REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA



Faculté de **T**echnologie

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Génie Civil

Spécialité : Matériaux en génie civil

Fabrication d'un éco-matériaux à base de déchets de fonderie

Présenté par

M. TAHRAOUI Youcef

M. DJEMAI Nour Elislam

Proposé et Dirigé par

Dr. GUENDOUZ Mohamed

Mme. BELAIFI Habiba

Promotion Juin 2020

Remerciements

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

Nous exprimons nos sincères remerciements :

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

A notre encadreur
Dr .GUENDOUZ Mohamed et M^{me}. BELAIFI Habiba pour leur aide et leur suivi, leurs orientations et nombreuses interventions qui ont permis l'aboutissement de ce travail.

A l'ensemble des enseignants du département de Génie civil option matériaux

Mes remerciements vont également aux responsables et personnels du Département de Génie Civil Université Dr. Yahia Fares Médéa et aux ingénieurs de laboratoire pour leur bon accueil et leurs orientations durant toute la durée du travail.

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

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

Djemai. I / Tahraoui.Y

Dédicace

Je dédie ce mémoire à :

Les deux personnes les plus chères à mon cœur, mon père et ma mère, qui m'ont apporté soutien et réconfort tout au long de mes études. Que dieu leur procure bonne santé et longue vie.

À Mes frères et Ma sœur

À mes grands-parents et la famille

«Tahraoui» et «zergui»

À Tous mes amis sans exception.

À Mes amis du groupe MGC

Et sans oublier mes enseignants qui m'ont soutenu durant Toutes mes années d'études.

Tahraoui.Y

Dédicace

Je dédie ce mémoire à :

Tous les mots ne sauraient exprimer la gratitude, l'amour, le respect, la reconnaissance, c'est tout simplement que :

Je dédie cette mémoire de master :

À la plus belle créature que Dieu a créée sur terre,,,

À cette source de tendresse, de patience et de générosité,,,

À ma mère

A mon père

À tous mes frères et sœurs

À mes grands-parents et à toute ma famille

À tous mes amis et collègues

À tous les étudiants de la promotion 2019/2020 Option : Génie Civil

A tous ceux qui, par un mot, m'ont donné la force de continuer

Djemai.I

ملخص

الهدف الرئيسي من هذا المشروع هو المساهمة في تثمين ورسكلة نفايات المسابك ودمجها في كتلة الخرسانة الرملية السائلة عن طريق استبدال حجم الرمل والأسمنت بإضافة نسب مختلفة (0٪، 10٪، 20٪، 30٪ و40٪) على التوالي مع دراسة خصائصها في الحالة الرطبة وفي الحالة الصلبة ومقارنتها مع خرسانة رملية مائعة عادية.

اظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أنه بغض النظر عن أنواع الإضافات من نفايات المسابك، الميوعة والكثافة تقل بزيادة النسبة المئوية للنفايات. وعلاوة على ذلك، ووفقًا للبحوث التي اجريت ينخفض الأداء الميكانيكي للخرسانة مع زيادة نسبة نفايات المسابك ولكن يبقى مقبولاً لقواعد البناء. لذلك من الممكن الحصول على مواد بناء جديدة يمكن استخدامها لأنواع مختلفة من عناصر المبنى.

Résumé

L'objectif principal de ce projet consiste à valoriser et recycler les déchets de fonderie (plus précisément les déchets de sable de moulage et poudre de fonte) et incorporé dans la masse du béton de sable fluide par substituions volumique du sable et de ciment par ajout en différents pourcentages (0%,10%,20%,30% et 40%) respectivement. Les propriétés à l'état frais et à l'état durci des différents mélanges réalisés ont été analysées et comparées aux bétons de sable fluide témoin respectifs.

Les résultats obtenus montrent que quelque soit le types d'ajouts des déchets fonderie l'étalement et la densité sont diminués en fonction d'augmentation de pourcentage de déchets .Par ailleurs, et d'après la littérature les performances mécanique du béton sont diminués mais reste acceptable pour les règles de construction. Donc, il est possible d'obtenir un nouveau matériau de construction utilisable pour différents types d'éléments de construction**.**

Abstract

The main objective of this project is to value and recycling the fonder waste and incorporated into the mass of flowable sand concrete by substituted volumetric of natural sand and addition of cement at different percentage (0% ,10%,20%,30% et 40%) respectively. The properties in a fresh and a hardened state of the various flowable sand concretes carried out were analyzed and compared with control flowable sand concretes respective.

The results obtained show that whatever the types of additions of foundry waste, the flow ability and the density are reduced as a function of the percentage increase in waste. Furthermore, and according to the literature, the mechanical performance of concrete is reduced is reduced but remains acceptable for building rules. So it is possible to get a new building material that can be used for different types of building elements.

sommaire

Sommaire

Remerciements
Dédicace
Résume
ملخص
Abstract
Sommaire
Liste des tableaux
Liste des figures
Listes des symboles et des abréviations
Introduction général

CHAPITRE 01 : SYNTESE BIBLIOGRAPHIQUE

1.1 Introduction ……03
1.2 Valorisation des déchets et activité de recyclage en construction…….....03
1.2.1 Introduction ……..……..03
1.2.2Valorisation des déchets et sous produits industriels dans le domaine génie civil…...03
1.2.3 Constitution chimique du déchet....…….05
1.2.4 Origine de la production de déchets ……...…05
1.2.5 Différents déchets utilisés en génie civil ……....06
1.2.6 Activité du recyclage des déchets en construction ……..08
1.3 Fonderie et déchets de fonderie ……..…….09
1.3.1 La Fonderie ……..…….....09
1.3.1.1 Définition ……..……09
1.3.1.2Type de fonderie…….....……....09
1.3.1.3 Equipement de la Fonderie ….……..…….....12
1.3.1.4 Les séquelles industrielles de la fonderie sur la santé et l'environnement….....13
1.3.2 Sable de la fonderie……...…….……..14
1.3.2.1 Généralité ……..……..…….....14
1.3.2.2 Définition ……..…….....14
1.3.2.3 Composition de sable de fonderie ……...…….15
1.3.2.4 Propriétés chimique du sable de la fonderie ……..15
1.3.2.5 Les sables de fonderie en Algérie ……..16
1.3.2.6 Caractéristiques des différents sables utilisés en fonderie ……17
1.3.2.7 Les critères pour le choix d'un sable ……..18
1.3.3 Sable de fonte ……..…….....18
1.3.3.1 Définition …….....18
1.3.3.2 Les types de poudre de fonte.……....19
1.3.3.3 Propriétés mécaniques de fonte.……..…….....21
1.3.3.4 Propriétés physiques de fonte ……...…22
1.3.3.5 Moulage en sable mécanique ……..……..22
1.3.3.6 Particularités des sables usés ……...….23
1.3.3.7 Les étapes du moulage au sable pour choisir les meilleurs matériaux…...……...23

1.4 Le béton de sable ……...27
1.4.1 Introduction ……..27
1.4.2 Origines de béton de sable ……..28
1.4.3 Définition ……..28
1.4.4 Les composants du béton de sable ……29
1.4.5 Propriétés du béton de sable……..30
1.4.6 Retrait et Fluage……35
1.4.7 Domaines d'emploi des bétons de sable……..40
1.4.8 Formulation du béton de sable……...41
1.5 Influence des déchets de fonderie sur les propriétés des matériaux cimentaires....50
1.6 Conclusion ……56

CHAPITRE 02 : MATERIAUX ET ESSAIS

2.1 Introduction……..57
2.2 Caractérisation des Matériaux utilisés……...…...57
2.2.1 Le sable…….....57
2.2.2 Ciment ……..…….....59
2.2.3 Ajouts (fillers)……..……..……..…..…….....61
2.2.4 Adjuvant…….....…….....62
2.2.5 Eau de gâchage ……...……..……..……..62
2.2.6 Déchets de fonderie ……..…….....63
2.3 Composition des mélanges ……..……..…....…….....64
2.4 Malaxage et conservation…….....66
2.5 Essais réalisés à l'état frais.……..….....67
2.5.1 Etalement……..68
2.5.2 Ecoulement à l'entonnoir en v-funnel…...……...……69
2.5.3 La densité……70
2.6 préparation et conservation des éprouvettes …….....70
2.7 Essais réalisés à l'état durci……..…...……68
2.7.1 Résistance a la compression ……..……..……..72
2.7.2 Résistance à la traction……73
2.8 Variable étudiées ……...…..…..…..……...74
2.9 Conclusion……..……...……75

Conclusions générales ……..……..……76
Recommandation ……..……..……..……77
Références bibliographiques……..……78
Annexe……..……..…….....85

Liste des Tableaux

Liste des Tableaux

Tableau 1.1 Méthodes de valorisation des déchets. ……..……21

Tableau 1.2 Composition en oxyde chimique de l'échantillon de sable de fonderie, %…...21

Tableau 1.3 Caractéristiques des différents sables utilisés en fonderie. ……...……21

Tableau 2.1 Caractéristiques physiques des sables utilisés. ……...……58

Tableau 2.2 Les caractéristiques du ciment……..……...……60

Tableau 2.3 Caractéristiques physiques des fines de marbre utilisées. ……....…62

Tableau 2.4 Caractéristiques physiques de déchet de fonderie utilisé. ……..……63

Tableau 2.5 Compositions des Béton de sable fluide à base de déchet de poudre de fonderie pour (1m3). ……...……65

Tableau 2.6 Compositions des Béton de sable fluide à base de déchet de sable de fonderie pour (1m3). ……...……65

Tableau 2.7 Essais sur bétons frais. ……..…...……...……67

Tableau 2.8 Essais sur bétons durci. ……..……...……71

Liste des Figures

Liste des figures

Fig.1. 1 Caractéristiques élémentaires types des Déchet …….05
Fig.1. 2 exemple des déchets inertes ……..…..……..06
Fig.1. 3 exemple des déchets banals ……...……...……..07
Fig.1. 4 exemple des déchets dangereux ……...……..……08
Fig.1. 5 procédure de fonderie ……09
Fig.1. 6 Fonderie ferreux ……...…….10
Fig.1. 7 Fonderie non ferreux ……....……10
Fig.1. 8 moulage piece-bronze-aluminum ……..…...11
Fig. 1. 9 Fonderie d'art ……...……...……...11
Fig.1.10 Fonderie typographique…….…….....12
Fig. 1.11 poches de coulée……..……..13
Fig.1. 12 sable de la fonderie……....14
Fig.1. 13 Sable de fonte.....19
Fig.1. 14 Dessous de plat en fonte blanche……..……..20
Fig.1. 15 microstructure des fontes blanche eutectiques……...20
Fig.1. 16 formes de graphite dans les fontes grises …….……20
Fig1. 17 Le moulage au sable avec la fonte grise ...…..……..……..20
Fig.1. 18 Fonte malléable à graphite nodulaire et matrice ferritique ……...……21
Fig.1. 19 Raccord en T 133 mâle/femelle 3/8"-1" - fonte malléable……..21
Fig.1. 20 modélisme……...…….…..24
Fig.1. 21 noyautage……...…….……...25
Fig.1. 22 Moulage …….…….....….…....26
Fig.1. 23 coulée du métal en fusion ……...……..26
Fig.1. 24 Démoulage fonderie ……...….....27
Fig.1. 25 exprime une relation entre le module de finesse et la maniabilité..……...31
Fig.1. 26 Effet du dosage et de la finesse de l'addition sur la résistance ……..……...32
Fig.1. 27 Influence de la nature de l'addition sur le niveau de résistance ……...…….....32
Fig.1.28 Effets de la granularité sur la résistance ……...…….33
Fig.1. 29 Variation de l'adhérence d'une armature en fonction de la formulation ……34

Fig.1. 30 Evolution du retrait du béton de sable ……..……..…….36
Fig.1. 31 Evolution du fluage du béton de sable ……..……...37
Fig.1. 32 Eprouvettes non vibrées non piquées ……..…….38
Fig.1. 33 Le béton de sable en projection …….……...39
Fig.1. 34 Influence du diamètre D du sable sur le dosage en fines.…..…… .42
Fig.1. 35 Influence de la dimension d sur la porosité minimale du béton pour deux tailles D du sable ……..43
Fig.1. 36 Relation entre l'ouvrabilité et le dosage (e + v) d'une matrice pour une mise en œuvre donnée …….…….….44
Fig.1. 37 Coefficient d'activité du filler calcaire (modèle) ……..…….…..46
Fig.1. 38 Organigramme de la méthode théorique …….…….…….....47
Fig.1. 39 L'affaissement du béton ordinaire en fonction de déchets de fonderie…….……51
Fig.1. 40 La densité de béton auto plaçant à base de déchets de fonderie …….....51
Fig.1. 41 Résistance à la compression de béton auto plaçant à base de déchets de fonderie....52
Fig.1. 42 La résistance à la compression des bétons à base de déchets de fonderie…….....53
Fig.1. 43 Résistance à la compression de béton en fonction d'ajouts de gros et fin granulats de fonderie ……..…….…….53
Fig.1. 44 La résistance à la traction du béton en fonction d'âge……...54
Fig.1. 45 Résistance à la traction de béton en fonction d'ajouts de gros et fin granulats de Fonderie……..…….…….54
Fig.1. 46 Le module d'élasticité du béton à base de déchets de fonderie ……..…….....55
Fig.1. 47 Le module d'élasticité de béton auto plaçant à base de déchets de fonderie …….....55

Fig.2. 1 Sable utilisé. ……..……...……..…57
Fig.2. 2 Courbe granulométrique de sable utilisée. ……..……..……58
Fig.2. 3 Le ciment utilisé. ……..…….……...……..59
Fig.2. 4 Les fines de marbre. ……..……...……..…61
Fig.2. 5 Super plastifiant-Haut réducteur d'eau. ……..……..…62
Fig.2. 6 Déchet de poudre de fonte utilisé. ……..……...…….……63
Fig.2. 7 Déchet de sable de moulage utilisé……..……...……64

Fig.2. 8 le malaxage au laboratoire. ……..……..……...……67

Fig.2. 9 Mesure de l'étalement du béton de sable fluide……...…..……...…….68

Fig.2. 10 Essai d'écoulement à l'entonnoir en V. ……..……...……69

Fig.2. 11 Mesure de la densité du béton de sable fluide. ……..……70

Fig.2. 12 Fabrication des éprouvettes. ……...……...……...……71

Fig.2. 13 Dispositif de rupture à la compression. ……...……...……..…72

Fig.2. 14 Presse Hydraulique (2000KN)..……...……..…..……..73

Fig.2. 15 résistance à la traction. ……...……..……..……...73

Fig.2. 16 Variables étudiées. ……..……74

Fig. A. 1 Ciment MOKAOUEM PLUS utilisé. ……...…….....85

Fig. A. 2 La fiche technique ciment. …….....86

Fig. A .3 fiche technique d'adjuvant utilisé. ……..…….....87

Fig. A. 4 Tamiseuse électrique…….…….…….....88

Fig. A. 5 Malaxeur. ……..……...…….…….....88

Fig. A. 6 broyage par broyeur. ……..…….....88

Fig. A. 7 essai de l'étalement…… ……..…….…..... 89

Liste des symboles et des Abréviations

Liste des Symboles et des Abréviations

FFOM : Fraction fermentescible des ordures ménagères.

