

**UNIVERSITÉ DE BLIDA 1**  
FACULTE DE TECHNOLOGIE  
Département de génie civil  
Laboratoire de Géo matériaux et Génie Civil



**MEMOIRE DE MASTER**

Spécialité génie civil

**Etat d'art et essais préliminaires sur l'influence de sable de  
fonderie sur les mortiers autoplaçants**

Réalisé Par

**BENALI Mohamed**

**YAHYI Imen**

Devant les jurys :

BENTLEMCEN Nadia	Prof	U.S.D.B.1	Présidente
KENAI Said	Prof	U.S.D.B.1	Examineur
YAHIAOUI Walid	MCB	U.S.D.B.1	Promoteur
MENADI Belkacem	Prof	U.S.D.B.1	Co-promoteur

## Résumé

Les fonderies de métaux utilisent de grandes quantités de sable dans le cadre du processus de coulée des métaux. Les fonderies recyclent et réutilisent avec succès le sable de nombreuses fois dans une fonderie. Lorsque le sable ne peut plus être réutilisé dans la fonderie, il est retiré de la fonderie et est appelé 'sable de fonderie'. Le sable de fonderie est principalement constitué de sable siliceux, recouvert d'une fine pellicule de carbone brûlé, de liant résiduel et de poussière. Le sable de fonderie peut être utilisé dans le béton pour améliorer sa résistance et d'autres facteurs de durabilité. Le sable de fonderie peut être utilisé en remplacement partiel des agrégats fins ou en remplacement total des agrégats fins et comme ajout supplémentaire pour obtenir différentes propriétés du béton.

D'après les différents travaux de recherche réalisés sur le sable de fonderie, Les résultats des essais indiquent une augmentation marginale des propriétés de résistance et de durabilité du béton autoplaçant par l'inclusion du sable de fonderie en remplacement partiel de sable naturel ou comme ajouts cimentaire.

**Mot clés :** fonderie, béton autoplaçant , mortier autoplaçant, durabilité, résistance.

## Abstract

Metal foundries use large amounts of sand as part of the metal casting process. Foundries successfully recycle and reuse the sand many times in a foundry. When the sand can no longer be reused in the foundry, it is removed from the foundry and is termed 'foundry sand'. Foundry sand consists primarily of silica sand, coated with a thin film of burnt carbon, residual binder (bentonite, sea coal, resins) and dust. Foundry sand can be used in concrete to improve its strength and other durability factors. Foundry Sand can be used as a partial replacement of cement or as a partial replacement of fine aggregates or total replacement of fine aggregate and as supplementary addition to achieve different properties of concrete.

According to the various research works carried out on the effect of foundry sand, test results indicate a marginal increase in the strength and durability properties of self-compacting concrete by the inclusion of foundry sand as a partial replacement for natural sand or as a cementitious additive.

### *Introduction*

Spent foundry sand (SFU) is a discarded material from the ferrous and non-ferrous metal casting industry. It is a mixture of high quality, size-specific silica sand, low impurities from the ferrous and non-ferrous by-products of the metal casting process itself and a variety of binders. Spent foundry sand is partly a recycled material itself, whether it is recycled and successfully reused through many production cycles, it often loses its characteristics, in particular cleanliness and uniformity. As it does not become suitable for the manufacturing process, it is disposed of as waste.

Foundry sand can be used in concrete to improve its strength and other durability factors. Foundry sand can be used as a partial replacement for fine aggregates or as a total replacement for fine aggregates and as an additional addition to obtain different properties of concrete.

The aim of this study is to see the possibility of reusing foundry sand as sand and as a cementitious addition (by partial substitution of cement) to produce self-compacting mortar and concrete. This work presents a bibliographical study on the formulation and physico-mechanical characterisation of self-compacting mortars and concretes based on this type of waste.

The dissertation is divided into two chapters for which the following objectives are sought.

## Chapter 1 : bibliographical review

Presents an overview of self-compacting concretes and mortars, their constituents, mechanical performance and rheological behaviour as well as their durability properties. A state of the art on the use of foundry sands as sand and as a cementitious additive in the composition of mortars will be presented. Special attention will be given to the influence of foundry sand on the rheological, mechanical and durability properties of self-compacting mortar or concrete.

A complete overview of the work carried out by various researchers in the field of the use of foundry sand in mortar and self-compacting concrete was given by as sand and cement additive.

On the basis of the test results, the researchers concluded that:

The addition of foundry sand resulted in a decrease in the workability of the concrete. The compressive strength of the concrete decreased slightly due to the replacement of fine aggregates with foundry sand . The modulus of elasticity of the 100% foundry sand mixture was the highest of all concrete mixtures evaluated. With regard to the studied properties, they reported that "There is a systematic loss of workability of the concretes as the content of foundry sand increases. All mixtures (with and without foundry sand) show an increase in strength with the hardening time. The compressive strength of concrete also decreases with increasing amounts of WFS. This decrease is systematic. The control mix has the lowest water absorption in general, water absorption increases as the WFS in the concrete increases.

## chapter 2: materials and testing

The materials used in this study have a very important role in determining the properties of mortars in their fresh and hardened state. Therefore, it is necessary to know the different characteristics of the constituents used in the mortar formulation, as each of them could have a considerable influence on the results of the study.

- Cement: in this study we used a compound cement type CEM II/A 42.5 manufactured by Lafarge cement plant at MEFTEH in Algeria. Its minimum compressive strength at 28 days is 42.5MPa.

- Sand : We used three types of sand in our study:

The first one comes from the Baghlia region, it is a coarse sand, rolled with a rounded shape and a smooth surface.

The second is characterised by its very high fineness, it comes from the Oued Souf region.

The third sand is a used foundry sand, it comes from the POVAL company of Berrouaghuaia.

In our work, we have used this sand as sand and as an addition.

The sand was subjected to several tests at the Civil Engineering Laboratory of the University of Blida, following the French AFNOR standards.

- superplasticizers : Additives make it possible to obtain a great fluidity and a perfect homogeneity necessary to obtain a self compacting mortar.

#### Formulation of the self-compacting mortar

A large number of formulation approaches exist for self-compacting concretes; we have chosen the so-called "Japanese" method proposed by Okamura.

tests were carried out on the self-compacting mortar in its fresh and hardened state

#### *Conclusion*

The objective of this study was the use of foundry sand waste as a cementitious addition and fine aggregate (sand) in the formulation of self-compacting mortars. A literature review was conducted to evaluate the fresh and hardened properties of self-compacting mortars. From the bibliographical study carried out, it can be concluded that :

- 1. The compressive strength of the mortar has decreased with increasing sand replacement with different levels of foundry sand replacement. However, at each level of replacement, an increase in resistance was observed with increasing age.
- 2- The porosity of the mortar decreased with the increase in sand replacement with different levels of foundry sand replacement.
- 3- Mortar with foundry sand waste greater than 10% showed reductions in water absorption and void rates. The reduction in these ratios may be due to the void filling effect of clay type materials in spent foundry sand.

**Keywords** : foundry , self-compacting concrete, self-compacting mortar,durability,resistance.

## المخلص

تستخدم مسابك المعادن كميات كبيرة من الرمل كجزء من عملية صب المعادن. تقوم المسابك بإعادة تدوير وإعادة استخدام الرمال بنجاح عدة مرات في مسبك. عندما يتعذر إعادة استخدام الرمل في المسبك ، يتم إزالته من المسبك ويسمى "الرمل المسبك". يتكون رمل المسبك بشكل أساسي من رمل السيليكا المغطى بطبقة رقيقة من الكربون المحترق والمواد الرابطة المتبقية والغبار. يمكن استخدام رمل المسبك في الخرسانة لتحسين قوتها وعوامل المتانة الأخرى. يمكن استخدام رمل المسبك كبديل جزئي للأسمت أو كبديل جزئي للركام الناعم أو كبديل كلي للركام الناعم وكإضافة إضافية لتحقيق خصائص مختلفة للخرسانة.

وفقاً للأعمال البحثية المختلفة التي تم إجراؤها حول رمل المسبك، تشير نتائج الاختبار إلى زيادة هامشية في خصائص القوة والمتانة للخرسانة تدعيم ذاتي بإدراج رمل المسبك كبديل جزئي للرمل الطبيعي أو كإضافات أسمنتية.

**كلمات المفاتيح :** المسبك ، الخرسانة المرصوة ذاتيا ، الملاط المرصوص ذاتيا ، المتانة ، المقاومة

## REMERCIEMENTS

Tous d'abord, nous tenons à remercier Dieu clément et Miséricordieux de nous avoir données la force et le courage de Mener à bien ce travail.

Nos plus grands remerciements vont à notre deux responsables de la thèse, Monsieur Belkacem MENADI, Professeur à l'université de Blida et à Monsieur Walid YAHIAOUI Docteur à l'université de Blida, pour leur précieuse aide qui a nous permis de réaliser ce travail.

Merci aux membres de jury pour avoir sacrifié de leur temps et accepter d'examiner ce mémoire et d'honorer par leur présence le jury de soutenance.

Nous tenons à remercie le directeur de laboratoire Monsieur Said KENAI Professeur à l'université de Blida, et nous remercions toute l'équipe du laboratoire de Génie civil et Géo-matériaux à l'Université du Blida.

Nos remerciements s'adressent aussi aux enseignants, du département de génie civil avec qui nous avons eu le plaisir de travailler.

Nous adressons aussi nos remerciements à toute l'équipe de l'entreprise de fonderie POVAL qui ont mis à notre disposition des produits nécessaire pour l'élaboration de notre travail de recherche.

Nous remercions, particulièrement nos parents et tous les membres de ma famille qui m'ont aidé et soutenu tout au long de ce travail.

Enfin, nous remercions tous nos amis du laboratoire pour leur contribution à rendre la vie au laboratoire plus agréable.

# SOMMAIRE

RESUME.....	1
REMERCIEMENT.....	6
LISTE DES FIGURES.....	10
LISTE DES TABLEAUX.....	12
LISTE DES ABREVIATION.....	13
INTRODUCTION GENERALE.....	15
<b>Chapitre I : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE</b>	
I.1.Introduction.....	18
I.2.le béton autoplaçant (BAP).....	18
I.3.Mortier autoplaçant (MAP).....	18
I.3.1.Introduction.....	18
I.3.2.Définition du mortier autoplaçant (MAP ).....	18
I.3.3.Constituants des MAP.....	19
I.3.3.a. Le ciment .....	19
I.3.3.b. Le sable.....	20
I.3.3.c. L'eau.....	21
I.3.3.d. Les adjuvants .....	22
I.3.3.e. Les additions minérales.....	23
I.3.4.Formulation des MAP .....	25
I.3.5.les essais de caractérisations des MAP à l'état frais.....	26
I.3.5 a. Essai d'Etallement.....	26
I.3.5.b. Essai d'entonnoir (V-Funnel) et d'étalement modifié (J-Ring).....	27
I.3.5. c. Essai de la boîte en L.....	28
I.3.5.d. Essai de stabilité au tamis.....	28
I.4.Notion de base sur le sable de fonderie.....	29
I.4.1.Introduction.....	29
I.4.2.Définition de sable de fonderie.....	29
I.4.3.Types de sable de fonderie.....	29
I.4.4. Sable de fonderie en Algérie.....	30
I.4.5. Présentation de l'entreprise POVAL de Berrouaghuia.....	31
I.4.5.a .Historique et mission de l'entreprise.....	31



I.4.6. propriétés de sable de fonderie .....	31
I.4.6.a. Caractéristiques physiques du sable de fonderie .....	31
I.4.6.b. Propriétés physiques.....	32
I.4.6.c. Composition chimique.....	34
I.4.6.d. Propriétés mécaniques .....	35
I.4.7. Application du sable de fonderie.....	35
I.4.8.Moulage au sable .....	35
I.4.8.a. Les pièces pour le moulage au sable.....	36
I.4.8.b. Les étapes du moulage au sable pour choisir les meilleurs matériaux.....	37
I.9.Influence de sable de fonderie sur les propriétés des mortiers autoplaçants.....	39
I.9.1.Etat frais.....	39
I.9.2.Etat durci.....	40
I.10.Rhéologie des MAP.....	49
I.10.1.Introduction.....	49
I.10.2.Paramètre rhéologique.....	49
I.10.2.a. Viscosité.....	49
I.10.2.b. Contrainte de cisaillement.....	49
I.10.2.c. Vitesse de cisaillement.....	50
I.10.2.d. Seuil de cisaillement.....	50
I.10.3.Les essais rhéologiques.....	51
I.10.4.Les paramètres influents sur la rhéologie des bétons frais .....	52
I.10.4 a. La composition.....	52
I.10.4.b. Le type de ciment.....	53
I.10.4.c. Rapport eau-ciment .....	53
I.10.4.d .Les Adjuvants .....	54
I.10.4.e. Le malaxage.....	54
I.10.4.f. Le temps.....	54
I.11.Conclusion.....	56

## **Chapitre II : MATERIEUX ET ESSAIS**

II.1.Introduction.....	58
II.2.Caractéristique des matériaux utilisés.....	58
II.2.1.ciment.....	58
II.2.2.sable.....	59

II.2.3.Déchets de sable se fonderie.....	62
II.2.4. superplastifiants.....	63
II.2.5.eau de gâchage.....	64
II.3.Formulation du mortier autoplaçant.....	64
II.4.Essais effectués sur les MAP à l'état frais.....	65
II.4.1.Essai d'étalement au Mini-Cône.....	65
II.4.2. Essai à l'entonnoir en V (V-Funnel test).....	65
II.4.3.Essai de rhéomètre.....	65
II.4.4.Essai au cône de Marsh.....	66
II.5.Essais effectués sur les MAP à l'état durci.....	66
II.5.1.Confection et conservation des éprouvettes.....	66
II.5.2.La résistance traction par flexion.....	67
II.5.3.La résistance à la compression.....	68
II.5.4.Absorption capillaire.....	68
II.5.5.Porosité accessible à l'eau.....	69
CONCLUTION GENERALE.....	70
REFERENCES.....	71

## LISTE DES FIGURES

Figure I.1:	Résumé du processus de fabrication du ciment.....	20
Figure I.2:	Le mécanisme d'action du superplastifiant à base de polycarboxilate..	23
Figure I.3:	Essai d'étalement .....	27
Figure I.4:	Essai d'entonnoir.....	28
Figure I.5:	Essai de la boîte en L .....	28
Figure I.6:	Sable de fonderie non traité.....	31
Figure I.7:	Sables verts d'une industrie.....	32
Figure I.8:	les pièces pour moulage au fer et acier.....	37
Figure I.9:	les moules au sable.....	37
Figure I.10:	Effet des déchets de sable de fonderie sur la résistance à la compression.....	40
Figure I.11:	Résistance à la compression en fonction de la teneur en sable de fonderie utilisé et de l'âge de durcissement,.....	42
Figure I.12:	Résistance à la traction par fendage versus sable de fonderie utilisé.....	43
Figure I.13:	Résistance à la rupture en traction en fonction de la teneur en sable de fonderie utilisé et de l'âge de durcissement.....	44
Figure I.14:	Résistance à la traction indirecte des mélanges de ciment bitumineux WFS selon AASTHO .....	45
Figure I.15:	Résistance à la flexion en fonction de la teneur en sable de fonderie et de l'âge de durcissement.....	46
Figure I.16:	Module d'élasticité en fonction du sable de fonderie utilisé.....	47
Figure I.17:	Influence du gel-dégel sur la résistance à la compression et l'élasticité dynamique module.....	48
Figure I.18:	Schéma glissement des couches .....	49
Figure I.19:	Schéma de vitesse de cisaillement.....	50
Figure I.20:	Représentation schématique du principe de fonctionnement des rhéomètres de type Poiseuille .....	52
Figure I.21:	Effet de C3A et de SO3 sur le seuil de cisaillement .....	53
Figure I.22:	Effet du rapport E/C sur les paramètres rhéologiques des bétons .....	54
Figure I.23:	Évolution du comportement rhéologique en fonction du temps Pâte E/C=0,4 S Quarts (pâte inerte), C : Ciment (pâte active) .....	55
Figure II.1:	Mesure de la masse volumique apparente du sable.....	61
Figure II.2:	Analyse granulométrique des sables.....	62

Figure II.3: Déchet de sable fonderie utilisé dans cette étude.....	62
Figure II.4: Séquence de malaxage du mortier.....	65
Figure II.5: Confection des éprouvettes (4x4x16) cm <sup>3</sup> .....	66
Figure II.6: Bac d'eau pour la conservation des éprouvettes.....	67
Figure II.7 : Essai de Traction par flexion sur MAP.....	67
Figure II.8 : Essai de compression pour les MAP.....	68

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1:	Propriétés physiques typiques du sable de fonderie vert usé.....	33
Tableau I.2:	Propriétés mécaniques typiques du sable de fonderie usagé.....	35
Tableau I.3:	Propriétés physiques du sable de fonderie usagé (UFS) et du sable ordinaire.	41
Tableau II.1:	les caractéristiques physiques du ciment.....	58
Tableau II.2:	les caractéristiques chimiques de ciment.....	58
Tableau II.3:	les caractéristiques mécaniques du ciment.....	59
Tableau II.4:	les Caractéristiques de sable grossier.....	59
Tableau II.5:	les caractéristiques de sable fin.....	60
Tableau II.6:	les Caractéristiques de sable corrigé.....	60
Tableau II.7:	les Caractéristiques physiques du déchet des sables de fonderie.....	63
Tableau II.8:	Analyse chimique de sable de fonderie par fluorescence X.....	63
Tableau II.9:	les caractéristiques de superplastifiant.....	64

