dans le béton. La demande élevée en eau pour réaliser une fluidité requise par le BAP, était tout impraticable compte tenu du dosage très élevé de ciment qui était souvent requis pour permettre aux conditions de résistance à la compression d'être rencontrées. L'arrivée des superplastifiants et la technologie de développements de ces adjuvants, ont joué un rôle essentiel dans le développement des BAP. Les superplastifiants modernes (basés sur les éthers polycarboxyliques) favorisent la conservation de la fluidité souhaitée tout en maintenant la stabilité du mélange de béton. Ces superplastifiants réalisent ceci avec un mécanisme de répulsion électrostatique en combinaison avec l'obstacle stérique (la figure I.2).

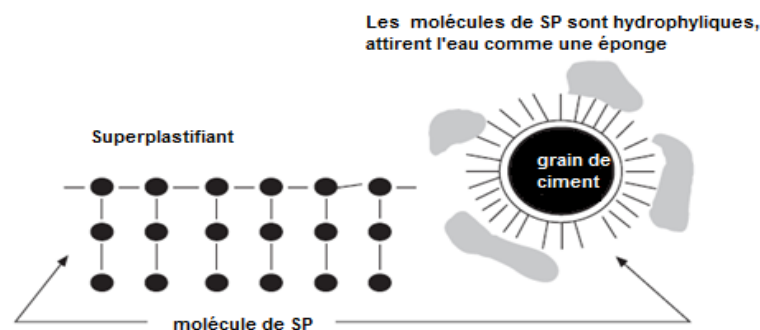


Figure I.2 : Le mécanisme d'action du superplastifiant à base de polycarboxylate (ACI) [4]

Les superplastifiants récents sont les polycarboxylates qui assurent une meilleure défloculation de la suspension de ciment en solution aqueuse, ce qui améliore caractéristiques rhéologiques du mélange (Ramachandran, 1995) [16]. En effet, les molécules organiques de ces superplastifiants, s'adsorbent à la surface des particules de ciment. La dispersion de ces particules, est obtenue par la répulsion électrostatique des molécules du polymère autour de la périphérie des grains et/ou par l'encombrement stérique de ces molécules, qui empêcherait les contacts entre les grains de ciment.

I.3.Essais de Caractérisation des BAP à l'état frais :

Plusieurs essais de caractérisation ont été préconisés en l'an 2000 par l'Association Française de Génie Civil (AFGC) [1]. D'abord provisoires, ces recommandations sont devenues, sur site, les essais de référence pour valider une formule de BAP.

1.3.a). Essai d'Etalement (Slump Flow) :

Pour la détermination de l'étalement (Slump Flow), on utilise le même cône que celui normalement utilisé pour l'essai d'affaissement. Ce cône est placé sur une plaque d'étalement, à surface propre et humidifiée et de dimension suffisante (800 par 800 mm), puis il est rempli de béton BAP. Le cône est ensuite soulevé et le BAP en sort en formant une galette qui s'élargit sous sa propre énergie, sans qu'il soit nécessaire de soulever et de laisser retomber la plaque, comme dans l'essai classique d'étalement. La valeur de l'étalement correspond au diamètre moyen de la galette de béton ainsi obtenue, qui devrait être comprise entre 600 et 800mm. L'important est de procéder toujours de la même manière. Lorsque la petite ouverture se trouve en bas (figure I.3), le remplissage du cône avec le BAP est facilité et son soulèvement est empêché.

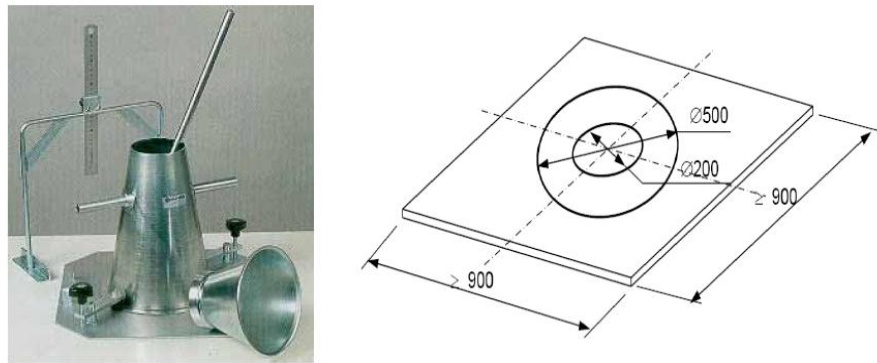


Figure I.3. Essai d'étalement [5]

I.3. b). Essai de la boîte en L (L-Box) :

La procédure d'essai de la boîte en L est la suivante: la partie verticale de la boîte est remplie de béton. Ensuite, le volet est soulevé, ce qui provoque l'écoulement du béton qui doit passer à travers un grillage, formé de 3 barres d'armature $\varnothing 14$ mm distantes de 39 mm, avant de pouvoir atteindre la partie horizontale de la boîte. On mesure le temps nécessaire dès l'ouverture du volet jusqu'à la fin de l'écoulement du béton dans la partie horizontale. Ce temps d'écoulement devrait être compris entre 3 et 7 secondes. On peut aussi mesurer la hauteur atteinte aux deux extrémités de la partie horizontale par le béton (h_1 et h_2), afin de qualifier sa capacité d'autonivellement. Le rapport H_2/H_1 devrait être supérieur à 0,80. L'essai permet en outre de vérifier la capacité du béton à s'écouler au travers d'un réseau d'armatures d'écartement défini. (Figure I.4)

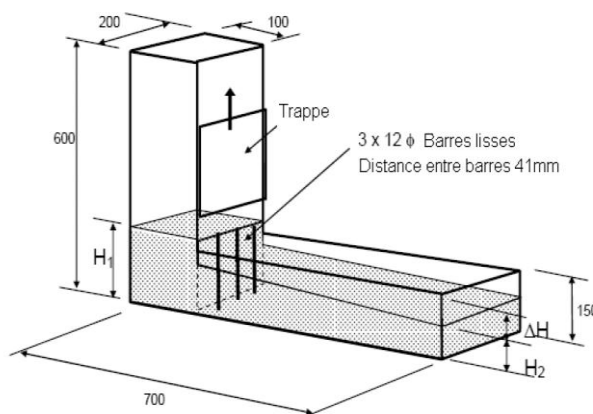


Figure I.4. Schéma de la boîte en L (toutes les dimensions en mm) [5].

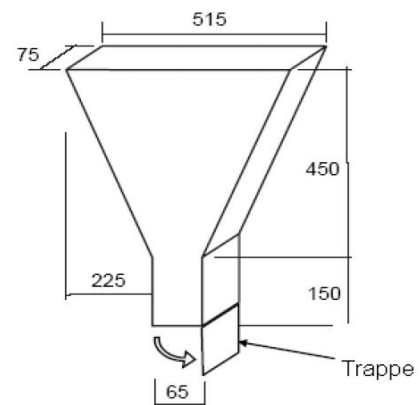


Figure I.5. Entonnoir à mortier.

I.3.c). Essai d'entonnoir (V-Funnel) et d'étalement modifié (J-Ring):

La procédure d'essai avec l'entonnoir est la suivante: l'entonnoir dont les dimensions sont définies à la figure I.5, est rempli de béton jusqu'en haut. Le clapet de fermeture situé à sa base est ensuite ouvert, ce qui provoque l'écoulement du béton, dont on mesure le temps nécessaire jusqu'à ce que l'entonnoir se soit entièrement vidé. Plus le béton s'écoule rapidement hors de l'entonnoir, plus sa viscosité est faible. Un temps d'écoulement compris entre 8 et 14 secondes est recommandé pour le béton BAP.

L'essai d'étalement modifié (J-Ring) fut développé au Japon et consiste à faire écouler le béton à travers des barres d'armature afin de pouvoir évaluer sa tendance au phénomène de blocage. A cet effet, le béton s'écoule à partir du cône disposé au centre d'un anneau métallique. Sur cet anneau de 300 mm de diamètre, sont soudées des barres d'armature $\varnothing$ 16 à 18 mm, espacées régulièrement d'environ deux fois et demi leur diamètre. Le béton BAP satisfait pleinement aux performances recherchées de fluidité avec faible tendance à la ségrégation et l'enrobage complet des armatures, lorsqu'il s'écoule de manière uniforme à travers cet anneau et lorsque la répartition des granulats paraît homogène, aussi bien à l'intérieur qu'à l'extérieur de l'anneau. (Figure I.6)

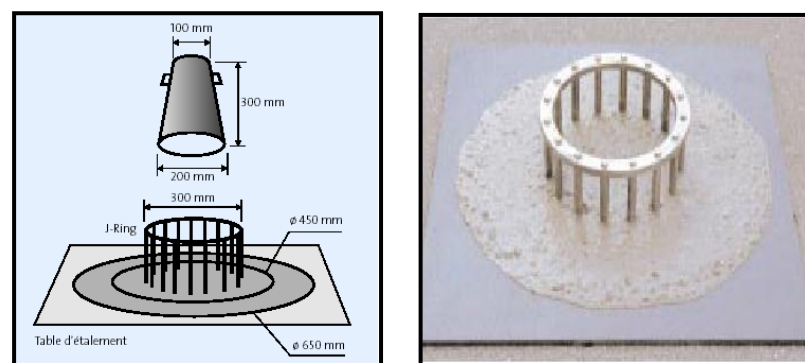


Figure I.6. Essai d'étalement modifié

I.3.d). Essai de stabilité au tamis:

A la fin du malaxage, dix litres de béton sont versés dans un seau. Après une attente de quinze minutes, une masse 4,8 kg de béton est versée du seau sur un tamis de maille 5 mm. Deux minutes plus tard, on pèse la quantité de pâte (laitance) ayant traversé le tamis. Un pourcentage élevé de laitance par rapport à la masse initiale est un indicateur d'une faible résistance à la ségrégation. L'AFGC a proposé, en plus, un essai de mesure du ressuage qui semble avoir été abandonné aujourd'hui, car peu pertinent (le ressuage est faible chez les BAP) et très contraignant (utilisation d'un liquide nocif) [1].

I.4. Classification des BAP

Les BAP sont globalement classés en 3 catégories en prenant en compte les conditions de chantier [2]. Le classement est basé sur la valeur de l'intervalle d'écoulement, le type d'application (horizontal ou vertical) et l'épaisseur (dans le cas d'application horizontale). Les classifications des BAP permettent aux entrepreneurs de choisir judicieusement les BAP en fonction des conditions réelles au site. Les tableaux (I-1 et I-2) montrent respectivement les critères de classification pour les BAP et les propriétés requises à l'état frais par chaque catégorie.

Tableau I.1: Classification des BAP à l'état frais [2, 4]

		Application Horizontale				Application verticale	
		Epaisseur ≤ 300 mm		Epaisseur > 300 mm			
	Longueur max. de cheminement	≤ 5 m	5 – 10m	≤ 5 m	5 – 10m	≤ 5 m	5 – 10m
Intervalle d'écoulement	$I \geq 100$	1		2a	2b	2a	2b
	$80 \leq I < 100$	2a	2b	2a	2b	2a	2b
	$I < 80$	3a	3b	3a	3b	2a	3b

Tableau I.2 : Propriétés requises des BAP à l'état frais pour chaque catégorie [2, 4]

	Cat. 1	Cat.2a	Cat. 2b	Cat. 3a	Cat. 3b
Valeur au tamis	20%	20%	15%	15%	10%
Valeur max. à la boîte en L	Pas prescription particulière	0.8 avec 2 barres	0.8 avec 2 barres	0.8 avec 3 barres	0.8 avec 3 barres

La catégorie 1 correspond aux BAP utilisés dans le cas de coulages horizontaux de faible épaisseur ou ayant un intervalle d'écoulement supérieur à 100mm (anciennement appelé BAN : Béton auto-nivelant). La catégorie 2 couvre principalement les BAP utilisés pour des applications horizontales de forte épaisseur ou pour des coulages courants en vertical. L'intervalle d'écoulement est dans la fourchette de 80-100mm. La catégorie 3 réservée aux BAP ayant un intervalle d'écoulement inférieur à 80mm (parties d'ouvrage exiguës ou fortement ferrillées). Pour les catégories 2 et 3, on distingue deux sous-classes : 2a, 2b et 3a, 3b en fonction de la longueur maximale de cheminement horizontal du BAP dans le coffrage.

I.5. Méthodes et techniques de formulation des BAP :

Des méthodes rationnelles de formulation des BAP ont été proposées dans la littérature technique. Ce n'est qu'à la fin des années 1980 que les bétons autoplaçants ont été utilisés pour la

première fois au Japon, afin d'améliorer la rentabilité de la construction, d'assurer constamment une mise en place correcte avec un béton de qualité et de diminuer les nuisances sonores [17].

Le développement du béton autoplaçant (BAP) est récemment devenu l'un des développements les plus importants dans l'industrie du bâtiment. C'est un béton qui a la capacité de remplir complètement le coffrage, même dans les systèmes trop confinés, sans qu'il y ait ségrégation entre les constituants du béton lors du transport, du pompage et de la mise en œuvre. Les deux chercheurs japonais Okamura et Ouchi [17], ont établi la première méthode de formulation des BAP, appelée la méthode japonaise. Cette méthode suggère que le volume du gravillon et du sable sont limités par le rapport G/S (qui est pris proche de 1), et le volume du mortier doit être à 40% du volume totale de béton. Cette limitation du volume des granulats conduit à un volume important de la pâte. En Europe, particulièrement aux Pays Bas, la méthode japonaise a été adoptée et employée comme point de départ pour le développement des BAP [17].

De nombreux travaux ont été consacrés à l'étude des formulations appropriées aux BAP. Les compositions tirées de la littérature soulignent deux particularités : ces bétons contiennent un volume de fines plus important que les bétons classiques vibrés et souvent un agent de viscosité (les Japonais utilisent également des forts dosages en superplastifiants).

Les différents constituants, en plus du ciment et de l'eau dosés de manière à obtenir une résistance mécanique donnée, qui sont proposés pour composer les bétons autoplaçants sont : les granulats, les fines, le fluidifiant et l'agent de viscosité.