DIS : Déchets industriels spéciaux.

DMS : Déchets ménagers spéciaux.

D.I.B. : Les déchets industriels banals.

MF : Aminoplastes.

COV : Composés organiques volatils.

BS : Béton de sable.

E/C : Eau/Ciment.

C : Dosage en ciment

C_2S : Silicate bicalcique (belite)

C_3A : Aluminate tricalcique.

C_3S : Silicate tricalcique (alite).

C_4AF : Aluminate-ferrite tétracalcique.

$CaCO_3$: Carbonate de calcium **Al_2O_3 :** Oxyde d'Aluminium.

Fe2O3 : Oxyde de fer.

Cao : Oxyde de calcium.

S_iO_2 : Silicium.

MgO : Magnésium.

Dmax **:** Diamètre maximale des granulats.

G/S : Gravillons sur sable.

ES : Equivalent de sable.

R7j : Résistance à 7 jours.

R28j : Résistance à 28 jours.

R90j : Résistance à 90 jours.

DRX : Diffractomètre au rayon X.

MEB : Microscope électronique à balayage.

V : Volume des vides du mélange granulaire.

V0 : Constante expérimentale comprise entre 0,7 et 0,8.

d : La dimension du plus petit grain de l'étendue granulaire.

M sable : masse nécessaire pour 1 m^3 du béton de sable.

MV sable : masse volumique du sable.

MVA sable : masse volumique absolue du sable.

V : le volume d'eau à rajouter ou à retrancher selon l'écoulement.

CPA CEM I 42.5 : Ciment Portland ordinaire de Classe 42,5

ρ : masse volumique apparente (kg.m-3).

ρs : masse volumique absolue (kg.m-3).

λ : Conductivité thermique (W/m°C).

ν : La distance de la fibre la plus éloignée.

$\mathbf{R_C}$: Résistance à la compression en (MPa)

: Charge de rupture en (N)

b : Côte de l'éprouvette.

ε : porosité totale (%)

: La masse d'éprouvette imbibée pesé dans l'air

: La masse d'éprouvette sec

: La masse d'éprouvette immergée dans l'eau

BSFT : Béton de sable fluide témoin.

BSFPF : Béton de sable fluide à base de poudre de fonte.

BSFSM : Béton de sable fluide à base de sable de moulage.

Δ**L** : Variation de longueur par apport à la longueur origine.

L0 : Longueur de base, prise égale 160mm.

Δ**M** : Variation de masse par apport à la masse au moment du démoulage.

M : Masse de l'éprouvette au moment du démoulage.

introduction général

Introduction général

La gestion des déchets est nécessaire que ce soit d'un point de vue environnemental, économique ou social, Car ils posent actuellement un sérieux problème à cause de leur durée de vie.

On peut utiliser les déchets industriels comme matériaux cimentaires dans la fabrication des bétons ou des mortiers de ciment comme ajout minéral ou granulat fin, afin d'améliorer certaines propriétés à l'état frais ou l'état durci des matériaux, Parmi ces déchets, le laitier granulé de haut fourneau, la fumées de silice, les cendres volantes et les sables de la fonderie. Les sables de fonderie sont des sous-produits de l'industrie de la fonderie. Les fonderies utilisent un sable fin siliceux associé à d'autres matériaux tels que l'argile ou des liants organiques dans le procédé de moulage des pièces métalliques. On peut recycler ce sable mais le nombre de réutilisation de celui-ci est limité. Ce sable est jeté lorsqu'il n'est plus réutilisable dans l'industrie de la fonderie. Donc les sables de fonderie constituer une matière première d'un coût assez faible pour la fabrication des bétons hydrauliques. Pour cette raison, les recherches continues pour trouver des constituants rentrant dans la formulation des bétons spéciaux afin de diminuer le cout de fabrication de ces bétons et minimiser l'utilisation du sable de mer au nord d'Algérie et sable de Sahara pour le sud.

Dans ce contexte s'ouvre la réflexion sur la formulation de nouveaux bétons qui utiliseraient des ressources abondantes, peu ou pas exploitées, et présenteraient soit des caractéristiques comparables à celles des bétons usuels, soit des caractéristiques répondant à certaines exigences mal assurées par ces derniers. La valorisation des matériaux locaux ainsi que la réutilisation des déchets de différentes nature actuellement l'objet de différentes recherches.

Notre travail consiste donc à récupérer des déchets de la fonderie, rejetés dans les usines, après avoir été collectés, sont incorporés dans le béton de sable fluide par substitution volumétrique du ciment et par ajout. Le composite ainsi réalisé est appelé ***''béton de sable fluide à base de déchets de fonderie''***. A part le ciment, chaque matériau de base constituant ce béton entre soit dans le cadre de la valorisation des matériaux locaux, soit dans le cadre de la réutilisation des déchets industriels.

Pour le besoin de l'étude, les matériaux utilisés sont les suivants :

- Un sable roulé d'Oued Souf.
- Trois types de déchets : le marbre provenant d'une carrière de SKIKDA, le sable de moulage et la poudre de fonte provenant de la société de fabrication des pompes et des vannes POVAL à Berrouaghia wilaya de Médéa.

Le travail présenté poursuit une démarche progressive s'articulant autour des trois chapitres suivants :

Dans le premier chapitre, Nous présentons une synthèse bibliographie regroupant en général la valorisation des déchets et l'activité de recyclage en construction, fonderie et déchets de fonderie et l'effet de déchets de fonderie sur les caractéristiques des matériaux cimentaire.

Ensuite dans le deuxième chapitre, nous présentons les caractéristiques des matériaux de base, la formulation du béton de sable fluide, et les techniques expérimentales utilisées durant cette étude pour évaluer les propriétés à l'état frais (étalement, temps d'écoulement et densité), les propriétés mécaniques (résistance à la compression, résistance à traction).

Finalement des conclusions générales et des recommandations sont présentées pour achever notre modeste projet de recherche.

Chapitre 01 :
Synthèse bibliographique

1.1 Introduction

Différents types de matériaux recyclables sont actuellement utilisés dans les applications de génie civil. Il s'agit notamment des lambeaux de pneus, du caoutchouc broyé des pneus, des cendres de mouches et de fond, des scories de haut fourneau, des scories d'acier, de la poussière de four à ciment, de la fumée de silice, du verre concassé, de la chaussée d'asphalte récupérée et des cendres de cosse de riz. La réutilisation de ces matériaux recyclables est particulièrement bénéfique dans les applications de génie civil qui nécessitent de grands volumes de matériaux. Lorsque ces déchets sont utilisés à la place d'autres matériaux conventionnels, les ressources naturelles et l'énergie sont préservées et l'élimination des déchets coûteuse et potentiellement dangereuse est évitée. Ce numéro spécial traite de l'utilisation de matériaux recyclables dans diverses applications de génie civil axées sur le développement durable.

1.2 Valorisation des déchets et activité de recyclage en construction

1.2.1 Introduction

Les déchets de Construction sont définis comme des matériaux de construction assez propres et hétérogènes qui sont produits à partir des diverses activités de construction, Les activités de Construction, de rénovation et de démolition entraînent la formation de déchets.

Le recyclage des déchets de construction est un moyen de contrer les risques pour les déchets de construction. Ainsi, l'invention d'une technologie appropriée pour recycler ces matériaux est d'une grande importance. Par exemple, les déchets de béton peuvent être broyés et utilisés comme granulats recyclés. **[1]**

1.2.2 Valorisation des déchets et sous-produits industriels dans le domaine génie civil

La valorisation des déchets s'appelle également. Elle désigne l'ensemble des opérations effectuées sur un objet inutile afin de le rendre à nouveau utile. La valorisation permet de réaliser **[2]** :

- un nouveau matériau,
- un nouveau produit de qualité égale ou supérieure.

Les déchets non triés s'appellent ordures ménagères résiduelles (OMR) : ils restent stockés à la décharge et impactent l'environnement ; ils ne subissent pas ou peu de traitement.

Il existe deux types de stockages des déchets :

- le stockage des déchets ultimes (CSDU),
- le stockage des déchets non dangereux (ISND).

- **Traitement des déchets selon leur nature pour valorisation**

Après la collecte les déchets triés à la source, les déchets se classent en deux catégories **[2]**:

- déchets organiques biodégradables : bons pour le compost ou la méthanisation,
- déchets non fermentescibles : qui devront subir un traitement spécial.

Tableau 1.1 Méthodes de valorisation des déchets **[2]**

MÉTHODES DE VALORISATION DES DÉCHETS	
Valorisation des déchets non fermentescibles	- Les déchets non fermentescibles ou FNFOM résultent d'un traitement attentif à la source. - Ce dernier permet de récupérer des matériaux économiquement intéressants après le recyclage.
Valorisation énergétique du déchet	- La valorisation énergétique consiste à brûler les déchets pour produire du carburant. - Ce carburant ne peut être stocké et risque de polluer l'atmosphère.
Tri mécano biologique	- Cette technique controversée consiste à séparer les matières recyclables des déchets ultimes destinés à être enfouis.

1.2.3 Constitution chimique du déchet

Plusieurs études se sont intéressées à la caractérisation chimique des DM. Certaines d'entre elles avaient pour principal objectif l'évaluation du potentiel polluant de ces déchets ou la-mise en évidence de l'existence des effets néfastes sur la santé humaine et l'environnement. La figure 1.1 donne des exemples de la composition chimique élémentaire de la gestion des déchets urbains solides en France, en Chine et en Suisse. **[3]**

Paramètres	Unités (*)	Teneurs moyennes		
		France[a]	Chine[b]	Suisse[b]
Humidité	% MH	35	-	-
Matière organique totale	% MS	59,2	-	-
Carbone	% MS	33,4	29 ± 5	37 ± 4
Chlore	g/kg MS	14	-	6,9 ± 1,0
Soufre	g/kg MS	2,8	-	1,3 ± 0,2
Azote organique	g/kg MS	7,3	-	
Fluor	g/kg MS	0,058	-	
Bore	g/kg MS	0,014	-	
Cadmium	g/kg MS	0,004	0,3 ± 0,01	0,011 ± 0,002
Cobalt	g/kg MS	0,113	25 ± 3	-
Chrome	g/kg MS	0,183	0,18 ± 0,02	-
Cuivre	g/kg MS	1,048	-	0,7 ± 0,2
Manganèse	g/kg MS	0,412	-	-
Mercure	g/kg MS	0,003	0,005 ± 0,001	0,003 ± 0,001
Nickel	g/kg MS	0,048	-	-
Plomb	g/kg MS	0,795	-	0,7 ± 0,1
Zinc	g/kg MS	1,0	1,3 ± 0,2	1,4 ± 0,2

Fig. 1.1 Caractéristiques élémentaires types des Déchet **[3]**

1.2.4 Origine de la production de déchets

Ces déchets peuvent être d'origine diverses : industrielle, artisanale, domestique... En effet, toutes les activités humaines produisent des déchets, même celles liées à la nature avec les déchets verts. D'une manière générale, nous consommons des produits et utilisons des services qui, pour être créés, génèrent des déchets. De plus, cette consommation entraîne également des déchets : à toutes les étapes, nos activités produisent des déchets.

Les déchets ne se limitent pas seulement aux déchets ménagers et assimilés. En effet, la construction (BTP), les activités économiques et industrielles produisent la majorité du tonnage des déchets. De plus, les déchets liés à l'activité de soins sont particulièrement suivis pour leur dangerosité **[4]**

1.2.5 Différents déchets utilisés en génie civil

A. Déchets inertes

Déchet solide minéral, non susceptible d'évolution physico-chimique ou biologique. Il ne se décompose pas, ne brûle pas, n'est pas biodégradable.

