

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



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

Mémoire

Présenté pour l'obtention du diplôme Master

Spécialité : Génie Civil

Option : Matériaux Génie Civil (MMGC)

THEME

Recyclage du sable de fonderie dans les bétons autoplaçants :

Utilisation en tant qu'ajout cimentaire

Réalisé Par :

BEGGAR ADLEN

LAIDOUCI HAMZA

Devant le jury :

Sujet Proposé et suivi par :

Dr. SAFI B.

Dédicace

Merci Allah de m'avoir donné la capacité d'écrire et de réfléchir, la force d'y croire, la patience d'aller jusqu'au bout de mes rêves.

Je dédie ce modeste travail en signe de reconnaissance et de respect et d'amour a :

- ✚ Mes très chers parents pour les sacrifices qu'ils ont consentis à mon égard pour l'amour qu'ils n'ont cessé de me le donner depuis ma naissance.
- ✚ Mon grand frère Hamza et mon petit frère Ali.
- ✚ Mes oncles Ahmed, Mohammed, Sofiane et mes tantes Wahiba, Leila, et Nabila.
- ✚ Mes cousins : Abederrahman, Billel, Assia, et Abdelhak.
- ✚ Mes meilleurs amis : Issolah Imad Eddin, Amine Hidour, Samir Tekfi, Yacine Kadour, Anis Boussouar, Rachid Bouchaid, Dahmani Abdallah, Sid ali Mebarki, Fares Boudali, Yanis Nacerbey, Khalil Debba7, Nabil El Bouchi, Zakaria Kenji, Walid Zitrov, Oussama Googster, Yousef Slayver, Lotfi Aldo, Islam Doto, Maroua rial, Meriem Mahi, Hannah, Tinhenen et Drifa.
- ✚ Mes Collègue et chers amis : Houcin, Walid, Hamza, Amine, Abdelhak, Simo et Mustapha et tous les autres que je n'ai pas cité leurs Nom.
- ✚ Mon très cher Binome et Frère Hamza Laidouci.

BEGGAR ADLEN

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à

Mes chers parents ...

Ma mère qui a tout sacrifié pour moi et à mon père. Grâce à vous que je suis là, et grâce à vous que je serai loin. Vous resterez toujours dans mon cœur.

Mes frères et Mes sœurs pour leurs encouragements et leurs soutiens.

À ma femme « sissa » .

*Mon très cher Binôme et Frère **BEGGAR ADLEN**.*

À toute Ma famille, à tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin

Laidouci hamza,

Remerciement

*Nous tenons en premier lieu à remercier le bon Dieu le tout Puissant de nous avoir
Permis de mener à terminer ce projet de fin d'étude.*

*Nous exprimons nos sincères remerciements aux membres du jury :
MR GHARNOUTI .Y et MR DAOUI.A qui nous ont honorées de leur présence pour
présider et d'examiner ce travail.*

*Nous tenons à remercier chaleureusement Mme GHANEM.F pour son généreux
accueil ainsi que son aide, sa disponibilité, ses conseils, la riche documentation qui nous
a permis de mener à bien ce travail de recherche.*

*Nous tenons à remercier Dr SAFI .B qui nous a fait l'honneur d'encadrer ce travail et
de nous avoir guidés au cours de sa réalisation, en témoignage de son dynamisme, de
son implication dans la recherche, nous exprimons par ces quelques mots de notre
profonde gratitude, tout en espérant que nous étions à l'auteur de ses espérances.*

*Nos vifs remerciements s'adressent à tous le personnel de département de génie civil
de la faculté mouloud maamri, Tizi-Ouzou pour leur disponibilité à tout instant
durant la durée de notre recherche en particulier Mr BOUHRAOUA dont l'ardeur au
travail et la sympathie ont créé des conditions tout à fait propices pour une bonne
productivité scientifique.*

*Merci à tous les enseignants du département de génie des procédés surtout les
enseignants de la spécialité Matériaux Génie Civil.*

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

Chapitre 1 – Les bétons autoplaçants

1	Introduction	8
2	Généralités sur les BAP	8
2.1	Définition.....	8
2.2	Les principaux constituants des BAP	9
2.2.1	Matériaux de base.....	9
3	Caractérisation des BAP à l'état frais.....	11
3.1.1	Essai d'étalement.....	12
3.1.2	L'essai de la boîte en L	13
3.1.3	Essai de stabilité au tamis.....	14
4	Caractérisation des BAP à l'état durci	14
4.1	Propriétés mécaniques (essai destructifs).....	14
4.1.1	Résistances mécaniques	14
4.1.2	Résistance à la traction :	16
4.1.3	Module d'élasticité	16
4.2	Essais Non destructifs	17
4.2.1	Essai au scléromètre	17
4.2.2	Essai d'auscultation dynamique (ultrason)	17
5	Méthodes de formulation des BAP.....	18

Chapitre 2 – Les Sables de la Fonderie

1	Introduction	19
2	Sable de fonderie	19
2.1	Définition.....	19
2.2	Particularité des sables usées.....	20
2.3	Sable usé étudié.....	21
2.3.1	Sable à vert ou à l'argile.....	21
2.3.2	Sable au silicate de soude.....	21
2.3.3	Sable au silicate de soude avec bentonite.....	22
2.3.4	Sable à la résine furanique.....	22
2.4	Le moulage au sable	22
2.5	Caractéristiques des différents sables utilisés en fonderie.....	23
2.5.1	Le choix d'un sable est déterminé par son.....	23
2.6	Moulage au sable.....	24

2.6.1	Le prototypage rapide.....	24
2.6.2	Avantages	24
2.7	Les pièces pour le moulage au sable	25
2.8	Les étapes de moulage au sable.....	25
2.8.1	Réalisation du noyau	25
2.8.2	Réalisation du moule	26
2.8.3	Réalisation des événements et du trou de coulée.....	27
2.8.4	Assemblage du moule	28
2.8.5	Coulée.....	28
2.8.6	Obtention de la pièce.....	28
3	Les solutions pour les sables de fonderie	28
3.1	Prévention / Réduction	28
3.2	Gestion dans l'entreprise.....	28
3.3	Collecte.....	28
3.4	Traitement / valorisation.....	29
3.4.2	Stockage	30
4	Caractéristiques environnementales	30
4.1	Acceptabilité environnementale	30
4.2	Effets sur les écosystèmes des sables de fonderie valorisés en techniques	30
4.2.1	Routières :	30
4.3	Suivi environnemental.....	31
4.3.1	Source de substances	31
4.4	Aspects sanitaires.....	31
4.4.1	Risques de silicose :	31
5	Conclusion.....	32

Chapitre 3 - Méthodologie et choix des matériaux

1	Objectif du travail.....	33
2	Méthodologie du travail pratique	33
3	Caractéristique des matériaux utilisés	34
3.1	Ciment	34
3.1.1	Domaine d'utilisation :	34
3.1.2	Caractéristiques physiques du ciment	34
3.1.3	Caractéristiques chimiques.....	35
3.1.4	Caractéristiques minéralogiques	35

3.1.5	Caractéristiques mécaniques du ciment	35
4	Sable	35
4.1	Caractéristique du sable.....	35
4.1.1	Caractéristiques physiques	35
4.1.2	Analyse granulométrique et classe granulaire.....	36
4.1.3	Caractéristique chimiques	36
4.1.4	Analyse granulométrique par laser.....	37
5	Les granulats.....	37
5.1	Analyse granulométrique et classe granulaire	37
6	Superplastifiant.....	38
6.1.1	Domain d'application	38
6.2	Caractères généraux	38
6.3	Conditionnement	39
6.3.1	Stockage	39
6.3.2	Caractéristiques	39
6.3.3	Conditions d'application	39
6.3.4	Propriétés et effets	39
6.3.5	Délai de conservation	40
6.3.6	Eau de gâchage	40
7	Déchet du sable de fonderie	40
7.1	Caractéristiques de sable de fonderie	40
7.1.1	Caractéristiques physiques	40
7.1.2	Analyse granulométriques par laser	41

Chapitre 4 - Formulation des bétons et méthodes d'essais

1	Formulation des Bétons.....	43
1.1	Composition du béton autoplaçant	43
1.2	Donné de base	43
1.3	Calcul des proportions.....	44
1.4	Détermination de la masse de chaque constituant.....	44
1.5	Dosages des constituants pour 1 m ³ du béton.....	45
2	Méthodes d'essais.....	45
2.1	Conduite d'essais.....	46
2.1.1	Etat frais	46
2.2	Etat durci	47

2.2.1	Résistance à la compression.....	47
2.2.2	Essai de flexion par traction.....	49

Chapitre 5 – Résultats et interprétations

1	Etat frais.....	50
1.1	Fluidité des bétons.....	50
1.2	Stabilité des Bétons (Stabilité au tamis).....	52
1.3	Capacité de remplissage (Boite en L).....	53
2	Etat durci.....	55
2.1	Masse volumique.....	55
2.2	Vitesse de propagation de son.....	56
2.3	Résistance à la traction.....	58
2.4	Résistance en compression.....	59
3	Module d'élasticité Dynamique.....	59

Liste des figures

Figure I.1 : Action des superplastifiants- défloculation des grains de ciment.

Figure I.2 : Influence de la qualité du superplastifiant sur l'étalement et la viscosité d'un béton.

Figure I.3 : Schéma de principe de l'essai d'étalement.

Figure I.4 : détermination de l'étalement.

Figure I.5 : schéma de principe l'essai de la boîte en l.

Figure I.6 : essai de boîte en l.

Figure I.7 : Représentation de l'essai de stabilité au tamis.

Figure I.8 : évolution de la résistance mécanique d'un BAP et d'un BV.

Figure I.9 : Résistance mécanique d'un béton vibré et de 2 BAP

Figure I.10 : Comparaison des modules d'élasticité d'après les codes de construction et de bétons Vibrés avec leurs valeurs expérimentales.

Figure II.1 : Comment le sable est réutilisé et devient un sable de fonderie.

Figure II.2 : Localisation de l'Algérienne des Fonderies de Tiaret (ALFET) – Algérie.

Figure II.3 : Moule au sable.

Figure II.4 : les pièces pour moulage au fer et acier.

Figure II.5 : Le noyau sorti de sa boîte.

Figure II.6 : Plaques modèle avec canaux d'alimentation, masselottes et trou de coulée.

Figure II.7 : Remplissage du châssis avec le sable à vert.

Figure III.1 : Analyse granulométrique de sable 0/3 selon la norme NF EN 933-1.

Figure III.2 : Distribution granulométrique en fraction volumique de sable 0/3.

Figure III.3 : Analyse granulométrique par tamisage de gravier 8/16.

Figure III.4 : déchet de sable de fonderie broyé et Naturel.

Figure III.1 : Analyse granulométrique du sable de fonderie.

Figure III.5 : distribution granulométrique en fraction volumique (sable de fonderie).

Figure IV.2 : schéma de l'essai d'étalement.

Figure IV.2 : la boîte en L.

Figure IV.3 : Confection des éprouvettes des bétons autoplaçants.

Figure IV.4 : La machine d'écrasement.

Figure IV.5 : confection des éprouvettes du béton autoplaçant pour essai de traction.

Figure V.1 : Fluidité des bétons étudiés en fonction de taux de substitution du ciment par le déchet de sable de fonderie.

Figure V.2 : Essai de l'étalement.

Figure V.3 : La stabilité des bétons étudiés.

Figure V.4 : Essai de Stabilité au tamis.

Figure V.5 : Capacité de remplissage des Bétons étudiés.

Figure V.6 : Essai de la boîte en L.

Figure V.7 : Evolution la masse volumique apparente des bétons étudiés mesurée après 28 jours de durcissement.

Figure V.8 : Evolution de la vitesse de propagation du son des bétons étudiés.

Figure V.9 : Evolution de la résistance à la traction par flexion effectués à 28 jours.

Figure V.10 : Evolution de la résistance à la compression des Bétons étudiés effectués à différents âge (3, 7, 28 jours).

Figure V.11 : Module d'élasticité dynamique des bétons étudiés.

Liste des tableaux

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 fluorescence X.

Tableau III.3 : composition minéralogique du ciment par diffraction rayon X.

Tableau III.4 : Caractéristiques mécaniques du ciment.

Tableau III.5 : Caractéristiques physiques du sable concassé (0/3) selon la norme NF EN 933-1.

Tableau III.6 : Analyse granulométrique par tamisage du sable 0/3 selon NF EN 933-1.

Tableau III.7 : Analyse chimique de sable calcaire effectué par fluorescence X.

Tableau III.8 : Analyse granulométrique par tamisage du gravier 8/16 selon NF EN 933-1.

Tableau III.9 : Caractéristiques physiques du déchet de sable de fonderie.

Tableau III.10 : Caractéristiques physique du déchet de sable de fonderie finement broyé.

Tableau III.1 : Analyse granulométrique du déchet de sable de fonderie (la norme NF p 18-560).

Tableau IV.1 : Formulations gâchées des bétons étudiés pour 1m³.

Tableau V.1 : Essai de l'étalement.

Tableau V.2 : Essai de Stabilité au tamis.

Tableau V.3 : Essai de la boîte en L.

Tableau V.4 : Masse Volumique.

Tableau V.5 : Essai d'ultrason.

Tableau V.6 : Essais de traction par flexion effectués à 28 jours.

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

Tableau V.8 : Module d'élasticité dynamique.

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 qu'ajout cimentaire (par remplacement d'une partie de ciment) à différents taux de substitution (0, 10, 20 et 30%) pour produire du béton autoplaçant. Ce travail présente une étude expérimentale sur la formulation et caractérisation physico-mécanique des bétons autoplaçants à base de déchets de sable de fonderie finement broyé.

Abstract

Industrial waste has found its place as cementations materials in the manufacture of concrete or cement mortars. Among these wastes, silica fumes, granulated blast furnace slag, fly ash ...etc. This waste can be incorporated in the concrete as a mineral addition or fine aggregate (sand), to improve certain properties in the fresh state such as fluidity or hardened such as the durability of the concrete material. However, there are other types of waste that need to be recycled, namely the sands of the foundry. Foundry sand is a by-product of the foundry industry. In the metal casting process, foundries use fine siliceous sand in combination with other materials such as clay or organic binders. This sand can be recycled but the number uses of it is limited. When the sand is no longer usable for the foundry industry, it is landfilled. The foundry sands are therefore likely to be a raw material at a relatively low cost for the manufacture of hydraulic concretes. For this reason, ongoing research to find constituents in the formulation of special concretes to reduce the cost of manufacturing these concretes.

The aim of this study is to see the possibility of reusing foundry sand (SNVI-Rouiba) as a cement additive (by replacing a part of cement) at different substitution rates (0, 10, 20 and 30%) to produce self-consolidating concrete. This work presents an experimental study on the physic-mechanical formulation and characterization of self-compacting concretes based on finely ground foundry sand waste.

Introduction générale

Au cours des dernières décennies, l'utilisation des déchets industriels a considérablement augmenté dans différents domaines de la fabrication des matériaux en particulier le matériau béton. En effet, le développement des techniques de recyclage et de classification des déchets industriels, Ces derniers peuvent être incorporés dans le béton comme ajout minéral ou granulats fins (sable), afin d'améliorer certaines propriétés à l'état frais telles que la fluidité ou la durabilité du matériau béton. Cependant, il existe d'autres types de déchets qui nécessitent d'être recyclés, 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 de réutilisations de celui-ci est limité. Quand le sable n'est plus réutilisable pour l'industrie de la fonderie, il est mis en décharge. Les sables de fonderie sont donc susceptibles de constituer une matière première d'un coût assez faible pour la fabrication des bétons hydrauliques. Pour cette raison, les recherches continuent pour trouver des constituants rentrant dans la formulation des bétons spéciaux afin de diminuer le coût 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 qu'ajout cimentaire (par remplacement d'une partie de ciment) pour produire du béton autoplaçant. Ce travail présente une étude expérimentale sur la formulation et caractérisation

physico-mécanique des bétons autoplaçants à base de déchets de sable de fonderie finement broyé.

Le présent manuscrit est subdivisé en cinq (5) chapitres, répartie en deux chapitres pour la synthèse bibliographique et trois autres chapitres pour le travail expérimental.