## LISTE DES SYMBOLES ET DES ABREVIATIONS

AFGC	Association Française de Génie Civil
$Al_2O_3$	Alumine
BAP	Béton autoplaçant
C	Ciment
$C_3A$	Aluminate tricalcique
$CaCO_3$	Carbonate de calcium
$C_4AF$	Aluminate-ferrite tétracalcique
CaO	Oxyde de calcium
$Ca(OH)_2$	Hydroxyde de calcium (la chaux)
$CaSO_4$	Sulfate de calcium
CEM	Ciment Portland
CEM I	Ciment portland.
CEM II	Ciment portland composé.
CEM III	Ciment de haut fourneau.
CEM IV	Ciment pouzzolanique.
CEM V	Ciment au laitier et aux cendres.
$CO_2$	Dioxyde de carbone
$C_2S$	Silicate bicalcique (belite)
$C_3S$	Silicate tricalcique (alite)
C-S-H	Silicate de calcium hydraté
dS	Surface élémentaire d'une couche cisillée.
dF	Projection de la force de frottement tangentielle.
E/C	Rapport de l'Eau sur Ciment
$Fe_2O_3$	Oxyde de fer
F/C	Rapport de filler sur ciment
G/S	Rapport de
$K_2O$	Oxyde de potassium
LCPC	Laboratoire central des ponts et chaussées
MAP	Mortier autoplaçant
$M_f$	Module de finesse
$MgO$	Oxyde de magnésium

$\text{Na}_2\text{O}$	Oxyde de sodium
$\text{NaOH}$	La soude
$R_c$	Résistance à la compression
$R_m$	La vitesse relative d'écoulement
$R_t$	Résistance à la traction
SFU	Sable de fonderie usagé
$\text{SiO}_2$	Dioxyde de calcium (silice)
S/C	Rapport de Sable sur Ciment
S/M	Rapport de Sable sur Mortier
SP	Superplastifiant
$\text{SO}_3$	Trioxys de soufre
T50	Temps d'écoulement pour que le diamètre d'étalement
TVF	Temps d'écoulement à l'entonnoir (sec).
VZ	Adjuvant retardateur de prise
$\eta$	Viscosité dynamique
$\nu$	Viscosité cinétique
$\eta_R$	Viscosité relative
$\eta_{SP}$	Viscosité spécifique
$\tau$	La contrainte de cisaillement
$\tau_0$	Seuil cisaillement
$\gamma'$	Taux de cisaillement
$\mu$	Viscosité plastique
$\mu^\infty$	Viscosité à taux de cisaillement infini
$\mu_0$	Viscosité à taux de cisaillement nul
$\rho_{\text{abs}}$	Masse volumique absolue
$\rho_{\text{app}}$	Masse volumique apparente
I	La porosité accessible à l'eau
$\rho$	La masse volumique hydrostatique

## INTRODUCTION GÉNÉRALE

En raison des quantités toujours croissantes de déchets et de sous-produits industriels, la gestion des déchets solides est la principale préoccupation dans le monde. Le coût de déstockage et les décharges est toujours croissant, le recyclage et l'utilisation des sous-produits et des déchets industriels sont devenus une solution attrayante pour l'élimination des déchets. L'utilisation de ces matériaux dans le béton non seulement le rend économique, mais contribue également à réduire les problèmes d'environnement et les émissions en CO<sub>2</sub>. Les caractéristiques physiques et chimiques du sable de fonderie dépendent du type de procédé de moulage et du secteur industriel dont il provient. Dans la pratique moderne de la fonderie, le sable est généralement recyclé et réutilisé au cours de nombreux cycles de production. L'industrie estime qu'environ 100 millions de tonnes de sable sont utilisées dans la production chaque année, dont 6 à 10 millions de tonnes sont mises au rebut chaque année et peuvent être recyclées dans d'autres produits et industries. L'industrie automobile et ses pièces détachées sont les principaux producteurs de sable de fonderie. Les fonderies achètent des sables de silice de haute qualité et de taille spécifique pour les utiliser dans leurs opérations de moulage et de coulée.

Le but de cette étude est de voir la possibilité de réutiliser le sable de fonderie (POVAL Berrouaghia) en tant que sable et comme ajout cimentaire (par une substitution partielle de ciment) pour produire du mortier et béton autoplaçant. Ce travail présente une étude bibliographique sur la formulation et la caractérisation physico-mécanique des mortiers et bétons autoplaçants à base de ce type de déchet.

Le mémoire est décomposé en deux chapitres pour lesquels les objectifs suivant sont recherchés.

### CHAPITRE I : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE.

Présente un aperçu sur les bétons et mortiers autoplaçants, leurs constituants, leurs performances mécaniques et comportements rhéologiques ainsi que, leurs propriétés en durabilité. Un état de l'art sur l'utilisation des sables de fonderie en tant que sable et qu'ajout



cimentaire dans la composition des mortiers sera présenté. Une attention particulière est donnée sur l'influence du sable de fonderie sur les propriétés rhéologiques, mécaniques et de durabilité du mortier ou béton autoplacant.

## **CHAPITRE II : MATERIAUX ET ESSAIS.**

Le deuxième chapitre présente de notre programme expérimental à réaliser dans le cadre du présent travail. Les différents matériaux utilisés et leurs caractéristiques ainsi que les différentes procédures des essais seront présentés.

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

## **Chapitre I :**

### **REVUE BIBLIOGRAPHIQUE**

## **I.1.Introduction**

Dans ce premier chapitre, nous allons présenter une description générale issue de notre recherche bibliographique sur le béton et mortier autoplaçant, leur définition, leur formulation et ses propriétés à l'état frais et durci. Nous présentons un état de l'art sur l'utilisation des sables de fonderie en tant que sable et qu'ajout cimentaire dans la composition des mortiers et bétons autoplaçants.

## **I.2. le béton autoplaçant (BAP)**

Les bétons autoplaçants sont découverts depuis les années 1980 au Japon, ces bétons se caractérisent par, une grande fluidité, une homogénéité et sa mise en place par gravitation et sans vibration [1].

Ces bétons se développent maintenant dans le monde et semblent être amenés à remplacer, à terme, les bétons vibrés classiques dans de nombreuses applications. Ils présentent en effet des intérêts à la fois techniques et économiques : absence de nuisances sonores en milieu urbain, possibilité de bétonner des zones fortement ferraillées ou à géométrie complexe et obtention d'une meilleure qualité du béton d'une part, diminution du temps de personnel lors de la mise en place et réduction des coûts des processus industriels [2]. Cependant, ces avantages s'accompagnent fatalement de certains inconvénients :

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

## **I.3. Mortier autoplaçant (MAP)**

### **I.3.1.Introduction**

Le mortier autoplaçant est l'un des matériaux de construction que l'on utilise pour solidariser les éléments entre eux, combler les interstices entre les blocs de construction ou pour réunir les différents éléments (briques, blocs de béton ...).

### **I.3.2.Définition du mortier autoplaçant (MAP)**

Le mortier autoplaçant est le résultat d'un mélange de sable, un liant (ciment ou chaux), l'eau et un adjuvant. Des formulations multiples de mortier autoplaçant peuvent être obtenues en jouant sur différents paramètres tel que le liant (type et dosage), l'adjuvant, l'ajout et le dosage en eau. Leurs choix et dosages sont en fonction de l'ouvrage à réaliser et de son environnement.

MAP est caractérisé par une grande fluidité et une grande capacité de remplissage tout en garantissant de bonnes performances mécaniques et de durabilité, de telles caractéristiques sont directement liées à sa composition.

### I. 3.3. Constituants des MAP

Chaque formulation passe par la compréhension de l'influence de chaque constituant sur les propriétés d'écoulement du béton. Le rôle d'un constituant dépend essentiellement de son état (fluide, solide) et de sa nature minéralogique, chaque constituant joue un rôle différent dans l'écoulement et surtout dans le comportement rhéologique du béton.

#### I. 3.3.a. Le ciment

Le ciment est un liant hydraulique capable de faire prise dans l'eau présenté sous la forme d'une poudre minérale fine qui, mélangée avec de l'eau, forme une pâte faisant prise et durcisse progressivement dans le temps. Ce durcissement est dû à l'hydratation de certains composants minéraux, notamment des silicates et des aluminates de calcium [3]. Le ciment est constitué par mélange et broyage du clinker, le constituant principal classique, obtenu à partir de la cuisson à 1450 °C du cru qui est composé de 80 % de calcaire et 20 % d'argile et constitué au plan chimique, de silicates et d'aluminates de calcium. Le clinker est accompagné de sulfate de calcium CaSO<sub>4</sub> (gypse ou anhydrite), qui joue un rôle de régulateur de prise. Et d'additifs éventuels, qui confèrent au ciment des propriétés particulières. Figure I.1 Résume le processus de fabrication du ciment.

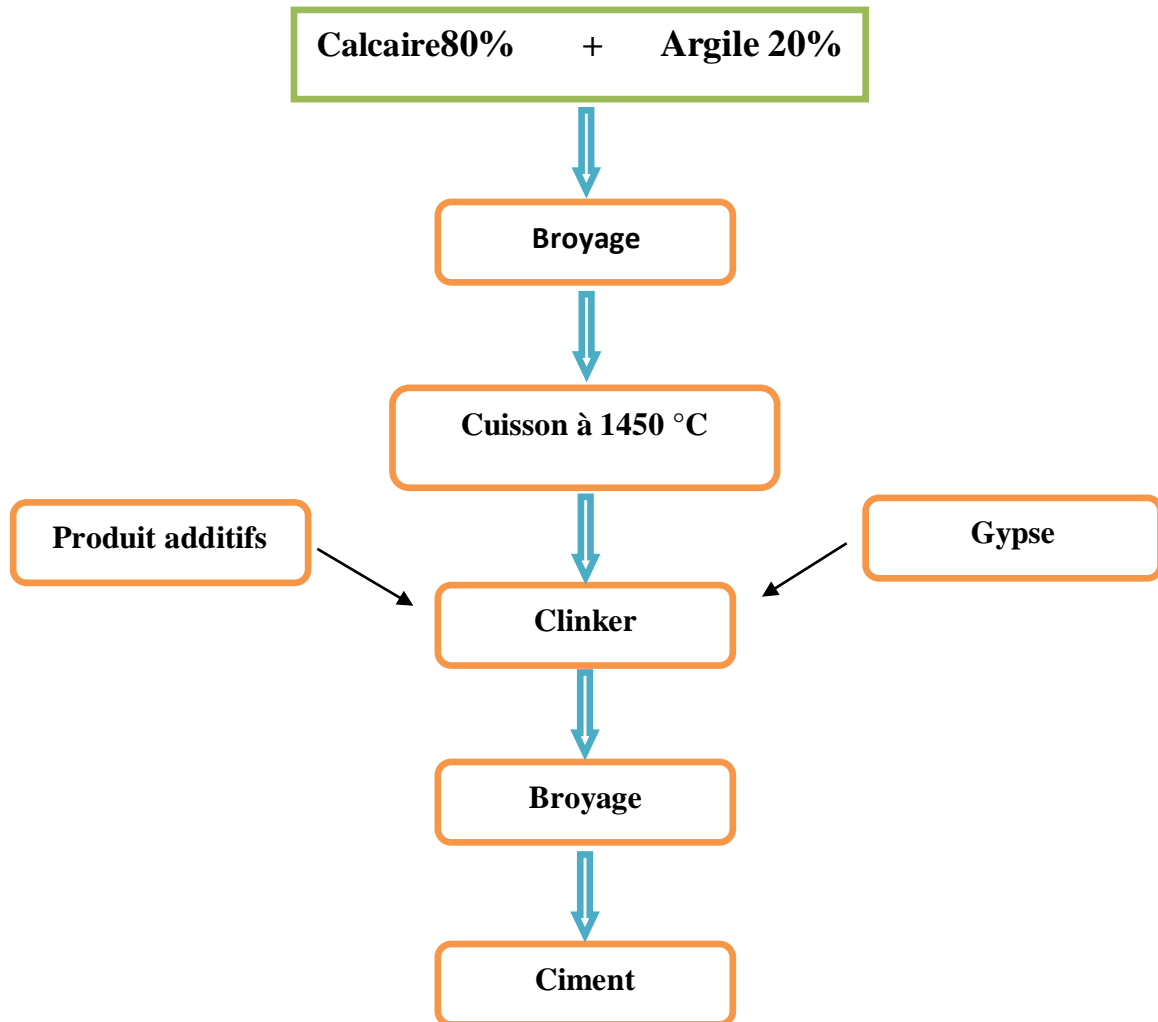


Figure I.1 : Résumé du processus de fabrication du ciment.

Les ciments sont classés en fonction de leur composition en cinq types principaux définis par la norme EN 197-1 [4] :

- CEM I : Ciment portland.
- CEM II : Ciment portland composé.
- CEM III : Ciment de haut fourneau.
- CEM IV : Ciment pouzzolanique.
- CEM V : Ciment au laitier et aux cendres.

### I. 3.3.b. Le sable

Le sable est un matériau granulé inerte entrant dans la composition de béton ou mortier. Le sable de bonne granulométrie doit contenir des grains fins et moyens. Les grains fins se disposent dans les intervalles entre les gros grains pour combler les vides. Ils jouent un rôle important, réduisent les variations volumiques, les chaleurs dégagées et le prix. Les sables peuvent être :

- Sables naturels :

- Sable de rivières : ou sable alluvionnaire, il se caractérise par sa forme arrondie et sa dureté de nature siliceuse ou silico-calcaire.

- Sable de carrière : concassés extrait des sablonnières de forme angulaire. Le sable de carrière est soit retiré du sol en masse, soit fabriqué à partir de roches extraites en carrière. Comme les basaltes, les porphyres et les quartzites.

- Sables artificiels :

Comprennent les sables résultant du concassage de blocs de laitiers de hauts-fourneaux, le laitier granulé ayant subi un refroidissement rapide, et le laitier broyé obtenu à partir du concassage du laitier granulé. Le sable concassé obtenu de façon identique mais sans filler. Les sables naturels et artificiels sont employés dans le domaine de la construction pour la fabrication de mortiers et de béton. Les sables augmentent l'ouvrabilité du mortier ou du béton en le rendant plus dense. Toutefois, si les sables ronds sont plus malléables, les sables angulaires ont la particularité de rendre le béton plus résistant. Certains sables sont à éviter, notamment les 'sables à lapin', généralement très fins, les sables crus qui manquent de fines et les sables de dunes ou de mer qui contiennent des sels néfastes pour les constituants des ciments, par contre ils doivent être propres. Les dosages du sable se feront en poids plutôt qu'en volume comme c'est souvent le cas, afin d'éviter les erreurs de dosage, par suite de l'augmentation de volume de sable humide. Le diamètre maximum des grains de sable utilisés pour les mortiers sont :

- Extra-fins : jusqu'à 0,8 mm (en tamis), soit 1 mm (en passoire) ;
- Fins : jusqu'à 1,6 mm ;
- Moyens : jusqu'à 3,15 mm ;
- Gros : jusqu'à 5 mm.

### I. 3.3.c. L'eau

L'eau efficace est la quantité d'eau contenue dans le mortier ou béton frais, qui est prise en compte lors du calcul du rapport E/C. L'eau efficace comprend, l'eau de gâchage, l'humidité superficielle des granulats et l'eau apportée par les adjuvants et les additions, si leur quantité totale s'élève plus de 3 l/m<sup>3</sup> [5].

L'eau de gâchage ne doit pas présenter un excès d'impuretés qui peuvent détériorer les propriétés physiques et mécaniques (résistance, prise et consistance), les propriétés esthétiques (tache, efflorescences), la durabilité (corrosion des armatures, stabilité du mortier). L'eau ajoutée assure deux fonctions principales l'hydratation de ciment pour la prise et le durcissement, et l'amélioration de la maniabilité à l'état frais, ainsi que d'autres fonctions, mouillage des granulats et véhicule des adjuvants. L'augmentation du dosage en eau augmente la fluidité du béton et entraîne la diminution de la concentration en solides ; au niveau rhéologique, le seuil de cisaillement et la viscosité diminuent. Cependant, l'introduction excessive d'eau provoque la chute de la résistance mécanique du béton à l'état durci, ainsi que l'apparition des phénomènes de ségrégation à l'état frais [5].

#### I. 3.3.d. Les adjuvants

L'emploi d'adjuvant doit répondre à la norme NF EN 934-2+A1 [6]. Les adjuvants sont des produits dont l'incorporation à faible dose (inférieure à 5% de la masse de ciment) aux bétons, mortier ou coulis lors du malaxage ou avant la mise en œuvre, pour modifier certaines propriétés recherchées, à l'état frais (le temps de prise, le processus de durcissement et l'ouvrabilité) ou durci (la résistance et la durabilité).

Les adjuvants améliorent certaines caractéristiques qui répondent à des considérations techniques et économiques. L'emploi des adjuvants permet d'obtenir une meilleure ouvrabilité en remplaçant une partie de l'eau de gâchage par un plastifiant et réduire ainsi la capillarité, ce qui améliore la durabilité du béton. L'efficacité des adjuvants dépend d'une quantité de facteurs qui sont, le dosage de l'adjuvant, le type et le dosage de ciment, le dosage en eau ainsi que la consistance, les conditions de malaxage et la température. Chaque adjuvant est défini par une unique fonction principale, mais peut présenter d'autres fonctions secondaires [7].