Déchet à potentiel polluant pratiquement nul, non réactif, non évolutif, non ou peu soluble

- L'essentiel de ces déchets est produit sur les chantiers du BTP **[5]**

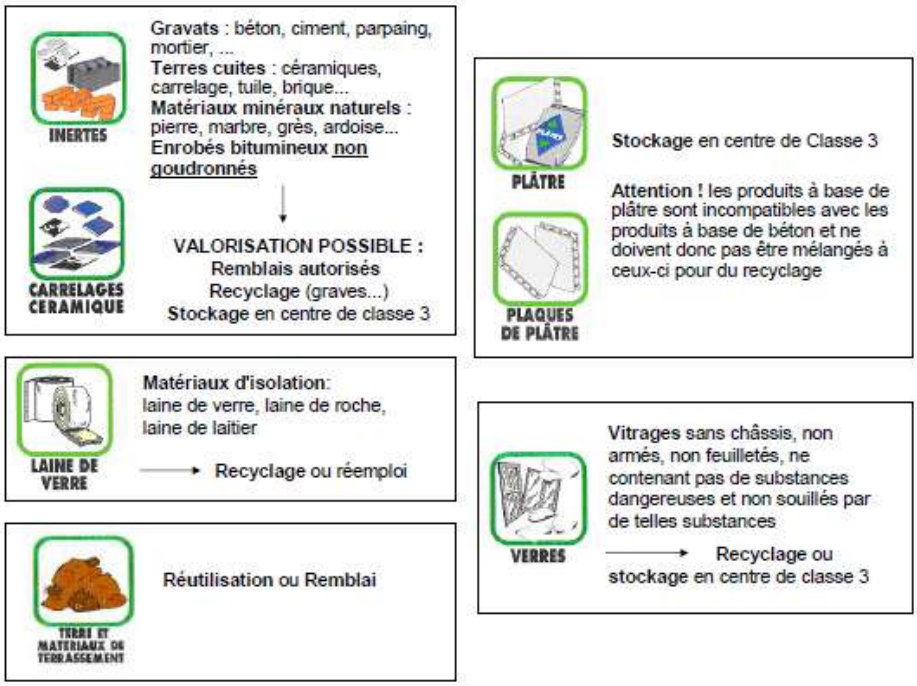


Fig. 1.2 exemple des déchets inertes **[5]**

B. Les déchets banals

- Susceptibles de se dégrader par fermentation, oxydation ou combustion.
- Impacts sur l'environnement réels sans pour autant présenter des risques pour la santé humaine.
- Caractéristiques techniques similaires aux déchets ménagers : filières d'élimination communes.
- Définition réglementaire : ni inerte, ni dangereux. **[5]**

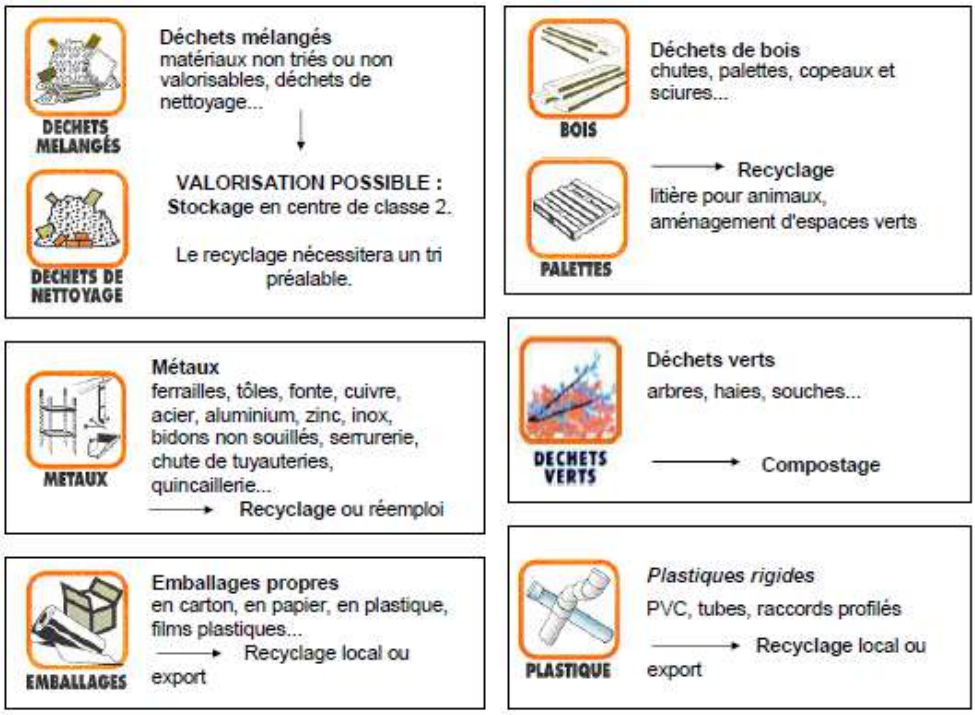


Fig. 1.3 exemple des déchets banals **[5]**

C. Les déchets dangereux

- Déchets contenant des produits (solvants, hydrocarbures …) qui peuvent être toxiques, corrosifs, irritants ou inflammables.
- Impact important sur la santé et sur l'environnement.
- Tout déchet banal ou inerte souillé par ces produits devient automatiquement un déchet dangereux.
- Liste européenne des déchets dangereux (transcrit dans le décret du 18 avril 2002) **[5]**

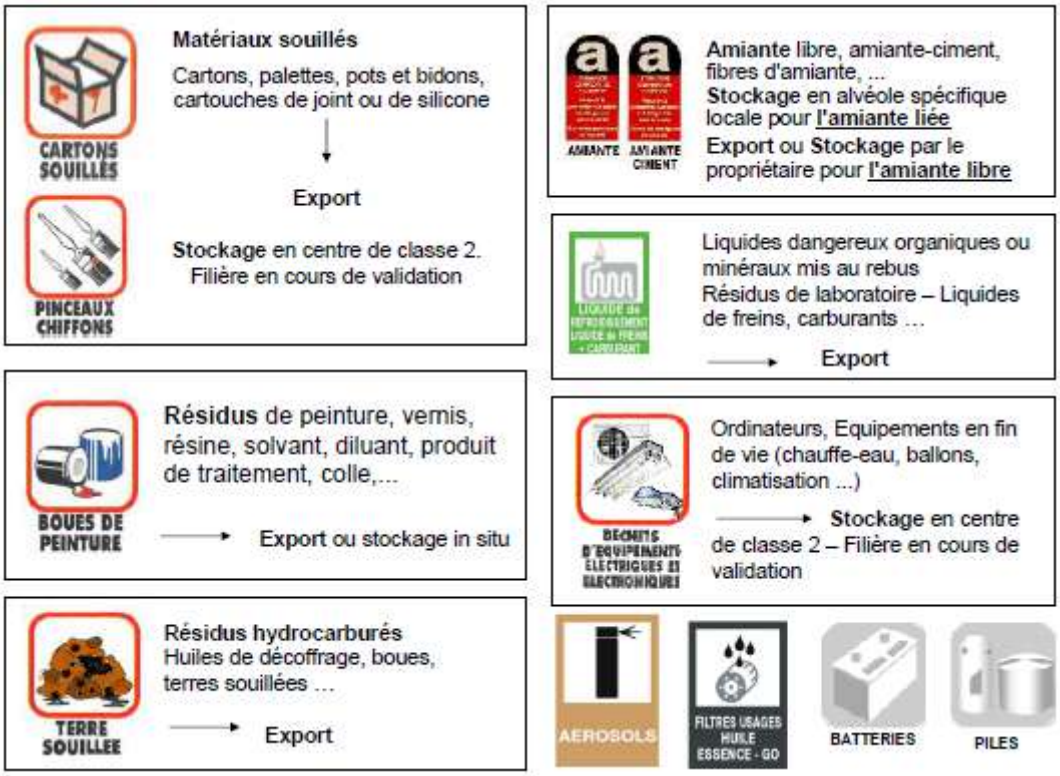


Fig. 1.4 exemple des déchets dangereux **[5]**

1.2.6 Activité du recyclage des déchets en construction

1.2.6.1 Recyclage des déchets

Le recyclage est le processus de prendre des matériaux anciens et des déchets et de les utiliser pour fabriquer un autre produit pour compléter le cycle au lieu de simplement les jeter. Une grande partie des produits utilisés pour l'emballage aujourd'hui comme le papier, le plastique, le verre, le métal, l'électronique, les boîtes en aluminium sont déjà recyclées. En d'autres termes, le recyclage de vieux produits pourrait produire un approvisionnement frais de nouveaux produits mêmes. **[6]**

1.2.6.2 Impacts du recyclage sur l'environnement

Le recyclage contribue à réduire la pollution causée par les déchets. Il réduit le besoin de matières premières afin que les forêts tropicales puissent être préservées. D'énormes quantités d'énergie sont utilisées lors de la fabrication de produits à partir de matières premières. Le recyclage nécessite beaucoup moins d'énergie, ce qui contribue à préserver

les ressources naturelles. Nous devons toujours nous rappeler que fabriquer des produits à partir de matières premières coûte beaucoup plus cher que s'ils étaient fabriqués à partir de produits recyclés. **[7]**

1.3 Fonderie et déchets de fonderie

1.3.1 La Fonderie

1.3.1.1 Définition

C'est un des procédés de formage des métaux qui consiste à couler un métal ou un alliage liquide dans un moule pour reproduire, après refroidissement, une pièce donnée. La fonderie comprend la fonderie des métaux ferreux, fonte, et acier. Elle intègre également la fonderie des métaux non ferreux, aluminium, cuivre, et zinc et leurs alliages. Les techniques employées dépendent de l'alliage fondu, des dimensions, des caractéristiques et des quantités de pièces à produire.

Applications : automobile, sidérurgie, matériel de manutention, équipement industriel, matériel électrique, aéronautique, etc. **[8]**



Fig. 1.5 procédure de fonderie **[9]**

1.3.1.2 Type de fonderie

Il existe Cinque types de fonderie :

- **Fonderie des métaux ferreux** : correspondants aux déchets de fabrication et de transformation des métaux et des objets métalliques en fin de vie et mis au rebus **[10]**



Fig. 1.6 Fonderie ferreux **[11]**

- **Fonderie des métaux non ferreux :** comprenant tous les métaux sauf le fer à l'état pur ou faiblement allié (inférieur à 10%). Ce sont principalement le cuivre, l'aluminium, le zinc, le plomb, l'étain, le chrome et le nickel. **[10]**



Fig. 1.7 Fonderie non ferreux **[12]**

- **Fonderie alliages légers** : aluminium, zamac, et autres alliages légers (NAF 2453Z). Les alliages de fonderie contiennent généralement une plus grande proportion d'éléments d'alliage que les alliages de corroyage. L'ajout des éléments d'alliages, tels le silicium, le magnésium ou le cuivre se fait en fonction de nombreux facteurs propres à la fonderie : la coulabilité, la fluidité, la résistance à la déchirure à chaud, l'étanchéité à la pression, le retrait de refroidissement. **[13]**



Fig. 1.8 moulage pièce-bronze-aluminium **[14]**

- **Fonderie d'art** La fonderie d'art est un procédé de formage d'œuvres d'art ou de pièces d'ornementation métalliques, qui consiste à couler un métal ou un alliage liquide dans un moule pour reproduire, après refroidissement, une pièce donnée (forme intérieure et extérieure) en limitant autant que possible les travaux ultérieurs de finition. **[15]**



Fig. 1.9 Fonderie d'art **[16]**

- **Fonderie typographique** Une fonderie typographique est une entreprise qui réalise des polices de caractères pour l'imprimerie, il s'agit de concevoir et de fabriquer des caractères en relief, en plomb, pour la typographie. **[17]**



Fig. 1.10 Fonderie typographique **[18]**

1.3.1.3 Equipement de la Fonderie

L'équipement et les fournitures de fonderie comprennent les machines lourdes nécessaires pour travailler le métal chaud et fondu et les articles de fonderie nécessaires pour couler le métal en formes ou produits spécifiques. Les articles de fonderie comprennent les composés chimiques utilisés pour lier les alliages, ainsi que les sables pour la fabrication des moules. Une fonderie de métaux peut se spécialiser dans la fabrication d'articles d'un métal particulier, comme le fer ou l'acier, et disposer de fours ou d'autres équipements et fournitures de fonderie dédiés à ces procédés. Lors de la coulée, le métal en fusion est versé dans un moule fait de sable de coulée et on le laisse se solidifier. Le sable de coulée peut être à base d'huile ou d'eau. Le sable à base d'eau est connu sous le nom de sable vert de coulée, un mélange humide de sable et d'argile.

Différents types de fonderies peuvent utiliser des équipements et des fournitures de fonderie spécifiques. Par exemple, une fonderie de fer utilise un haut fourneau, également appelé cubilot. Les fonderies d'acier et de laiton utilisent généralement un four à induction électrique ou un four à creuset chauffé au gaz. **[19]**



Fig. 1.11 poches de coulée **[19]**

1.3.1.4 Les séquelles industrielles de la fonderie sur la santé et l'environnement

Les opérateurs de fonderie élaborent, à partir de métaux, des pièces volumineuses ou non, en alliages ferreux ou d'étain, bronze, laiton ou autres métaux non ferreux (cuivre, plomb, aluminium…) par coulée dans des moules, pour des fabrications unitaires ou en séries, artisanales ou mécanisées. De nombreux agents chimiques dangereux (silice cristalline, formaldéhyde, Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques, fumées des alliages métalliques liquides, Fibres Céramiques Réfractaires…) sont utilisés ou émis lors des différents procédés de moulage en sable et noyaux qui utilisent également des résines dont la dégradation thermique pendant la coulée génèrent des substances toxiques : les affections respiratoires sont des maladies professionnelles préoccupantes pour les fondeurs, avec la possibilité d'apparition de cancers.