Yurugi et al, et Khayat et al., [18-19], considèrent que le volume des gros granulats (grain supérieur à 5mm) dans le béton est l'un des facteurs les plus importants à prendre en considération. En effet, ils ont constaté que, plus la teneur en gros granulats augmente plus la capacité de remplissage diminue. De plus, les gravillons étant la cause du blocage en milieu confiné, leur volume est limité et le rapport gravillon/sable est proche de 1 [20].

Selon Okamura et al [21], l'utilisation d'un superplastifiant à faible perte d'étalement est essentielle pour la confection de bétons autoplaçants. Même si de nombreuses études ont été effectuées pour comprendre les principes qui régissent le comportement de ces bétons en milieux confinés, aucune méthodologie pratique de formulation ne semble avoir été établie, permettant à un chercheur ou à un ingénieur de fabriquer un béton autoplaçant à partir de données de base sur les matériaux locaux et un cahier des charges précis[22].

I.5.3. Méthodes de formulation existantes

Les méthodes de formulations des bétons autoplaçants utilisées actuellement, sont ;

- Méthode japonaise, proposée par Okamura et al [21] .

- Méthode française (LCPC), proposée par De Larrard et al [23] .
- Méthode suédoise, proposée par Peterson et al [24] .
- Méthode Taïwanaise, proposée par Nan Su [25], et simplifiée par Nan Su [26].
- Méthode de LGC, proposée par Shen Je [27].
- Autres Méthodes, la méthode reposant sur la théorie de «l'excès de pâte » : proposée par Oh et al [28].

Chapitre II : les Sables de Fonderie

Cette étude a pour objectif de valoriser les sables de fonderie dans les bétons, ce présent chapitre consiste à donner des généralités sur les différents sables de fonderie qui existent dans l'industrie de métallurgie. De même nous présentons ici, un état de l'art sur l'utilisation des sables de fonderie en tant que sable et qu'ajout cimentaire dans la composition des bétons.

II.1 Introduction :

La conjugaison des coûts d'achats des sables neufs, de leur transport et du tonnage considérable de sable nécessaire à la confection des moules et des noyaux (estimé globalement de 5 à 10 fois le volume des pièces produites) a incité l'industrie de la fonderie à recycler préférentiellement les sables usés dans leur procédé de moulage des pièces métalliques. 90 % du sable brûlé est recyclé à la confection de nouveaux moules par ajout de sable neuf et moyennant une préparation spécifique (régénération). Le sable restant (10 %) est rejeté du procédé de fabrication. A ce stade, le « sable usé » est considéré comme un déchet de fonderie et peut éventuellement suivre une autre voie de recyclage. Ces matériaux sont principalement constitués de sable d'origine naturelle mélangé à des liants de nature très variée (argile, silicate de soude, résine furanique) et à des résidus de métaux fondus. Le premier type de procédé à base de liants minéraux d'origine naturelle (argile) (de la bentonite pour les sables à vert) génère des sables dont l'élimination n'implique pas de risque de pollution de l'environnement. Les procédés à base de liants organiques d'origine synthétique utilisent dans la grande majorité des cas, des résines phénoliques ou furaniques qui sont présentes dans les sables en quantités diverses. Ces sables peuvent être, soit stockés dans des installations dûment autorisées à cet effet, soit valorisés en les introduisant dans des procédés aptes à détruire ces liants. Les sables usés peuvent être utilisés en agriculture, en construction routière, dans le domaine du bâtiment, pour la fabrication de tuiles, de briques et de ciment. [1]

II.2 Sable de fonderie

Déf : le sable de fonderie lie avec des matériaux naturels (bentonite, sable à verts) ou des résines chimiques (sables à prise chimique), Il est utilisé pour confectionner des moules et des noyaux dans lesquels sont coulés les métaux en fusion. Ce procédé de moulage au sable est utilisé

pour la totalité des productions de fonderie de fonte et d'acier. Après l'opération de démoulage des pièces métalliques, une grande partie des sables est réutilisée sur place par régénération, tandis que les sables usés de fonderie résiduaux nommés également sables rejetés ou vieux sable doivent être éliminés. [6]

Origine : Le sable de fonderie est un sable propre, de granulométrie uniforme, ayant une haute qualité qui est lié par un liant pour former des moules afin de mouler des pièces en métal ferreux ou non ferreux. [6]

II.3 Particularités des sables usés

Les sables usés sont des résidus de calcination qui résultent du traitement thermique des sables de moulage à haute température (parfois plus de 1000°C) lors de la coulée du métal en fusion. On peut détecter des traces d'adjuvant tels que le noir minéral qui facilite le démoulage des pièces ou des produits organiques de toutes natures (paraffines, graisses aux silicones-esters, sulfonates,...). Il est important de signaler que les sables usés peuvent également contenir un certain nombre de corps étrangers (billes de métal, bavures, supports de noyaux, ...), si les déchets issus du traitement de régénération des sables de moulage (déchets métalliques, refus de criblage, dépoussiérage) ne sont pas convenablement gérés. Ils peuvent contenir des quantités importantes de métaux lourds, comme le nickel et le chrome, deux éléments d'alliage fréquemment rencontrés dans les aciers. Certains sables usés, issus des sables de moulage à la résine, peuvent contenir des matières organiques plus ou moins dégradées par la coulée. [2]

II.4 Les sables de fonderie en Algérie

L'industrie Algérienne des fonderies 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 sont répertoriés comme suite :

4-1. **Sable à vert ou à l'argile :** Le sable de base est constitué principalement de grains de silice pure (quartz), mélangés avec de la bentonite (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.

4-2. **Sable au silicate de soude :** Le sable au silicate de soude dénommé sable de remplissage (3 % à 4 %) est utilisé pour la confection de grandes séries de moules et de noyaux. Ces mélanges sont durcis, par injection de gaz carbonique. Ce type de sable est utilisé pour le moulage de pièces en acier.

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.

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 therm durcissable 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. [2]

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.

II.5 Le moulage au sable

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. [3]



Fig. II. 1 : Moule au sable

II.5 Caractéristiques des différents sables utilisés en fonderie :

Les caractéristiques des différents sables utilisés en fonderie, peuvent être résumées dans le tableau ci-dessous.

Tableau II.1 : Caractéristiques des différents sables utilisés en fonderie

	Chromite	Kerpahlite	Olivine	Silice	Zircon
Prix	élevé	élevé	moyen	faible	élevé
Densité	4.5	3.1	3.5	2.6	4.5
T°C Fusion	2100 °C	1850°C	1850°C	1725°C	2300°C
Compatibilité résine	haute	haute	moyenne	très haute	très haute

➤ Le choix d'un sable est déterminé par son:

- coût: la silice a le meilleur taux de rentabilité

- Rapport technique: on peut par exemple conclure que la silice a une température de fusion assez faible par rapport aux autres sables, on ne l'utilisera pas pour des applications nécessitant de très bonnes caractéristiques mécaniques.

Le "sable" comporte également des liants qui lui donnent sa plasticité (caractéristique du sable à épouser les formes du modèle et à les conserver après la solidification du métal). C'est liants doivent réduire au maximum les réactions entre le métal et le moule qui sont les facteurs de risque les plus sensibles. Les liants sont soit minéraux (argile, plâtre, ciment, ...) soit organiques (résines synthétiques, huiles siccatives, ...). D'autres produits entrent dans la composition du sable comme les agents de démoulage ou les enduits destinés à faciliter d'extraire les pièces de leurs moules.

Un acheteur sollicitera une fonderie de moulage au sable s'il cherche des pièces:

- facile à mettre en œuvre
- à bon prix
- avec un bon état de surface [3]

II.6. Moulage au sable

Le moulage au sable est un processus par lequel un matériau réfractaire est façonné dans un moule qui forme une cavité d'une forme spécifique de telle sorte que le métal fondu peut alors être versé dans la cavité. La cavité du moule doit conserver sa forme jusqu'à ce que le métal soit solidifié et que le moulage soit retiré. Les caractéristiques du moule varient en complexité en fonction du type de métal utilisé. Des industries dans le monde entier s'appuient sur notre connaissance approfondie des techniques de moulage ainsi que sur notre expérience pour produire des moules efficaces spécifiquement adaptés aux exigences de leur production.

Le prototypage rapide est souvent utilisé avec le moulage au sable pour produire une pièce moulée pour tester la forme, l'ajustement et le fonctionnement. Cette pièce ou prototype coulé permet de déterminer les propriétés finales approximatives des pièces réelles moulées. Dans le moulage au sable, des pièces générées par prototypage rapide peuvent être utilisées comme modèles pour fabriquer un moule en sable. Les procédés de prototypage rapide qui utilisent un matériau similaire à du bois tel que le polystyrène sont communs. Les moules de coulée en sable sont créés en une fraction du temps et fixés sur le panneau de modèle par le fabricant du moulage de sable avant que du sable soit pressé autour de la moitié pour créer un moule en creux.

Avantages

- 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 [4]

II.7 Les pièces pour le moulage au sable

Le moulage au sable convient pour des pièces plus grandes avec des formes complexes. Ces composants se rencontrent dans une grande variété d'industries parmi lesquelles la production de

ciment, l'exploitation minière, la transformation des métaux ou la production d'énergie. Nous travaillons avec un réseau de partenaires et de fabricants triés sur le volet pour vous apporter des pièces moulées de qualité supérieure, comprenant :

- Grilles de refroidissement, doublures de moulin, manèges et rouleaux de poussée (industrie du ciment)
- Bagues en bronze (la plupart des industries)
- Têtes, tourillons et engrenages (industrie minière)
- Rotors, boîtiers de roulement et têtes de sécheuse (Industrie du papier et pâte à papier)
- Boîtes d'engrenage, accouplements et pignons (Production d'énergie)
- Wagonnets complets de granulés (Industrie de la granule)
- Tambours enrouleurs (industrie sidérurgique)
- Turbines et soupapes Wicketgatges, Kaplan, Francis et Pelton (Industrie hydraulique) [4]



Fig. II. 2 : les pièces pour moulage au fer et acier

II.8 Les étapes du moulage au sable pour choisir les meilleurs matériaux

Le moulage au sable est l'un des plus anciens processus métallurgiques et reste l'un des plus populaires à ce jour. Lorsque le processus de moulage au sable est utilisé, il est important de choisir les bons matériaux. Les matériaux que vous choisirez dépendront en grande partie de la taille de la pièce, de l'usage auquel celle-ci est destinée et des coûts associés aux matériaux disponibles. Lorsque vous choisissez votre matériel, il est utile de comprendre le processus. Nous décrivons brièvement les six principales étapes du processus de moulage au sable ci-dessous :



Figure II.3 : les moules au sable

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. Lors du choix de matériaux possibles pour la production d'une pièce moulée, il est pertinent de parler avec un consultant expérimenté qui comprend le processus de moulage au sable et les spécifications de votre projet. Les consultants présents chez Monet ont travaillé sur de nombreux projets de moulage et de forge de toutes tailles depuis des générations. Si vous cherchez à entreprendre un projet de moulage au sable, appelez-nous pour discuter des matières idéales pour votre projet. [4]

II.9 Les solutions pour les sables de fonderie :

Prévention / Réduction : Il faut optimiser le processus de manière à réduire la production de pertes ou de rebuts des moules et noyaux. Il faut favoriser le recyclage in situ pour les sables de fonderies à liants minéraux.

Gestion dans l'entreprise : Lors de leur stockage sur le site de la fonderie en attente d'élimination, ces sables sont entreposés sur un sol imperméable et à l'abri des eaux pluviales et de ruissellement.

Collecte : La collecte doit être réalisée par une entreprise spécialisée. Le détenteur doit tenir un registre spécifiant la date de départ des déchets, la nature et la destination des sables et leur volume (ou leur poids).

Traitement et Valorisation :

- La valorisation représente 20% des déchets de sables (+ 30% en centre de stockage + 50% en stockage interne).
- La majeure partie des sables de fonderies à liants minéraux est recyclée in situ, directement sur le lieu de production des sables usés.
- Les sables usés à liants organiques peuvent suivre quatre voies de valorisation.

La régénération mécanique : consiste à séparer les résines enrobant les grains (opérations de dégangage et de dés enrobage) par frottement des grains les uns contre les autres ou par projection contre une surface dure. Les déchets à base de résine issus de cette opération sont éliminés de la même façon que les sables non brûlés.

La régénération thermique : Permet de détruire la résine par passage dans des équipements chauffés au gaz ou à l'électricité.

La régénération par voie bactériologique : Permet de réduire le taux de phénols des sables.

Des sables de fonderies contenant des liants organiques de synthèse est prévue dans l'arrêté du 16 juillet 1991. Trois possibilités y sont décrites, elles nécessitent toutes un test de lixiviation :

- utilisation en tant que remblais routiers (taux de phénols < 1 mg/kg de sable rapporté à la matière sèche),
- utilisation dans la fabrication de produits à base de liants hydrauliques (graves, parpaings...) (taux de phénols < 5 mg/kg),
- valorisation dans des procédés aptes à détruire des liants organiques et cela, quelle que soit la teneur des sables en phénols : fabrication de tuiles, briques, ciment... sous réserve que les installations soient autorisées au titre de la législation sur les installations classées.

Stockage : En fonction de l'état des sables, de leur taux de phénols et du test de lixiviation, le stockage est régi soit par l'arrêté du 16 juillet 1991, soit par la réglementation générale sur le stockage. Leurs prescriptions s'appliquent que le stockage soit connexe à l'installation de fonderie ou collectif. Le choix du centre de stockage, après stabilisation, est conditionné par l'état des sables (brûlés ou non) et de leur teneur en phénols.

- Les sables non brûlés et déchets provenant du dégangage et du désenrobage :
 - centre de stockage de déchets dangereux si le taux de phénols est > 50 mg/kg de sable rapporté à la matière sèche,
 - centre de stockage de déchets non dangereux si le taux de phénols est < 50 mg/kg,
- Les sables brûlés issus du noyautage et sable brûlés non retenus au tamisage :

- centre de stockage de déchets non dangereux si le taux de phénols est < 50 mg/kg,
- centre de stockage de déchets industriels inertes provenant d'une installation classée dont le taux de phénols est < 1 mg/kg de matière sèche.