- Superplastifiants

Les superplastifiants sont apparus à la fin des années 1970 au Japon et en Allemagne. Ce sont généralement des sels sulfoniques de formaldéhydes, naphthalènes ou mélamines, qui ont la propriété de pouvoir améliorer notablement la fluidité d'une gâchée, et donc de diminuer la

quantité d'eau nécessaire à sa mise en oeuvre. Leur arrivée sur le marché a permis le développement des bétons à "hautes performances". Ces superplastifiants assurent une défloculation de la suspension de ciment en solution aqueuse, ce qui améliore caractéristiques rhéologiques du mélange [8]. La défloculation serait obtenue par répulsion électrostatique des nuages de molécules ainsi formés en périphérie des grains et/ou par l'encombrement stérique de ces molécules qui empêcherait les contacts entre les particules de ciment. Le niveau élevé de la cohérence (ouvrabilité) requis par les BAP tout en maintenant la stabilité du mélange, a mené à l'utilisation d'un certain nombre d'adjuvants dans le béton. La demande élevée en eau pour réaliser une fluidité requise par le BAP, était tout impraticable compte tenu du dosage très élevé de ciment qui était souvent requis pour permettre aux conditions de résistance à la compression d'être rencontrées. L'arrivée des superplastifiants et la technologie de développements de ces adjuvants, ont joué un rôle essentiel dans le développement des BAP. Les superplastifiants modernes (basés sur les éthers polycarboxyliques) favorisent la conservation de la fluidité souhaitée tout en maintenant la stabilité du mélange de béton. Ces superplastifiants réalisent ceci avec un mécanisme de répulsion électrostatique en combinaison avec l'obstacle stérique (figure I.2).

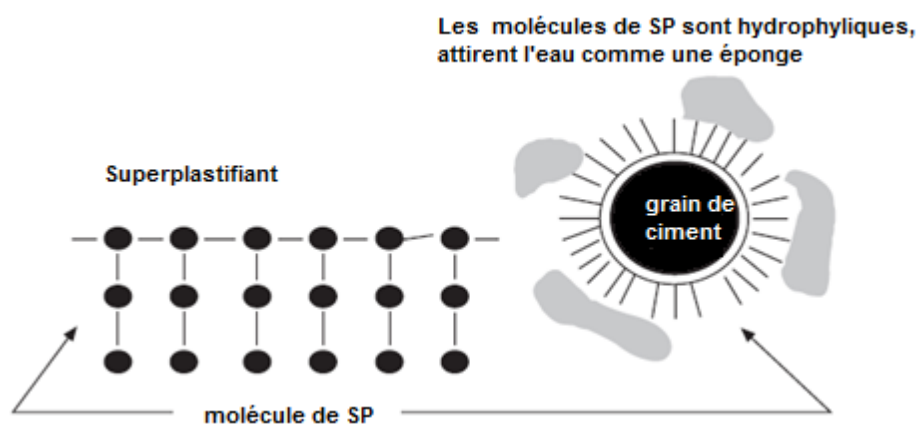


Figure I.2 : Le mécanisme d'action du superplastifiant à base de polycarboxilate [8].

Les superplastifiants récents sont les polycarboxylates qui assurent une meilleure défloculation de la suspension de ciment en solution aqueuse, ce qui améliore caractéristiques rhéologiques du mélange [9]. En effet, les molécules organiques de ces superplastifiants, s'adsorbent à la surface des particules de ciment. La dispersion de ces particules, est obtenue par la répulsion électrostatique des molécules du polymère autour de la périphérie des grains et/ou par l'encombrement.

#### I. 3.3.e. Les additions minérales



Les additions minérales sont des produits qui ont des dimensions inférieures à 80µm. Récupérer des déchets des centrales thermiques ou pulvérisation de certaines roches par broyage. Pour l'amélioration de propriétés rhéologiques des BAP, l'addition des fines inertes ou réactives est nécessaire, ainsi que leurs présence peut remplacer une quantité de ciment dans la formulation et réduit la chaleur d'hydratation ce qui réduit le retrait endogène [10]

- Filler calcaire

Les additions calcaires sont des produits secs obtenus par broyage et/ou sélection de roches naturelles (calcaires, basalte, bentonite, etc.) les fillers calcaires présentant une teneur en carbonate de calcium  $\text{CaCO}_3$  supérieure à 75% en masse [11]. Un filler est dit calcaire s'il contient au moins 90% de carbonate de calcium. Dans les autres cas, le filler est désigné par le nom de sa roche d'origine.

Les produits désignés dans le commerce comme fillers sont des poudres fines à granulométrie contrôlée < 80 micron.

Les fillers se différencient les uns des autres par leurs origines, leurs compositions chimiques et minéralogiques, les impuretés qu'ils contiennent, leur finesse, la forme des grains, leur dureté et leur porosité.

- Cendres volantes

Les cendres volantes sont des particules non combustibles pulvérulentes de grande finesse entraînées par les fumées lors de la combustion du charbon pulvérisé dans les chaudières des centrales thermiques de minéraux solides. Les particules de cendres volantes sont sphérique et par conséquent avantageuses du point de vue de la demande en eau. Elles se présentent sous forme de poudre grise noirâtre [12], Elles ont une finesse très élevée avec un diamètre compris entre (1 et 100 µm).

Les cendres volantes sont composées essentiellement de  $\text{SiO}_2$  et  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Les principales exigences de la norme ASTM C 618-19 concernent une teneur minimale de 70 % de silice, d'alumine, et d'oxyde de fer ( $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Les cendres volantes peuvent être siliceuses ou calciques. Le mélange avec le ciment donne un véritable liant car le  $\text{Ca(OH)}_2$  se combine avec le  $\text{SiO}_2$  et  $\text{Al}_2\text{O}_3$  des cendres.

- Laitiers de hauts fourneaux

C'est un résidu minéral de la préparation de la fonte dans les hauts fourneaux à partir du minerai et du coke métallurgique. La composition chimique comporte de la chaux (45 à 50%), de la silice (25 à 30 %), de l'alumine entre (15 à 20 %) et 10% environ de magnésie. Trempé à

l'air ou à l'eau, le laitier est principalement vitreux. Il est broyé et ajouté en proportions variables au clinker, Le laitier peut être introduit dans les matrices cimentaires par différents taux de substitution. Les laitiers améliorent la durabilité des mortiers et des bétons grâce à leur capacité de fixation de la chaux et augmentent significativement les performances mécaniques à long terme.

- Fumées de silice

La fumée de silice est un produit pulvérulent ultrafin issu des usines de fabrication d'alliage de silicium et de Ferro silicium obtenu dans un four à arc électrique à partir de quartz de grande pureté et de charbon [13]. La fumée de silice est une poudre de silice très fine (inférieur à  $1\mu\text{m}$ ), environ 100 fois plus petites que les grains de ciment ( $\text{SSB} = 20000 \text{ m}^2/\text{kg}$ ). Sa forte teneur en silice amorphe (vitreuse) et sa finesse qui complète la granulométrie des ciments confère à la fumée de silice des propriétés pouzzolaniques.

Les propriétés des fumées de silice sont assez diverses. Conformées à la norme NF EN 13263-1+A1, elle confère au béton de très bonnes propriétés rhéologiques, mécaniques et chimiques, tout en améliorant la durabilité.

### **I.3.4. Formulation des MAP**

La formulation des bétons autoplaçants est plus élaborée que celle d'un béton ordinaire. En effet, en plus des critères habituellement choisis pour la formulation des bétons ordinaire notamment (résistance mécanique, durabilité...) les bétons autoplaçants contient deux propriétés qui sont contradictoires : une bonne fluidité pour assurer une bonne mise en place ; et une bonne viscosité pour éviter les problèmes des ségrégations.

#### **1.3.4. a. Méthode d'Okamura**

La formulation des BAP par l'approche développée à l'Université de Kochi (1990), se fait de manière sécuritaire, en privilégiant le volume de pâte au détriment des granulats. Les bétons obtenus sont sous dosés en granulats et par conséquent loin d'un optimum économique. Les principes de formulation et leur application sont les suivants :

a) Dosage des gravillons : Les chercheurs japonais ont montré que le risque de blocage est minimisé lorsque le volume du gravillon pour  $1 \text{ m}^3$  de béton est limité à la moitié de sa compacité. Par définition, la compacité d'un mélange de grains est le rapport du volume de grains et du volume total du système grains + vides. Elle dépend bien sûr du mode de compactage.

b) Dosage du sable : Le volume du sable est posé forfaitairement à 40 % du volume de mortier du béton. La fluidité du béton est garantie par la réduction des frictions granulaires.

c) Dosage du liant : La méthode ne précise pas comment doser le liant. Néanmoins la quantité de ciment peut être fixée, par exemple, en respectant la donnée des normes (soit ici une masse minimale de ciment de 350 kg/m<sup>3</sup>). Les rapports massiques eau sur ciment (E/C) et filler sur ciment (F/C) peuvent également être choisis sur des critères de résistance.

d) Dosage de l'eau et du superplastifiant : Les dosages en eau et en super plastifiant sont déterminés au moyen d'essais sur mortiers, dont le volume de sable est fixé à 40 %. On réalise des mesures d'étalement avec un cône à mortier et des mesures d'écoulement à l'entonnoir [14].

#### 1.3.4.b . L'approche suédoise

Cette méthode est basée sur la méthode japonaise citée ci-dessus, le principe est d'intégrer l'approche de l'évaluation du risque de blocage dans le processus de formulation. Pour chaque rapport G/S on estime le volume de pâte critique pour le blocage, on retiendra ensuite le rapport G/S qui vérifie les propriétés rhéologiques recherchées. Les dosages des fines, de l'eau et du superplastifiant sont ajustés pour avoir une viscosité suffisante, un faible seuil de cisaillement, et une résistance souhaitée. Cette approche permet une meilleure optimisation du squelette granulaire. Cependant, on ne peut pas appliquer le critère de blocage à n'importe quel type de granulats [15].

### **1.3.5. les essais de Caractérisation des BAP à l'état frais**

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

#### 1.3.5 a. Essai d'étalement

Pour la détermination de l'étalement (Slump Flow), on utilise le même cône que celui normalement utilisé pour l'essai d'affaissement. Ce cône est placé sur une plaque d'étalement, à surface propre et humidifiée et de dimension suffisante (800 par 800 mm), puis il est rempli de béton BAP. Le cône est ensuite soulevé et le BAP en sort en formant une galette qui s'élargit sous sa propre énergie, sans qu'il soit nécessaire de soulever et de laisser retomber la plaque, comme dans l'essai classique d'étalement. La valeur de l'étalement correspond au diamètre moyen de la galette de béton ainsi obtenue, qui devrait être comprise entre 600 et

800mm. L'important est de procéder toujours de la même manière. Lorsque la petite ouverture se trouve en bas (figure I.3), le remplissage du cône avec le BAP est facilité et son soulèvement est empêché. [15]

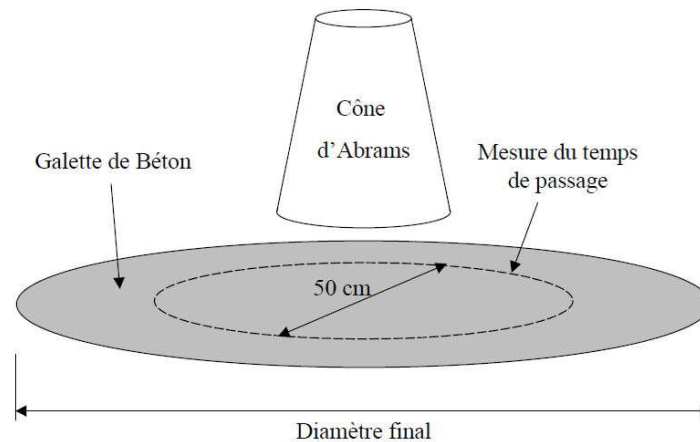


Figure I.3 : Essai d'étalement [15].

#### 1.3.5.b. Essai d'entonnoir (V-Funnel) et d'étalement modifié (J-Ring)

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

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



Figure I.4: Essai d'entonnoir [15].

#### I.3.5. c. Essai de la boîte en L

La procédure d'essai de la boîte en L est la suivante: la partie verticale de la boîte est remplie de béton. Ensuite, le volet est soulevé, ce qui provoque l'écoulement du béton qui doit passer à travers un grillage, formé de 3 barres d'armature  $\varnothing$  14 mm distantes de 39 mm, avant de pouvoir atteindre la partie horizontale de la boîte. On mesure le temps nécessaire dès l'ouverture du volet jusqu'à la fin de l'écoulement du béton dans la partie horizontale. Ce temps d'écoulement devrait être compris entre 3 et 7 secondes. On peut aussi mesurer la hauteur atteinte aux deux extrémités de la partie horizontale par le béton ( $h_1$  et  $h_2$ ), afin de qualifier sa capacité d'auto nivellement. Le rapport  $H_2/H_1$  devrait être supérieur à 0,80. L'essai permet en outre de vérifier la capacité du béton à s'écouler au travers d'un réseau d'armatures d'écartement défini. [15]



Figure I.5: Essai de la boîte en L (L-Box) [15].

#### I.3.5.d. Essai de stabilité au tamis

A la fin du malaxage, dix litres de béton sont versés dans un seau. Après une attente de quinze minutes, une masse 4,8 kg de béton est versée du seau sur un tamis de maille 5 mm Deux minutes plus tard, on pèse la quantité de pâte (laitance) ayant traversé le tamis.

Un pourcentage élevé de laitance par rapport à la masse initiale est un indicateur d'une faible résistance à la ségrégation. L'AFGC a proposé, en plus, un essai de mesure du ressuage qui semble avoir été abandonné aujourd'hui, car peu pertinent (le ressuage est faible chez les BAP) et très contraignant.

## **I.4. Notion de base sur le sable de fonderie**

### **I.4.1. Introduction**

Le recyclage et l'utilisation des sous-produits et des déchets industriels sont devenus une solution attrayante pour l'élimination des déchets. Il existe plusieurs types de sous-produits et de déchets industriels. L'utilisation de ces matériaux dans le béton ne fait pas seulement économique, mais contribue également à réduire les problèmes d'élimination. Les caractéristiques physiques et chimiques du sable de fonderie dépendent du type de procédé de coulée et du secteur industriel dont il provient. Dans la pratique moderne de la fonderie, le sable est généralement recyclé et réutilisé au cours de nombreux cycles de production. L'industrie automobile et ses pièces détachées sont les principaux producteurs de sable de fonderie. Les fonderies achètent des sables de silice de haute qualité et de taille spécifique pour les utiliser dans leurs opérations de moulage et de coulée.

### **I.4.2. Définition de sable de fonderie**

Le sable de fonderie est un sable siliceux de haute qualité aux caractéristiques physiques uniformes. Il s'agit d'un sous-produit des industries de moulage des métaux ferreux et non ferreux, où le sable est utilisé depuis des siècles comme matériau de moulage en raison de sa conductivité thermique.

### **I.4.3. Types de sable de fonderie**

La classification des sables de fonderie dépend du type de systèmes de liants utilisés dans la fonte des métaux. Deux types de systèmes de liants sont généralement utilisés et, sur cette base, les sables de fonderie sont classés comme suit : sables liés à l'argile (sable vert) et sables liés chimiquement. Les deux types de sables sont adaptés à une utilisation bénéfique, mais ils présentent des caractéristiques physiques et environnementales différentes.

#### **I.4.3 a. Les moules en sable vert :**

Le sable vert est composé de matériaux naturels qui sont mélangés entre eux : sable de silice de haute qualité (85-95 %), argile de bentonite (4-10 %) comme liant, un additif carboné (2-

10 %) pour améliorer la finition de la surface de moulage et de l'eau (2-5%). Le sable vert est le sable de fonderie recyclé le plus couramment utilisé pour une réutilisation bénéfique. Il est de couleur noire, en raison de sa teneur en carbone, et adhère grâce à l'argile et à l'eau.

#### I.4.3.b Les sables liés chimiquement :

Sont utilisés à la fois dans la fabrication de noyaux, où des résistances élevées sont nécessaires pour supporter la chaleur du métal en fusion, et dans la fabrication de moules. Le sable lié chimiquement est composé de 93-99% de silice et de 1-3% de liant chimique. Le sable de silice est mélangé à fond avec les produits chimiques. La plupart des systèmes de liants chimiques consistent en un liant organique qui est activé par un catalyseur, bien que certains systèmes utilisent des liants inorganiques. Les sables à liant chimique sont généralement de couleur et de texture plus claire que les sables à liant argileux. Il existe différents types de systèmes de liants chimiques utilisés dans l'industrie de la fonderie. Les systèmes de liants chimiques les plus courants sont les polyuréthanes phénoliques, les résines époxy, l'alcool furfurylique et les silicates de sodium. Les sables à liant chimique sont généralement de couleur et de texture plus claire que les sables à liant argileux. [16].

#### I.4.4.Le sable de fonderie en Algérie

L'industrie Algérienne des fonderies utilise de nombreux types de sables qui servent à confectionner des moules et des noyaux pour le moulage de ces pièces métalliques. Les principaux sables de moulage étudiés et utilisés sont répertoriés comme suite :

- **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.
- **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.
- **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 (S<sub>2</sub>) mais on ajoute de la bentonite (4 % à 4.5 %) pour améliorer l'état de surface des pièces.
- **Sable à la résine furanique :** D'une manière générale, les résines sont utilisées à faible dosage, de l'ordre de 2 %, comme liant organique. La résine furanique est un mélange

d'alcool furfurylique et d'alcool formaldéhyde. Cette résine thermodurcissable durcie en présence d'un catalyseur acide composé de l'acide xylène-sulfonique, de l'acide benzène-sulfonique et de l'acide sulfurique. Le sable à la résine furanique sert à la fabrication de pièces massives en fonte. [17]

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

#### **I.4.5. Présentation de l'entreprise POVAL de Berrouaghia**

##### I.4.5.a .Historique et mission de l'entreprise :

L'entreprise POVAL SPA pompes et vannes algériennes société par action est créée en date du 23 juillet 1997, et suite à la dissolution de la société mère ENPMH entreprise nationale de production du matériel hydraulique [18]. La société POVAL est composée par six unités de production :

- L'Unité Fonderie de Berrouaghia UFB.
- L'Unité Pompe de Berrouaghia UPB.
- L'Unité pompe de Baraki UPB.
- L'Unité Pompe de Rouïba UPR.
- L'Unité Vanne de Berrouaghia UVB.
- L'Unité Maintenance de Berrouaghia UMB.