Par ailleurs, la nature même des procédés de fonderie à partir de métal en fusion exposent évidemment à un risque de brûlure thermique par projection de métal ou exposition aux rayons infrarouges. Les accidents du travail provoqués par des blessures aux mains ou des corps étrangers dans les yeux sont également très fréquents.

De plus, il faut prendre en compte les risques professionnels non spécifiques à la fonderie, liés aux manutentions, aux chutes de plain-pied, à la possibilité des contacts avec des conducteurs électriques sous tension, aux troubles auditifs liés à des niveaux sonores élevés …Par des mesures de prévention appropriées, on peut réduire toutes ces expositions et diminuer fortement les risques professionnels dans les fonderies **[20]**

Les fonderies sont ou ont été des sources importantes de pollution de l'air, de l'eau et des sols, plus ou moins selon leur taille, leur âge, les accidents qu'elles ont pu subir, et la nature des sols et paysages.

1.3.2 Sable de la fonderie

1.3.2.1 Généralité

Les déchets de sable concernent les fonderies qui mettent en œuvre des procédés de moulage et de noyautage à base de sable. Le sable de moulage est généralement régénéré et mis en recirculation tandis que le sable noyautage est très souvent du sable neuf. Les déchets de sable sont issus du circuit de régénération de sable de moulage ou du décochage (séparation pièces/moules). Ils sont composés de grains réfractaires (généralement siliceux) et d'un liant, soit argileux (sables à vert), soit à prise chimique (sables à prise chimique)

1.3.2.2 Définition

Le sable de fonderie est propre, uniformément dimensionné, sable de silice de haute qualité, utilisé dans les processus de coulée de fonderie. Le sable est collé pour former des moules ou des motifs utilisés pour les moulages métalliques ferreux (fer et acier) et non ferreux (cuivre, aluminium, laiton). Le sable secoué de la coulée de métal terminée est souvent récupéré dans le processus de sable de fonderie.. **[21]**



Fig. 1.12 sable de la fonderie **[22]**

1.3.2.3 Composition de sable de fonderie

Sont constitués d'un réfractaire (Silice) aggloméré par de l'argile activée par de l'eau. Des additifs sont ajoutés à ce sable afin d'en améliorer son comportement à la coulée Les constituants du sable sont :

- le sable siliceux
- l'argile, souvent du type bentonite
- les additifs carbonés
- l'eau

D'autres éléments éventuellement **[23]**

1.3.2.4 Propriétés chimique du sable de la fonderie

Le sable de fonderie usé se compose principalement de sable de silice, recouvert d'une mince couche de brûlé carbone, de liant résiduel (bentonite, charbon de mer, résines) et de poussière. Le tableau 1-1 énumère la composition chimique d'un échantillon typique de sable de fonderie usé déterminé par la fluorescence X

Le sable de silice est hydrophile et attire donc l'eau à sa surface. Cette propriété pourrait conduire à l'humidité accélérée dommages et les problèmes connexes de stripping dans la chaussée asphalte. En fonction du liant et du type de métal coulé, le pH du sable de fonderie épuisé peut varier de 4 à 8.Il a été rapporté que certains sables de fonderie usés peuvent devenir corrosifs pour les métaux.

En raison de la présence de phénols dans le sable de fonderie, on craint que les précipitations percutantes à travers les stocks puissent mobiliser des fractions lixiviable, ce qui entraînerait des rejets d'in phénol dans les eaux de surface ou souterraines. Les sources de sable de fonderie et les réserves doivent être surveillées afin d'évaluer la nécessité d'établir des contrôles pour le phénol discharges potentiels **[24]**

Tableau 1.2 Composition en oxyde chimique de l'échantillon de sable de fonderie, % **[24]**

constituant	Valeur (%)
SiO2	87.91
AL2O3	4.7
Fe2O3	0.94
CaO	0.14
MgO	0.3
SO3	0.09
Na2O	0.19
K2O	0.25
TiO2	0.15
P2O5	0
Mn2O3	0.02
SrO	0.03
LOI	5.15
TOTAL	99.87

1.3.2.5 Les sables de fonderie en Algérie

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

- **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 (S2) mais on ajoute de la bentonite (4 % à 4.5 %) pour améliore 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. **[25]**

- **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.

1.3.2.6 Caractéristiques des différents sables utilisés en fonderie

Les caractéristiques des différents sables utilisés en fonderie, peuvent être résumées dans le tableau ci-dessous. **[26]**

Tableau 1. 3 Caractéristiques des différents sables utilisés en fonderie. **[26]**

Colonne1	Chromite	Kerphalite	Olivine	Silice	Zircon
Prix	élevé	élevé	moyen	faible	élevé
Densité	4.5	3.1	3.5	2.6	4.5
T°C Fusion	2100 °C	1850°C	1850°C	1725°C	2300°C
Compatibilité résine	haute	haute	moyenne	très haute	très haute

1.3.2.7 Les critères pour le choix d'un sable

Les critères pour le choix d'un sable sont :

- **Economique** (coût et disponibilité). De ce point de vue, la silice est de loin la moins chère et la plus disponible. C'est aussi le sable qui est le plus largement utilisé en moulage sable à vert. Le zircon est par exemple d'un coût environ 20 fois supérieur à la silice et est faiblement disponible.
- **Techniques** Les caractéristiques physiques et en particulier la température de fusion et la dilatation thermique qui vont impacter la tenue à chaud et la résistance à l'agression du métal liquide lors de la coulée. La silice à, de ce point de vue, les moins bonnes propriétés intrinsèques alors que la chromite et le zircon présentent, quant à eux, les meilleures caractéristiques, ce qui réservent leur utilisation aux métaux ferreux à haut point de fusion. D'autres critères de choix peuvent intervenir comme la compatibilité avec les résines utilisés, la facilité de mise en décharge ou de recyclage (compatibilité avec d'autres types de sable). **[26]**

1.3.3 Sable de fonte

1.3.3.1 Définition

Une fonte est un alliage métallique dont l'élément essentiel est le fer, et dont la teneur en carbone est supérieure à 2%. Il est à noter que la présence de fortes teneurs en éléments carburigènes peut modifier cette limite de la teneur en carbone. Dans la pratique les pourcentages de carbone se situent le plus souvent entre 3 et 4%

Composition moyenne :

- Carbone : 3 à 4%
- Silicium : 0.5 à 2.5%
- Manganèse : 0.4 à 1%
- Phosphore : 0 à 2%
- Soufre : <= 0.12% **[27]**



Fig. 1.13 Sable de fonte **[28]**

1.3.3.2 Les types de poudre de fonte

- **Fonte blanche**

Dans l'état final de la fonte blanche, tout le carbone est sous forme de carbures. La présence de différents carbures, produits par l'addition d'alliages, rend la fonte blanche extrêmement dure et résistante à l'abrasion, mais aussi très fragile. **[29]**



Fig. 1.14 Dessous de plat en fonte blanche **[30]**

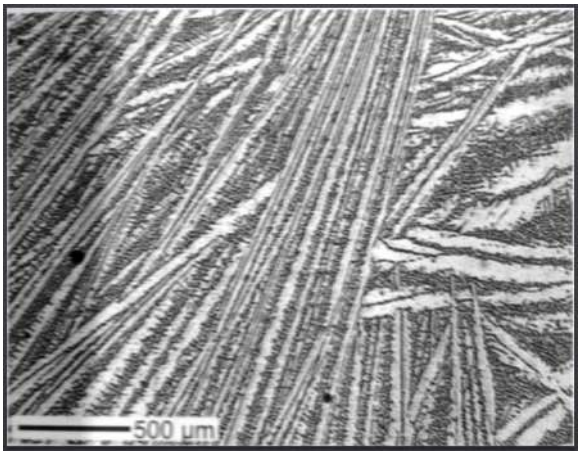


Fig. 1.15 microstructure des fontes blanche eutectiques **[31]**

➢ **Fonte grise**

La fonte grise est, de loin, le type de fonte le plus ancien et le plus commun. Pour cette raison, bien des gens croient que c'est le seul type de fonte et que les termes « fonte » et « fonte grise » sont interchangeables. La fonte grise, ainsi nommée parce que le métal présente des fractures ayant une couleur grise, est composée de carbone sous forme de lamelles de graphite dans une matrice de ferrite ou de perlite, ou d'un mélange des deux. La fluidité de la fonte grise liquide ainsi que son expansion due à la formation de graphite au cours de la solidification en font un matériau idéal pour la production économique de pièces moulées complexes et sans retrait, par exemple les blocs-moteur. **[29]**

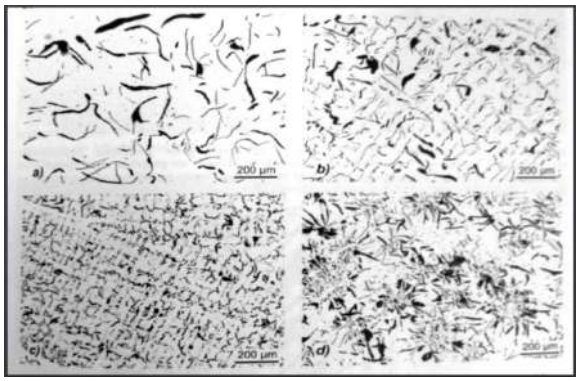


Fig. 1.16 formes de graphite dans les fontes grises [32]



Fig. 1.17 Le moulage au sable avec la fonte grise [33]

- **Fonte malléable**

Contrairement à la fonte grise et à la fonte GS, on moule la fonte malléable à l'état de fonte aux carbures ou de fonte blanche, et un traitement thermique de recuit ou de graphitisation est requis pour convertir les carbures en graphite. La microstructure de la fonte malléable comporte des nodules irréguliers de graphite (carbone de recuit) dans une matrice de ferrite et/ou de perlite. Si le graphite est sous forme de sphéroïdes plus compacts, la fonte malléable a des caractéristiques de ductilité et de résistance presque équivalentes à celles de l'acier moulé à faible teneur en carbone. Dans le cas de la fonte malléable, la formation de carbures au cours de la solidification explique le comportement habituel de retrait. Il faut donc de plus grands réservoirs d'alimentation pour le moulage de ce métal, ce qui se traduit par une diminution du rendement du moule et par une augmentation des coûts de production. **[29]**

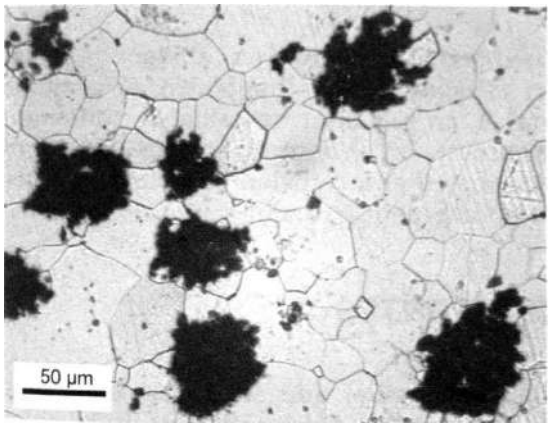


Fig. 1.18 Fonte malléable à graphite nodulaire et matrice ferritique **[34]**



Fig. 1.19 Raccord en T 133 – filetage mâle/femelle 3/8"-1" - fonte malléable **[35]**

1.3.3.3 Propriétés mécaniques de fonte

La résistance et la dureté de la ferrite sont plus importantes dans les fontes que dans l'acier grâce à l'effet durcissant du silicium. Cependant, la résistance à la traction dépend de l'hétérogénéité des fontes. Celle-ci varie en fonction de la proportion de ferrite, de perlite, de carbures et surtout de graphite car celui-ci ne possède qu'une faible résistance à la traction et forme des cavités dans le métal. La présence du graphite a donc 2 principales conséquences :

- Réduction de la section efficace des pièces
- Concentration de contraintes par un effet d'entaille

Les fontes possèdent une résistance à la compression 3 à 4 fois plus élevée que leur résistance à la traction. Ce dernier est régit par 2 paramètres :

- La teneur en carbone
- Les dimensions de la pièce -> vitesse de refroidissement **[36]**

1.3.3.4 Propriétés physiques de fonte

La fonte solide surnage sur la fonte liquide ; on en a conclu qu'elle se dilate en se solidifiant, ce qui lui permettrait **de** mieux : remplir les parties minces des moules**.** Cette interprétation est douteuse. D'après M. Keep, il y a trois expansions à diverses périodes du refroidissement, elles sont variables avec la composition chimique, le manganèse les atténue ou les fait disparaître. Le résultat général est un retrait qui diminue d'amplitude quand la fonte est riche en silicium : on compte i, 5 à 2 °/0 pour les fontes fruitées ou blanches, 1 °/0 pour la fonte grise. La densité varie de 6,90 (fontes grises) à 7,40 (fontes blanches). Elle diminue par la trempe, et peut reprendre sa valeur initiale par un recuit prolongé, La chaleur totale de la fonte fondue est de 33o à 3x5° calories par kilogramme. La chaleur latente de fusion de 80 à 110. **[37]**