Pour les fonderies de plomb, tous les sables doivent être éliminés en installation de stockage de déchets dangereux éventuellement après stabilisation. [5]

II.10 Caractéristiques environnementales

10.1 Acceptabilité environnementale : Pas de ressources bibliographiques sur les caractéristiques environnementales des sables de fonderie selon les exigences du guide SETRA « Acceptabilité de matériaux alternatifs en techniques routières » (2011).

10.2 Effets sur les écosystèmes des sables de fonderie valorisés en techniques Routières : Dans le cas de la ressource en eau, le bon état biologique peut être caractérisé par une méthode standardisée l'IBGN (indice biologique global normalisé) et le bon état chimique par des analyses chimiques. La méthode IBGN utilise différents macro-invertébrés aquatiques comme indicateurs. L'indice peut prendre une valeur variant de 0 à 20. Il se base sur la présence ou l'absence de certains taxons bio-indicateurs (groupe d'espèces ayant la même sensibilité) sensibles à la pollution comme les plécoptères ou résistant à la pollution. Cette méthode a été utilisée lors d'une expérimentation menée par le CETE de Lyon entre 2008-2011 sur les effets de l'emploi de sables de fonderies en couche de forme sur un cours d'eau longeant la route expérimentale de 4 km de long. Les sables de fonderie ont été traités au liant hydraulique (5.5%) et mis en œuvre sur une épaisseur de 46 cm.

10.3 Suivi environnemental : Lors de la valorisation d'un sable de fonderie utilisé en technique routière, l'analyse des émissions peut être réalisée en premier temps dans un laboratoire via des essais de lixiviation et percolation du matériau routier (sable de fonderie utilisé traité ou non mis en œuvre dans le corps de chaussée). Dans un second temps, l'émission de substances peut être suivie in-situ, dans le cadre d'un chantier expérimental (ou plot). Les eaux collectées dans la cuve de stockage sont suivies régulièrement dans le temps par des mesures des volumes collectés et par des analyses physico-chimiques. [6]

II. 11 Aspects sanitaires

Compte tenu de leur composition minéralogique et chimique, les travailleurs utilisant des sables de fonderie utilisés pourraient risquer, en premier lieu, d'être exposés à de la poussière de silice. La poussière de silice est en effet depuis longtemps reconnue comme un risque professionnel majeur, entraînant des invalidités et des décès (par Silicose) parmi les travailleurs dans plusieurs secteurs tels que les domaines des mines et carrières, les industries des matériaux réfractaires, des poteries et des fonderies. Si de nombreuses études sanitaires ont été menées pour les travaux de sablage, de concassage et de minage de roches massives, s'agissant des sables de fonderie, aucun travail significatif n'est accessible à ce jour. Une seule étude expérimentale ponctuelle a été menée dans l'état nord-américain de l'Indiana lors de la mise en œuvre d'un remblai routier fabriqué à partir de sable de fonderie usé mélangé avec des poussières de filtres à air [Afzal W. et al. 2002]. Les ouvriers avaient alerté les Chercheurs sur la façon dont les nuages de poussière se formaient en phase chantier. [6]

II.12 Utilisation des Sables de fonderie dans la production des mortiers de ciment et des bétons:

Le sable de fonderie usé (SFU) est un matériau mis au rebut issu de l'industrie des moulages de métaux ferreux et non ferreux. C'est un mélange de sable de silice spécifique à la taille de haute qualité, peu d'impureté des sous-produits ferreux et non ferreux du procédé de coulée métallique lui-même et d'une variété de liants. Le sable de silice est utilisé comme matériau de moulage, pour les moulages métalliques ferreux (fer et acier) et non ferreux (cuivre, aluminium, laiton), principalement en raison de sa conductivité thermique. Le sable brut est normalement d'une qualité supérieure à celle du banc typique ou des sables naturels utilisés dans les sites de construction de remplissage. Dans le procédé de coulée, les murs de moulage sont recyclés et réutilisés à plusieurs reprises, de petits résidus de sous-produits ferreux et non ferreux proviennent souvent du processus de recyclage. Avant d'être réutilisés, le sable de silice doit être nettoyé au moyen de systèmes de filtrage et de séparateurs magnétiques pour séparer le sable réutilisable des autres déchets et pour séparer des particules de différentes tailles [1, 2].

Bien que le sable de fonderie usé soit partiellement un matériau recyclé lui-même, qu'il soit recyclé et réutilisé avec succès à travers de nombreux cycles de production, il perd souvent ses caractéristiques, en particulier la propreté et l'uniformité. Ne devenant pas adapté au processus de fabrication, il est éliminé comme un gaspillage.

En outre, conformément à la réglementation en vigueur, le sable de fonderie usé est classé comme déchets non dangereux et, par conséquent, il a une valeur économique intrinsèque importante, en particulier en termes de fer et d'acier. Récemment, un certain nombre de travaux de recherches appliquées [6-9], y compris le brevet [10], visant à étudier la faisabilité de réutiliser des sables de fonderie usés dans d'autres secteurs industriels que ferreux. Le produit le plus adapté semble être l'industrie des matériaux de construction, en raison de l'emploi de sable de fonderie usé dans plusieurs matériaux de construction, comme: ajout au clinker pour la production ciment Portland, le béton structurel, les briques, les conglomerats de bâtiments, la base de la route, le remplissage structurel, le remplissage écoulé, l'amendement du sol ou l'amende Portion agrégée de béton ou d'asphalte à chaud [11-13]. En outre, un peu de sable peut être utilisé comme additif haut de gamme pour les matériaux industriels, tels que les plastiques, pour fournir des textures et des couleurs spécifiques [12].

Les données quantitatives détaillées sur les diverses applications bénéfiques du sable de fonderie n'ont pas été bien citées dans la littérature. Récemment, une recherche préliminaire a été menée par des auteurs [14] soulignant qu'une petite quantité de sable de fonderie usé est encore utilisée dans le clinker pour produire le ciment Portland composé. Cela semble dû aux coûts de transport pour regrouper l'usine de destination finale, en particulier compte tenu de la production journalière élevée de la fonderie. Cependant, selon l'association américaine du Ciment Portland au sable de fonderie, qu'on utilise de nombreux fours à ciment nord-américains [15-17]. En ce qui concerne l'Europe, les données indiquent un intérêt croissant pour les propriétés techniques de sable de fonderie dans la production et les performances des conglomerats [18, 19].

En outre, les aspects environnementaux et la compatibilité ont été étudiés afin de souligner les conditions préalables à l'utilisation du sable de fonderie usé [20, 21]. Monoski et al, ont étudié l'utilisation du sable de fonderie usé pour produire des mortiers de ciment et des bétons. Dans

leur travail de recherche, les propriétés des mortiers et des bétons contenant différentes doses de sable de fonderie utilisé (SFU) en remplacement partiel du sable ont été étudiées dans des conditions fraîches et durcies. En particulier, des pourcentages d'addition plus élevés, mais inférieurs à ceux de l'ensemble des agrégats (fin et grossier), ont été considérés dans des bétons comme dans les mortiers. Les mortiers et les bétons ont été évalués en ce qui concerne la consistance du mélange frais et la résistance à la compression du matériau durci. La détermination du module élastique du matériau durci a été réalisée sur des bétons. Ils ont constaté qu'une faible quantité (10%) de sable de fonderie utilisé ne modifie pas les performances du mortier. En présence d'ajouts plus élevés, on peut décrire une diminution de la maniabilité, puis une dose supérieure de superplastifiant est nécessaire pour la maintenir constante. Des performances mécaniques inférieures à environ 20-30% que celles du conglomerat sans sable de fonderie utilisé sont observées. La pénalisation plus élevée semble concerner les conglomerats de meilleure qualité (c.-à-d. De l'eau-ciment inférieur rapport).

Effet sur la fluidité et l'ouvrabilité :

Les résultats de la fluidité des mortiers et des bétons contenant de sable de fonderie usé montrent que l'SFU réduit la maniabilité lorsqu'il est ajoutée comme remplacement de sable naturel; Une grande quantité de superplastifiant est requise pour maintenir la même fluidité (cas du mortier) ou ouvrabilité (cas du béton). Cette augmentation de l'addition de superplastifiant devrait être considérée assez élevée par rapport à celle introduite dans le mélange témoin.

Effet sur la résistance mécanique :

Cas du mortier : la performance mécanique des mortiers au même taux du sable de fonderie usé est comparée à un rapport différent (0,45, 0,50 et 0,55) dans la Fig. (6a). Bien que la valeur absolue de la résistance à la compression soit élevée à faible rapport E / c, il y a une réduction de la résistance est observée. En conséquence, la réduction de la résistance due à la présence de SFU ne peut être simplement récupérée en abaissant le rapport E/C. Par conséquent, cette solution n'est pas conforme à certaines valeurs en raison de l'augmentation de l'addition de superplastifiant.

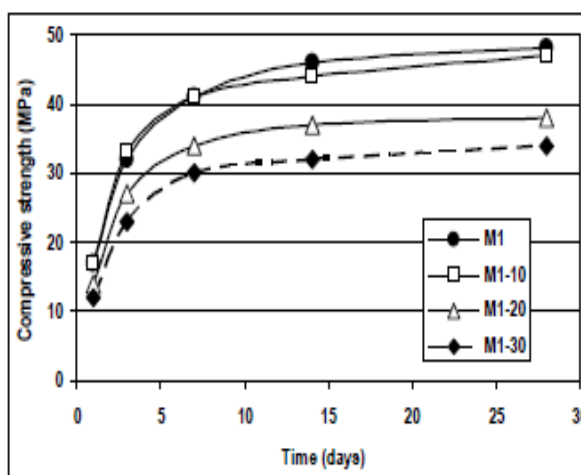


Figure II.4 : Résistance à la compression des mortiers avec rapport E/C =0,50 [22]

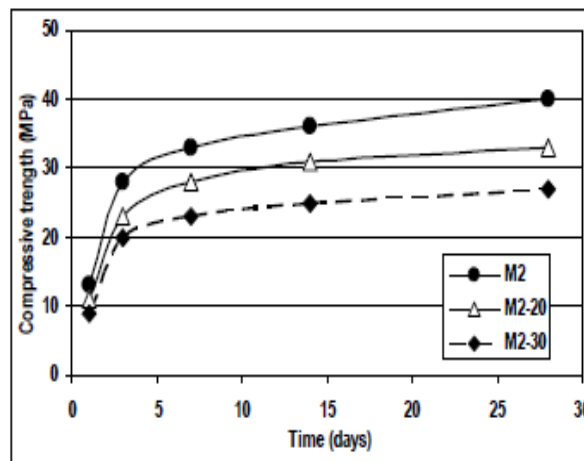


Figure II.5 : Résistance à la compression des mortiers avec rapport $E/C = 0,55$ [22]

Cas du béton : En ce qui concerne les mélanges de béton à base de sable de fonderie au rapport eau-ciment différent (0,46, 0,50), ils sont données sur la Fig. (7). Les considérations relatives à la résistance à la compression déduites des mortiers peuvent être étendues aux mélanges de bétons, en renforçant les résultats antérieurs. La pénalisation de la résistance à la compression doit être attribuée à la présence d'UFS, en remplacement partiel du sable naturel, et dépend de la quantité introduite dans le mélange. La diminution de la résistance à la compression dans les matériaux de ciment est due à la présence de liant dans le sable de fonderie, comme indiqué dans [20, 27, 28].

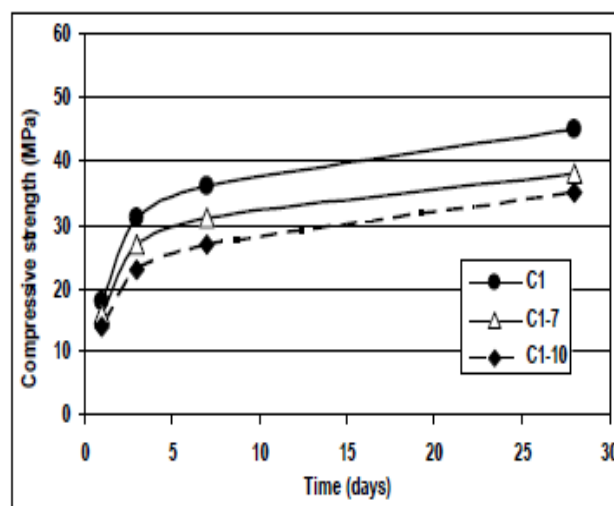


Figure II.6 : Résistance à la compression des bétons avec rapport $E/C = 0,50$ [22]

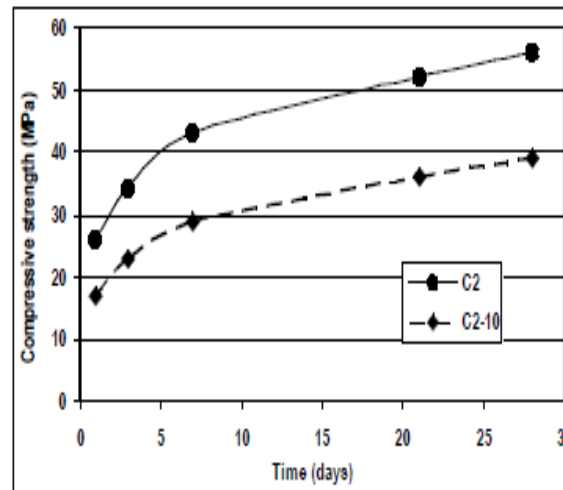


Figure II.7 : Résistance à la compression des bétons avec rapport E/C =0,46 [22]

Certains chercheurs ont signalé dans leur travail concernant les différentes applications et méthodes utilisées pour tester le béton fabriqué à base de sable de fonderie. T.R. Nasik et al. [13] ont mené une étude pour évaluer les performances des sous-produits de fonderie dans la production du béton et de maçonnerie. Sur la base des résultats des tests, ils ont conclu que: L'ajout de sable de fonderie entraînait une diminution de l'ouvrabilité du béton. La résistance à la compression du béton a diminué légèrement en raison du remplacement de granulats fin par du sable de fonderie. Cependant, la résistance à la compression observée pour les mélanges des bétons contenant 50 et 100 % était appropriée et acceptable pour des utilisations structurales. Le module d'élasticité du mélange de 100% de sable de fonderie était le plus élevé de tous les mélanges des bétons évalués. Tous les blocs de maçonnerie fabriqués avec des sables de fonderie usés à 35 % ont de bonne qualité et réponds aux exigences par ASTM en ce qui concerne la résistance à la compression, l'absorption et la densité apparente. Khatib et al. [29] a aussi étudié certaines propriétés mécaniques et à l'état frais du béton contenant du déchet de sable de fonderie. En ce qui concerne les propriétés étudiées, Ils ont signalé qu'il y a une perte systématique de maniabilité des bétons que la teneur en sable de fonderie augmente. Tous les mélanges (avec et sans sable de fonderie) montrent une augmentation de la résistance avec le temps de durcissement. La résistance à la compression du béton diminue également avec les quantités croissantes de WFS. Cette diminution est systématique. Le mélange de contrôle présente le moins d'eau absorbée et, en général, l'absorption d'eau augmente à mesure que le SMA dans le béton augmente. Le rétrécissement augmente à mesure que le SMA dans le béton augmente et cette augmentation est systématique.