#### **I.4.6. Propriétés de sable de fonderie**

##### I.4.6.a. Caractéristiques physiques du sable de fonderie :

Le sable de fonderie est généralement de forme su angulaire à arrondie. Après avoir été utilisé dans la fonderie un nombre important d'agglomérations de sable se forment. Lorsque celles-ci sont décomposées, la forme des différents grains de sable est apparente.



Figure I.6: Sable de fonderie non traité.



Les sables verts sont généralement noirs, ou gris, et non verts ; le sable lié chimiquement est généralement un couleur havane moyen ou blanc cassé Les figures 1.6 et 1.7 montrent le sable de fonderie non traité et respectivement du sable vert [19].



Figure I.7: Sables verts d'une industrie.

#### I.4.6.b. Propriétés physiques :

Les propriétés physiques typiques des sables de fonderie usés provenant de systèmes de sable vert sont données dans le tableau I.1. La distribution granulométrique du sable de fonderie usagé est très uniforme, avec environ 85 à 95 % de la matière entre 0,6 mm et 0,15 mm (n° 30 et n° 100) de granulométrie. On peut s'attendre à ce que 5 à 12 pour cent du sable de fonderie soit inférieur à 0,075 mm (tamis No. 200). La forme des particules est généralement su angulaire à ronde. Les granulométries des sables de fonderie usés se sont avérées trop fines pour satisfaire à certaines spécifications relatives aux agrégats fins.

Le sable de fonderie usagé a une faible absorption et est non plastique. Les valeurs d'absorption rapportées varient considérablement, ce qui peut également être attribué à la présence de liants et d'additifs. La teneur en impuretés organiques (en particulier dans les systèmes de liants au charbon de mer) peut varier considérablement et peut être assez élevée. Cela peut empêcher son utilisation dans des applications où les impuretés organiques pourraient être importantes (par exemple, les agrégats de béton de ciment Portland). On a constaté que la densité du sable de fonderie varie de 2,39 à 2,55. Cette variabilité a été attribuée à la variabilité des fines et des additifs contenus dans les différents échantillons. En général, les sables de fonderie sont secs, avec une teneur en humidité inférieure à 2 %. Une grande partie des grumeaux d'argile et des particules friables ont été signalés, ce qui est attribué aux grumeaux associés au sable moulé, qui se désintègrent facilement lors de la

procédure d'essai. La variation de la perméabilité, indiquée dans le tableau I.1, est le résultat direct de la fraction de fines dans les échantillons prélevés [19].

La qualité du sable de fonderie peut être quantifiée par sa durabilité et sa solidité, sa composition chimique et sa variabilité. Divers aspects de la production de sable de fonderie influencent ces trois caractéristiques. La durabilité/sonorité du sable de fonderie est importante pour garantir la performance à long terme des applications de génie civil. La durabilité du sable de fonderie dépend de la manière dont le sable a été utilisé à la fonderie. Les moulages successifs peuvent entraîner un affaiblissement du sable de fonderie en raison des chocs thermiques. Aux stades ultérieurs de l'utilisation du moule, cela peut entraîner une détérioration accélérée des particules de sable d'origine. Toutefois, dans les utilisations en génie civil, le sable de fonderie ne sera normalement pas soumis à des conditions aussi sévères. Dans les applications géotechniques, le sable de fonderie présente souvent une grande durabilité.

Tableau I.1 : Propriétés physiques typiques du sable de fonderie vert utilisé.

<b>Propriété</b>	<b>Résultats</b>	<b>Méthodes d'essai</b>
<b>Gravité spécifique</b>	2.39- 2.55	ASTM D854
<b>Densité relative en vrac, Kg/m<sup>3</sup> (lb/ft<sup>3</sup>)</b>	2589 (160)	ASTMC48/ AASTHO T84
<b>Pourcentage d'absorption</b>	0.45	ASTM C128
<b>Teneur en eau (%)</b>	0.1- 10.1	ASTM D2216
<b>Coefficient de perméabilité (Cm/Sec.)</b>	10-3- 10-6	AASTHO T215/ ASTM D2434
<b>Limite plastique / Indice plastique</b>	Non-plastic	AASTHO T90/ ASTM D4318

En règle générale, la composition chimique du sable de fonderie varie d'une fonderie à l'autre. Les sables produits par une seule fonderie, cependant, ne présenteront probablement pas de variation significative dans le temps. En outre, les sables mélangés produits par des consortiums de fonderies produisent souvent des sables cohérents. La composition chimique du sable de fonderie peut avoir un impact sur ses performances [20]. Le sable de fonderie usagé est principalement constitué de sable siliceux, recouvert d'une fine pellicule de carbone brûlé, de liant résiduel (bentonite, charbon de mer, résines) et de poussière.

Le sable de silice est hydrophile et attire donc l'eau à sa surface. Cette propriété pourrait entraîner des dommages accélérés par l'humidité et des problèmes de décapage associés dans un revêtement en asphalte. Des additifs anti-décapants peuvent être nécessaires pour contrecarrer ces problèmes. Selon le liant et le type de métal coulé, le pH du sable de fonderie usé peut varier d'environ 4 à 8. Il a été signalé que certains sables de fonderie usés peuvent être corrosifs pour les métaux. En raison de la présence de phénols dans le sable de fonderie, on craint que les précipitations qui percolent à travers les stocks ne mobilisent des fractions capables de lixiviation, ce qui entraînerait des rejets de phénols dans les eaux de surface ou souterraines. Les sources et les stocks de sable de fonderie doivent être surveillés pour évaluer la nécessité d'établir des contrôles des rejets potentiels de phénols.

#### I.4.6.d. Propriétés mécaniques

Les propriétés mécaniques typiques des sables de fonderie usés sont énumérées dans le tableau I.2. Les sables de fonderie usés présentent de bonnes caractéristiques de durabilité, mesurées par des essais de faible abrasion Micro-Deval et de perte de solidité au sulfate de magnésium. L'essai d'abrasion Micro-Deval est un essai d'attrition/abrasion dans lequel un échantillon de l'agrégat fin est placé dans un bocal en acier inoxydable avec de l'eau et des paliers en acier et tourné à 100 tours/minute pendant 15 minutes. Le pourcentage de perte a été déterminé comme étant très bien corrélé avec la solidité du sulfate de magnésium et d'autres propriétés physiques. Des études récentes ont fait état d'une perte de solidité relativement élevée, qui est attribuée à des échantillons de perte de sable lié et non à une décomposition des particules de sable individuelles. L'angle de résistance au cisaillement (angle de frottement) du sable de fonderie serait compris entre 33 et 40 degrés, ce qui est comparable à celui des sables conventionnels.

Tableau I.2 : Propriétés mécaniques typiques du sable de fonderie usagé

Propriété	Résultats	Méthodes d'essai
Pertes dues à l'abrasion des micro-démons (%)	< 2	-
Sulfate de magnésium Perte de solidité %	5-15 6-47	ASTMC88
Angle de frottement (degré)	33-40	-
Ratio de portance de la Californie (%)	4-20	ASTM D1883

#### **I.4.7. Application du sable de fonderie**

- Remblais.
- Couches barrières Construction.
- Remplissages fluides.
- Construction de routes.
- Renforcement des sols.
- Asphalte à chaud.
- Fabrication de ciment Portland.
- Fabrication de laine de roche.
- Fabrication de fibres de verre.
- Couverture/obstacles de la décharge.

#### **I.4.8. Le moulage au sable**

Le moulage est un processus par lequel un matériau réfractaire est façonné dans un moule qui forme une cavité d'une forme spécifique de telle sorte que le métal fondu peut alors être versé

dans la cavité. La cavité du moule doit conserver sa forme jusqu'à ce que le métal soit solidifié et que le moulage soit retiré. Les caractéristiques du moule varient en complexité en fonction du type de métal utilisé. Des industries dans le monde entier s'appuient sur notre connaissance approfondie des techniques de moulage ainsi que sur notre expérience pour produire des moules efficaces spécifiquement adaptés aux exigences de leur production.

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

Avantage :

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

Moulage au sable [21]

#### I.4.8.a. 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) [22]



Figure. I.8: les pièces pour moulage au fer et acier [17].

I.4.8.b. Les étapes du moulage au sable pour choisir les meilleurs matériaux :

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



Figure I.9: les moules au sable [18]

### Etape 1 : la fabrication des moules

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

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

### Etape 2 : La coulée

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

### Etape 3 : Le refroidissement

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

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

#### Etape 4 : La finition

Parce qu'il existe des canaux à l'intérieur du moule, il y aura du matériel excédentaire rattaché à la pièce finie qu'il faut enlever. À l'aide d'une presse de parage, d'une scie ou d'autres méthodes de coupe, tout matériel supplémentaire pourra être enlevé. Selon le type de coulée, cela peut être très rapide ou prendre plus de temps. Lors du choix de matériaux possibles pour la production d'une pièce moulée, il est pertinent de parler avec un consultant expérimenté qui comprend le processus de moulage au sable et les spécifications de votre projet. Les consultants présents chez Monet ont travaillé sur de nombreux projets de moulage et de forge de toutes tailles depuis des générations. Si vous cherchez à entreprendre un projet de moulage au sable, appelez-nous pour discuter des matières idéales pour votre projet. [22]

#### **I.9. Influence de sable de fonderie sur les propriétés des mortiers autoplaçants (MAP)**

On va donner un aperçu complet des travaux réalisés par différents chercheurs dans le domaine de l'utilisation du sable de fonderie dans le mortier et béton autoplaçant en tant que sable et ajout cimentaire.

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

##### I.9.1. Etat frais :

##### Effet sur l'ouvrabilité :

Les résultats de La fluidité des mortiers et des bétons contenant de sable de fonderie usé montrent que le sable de fonderie utilisé réduit la maniabilité lorsqu'il est ajoutée comme remplacement de sable naturel, Une grande quantité de superplastifiant est requise pour



maintenir la même fluidité (cas du mortier) ou ouvrabilité (cas du béton). Cette augmentation de l'addition de superplastifiant devrait être considérée assez élevée par rapport à celle introduite dans le mélange témoin.

### I.9.2. Etat durci :

#### Effet sur la résistance mécanique :

Guney et al. (2010), ont étudié la réutilisation potentielle des déchets de sable de fonderie dans des la production de béton. Le sable fin naturel est remplacé par des déchets de sable de fonderie (0%, 5%, 10 %, et 15 %). La méthode d'essai standard ASTM C39 a été utilisée pour tester la résistance à la compression. Les résultats des essais de compression non confinée pour les différentes quantités de sable de fonderie usagé comme Le remplacement partiel de l'agrégat fin à 28 et 56 jours a été tracé dans la figure I.10. Cette figure montre que la résistance à la compression augmente avec l'âge pour tous les des mélanges. On n'observe également que le béton avec 10 % de sable de fonderie usagé présente la plus grande résistance à la compression à l'âge de 56 jours. La résistance à la compression diminue avec l'augmentation de la quantité de sable de fonderie. Le béton avec 10 % de déchets le sable de fonderie présente presque la même résistance que celui du mélange de béton témoin alors que tous les autres mélanges de déchets de fonderie ajoutés présentent des valeurs inférieures à celles du contrôle [23]

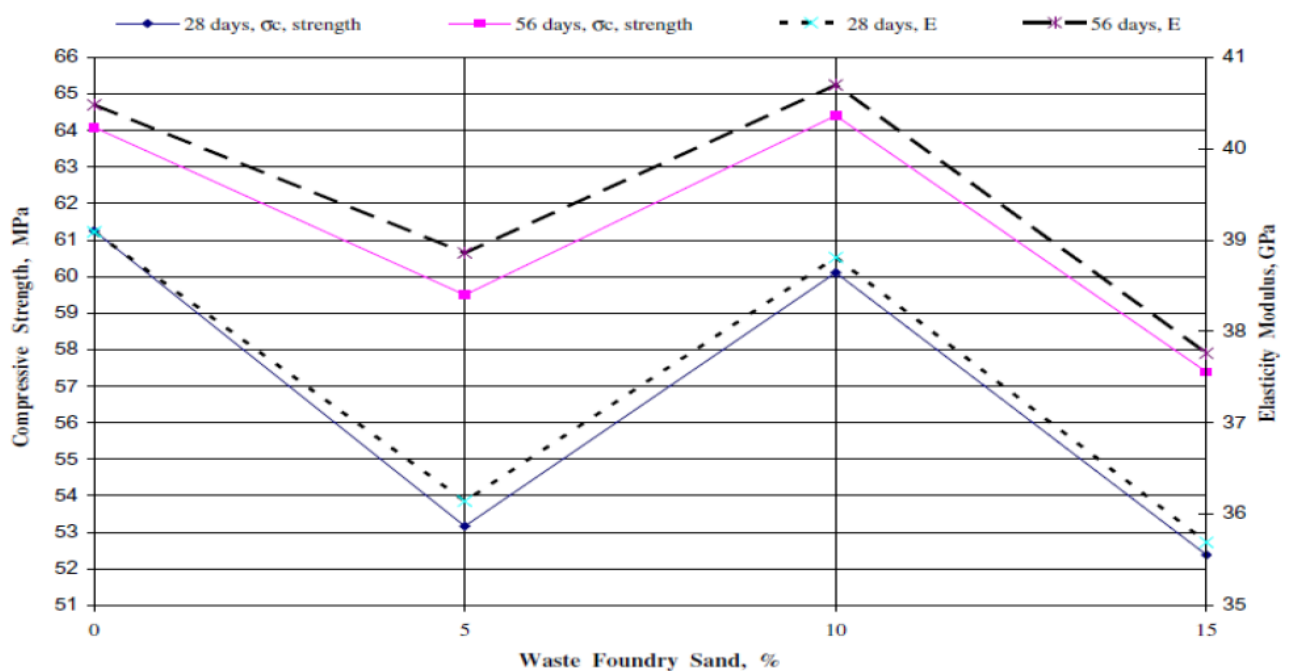


Figure I.10 : Effet des déchets de sable de fonderie sur la résistance à la compression [23].

Siddique et al. (2009) ont étudié les propriétés mécaniques des mélanges de béton dans lesquels les agrégats fins (sable ordinaire) étaient partiellement remplacés par du sable de fonderie usagé (SFU). Les propriétés physiques du sable de fonderie usagé et du sable fin sont indiquées dans le tableau. Les agrégats fins ont été remplacés par trois pourcentages (10 %, 20 % et 30 %) d'UFS en poids. La résistance à la compression des mélanges de béton fabriqués avec et sans sable de fonderie usagé (SFU) a été déterminée à 7, 28, 56, 91 et 365 jours de durcissement. Pour cela, des cubes de béton de 150 mm ont été coulés pour la résistance à la compression [24]. Les propriétés physiques et la proportion du mélange sont indiquées dans les tableaux I.3 et I.4.

Tableau I.3: Propriétés physiques du sable de fonderie usagé (UFS) et du sable ordinaire.

<b>Propriété</b>	<b>Sable de fonderie usagé (UFS)</b>	<b>Sable régulier (agrégat fin)</b>	<b>ASTMC 33</b>
<b>Gravité spécifique</b>	2.2	2.68	-
<b>Poids unitaire (kg / m<sup>3</sup>)</b>	1520	1750	-
<b>Absorption (%)</b>	1.3	0.86	-
<b>Module de finesse</b>	1.6	2.5	2.3- 3.1
<b>Matériaux plus fins que 75 µm (%)</b>	8	0.8	3 max

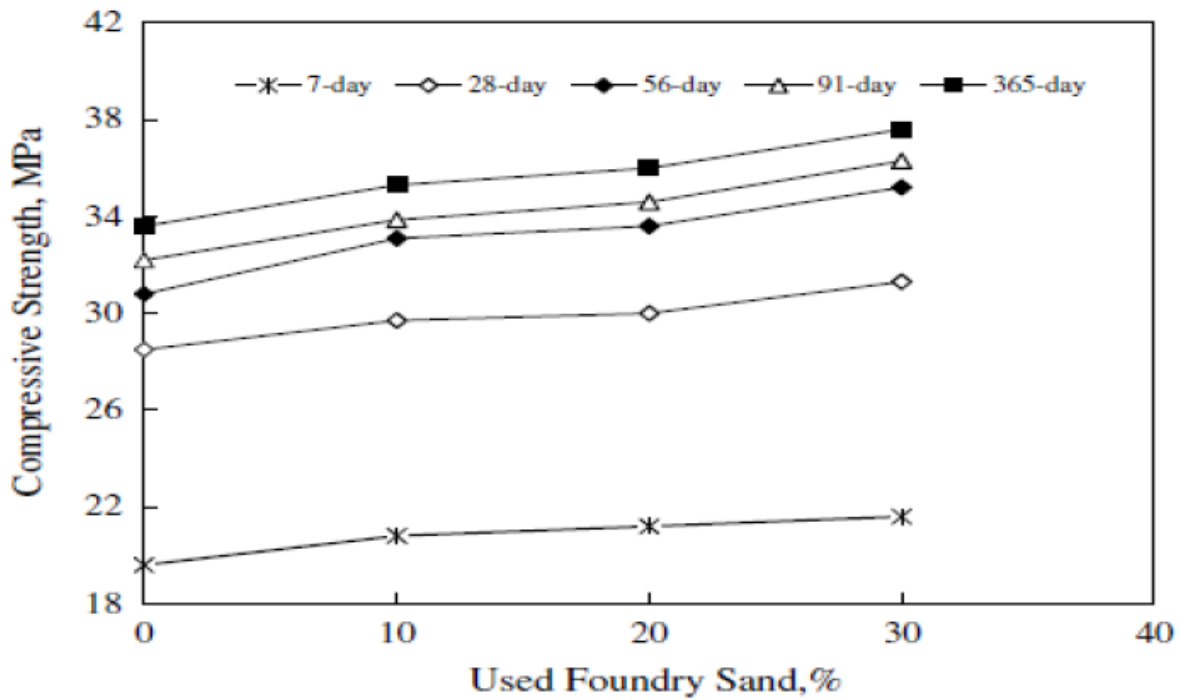


Figure I.11: Résistance à la compression en fonction de la teneur en sable de fonderie utilisé et de l'âge de durcissement [23].