1.3.3.5 Moulage en sable mécanique

C'est le procédé de moulage le plus universel et le plus couramment employé, et qui reste toujours très compétitifs avec d'autres procédés plus modernes. Il permet de couler aussi bien de grosses pièces unitaires, que de petites et moyennes pièces en série, sur chantiers de moulage mécanisés, quel que soit l'alliage. Cette technique utilise des moules en sable lié avec de l'argile et de l'eau. Le moulage peut se faire avec ou sans modèle. Il peut être en bois, en plâtre ou métallique **[38]**

- **Avantages du procédé**

- Permet de réaliser des pièces de formes complexes

- Permet de réaliser des formes intérieures et extérieures

- Suivant les procédés de moulage on peut obtenir des pièces dont les dimensions sont plus ou moins proches de la pièce finie

- On peut réaliser des pièces de très grande dimension

- Certains procédés de moulage permettent une production en très grandes séries **[39]**

❖ **inconvénient du procédé**

- Limitation des propriétés mécaniques des pièces (matériau)

- Faible précision dimensionnelle et mauvais état des surfaces pour certains procédés (ex : moulage ensable)

- Procédés dangereux du fait de la manipulation de métaux en fusion

- Problèmes environnementaux (fumées…) **[39]**

1.3.3.6 Particularités des sables usés

Les sables usés sont des résidus de calcination qui résultent du traitement thermique des sables de moulage à haute température (parfois plus de 1000°C) lors de la coulée du métal en fusion. On peut détecter des traces d'adjuvant tels que le noir minéral qui facilite le démoulage des pièces ou des produits organiques de toutes natures (paraffines, graisses aux silicones-esters, sulfonâtes,…). Il est important de signaler que les sables usés peuvent également contenir un certain nombre de corps étrangers (billes de métal, bavures, supports de noyaux, …), si les déchets issus du traitement de régénération des sables de moulage (déchets métalliques, refus de criblage, dépoussiérage) ne sont pas convenablement gérés. Ils peuvent contenir des quantités importantes de métaux lourds, comme le nickel et le chrome, deux éléments d'alliage fréquemment rencontrés dans les aciers. Certains sables usés, issus des sables de moulage à la résine, peuvent contenir des matières organiques plus ou moins dégradées par la coulée. **[25]**

1.3.3.7 Les étapes du moulage au sable pour choisir les meilleurs matériaux

Le moulage au sable est un procédé métallurgique largement utilisé dans la fonderie, presque tous les métaux peuvent être travaillés par cette méthode. Sa principale caractéristique est l'utilisation des moules de sable pour donner forme à des pièces complexes de n'importe quel alliage. Normalement, le moulage au sable a un faible taux

de production puisque le moule doit être détruit pour retirer la pièce. Egalement la finition de surface est relativement rugueuse de sorte qu'un processus de finition est nécessaire **[40]**. Il est utile de comprendre le processus. Nous décrivons brièvement les principales étapes du processus de moulage au sable ci-dessous :

- **modélisme**

La première étape de la coulée en sable est la création de modèles. Le motif est une réplique de l'extérieur de la fonte avec une allocation dimensionnelle pour le retrait et la finition. Si le moulage doit être creux, des motifs supplémentaires appelés noyaux sont utilisés pour créer ces cavités dans le produit fini. Les modèles sont généralement en bois, en plastique, en métal ou en plâtre, cependant, d'autres matériaux ou combinaisons de matériaux sont utilisés s'il y propriétés spécifiques supplémentaires requises du modèle. Le nombre de pièces moulées à réaliser à partir du moule et les spécifications requises pour la pièce finie sont deux des critères qui déterminent le matériau sélectionné pour la création du motif. **[41]**



Fig. 1.20 modélisme **[42]**

- **noyautage**

La prochaine étape du processus est la fabrication de base. Les noyaux sont des formes qui sont placées dans le moule pour créer les contours intérieurs de la pièce moulée. Ils sont généralement constitués d'un mélange de sable (sable combiné avec de l'eau et des adhésifs organiques appelés liants) qui est cuit pour former le noyau, ce qui permet aux noyaux

d'être solides mais pliables, de sorte qu'ils peuvent être facilement retirés de la coulée finie. Étant donné que les noyaux sont fabriqués dans des moules, ils nécessitent un modèle et un moule, appelés boîte à noyaux. Le motif du noyau est fabriqué de la même manière que le modèle de moulage, mais le boîtier du noyau est créé à partir d'un matériau durable comme le métal ou le bois. Comme les noyaux sont en sable, le moule ne peut pas également être en sable. **[41]**



Fig. 1.21 noyautage **[43]**

- **Moulage**

Le moulage est le processus en plusieurs étapes dans lequel les moules sont créés. En coulée horizontale, la moisissure est contenue dans un cadre en deux parties, appelé flacon. La partie supérieure du flacon est appelée acope et la partie inférieure est une traînée. tout d'abord, le sable de moulage est emballé dans un ballon autour du motif. une fois le motif enlevé, des agencements de portes et de glissières sont positionnés dans la moitié de la traînée de la cavité du moule et la carotte est placée dans la partie de face. des systèmes de portes sont nécessaires pour que le métal fondu s'écoule dans la cavité du moule. des noyaux sont également placés dans la partie de traînée du moule si nécessaire. Pour terminer le moule, la section de face (en haut) est placée sur la section de traînée (en bas), et le moule est fermé et serré ensemble. Dans les fonderies de Métal Technologies, les moules sont créés dans de grandes machines de moulage automatisées (Diamantins), un processus qui justifie sa propre explication détaillée. **[41]**



Fig. 1.22 Moulage **[44]**

- **Fonte coulée**

La fusion est la préparation du métal pour la coulée et sa conversion d'un solide à un état liquide dans un four. Il est ensuite transféré dans une poche à la zone de moulage de la fonderie où il est coulé dans les moules. Une fois le métal solidifié, les moules vibrent pour éliminer le sable de la pièce coulée, un processus appelé décochage. **[41]**



Fig. 1.23 coulée du métal en fusion **[45]**

- **Le démoulage**

le nettoyage fait généralement référence à l'élimination de tous les matériaux qui ne font pas partie de la pièce moulée finie. un nettoyage grossier consiste à retirer les systèmes de portes du moulage. La finition initiale élimine tout moule résiduel ou sable de noyau qui reste sur la pièce une fois qu'elle est débarrassée du moule. La taille élimine tout métal superflu. Dans les dernières étapes de finition, la surface de la pièce coulée est nettoyée pour une meilleure apparence. De plus, à ce stade, la pièce moulée est inspectée pour les défauts et le respect des normes de qualité. Cette inspection peut comprendre des essais non destructifs pour déterminer si la pièce fonctionnera correctement pour l'usage auquel elle est destinée **[41]**



Fig. 1.24 Démoulage fonderie **[46]**

1.4 Le béton de sable

1.4.1 Introduction

Le matériau de construction béton est une roche artificielle fabriquée à partir d'un mélange de ciment, d'eau et de granulats (sable et gravier). À son état initial, il est d'abord façonnable à volonté avant de durcir et acquérir sa résistance élevée à la compression. La composition des différents constituants et les proportions respectives idéales de ceux-ci constituent un critère déterminant en matière de qualité du béton.

En fait, il existe plusieurs types de béton, et parmi eux le béton de sable.

1.4.2 Origines de béton de sable

La technique des bétons de sable était tombée en sommeil vers les années 1920 aussi bien en Europe Occidentale qu'en ex URSS pour redevenir d'actualité pendant la deuxième guerre mondiale grâce au comportement de certaines pistes réalisées par l'Allemagne. A travers les différents secteurs (routes, autoroutes, aérodromes, bâtiments et composants du génie civil, ouvrages d'art), les soviétiques ont développé une méthodologie de formulation et surtout de mise en œuvre dans la préfabrication et la projection, Plusieurs ouvrages ont été réalisés à partir de ce matériau et constituent les premières applications de cette technique rapport-sable crête (1987-1991).

En 1954, le professeur REHBINDER et son équipe ont réalisées en Russie les premières expérimentations en laboratoire, l'idée de son travail est basée sur le broyage du mélange composé de ciment et du sable, et d'un agent de mouture sur actif. Un adjuvant réducteur est ajouté lors de malaxage. Les travaux donnent un béton de porosité aussi faible que possible, constitué de capillaires très fins et d'homogénéité maximale après mise en place.

En 1991, MIRONVOK et STERYNE présentent une étude sur des bétons de sable compact à l'aide de l'équipement à vibro-choc pour la fabrication de structures.

En France 1980, des travaux d'expérimentation ont été menés par GUINEZ.R, GLUAIS.G, DELUDE.P. Le but de ces recherches c'est de donner au maçon et entreprises du bâtiment un matériau hydraulique, à base de sable ayant des performances mécaniques modestes, d'autre part, des caractéristiques rhéologiques bien adaptées à une grande facilité de mise en oeuvre, sans vibration avec un retrait limité. En Algérie en 1997, Une étude est faite par M.BENMALEK.ML sur le béton de sable de dune. Cette étude a montré qu'en exploitant les caractéristiques physico-chimiques, ce type de sable pourrait bien constituer le squelette d'un béton pour peu que sa formulation soit judicieusement étudiée. **[47]**

1.4.3 Définition

Un béton de sable est un béton, constitué de sable, de ciment, d'eau et/ou de fines. Par rapport à cette composition de base et pour répondre aux besoins de certains usages, d'autres ajouts peuvent être envisagés tels que : des adjuvants, des fibres, des gravillons, poudrette de caoutchouc etc. Comme son nom l'indique, ce mélange est composé de sable comme élément majoritaire, au lieu des agrégats de gros calibres. Ce qui distingue les bétons de sable des bétons classiques réside essentiellement en leur faible dosage ou non en gravillons tandis qu'un dosage en ciment est similaire aux bétons entre (300 et 400 kg/ m3).

On les distingue des mortiers destinés à la réalisation des joints et des enduits. Ce béton est destiné à réaliser des éléments structuraux, dans le domaine du bâtiment et du génie civil, il doit avoir une résistance caractéristique suffisante, qui est liée à la compacité des constituants mélangés **[48]**

1.4.4 Les composants du béton de sable

1.4.4.1 Les sables

On définit les sables comme étant la fraction des granulats pierreux dont les grains ont des dimensions comprises entre 80µm et 05mm ; il s'agit d'une définition globale, dont les bornes varient d'une classification à une autre. Ce sont aussi les matériaux dont le diamètre maximal est inférieur à 6,3mm et dont le passant à80microns n'excède pas 30% **[49]**

1.4.4.2 Les fines d'ajout (ou addition)

- **Les fines d'ajout**

Les ajouts sont des produits incorporés au béton et qui ne sont ni des ciments ni des granulats ni de l'eau de gâchage ni des additions. Il s'agit par exemple de fibres, de produits augmentant la viscosité ou la thixotropie, de colorants… **[50]**

- **addition**

Ce sont des minéraux utilisés comme constituant du béton pour lui conférer des propriétés particulières **[51]**

Les additions peuvent être des :

- laitiers de hauts fourneaux
- fumées de silice
- cendres volantes
- additions calcaires
- additions siliceuses

1.4.4.3 Les ciments

Le ciment est un liant hydrologique, c'est-à-dire capable de faire prise dans l'eau. Il se présente sous l'aspect d'une poudre très fines qui mélangée avec de l'eau, forme une pate faisant prise et durcissant progressivement dans le temps. Ce durcissement est dû à l'hydratation de certain composé minéral, notamment des silicates et des aluminates de Calcium **[49]**

1.4.4.4 L'eau

L'eau utilisée est conforme à la norme NFP18-303. La proportion élevée d'éléments fins nécessite un volume de mouillage plus important, élevant le rapporte E/C au-dessus de celui des bétons ordinaires ; l'incorporation de plastifiant réducteur d'eau et la sélection de fillers adéquats peuvent réduire la quantité d'eau dans des proportions non négligeables. **[49]**

1.4.4.5 Adjuvants

Un adjuvant est un produit dont l'incorporation à faible dose (inférieure à 5 % de la masse du ciment) aux bétons, mortiers ou coulis, lors du malaxage ou avant la mise en œuvre, provoque les modifications des propriétés du mélange, à l'état frais ou durci. **[52]**

1.4.5 Propriétés du béton de sable

L'un des avantages du béton de sable est le grand besoin d'eau par rapport au béton ordinaire et cela se traduit pour le grand E/C entre 0,6 à 0,7 que ce rapport en cas normal est d'environ 0,5 cette propriété est due à la douceur du mélange (finesse). En outre, la composition des grains joue un grand rôle dans le besoin d'eau, et Lorsque le sable était riche en grands éléments, il y avait moins besoin d'eau. Donc un meilleur Mélange., ce qui se traduit par la relation entre la finesse et le Mélange.