II. 13 Conclusion

Ce chapitre a présenté une synthèse bibliographique sur les sables de fonderie. Les études sur le béton contenant des déchets de sable de fonderie. Ces études proposées de faire de recherches poussées pour évaluer les performances des bétons contenant des déchets sable de fonderie. Pour cela, notre but essentiel est d'évaluer le potentiel de ce type de déchet utilisation en tant sable et ajout cimentaire pour les bétons autoplaçants (mortiers autoplaçants).

Chapitre III : Méthodologie et Choix des Matériaux

Les matériaux utilisés dans cette étude, ont un rôle très important dans la détermination des propriétés des mortiers 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 mortier. 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 et ciment par le sable de fonderie sur les propriétés physico-mécaniques des mortiers autoplacants. Le sable est substitué par le déchet sable de fonderie (0-5 mm) à des teneurs (0, 10, 30, 50, 100% par poids de sable). Et aussi le ciment substitué par le sable de fonderie (utilisation comme ajout cimentaire) à des teneurs (0, 10, 20, 30, 50% par poids de ciment). Objectif de travail économique en remplacement le sable par un déchet. Technique (avoir un mortier autoplacant de qualité comparable à mortier témoins) et enfin environnementale (recyclage d'un déchet sable de fonderie).

III. 2.Méthodologie du travail pratique :

La caractérisation de tous les matériaux utilisés en premier lieu :

- Le ciment (CPJ CEM II A 42.5) ;
- Filler calcaire ;
- Superplastifiant haut réducteur d'eau SIKA Viscocrete Tempo 12 ;
- Sable ;
- Déchet du sable de fonderie ;

En second lieu, nous avons déterminé la composition du mortier autoplacant témoins ainsi que toutes les variantes des mortiers étudiés à partir de la composition d'un béton autoplacant.

Ensuite ; nous avons procédé à étudier l'influence de l'incorporation du sable de la fonderie dans les mortiers sous forme ajout cimentaire (par substitution partielle de ciment) et en tant que sable (par substitution partielle de sable naturel).

Des essais physico-mécaniques, ont été ensuite réalisés sur des mortiers autoplaçants afin d'évaluer l'effet de l'utilisation du sable de fonderie.

Enfin, une conclusion générale est présentée qui traitera l'ensemble des points issus de cette étude.

III. 3. Caractéristique des matériaux utilisés :

3.1. Ciment :

MATINE est un ciment gris de haute résistances et finales résultat de la mouture du clinker obtenu par cuisson jusqu'à la fusion partielle (clinkerisation) d'un mélange convenablement dosé et homogénéisé de calcaire et d'argile. Conformément à la norme NA 442, EN 197-1 et à la norme NF P 15-301/94.

Domaine d'utilisation : MATINE est utilisé pour tous les projets de construction qui nécessitent des hautes résistances mécaniques tels que :

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

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

III.3.1.a). Caractéristiques physiques du ciment

Tableau III. 1 : Caractéristiques physiques du ciment

Caractéristiques	Résultats	Unités	Norme
Consistance normal	27,8	(%)	NF EN 196-3
Début de prise	190	(min)	NF EN 196-3
Fin de prise	265	(min)	NF EN 196-3
SSB	4410	(Cm ² /g)	NF EN 196-6
masse spécifique	2.99	(g/cm ³)	NF EN 196-5
Retrait à 28 jours	<1000	(µm/mm)	NF EN 197-7

Les valeurs des résultats obtenus Sont compatibles avec les exigences de normes correspondantes.

III.3.1.b). Caractéristiques chimiques

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

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

III.3.1.c). 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
%	58	18	05	13	01	05	05	07

III.3.1.d). Caractéristiques mécaniques du ciment**Tableau III. 4 :** Résistance à la compression et à la flexion du ciment. Norme NF EN 196-1

Essais	Âge [J]		
	2 jours	7 jours	28 jours
Résistance à la compression (MPa)	35,81	40,4	48,87
Résistance à la flexion (MPa)	4,41	6,37	8,35

2. Fillers de calcaire :

C'est un calcaire issu du gisement d'EL-KHAROUB, il est de calcaire d'origine biochimique néritique caractérisé par une grande pureté chimique et une blancheur élevée.

**Figure III. 1 :** Filler calcaire**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	MgO	P ₂ O ₅	TiO ₂	PAF
(%)	53,08	4,27	0,73	0,26	0,01	0,03	0,13	0,25	0,09	0,02	41,13

Tableau III. 6 : Propriétés physiques du calcaire :

Caractéristiques	Résultats
Masse volumique absolue	2,68 (g/cm ³)
Finesse suivant la méthode Blaine	8379 (g/cm ²)

III.3. Sable:

Elément inerte entrant dans la composition des bétons peut être naturel ou artificiel ou provenant de recyclage. Les caractéristiques principales requises pour un bon sable à béton sont la propreté définie par l'essai d'équivalent de sable et la granularité. Le sable utilisé est un sable lavé concassé de Keddara, Wilaya de BOUMERDES. Après traitement du sable, on a obtenu les résultats des essais physiques et l'analyse granulométrique suivant :

III.3.1. Caractéristiques du sable:**Tableau III. 7 :** Caractéristiques physiques du sable concassé (0/5) selon la norme NF EN 933-1

Caractéristiques	Résultats	Unité
Masse volumique réelle	2,61	(g /cm ³)
Masse volumique imbibé	2,63	(g /cm ³)
Masse spécifique	2,72	(g /cm ³)
Absorption	0,86	(%)
EVS	53,33	(%)
La teneur en bleu	0,7	(%)

❖ Analyse granulométrique et classe granulaire :**Tableau III.8 :** Analyse granulométrique par tamisage du sable Keddara selon NF EN 933-1 :

Tamis ouverture (mm)	Masse des refus cumuls R _i (g)	Pourcentage refus cumuls (%)	Pourcentage tamisât cumuls (%)
6,3	0	0,0	100,0
5	15	1,5	98,5
4	117	11,9	88,1
3,15	206	20,9	79,1
2,5	314	32,0	68,0
2	417	42,5	57,5
1,25	566	57,6	42,4
1	610	62,1	37,9
0,63	710	72,3	27,7
0,50	732	74,6	25,4
0,315	792	80,7	19,3
0,250	816	83,1	16,9
0,16	853	86,9	13,1
0,125	866	88,2	11,8
0,08	880	89,7	10,3
0,063	897	91,4	8,6
Fond de tamis	898	91,5	8,5
Module de finesse du sable M _f = 3,62			

On remarque que le sable lavé concassé a un module de finesse (MF = 3.62) élevé

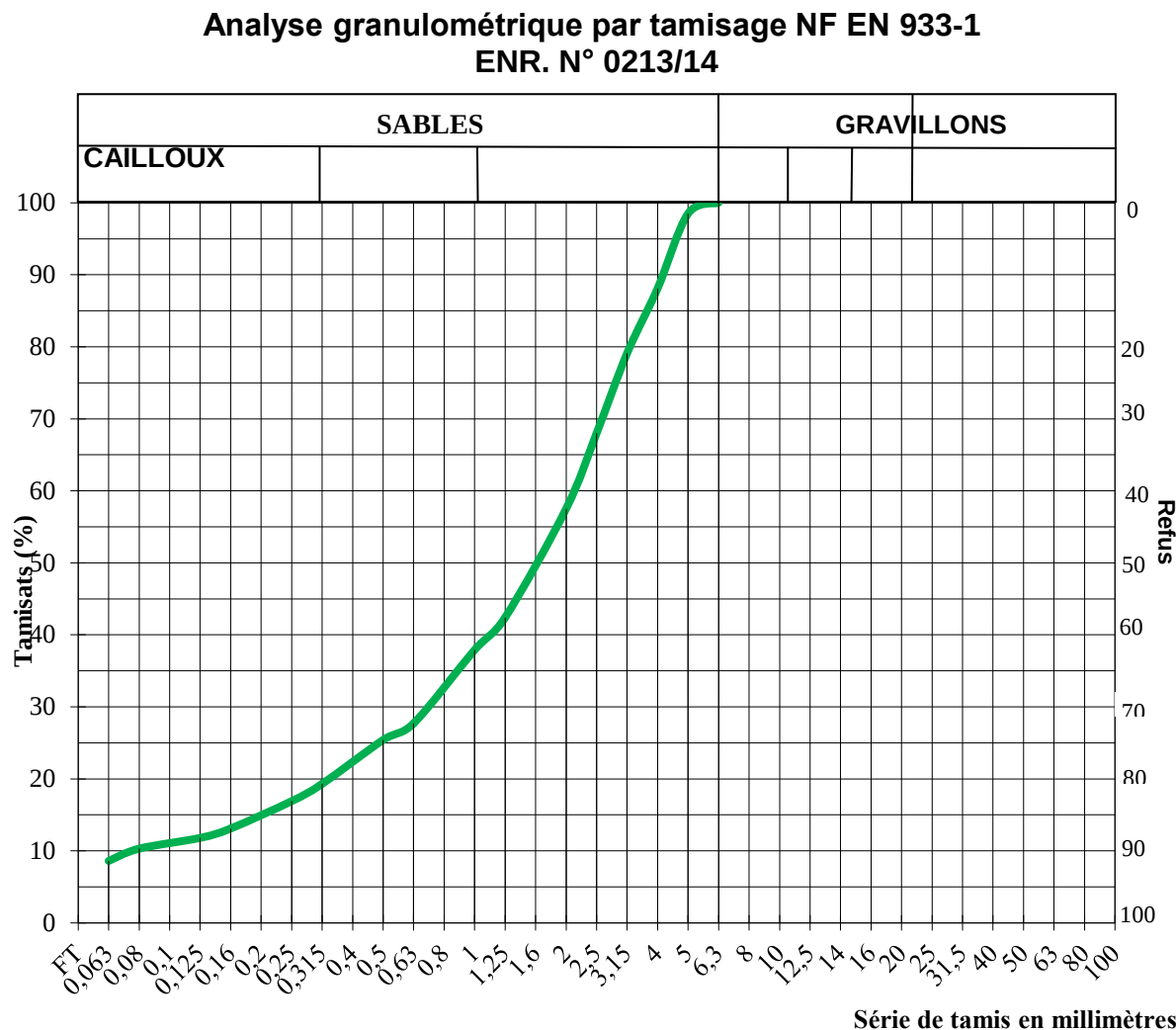


Figure III. 2: Analyse granulométrique de sable de keddara 0/5.

III.4. Superplastifiant:

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

Domaines 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, SIK A VISCOCRETE TEMPO 12 améliore la stabilité, limite la ségrégation du béton et rend les formules moins susceptibles aux variations d'eau et des constituants.
- SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 permet de réduire significativement le rapport E/C ce qui améliore la durabilité du béton durci (diminution de la perméabilité, augmentation des résistances mécaniques, diminution du retrait).

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

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

Conditionnement

- Fûts de 230 kg
- CP de 1000 L
- Vrac

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

Caractéristiques

- Données techniques densité $1,06 \pm 0,01$
- pH 4,5 à 6,5
- Teneur en Na₂O Eq. $\leq 1 \%$
- Extrait sec 28,0 à 31,0 %
- Teneur en ions Cl $\leq 0,1 \%$

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

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

Sur béton frais

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

Sur béton durci

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

Délai de conservation : Une année dans son emballage d'origine, à l'abri du gel et de la chaleur ($5^{\circ}\text{C} < t < 35^{\circ}\text{C}$).