Le **chapitre I** est consacré aux généralités sur les bétons autoplaçants ;

Le **chapitre II** décrit un état de l'art sur les sables de fonderie ainsi que les leurs utilisation dans le domaine des matériaux de construction;

Le **chapitre III** présente la caractérisation des matériaux utilisés, dont nous présentation les caractéristiques chimiques, physiques et mécaniques des matériaux utilisés (ciment, filler calcaire, superplastifiant, déchets de sable de fonderie, sable et gravillon). La fabrication et les caractéristiques des granulats de verre mousse est aussi donnée le même chapitre ;

Le **chapitre IV** est consacré à l'élaboration des bétons autoplaçants à base de sable de fonderie finement broyé. La composition et méthode de formulation des bétons étudiés seront aussi présentées dans ce chapitre ;

Le **chapitre V** donnera les résultats des différents essais réalisés et leurs interprétations.

Enfin, une conclusion générale clôtura ce mémoire en synthétisant les principaux résultats obtenus par notre travail.

Chapitre I : les bétons Autoplaçants (BAP)

Ce chapitre est consacré à présenter des généralités sur les bétons autoplaçants, leurs constituant et leurs propriétés essentielles ainsi que leurs particularités de point de vue propriétés à l'état frais et durci.

1 Introduction

Le béton est un matériau structural plus utilisé pour la construction des infrastructures sociales et industrielles. Toutefois, pour construire des structures durables et fiables, il est nécessaire, non seulement de développer un béton de qualité, mais aussi d'assurer une mise en place correcte afin de répondre aux exigences demandées pour la mise ne service de la structure. Les bétons autoplaçants (BAP) constituent une nouvelle génération de béton qui s'adapte bien à l'état actuel du développement des structures face à une main-d'œuvre de moins en moins qualifiée. Cette gamme de béton ce caractérise par une grande ouvrabilité et une grande déformabilité tout en étant stable et garantit des structures résistantes et durables.

2 Généralités sur les BAP

2.1 Définition

Le béton autoplaçants est un béton capable de se mettre en place dans les coffrages les plus complexes et très encombrés uniquement sous l'effet de la pesanteur. Ainsi, ce type de béton ne requiert aucun moyen de vibration pour consolider le mélange avec comme résultat un produit très homogène [1].

Les BAP se distinguent des bétons ordinaires principalement par leurs propriétés à l'état frais, qui sont le résultat d'une formulation spécifique. Cette dernière doit pouvoir concilier deux propriétés a priori contradictoires : une très grande fluidité et une bonne résistance à la ségrégation (stabilité). L'association française de génie-civil définit dans ses recommandations provisoires les BAP comme des bétons « très fluides, homogènes et stables » [2].

2.2 Les principaux constituants des BAP

Les constituants des BAP peuvent être assez différents de ceux des bétons ordinaires (BO). Ils peuvent différer tant par leurs proportions que par leur choix. Étant donné le mode de mise en place des BAP, les constituants entrant dans la fabrication du BAP, selon leur utilisation, en trois catégories ; les matériaux de base (ciment, granulats et eau de gâchage), les additions minérales, ainsi que les adjuvants chimiques.

2.2.1 Matériaux de base

Les granulats, le ciment et l'eau forment les éléments de base de tous types de béton. Ils sont qualifiés ainsi puisqu'ils sont historiquement les seuls constituants des bétons de nos ancêtres et parce qu'ils ont toujours les plus grosses proportions relatives dans le mélange de BAP.

2.2.1.1 Les granulats

Le granulat, qu'on appelle aussi agrégat roulés ou concassés peuvent en principe être utilisés. Les granulats roulés en vrac présentent un plus petit volume de vide inter granulaire, ce qui nécessite une plus faible quantité de pâte de ciment pour le remplir. La flottabilité des granulats concassés dans la pâte de ciment est cependant meilleure, en raison de leur plus grande surface spécifique à masse identique. Afin d'empêcher tout risque de blocage du BAP par les barres d'armature lors de coulage, on limite en général le diamètre maximal des granulats à 16mm. L'expérience a néanmoins montré qu'il était également possible d'utiliser des granulats de diamètre maximal différent.

Le mélange pour béton (granularité) est caractérisé par une teneur élevée en sable et en éléments fins. Le passant au tamis de 2mm devrait être idéalement compris entre 38 et 42%.

De même, la proportion de farines (0,125 mm) ne devrait pas être trop faible, l'optimum étant situé entre 4 et 8%.

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

Afin d'assurer une bonne stabilité du BAP (éviter toute ségrégation), il est recommandé de choisir un sable spécialement optimisé, au besoin recomposé à partir de plusieurs fractions.

2.2.1.2 Le ciment

En principe, tous les types normalisés de ciment conviennent pour la fabrication de BAP.

Cependant, l'utilisation du ciment portland (contenant seulement le clinker) nous donne toute latitude pour varier et contrôler les quantités introduites des additions minérales. Le ciment généralement utilisé pour la confection d'un béton autoplaçant est soit le ciment Portland CPA-CEM I 42,5 qui contient au moins 95 % de clinker et éventuellement un constituant secondaire, soit le ciment Portland composé CPA-CEM II/A et B 42,5 dont l'apport en clinker est de 65 à 94 %, le reste étant composé d'un ou de plusieurs ajouts [3].

2.2.1.3 L'eau de gâchage

Toute eau du réseau public d'eau potable convient pour la fabrication de béton autoplaçant. Les catégories d'eau qui ne doivent pas être utilisées sont :

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

2.2.1.4 Les ajouts minéraux

Les ajouts cimentaires sont généralement des produits et de sous-produits minéraux qui peuvent être naturels ou artificiels. L'incorporation d'ajouts cimentaires peut se faire lors de la fabrication de ciment composé ou dans une centrale à béton au moment de la fabrication du béton. D'un point de vue économique, les ajouts sont généralement moins chers par rapport au ciment portland et leur substitution partielle contribue à une diminution importante du coût de production du ciment portland.

Nous présentons ci-dessous quelques différents ajouts minéraux qu'on peut incorporer dans les compositions des BAP :

1. Les fillers calcaires
2. Les pouzzolanes naturelles
3. La fumée de silice
4. Les cendres volantes
5. Le laitier de haut fourneau

2.2.1.5 Les superplastifiants

L'action principale des superplastifiants est de dé flocler les grains de ciment. Une action de répulsion électrostatique agit en neutralisant les charges électriques présentes à la surface des grains et/ou par répulsion stérique en écartant les grains les uns des autres, grâce à des

chaînes moléculaires très longues. L'eau piégée par les floccs est de nouveau disponible pour la maniabilité du béton (Figure 1). Il est alors possible de mettre en œuvre des bétons très fluides avec des rapports E/C faible [4].

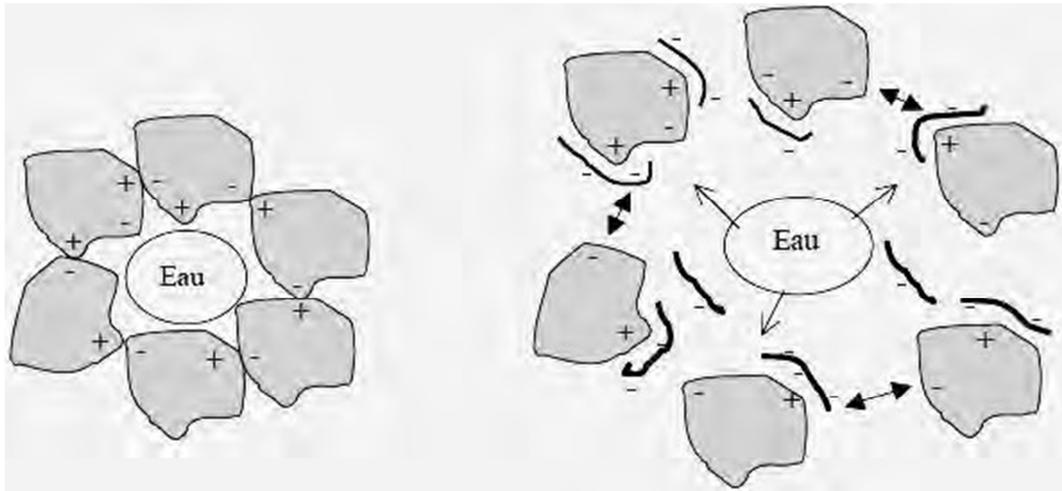


FIGURE I.1 : ACTION DES SUPERPLASTIFIANTS – DEFLOCCULATION DES GRAINS DE CIMENT[5].

L'ajout d'un superplastifiant aide à augmenter la fluidité. La figure 2 montre par exemple que l'étalement augmente très fortement à partir d'un certain dosage en superplastifiant [6].

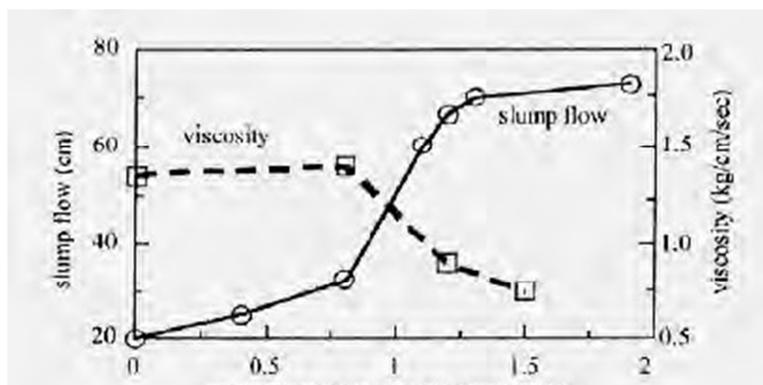


FIGURE I.2 : INFLUENCE DE LA QUALITE DU SUPERPLASTIFIANT SUR L'ETALEMENT ET LA VISCOSITE D'UN BETON [6].

3 Caractérisation des BAP à l'état frais

Contrairement au béton ordinaire, le béton autoplaçant présente une difficulté particulière pour sa formulation et sa caractérisation. En effet, il doit concilier deux propriétés, à priori contradictoires, à savoir la fluidité et l'absence de ségrégation et de ressuage. Il doit satisfaire à plusieurs tests pour pouvoir être qualifié d'autoplaçant.

Avant d'accepter une composition comme celle d'un BAP, il faut s'assurer que le béton résultant possède effectivement les qualités qu'on espère. Pour cela, il existe de nombreux

essais permettant d'évaluer les différentes caractéristiques du béton à l'état frais.

3.1.1 Essai d'étalement

Cet essai est dérivé de l'essai d'affaissement. Au lieu de mesurer l'affaissement qui doit toujours être supérieur à 25cm pour le béton autoplaçant, on mesure le diamètre moyen de la galette formé par le béton lors de l'étalement. Cet essai permet d'avoir une très bonne idée de la déformabilité du béton autoplaçant. On vise habituellement un étalement compris entre 600 et 750mm pour un béton autoplaçant [7].

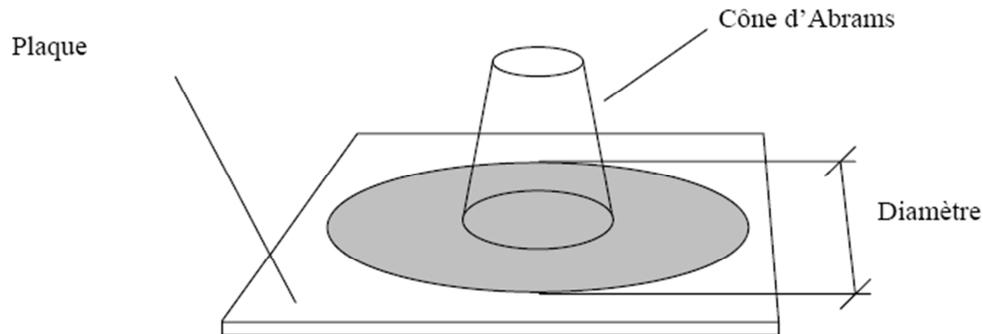


FIGURE I.3 : SCHEMA DE PRINCIPE DE L'ESSAI D'ETALEMENT.



FIGURE I.4 : DETERMINATION DE L'ETALEMENT.

3.1.2 L'essai de la boîte en L

Cet essai permet de tester la mobilité du béton en milieu confiné et de vérifier que la mise en place du béton ne sera pas contrariée par des phénomènes de blocage au droit des armatures. Le schéma de la boîte ainsi que le principe de l'essai sont décrits sur la figure suivante.

La partie verticale de la boîte est remplie de béton qu'on laisse reposer une minute. On lève la trappe et on laisse le béton s'écouler à travers le ferrailage. Une fois l'écoulement terminé, on mesure les deux hauteurs H_1 et H_2 et on exprime le résultat en terme de taux de remplissage H_2/H_1 . Le taux de remplissage pour un BAP doit être supérieur à 0,8. Lorsque le béton s'écoule mal à travers le ferrailage ou qu'il y a blocage des granulats, c'est le signe de l'apparition de la ségrégation.

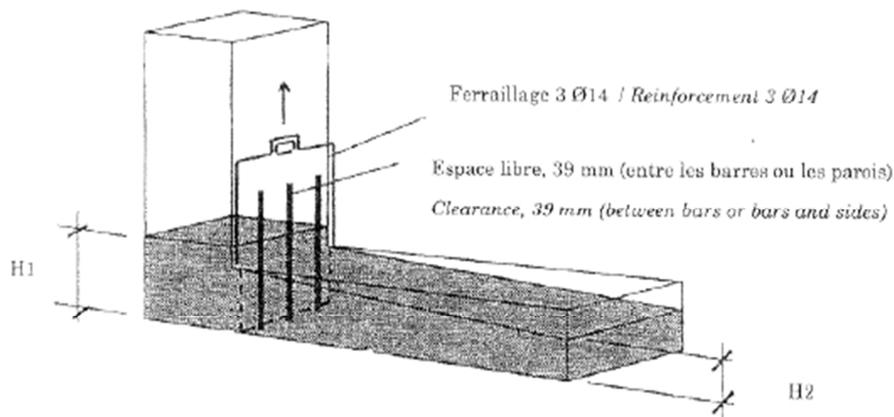


FIGURE I.5 : SCHEMA DE PRINCIPE L'ESSAI DE LA BOITE EN L.



FIGURE I.6 : ESSAI DE BOITE EN L.

3.1.3 Essai de stabilité au tamis

Cet essai vise à qualifier les bétons autoplaçants vis-à-vis du risque de ségrégation. Il peut être utilisé en phase d'étude de formulation d'un béton autoplaçant en laboratoire, ou pour le contrôle de la stabilité du béton livré sur chantier.

On prélève un échantillon de 10 litres de Béton, après 15 Minutes d'attente, on verse sur un tamis d'ouverture 5 mm, une masse de 4.8 kg de béton et on relève la masse de l'échantillon ainsi que celle du fond avec la laitance.

On calcule le pourcentage en poids de laitance par rapport au poids de l'échantillon :

$$P_i = \frac{P_{\text{laitance}}}{P_{\text{échantillon}}} \times 100$$

La mesure de ce pourcentage permet de classer les formules de BAP :

- 0 % < % laitance < 15 % → Stabilité satisfaisante.
- 15 % < % laitance < 30 % → Stabilité critique.
- % laitance > 30 % → Stabilité très Mauvaise.



FIGURE I.7 : REPRESENTATION DE L'ESSAI DE STABILITE AU TAMIS.

4 Caractérisation des BAP à l'état durci

4.1 Propriétés mécaniques (essai destructifs)

4.1.1 Résistances mécaniques

Diverses études [8] [9] [10] [11] comparent l'évolution de la résistance mécanique des BAP contenant des fillers calcaires à celle des bétons vibrés. Ces auteurs observent une accélération de la résistance au jeune âge et cela jusqu'à 28 jours. Ceci est expliqué par une hydratation favorisée par une multiplication des sites de nucléation des fines du filler.

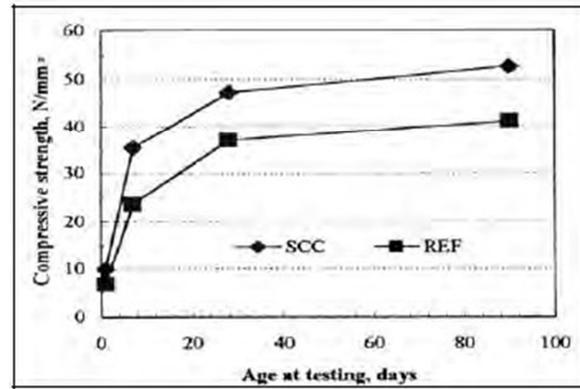


FIGURE I.8 : EVOLUTION DE LA RESISTANCE MECANIQUE D'UN BAP ET D'UN BV [8].