Chaque fois que les ajouts ont été lisses et précis, ont été efficaces pour élever la Compacité du mélange, augmentant ainsi la résistance de ce peu importe quel type de sable. **[53]**

1.4.5.1 Propriétés générales

- **Granulométrie et maniabilité**

Une des particularités des bétons de sable est de nécessiter davantage d'eau que les bétons classiques ceci se traduit par des valeurs du rapport E/C (eau/ciment) systéinatiquement supérieures à 0,5. Ce rapport se situant généralement entre 0.6 et 0,7. Cette particularité est due à une surface spécifique plus importante du mélange : d'ailleurs, si I on considère non plus le rapport E/C. mais le rapport E/C + A (A = Addition en fines), on obtient des valeurs similaires aux bétons tra-additionnels. La granulométrie du sable jouera également sur le besoin en eau : plus le sable est riche en éléments grossiers, plus la maniabilité s'améliore. Ceci se traduit par une relation entre module de finesse et maniabilité **[54]**

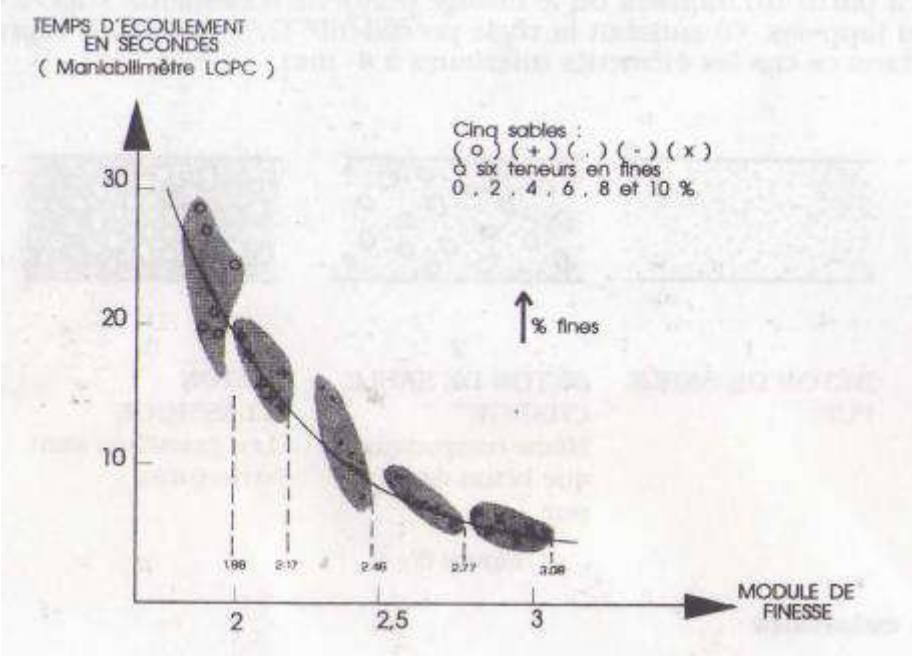


Fig. 1.25 exprime une relation entre le module de finesse et la maniabilité **[54]**

- **Granulométrie et résistance**

A dosage en ciment constant, la résistance peut être différente en fonction d'un certain nombre de paramètre et en particulier :

❖ **La finesse de l'addition**

Plus l'addition est fine plus elle est efficace au niveau du gain en compacité et donc du gain en résistance ; ce résultat est valable quelle que soit la granulométrie du sable (sable alluvionnaire, sable de dune…). **[54]**

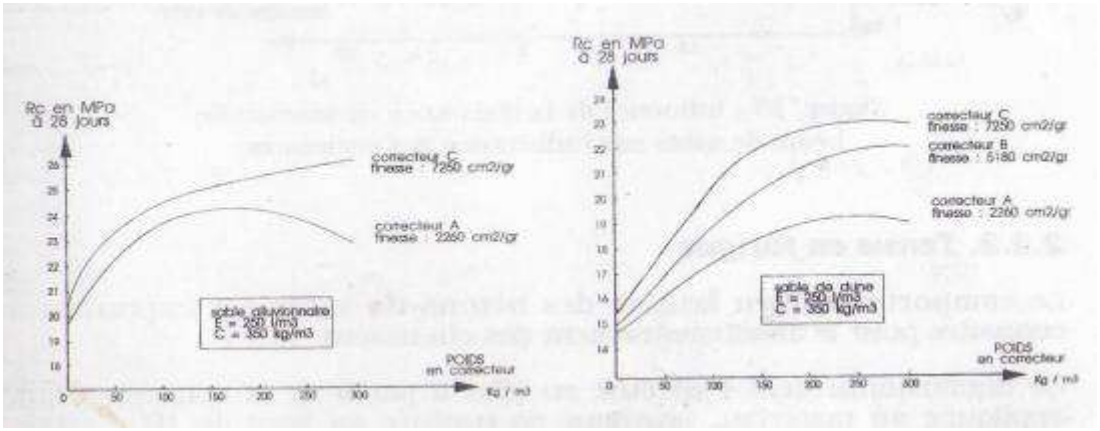


Fig. 1.26 Effet du dosage et de la finesse de l'addition sur la résistance **[54]**

❖ **La nature de l'addition**

A même dosage, permet de constater l'extrême diversité du niveau de performance atteint selon la nature du filler ; si l'addition de fines permet d'améliorer systématiquement la résistance, ce gain est en effet très variable. **[54]**

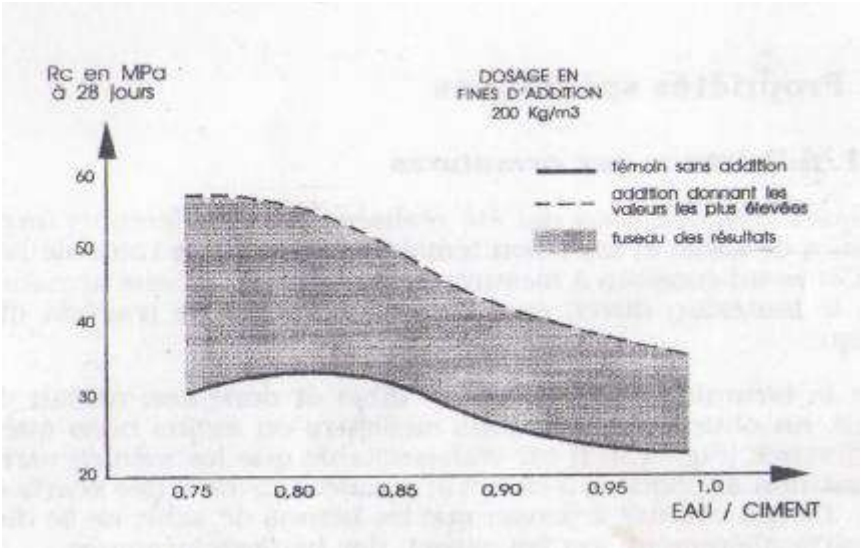


Fig. 1.27 Influence de la nature de l'addition sur le niveau de résistance **[54]**

❖ **La dimension du D_{max}**

Pour une même valeur du rapport E/C (eau/ciment), on constate (Fig. 1.28 - a) que l'effet du diamètre Dmax du plus gros granulat est peu important et, en tout état de cause, pas défavorable aux sables. Le seul problème tient à la maniabilité très différente selon les bétons : très maniable dans le cas d'un 0/20, on aura une maniabilité de type préfabrication dans le cas du sable. A même dosage en ciment (Fig. 1.28 - b) mais à E/C différent, les différences sont beaucoup plus importantes. Les maniabilités étant identiques, il faudra beaucoup plus d'eau dans le cas des sables, ce qui aura pour conséquence une chute de la résistance. Là encore, on pour- ra minimiser cette chute par l'emploi d'un plastifiant réducteur d'eau **[54]**

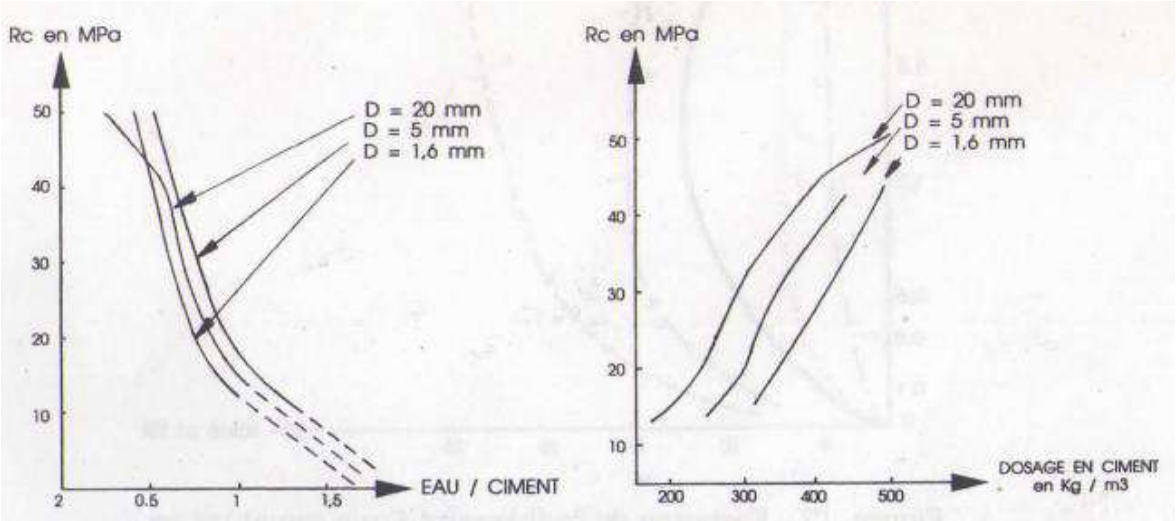


Figure (a) **Figure (b)**

Fig. 1.28 Effets de la granularité sur la résistance **[54]**

1.4.5.2 Propriétés spécifique

➢ **L'adhérence aux armatures**

Selon la formulation du béton de sable (donc son niveau de performance), on obtient des propriétés spécifiques à l'adhérence aux armatures plus ou moins bons que le béton de référence. Quelques comparaisons ont été réalisées entre différentes formulations de béton de sable et un béton témoin traditionnel à l'aide de l'essai pullout. Il s'agit de mesurer le

déplacement d'une armature qui se trouve dans le matériau durci, en fonction de l'effort de traction qui lui est appliqué. Sur la base des résultats de cet essai, on remarque que des variations de compositions appliquées au béton de sable mènent à des écarts du même ordre que les bétons traditionnels, ce qui a amené à penser que les bétons de sable ne se distinguent pas particulièrement sur cet aspect des bétons traditionnels classiques. . **[54]**

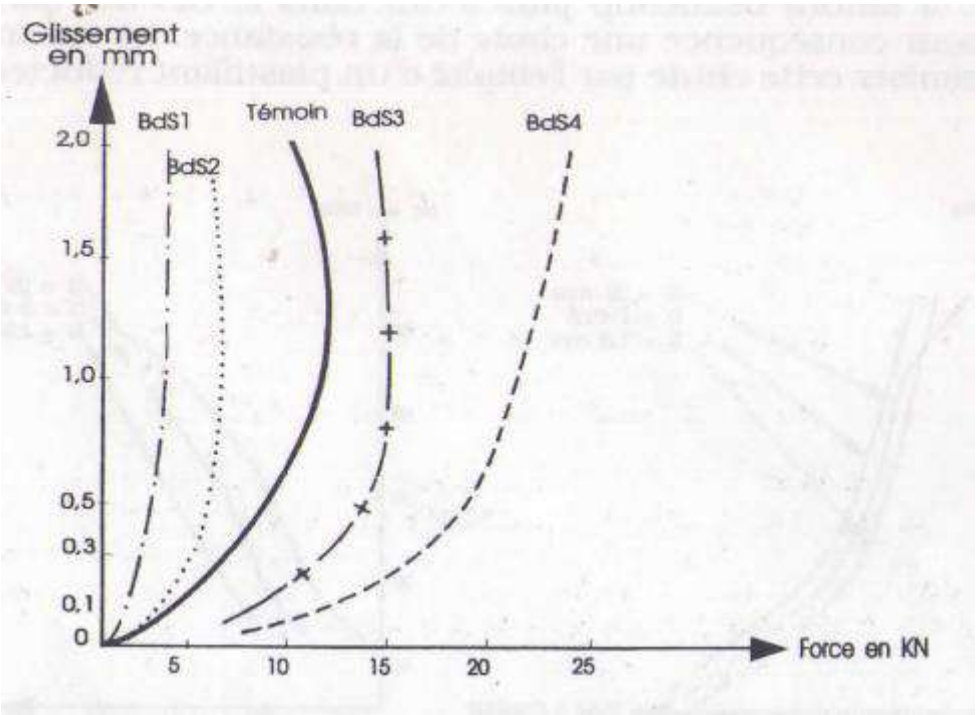


Fig. 1.29 Variation de l'adhérence d'une armature en fonction de la formulation. **[54]**

- **Durabilité des bétons de sable**

Conventionnellement, la durabilité d'un béton est reliée à ses capacités d'échange avec le milieu extérieur. De ce fait, il est évident que les para- mètres tels que porosité, organisation géométrique des pores et perméa- bilité sont des paramètres physiques de premier ordre de la durabilité. De même, les phénomènes internes tels que l'alcaliréaction ou l'attaque sulfatique différée sont aussi des processus d'altération du béton accé- lérés par les échanges hydrauliques avec le milieu extérieur. La tenue d'un béton vis-à-vis des phénomènes d'échange dépend aussi de l'environnement de celui-ci, raison pour laquelle l'estimation de la durabilité s'effectue généralement par un ou plusieurs essais suivants,

selon l'environnement prévisible du matériau (milieu urbain, région montagneuse, milieu marin, ambiances agressives...) : -

- perméabilité à l'air et à l'eau
- gel-dégel
- carbonatation
- pénétration des ions chlorure.. **[54]**

- **Résistance au gel et au dégel**

De même, la tenue au gel des bétons de sable formulés correctement est excellente. En effet, par comparaison à une étude menée sur un large éventail de formulations de bétons traditionnels, les bétons de sable à formulation et performance équivalentes résistent mieux au gel que les bétons traditionnels correspondants. Certains bétons de sable, même sans ajout d'entraîneur d'air, présentent une résistance au gel équivalent aux bétons classiques les plus performants de ce point de vue. Cette bonne tenue aux cycles gel- dégel, quand elle ne résulte pas d'une formulation visant, soit une très faible porosité, soit une porosité bien répartie par l'emploi d'entraîneur d'air, s'explique par la microstructure particulière des bétons de sable, qui est en général, caractérisée par une bonne répartition de micropores **[54].**