Eau de gâchage : L'eau utilisée pour le gâchage de béton est une eau potable du réseau public de la ville de TIZI OUZOU

III.5 Déchet du sable de fonderie

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



Figure III. 3 : 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.6.1. Caractéristiques des sables de fonderie :

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

Caractéristiques	Résultats	Unité
Masse volumique apparente	1.24	(g /cm ³)
Masse volumique absolue	2.4	(g /cm ³)
Absorption	1.8	(%)

III.6.2. Caractéristiques chimiques :

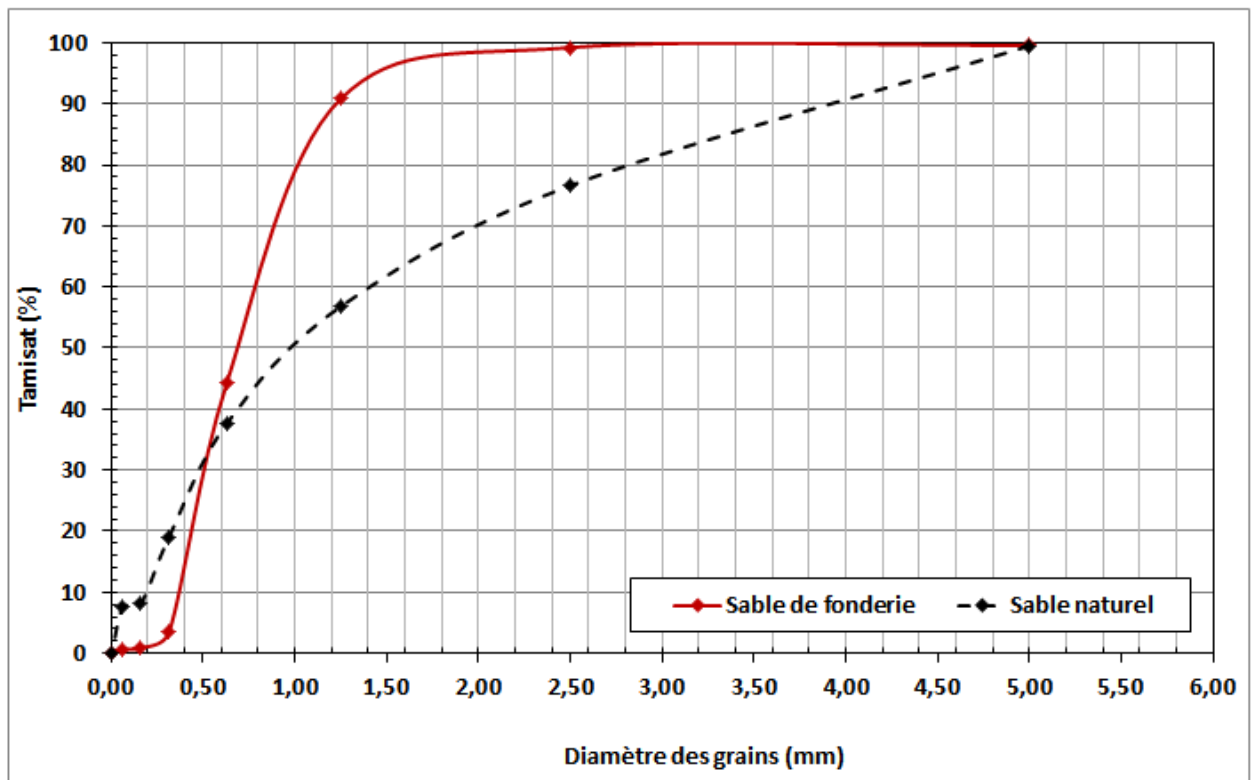
Tableau III. 10: Analyse chimique de sable de fonderie par fluorescence X

Eléments	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	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) pour 3000g

Ouverture des tamis	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisât (%)
5	12	0.4	99.6
4	17	0.54	99.44
3.15	25.5	0.84	99.15
2	32.5	1.08	98.92
1.25	65	2.16	97.84
0.5	93.5	3.11	96.81
0.315	1366.5	45.55	44.45
0.16	2895.5	96.51	3.49
0.08	2972.5	99.08	0.92
FT	3000	100	0

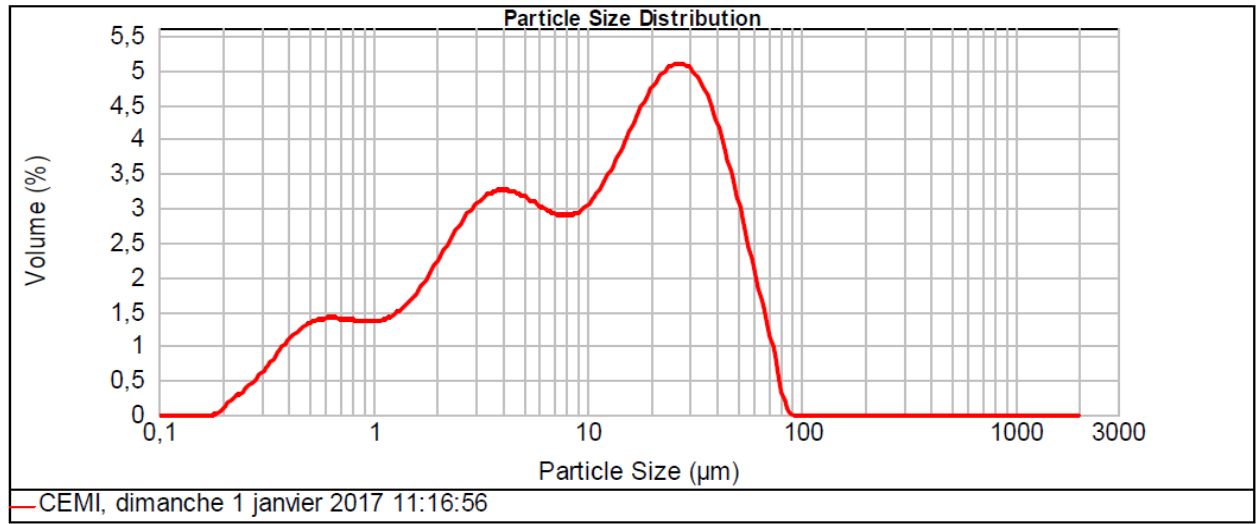
Module de finesse = 2.47

**Figure III.4 :** Analyse granulométrique des deux sables

III.7. Analyse granulométrique par laser :

Afin de vérifier la finesse du sable de fonderie finement broyé, nous avons procédé à l'analyse granulométrique par laser du ciment et de sable de fonderie. Les résultats sont donnés sous forme de courbe qui représente la fraction volumique en % en fonction de la taille des particules (figure III.5) Egalement, nous avons présenté aussi ces résultats sous forme de courbe la distribution granulométrique de ciment et de sable de fonderie.

a/ Ciment



b/ Sable

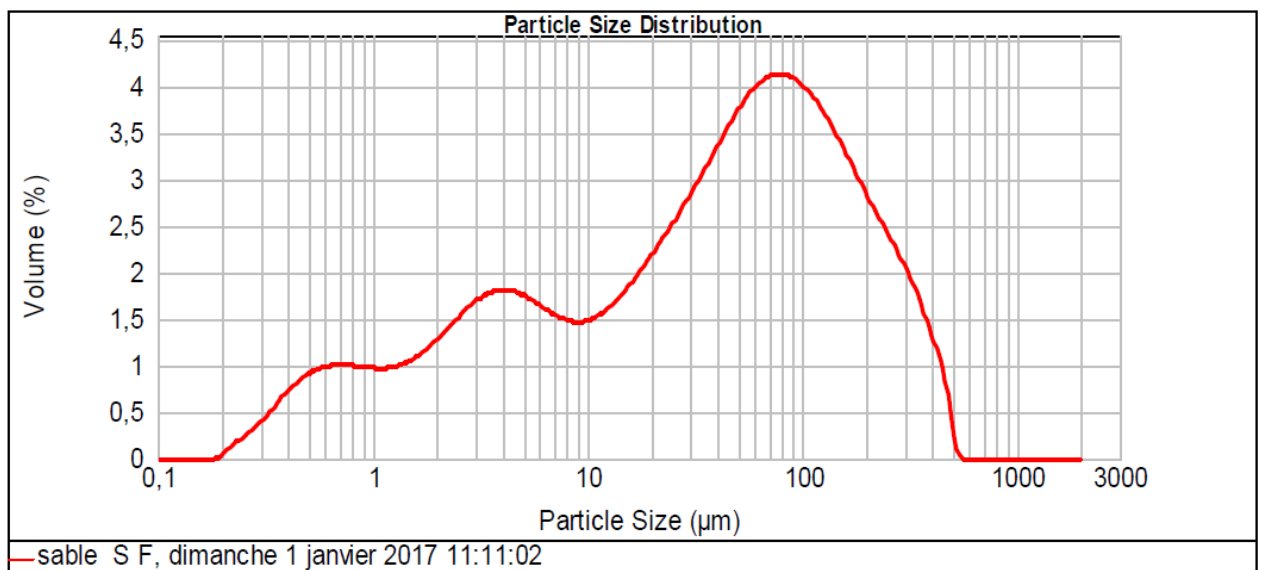


Figure III.5 : Distribution granulométrique en fraction volumique

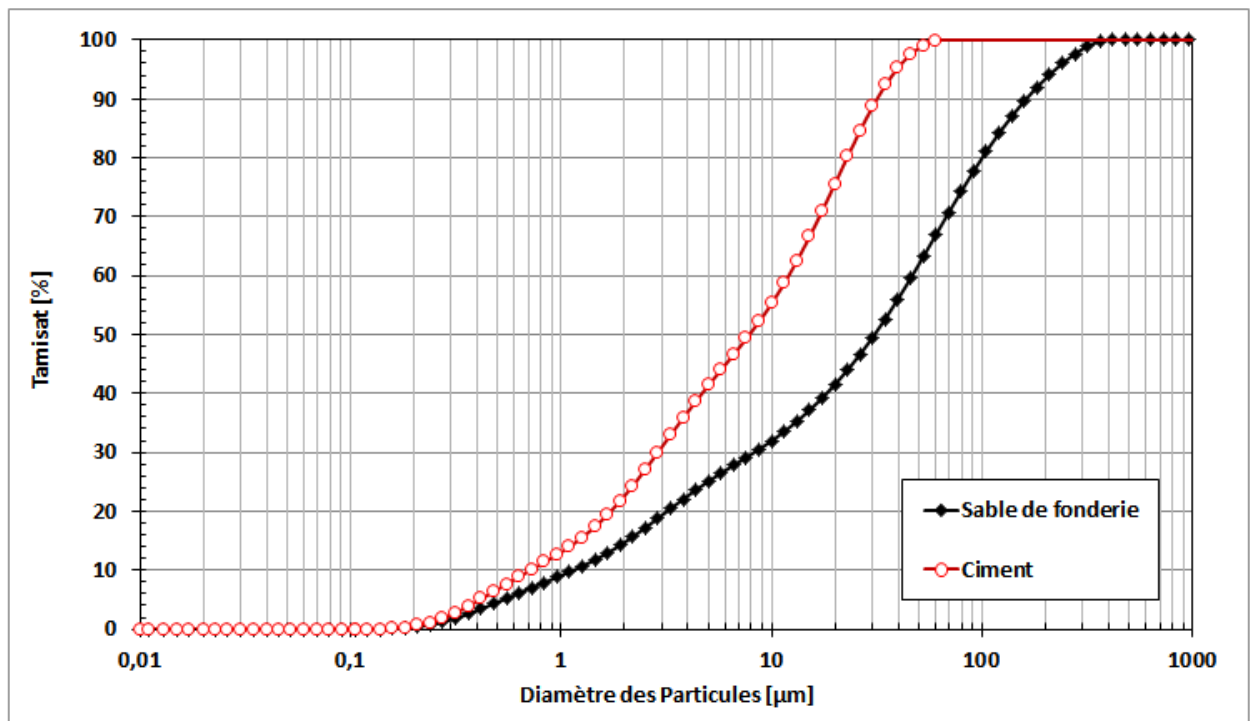


Figure III.6 : Distribution granulométrique du ciment et du sable de fonderie

Il est remarquable que le ciment est plus fin que le sable de fonderie broyé. En effet, ce dernier contient des grains de diamètre de 100 μm plus que le ciment. Par contre, le ciment a des particules de diamètre 10 μm dépassant les 50 % par rapport au sable de fonderie broyé.

Chapitre IV : Formulation des Mortiers

Le présent chapitre consiste à donner des généralités sur les bétons autoplaçants. La définition des BAP, leurs constituants, leurs propriétés essentielles ainsi que les méthodes d'essais de formulation utilisées dans les BAP, leurs particularités de point de vue propriétés à l'état frais et durci ainsi que leurs méthodes de formulation seront présentées dans ce chapitre. Egalement, les mortiers autoplaçants et de béton équivalent, leurs définitions et leurs méthodes de formulation sera présenté dans ce même chapitre.

IV.1. Introduction :

a). Composition du mortier autoplaçant:

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

Tableau IV.1 : Intervalles pour chaque constituant selon la méthode Japonaise

Constituant	Intervalle Préconisé
Volume de la pate	330 à 400 (l/m ³)
La masse de ciment	300 à 400 (Kg/m ³)
Le dosage de calcaire	10% de poids du ciment
Le volume de gravillons	G /S proche de 1
Le dosage en superplastifiant	Proche de son point de saturation

b). Données de base : les données de base sont :

- $G/S = 1.1$
- On fixe le rapport $E/(C + F) = 0.38$
- Le dosage en superplastifiant est donné par l'essai de la rhéologie (point de saturation).

c). Optimisation de la composition du béton :

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

- $C = 430\text{ Kg/ m}^3$.
- Le volume de la pâte Kg/ m^3 .
- $F = 43\text{ Kg/ m}^3$ Filler de calcaire (10 % du poids de ciment).
- $E/(C + F) = 0.38$
- $G/S = 1.1$

d). Détermination de la masse de chaque constituant :

On a :

- $C = 430\text{ Kg/ m}^3$.
- $F = 43\text{ Kg/ m}^3$.
- $E/(C + F) = 0.38 * (430 + 43) \longrightarrow E = 179.74\text{ L/m}^3$.
- Volume de la pâte 340 L/m^3 .
- Volume de granulats $= 660\text{ L/ m}^3$.
- $G/S = 1.1$
- $G + S = 660$
- $G = 660 - S$
- $S = 660/2.1 \longrightarrow S = 314.28\text{ L/m}^3$
- $G = 660 - 314.28 \longrightarrow G = 345.72\text{ L/m}^3$
- Le dosage de superplastifiant est 2% de la masse de ciment de filler.
- $SP = 0.02 * (430 + 43)$
- $SP = 9.46\text{ Kg/ m}^3$

On a l'extrait sec du superplastifiant (polycarboxylate) est de $30\% \pm 1.5\%$, ce qui nous donne la quantité d'eau provient de superplastifiant est de $0.7 * 9.46 = 6.62\text{ L}$. Donc la quantité d'eau utilisée pour 1 m^3 est de 173.12 L/m^3 .

e). 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.

- Eau $= 173.12\text{ L}$
- Ciment $= 430\text{ Kg}$
- Filler $= 43\text{ Kg}$
- Sable $= 820.27\text{ Kg/m}^3$

- Gravier = 914.42 Kg/m^3
 1. Classe 3/8 = 457.21 Kg/m^3
 2. Classe 8/15 = 457.21 Kg/m^3
- SP = 2 % = 9.46 Kg.