La figure I.11 montre qu'il y a eu une augmentation de la résistance à la compression des mélanges de béton avec l'inclusion de SFU en remplacement partiel du sable ordinaire. À 28 jours, le mélange de contrôle M-1 (0% SFU) a atteint une résistance à la compression de 28,5 MPa, tandis que les mélanges M-2 (10% SFU), M-3 (20% UFS), M-4 (30% SFU) ont atteint une résistance à la compression de 29,7, 30,0, et 31,3MPa, respectivement ; une augmentation de 4,2%, 5,2% et 9,8% par rapport à la résistance du mélange de contrôle M-1 (0% SFU). Avec l'âge (de 56 à 365 jours), le pourcentage d'augmentation de la résistance à la compression du mélange témoin (sans SFU) était compris entre 8 et 18 %, entre 11,4 et 18,8% pour le mélange M-2, entre 12 et 20 % pour le mélange M-3 et entre 12,4 et 20 % pour le mélange M-4. L'augmentation de la résistance à la compression des mélanges de béton incorporant du sable de fonderie usagé a indiqué que le sable de fonderie pouvait être utilisé avec succès dans la fabrication du béton comme remplacement partiel des agrégats fins. L'augmentation de la résistance à la compression avec l'inclusion de SFU pourrait probablement être due au fait que SFU est plus fin que le sable ordinaire, ce qui se traduit par une matrice de béton plus dense, et aussi à la teneur en silice présente dans SFU.

### Effet sur la résistance à la fissuration :

Siddique et al. (2007), ont déterminé l'effet du sable de fonderie usé, en tant que remplacement partiel des agrégats fins, sur la résistance à la traction du béton. Les proportions de granulats fins remplacés étaient de 10, 20 et 30%. Des tests ont été effectués à l'âge de 28 et 56 jours. Les résultats des tests de résistance à la traction de fendage sont présentés à la figure I.12. Le résultat a conclu que la résistance à la traction de fendage augmente avec l'augmentation du sable de fonderie. À l'âge de 28 jours, la résistance à la traction de fendage augmente de 12, 14 et 20 % par rapport à un mélange ordinaire sans sable de fonderie, alors que l'augmentation était de 6,0, 10 et 20 % à l'âge de 56 jours. La résistance à la traction de fendage à 56 jours était supérieure de 20, 14, 14 et 20 % à celle de 28 jours [23]

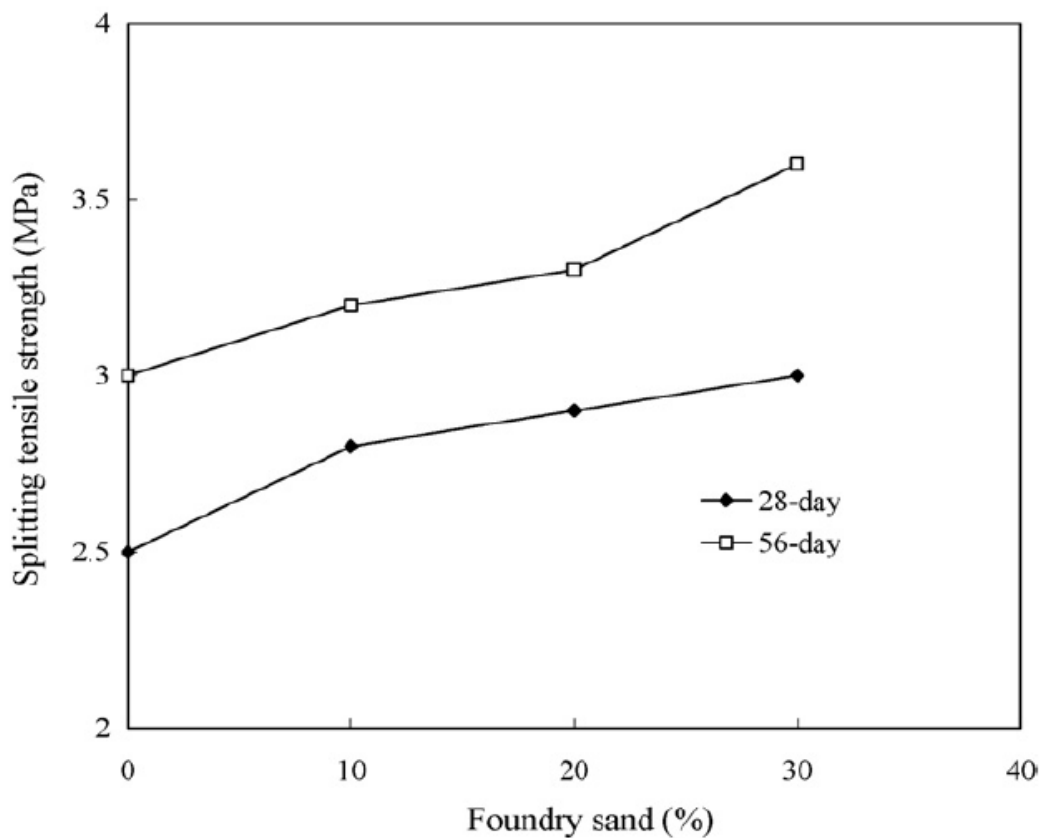


Figure I.12: Résistance à la traction par fendage versus sable de fonderie usé [23].

Siddique et al. (2009) ont étudié les propriétés mécaniques des mélanges de béton dans lesquels les fines (sable ordinaire) a été partiellement remplacé par du sable de fonderie usagé (SFU). 150 x 300 mm Des cylindres ont été coulés à cet effet. Les agrégats fins ont été remplacés par trois pourcentages (10 %, 20 % et 30 %) de SFU en poids. La résistance à la traction et à la fissuration des mélanges de béton Les données de l'enquête ont été mesurées à

l'âge de 7, 28, 56, 91 et 365 jours. Le site La variation de la résistance à la traction de fissuration en fonction de la teneur en SFU était similaire à celle observée dans le cas de la résistance à la compression. Augmentation de la résistance à la traction des mélanges de béton avec l'augmentation du contenu de SFU. La figure I.13 montre l'effet sur le béton à différents âges. À 28 jours, la résistance à la traction du mélange témoin M-1 (0 % SFU) était de 2,75 MPa, alors que les mélanges M-2 (10% SFU), M-3 (20% SFU) et M-4 (30% SFU) ont atteint la solidité de 2,85, 2,9 et 3,0MPa, respectivement. À 56 jours, les mélanges M-1 (0 % SFU), M-2 (10 % SFU), M-3 (20 % SFU) et M-4 (30 % SFU) ont atteint des valeurs de 2,93, 3,1, 3,17 et 3,24MPa, respectivement ; une augmentation de 6,5%, 8,8%, 9,3% et 8% par rapport à l'effectif de 28 jours. Une tendance similaire a également été observée avec des résultats de résistance à la traction de 91 et 365 jours de fendage. Avec l'augmentation de l'âge de 56 à 365 jours, le pourcentage d'augmentation de la résistance à la traction de la fonte pour (sans SFU) se situait entre 6,5 % et 12,7 %, 8,7 % et 13 % pour le mélange [23] M-2, 9,3% et 14,5% pour le mélange M-3 et 8% et 15% pour le mélange M-4.

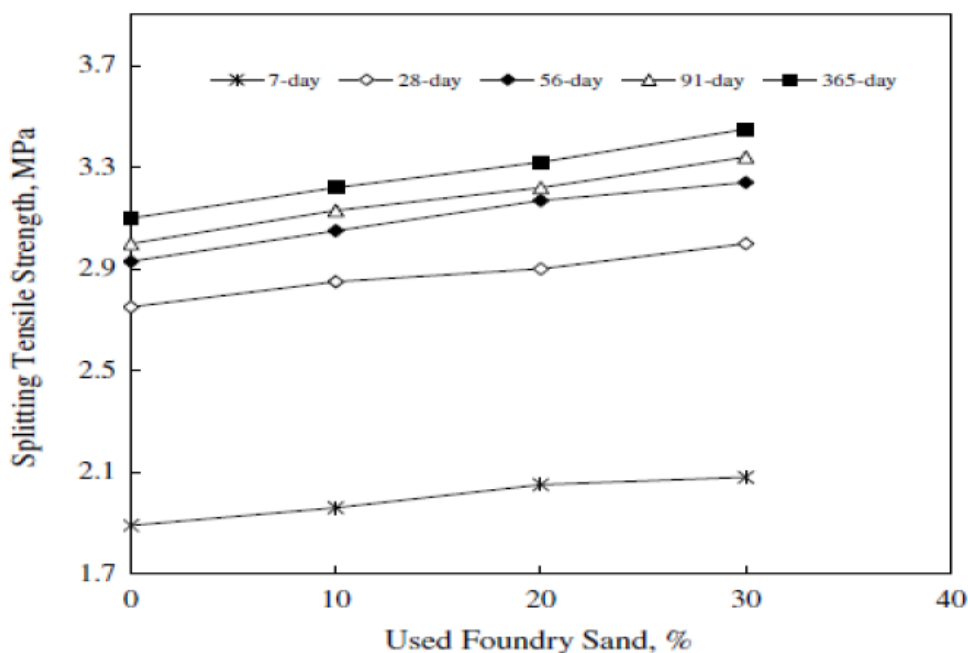


Figure I.13 : Résistance à la rupture en traction en fonction de la teneur en SFU utilisé et de l'âge de durcissement [23].

Bakis et al. (2006) ont étudié l'utilisation de déchets de sable de fonderie (SFU) dans le béton asphaltique [23]. Des mélanges de béton asphaltique ont été préparés en remplaçant 0, 4, 7, 10, 14, 17 et 20 % des agrégats fins avec le SFU. Des tests ont été effectués pour la résistance à la traction indirecte selon la norme AASTHO (1989). Les résultats de la résistance à la

traction indirecte sont présentés à la figure I.14. La résistance de mélange de béton bitumineux ont connu une diminution presque linéaire, le pourcentage de SMA étant de a augmenté, passant de 1,39MPa avec une SMA de 0 % à 0,94MPa avec une SMA de 20 %.

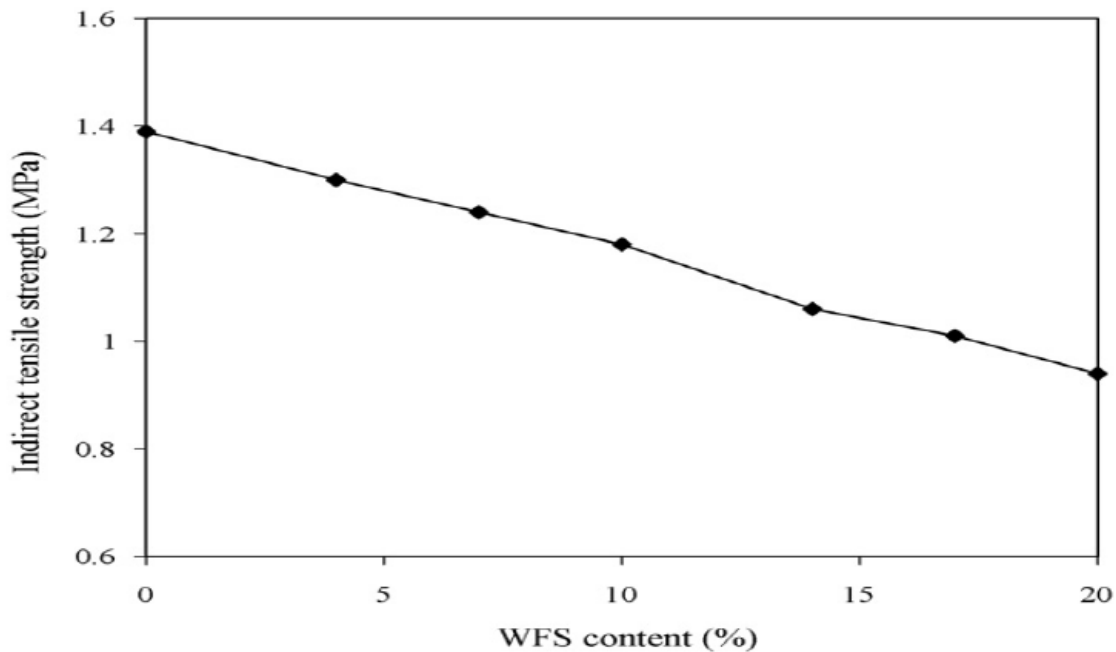


Figure I.14 : Résistance à la traction indirecte des mélanges de ciment bitumineux SFU selon AASTHO T283 [23].

#### Effet sur Résistance à la flexion :

Siddique et al. (2009) ont étudié les propriétés mécaniques des mélanges de béton dans lesquels les fines (sable ordinaire) a été partiellement remplacé par du sable de fonderie usagé (SFU). Des poutres de 101,4 x 101,4 x 508 mm ont été coulées pour la résistance à la flexion. Les agrégats fins ont été remplacés avec trois pourcentages (10 %, 20 % et 30 %) de SFU en poids [25]. Résistance à la flexion du béton les mélanges faits avec et sans SFU ont été déterminés à l'âge de 7, 28, 56, 91 et 365 ans jours. Les résultats des essais de résistance à la flexion des mélanges de béton sont présentés à la figure I.15. A 28 jours, la résistance à la traction du mélange de contrôle M-1 (0% SFU) était de 3,41MPa, alors que les mélanges M-2 (10% SFU), M-3 (20% SFU) et M-4 (30% SFU) ont atteint des niveaux de 4,0, 4,1 et 4,18MPa, respectivement. La résistance à la flexion des mélanges de béton a légèrement augmenté avec l'augmentation du contenu de SFU.

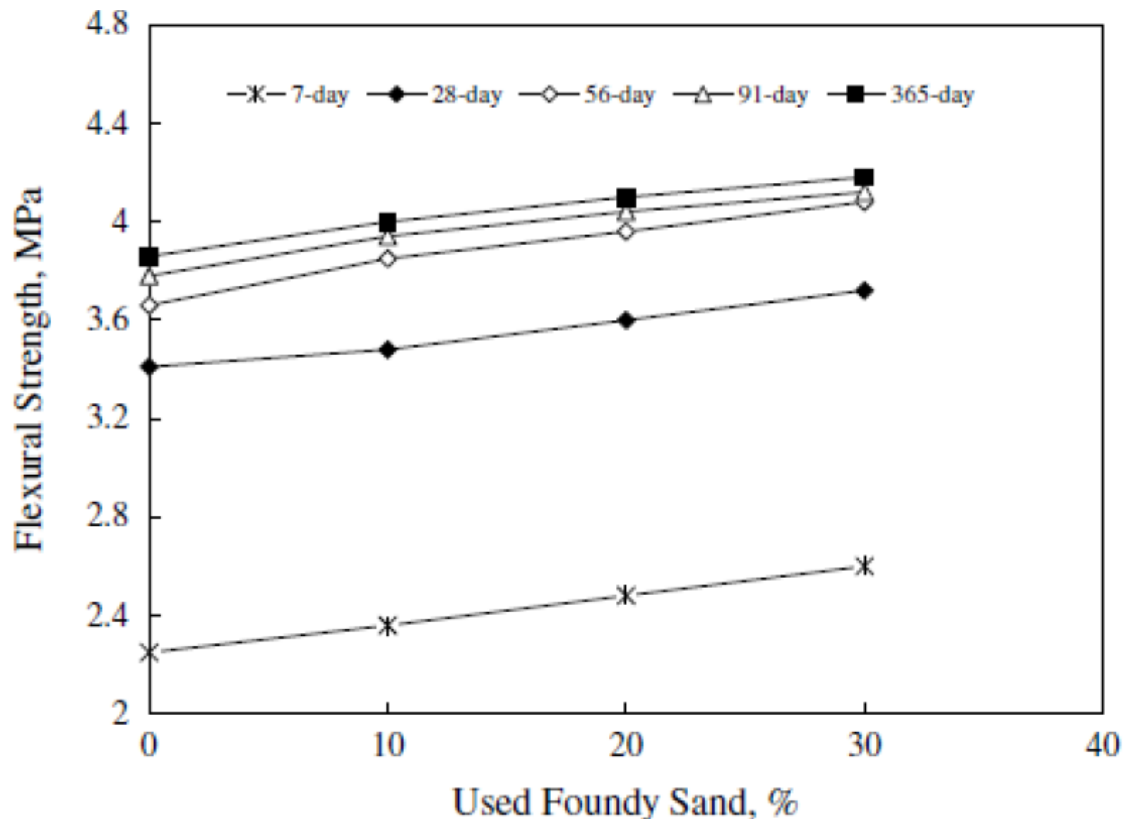


Figure I.15: Résistance à la flexion en fonction de la teneur en sable de fonderie et de l'âge de durcissement [23].