Pour Petersson [12], cette résistance augmente d'autant plus que la finesse du filler est importante.

De plus, les superplastifiants et les agents de viscosité ont des répercussions sur la résistance

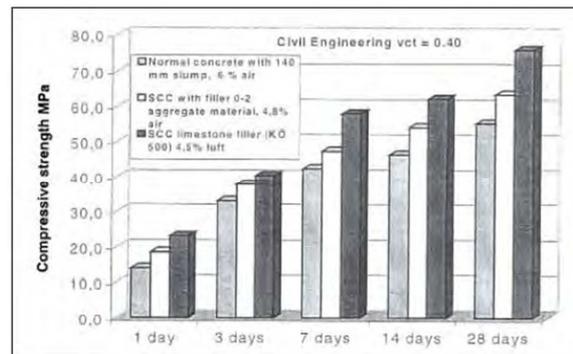


FIGURE I.9 : RESISTANCE MECANIQUE D'UN BETON VIBRE ET DE 2 BAP [12].

mécanique des bétons autoplaçants. Selon Felekogly et al [13], l'agent de viscosité diminue la résistance aux jeunes âges. Par contre, certains superplastifiants entraînent des effets secondaires comme le retard de la prise qui aboutit à l'augmentation du développement de la résistance mécanique au jeune âge [14].

Mais, à long terme, la résistance en compression des BAP est, soit inférieure à celle des BV [15][16] ce qui est attribué aux quantités importantes de fluidifiant et à la présence du filler calcaire, soit égale à celle des BV [17].

Un autre élément influençant la résistance à la compression est le volume de la pâte. Turcry et al [18] montre que le volume de la pâte a un effet réel limité sur la résistance en compression. Il est observé une diminution de 12% de la résistance pour une augmentation de 57% du volume de la pâte. De même, Pineaud [19] constate que le volume de pâte a une faible influence sur la résistance en compression. Parallèlement au volume de pâte. Le rapport E/L

est un des facteurs les plus influents sur la résistance en compression. Pineaud [19] montre que l'influence du rapport E/L est comparable à celle obtenue par auteurs sur des BV.

4.1.2 Résistance à la traction :

La particularité des BAP peut entraîner des variations de résistance. Par exemple la qualité de fines ou bien le volume de sable peuvent influencer la résistance en traction [19]. Ils montrent que l'augmentation de la quantité de sable ou/et du volume de fines entraîne une élévation de la résistance en traction.

En effet, la résistance d'un béton à la traction est conditionnée par de nombreux paramètres. On peut noter que la microstructure de la pâte cimentaire et la porosité de l'auréole de transition sont fréquemment utilisées dans la littérature pour expliquer les variations ou les résultats de résistance à la traction obtenue.

Pour certains auteurs [15][20], la porosité de l'auréole de transition des BAP est inférieure à celle des BV. Donc, la résistance en traction des BAP est supérieure à celle des BV (de l'ordre de 10%). Ces résultats sont repris par Pineaud [19]. Il suggère que la qualité de l'interface pâte-granulats est meilleure dans les BAP et la faible proportion de granulats diminue le risque de propagation des premières fissures.

4.1.3 Module d'élasticité

Le module d'élasticité dépend à la fois des proportions et des modules des différentes phases constituant un béton. Or, un BAP est composé d'un volume de pâte important et de ration G/S plus faible qu'un BV.

D'après différents codes (Eurocode ou DTU), le module d'élasticité est fonction de la résistance en compression des bétons. Donc, à résistance égale, un BAP devrait avoir le même module qu'un béton vibré. Or, Persson [17] et Pons et al [21] ont montré que le module est similaire pour les BAP et les BV. De même, König et al [20] constatent que les modules des BAP sont très proches de ceux des BV. D'autres auteurs indiquent un module plus faible que ceux des bétons vibrés [22] [19] [15].

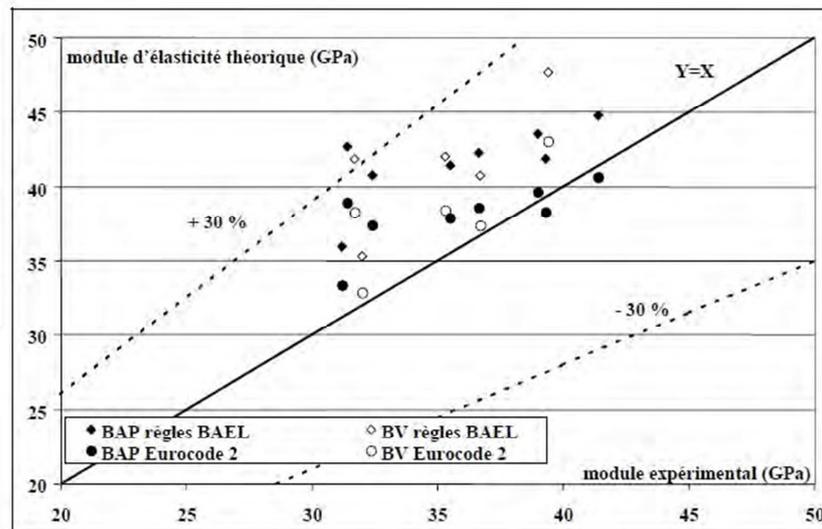


FIGURE I.10 : COMPARAISON DES MODULES D'ELASTICITE D'APRES LES CODES DE CONSTRUCTION ET DE BETONS VIBRES AVEC LEURS VALEURS EXPERIMENTALES [21]

Comme pour la résistance à la compression, d'autres paramètres influencent le module d'élasticité. Turcry et al [18] montrent une diminution du module des BAP avec l'augmentation de volume de pâte. Mais, selon ces mêmes auteurs, l'influence du volume sur le module est négligeable. En effet, Pineaud [19] observe des valeurs de déformations à la rupture très proches pour les BAP et les BV. Parallèlement au volume de pâte, il a observé une diminution du module avec l'augmentation du rapport E/L.

4.2 Essais Non destructifs

4.2.1 Essai au scléromètre

L'essai au scléromètre consiste à projeter une masse sur la surface du béton avec une énergie initiale constante. Suite au choc, une partie de l'énergie est absorbée par le béton, l'autre partie provoque le rebondissement de la masse.

La mesure de la dureté au choc permet d'évaluer la résistance d'un béton de manière non destructive. Cette méthode est intéressante en raison de sa simplicité ; elle permet de faire rapidement des contrôles de régularité des bétons d'un ouvrage.

4.2.2 Essai d'auscultation dynamique (ultrason)

Cet essai permet de déterminer la vitesse la propagation d'ondes longitudinales (de compression) à travers un élément en béton. Le principe de la méthode consiste à mesurer le temps mis par une onde à parcourir une distance donnée.

Le principe de la méthode consiste à mesurer le temps mis par une onde, d'où le nom de la méthode (essai de vitesse de propagation d'ondes sonores) à parcourir une distance connue. D'après LESLIE et CHEESMAN, l'état du béton totalement inconnu peut se déterminer approximativement selon la vitesse mesurée.

5 Méthodes de formulation des BAP

Plusieurs méthodes de formulation des bétons autoplaçants existent aujourd'hui dont un grand nombre a été publié dans les différents congrès dédiés aux BAP [23][24][25].

La méthode japonaise développée par Okamura et Ozawa est l'une des premières méthodes mises au point pour la formulation des bétons autoplaçants à étalement d'au moins 65 cm [26][27]. La Méthode préconise l'augmentation du volume de pâte au détriment du volume de granulats. Ce principe vise à éviter tout problème de blocage des gravillons en imposant un volume de gravillons inférieur à 50 % au volume solide du béton et un volume de sable de diamètre supérieur à 90 μm est égal à 40 % du volume total du mortier du béton. Au final, la méthode conduit à des volumes de pâte très élevés, une surestimation du liant et donc à des bétons très onéreux [28].

Chapitre II : Les Sables De La Fonderie

Ce chapitre consiste à donner des généralités sur les différents sables de fonderie qui existent dans l'industrie de métallurgie. De même nous présentons ici dans ce chapitre, un état de l'art sur l'utilisation des sables de fonderie en tant qu'ajout cimentaire dans la composition des bétons.

1 Introduction

Environ 60% à 80% du béton est composé d'agrégats en volume. Les granulats fins et grossiers sont utilisés dans la production de béton. L'utilisation de sable comme granulat fin dans l'industrie de la construction a augmenté à un rythme alarmant. Pour répondre à cette demande croissante, l'industrie est confrontée à des difficultés d'approvisionnement en sable de rivière naturel. Pour surmonter cette situation, les industries de construction ont identifié des alternatives comme le sable manufacturé, le sable robo, la poussière de roche, etc. une autre alternative est l'utilisation de sable de fonderie. Cette méthode rend la production de béton plus économique. Le remplacement partiel des granulats fins par les déchets de sable de fonderie permet de réduire la consommation d'agrégats naturels [29].

2 Sable de fonderie

2.1 Définition

Dans les fonderies, le sable est recyclé et réutilisé plusieurs fois dans le but de couler. Lorsque le sable ne trouve aucun avantage dans cette industrie, il est éliminé comme un déchet, et appelé sable de fonderie [29].

Le sable de fonderie est produit par cinq classes de fonderie. Les fonderies ferreuses (fonte grise, fonte ductile et acier) en produisent le plus. L'aluminium, le cuivre et le bronze produisent le reste [30].

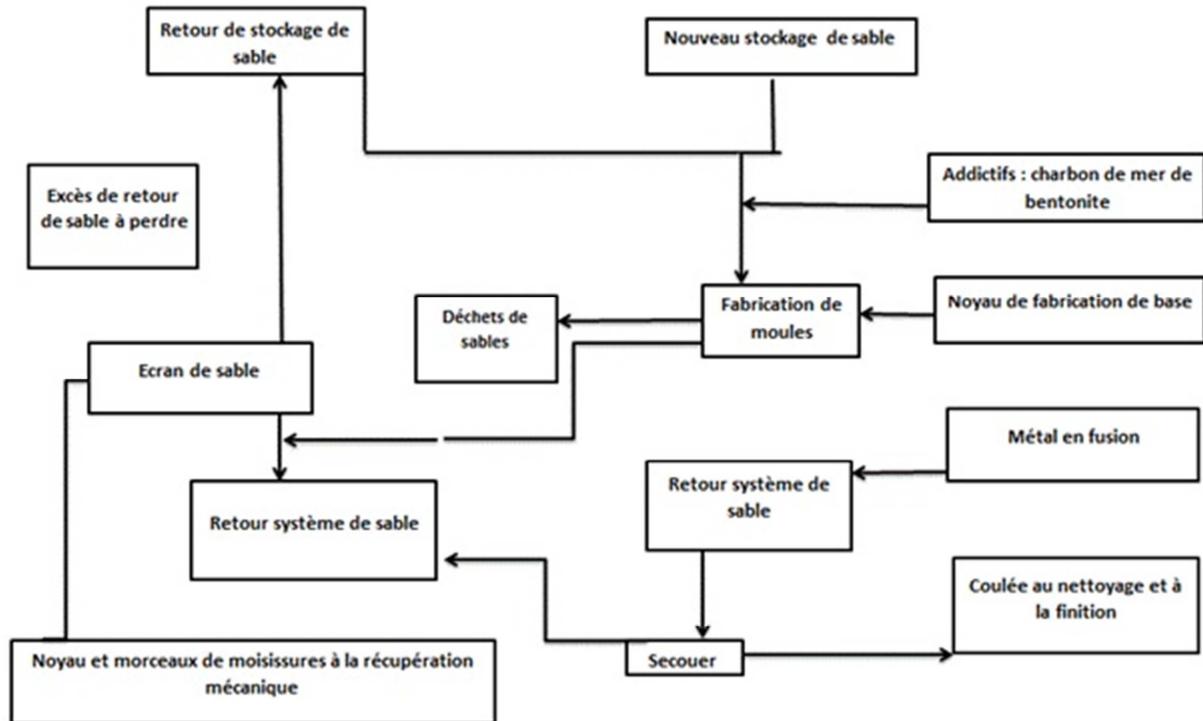


Figure II.1 : Comment le sable est réutilisé et devient un sable de fonderie [30].

2.2 Particularité 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, sulfonâtes,...). 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 [31].

2.3 Sable usé étudié

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

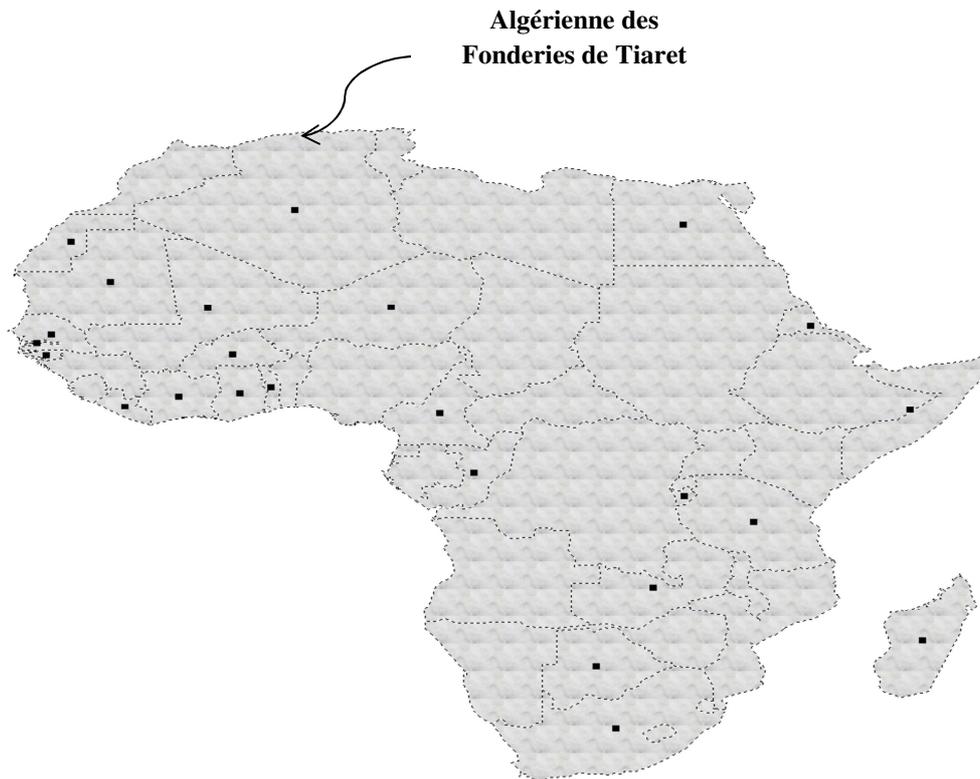


Figure II.2 : Localisation de l'Algérienne des Fonderies de Tiaret (ALFET) – Algérie [31].

2.3.1 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.

2.3.2 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.

2.3.3 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.

2.3.4 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 employée par ALFET est un mélange d'alcool furfurylique et d'alcool formaldéhyde. Cette résine thermodurcissable durcie en présence d'un catalyseur acide composé de l'acide xylènesulfonique, 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. [31]

2.4 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, ont trouvé 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 kerpélite.



Figure II.3 : Moule au sable.

2.5 Caractéristiques des différents sables utilisés en fonderie

	Chromite	Kerphalite	Olivine	Silice	Zircon
Prix	Elevé	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

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

2.5.1 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.

2.6 Moulage au sable

Le matériau est coulé dans un moule en sable qui sera détruit après l'élaboration de chaque pièce. Ce dernier est fabriqué en une ou plusieurs parties: chacune d'elles dispose d'une empreinte donnant la forme de la pièce tracée par un modèle (en bois, métallique, etc.) enfoncé dans le sable. Lorsque la pièce a des formes intérieures (trous, évidement, etc.), on insère dans la partie du moule un noyau en sable qui y sera maintenu (dans le moule) puis détruit après démoulage de la pièce.

2.6.1 Le prototypage rapide

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.

2.6.2 Avantages

- Faibles coûts d'outillage et faible investissement en capital
- Les coeurs 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 [32].

2.7 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) [32].



Figure II.4 : les pièces pour moulage au fer et acier.