Tableau IV.2 : Composition pour 1 m^3 du BAP

Constituants	Masse (Kg /m^3)
Ciment	430
Fillers Calcaire	43
Sable	820.27
Graviers (3/8)	475.21
Graviers (8/15)	475.21
Eau	173
Superplastifiant	9.46

IV.2. Formulation du mortier autoplaçant :

En appliquant la méthode du Mortier du Béton Equivalent (MBE) établie par Schwartzentruber Norme NF-480-4, nous avons obtenu les dosages des constituants mentionnés dans le tableau IV.4

Tableau IV.3 : Rappelons que ce mortier est un mortier équivalent du béton autoplaçant**IV.2.1. Composition sèche et imbibé du béton et du MBE Correspondant :****Tableau IV.3 :** Composition sèche et imbibée du béton et du MBE

Constituants	BAP (sèche)	BAP (imbibé)	MBE (sèche)	MBE (imbibé)
Ciment	430.00	430.00	430.00	430.00
Fillers Calcaire	43.00	43.00	43.00	43.00
Sable	820.27	824.37	888.55	893.00
Graviers	914.42	923.56	-	-
Eau	172.37	153.37	176.09	172.37
SP	9.46	2.84	9.46	2.84
Total	2389.52	2377.14	1547.11	1541.21

IV.2.2. Composition du mortier autoplaçant (MBE) dans 1 m^3 :**Tableau IV.4 :** Composition du MBE dans 1 m^3

Constituants	En volume	MBE (m^3)	MBE (Kg/m^3)
Ciment	0.143	0.209	628.68
Fillers Calcaire	0.016	0.023	62.87
Sable	0.340	0.498	1299.11
Eau	0.176	0.257	257.46
SP	0.009	0.013	13.83
Total	0.684	1	2261.96

IV.2.3. Vérification de la composition du MBE dans 1 m³ :

Une vérification a été effectuée sur la composition mortier donnée par le tableau IV.15. Après la vérification, la composition retenue du mortier autoplaçant comme témoin et qui sera utilisée dans notre travail, est donnée dans le tableau 16.

Tableau IV.5 : Vérification de la composition du MBE dans 1 m³

Constituant	Dosage (Kg/m ³)	Rapport	Calculer
Ciment	664.1	F/C	0.10
Filler	66.41	E/C	0.38
Sable	1372.4	E/L	0.35
Eau	256	S/L	1.88
SP	12.17	S/C	2.06

IV.2.4 Protocole de mélange des mortiers autoplaçants (MAP) :

Le protocole de mélange des mortiers autoplaçants (MAP), a été établi selon les caractéristiques recherchées (la fluidité du mortier 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 portiers autoplaçants (MAP).

IV.2.5. Conduite d'essais :

Etat frais :

- **Fluidité de mortier :** La fluidité du mortier a été réalisée par le test de mini-cône (voir la figure IV.2). Ce test consiste à mesurer le diamètre moyen de la galette après l'affaissement de mortier c'est-à-dire après soulèvement du cône. Nous rappelons que le diamètre préconisé pour un mortier autoplaçant est de 180 à 220 mm. Cette plage du diamètre, peut donner des valeurs de l'étalement pour un béton autoplaçant qui sont de 650 à 750 mm.

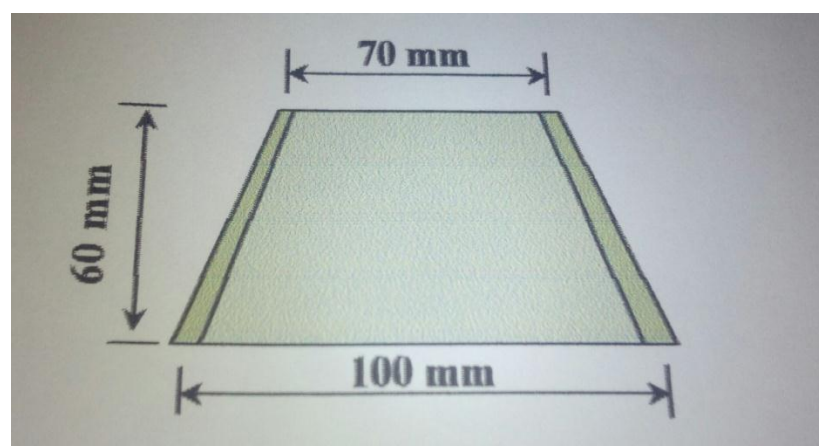


Figure IV.2 : Mini- cône pour mortier et pâte de ciment

Etat durci :

Pour réaliser cette étude, des éprouvette prismatiques ($40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$) et ($50 \times 50 \times 50 \text{ mm}^3$) (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 22°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, des courbes contraintes-déformations ainsi que les valeurs de module de Young ont été déterminées pour chaque composition du mortier étudié. Pour cela, des tests de compression uniaxial ont été effectués sur des éprouvettes ($50 \times 50 \times 50 \text{ mm}^3$) de mortiers étudiés pour voir le comportement mécanique de ce dernier. Le comportement mécanique de tous les mortiers est déterminé en utilisant une machine universelle pour essais de compression (Voir figure 3). Les résultats obtenus seront donnés sous forme des courbes contraintes-déformations pour les mortiers choisis (0, 10 et 30% de substitution pour les deux cas).



Figure IV.3 : Confection des éprouvettes du mortier autoplaçant



Figure IV.4 : La machine d'écrasement et de flexion

Les essais mécanique d'écrasement et de flexion ont été réalisé an laboratoire de Génie-Civil de l'UMMBTO, sur une presse hydraulique de type Ibortest, c'est un machine assistée par ordinateur, sa capacité est de 200 KN (figure 4).

Notation des mélanges :

➤ **Substitution ciment** : Utilisation déchet de sable de fonderie comme ajout cimentaire ;

MC0 : mortier autoplaçant témoin ;

MC10 : mortier autoplaçant à 10% de substitution du ciment par déchet sable de fonderie ;

MC20 : mortier autoplaçant à 20% de substitution du ciment par déchet sable de fonderie ;

MC30 : mortier autoplaçant à 30% de substitution du ciment par déchet sable de fonderie ;

MC50 : mortier autoplaçant à 50% de substitution du ciment par déchet sable de fonderie ;

➤ **Substitution sable** : utilisation déchet de sable de fonderie comme sable ;

MS0 : mortier autoplaçant témoin ;

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

MS30 : mortier autoplaçant à 30% 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 Interprétations

Les différents résultats des essais physico-mécaniques des mortiers autoplaçants à base du sable de la fonderie, seront présentés dans ce chapitre. une interprétation de ces résultats à été également présentée dans le même chapitre. Les essais physico-mécaniques effectués sur des mortiers autoplaçants étudiés, ont été réalisés selon les normes en vigueur.

Pour connaître l'influence de l'incorporation du sable de fonderie dans les mortiers autoplaçants, notre étude a été menée sur deux volets ; Utilisation du sable de fonderie en tant qu'ajout cimentaire (par substitution partielle de ciment) à différents rapports et son utilisation comme sable (par substitution partielle du sable naturel) à différents rapports.

V.1. Substitution partielle de ciment

V.1.a) Etat frais

Tous les mélanges des mortiers étudiés ont été élaborés avec un étalement variant entre 180 à 220 mm de la galette. Cet étalement correspond à un étalement d'un autoplaçant dont la fluidité est celle préconisée pour les BAP. Le dosage du superplastifiant est ajusté pour avoir cet étalement.

Les résultats obtenus sont donnés dans les tableaux suivant :

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

Mortier	Etalement Diamètre (mm)	Mise en œuvre
MC0	205	Bonne
MC10	200	Bonne
MC20	195	Bonne
MC30	190	Acceptable
MC50	180	Acceptable

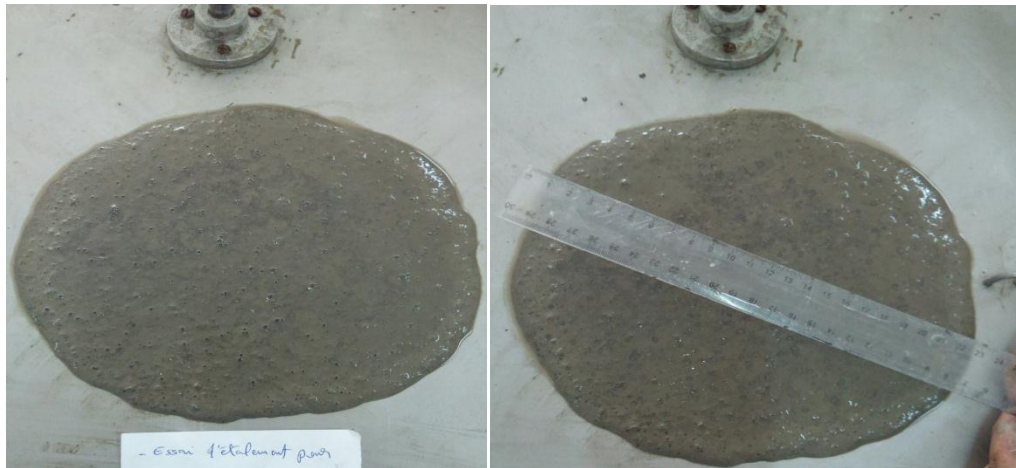


Figure V.1 : Essais d'étalement sur le mortier autoplaçant frais

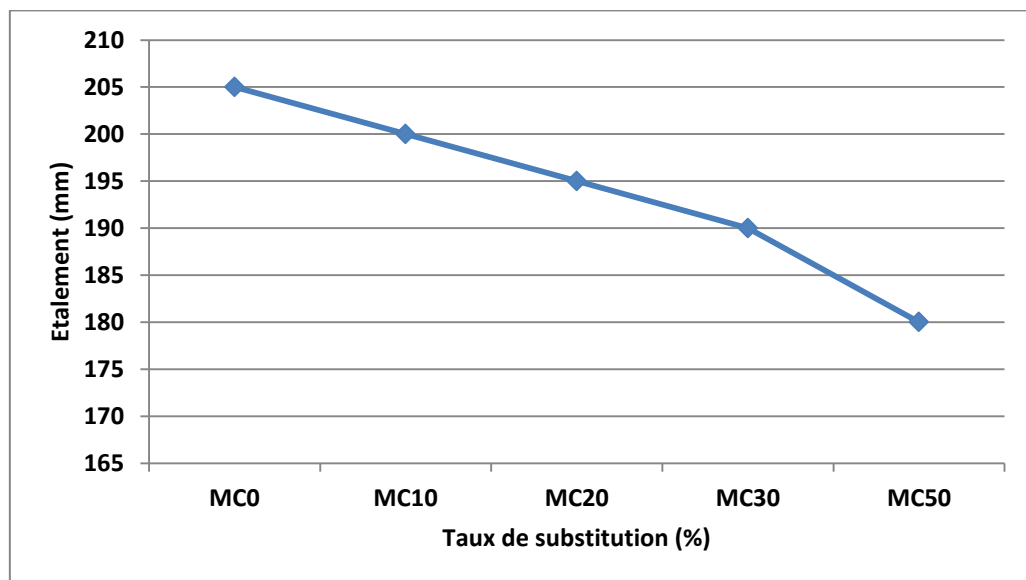


Figure V.2 : Fluidité des mortiers étudiés en fonction du taux de substitution du ciment par déchet sable de fonderie

D'après les résultats des essais à l'état frais, tel que l'étalement on constate qu'une diminution de la fluidité des mortiers avec l'augmentation du taux de substitution du ciment par déchet sable de fonderie. En effet, jusqu'au 30% de substitution la diminution n'est pas importante, ou le mortier répond aux exigences des bétons autoplaçants de point de vue fluidité et mise en œuvre. Au-delà de 50% de substitution, les mortiers autoplaçant perdent leur fluidité. Il est à noter qu'on peut rattraper cette fluidité en augmentant ainsi le dosage du superplastifiant.

V.1.b) Etat durci

Résistance mécaniques

Des essais de traction par flexion et de compression uni-axiale ont été réalisés à 2, 7, et 28 jour de durcissement. Après l'écrasement des trois échantillons à la traction par flexion et de compression à l'aide de la machine assistée par ordinateur, sur une presse hydraulique capacité est de 200 KN.

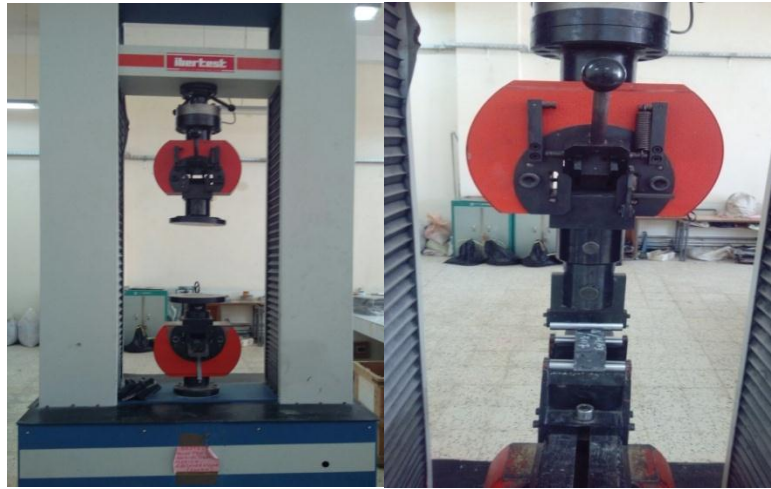


Figure V.3 : Essai de compression (Machine de l'écrasement)

Résistance à traction par flexion :



Figure V.4 : Essai de traction par flexion

Résistance à la compression uni-axiale :