1.4.6 Retrait et Fluage

- **Retrait**

Le retrait d'auto-dessiccation est caractérisé par une cinétique semblable à celle du béton classique. Une différence de l'ordre de 10% existe par rapport à ce dernier. Cette différence, couramment observée à l'intérieur même de la gamme des bétons, est due à une perte en masse plus rapide pour le béton de sable. Le rapport des déformations de retrait de dessiccation des deux bétons, en fin d'essai (6 mois), est égal à 1.6 correspondant globalement au rapport de perte en masse au même âge, . En conclusion nous pouvons dire que le retrait est une fonction croissante de l'eau évaporable (taux de séchage) **.**Notons que la valeur du retrait du béton de sable est voisine de celle du béton ordinaire s'il est conservé dans un milieu étanche. Si la conservation se fait dans un milieu sec, la valeur du retrait du béton de sable est double de celle du béton ordinaire. **[55]**

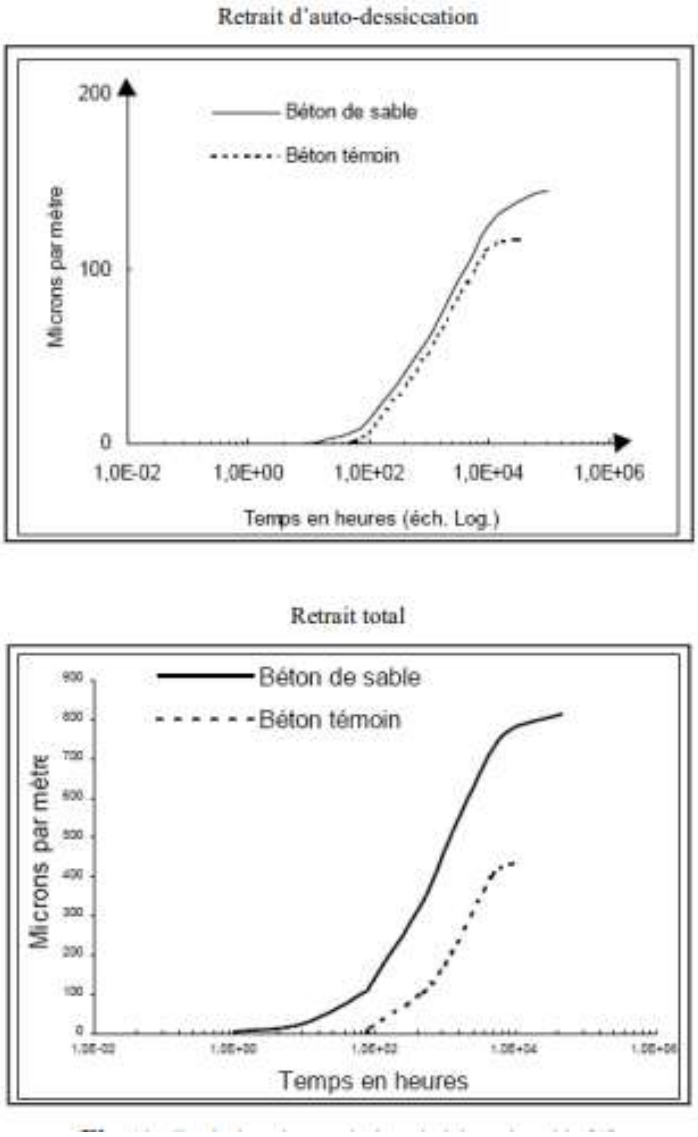
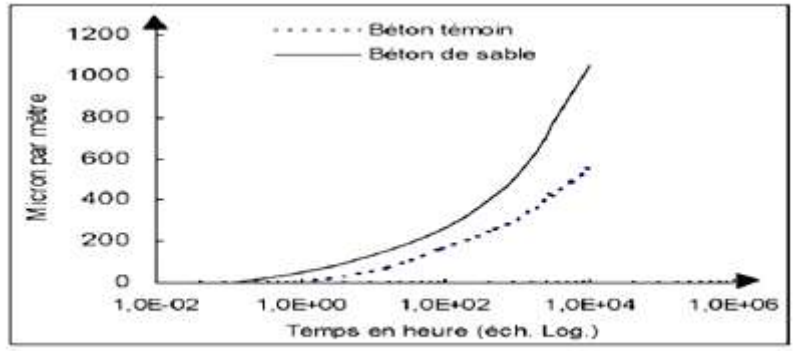


Fig. 1.30 Evolution du retrait du béton de sable **[55]**

- **Fluage**

Le fluage est une déformation qui résulte de l'effet d'une contrainte constante appliquée au béton.

Afin d'atténuer ce phénomène, il est conseillé de réduire le dosage en ciment en ajoutant des granulats. Les essais de fluage effectués sur le fluage ont concerné les bétons de sable et les bétons ordinaires afin de les comparer. La (Fig. 1.31) montre que la valeur du fluage du béton de sable est plus importante que celle du béton classique. Ceci est lié aux paramètres rentrant dans la composition des deux matériaux et qui influent systématiquement sur les déformations et donc sur les résistances. **[56-57]**



Fluage d'auto-dessiccation

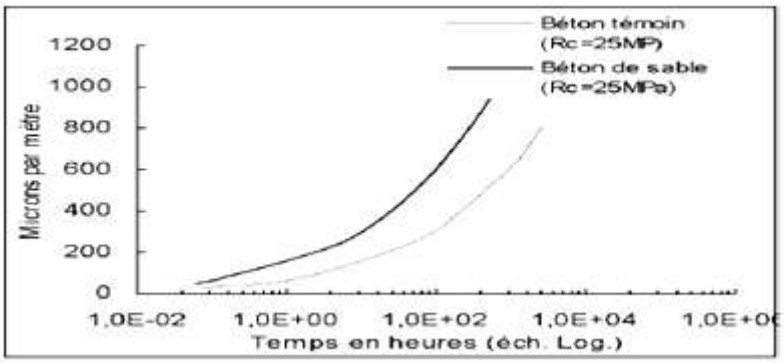


Fig. 1.31 Evolution du fluage du béton de sable **[57]**

- **Comportement thermique du béton de sable**

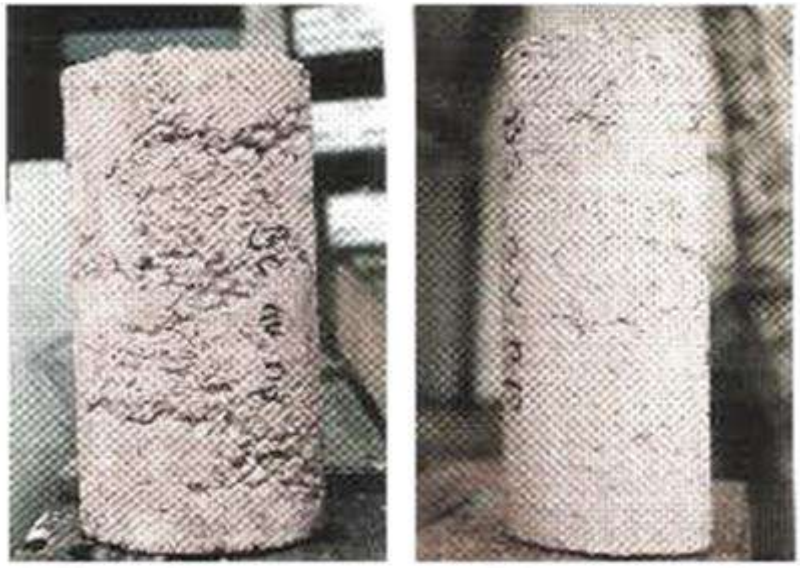
La réaction d'hydratation du ciment est très exothermique (40 à 60 J/g). Ceci provoque, lors de la mise en œuvre du béton, des élévations de température pouvant atteindre 50 °C au cœur de pièces massives. Lors du refroidissement, les variations de température sont à l'origine de contraintes mécaniques, ce qui peut conduire à la fissuration des pièces. **[54].**

- **Phénomène de ségrégation des constituants**

Leur faible étendue granulométrique, et donc leur plus grande homogénéité, combinées à une bonne maniabilité, confèrent aux bétons de sable un meilleur comportement que les bétons traditionnels vis-à-vis des phénomènes de ségrégation.

Cette faculté a pu être mise en évidence à travers des expériences comparatives sur des bétons de sable et des bétons classiques équivalents, avec des plasticités et des modes de mise en euvre variables.

par exemple, montrent les différences d'aspect de la peau de deux éprouvettes, coulées sans action extérieure sur le serrage, à des consistances plastiques équivalentes (cônes de 14 cm). **[54]**



a) Béton ordinaire **b)** Béton de sable

Fig. 1.32 Eprouvettes non vibrées non piquées **[54]**

1.4.6.1 Techniques particulières

Le béton de sable peut être utilisé dans différents domaines, et sous plusieurs formes. La plupart des applications actuelles du béton de sable tiennent davantage à ses propriétés spécifiques, par rapport au béton traditionnel, qu'à l'économie qu'il pourrait représenter en remplaçant celui-ci. **[55]**

1.4.6.2 Béton de sable projeté

Ils se sont révélés particulièrement intéressants, techniquement et économiquement et se prêtent au renforcement de structure par projection, exemple :

- La réhabilitation de collecteurs d'assainissement.

- La stabilisation de parois ou talus.

En général, le béton de sable peut être également utilisé en projection dans des travaux de Rénovation, de ponts, d'égouts visitables et de bâtiments **[55]**

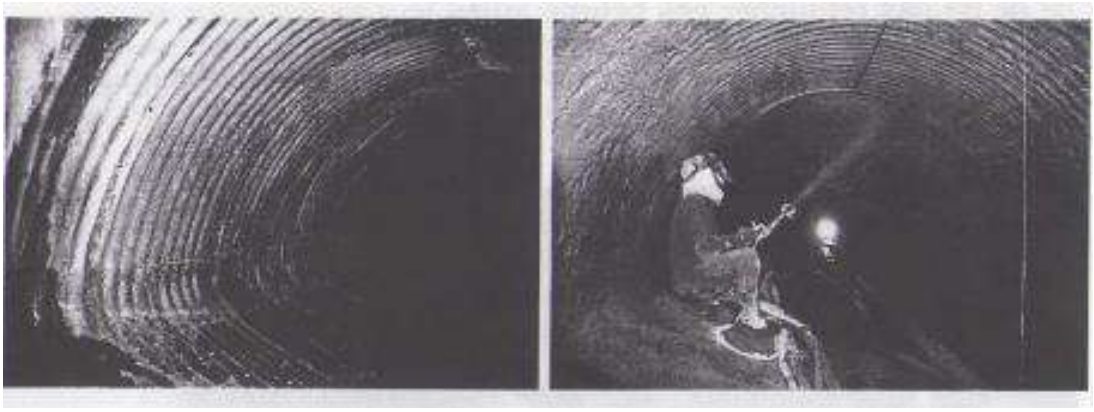


Fig. 1.33 Le béton de sable en projection **[54]**

1.4.6.3 Bétons de sable fluides

Les bétons fluides ont été développés récemment afin d'améliorer les conditions d'exécution et la productivité des chantiers ainsi que la qualité et la durabilité des ouvrages. Ces bétons ont trouvé un grand intérêt dans certaines conditions d'utilisation telles que : l'absence de vibration, la faible accessibilité aux zones ferraillées et aux formes complexes des coffrages et le besoin de pomper le béton à des distances importantes. Le concept du BS s'adapte parfaitement aux conditions particulières citées ci-dessus. En plus, l'absence totale ou partielle des gros granulats dans le BS minimise le risque de ségrégation. La fluidité doit être assurée par l'utilisation des adjuvants super plastifiants afin d'éviter l'ajout excessive et incontrôlé de l'eau, qui entraîne une diminution des performances physico-mécaniques et de la durabilité. Pour que les bétons de sable fluides soient homogènes et stables vis-à-vis du phénomène de ségrégation et de ressuage, l'utilisation des éléments fins ou d'un adjuvant de viscosité est obligatoire.

Les bétons de sable fluides sont intéressants pour certaines applications en génie civil comme les pieux forés, les injections et les reprises en sous oeuvre. Les bétons de sable fluides sont économiquement mieux adaptés aux dallages du bâtiment. S'agissant d'éléments horizontaux, la fluidité convient et l'auto-nivellement est un atout considérable. L'intérêt réside dans les avantages suivants :

- Rapidité et simplicité d'exécution ;
- Limitation des moyens en personnel et en matériels ;
- Nuisances réduites (absence de vibration).

Dans le cas des aménagements de voirie peu dénivelés (comme les aires de stationnement et les voies piétons), où les performances demandées ne seront pas élevées, elles se prêtent parfaitement à la technique de fluidification de BS.

Les bétons de sable fluides présentent des performances comparables aux bétons fluides classiques, dont l'utilisation semble se développer actuellement. Indépendamment de l'aspect environnemental lié à l'utilisation des BS, il pourra être mieux adapté aux cas suivants :

- Risques de ségrégation préjudiciables ;

- Forte densité de ferraillages ;

- Recherche d'un produit fini ;

Le BS fluidifié présente un surcoût allant de 10 à 25 % par rapport à un béton traditionnel. Par exemple, les BS nécessitent des dosages plus élevés en fluidifiants et additions que les bétons traditionnels, pour avoir des performances identiques.