2.8 Les étapes de moulage au sable

2.8.1 Réalisation du noyau

Le noyau, de forme simple pour cette pièce, est réalisé à l'aide d'une boîte à noyau et avec du sable aggloméré, mélange de silice et de silicate de soude (3% en masse). La boîte à noyau montée est remplie du mélange, tassé de façon homogène. Le mélange est ensuite piqué à

l'aide d'une aiguille afin de laisser circuler le durcisseur injecté (Co₂). Lorsque le noyau est durci, la boîte est démontée, le noyau délicatement sorti et ébavuré.



Figure II.5 : Le noyau sorti de sa boîte.

2.8.2 Réalisation du moule

2.8.2.1 Préparation du sable à vert

Le sable utilisé est composé de silice et d'argile, il est de couleur brune/oranger, et noircit au contact du métal chaud. Il est cependant réutilisable à l'infini une fois remis en condition : tamisé, aéré et humidifié. L'argile humidifiée est le liant des grains de silice. Avant utilisation du sable à vert, il faut mesurer le taux d'humidité et le ramener à 6%.

2.8.2.2 Elaboration d'un demi-moule

Les deux plaques modèles sont fixées successivement sur la machine à mouler. Une de deux plaques comporte le canal d'alimentation et les masselottes. Un châssis positionné sur la plaque à l'aide de deux goujons de centrage comporte à sa base deux barres qui reposent sur les chandelles de la machine.

Les plaques modèle doivent être nettoyées des précédentes utilisations et en parfait état, tout défaut sur la surface utile du moulage sera reproduit sur la surface de la future pièce. Il faut donc veiller à maintenir les plaques modèles en déposant du talc ou de l'agent démoulant pour éviter l'adhérence du sable sur la plaque modèle.

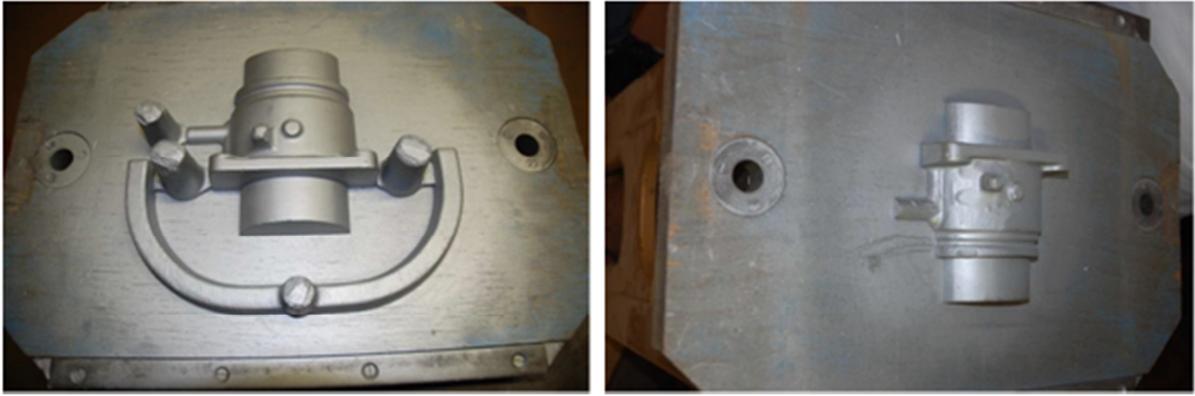


Figure II.6 : Plaques modèle avec canaux d'alimentation, masselottes et trou de coulée.

Le châssis est rempli de sable tamisé pour la partie en contact avec la forme de la pièce ; de la granulométrie du sable en contact avec le modèle dépendra la qualité de l'état de surface de la pièce. Le sable doit être réparti correctement particulièrement aux endroits sensibles, il est progressivement tassé à la main, puis à l'aide de fouloirs lorsque la hauteur est suffisante pour ne pas endommager le modèle. Le niveau du sable doit dépasser le bord supérieur du châssis, la machine terminant le travail.



Figure II.7 : Remplissage du châssis avec le sable à vert

Le sable est arasé à hauteur de châssis afin d'obtenir une surface plane, cette surface sert d'appui pour un des demi-moules lors de la phase de coulée. Puis par vibrations de la machine, le sable est décollé de la plaque modèle. Enfin le châssis est soulevé par les chandelles, la plaque modèle est libérée verticalement afin de ne pas abîmer l'empreinte déposée dans chaque demi-moule.

2.8.3 Réalisation des événements et du trou de coulée

Les événements facilitent l'évacuation des gaz lors de la coulée, ils sont réalisés à l'aide d'aiguille. Le trou de coulée a été ébauché par la plaque modèle, il s'agit maintenant de le rendre débouchant. Le châssis est ensuite retourné, puis l'ouverture du trou coulée est agrandie. La forme pyramidale du trou de coulée facilite la visée lors du remplissage et évite la création de

vortex, ce qui pourrait entraîner grains de sable et bulles d'air dans le métal et donc des défauts dans la pièce.

2.8.4 Assemblage du moule

Le noyau préalablement réalisé est positionné délicatement dans l'empreinte du châssis inférieur (celui qui ne comporte pas le trou de coulée). Puis les deux châssis sont superposés en veillant à leur bonne orientation l'un par rapport à l'autre. Les goujons assurent le bon positionnement et le maintien des deux châssis.

2.8.5 Coulée

Le moule est posé à proximité du four contenant l'alliage liquide. La température (environ 700°C) nécessite un équipement de protection : casque avec masque, tablier, guêtres et moufles. La coulée doit être faite rapidement en un seul geste, il est nécessaire de prélever la bonne quantité à l'aide de la louche préalablement poteyée.

2.8.6 Obtention de la pièce

La pièce se solidifie mais se refroidit que très peu, il est important de réaliser le démoulage avec précaution. La pièce est solidaire du châssis supérieur séparé en le soulevant du châssis inférieur, qui garde la trace de la pièce moulée, l'empreinte est noircie. Le noyau est inclus dans la pièce, il est préférable de ne pas mélanger les deux sables ; il faut donc extraire dans un premier temps la pièce et son noyau, puis éliminer ensuite le noyau [33].

3 Les solutions pour les sables de fonderie

3.1 Prévention / Réduction

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

3.2 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.

3.3 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).

3.4 Traitement / 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 liant organique peuvent suivre quatre voies de valorisation :

3.4.1.1 La régénération mécanique

Consiste à séparer les résines enrobant les grains (opérations de dégangage et de désenrobage) 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.

3.4.1.2 La régénération thermique

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

3.4.1.3 La régénération par voie bactériologique

Permet de réduire le taux de phénols des sables.

3.4.1.4 La valorisation en l'état

Des sables de fonderies contenant des liants organiques de synthèse sont prévus 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.

3.4.2 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 :

- ▶ 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,
- ▶ Sables brûlés issus du noyautage et sables 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 classé 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. [34]

4 Caractéristiques environnementales

4.1 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).

4.2 Effets sur les écosystèmes des sables de fonderie valorisés en techniques

4.2.1 Routières :

Dans le cas de la ressource en eau, le bon état biologique peut être caractérisé par une méthode standardisé 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

certaines 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 formeur un cours d'eau longeant la route expérimentale de 4km de long. Les sables de fonderie ont été traité au liant hydraulique (5.5%) et mis en œuvre sur une épaisseur de 46 cm.

4.3 Suivi environnemental

4.3.1 Source de substances

Lors de la valorisation d'un sable de fonderie usé 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 usé 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. [35]

4.4 Aspects sanitaires

4.4.1 Risques de silicose :

Compte tenu de leur composition minéralogique et chimique, les travailleurs utilisant des sables de fonderie usés 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 usée mélangé avec des poussières de filtres à air.

Les ouvriers avaient alerté les chercheurs sur la façon dont les nuages de poussière se formaient en phase chantier.

5 Conclusion

Ce chapitre a présenté une synthèse bibliographique sur les sables de fonderie et les déchets de sables de fonderies, dans le but est d'évaluer la performance des bétons contenant des déchets de sable de fonderie afin d'estimer le potentiel de ce type de déchet et l'introduire dans la cimenterie pour les bétons 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 bétons à l'état frais et durci. Donc, il est nécessaire de connaître les différentes caractéristiques des constituants rentrant dans la formulation des bétons car chacun pourrait influencer considérablement sur les résultats d'étude. Pour cela dans ce chapitre, nous avons procédé à la caractérisation de chaque constituant du béton. La méthodologie suivie pour réaliser ce travail, sera aussi présentée dans ce chapitre.

1 Objectif du travail

L'objectif de notre travail est d'étudier l'effet de la substitution du ciment par le sable de fonderie sur les propriétés physico-mécaniques des bétons autoplaçants. Le ciment est substitué par les déchets de sable de fonderie (utilisation comme ajout cimentaire) finement Broyé et tamisé à des teneurs (0, 10, 20, 30% par le poids de ciment).

Objectif de ce travail :

- Economique : en remplaçant le ciment par un Déchet.
- Technique : avoir un béton autoplaçant de qualité comparable au béton témoin.
- Environnementale : recyclage d'un déchet (sable de fenderie).

2 Méthodologie du travail pratique

Les matériaux utilisés en premier lieu sont :

- Le ciment (CPJ CEM II A 42,5)
- Sable

- Déchet de sable de fonderie
- Les Granulats (3-8 mm, 8-15 mm)
- Superplastifiant haut réducteur d'eau SIKA Viscocrete Tempo 12

En Second lieu, nous avons déterminé la composition de béton autoplaçant témoins.

Ensuite, nous avons procédé à étudier l'influence de l'incorporation du sable de fonderie dans le béton sous forme d'ajout cimentaire (par substitution partielle de ciment).

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

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

3 Caractéristique des matériaux utilisés

3.1 Ciment

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.

3.1.1 Domaine d'utilisation :

Il 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.

3.1.2 Caractéristiques physiques du ciment

Tableau III.1 : Caractéristiques physiques du ciment.

Caractéristiques	Résultats	Unités	Norme
Consistance normal	28.9	(%)	NF EN 196-3
Début de prise	165	(min)	NF EN 196-3
Fin de prise	245	(min)	NF EN 196-3
SSB	4582	(cm ² /g)	NF EN 196-6
Masse volumique absolue	3.00	(g/cm ³)	NF EN 196-5

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

3.1.3 Caractéristiques chimiques

Tableau III.2 : Composition chimique du ciment par fluorescence X.

CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO ₃	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	Cl-	P.F	CaO libre	Ins	P.F
59.76	16.88	4.34	2.83	2.38	0.01	0.54	1.69	0.025	11 .26	1.369	2.67	11.26

3.1.4 Caractéristiques minéralogiques

Tableau III.3 : composition minéralogique du ciment par diffraction rayon X.

Eléments	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	CaO	Gypse	Calcaire (L)
%	53	22	04	14	< 03	05	22

3.1.5 Caractéristiques mécaniques du ciment

Tableau III.4 : Caractéristiques mécaniques du ciment.

Essais	Âge (J)		
	2 jours	7 jours	28 jours
Résistance à la compression (MPa)	22.8	37.6	47.7
Résistance à la flexion (MPa)	4,6	6,1	7.0

4 Sable

Le sable utilisé, provient de la carrière de Tizi Bouamen, propriété de l'Entreprise Nationale de Marbre (ENAMarbre)/ Tizi-Ouzou.

4.1 Caractéristique du sable

4.1.1 Caractéristiques physiques

Les propriétés physiques de sable (0/3) sont présentées dans le tableau 5

Tableau III.5 : Caractéristiques physiques du sable concassé (0/3) selon la norme NF EN 933-1.

Caractéristiques	Résultats	Unité
Masse volumique réelle	3.1	(g /cm ³)
Masse volumique imbibée	2.52	(g /cm ³)
Masse spécifique	2.7	(g /cm ³)
EVS	52.01	(%)
La teneur en bleu	1.2	(%)
Absorption	6.34	(%)

4.1.2 Analyse granulométrique et classe granulaire

Tableau III.6 : Analyse granulométrique par tamisage du sable 0/3 selon NF EN 933-1.

Tamis ouverture (mm)	Masse des refus cumulés Ri (g)	Pourcentage refus cumulés (%)	Pourcentage tamisât cumulés (%)
3.15	0	0	100
1.25	140	28	72
1	170	34	66
0.8	205	41	59
0.63	235	47	53
0.5	255	51	49
0.2	350	70	30
0.16	370	74	26
0.125	385	77	23
0.08	430	86	14
Fond de tamis	495	99	1

Module de finesse du Sable = 2

On remarque que le sable 0/3 a un module de finesse ($MF = 2$) faible donc le sable est riche en éléments fins.

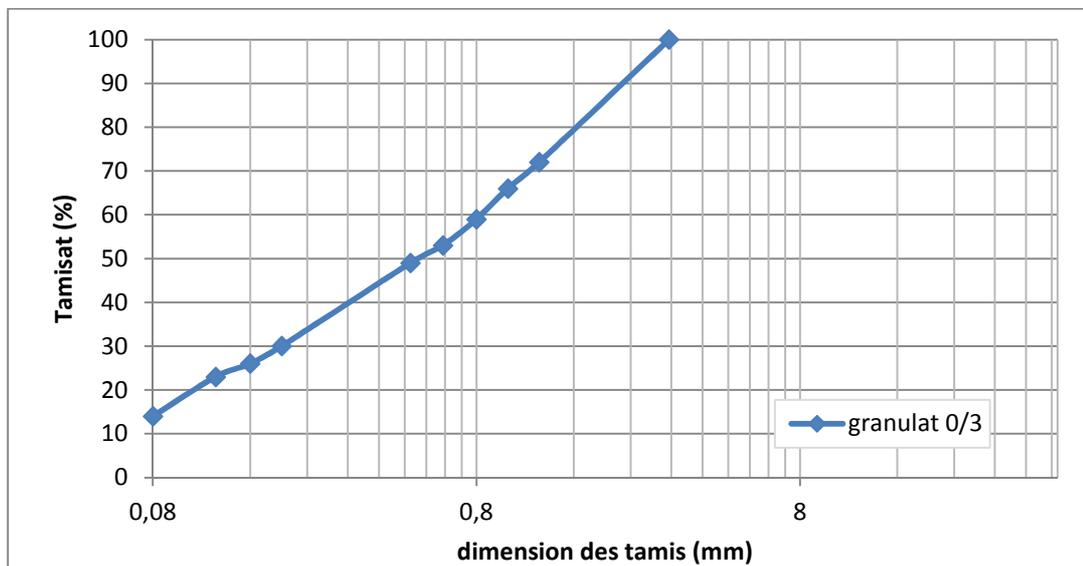


Figure III.1 : Analyse granulométrique de sable 0/3 selon la norme NF EN 933-1.

4.1.3 Caractéristique chimiques

Tableau III.7 : Analyse chimique de sable calcaire effectué par fluorescence X.

Eléments	PF	S.conc	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	TiO ₂
(%)	40.55	100	6.14	1.59	0.69	49.89	0.51	0.08	0.26	0.18	0.04	0.06

4.1.4 Analyse granulométrique par laser

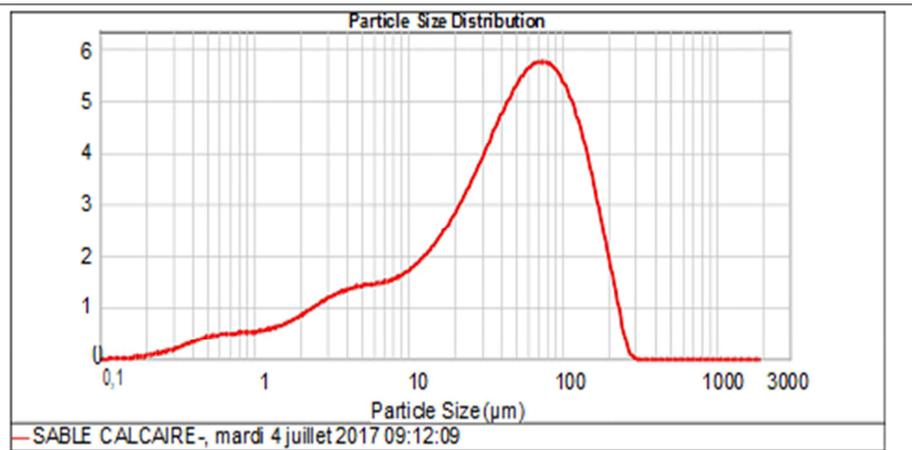


Figure III.2 : Distribution granulométrique en fraction volumique de sable 0/3.