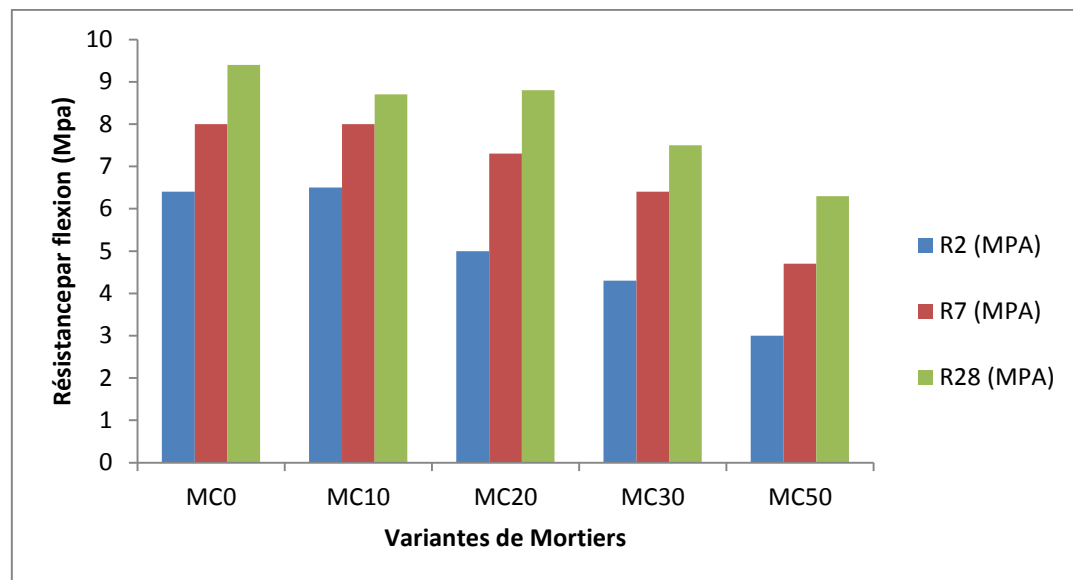


Figure V.5 : L'essai de compression uni-axiale

1). Résistance à la traction par flexion :

Tableau V.2 : Essais de traction par flexion des mortiers étudiés effectués à 2, 7, et 28 jours :

Eprouvette	R2 (MPa)	R7 (MPa)	R28 (MPa)
MC0	6,4	8	9,4
MC10	6,5	8	8,7
MC20	5	7,3	8,8
MC30	4,3	6,4	7,5
MC50	3	4,7	6,3

**Figure V.6 :** Evolution de la résistance à la traction par flexion des mortiers en fonction du taux de substitution de ciment par déchet sable de fonderie à différent âge (2, 7, et 28 jours)

Les résultats de la résistance à la traction par flexion des mortiers, sont donnés dans la figure V.6. D'après les résultats obtenus présentés, on remarque que la résistance à la traction par flexion est constante pour substitution de ciment par déchet de sable fonderie 10% et 20% par rapport à témoin, une diminution de la résistance pour 30% et 50% de substitution n'est pas importante. Les résistances à la traction par flexion pour une substitution de 10%, 20% et 30% plus proche de la résistance du mortier témoin.

2). Résistance à la compression :

Tableau V.3 : Essais d'écrasement des mortiers étudiés effectués à 2, 7, et 28 jours:

Eprouvette	R2 (MPa)	R7 (MPa)	R28 (MPa)
MC0	30	44	50,5
MC10	33	45,5	46,5
MC20	24,5	38,5	50,5
MC30	20	30	43
MC50	11,5	18	27,5

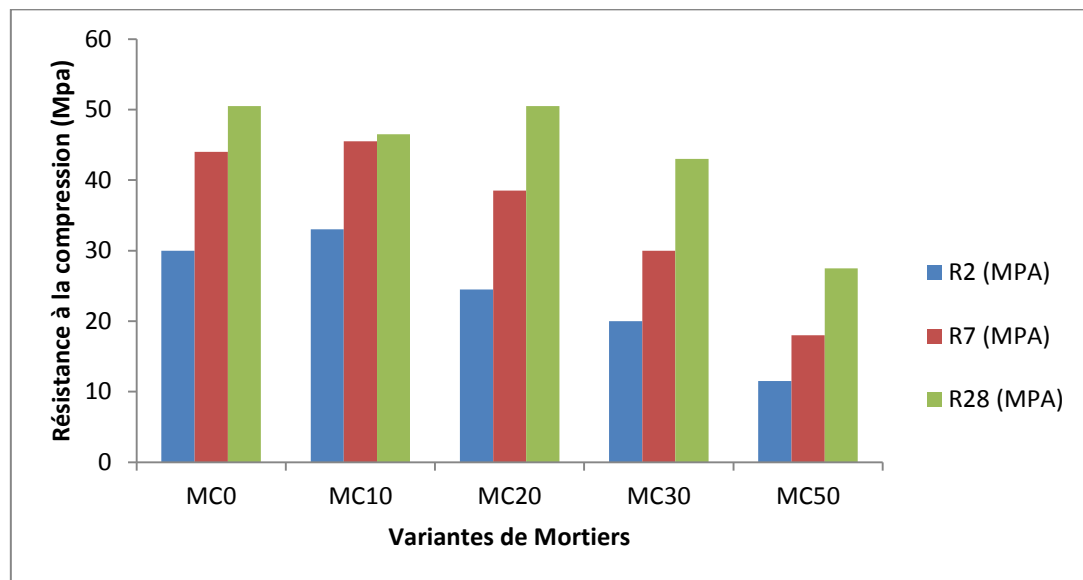


Figure V.7 : Evolution de la résistance à la compression des mortiers en fonction du taux de substitution de ciment par déchet sable de fonderie à différent âge (2, 7, et 28 jours)

Les résultats des tests de résistance en compression des mortiers étudiés sont présentés dans la figure V.7. On constate que la résistance à la compression augmente en fonction de l'âge du mortier. Cela est expliqué par l'hydratation des minéraux de ciment. Aussi, on remarque que la valeur de la résistance des mortiers est pratiquement la même pour les mortiers M0, M10, M20, de substitution de ciment par déchet de sable de fonderie. Cependant, au-delà du 30% de déchet sable de fonderie une diminution de la résistance à la compression n'est pas importante. La résistance pour 50% de substitution diminue par rapport à témoin, la valeur de la résistance à la compression la plus élevée enregistrée est de l'ordre de 50,5 MPa pour le mortier de 20% de substitution ciment à 28 jours.

V.2. Substitution partielle de sable

Après avoir étudié le cas de la substitution de ciment par le sable de fonderie finement broyé, nous avons procédé aux à la de caractérisation des mortiers pour le cas de la substitution de sable par le sable de fonderie.

V.2.a) Etat frais

Les résultats des essais de fluidité effectués sur les mortiers à base de sable de fonderie, sont présentés dans le tableau.

Tableau V.4 : L'essai l'étalement pour substitution du sable

Mortier	Etalement Diamètre (mm)	Mise en œuvre
MS0	205	Bonne
MS10	200	Bonne
MS30	190	bonne
MS50	180	Acceptable
MS100	165	Mauvaise

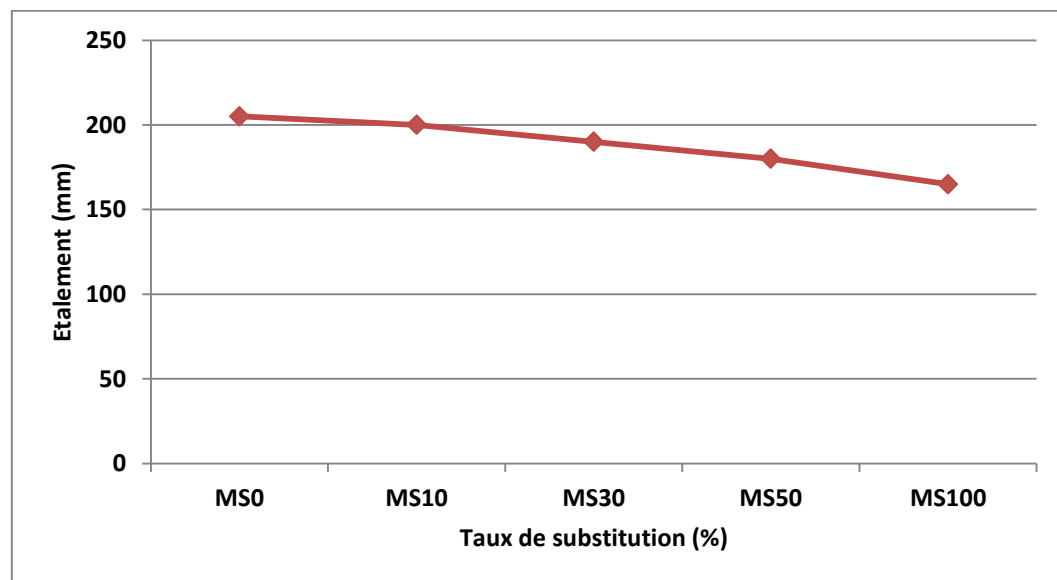


Figure V.8. Fluidité des mortiers étudiés en fonction du taux de substitution du sable par déchet de sable de fonderie

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 déchet de sable de fonderie. En effet, jusqu'à 50% de substitution la diminution n'est pas importante, le mortier répond aux exigences des bétons autoplaçants de point de vue fluidité et mise en œuvre. Au-delà de 100% de substitution, les mortiers autoplaçants perdent leur fluidité. Il est à noter qu'on peut rattraper cette fluidité en augmentant ainsi le dosage du superplastifiant.

V.2.b) Etat durci

1). Résistance à la traction par flexion :

Tableau V.5 : Essais de traction par flexion des mortiers étudiés effectués à 2, 7, et 28 jours:

Eprouvette	R2 (MPa)	R7 (MPa)	M28 (MPa)
MS0	6,5	6,5	9,8
MS10	4,9	6	9,6
MS30	5,4	5,7	8,4
MS50	4,3	3,5	6,3
MS100			2,1

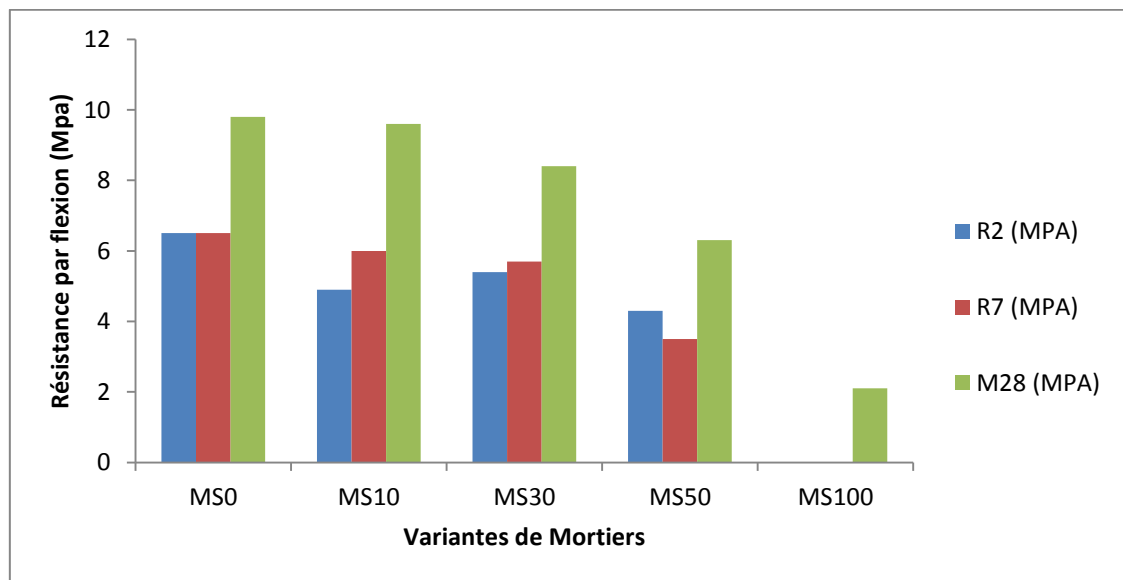


Figure V.9 : Evolution de la résistance à la traction par flexion des mortiers en fonction du taux de substitution de sable par déchet sable de fonderie à différent âge (2, 7, et 28 jours)

Les résultats de la résistance à la traction par flexion des mortiers, sont donnés dans la figure V.9. D'après les résultats obtenus, on remarque que la résistance à la traction par flexion est constante pour le cas de la substitution du sable 10% et 30% par rapport au mortier témoin, une diminution de la résistance pour 50% de substitution n'est pas importante. On remarque aussi une diminution importante de la résistance pour une substitution 100% par rapport au mortier témoin.

2). Résistance à la compression :

Tableau V.6 : Essais d'écrasement des mortiers étudiés effectués à 2, 7, et 28 jours:

Eprouvette	R2 (MPa)	R7 (MPa)	M28 (MPa)
MS0	29	30	50,5
MS10	22	32,5	49
MS30	16	33,5	40
MS50	14	20	30
MS100			7

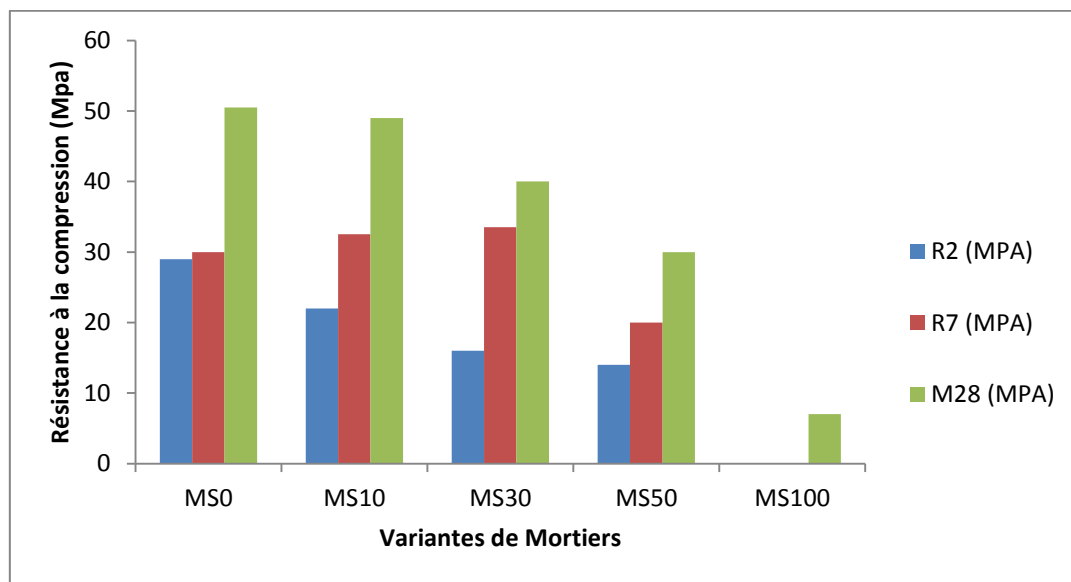


Figure V.10 : Evolution de la résistance à la compression des mortiers en fonction du taux de substitution de sable par déchet sable de fonderie à différent âge (2, 7, et 28 jours)

Les résultats de la résistance à la compression des mortiers, sont donner dans la figure V.10, la résistance augmente en fonction du temps de durcissement, on remarque que la valeur de la résistance des mortiers est pratiquement la même pour les mortiers M0 et M10 de substitution du sable. Cependant, au-delà de 30% et 50% de substitution de sable, la résistance diminue, la valeur de la résistance à la compression la plus élevée enregistrée est de l'ordre de 49 MPa pour le mortier de 10% de substitution de sable, la valeur de la résistance pour substitution 100% totale du sable est très faible par rapport au mortier témoin à 28 jours.