#### Module d'élasticité

Siddique et al. (2007), ont déterminé l'effet du sable de fonderie utilisé comme remplacement partiel des agrégats fins sur le module d'élasticité du béton. Les proportions de granulats fins ont été remplacés par 10, 20 et 30 %. Les tests ont été effectués à l'âge de 28 et 56 jours. Les résultats du module d'élasticité sont présentés dans les figures I.16. Le résultat a permis de conclure que le module d'élasticité des bétons de cendres volantes de sable de fonderie avec 0, 10, 20 et 30% de fines Le remplacement des agrégats (sable) a été plus élevé que le mélange témoin à tous les âges. Il est également évident que le module d'élasticité de tous les mélanges continuait à augmenter avec l'âge [23].

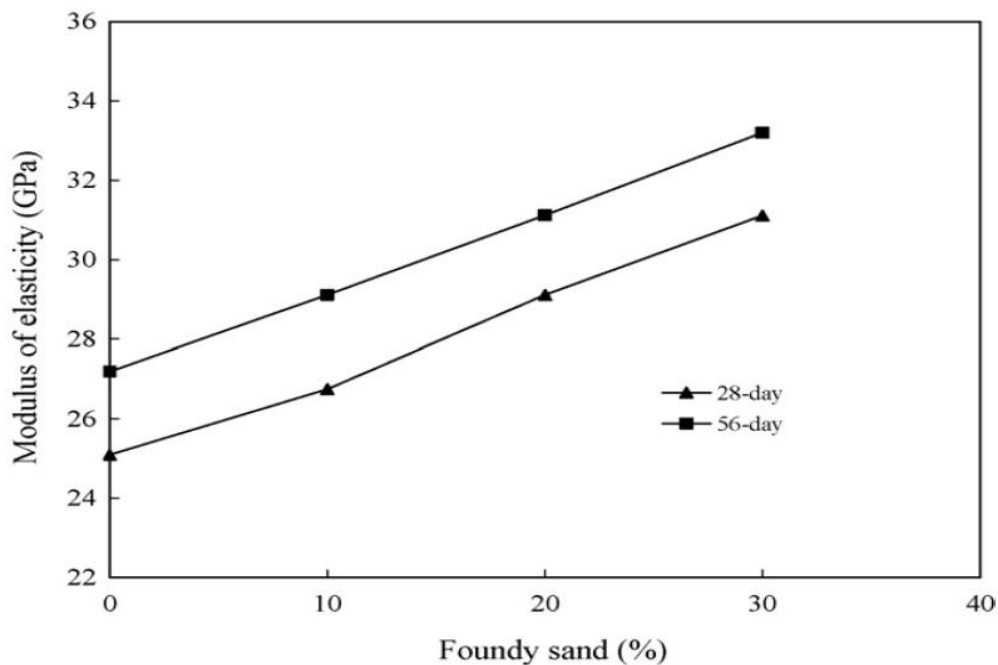


Figure I.16: Module d'élasticité en fonction du sable de fonderie utilisé [23].

Naik et al. (1994) ont étudié la performance du béton frais et durci contenant des sables de fonderie mis au rebut à la place des agrégats fins. Au total, cinq mélanges de béton (deux contenant 25 % et 35 % de remplacement partiel du sable ordinaire par du sable de fonderie usagé, deux contenant 25 % et 35 % de remplacement partiel du sable ordinaire par du sable de fonderie propre/neuf, et un mélange témoin) ont été étudiés. Des cylindres de 150 mm x 300 mm (6 in. x 12 in.) ont été coulés conformément à la norme ASTM C 192 pour la mesure du module d'élasticité du béton [23].

Le module d'élasticité du béton contenant 25 % et 35 % de sable de fonderie usagé est inférieur à celui du mélange témoin au début de la vie. Toutefois, à 28 jours, le mélange de contrôle et le mélange contenant 25 % de sable de fonderie présentent approximativement la même valeur de module d'élasticité. Cependant, le module d'élasticité à 28 jours du béton contenant 25 % et 35 % de sable de fonderie.

Le sable de fonderie propre est légèrement supérieur à celle du mélange témoin.

### Résistance au gel et dégel

Guney et coll. (2010), ont étudié la réutilisation potentielle des déchets de sable de fonderie dans la production de béton à haute résistance. Le sable fin naturel est remplacé par des déchets de sable de fonderie (0%, 5%, 0% et 15%). Après 120 jours de durcissement, les échantillons ont été congelés dans une chambre de température à  $-24 \pm 1$  OC pendant 24 h, puis décongelé selon la norme ASTM C666. La durabilité du béton dans des conditions climatiques variables est une condition essentielle pour son application dans les sections extérieures des bâtiments et des structures. Des tests de résistance au gel-dégel du béton ont été effectués selon la norme ASTM C 666 sur des cubes de 100 mm soumis à une congélation



et une décongélation cycliques dans la plage de températures de -24 à +24 [28]. La résistance à la compression non confinée a été mesurée avant et après 80 cycles de congélation et de décongélation. Les résultats obtenus pour le module d'élasticité dynamique,  $E_d$ , sont représentés sur la figure I.17.

On peut observer que la résistance à la compression et le module d'élasticité dynamique diminuent avec les cycles de congélation et de décongélation. La même tendance a été constatée dans tous les mélanges; De plus, les échantillons de béton contenant 10% de mélange de sable de fonderie sont légèrement influencés par les cycles de congélation et de décongélation par rapport aux autres taux de remplacement du sable de fonderie.

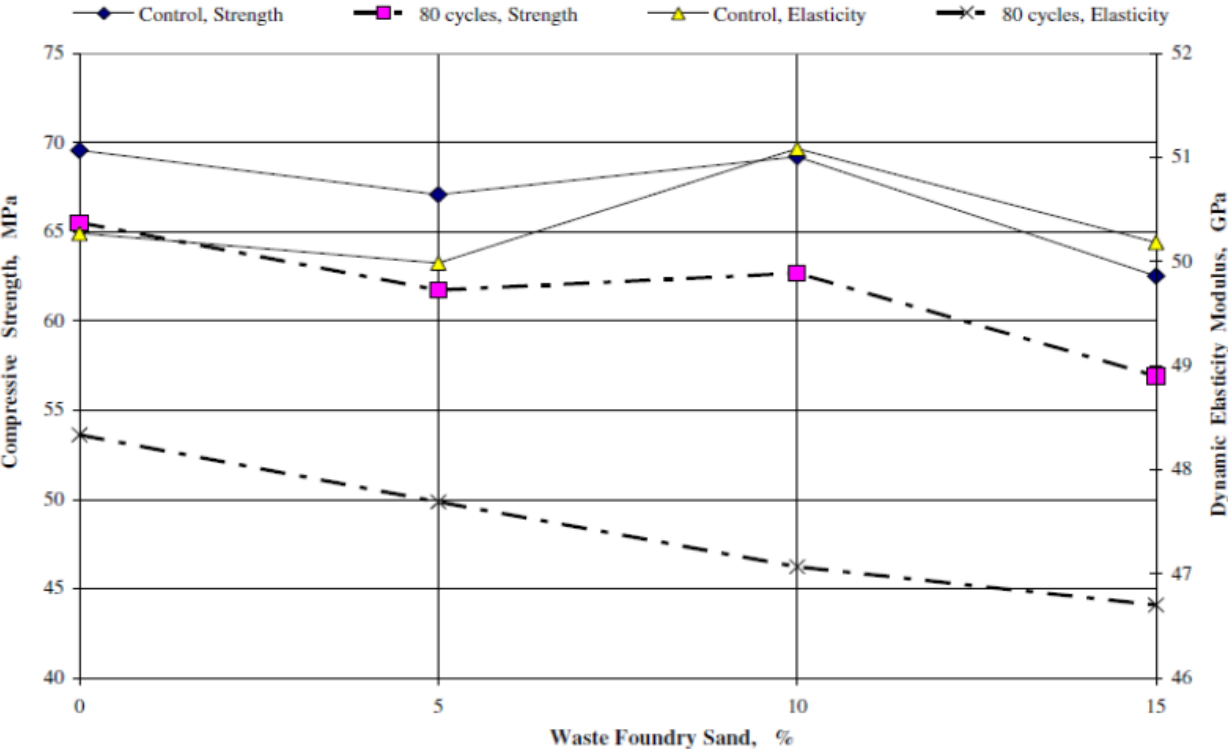


Figure I.17: Influence du gel-dégel sur la résistance à la compression et l'élasticité dynamique [23].

## I.10. Rhéologie des MAP

### I.10.1. Introduction

La rhéologie est une science qui étudie l'écoulement des matériaux sous l'effet des contraintes. Il ya deux grandeurs physiques fondamentales qui composent la rhéologie, une grandeur appelée contrainte de cisaillement qui donne création de mouvement et deux grandeurs physiques cinématique appelées déformation et vitesse de cisaillement. Le but de la rhéologie est de décrire les relations entre les contraintes, les déformations et les vitesses de déformation d'un élément de volume.

### I.10.2. Paramètre rhéologique

#### I.10.2.a. Viscosité

La viscosité dynamique  $\mu$ , appelée aussi viscosité apparente se caractérise par le déplacement d'une molécule dans un milieu encombré par les autres. C'est la caractéristique du fluide qui produit des forces de frottement quand il est mis en écoulement. Cet effet provoqué par la friction interne des molécules de la couche sous-jacente sur celle de la couche supérieure, est appelé la viscosité [24].



Figure I.18: Schéma glissement des couches [24].

La viscosité est la résistance à l'écoulement d'un système soumis à une contrainte tangentielle, Le coefficient de viscosité est une grandeur physique qui joue un rôle essentiel dans la rhéologie des fluides. Sa connaissance satisfait parfois à caractériser le comportement rhéologique du matériau [29].

#### I.10.2.b. Contrainte de cisaillement

Au cours d'un mouvement laminaire de cisaillement, les couches sont animées d'un mouvement relatif les unes par rapport aux autres. Il en résulte l'arrivée de contraintes  $\tau$ , qui s'exerce tangentiellement à la surface de la couche. Conrrazé G., Grossiord J.L [25]. Donc, on peut dire que la contrainte de cisaillement est la force que l'on exerce par unité de surface du fluide:

$$\tau = dF/dS \dots\dots\dots(1)$$

où:

$dS$  : surface élémentaire d'une couche cisailée.

$dF$  : projection de la force de frottement tangentielle.

### I.10.2.c. Vitesse de cisaillement

Considérons un matériau comme un ensemble de couches moléculaires parallèles emprisonnées entre 2 plans parallèles de surface, séparés d'une distance  $h$ . Un des plans est fixe, et le second est déplacé d'une distance  $dx$  à une vitesse constante de norme  $V_0$ .

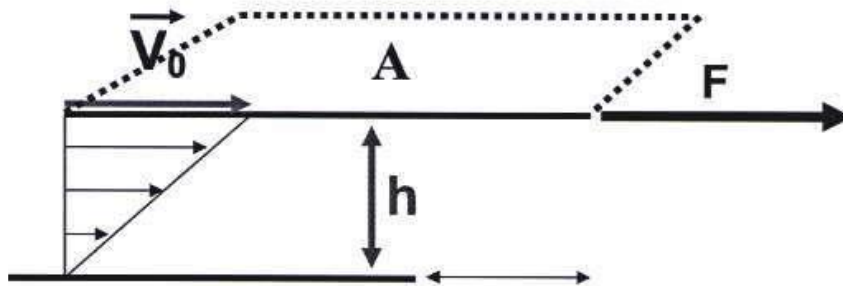


Figure I.19: Schéma de vitesse de cisaillement.

Sous l'effet de la force tangentielle, la première couche moléculaire se déplace à la même vitesse. Les couches inférieures vont se mouvoir dans la même direction mais avec des vitesses de plus en plus petites. Ils se créent un gradient de vitesse entre les deux plans. Le déplacement entre les deux plans est défini comme la déformation, symbole  $\gamma$  suivant la relation:  $\gamma = dx/dz$  ..... (2)

La norme du gradient de vitesse constant dans tout l'échantillon est définie comme la vitesse de cisaillement Appelée également vitesse de déformation ou taux de cisaillement, il s'agit de la vitesse de déformation entre deux couches successives voisines du fluide cisailé. Elle est souvent présentée comme étant la dérivée par rapport au temps de la déformation de cisaillement. Conrrazé G., Grossiord J.L [27].

### I.10.2.d. Seuil de cisaillement

Le seuil de cisaillement est la contrainte de cisaillement minimale pour initier l'écoulement d'un matériau. En dessous du seuil de cisaillement le matériau ne s'écoule pas. Wallevik [28] a dit qu'il ya deux seuils de cisaillement conduisant à des notions physiques différentes :

- Le seuil de cisaillement statique correspond à la contrainte nécessaire à fournir pour déclencher l'écoulement du matériau. Il correspond à la contrainte minimale fournie pour obtenir le premier signe d'écoulement.

- Le seuil de cisaillement dynamique  $\tau_0$ , est la contrainte minimale pour stopper l'écoulement (passage de l'état viscoplastique à l'état solide). Il est obtenu par interpolation de la courbe d'écoulement à une vitesse de cisaillement nulle.

### I.10.3. Les essais rhéologiques

La connaissance du comportement rhéologique du béton est indispensable pour le bon déroulement d'une construction. Il permet de prédire l'énergie nécessaire pour le mettre en place. Il existe plusieurs essais pour caractériser ce comportement. D'une part, des essais empiriques de maniabilité (cône d'Abrams, l'appareil Vébé, la table à secousses, le maniabilimètre LCPC), d'autre part, les essais rhéologiques qui donnent plus de précision sur le comportement du béton : essais aux rhéomètres (Two-Point, BML, BTRHEOM, CEMAGREF-IMG, ICAR...).

Essais aux rhéomètres :

Les rhéomètres sont des appareils utilisés pour déterminer le comportement rhéologique des matériaux. Ils peuvent être classés grossièrement en trois grandes catégories, selon leur régime de fonctionnement [29] :

- Les rhéomètres fonctionnant en régime permanent : ils permettent de déterminer les caractéristiques en écoulement des substances liquides.
- Les rhéomètres fonctionnant en régime transitoire : ils permettent de déterminer les caractéristiques viscoélastiques des substances liquides ainsi que des solides.
- Les rhéomètres fonctionnant en régime dynamique (sinusoïdal) : ils permettent de déterminer de manière très complète les caractéristiques rhéologiques, y compris des propriétés en régime d'écoulement et des propriétés viscoélastiques des matériaux liquides ou solides.

Les rhéomètres fonctionnant en régime permanent permettent largement d'étudier le comportement rhéologique des matériaux cimentaires, Dans cette catégorie, deux types de rhéomètres se distinguent :

- Les rhéomètres de type Couette.
- Les rhéomètres de type Poiseuille.
- Les rhéomètres de type Couette.

Les rhéomètres de type Couette sont des rhéomètres dans lesquels le fluide étudié est cisailé entre deux surfaces solides dont l'une est fixe et l'autre mobile. Différents modèles existent en

fonction de la forme et du mouvement relatif des surfaces solides, 4 variantes se distinguent [31] :

- Les rhéomètres rotatifs à cylindres coaxiaux.
- Les rhéomètres plans à translation.
- Les rhéomètres rotatifs à cône-plateau.
- Les rhéomètres rotatifs à plateau-plateau.

- Les rhéomètres de type Poiseuille

Le principe de fonctionnement des rhéomètres de type Poiseuille est relativement simple. Le fluide s'écoule dans un tube cylindrique de rayon  $R$  et de longueur  $L$ , soit sous l'effet de la pesanteur (tube en position verticale), soit sous l'effet d'un gradient de pression (tube en position horizontale soumis à une différence de pression  $\Delta p$  entre ses deux extrémités), soit sous l'effet d'une conjonction de ces deux actions (le tube est en position verticale soumis à une différence de pression  $\Delta p$  entre ses deux extrémités).

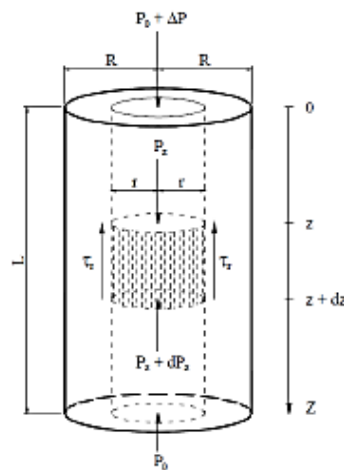


Figure I.20: Représentation schématique du principe de fonctionnement des rhéomètres de type Poiseuille [31].

#### I.10.4. Les paramètres influents sur la rhéologie des bétons frais

##### I.10.4.a. La composition

Tous les changements apportés à la composition du béton influencent, à des niveaux divers, ses propriétés. Les principaux facteurs sont :

- L'eau et le rapport eau-ciment.
- Les caractéristiques chimiques et physiques du ciment.
- Les adjuvants.

- Les ajouts minéraux.

#### I.10.4.b. Le type de ciment

L'influence de la composition du ciment Portland sur les propriétés rhéologiques a été largement étudiée. Suhr [26] a montré que le seuil de cisaillement augmente proportionnellement à la teneur en C3A et diminue quand la concentration en SO3 augmente. En outre, Asakusa et al. [27] ont constaté que la viscosité des pâtes de ciment augmente sensiblement dans le ciment ayant un faible rapport C3S/C2S ou C3A/C4AF lorsqu'un superplastifiant de PNS est employé.