5 Les granulats

Les granulats utilisés dans notre recherche sont des granulats concassés de nature calcaire, proviennent de l'Entreprise Nationale de marbre (ENAMARBRE) de Mekla (Tizi-Ouzou), dans le but de valoriser les granulats concassés dans la fabrication des bétons autoplaçant et de protéger les alluvions.

5.1 Analyse granulométrique et classe granulaire

Tableau III.8 : Analyse granulométrique par tamisage du gravier 8/16 selon NF EN 933-1.

Tamis ouverture (mm)	Masse des refus cumulés Ri (g)	Pourcentage refus cumulés (%)	Pourcentage tamisât cumulés (%)
20	0	0	100
16	85	2.83	97.17
12.5	440	14.67	85.33
10	855	28.5	71.5
8	1390	46.33	53.67
6.3	1410	47	53
5	2520	84	16
4	2805	93.5	6.5
3.15	2925	97.5	2.5
1.25	2965	98.83	1.67
1	2965	98.83	1.67
0.8	2965	98.83	1.67
0.63	2965	98.83	1.67
0.5	2965	98.83	1.67
0.2	2965	98.83	1.67
0.16	2965	98.83	1.67
0.125	2970	99	1
0.08	2970	99	1
Fond de tamis	3000	100	0

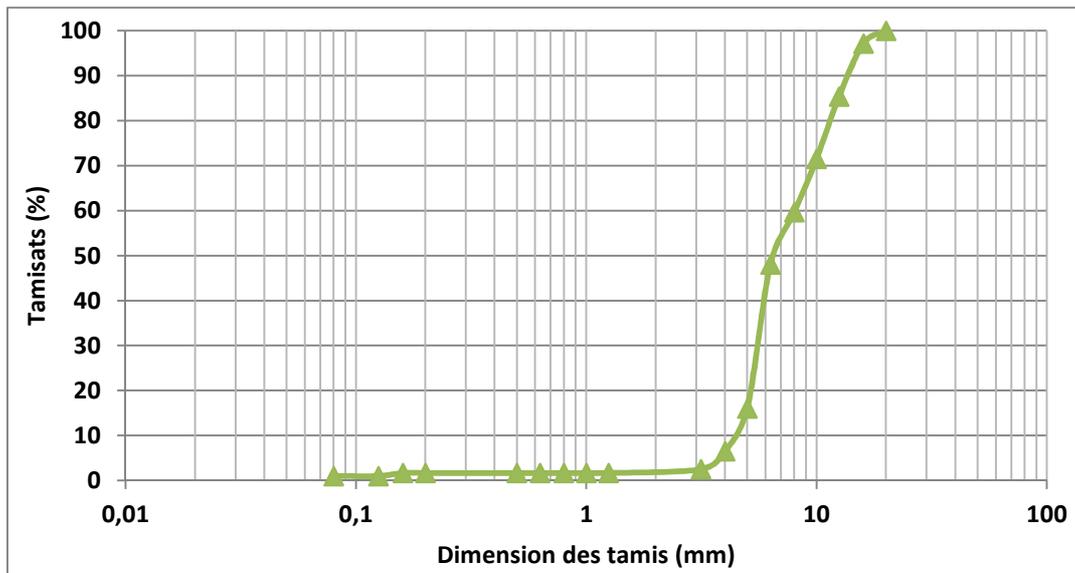


Figure III.3 : Analyse granulométrique par tamisage de gravier 8/16.

6 Superplastifiant

Le superplastifiant utilisé est un adjuvant de SIKA ® de type VISCOCRETE ® TEMPO 12. Superplastifiant Haut réducteur d'eau polyvalent pour béton 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.

6.1.1 Domain d'application

- SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 permet la fabrication de bétons plastique à autoplacants transportés sur de longues distances et pompés.
- Dans les bétons autoplacants, SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 améliore la stabilité, limite la ségrégation du béton et rend les formules moins susceptibles aux variations d'eau et des constituants.
- 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 de retrait).

6.2 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.

6.3 Conditionnement

- Fûts de 230 KG.
- CP de 1000L.
- Vrac.

6.3.1 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, faut vérifier qu'il n'a pas été déstabilisé.

6.3.2 Caractéristiques

- Données techniques densité $1,06 \pm 0,01$
- PH 4,5 à 6,5
- Teneur en $\text{Na}_2\text{O Eq} \leq 1\%$
- Extrait sec 30 %
- Teneur en ions $\text{Cl}^- \leq 0,1\%$

6.3.3 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.

6.3.4 Propriétés et effets

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

- Sur béton frais
 - Obtention d'un E/C très bas
 - Béton plastiques à fluides
 - Une très Bonne maniabilité
 - Un long maintenu de l'ouvrabilité
 - De facilité la mise en œuvre du béton
- Sur béton durci
 - Bonne résistance initiale et finales
 - De diminuer la porosité

- Bel aspect de parement au décoffrage
- De diminuer le retrait

6.3.5 Délai de conservation

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

6.3.6 Eau de gâchage

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

7 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. Ce déchet à une particularité spéciale de point de vue forme.



Figure III.4 : déchet de sable de fonderie broyé et Naturel.

7.1 Caractéristiques de sable de fonderie

7.1.1 Caractéristiques physiques

Tableau III.9 : Caractéristiques physiques du déchet de sable de fonderie

Caractéristiques	Résultats	Unités
Masse volumique apparente	1.33	(g/cm ³)
Masse volumique absolue	2.5	(g/cm ³)
Absorption	1.8	(%)

Tableau III.10 : Caractéristiques physique du déchet de sable de fonderie finement broyé.

Caractéristiques	Résultats	Unités
Masse volumique absolue	2,58	(g/cm ³)
Finesse	3761	cm ² /g

Tableau III.10 : Analyse granulométrique du déchet de sable de fonderie (la norme NF p 18-560)

Ouverture des tamis	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisât (%)
0.8	0	0	100
0.5	5	1	99
0.315	70	14	86
0.2	370	74	26
0.16	450	90	10
0.125	475	95	5
0.08	485	97	3
Fon de tamis	795	99	1

Module de Finesse = 2.08

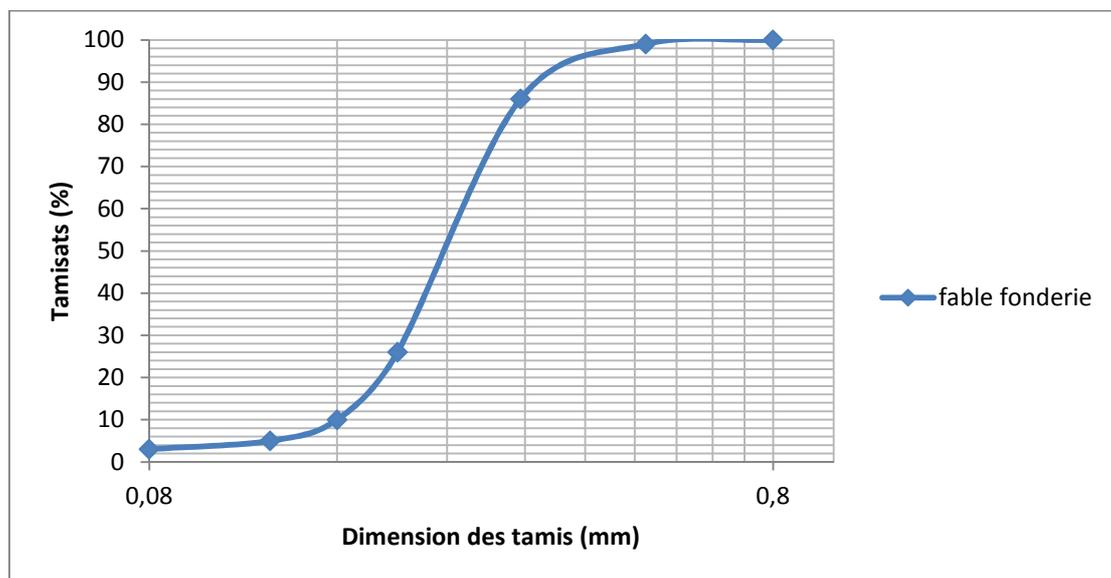


Figure III.5 : Analyse granulométrique du sable de fonderie.

7.1.2 Analyse granulométriques par laser

Afin de vérifier la finesse du sable de fonderie finement broyé, nous avons procédé à l'analyse granulométrique par laser du sable de fonderie. Les résultats sont donnés sous forme de courbe qui représente la fraction volumique en % en fonction de la taille des particules

Egalement, nous avons présenté aussi ces résultats sous forme de courbe la distribution granulométrique de sable de fonderie.

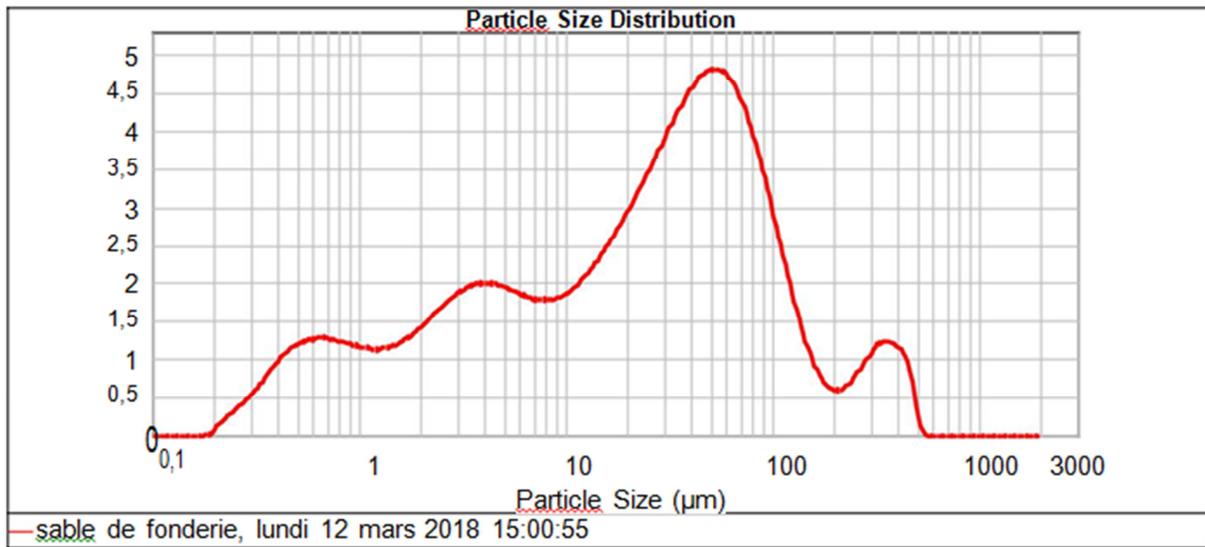


Figure III.6 : distribution granulométrique en fraction volumique (sable de fonderie).

Chapitre IV : Formulation et Méthodes D'essais

Ce présent chapitre consiste à présenter une étude de la formulation des bétons autoplaçants à base de sable de fonderie comme substitution partielle au ciment avec différent pourcentage (10%, 20%, 30%). Pour ce là, nous avons opté la méthode japonaise pour l'ensemble des bétons que nous avons formulés.

1 Formulation des Bétons

1.1 Composition du béton autoplaçant

La plupart des formules de BAP sont conçues actuellement de manière empirique. La méthode de Dreux-Gorisse n'est pas adaptée, car elle ne prend en compte ni les adjuvants ni les additions, alors que ce sont des composants essentiels d'un BAP. La formulation de nos bétons autoplaçants est donc basée sur la méthode japonaise.

Les proportions des constituants sont calculées selon les règles de la méthode japonaise :

- Le volume de gravillons est limité en prenant un rapport $G/S = 1$.
- Le volume de sable est limité à 40% volume de mortier.
- Le rapport volumique de l'eau/poudre est supposé entre 0.9 et 1. Dans notre cas, nous avons pris un rapport massique $E/(ciment+fine)$ égale à 0,35.
- Le dosage en superplastifiant est proche de son dosage à saturation.

La formulation se fait donc par tâtonnement sur la base de ces plages. La formule ne peut être optimisée et vérifiée que par des essais effectués la plupart du temps directement sur béton.

1.2 Donné de base

- $G/S = 1$
- On fixe le rapport $E/(C+F) = 0.35$
- Le dosage en superplastifiant est donné par l'essai de la rhéologie (point de saturation)

1.3 Calcul des proportions

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

$$V_T = V_{\text{mortier}} + V_{\text{sable}}$$

On sait que le V_{sable} est égal à 40% V_{mortier} , donc :

$$V_T = V_{\text{mortier}} + 0.4V_{\text{mortier}} = 1.4 V_{\text{mortier}} \rightarrow V_{\text{mortier}} = 1000/1.4 = 714.3 \text{ l}$$

$$V_{\text{mortier}} = 714.3 \text{ l}$$

$$\text{Donc : } V_{\text{sable}} = 40\% V_{\text{mortier}} = 0.4 \times 714.3 = 285.7 \text{ l}$$

$$V_{\text{sable}} = 285.7 \text{ l}$$

$$\text{Et comme } G/S = 1 \rightarrow V_{\text{gravier}} = V_{\text{sable}} = 285.7 \text{ l}$$

Selon l'analyse granulométrique de sable, la teneur en fine (< 0.08 mm) est de l'ordre de 14 %.

Le volume total de sable à prendre en considération dans nos calculs est $V_{(\text{sable}+\text{fine})} = 332.2 \text{ l}$.

$$\text{Donc : } V_{\text{fine}} = 14\% \ 332.2 = 46.51 \text{ l}$$

$$V_{\text{mortier}} = V_{\text{pate}} + V_{\text{sable}} \rightarrow V_{\text{pate}} = 714.3 - 332.2 = 382.1 \text{ l}$$

$$V_{\text{pate}} = 382.1 \text{ l}$$

$$V_{\text{pate}} = V_{\text{ciment}} + V_{\text{fines}} + V_{\text{eau}} + V_{\text{superplastifiant}}$$

$$\text{Avec } \rho_{\text{ciment}} = 3 \text{ kg/cm}^3, \rho_{\text{sable}} = 2.7 \text{ kg/cm}^3, \rho_{\text{SP}} = 1.01 \text{ kg/cm}^3$$

$$V_{\text{ciment}} = 166,7 \text{ l}$$

1.4 Détermination de la masse de chaque constituant

$$\rho_{\text{ciment}} = m_{\text{ciment}} / V_{\text{ciment}}$$

$$m_{\text{ciment}} = \rho_{\text{ciment}} \times V_{\text{ciment}} \rightarrow m_{\text{ciment}} = 166,7 \times 3 = 500 \text{ KG}$$

$$m_{\text{sable}} = \rho_{\text{sable}} \times V_{\text{sable}} + 14\% (m_{\text{sable}}) \rightarrow 285,71 \times 2,7 = 771,4 + 14\% (771,4) = 879,4 \text{ kg}$$

$$m_{\text{gravier}} = m_{\text{sable}} = 771,4 \text{ Kg}$$

$$E / (C+F) = 0,35$$

$$F = 14\% m_{\text{sable}} = 108 \text{ kg}$$

$$SP = 1,5\% (500) = 7,5 \text{ Kg}$$

$$E = 0.35 \times (C+F) = 213 \text{ Kg}$$

1.5 Dosages des constituants pour 1 m³ du béton

Après le calcul, le dosage de chaque constituant du BAP dans 1 m³ du béton, sont comme prévu :

Ciment = 500 kg

Sable = 879,4 kg

Gravier = 771,4 kg

Fine = 118 kg

SP = 7,5 kg

On sait que le superplastifiant contient 30 % d'extrait sec donc 70 % quantité liquide
 $7.5 \times 0.7 = 5.25$ kg (eau en plus)

Eau = $213 + 5,25 = 218,25$ kg

Tableau IV.1 : Formulations gâchées des bétons étudiés pour 1m³

	BAP0	BAP10	BAP20	BAP30
C(kg)	500	450	400	350
S(kg)	879,4	879,4	879,4	879,4
G3/8(kg)	308,56	308,56	308,56	308,56
G8/15(kg)	462,84	462,84	462,84	462,84
F(kg)	118	118	118	118
S F (kg)	0	50	100	150
S P (kg)	7,5	7,5	7,5	7,5
Eau (kg)	218	218	218	218
E/L	0,35	0,35	0,35	0,35

2 Méthodes d'essais

➤ La Procédure pour les mélanges des bétons autoplaçants

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

- Mélanger le sable avec le gravier dans la bétonnière pendant 1min.
- Ajouter le ciment puis mélanger une deuxième fois pendant 1min.
- Mettre le superplastifiant dans 2/3 d'eau et le verser dans la bétonnière, puis mélangé.
- Verser le 1/3 du reste d'eau petit à petit pendant qu'on mélange.