V.3. Comportement mécanique des mortiers étudiés

Cette partie du travail, est consacrée à l'étude de comportement mécanique des mortiers étudiés par essais de compression uni axiale réalisés sur des éprouvettes 50x50x50 m3. Pour cela, nous avons choisis que les compositions des mortiers qui ont données des meilleurs résultats par rapport au mortier de référence M0, à savoir le mortier MS10 et MS30 respectivement cas de substitution de ciment et de sable. Les résultats ainsi obtenus sont donnés sous forme des courbes contraintes-déformations de tous les mélanges après 28 jours de durcissement. Puis des valeurs du module de Young pour chaque composition du mortier, ont été déterminées graphiquement à

partir de la courbe contraintes-déformations. Les résultats obtenus ont été comparés selon le cas de mode d'introduction Substitution de sable de la fonderie.

V.3. Cas de substitution de sable :

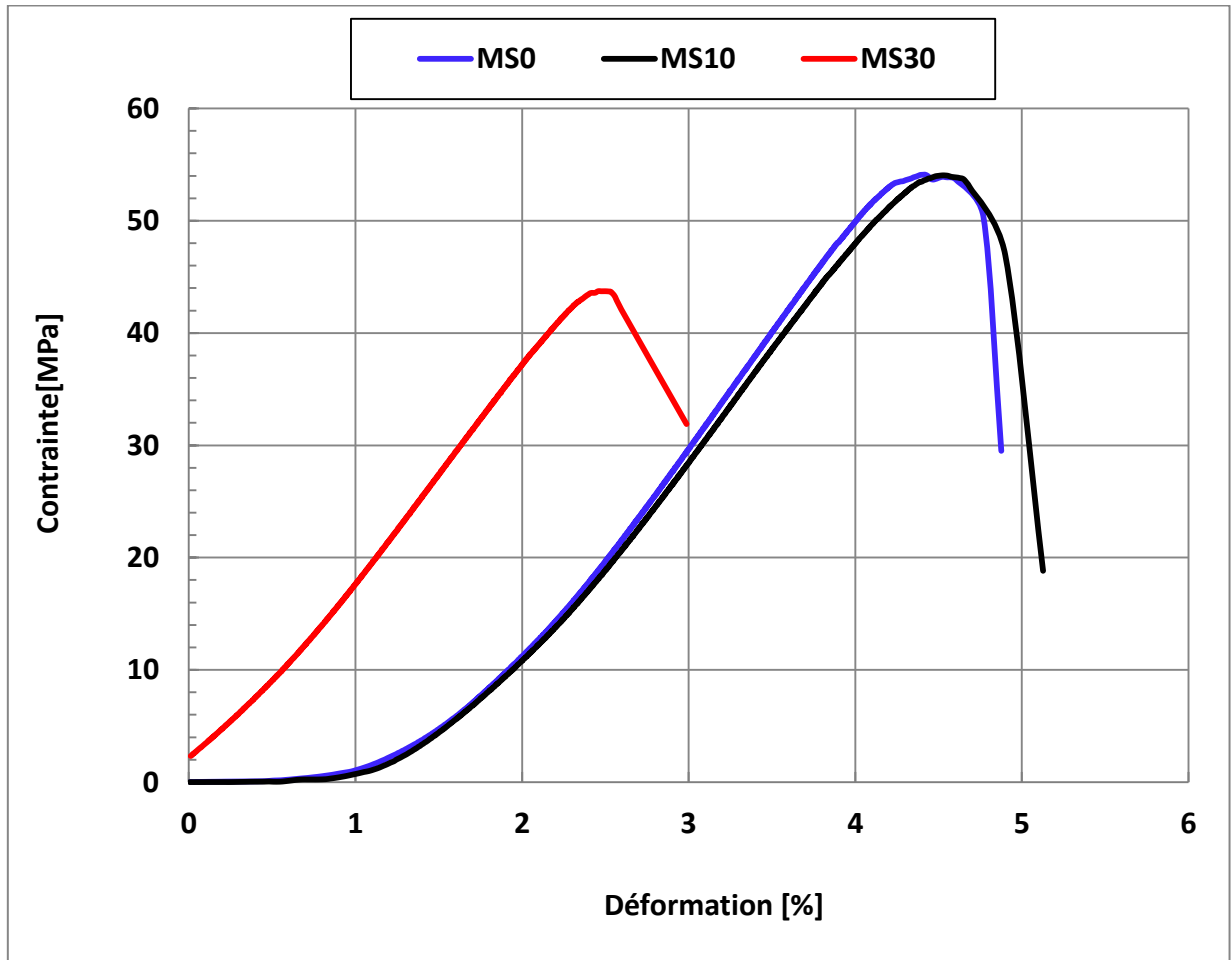


Figure V.11 : Contraintes-déformations des mortiers étudiés à 28 jours

La figure représente courbes contraintes-déformations des mortiers choisis après 28 jours de durcissement. Il est clair que le comportement de ces mortiers est un comportement fort identifié par un domaine élastique puis rupture à une charge maximale. Cependant, le mortier MC10 a un comportement mécanique identique à celui du mortier de référence sans sable de fonderie M0. Tandis que, jusqu'à 30% de substitution de ciment par le sable de fonderie, le comportement mécanique du mortier garde son élasticité démontré par la pente droite, mais une réduction de la charge maximale avec une déformation à la rupture plus faible par rapport au mortier de control est observée.

CONCLUSION GENERALE

L'objectif de cette étude était le recyclage des déchets de sable de fonderie en tant qu'ajout cimentaire et granulats fins (sable) dans la formulation des mortiers autoplaçants. Une étude expérimentale a été menée pour évaluer les propriétés à l'état frais et durcis des mortiers autoplaçants avec substitution partielle de ciment par le déchet de sable de fonderie finement broyé et d'autre part substitution de sable naturel par le déchet de sable de fonderie. A travers de l'étude expérimentale effectuée, on peut conclure que :

- Jusqu'au 30% de substitution de ciment par sable de fonderie broyé, la diminution de la fluidité des mortiers n'est pas importante, ou le mortier répond aux exigences des bétons autoplaçants de point de vue fluidité et mise en œuvre. Au-delà de 50% de substitution, les mortiers autoplaçant perdent leur fluidité. Il est à noter qu'on peut rattraper cette fluidité en augmentant ainsi le dosage du superplastifiant
- La résistance à la compression des mortiers pour 50% de substitution de ciment, a diminué par rapport au mortier témoin. La valeur de la résistance à la compression la plus élevée enregistrée est de l'ordre de 50 MPa pour le mortier de 20% de substitution ciment à 28 jours.
- 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 autoplaçant perdent leur fluidité.
- Pour les mortiers de 30% et 50% de substitution de sable, la résistance a diminué, la valeur de la résistance à la compression la plus élevée enregistrée est de l'ordre de 49 MPa pour le mortier de 10% de substitution de sable par déchet sable de fonderie. La résistance à la compression du mortier avec 100% du sable de fonderie était très faible par rapport au témoin.

Conclusion générale

- Le mortier MS10 à 10% de sable de fonderie, a un comportement mécanique identique à celui du mortier de référence sans sable de fonderie M0. Tandis que, jusqu'à 30% de substitution de sable par le sable de fonderie, le comportement mécanique du mortier est toujours élastique mais une réduction de la charge maximale avec une déformation à la rupture plus faible par rapport au mortier de contrôle.

Références

- [1] AFGC, "Recommandations pour l'emploi des bétons autoplaçants" Association française de génie civil, (2008)
- [2] OKAMURA H., OZAWA K. "Self-compactable high performance concrete", International Workshop on High Performance Concrete, American Concrete Institute, Detroit, pp. 31-44, 1994.
- [3] KHAYAT, K.H. Workability, testing, and performance of self-consolidating concrete, ACI Materials Journal, 96, 346–353, (1999).
- [4] ACI, "Processes, Self-Compacting Concrete", Advanced Concrete Technology III, 203.9/3, (2003)
- [5] SHEN Jie., "comportement mecanique des materiaux et des structures precontraintes en betons autoplaçants (BAP) ",Thèse de doctorat de l'Université de Reims champagne-ardenne-France, (2009)
- [6] TURCRY P., "Retrait et Fissuration des Bétons Autoplaçants Influence de la Formulation" Thèse de doctorat de l'Université de Nantes-France, (2004)
- [7] DUPAIN R., LANCHON R., SAINT-ARROMAN J.C., "Granulats, sols, ciments, et bétons", CASTEILLA, Paris, (2004)
- [8] NEHDI M., MINDESS S., AİTCIN P.-C., "Rheology of high-performance concrete: Effect of ultrafine " Cement and Concrete Research, 28(5), pp 687-697, (1998).
- [9] YAHIA A., TANIMURA M., SHIMOYAMA Y., "Rheological properties of highly flowable mortar containing limestone filler-effect of powder content and W/C ratio, Cement and concrete Research, 35(3), pp 532-539, (2005)
- [10] Khayat, K.H., Bickley, J., Lessard, M. Performance of self-consolidating concrete for casting basement and foundation walls, ACI Materials Journal, 97, 374–380, (2000)
- [11] HENDERSON, N.A. Self-compacting concrete at Millennium Point, Concrete, April, 26–27, (2000)
- [12] PETERSSON, O., Billberg, P., Van, B.K. A model for self compacting concrete. Proceedings of RILEM International Conference on Production Methods and Workability of Fresh Concrete, Paisley, June (1996)
- [13] DOMONE, P.L., Chai, H.-W. Testing of binders for high performance concrete, Cement and Concrete Research, 27, 1141–1147. (1997)
- [14] SEDRAN, T. and DELARRARD, F. Mix design of self-compacting concrete, Proceedings of the International RILEM Conference on Production Methods and Workability of Concrete, Paisley. Eds. P.J.M. Bartos, D.L. Marr, and D.J. Cleland, pp. 439–450. (1996)
- [15] BARTOS, P.J.M., Grauers, M. Self-compacting concrete, Concrete, April, 9–13. (1999)
- [16] RAMACHANDRAN, V.S. (1995) Concrete Admixtures Properties, Science, and Technology, 2nd, Noyes, Publications, Parkridge, NJ.
- [17] OKAMURA H. et al., "Self-compacting high performance concrete", Proceeding of the Fifth EA SEC, vol.3, pp.2381-2388, (1995)
- [18] YURUGI, M., SAKATA, N., IWAI, M. and SAKAI, G. Mix proportion for highly workable concrete, Proceedings of the International Conference of Concrete, Dundee, UK, (1993)
- [19] KHAYAT K.H., "Viscosity-Enhancing Admixtures for cement-based materials - An overview", Cement and Concrete Composites, 20, pp. 171-188, (1998)
- [20] SEDRAN, T. and DELARRARD, F. Mix design of self-compacting concrete, Proceedings of the International RILEM Conference on Production Methods and Workability of Concrete, Paisley (1996)
- [21] OKAMURA H., OZAWA K. "Self-compactable high performance concrete" International Workshop on High Performance Concrete, American Concrete Institute, Detroit, pp. 31-44, (1994)
- [22] SEDRAN T., « Les Bétons Autonivelants », bulletin LCPC 196, réf. 3889, pp. 53-60, mars-avril (1995)
- [23] DE LARRARD F. et al, " Mix design of self compacting concrete ", RILEM International Conference on production methods and workability of concrete, pp.439-451, Glasgow, 3-5 juin (1996)
- [24] PETERSSON Ö., BILLBERG P. and VAN B.K., "A model for Self- Compacting Concrete", International Rilem Conference on 'Production methods and workability of concrete', RILEM Proceedings 32, (1996)
- [25] SU N., HSU K.C., CHAI H.W., "A simple mix-design method for self compacting concrete", CemConcr Res, 31(12), pp1799-1807, (2001)
- [26] SU N., MIAO B., "A new method for the mix design of medium strength flowing concrete with low cement content" CemConcr Comp, 25, pp 215-222, (2003)
- [27] SHEN J. ; YURTDAS I.; DIAGANA C. ; LI A., "Mix-design method of self-compacting concretes for pre-cast industry", Canadian journal of civil engineering, , vol. 36, n. 9, pp. 1459-1469, (2009)
- [28] BUI V. K. and MONTGOMERY D., «Mixture porportioning method for selfcompacting high performance concrete with minimum paste volume», Proceedings of the First International RILEM Symposium of Self-Compacting Concrete, Paris, RILEM Publications S.A.R.L, p. 373-384. (1999)

Références

- [29] L. RIMOUX, "Les déchets dangereux en quantités dispersées en fonderie", Fonderie Fondateur d'aujourd'hui, CTIF, N°228-47-49.
- [30] J. ORKAS, "Remploi avantageux des sables excédentaires de fonderie dans le compostage", Fonderie Fondateur d'aujourd'hui, CTIF, N°215-34-40.
- [31] Cours en ligne sur les matériaux : <https://www.mfg.com/fr/manufacturing-knowledge-center/mechanical/fonderie-moulage-au-sable>
- [32] MONMET LTÉE, 5524 Rue St-Patrick, Bureau 202, Montréal , QUÉ, H4E 1A8 T: 514-788-6007 F: 514-788-6009 E: info@monmet.com
- [33] le formulaire du bordereau de suivi des déchets dangereux mentionné à l'article 4 du décret n° 2005-635 du 30 mai 2005. <http://www.recy.net/>
- [34] jean-claude Auriol (LCPC) OFRIR1, DL Clermond-ferrand-OFRIR2 (observation français des