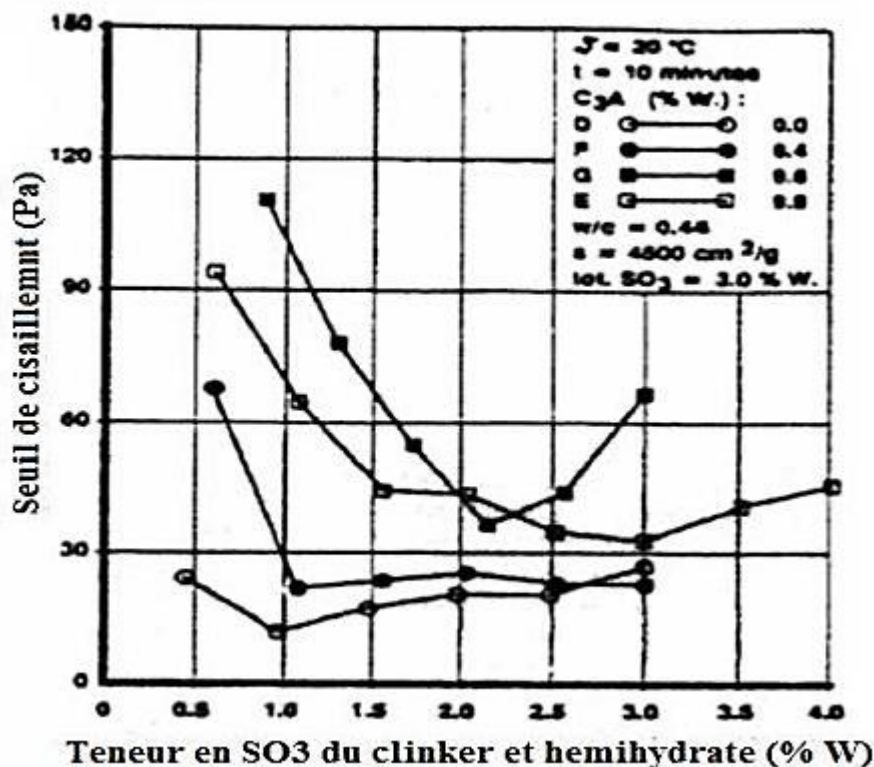


Figure I.21: Effet de C3A et de SO3 sur le seuil de cisaillement [33].

Le premier point s'explique par le fait que la rigidité du milieu est essentiellement fonction de la formation d'ettringite dans la phase interstitielle, elle-même issue de l'hydratation des aluminates tricalciques [29].

#### I.10.4.c. Rapport eau-ciment

Le seuil de cisaillement et la viscosité diminuent avec l'augmentation du rapport E/C [28] , La figure 1.26 montre l'influence du rapport E/C sur les paramètres rhéologiques du béton.

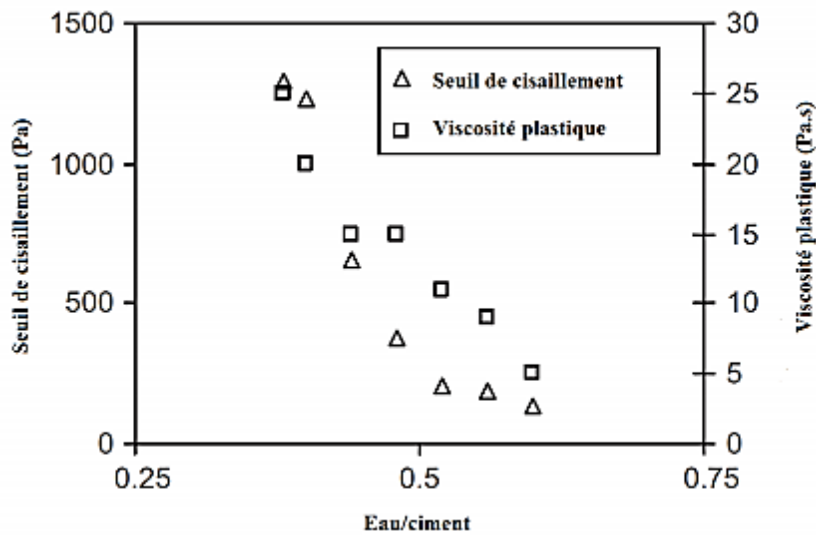


Figure I.22: Effet du rapport E/C sur les paramètres rhéologiques des bétons [28].

#### I.10.4.d .Les Adjuvants

Il est relativement difficile de prédire quel sera l'effet de tel ou tel adjuvant sur la rhéologie du mélange final. Il faut au préalable faire des essais pour connaître exactement l'effet d'un adjuvant. De plus, des interactions chimiques et physiques sont possibles entre les différentes composantes du mélange, ce qui complique la prédiction de la rhéologie finale. Des tendances générales peuvent être tracées mais une prédiction précise est quasiment impossible [29].

#### I.10.4.e. Le malaxage

D'après Banfill [28] l'augmentation de la vitesse de malaxage d'un mortier dans un rhéomètre accélère l'hydratation du ciment, le taux d'accroissement du moment de cisaillement engendre une augmentation de la contrainte de cisaillement et de la viscosité. En effet, l'hydratation entraîne via la formation de semi hydrates et de chaux, une augmentation de la teneur en solides. Parallèlement l'énergie apportée par le malaxage augmente la température du mélange, (ce qui engendre une diminution du seuil de cisaillement et une augmentation de la viscosité plastique.

#### I.10.4.f. Le temps

Le temps occupe une place particulière étant donné qu'il s'agit du seul facteur qui ne fait pas intrinsèquement partie de la composition du béton. La durée de la période où le béton frais reste suffisamment maniable est limitée dans le temps à cause du processus d'hydratation. Quand cette limite est dépassée, le béton perd sa maniabilité et son comportement rhéologique est modifié

Avec le temps, du fait de l'avancement de la réaction d'hydratation, la quantité d'hydrates augment. [30] montre une augmentation du seuil de cisaillement et une stabilité de la viscosité plastique au cours de la première heure.

L'avancement de la réaction d'hydratation engendre un accroissement de la formation d'ettringite et suscite une rigidification de la suspension par l'accroissement de la concentration en solides. Il en résulte une élévation des valeurs du seuil de cisaillement et de la viscosité plastique avec l'avancement de la réaction [30].

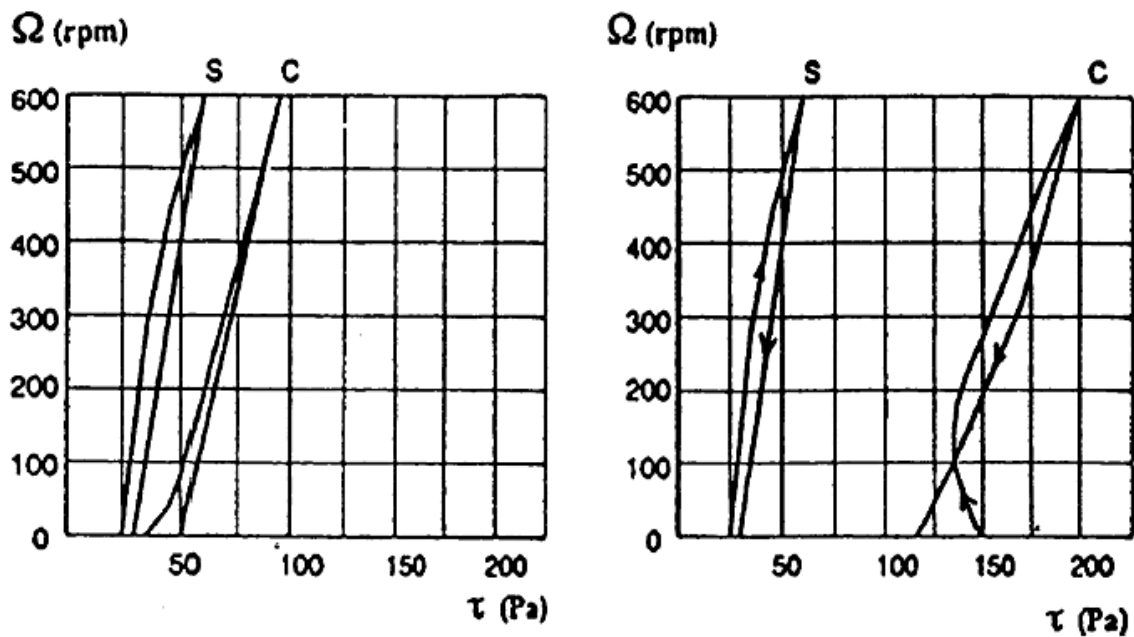


Figure I.23 : Évolution du comportement rhéologique en fonction du temps Pâte E/C=0,4 S : Quarts (pâte inerte), C : Ciment (pâte active) [30].



## **I.11.Conclusion**

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

## **Chapitre II :**

### **MATERIEUX ET ESSAIS**

## II.1.Introduction

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

## II.2.Caractéristique des matériaux utilisés

### II.2.1.ciment

Dans cette étude nous avons utilisé un ciment composé type CEM II/A 42.5 fabriqué par la cimenterie de Lafarge à MEFTEH en Algérie. sa résistance minimale en compression à 28 jours est de 42,5MPa avec une résistance à la compression à 28jours de 45.55MPa. La résistance à la compression a été réalisée sur un mortier normalisé.

#### II.2.1.a. Caractéristiques physiques du ciment

Tableau II.1 : les caractéristiques physiques du ciment.

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

#### II.2.1.b. Caractéristiques chimiques

Tableau II.2 : les caractéristiques chimiques de ciment.

<b>CaO</b>	<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>FeO<sub>3</sub></b>	<b>SO<sub>3</sub></b>	<b>Na<sub>2</sub>O</b>	<b>K<sub>2</sub>O</b>	<b>MgO</b>	<b>Chlorures</b>	<b>PAF</b>
60.4	20.71	5.45	3.63	2.37	0.23	0.65	2.15	0.007	4.28

### II.2.1.c.caractéristiques mécaniques du ciment

Tableau II.3 : les caractéristiques mécaniques du ciment

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

### II.2.2.sable

Nous avons utilisé trois types de sables dans notre étude :

Le premier provient de la région de Baghliia, c'est un sable grossier, roulé de forme arrondie et d'une surface lisse. Le deuxième est caractérisé par sa finesse très élevée, il provient de la région d'Oued Souf. Le troisième sable est un sable de fonderie usé, il provient de l'entreprise POVAL de Berrouaghuaia. Dans notre travail, nous avons utilisé ce sable comme sable et comme ajout. Le sable a été soumis à plusieurs essais au laboratoire de Génie civil de l'université de Blida, suivant les normes françaises AFNOR. Après traitement du sable, on a obtenu les résultats des essais physiques et l'analyse granulométrique suivant :

#### II.2.2.a. Caractéristiques de sable grossier

Tableau II.4 : les Caractéristiques de sable grossier.

$\rho$ abs (g/m <sup>3</sup> )	$\rho$ app (g/cm <sup>3</sup> )	E sv	E sp	MF2
2.78	1588	97.52	95.54	3.71

### II.2.2.b caractéristiques de sable fin

Tableau II.5 : les caractéristiques de sable fin.

<b><math>\rho</math> abs (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b><math>\rho</math> app (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>E sv</b>	<b>E sp</b>	<b>MF1</b>
2.73	1479.5	85.71	85.71	1.29

### II.2.2.c. Caractéristiques de sable corrigé

Tableau II.6 : les Caractéristiques de sable corrigé.

<b><math>\rho</math> abs (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b><math>\rho</math> app (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>E sv</b>	<b>E sp</b>	<b>MF</b>
2.52	1605	93.96	93.41	2.5

### II.2.2.d. Essais réalisés

- Masse volumique apparente :

Nous avons mesuré la masse volumique apparente des sables de dunes étudiés, par la détermination de la masse d'un remplissage d'une mesure de un litre, qui doit être effectué sans aucun tassement. 3 essais ont été effectués. La précision de la balance utilisée est de 0.1grammes.

$$MVap = \frac{M}{V} \dots \dots \dots (3)$$



Figure II.1 : Mesure de la masse volumique apparente du sable.

- Masse volumique absolue :

Nous avons rempli l'éprouvette d'un volume d'eau (noté V1). Ensuite nous avons introduit dans l'éprouvette environ 300g de l'échantillon testé (notée Ms). Après l'élimination de toutes les bulles d'air par une légère agitation, nous avons lu le nouveau volume (noté V2). La Lecture des volumes a été faite en bas du ménisque. La masse est alors calculée :

$$MV_{ab} = \frac{Ms}{V2 - V1} \dots \dots \dots (4)$$

- Essais l'équivalent de sable

Le sable est un grain minéral dont le diamètre est inférieur à 5mm. Il est utilisé dans le mortier a fin de combler les vides entre les grains de gravier.

A l'état naturel, le sable se compose de grains de diamètres inférieurs à 5mm. Mais, il compose de grains minéraux comme de grains organiques (argile). Ces grains organiques sont un diamètre inférieur à 0.08mm. Le mélange est appelé sable à partir du moment ou à l'oeil, il se compose d'avantage de grain supérieur à 0.08mm. Cela signifie que le mot sable désigne deux choses. Le sable brut composé uniquement de grains minéraux et le sable tel qu'on le trouve dans la nature composé d'un mélange de sable brut et d'argile.

$$Es = \frac{h2}{h1} * 100 \dots \dots \dots (5)$$

ESV >85 et ESP >80 on dit : le sable est très propre.

- Essais de l'analyse granulométrique

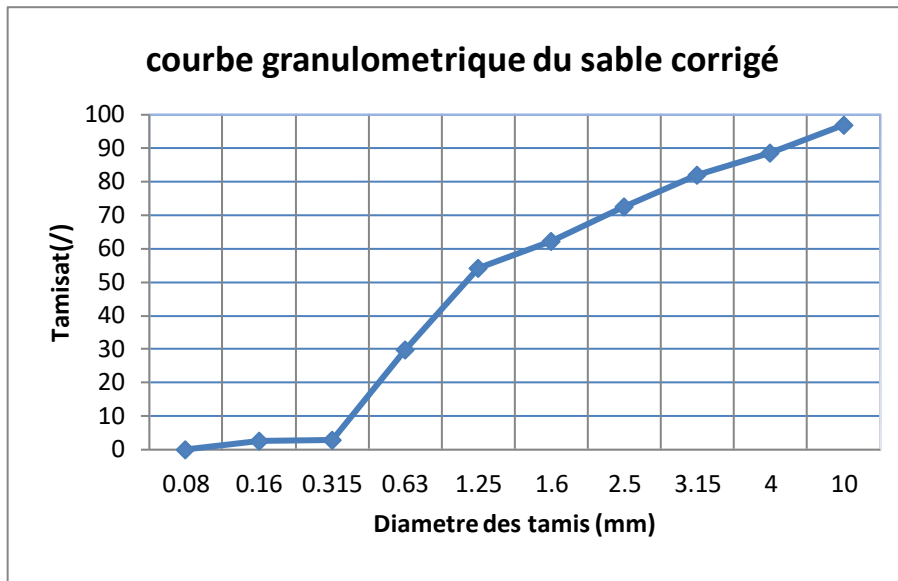


Figure II.2 : Analyse granulométrique du sable corrigé.

Sable fin : MF1=1.35

Sable grossier : MF2=3.65

$$G1=(2.5-3.71)/(1.29-3.71)=0.5$$

$$G2=(1.29-2.5)/(1.29-3.71)=0.5$$

Il faut alors un mélange de 50% du sable1 et 50% du sable2.

### II.2.3.Déchets de sable se fonderie

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



Figure II.3: Déchet de sable fonderie utilisé dans cette étude

Dans notre travail, les caractéristiques de ce sable ont été déterminées soit à l'état naturel ou broyer.

### II.2.3.a. Caractéristiques des sables de fonderie

Caractéristiques physiques du déchet des sables de fonderie.

Tableau II.7 : les Caractéristiques physiques du déchet des sables de fonderie.

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

### II.2.3.b .caractéristiques chimiques

Analyse chimique de sable de fonderie par fluorescence X

Tableau II.8 : Analyse chimique de sable de fonderie par fluorescence XB [23].

<b>Eléments</b>	<b>CaO</b>	<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>SO<sub>3</sub></b>	<b>Na<sub>2</sub>O</b>	<b>K<sub>2</sub>O</b>	<b>MgO</b>	<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>
<b>(%)</b>	6.328	60.762	11.688	9.642	1.851	0.010	1.281	2.195	0.010

### II.2.4. superplastifiants

Les adjuvants permettent d'obtenir une grande fluidité et une parfaite homogénéité nécessaire à l'obtention d'un MAP. L'adjuvant utilisé est un superplastifiant et haut réducteur d'eau composé de polycarboxylates,



Tableau II.8 : les caractéristiques de superplastifiant.

<b>Aspect</b>	Liquide
<b>Couleur</b>	marron
<b>Extrait sec</b>	30%
<b>Densité</b>	1,07 ± 0,01
<b>PH</b>	6 – 6,5
<b>Teneur en chlorures</b>	<0,1 g/l

### II.2.5.eau de gâchage

L'eau utilisée pour la confection des éprouvettes est une eau potable du robinet, propre et exempte d'impuretés.

### II.3.Formulation du mortier autoplaçant

Un grand nombre d'approches de formulation existe dans le cadre des BAP, nous avons retenu la méthode dite " Japonaise " proposée par Okamura [31]. Cette méthode consiste de formuler un BAP en composant en premier lieu le mortier, la méthode est purement expérimentale et nécessite pas beaucoup de moyen pour son application.

L'objectif de cette formulation est d'optimiser le dosage en superplastifiant afin d'obtenir un mélange optimal de chaque type de ciment pour un mortier autoplaçant homogène et stable « sans ségrégation et sans ressuage ».

Pour la confection du mortier, les proportions du mélange (ciment, sable, eau et superplastifiant) ont été calculées d'après l'exemple de composition de mortier donné à l'annexe A [32]. La séquence de malaxage est la même pour tous les mélanges du mortier dont la procédure est comme suit Figure II.4.