Pour les cas où on ajoute le sable de fonderie finement broyé dans la formulation on a mélangé ce dernier avec le ciment avant de l'ajouter au gravier + sable.

2.1 Conduite d'essais

2.1.1 Etat frais

- **Fluidité du béton** : la fluidité du béton a été réalisée par le test de cône d'Abrams (étalement). Ce test consiste à mesurer le diamètre moyen de la galette formé par le béton lors de l'étalement, c'est-à-dire après le soulèvement du cône et la stabilisation de la galette. Nous rappelons que le diamètre préconisé pour un béton autoplaçant est entre 600 et 750 mm.

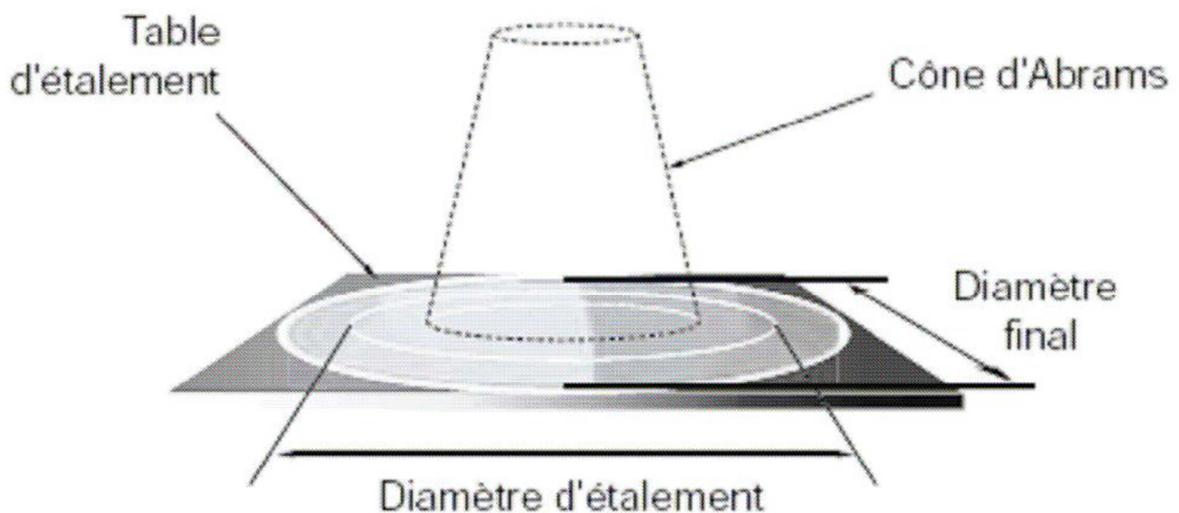


Figure IV.1 : schéma de l'essai d'étalement.

- **Capacité de remplissage** : la capacité de remplissage du béton a été déterminée par l'essai de la boîte en L. Cet essai permet de tester la mobilité du béton en milieu confiné et de vérifier que la mise en place du béton ne sera pas contrariée par des phénomènes de blocage au droit des armatures.

On remplit la partie verticale de la boîte avec le béton puis on laisse reposer une minute. On lève la trappe et on laisse le béton s'écouler à travers le ferrailage. Une fois l'écoulement terminé, on mesure les deux hauteurs H_1 et H_2 et on exprime le résultat en terme de taux de remplissage H_2/H_1 . Nous rappelons que le taux de remplissage pour un BAP doit être supérieur à 0,8.

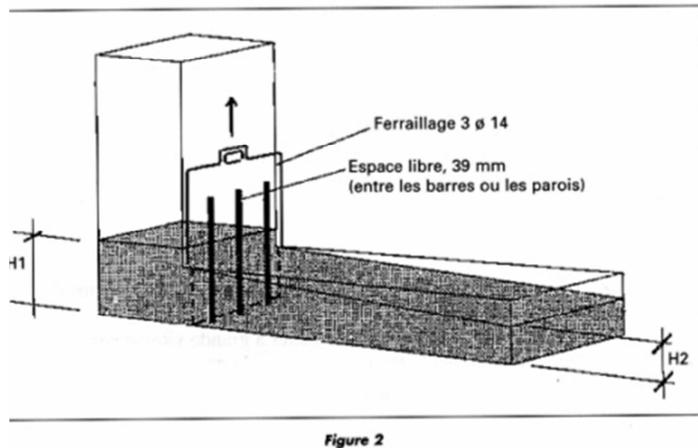


Figure 2



Figure IV.2 :la boîte en L.

- **Stabilité des Bétons :** La stabilité des bétons a été évaluée en mesurant le refus sur tamis du béton frais. On verse une masse de 5kg de béton sur un tamis d'ouverture de 5mm, après 15 Minutes d'attente, on relève la masse de l'échantillon ainsi que celle du fond avec la laitance, puis on calcule le pourcentage en poids de laitance par rapport au poids de l'échantillon :

$$P_i = \frac{P_{\text{laitance}}}{P_{\text{échantillon}}} \times 100$$

2.2 Etat durci

2.2.1 Résistance à la compression

Pour réaliser cette étude les éprouvettes prismatiques (10*10*10) (figure 3) ont été fabriquées. Un jour après le coulage, les éprouvettes ont été conservées dans l'eau jusqu'au jour de leurs écrasement. Après 28 jours on a d'abord mesuré les éprouvettes pour calculer la masse volumique, puis on a fait l'essai de l'ultrason pour déterminer le module d'élasticité dynamique avant l'écrasement. Le comportement mécanique de tous les bétons étudiés est déterminé en utilisant une machine universelle pour essais de compression (voir la Figure 4). Les résultats obtenus sont donnés sous forme d'histogramme groupé pour les bétons choisis (0, 10, 20 et 30% de substitution de Ciment).



Figure IV.3 : Confection des éprouvettes des bétons autoplaçants.



Figure IV.4 :La machine d'écrasement.

2.2.2 Essai de flexion par traction

Dans cette étude on a réalisé des éprouvettes (7*7*28cm) (Figure 5). Le comportement mécanique de ces bétons étudiés est déterminé en utilisant une machine universelle pour essais de traction (voir la figure 6). Les résultats obtenus sont donnés sous forme d'histogramme pour les bétons choisis (0, 10, 20 et 30% de substitution de Ciment).



Figure IV.5 : confection des éprouvettes du béton autoplaçant pour essai de traction.

- **Notation des mélanges**

BAP0 : béton autoplaçant témoin ;

BAP10 : béton autoplaçant à 10% de substitution du ciment par déchet sable de fonderie ;

BAP20 :béton autoplaçant à 20% de substitution du ciment par déchet sable de fonderie ;

BAP30 : béton autoplaçant à 30% de substitution du ciment par déchet sable de fonderie ;

Chapitre 5 : Résultats Et Interprétations

Pour connaître l'influence de l'incorporation du sable de fonderie dans les bétons autoplaçants, on a fait une étude sur l'utilisation de sable de fonderie en tant que ajout cimentaire (par substitution partielle de ciment).

1 Etat frais

1.1 Fluidité des bétons

Tous les mélanges des bétons étudiés ont été élaborés avec un étalement variant entre 650 à 800mm. Le dosage du superplastifiant est ajusté pour avoir cet étalement.

Les résultats obtenus sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau V.1 : Essai de l'étalement

Bétons étudiés	Etalement (mm)	Mise en œuvre
BAP0	750	Bonne
BAP10	720	Bonne
BAP20	680	Acceptable
BAP30	770	Bonne

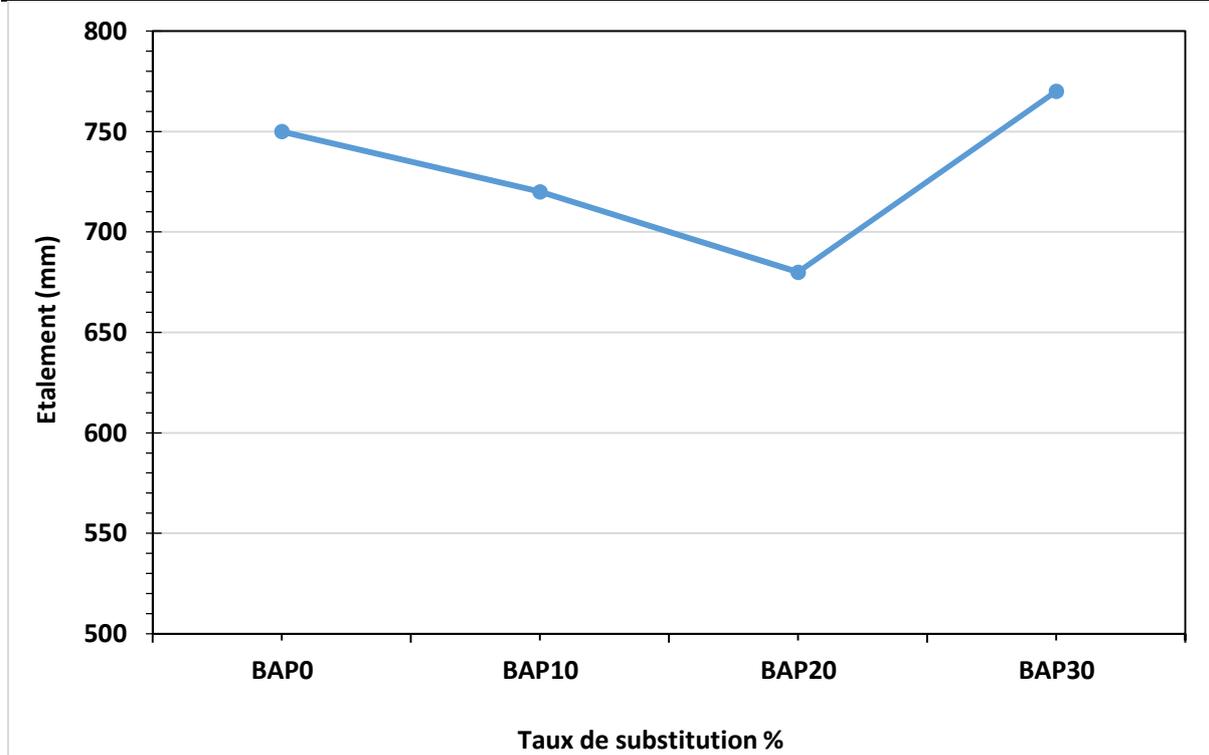


Figure V.1 : Fluidité des bétons étudiés en fonction de taux de substitution du ciment par le déchet de sable de fonderie.

La **figure 1** représente la fluidité des bétons étudiés en fonction de taux de substitution du ciment par le déchet de sable de fonderie finement broyé. D'après les résultats des essais de l'étalement, on remarque bien une légère diminution de la fluidité des bétons avec l'augmentation du taux de substitution du ciment par déchet sable de fonderie. En effet, jusqu'à 20% de substitution la diminution n'est pas assez importante car le béton reste toujours autoplaçant, suivis une amélioration de la fluidité du béton avec 30 % de substitution. L'effet de sable de fonderie finement broyé sur la fluidité peut être dû à la nature minéralogique du sable par rapport au ciment.



Figure V.2 : Essai de l'étalement.

1.2 Stabilité des Bétons (Stabilité au tamis)

Tableau V.2 : Essai de Stabilité au tamis.

Bétons étudiés	Stabilité au tamis (%)	Mise en œuvre
BAP0	15	Stabilité satisfaisante
BAP10	8.3	Stabilité satisfaisante
BAP20	4.4	Stabilité satisfaisante
BAP30	4.4	Stabilité satisfaisante

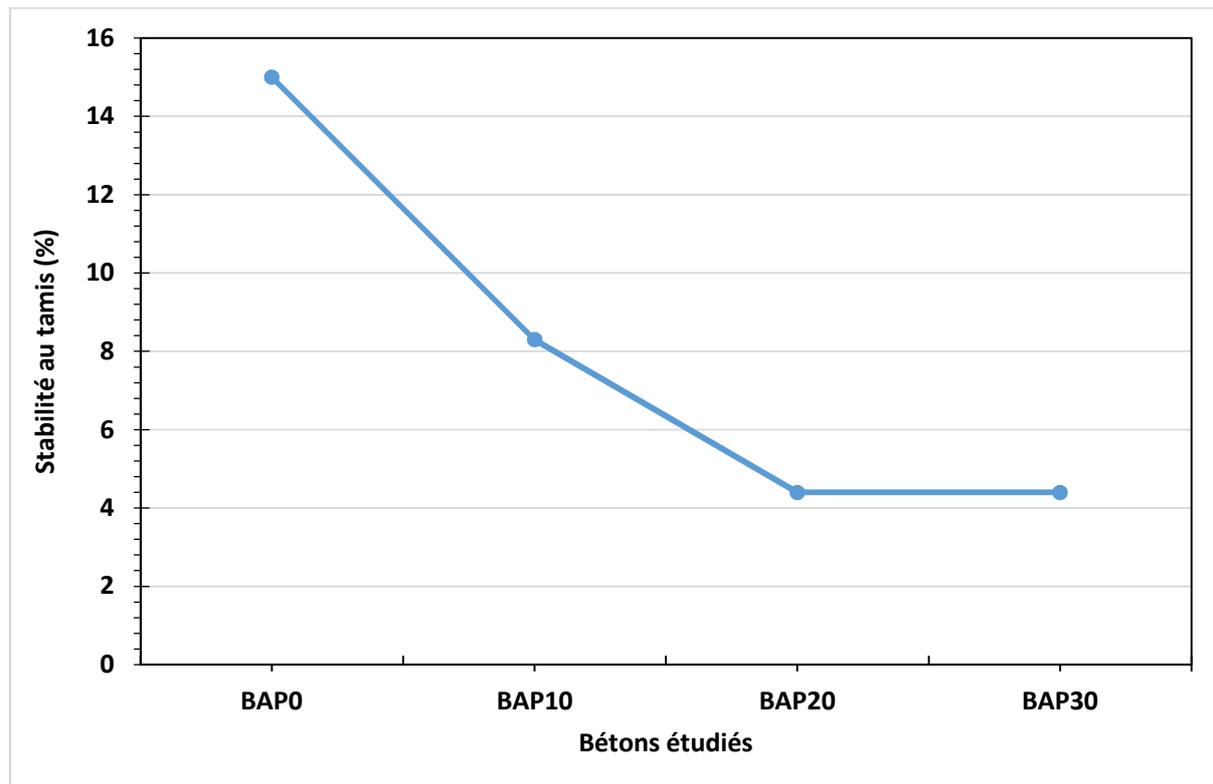


Figure V.3 : La stabilité des bétons étudiés.

La stabilité des bétons étudiés a été évaluée en mesurant le refus sur tamis du béton frais. La **figure 3** représente la variation de la stabilité au tamis des bétons autoplacants en fonction de taux de substitution du ciment par le déchet de sable de fonderie finement broyé. D'après cette figure, on constate une diminution de la stabilité des BAP jusqu'à 20% de sable de fonderie puis les bétons deviennent plus stable avec 30% de sable de fonderie. Cela peut être dû à la nature minéralogique et physique de l'ajout cimentaire qui est le sable. En effet, l'activité vis-à-vis de l'eau d'ajout minéral (comme le sable de fonderie) peut diminuée la stabilité d'un béton toute en augmentant le besoin d'eau.

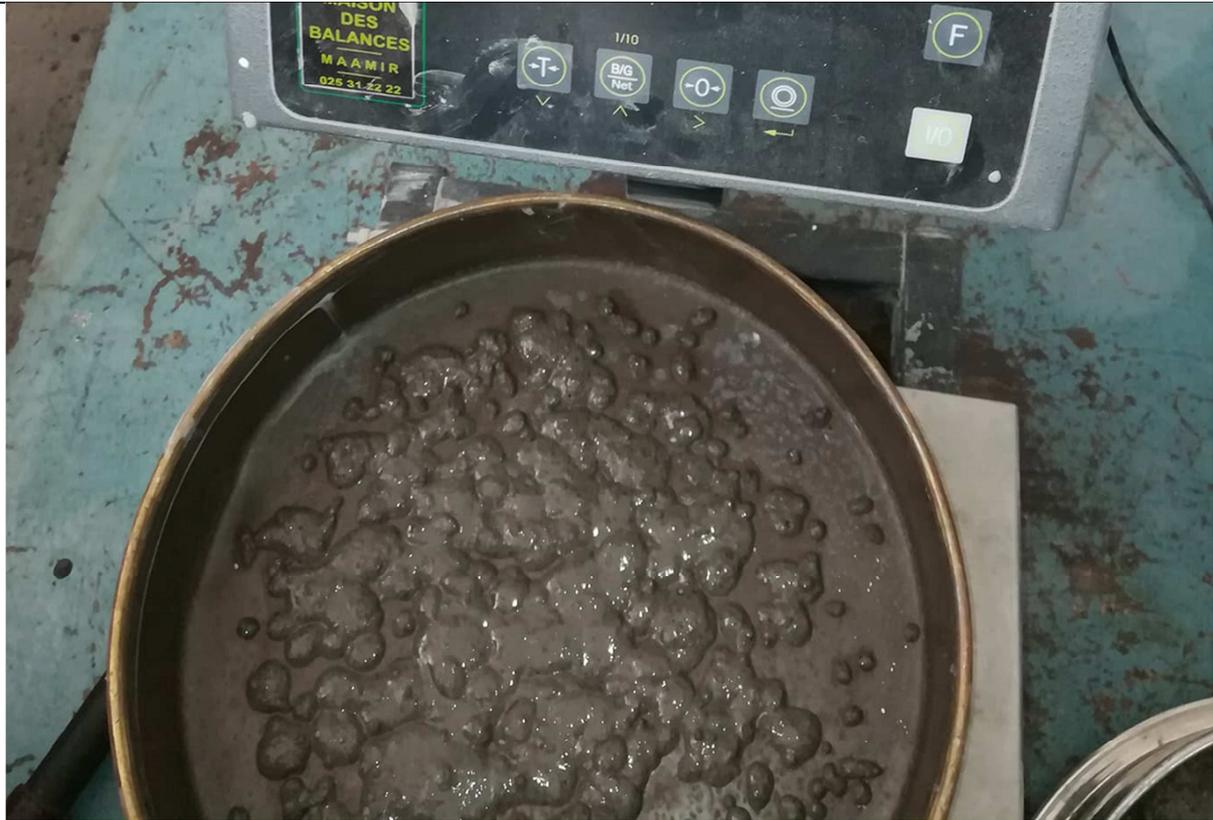


Figure V.4 : Essai de Stabilité au tamis.

1.3 Capacité de remplissage (Boite en L)

On mesure les deux hauteurs H_1 et H_2 et on exprime le résultat en terme de taux de remplissage H_2/H_1 .

Tableau V.3 : Essai de la boite en L

Bétons étudiés	Boite en L
BAP0	0.86
BAP10	0.83
BAP20	0.84
BAP30	0.83

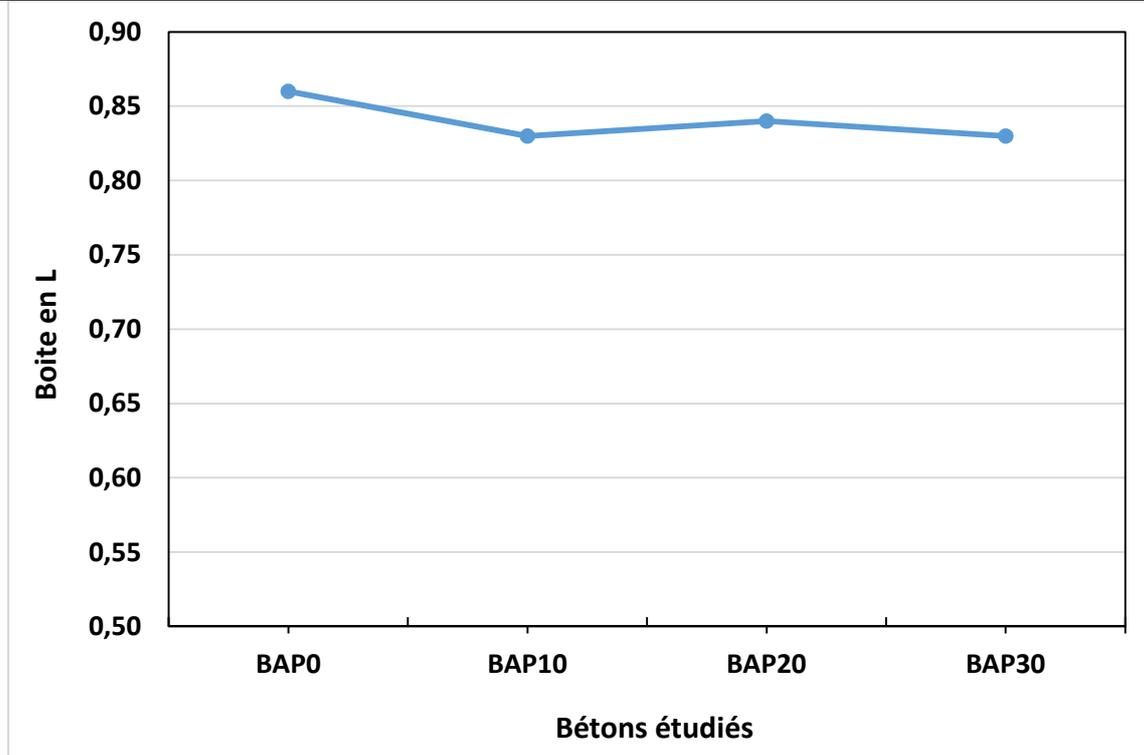


Figure V.5 : Capacité de remplissage des Bétons étudiés.

Pour qu'un béton autoplaçant se qualifie comme béton fluide, il faut qu'il y ait une bonne mise en œuvre à travers le ferrailage dans une structure pendant le coulage. La mise en œuvre des bétons étudiés à base du sable de fonderie a été déterminée par l'essai à la boîte en L. Selon les résultats représentés dans la **figure 5**, on observe que la mise en œuvre des bétons n'est pas influencée par la présence du sable de fonderie et qu'une légère perturbation de la capacité de remplissage a été aussi observée.



Figure V.6 : Essai de la boîte en L.

2 Etat durci

2.1 Masse volumique

Tableau V.4 : Masse Volumique.

Bétons étudiés	Masse Volumique (kg/m ³)
BAP0	2237
BAP10	2239
BAP 20	2240
BAP 30	2255

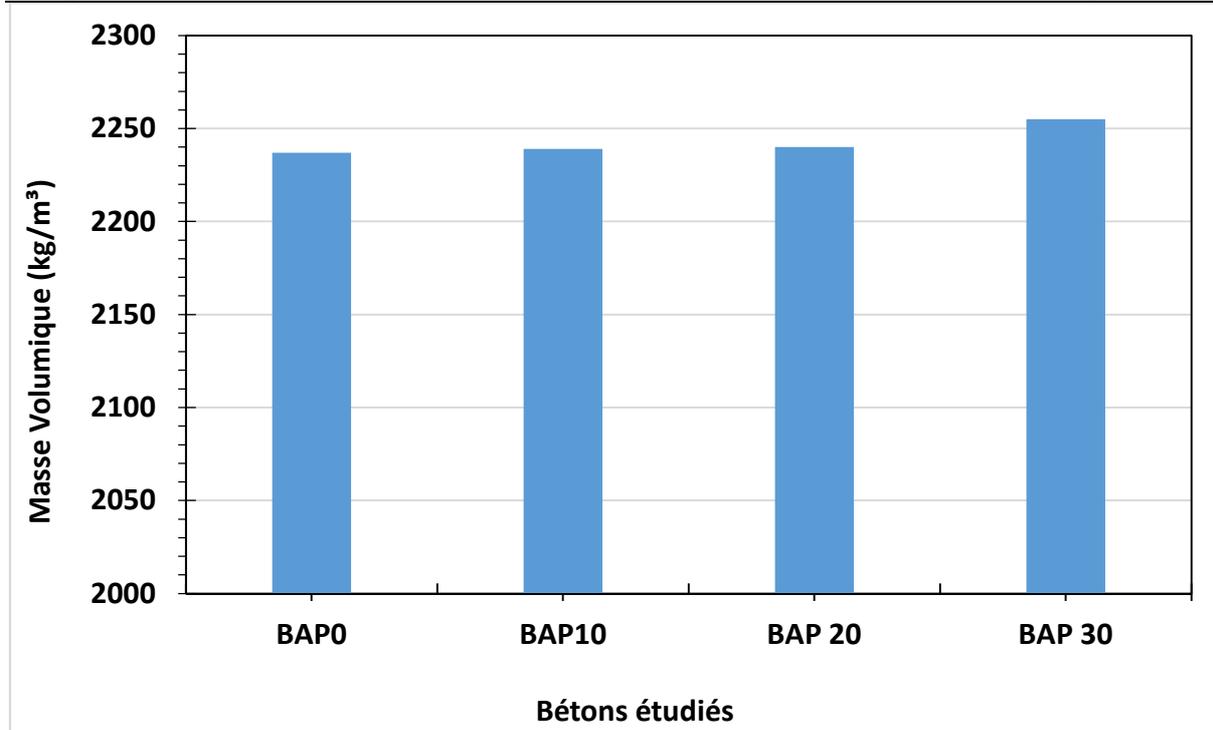


Figure V.7 : Evolution la masse volumique apparente des bétons étudiés mesurée après 28 jours de durcissement.

La figure ci-dessus représente l'évolution de la masse volumique des bétons après 28 jours de durcissement en fonction de substitution de ciment par le sable de fonderie. On observe que la masse volumique augmente légèrement avec l'augmentation de taux de substitution de ciment par le sable de fonderie par rapport au béton témoin. La valeur de cette dernière est la plus faible a 10% de substitution, s'élevant ainsi sa valeur la plus importante à 30% « mettre la valeur ».

2.2 Vitesse de propagation de son

Tableau V.5 : Essai d'ultrason.

Bétons étudiés	Ultrason (m/s)
BAP0	4470
BAP10	4550
BAP 20	4093
BAP 30	4233

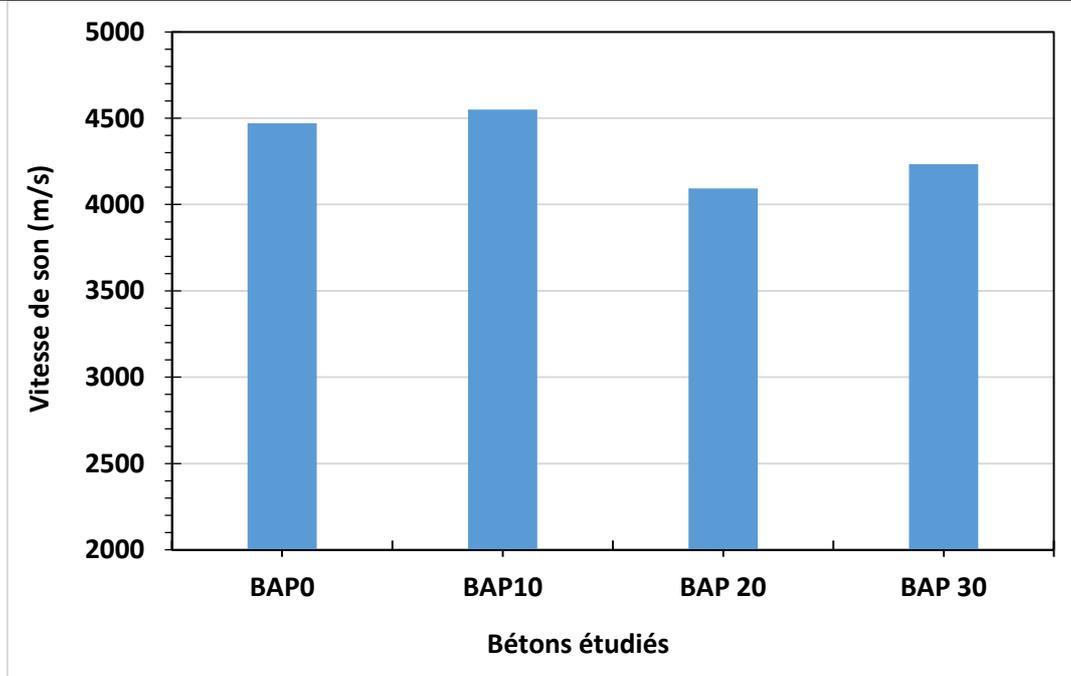


Figure V.8 : Evolution de la vitesse de propagation du son des bétons étudiés.

Afin de tester la compacité du matériau et aussi d'estimer la résistance des bétons étudiés, des essais ultrasoniques ont été réalisés sur les éprouvettes prismatiques afin de mesurer la vitesse de propagation du son à travers le béton après 28 jours de durcissement. La figure 8 représente l'évolution de la vitesse de propagation du son des bétons étudiés. Selon la figure, on remarque que tous les bétons ont une vitesse de propagation du son presque identiques et qui sont supérieures à 4000 m/s. Ceci montre bien que le sable de fonderie peut être utilisé comme matériau de remplissage et qui améliore légèrement la compacité du béton toute en économisant d'une partie de ciment. En effet, jusqu'à 30% de substitution de ciment par le sable de fonderie finement broyé peut donner un béton autoplaçant de compacité acceptable.

2.3 Résistance à la traction

Tableau V.6 : Essais de traction par flexion effectués à 28 jours.

Bétons étudiés	Résistance (MPa)
BAP0	5,49
BAP10	7,125
BAP20	6,75
BAP30	6,41

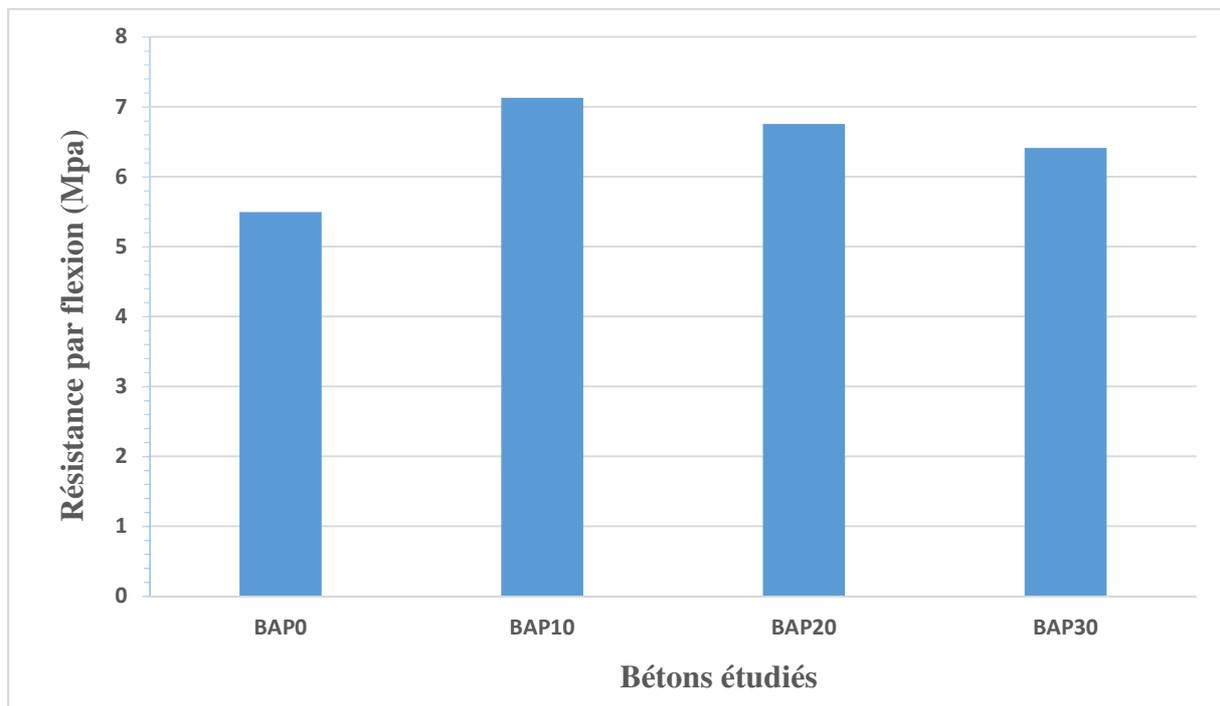


Figure V.9 : Evolution de la résistance à la traction par flexion effectués à 28 jours.