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

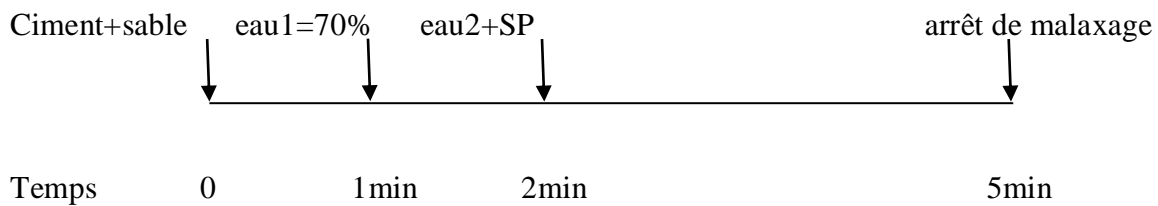


Figure II.4: Séquence de malaxage du mortier.

## II.4.Essais sur les MAP à l'état frais

### II.4.1.Essai d'étalement au Mini-Cône :

L'appareil se compose d'un moule tronconique de 40 mm de hauteur, un diamètre du haut de 70 mm et du bas de 80 mm [40]. L'essai d'étalement s'agit de remplir le moule tronconique placé au centre d'une plaque en acier horizontale lisse, une fois le moule est soulevé et le mortier s'écoule sur la plaque. Le diamètre d'étalement du mortier est mesuré suivant deux directions perpendiculaires pour retenir la moyenne. (D moyen). Le (D moyen) est calculé comme suit :

$$D = \frac{D1+D2}{2} \dots\dots\dots (6)$$

### II.4.2. Essai à l'entonnoir en V (V-Funnel test)

L'essai de l'entonnoir en V (V-funnel) consiste à remplir l'entonnoir de 1.1 litre de mortier et mesurer le temps d'écoulement entre l'instant de l'ouverture de l'orifice de l'entonnoir et l'instant de l'apparition de la première lumière en regardant verticalement vers le bas de l'entonnoir.

### II.4.3.Essai de rhéomètre

Le comportement et les paramètres rhéologiques du mortier autoplaçant sont déterminés par un rhéomètre développé de type couette (Heidolph- RZR 2102 Control Z). Ce type est généralement considéré comme étant le mieux adapté pour des suspensions concentrées possédant un seuil de cisaillement [34]. Le rhéomètre est composé d'un agitateur avec deux vitesses de rotation, croisillon vanne à quatre pales de 10 cm de hauteur et de 5 cm de diamètre, et d'un récipient cylindrique de dimension 13x10cm, le fonctionnement de ce rhéomètre est assisté par un logiciel avec un système d'acquisition des données qui sont exportées vers une feuille de calcul Excel.

Le principe consiste à mettre en rotation, à différentes vitesses, un cylindre ou une pale dans un échantillon cylindrique de mortier frais et mesurer le couple à appliquer pour engendrer

#### II.4.4.Essai au cône de Marsh

L'essai permet de mesurer la fluidité des MAP à travers le temps d'écoulement, il consiste à remplir le cône de March à un certain niveau avec la fermeture de l'orifice de 11 mm de diamètre. On lance le chronomètre au moment où on libère l'orifice. On arrête le chronomètre dès que le remplissage soit à ras du récipient d'un volume d'un litre placé au-dessous du cône. On détermine le comportement rhéologique de chaque mortier à l'aide d'une courbe qui présente les contraintes de cisaillement en fonction des taux de cisaillement. Le principe consiste à verser le mortier dans un récipient fixe et faire descendre le croisillon au récipient qui pénètre au centre du mortier tout en vérifiant que l'extrémité supérieure des ailes du croisillon est à ras du mortier. En se servant du logiciel, on lance la rotation du croisillon suivant un profil de vitesse imposé. [32].

#### II.5.Essais sur les MAP à l'état durci

##### II.5.1.Confection et conservation des éprouvettes

Les moules utilisés pour la confection des éprouvettes en mortiers sont de forme cylindrique (4x4x16) cm<sup>3</sup> de dimensions pour tous les essais à l'état durci.

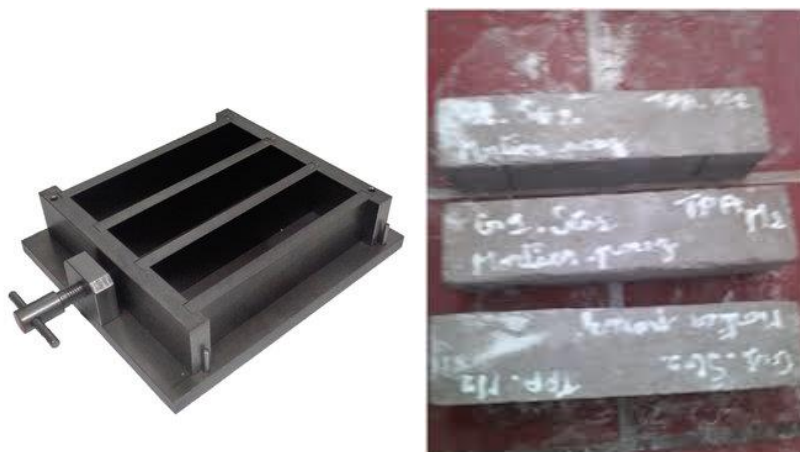


Figure II.5: Confection des éprouvettes (4x4x16) cm<sup>3</sup>.

Après la préparation des mortiers, des moules métalliques à trois alvéoles préalablement huilés ont été remplis par deux couches pour assurer l'homogénéité du mélange. Les éprouvettes ont été couvertes par un film plastique et stockés dans les conditions ambiantes du laboratoire. Après 24 heures, les échantillons ont été démoulés et conditionnés dans des bacs

remplis d'eau saturé en chaux à une température de 20 °C±2°C pour assurer une cure normalisé jusqu'à la date d'essai.



Figure II.6: Bac d'eau pour la conservation des éprouvettes.

### II.5.2.La résistance traction par flexion

Cet essai très utilisé permet de simuler le type de sollicitation le plus courant dans les éléments des ouvrages (Figure II.7). Les éprouvettes utilisées pour ce type d'essai son propre uniquement aux mortiers, elles sont prismatiques de dimensions 4x4x16 cm. La résistance à la traction par flexion est obtenue par l'application de la formule de résistance des matériaux suivante :

$$\text{Rt} = \frac{1,5 F l}{b^2} \dots\dots\dots(7)$$

Avec : F : la force applique sur l'éprouvette (N)

l : la distance entre appuis 100(mm)

b : la largeur de l'éprouvette 40(mm<sup>3</sup>) [43].



Figure II.7 : Essai de Traction par flexion sur MAP.

### II.5.3.La résistance à la compression

Les essais de compression sont effectués selon la norme EN 196-1. Les demi-prismes après rupture en flexion de l'éprouvette sont testés en compression sur les faces latérales du moulage sous une section de 40x40 mm<sup>2</sup> tels qu'illustre la figure II.8. La résistance en compression est la moyenne de six mesures .La résistance de compression est donnée par la

formule :  $R_c = \frac{F}{b^2} \dots \dots \dots (8)$

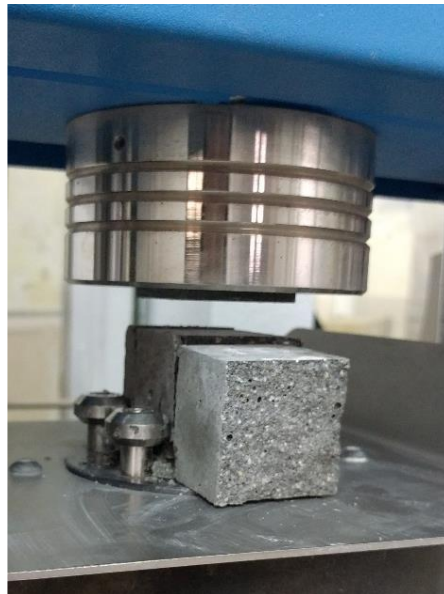


Figure II.8 : Essai de compression pour les MAP.

### II.5.4.Absorption capillaire

L'essai de l'Absorption capillaire est effectué selon les recommandations de la procédure d'ASTM [36] sur des éprouvettes prismatiques de (4x4x16) cm<sup>3</sup>. Le résultat est la moyenne de 3 mesures pour chaque échantillon. Après une cure humide d'un âge approprié, les éprouvettes ont été séchées dans une étuve ventilée à 80 ±2 °C, jusqu'à ce que la variation de la masse entre deux pesées soit inférieure à 0.1%. Les faces latérales des éprouvettes ont été surfacées par une résine de type Meda Poxy colle, pour assurer un écoulement unidirectionnel et éviter l'évaporation latérale de l'eau absorbée. Après le séchage les échantillons sont posés sur leur base, à l'aide des cales d'au moins 1cm d'épaisseur, dans un bac où le niveau d'eau est maintenu constant (environ 2 à 3 mm au dessus de la base de l'éprouvette) pendant toute la durée de l'essai. L'absorption est mesurée après (1, 2, 5, 10, 20, 30 mn, 1, 2, 3, 4, 5, 6h, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 jours), on relève le poids de chaque éprouvette après l'avoir essuyée d'un

chiffon humide, l'absorption est exprimée en g/cm<sup>2</sup> par le rapport (m initial - m finale) de l'augmentation de masse.

Le coefficient d'absorption capillaire **I** est défini par l'équation suivante :

$$I = \frac{Q}{A \cdot \gamma \omega} \dots \dots \dots (9)$$

- I : coefficient d'absorption (cm),
- Q : quantité d'eau absorbé en (g),
- A : surface en contact avec l'eau (cm<sup>2</sup>),
- $\gamma \omega$  : masse volumique d'eau = 1 g/cm<sup>2</sup>.

$$S = \frac{Q/A}{\sqrt{t}} \dots \dots \dots (10)$$

- Où :
- A : surface en contact avec l'eau en cm<sup>2</sup>,
- Q : quantité d'eau absorbé en (g),
- t : temps écoulé en (s),
- S : coefficient de sportivité (cm/ $\sqrt{s}$ ).

II.5.5.Porosité accessible à l'eau

L'essai permet d'évaluer un volume de pores ouverts accessibles à l'eau et nous permet aussi de mesurer la masse volumique apparente des échantillons. La porosité, notée  $\epsilon$  (%), correspond au rapport du volume total des pores ouverts dans un corps poreux à son volume apparent. L'essai consiste à faire sécher les éprouvettes à une température de  $80 \pm 2$  °C jusqu'à masse constante. On détermine la masse sèche d'échantillon  $M_{sec}$  à l'aide d'une balance de précision de 0.1g, ensuite on place les éprouvettes dans une enceinte fermée (dessiccateur) sous une pression constante pendant 4heures, 3heures sous vides et une heure en introduisant l'eau jusqu'à saturation et recouvrement des éprouvettes d'environ 20 mm, puis on déconnecte la pompe et les éprouvettes sont maintenu en saturation pendant  $18 \pm 2$ h. Enfin on fait sortir les éprouvettes et on les pèse dans l'eau ( $M_{eau}$ ) à l'aide d'une balance hydrostatique et on pèse à nouveau ( $M_{air}$ ).

La porosité accessible à l'eau  $\phi$  (%) est donnée par la relation suivante :

$$\phi = \frac{M_{air} - M_{sec}}{M_{air} - M_{sec}} \dots \dots \dots (11)$$

La masse volumique apparente est définie par l'expression :

$$\rho = \frac{M_{sec}}{M_{air} - M_{eau}} \dots\dots\dots(12)$$

### **Conclusion générale**

L'objectif de cette étude était l'utilisation des déchets de sable de fonderie en tant qu'ajout cimentaire et granulats fins (sable) dans la formulation des mortiers autoplaçants. Une étude bibliographique a été menée pour évaluer les propriétés à l'état frais et durcis des mortiers autoplaçants. À travers de l'étude bibliographique effectuée, on peut conclure que :

1- La résistance à la compression du mortier a diminué avec l'augmentation du remplacement du sable avec différents niveaux de remplacement du sable de fonderie. Cependant, à chaque niveau de remplacement, une augmentation de la résistance a été observée avec l'augmentation de l'âge.

2- La porosité du mortier diminue avec l'augmentation du remplacement du sable avec différents niveaux de remplacement du sable de fonderie.

3- Le mortier avec des déchets de sable de fonderie supérieurs à 10 % a montré des réductions de l'absorption d'eau et des taux de vides. La réduction de ces ratios peut être due à l'effet de remplissage des vides des matériaux de type argileux dans les sables de fonderie usés.

## Références

- [01] Okamura H., Ouchi M.; “Self-compacting concrete”, journal of advanced concrete Technology, Vol. 1, No. 1, pp 5-15, April 2003.
- [02] Okamura H. and Ouchi M., “Self-compacting concrete. Development, present and future”, Proceedings of First International RILEM Symposium on Self- Compacting Concrete (PRO 7)
- [3] EN 197-1, Ciment - Partie 1, Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants, Janvier 2019
- [4] EN 197-1, Ciment - Partie 1, Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants, Janvier 2019.
- [5] Effet de la nature du ciment sur la rhéologie des mortiers autoplçants, mémoire de master de l’université de Blida 1, juillet 2018.
- [6] Boukendakdji Etude de l’influence des paramètres de formulation sur les propriétés d’un béton autoplçant, optimisation des conditions opératoires, Thèse de Doctorat de l’Université Saad Dahleb.
- [7] Adjuvants pour bétons, mortier et coulis - Partie 2 : adjuvants pour béton - Définitions, exigences, conformité, marquage et étiquetage, Août 2012.
- [8] Flatt R J., Polymeric dispersants in concrete, In Polymers in particulate systems - Properties and applications, 2002.
- [9] RAMACHANDRAN, V.S. (1995) Concrete Admixtures Properties, Science, and Technology, 2nd , Noyes, Publications, Parkridge, NJ.
- [10] ACI, „Processes, Self-Compacting Concrete““, Advanced Concrete Technology III, 203.9/3, (2003)
- [11] Azizi N., caractérisation des ciments algériens et leurs effets sur les performances du béton, magister de l’université de Blida 1, décembre 2011.
- [12] Bouteldja I. Rheologie et performances des mortiers autoplçants a base des ciments binaires e ternaires thèse de master université de Blida 2019.



- [13] Neville A M., Propriétés des bétons, Ed. Eyrolles, France, 2000.
- [14] Okamura et al. 1999 : Okamura H. and Ouchi. M., “Self-compacting concrete, development, present use and future”, In Proceedings of the First International RILEM Symposium of Self-Compacting Concrete; RILEM,1999.
- [15] AFGC, Recommandations pour l’emploi des bétons auto plaçants, Document scientifique et technique, 2008.
- [16] An investigation of waste foundry sand in asphalt concrete mixtures”. Waste Management Research 2006; 24: 269–74.
- [17] Recyclage du sable de fonderie dans les mortiers autoplaçants: Utilisation en tant que sable et ajout cimentaire ; thèse de master université de Boumerdas 2017.
- [18] Document de l’entreprise POVAL berrghaoughia
- [19] Laboratory leachings of organic compounds in ferrous foundry process waste”. Final Report to American Foundrymen’s Society, Des Plaines, IL, USA; 1989.
- [20] An investigation of ground water contamination by organic compounds leached from iron foundry solid wastes”. Final Report to American Foundrymen’s Society, Des Plaines, IL, USA; 1986.
- [21] J. ORKAS, "Remploi avantageux des sables excédentaires de fonderie dans le compostage", Fonderie Fondateur d’aujourd’hui, CTIF, N°215-34-40.
- [22] Les déchets dangereux en quantités dispersées en fonderie", Fonderie Fondateur d’aujourd’hui,
- [23] PROPERTIES OF MORTAR INCORPORATING WASTE FOUNDRY SAND Thesis submitted In partial fulfillment of the requirement for the Award of the degree of MASTER OF ENGINEERING IN CIVIL ENGINEERING (STRUCTURES)
- [24] Couarraze G., Grossiord J., Initiation à la rhéologie, Paris : 3e Edition Lavoisier, 300 pages, 2000.
- [25] Contrôle de la rhéologie d’un béton et de son évolution lors du malaxage par des mesures en ligne à l’aide de la sonde Viscoprobe , Thèse de doctorat de l’Ecole Centrale de Nantes,2014

- [26] Suhr S., Interaction between sulfate minerals and C3A in cement paste rheology»  
Rheology of fresh cement and concrete, Ed. Banfill P. F. G.,
- [27] Asakura E., Yoshida H., Nakae H., Influence of superplasticizer on fluidity of fresh cement paste with different clinker phase composition, Proceedings of the 9th International Congress on the Chemistry of Cements, New Delhi IV, 1992.
- [28] Banfill P., Additivity effects in the rheology of fresh concrete containing water reducing admixtures, Construction and Building Materials, vol. 25(6), 2011.
- [29] Soualhi H., Optimisation de la viscosité des bétons à faible impact environnemental,
- [30] Bellifa S., Evolution de la porométrie des pâtes autoplaçantes, Université Abou bekr Belkaid - Tlemcen faculté de technologie département de génie civil, mémoire en vue de l'obtention du diplôme de magister en génie civil, 2012.
- [31] Effet de la nature du ciment sur la rhéologie des mortiers autoplaçants,  
mémoire de master de l'université de Blida 1, juillet 2018
- [32] Yahiaoui W. DURABILITE DU BETON AUTOPLAÇANT EN CLIMAT CHAUD  
thèse de doctorat université Saad dahleb Blida 2018.
- [33] Domone P.L.J. et Jin J., Properties of mortar for Self-Compacting Concrete,
- [34] L. RIMOUX, "Les déchets dangereux en quantités dispersées en fonderie", Fonderie  
Fondeur d'aujourd'hui, CTIF, N°228-47-49.
- [35] Caractérisation aux moyens des essais non destructifs (NDT)
- [36] Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes, 2012.