Les résultats de la résistance à la traction par flexion des bétons sont donnés dans la figure 9. D'après les résultats obtenus, on remarque que la résistance à la traction par flexion augmente légèrement avec la substitution de ciment par déchet de sable fonderie par rapport au béton témoin. Cependant, la résistance à la flexion à légèrement augmentée pour les bétons avec 10 et 20% de substitution puis une légère diminution de la résistance pour le BAP 30% de substitution. La résistance à la traction par flexion de BAP avec 30% de substitution de ciment par le sable est plus élevée que celle du béton témoin.

2.4 Résistance en compression

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

Bétons étudiés	3J	7J	28J
BAP0	21,01	34,04	56
BAP10	21,75	31,66	45,87
BAP20	21,63	25,51	36,75
BAP30	19,06	24,21	30,67

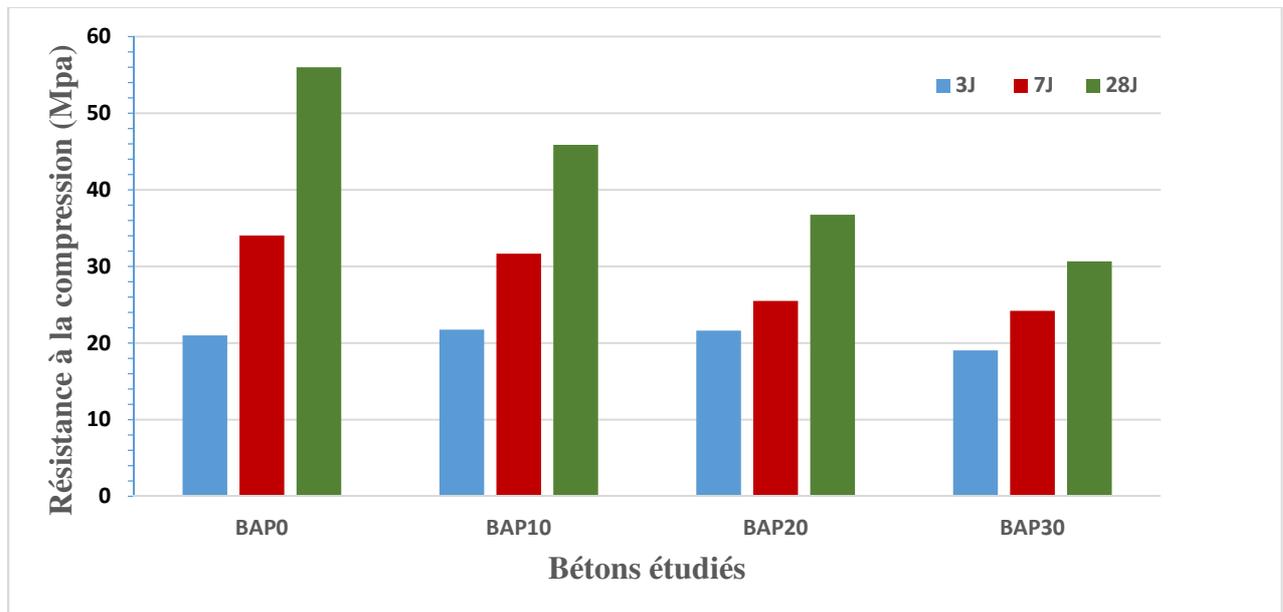


Figure V.10 : Evolution de la résistance à la compression des Bétons étudiés effectués à différents âge (3, 7, 28 jours).

Les résultats des essais mécaniques à savoir la résistance en compression des bétons étudiés sont présentés dans la figure. On constat que la résistance à la compression augmente en fonction du l'âge de durcissement du béton. Cela est expliqué par le processus de l'hydratation des minéraux de ciment. Aussi, on remarque que la valeur de la résistance des bétons est diminuée avec la substitution de ciment par le déchet de sable de fonderie. Cependant, au-delà jusqu'à 30% de déchet sable de fonderie la résistance à la compression enregistrée après 28j est environ de 30MPa.

3 Module d'élasticité Dynamique

Tableau V.8 : Module d'élasticité dynamique.

Bétons étudiés	Module d'élasticité (GPa)
BAP0	44,7
BAP10	37,5
BAP20	40,1
BAP30	40,4

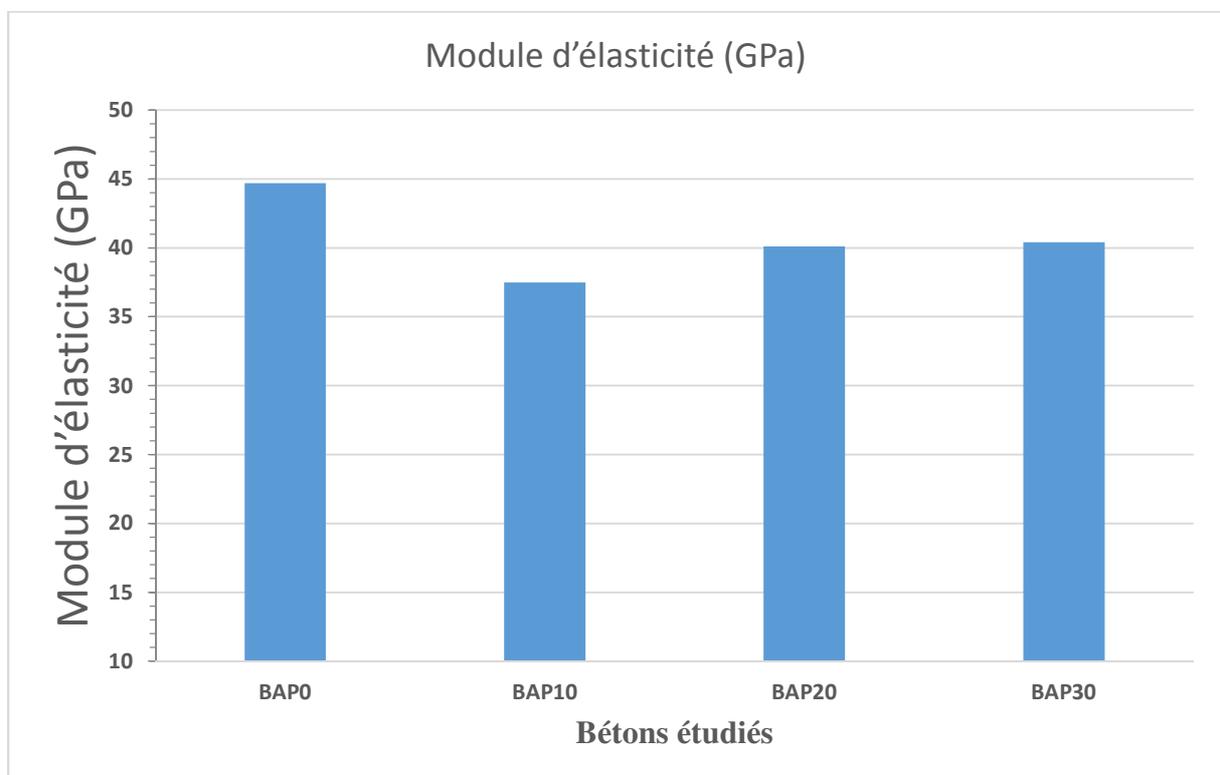


Figure V.11 : Module d'élasticité dynamique des bétons étudiés.

En utilisant les paramètres qui sont la masse volumique et la vitesse de son après avoir effectué des tests non-destructifs, nous avons déterminés le module d'élasticité dynamique des bétons étudiés. Après de la détermination de la vitesse de propagation de son à travers l'éprouvette, on calcule le module d'élasticité dynamique en utilisant la formule suivante

$$E_d = \rho \cdot V^2$$

Où :

E_d : module d'élasticité dynamique en GPa.

ρ : masse volumique de l'éprouvette en kg/m³

V : vitesse de son en m/s

La figure 11 représente l'évolution du module d'élasticité dynamique des bétons étudiés. Selon la figure, on remarque que tous les bétons ont le module d'élasticité dynamique presque identique et qui est supérieures à 36 GPa. Les résultats montrent bien que le sable de fonderie a aussi joué le rôle d'un matériau de remplissage et qui améliore légèrement la compacité du béton toute en économisant d'une partie de ciment. En effet, jusqu'à 30% de substitution de ciment par le sable de fonderie finement broyé peut donner un béton autoplaçant ayant un module d'élasticité dynamique dépassant les 40 GPa et qui est une valeur acceptable.

Conclusion générale

L'objectif de ce travail, était de voir la possibilité de réutiliser le sable de fonderie finement broyé de la société SNVI-Rouiba, en tant qu'ajout cimentaire (par remplacement d'une partie de ciment) à différents taux de substitution (0, 10, 20 et 30%) pour produire du béton autoplaçant. Une étude expérimentale a été menée pour évaluer les propriétés physico-mécanique des bétons autoplaçants à base de déchets de sable de fonderie finement broyé, on peut conclure que ;

A l'état frais du béton :

- Une légère diminution de la fluidité des bétons avec l'augmentation du taux de substitution du ciment par déchet sable de fonderie. En effet, jusqu'à 20% de substitution la diminution n'est pas assez importante car le béton reste toujours autoplaçant, suivis une amélioration de la fluidité du béton avec 30 % de substitution. L'effet de sable de fonderie finement broyé sur la fluidité peut être dû à la nature minéralogique du sable par rapport au ciment;
- La mise en œuvre des bétons étudiés à base du sable de fonderie a été déterminée par l'essai à la boîte en L. Selon les résultats, on a observé que la mise en œuvre des bétons n'est pas influencée par la présence du sable de fonderie et qu'une légère perturbation de la capacité de remplissage a été aussi observée.

Conclusion générale

- L'évolution de la masse volumique des bétons après 28 jours de durcissement en fonction de substitution de ciment par le sable de fonderie, a montrée qu'une augmentation légère de la masse avec l'augmentation de taux de substitution de ciment par le sable de fonderie.
- Selon les résultats des tests non-destructifs par des essais ultrasoniques, il a été observé que tous les bétons ont une vitesse de propagation du son presque identiques et qui sont supérieures à 4000 m/s. Ceci montre bien que le sable de fonderie peut être utilisé comme matériau de remplissage et qui améliore légèrement la compacité du béton toute en économisant d'une partie de ciment. En effet, jusqu'à 30% de substitution de ciment par le sable de fonderie finement broyé peut donner un béton autoplaçant de compacité acceptable
- Les résultats des essais mécaniques à savoir la résistance en compression des bétons étudiés ont que la valeur de la résistance des bétons a diminuée avec la substitution de ciment par le déchet de sable de fonderie. Cependant, au-delà jusqu'à 30% de déchet sable de fonderie la résistance à la compression enregistrée après 28j est environ de 30MPa.

Bibliographie

- [1] J.-m. torrenti, «Encuclopaedia».
- [2] AFGC, «Bétons Autoplaçant- Recommendations provisoires,» 2000, p. 63.
- [3] «rapport d'essais prémiminaires, Etude de ciment aux ajouts,» Entreprice Régionale des cimenterie de ain touta, 2005.
- [4] S. J. B. K. P. N. a. N. P. PC. Aïtcin, «L'interaction ciment : superplastifiant. cas des polysulfonates, Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées,» pp. vol 223 : 87-98.
- [5] S. Bethmont., M'ecanismes de ségrégation dans les BAP, In Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 2005.
- [6] T. S. a. Y. Matsuoka, «Development of combinaison type Self compacting concrete and Evaluation test methods,» *Journal of advanced conrete technology*, p. Vol. 1 no 1 :26–36, 2003.
- [7] AFGC, 2000.
- [8] J. G. a. W. Zhu, Strength of hardened self compacting concrete. Pro ceedings of First international RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 7), Stockholm, Suède, 1999.
- [9] M. S. a. P. Bartos, Hardened scc and its bond with reinforcement. Pro- ceeding of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 7), Stockholm, Sweden :275–289, 1999.
- [10] F. D. Larrard, De Larrard. Concrete mixture-proportioning - A scientific approach. Modern Concrete Technology Series, no 9 : E&FN SPON, 1999.
- [11] S. H. a. B. G. J. Pera, «Influence of finely ground limestone on cement hydration. Cement and Concrete Composites,» 1999, p. Vol. 21 N°2 :99–105.
- [12] O. Peterssoñ, Limestone powder as filler in self-compacting concrete - frost resis- tance and compressive strength. Proceeding of 2nd International RILEM Sympo- sium on Self- Compacting Concrete, Tokyo, Japan :277–284, 2001.
- [13] M. Y. a. B. B. B. Felekoglu, A comparative study on the use of mineral and chemical types of viscosity enhancers in self-compacting concrete. Proceeding of 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (Pro 33), Reykjavik, Iceland :446–456, 2003.[46] B. Felekoglu,, Reykjavik, Iceland :446–456, 2003.
- [14] Y. W. Y. S. a. M. R. C. Shi, Comparison of two design approaches for self-consolidating concrete. First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete, ACBM Center :349–354, 2002.

- [15] Y. K. a. K. Holschemacher, «Comparison of the hardened properties of self- compacting concrete and normal vibrated concrete. Proceeding of 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (Pro 33),» Reykjavik, Iceland, 2003, p. 596–607.
- [16] K. Holschemacher, «Hardened material properties of self-compacting concrete,» *Journal of Civil Engineering and Management*, vol. Vol. 10, n° 4, p. 261–266, 2004.
- [17] B. Persson, «A comparison between mechanical properties of self-compacting concrete and the corresponding properties of normal concrete - Cement and Concrete Research,» vol. 31, n° 12, p. 193–198, 2001.
- [18] E. R. a. A. L. P. Turcry, Influence du volume de pâte et des additions sur le retrait de fissuration des bétons autoplaçants. XXIIIèmes Rencontres Universitaires de Génie-Civil, Grenoble, France, 2005.
- [19] A. Pineaud, «Contribution à l'étude des caractéristiques mécaniques des bétons autoplaçants et application à l'industrie de la préfabrication. In Thèse de doctorat, Université de CergyPontoise,» 2007, p. page 271.
- [20] K. H. F. D. a. D. W. G. König, Self-compacting concrete time development of material properties and bond behaviour. Proceeding of 2nd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (Pro 33), Tokio, Japan :507–516, 2001.
- [21] E. P. a. S. A. G. Pons, «Creep and shrinkage of self-compacting concrete : a different behaviour compared with vibrated concrete Proceeding of 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (Pro 33),» Reykjavik, Iceland, 2003, p. 645–654.
- [22] AFGC, «Bétons Autoplaçants - Recommandations Provisoires,» 2000, p. page 63.
- [23] R. S. A. J. a. P. J, effect of a viscosity agent on mechanical properties of self-compacting concrete, Cement and concrete research, vol. 29, 1998, pp. 461-465.
- [24] D. S. G, Guidelines for testing fresh self compacting concrete, European Research Project, 2005.
- [25] T. L. De Schutter G, self compacting concrete, SSC proceeding of the 5th international Rilem symposium, RILEM, 2007.
- [26] O. G. O. M, «Self compacting concrete,» *Journal of advanced concrete technology*, vol. 1, n° 11, pp. 5-15, april 2003.
- [27] T. S. a. M. K. Ozawa K, «Role of powder materials on the filling capacity of fresh concrete,» chez *proceeding of the first international symposium of fly ash, silica fume, slag and natural pozzolans in concrete*, Istanbul, Turkey, 1992.
- [28] H. O., «Contribution au développement d'outil d'aide à la formation des BAP relatif à la rhéologie à l'état frais et à la résistance au jeune âge,» *thèse de doctorat de génie Civil*,

Université de Cergy-pontoise, 19 décembre 2007.

- [29] J. JOSE et N. HOSSINEY, «Characteristics of Concrete Containing Waste Foundry Sand and Slag Sand,» *international journal of earth science and engineering*, 2016.
- [30] A. KHanduri, properties of mortar incorporating waste foundry sand, 2010.
- [31] S. AISSAT et A. KACIMI, «Caractérisation physico-chimique des sables usés de la fonderie de Tiaret,» *Afrique SCIENCE*, 2011.
- [32] M. LTÉE.
- [33] B. ANGLADE, H. HORSIN MOLINARO et F. VENTURA, «Fonderie en sable : du modèle à la pièce,» 15 01 2018.
- [34] le formulaire du bordereau, « suivi des déchets dangereux mentionné,» 2005.
- [35] j.-c. Auriol et f. Clermond.