Indépendamment à l'aspect économique et aux gains de productivité, le BS fluidifié peut être une meilleure adaptation aux plusieurs applications mal assurées par les bétons traditionnel **[53]**

1.4.7 Domaines d'emploi des bétons de sable

Les BS sont employés à grand échelle dans plusieurs domaines telle que le domaine de préfabrication : bordures et toitures, tuyaux, mobilier urbain, voûtes en voiles minces, caissons de plafond, cloisons et autres éléments constructifs d'immeubles, etc. Et aussi dans le bâtiment, ou le BS consiste a remplacer le BO dans des structures en béton armé coulé et vibré, ou hyper compacté : (éléments horizontaux et verticaux, dalles, fondations etc.)**[54]**

1.4.8 Formulation du béton de sable

1.4.8.1 Approche théorique d'une formulation d'un béton de sable

Les granulats d'un béton jouent un rôle d'ossature et la pâte (généralement le ciment avec l'eau) assure, dans un premier temps, la cohésion et l'écoulement, et joue aussi le rôle d'une colle liant les granulats en donnant une certaine durabilité au matériau durci.

Le premier problème qui se pose lors d'une formulation d'un béton est la compacité du squelette granulaire définie comme le rapport du volume des constituants solides sur le volume total du mélange; il faut assurer au mélange une compacité maximale et donc diminuer au maximum la porosité.

Cependant la détermination de cette compacité maximale n'est pas facile et fait l'objet de modélisation poussée. Caquot a pu établir à partir des données expérimentales une relation mathématique reliant le volume des vides d'un mélange granulaire présentant une compacité maximale et son étendue granulaire (d/Dmax). **[55]**

Pour ce mélange optimisé la relation de Caquot s'écrit comme suit :

$V=Vo(d\ /Dmax)^{1/5}$ (1)

V : Volume des vides du mélange granulaire ;

Vo : Constante expérimentale comprise entre 0,7 et 0,8 ;

d : La dimension du plus petit grain de l'étendue granulaire ;

Dmax : La dimension du plus gros grain de l'étendue granulaire.

- **Dosage en fines d'un béton de sable**

Pour le but d'optimiser la compacité des constituants solides du béton de sable, il faut que ces constituants soient séparés en deux fractions. [**55]** :

1. Les éléments fins qui regroupent tous les grains de taille inférieure à 80 µm et qui sont le ciment, les fines d'ajout et la fraction du sable inférieure à 80 µm.
2. Toute l'étendue du sable comprise entre 80 µm et le diamètre maximal du sable Dmax, ainsi que l'éventuelle fraction des éléments supérieurs à 80 µm, provenant des fines d'ajout.

En faisant cette distinction entre les fines incluant les éléments inférieurs à 80 µm et

l'étendue du sable comprise entre 80 μm et le diamètre maximal du sable, la porosité du sable peut être calculée selon la formule précédente de Caquot. **[55]** :

$$Ps = V = 0.75\ (0.08/D)^{1/5} \quad \text{.....(2)}$$

Ps (v) : Porosité du sable d'étendue granulaire comprise entre 80 μm et Dmax.

Dmax : Diamètre maximal du plus gros grain du mélange.

La constante expérimentale (Vo) est prise comme étant la moyenne des valeurs extrêmes (0.7, 0.8). Un dosage optimal en fines d'ajout sert à compléter l'étendue granulaire bornée inférieurement par la coupure 80 μm, et à combler la porosité du sable ainsi calculée. En effet, il est impossible de prendre en compte la distribution de la taille des particules pour les fines d'ajout car l'assemblage géométrique relève surtout des forces électriques inter-granulaires. .

En apportant quelques simplifications, Caquot s'est rendu compte que le volume de l'ensemble des particules fines (< 80 μm) et le volume de vide associé à l'empilement de ces fines sont égaux, autrement dit le volume des vides restant dans le mélange est égal au volume de l'ensemble des fines d'ajout. [Fines]= [Vides].

Il suffit de combiner les deux résultats précédents de Caquot pour en déduire que le dosage volumique optimal en fines d'ajout est la moitié de la porosité du sable et que l'autre moitié correspond à la porosité minimale résiduelle.

$$[\text{Fines}] = 0.38\ (0.08/D_{max})^{1/5} \quad \text{..... (3)}$$

Cette dernière formule montre que le dosage en fines dépend surtout de la dimension du plus gros grain, il apparaît très clair que plus le diamètre maximum diminue plus le dosage en fines augmente **[55]** Figure (1.34).

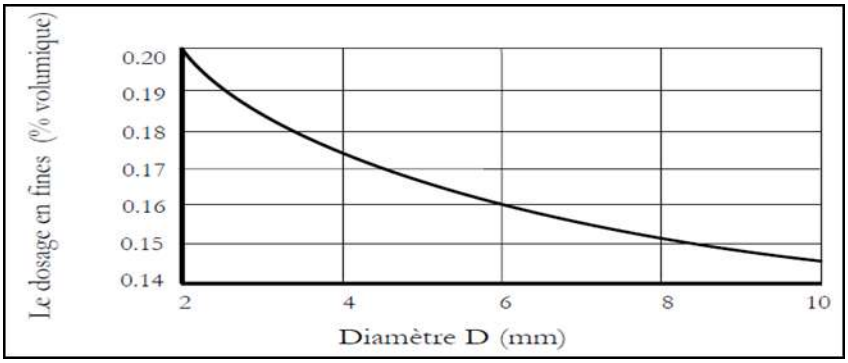


Fig. 1.34 Influence du diamètre D du sable sur le dosage en fines **[54]**

- **Dosage en eau d'un béton de sable**

Après optimisation du squelette granulaire, la compacité maximale conduisant à une porosité minimale ne sera atteinte que si la consistance le permet ; pour cela d'autres travaux de Caquot sur la compacité ont abouti à une autre relation à partir de la relation de base, en admettant que la porosité du squelette granulaire se décompose en la somme d'un volume d'eau et d'un volume de vide piégé notés respectivement e et v. **[55]**

$$(e+v)_{min} = 0.8\ (d/\ Dmax)^{1/5} \quad \text{……………………………. (4)}$$

Le calcul de la porosité minimale exige la connaissance de la plus petite dimension de l'étendue granulaire du mélange (d). L'estimation de cette valeur dans le cas d'un mélange totalement défloculé (chaque particule élémentaire agit indépendamment) est donnée par la formule suivante **[55]** :

$$d = (60\ /\ (f))\ mm \times \rho \quad \text{…………………………….. (5)}$$

Avec:

f : surface spécifique exprimée en cm2/g du constituant.

ρ : densité du constituant exprimée en g/cm3.

C'est la moyenne harmonique de la dimension des grains les plus fins du constituant assimilés à des sphères.

Cette définition de (d) ne peut pas être retenue pour les mélanges floculés :

La dimension des flocs relevant des considérations physico-chimiques très complexes. Un ordre de grandeur peut être avancé de l'ordre de 20 à 25 μm pour le diamètre ; ainsi l'élargissement de l'étendue est la seule solution pour la réduction de la porosité théorique minimale. (Fig. 1.35)

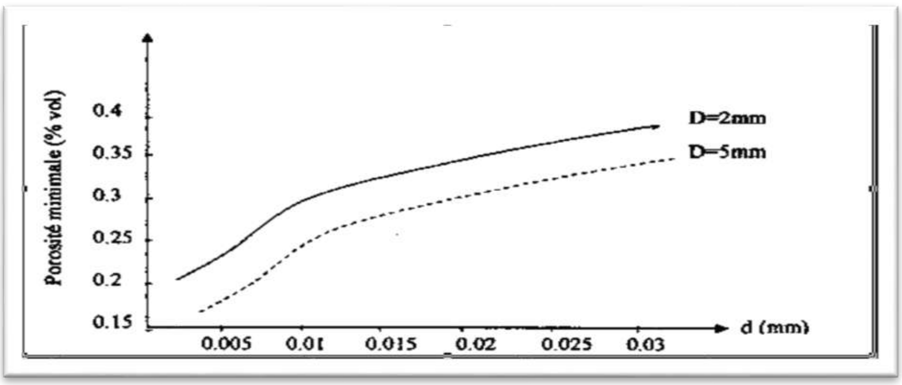


Fig. 1.35 Influence de la dimension d sur la porosité minimale du béton pour deux tailles D du sable **[54]**

L'expérience montre que pour des quantités d'eau inférieures à la quantité d'eau permettant d'obtenir l'ouvrabilité optimale, le mélange piégera une forte quantité d'air quelques soient les moyens de serrage utilisés, et par suite une porosité (e+v) supérieure à (e+v) min, alors pour des quantités d'eau supérieures à celles qui donnent l'ouvrabilité optimale, la quantité d'air piégée reste stable et l'ouvrabilité augmente de façon linéaire. (fig.1.36)

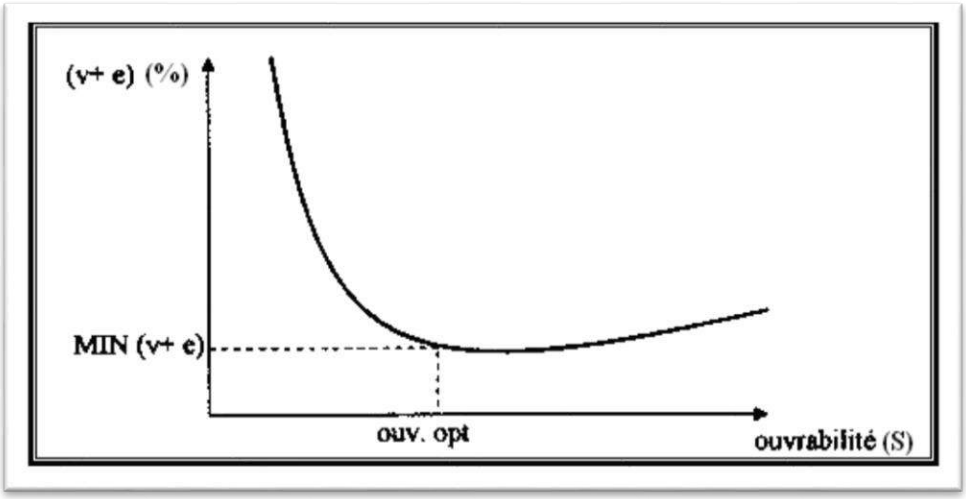


Fig. 1.36 Relation entre l'ouvrabilité et le dosage (e + v) d'une matrice pour une mise en œuvre donnée **[54]**

Finalement, pour estimer le dosage en eau, il faut préalablement évaluer la quantité d'air piégée. Dans le cas des bétons de sable cette quantité est légèrement supérieure à celle des bétons ordinaires et la formule qui suit conduit à des teneurs en air de l'ordre de 3 à 5%.

[Vide] = K [eau] ……..……(6)

Avec :

K : constante comprise entre 0.2 et 0.25.

- **Dosage en sable**

Pour estimer le dosage en sable, il suffit de compléter au mètre cube la somme des constituants fines, eau et vides, comme ci-dessous **[55]** :

[Sable]=1000-[fine]-[eau]-[vide] (l/m3)

Il reste à noter que le volume du sable ainsi calculé regroupe toutes les particules de taille supérieure à 80 µm, soit du sable, soit de la fraction des fines d'addition.

- **Estimation de la résistance en compression**

L'estimation de la résistance en compression se fait par référence aux méthodes classiques adoptées pour les matrices cimentaires qui consistent à partitionner la

contribution du squelette granulaire, de la nature du liant et des dosages des constituants de la pâte. **[55]**

Dans le cas de bétons formulés avec des fines potentiellement réactives, une généralisation de la formule de FERET **[1]** a été proposée récemment.

$$R_b = \frac{Kf * Rc}{\left(1 + \frac{3.1(e+v)}{c(1+K1+K2)}\right)^2} \quad \text{.....(7)}$$

Kf : coefficient granulaire compris entre 4.5 et 5 ;

Rc : classe vraie du ciment (MPa) ;

e : dosage en eau totale (l/m3) ;

V : air piégée (l/m3) ;

C : dosage en ciment (kg/m3) ;

R_b : résistance à la compression du béton à 28 jours (MPa).

Avec

K1 = Kcv (CV/C) +Kfs (FS/C);

0.2<Kcv<0.4 ;

2<Kfs<3.3 ;

K1 0.5 K2= Kfi1 (Fil/C);0<Kfil 0.4 ;

K1<0.2

K1 : coefficient pouzzolanique

K2 : coefficient d'activité du filler calcaire.

Kcv., Kfs, Kfil : coefficients d'équivalence en ciment des différentes additions en fines.

CV, FS, FIL : dosage en cendres volantes, fumée de silice et filler calcaire (kg/m3)

Cette formule ne peut être utilisée que par une identification précise de l'activité des additions par l'intermédiaire des coefficients déjà mentionnés (Kcv., Kfs et Kfil).

Les valeurs données pour les différents coefficients d'activité ont, ici, un caractère essentiellement indicatif, d'autres additions peuvent être également utilisées, telles que les fines siliceuses généralement considérées inertes et les fines de laitier qui peuvent présenter un caractère hydraulique non pris en compte dans la formule précédente**.**

Ainsi d'autres paramètres pourraient également jouer un rôle sur l'activité liante des fillers tels que la répartition granulaire, la forme des grains, et leur porosité. L'activité de

filler calcaire présente un optimum au-delà duquel la contribution de l'activité de filler ne participe plus aux développements de performances mécaniques**.** (fig.1. 37**)**

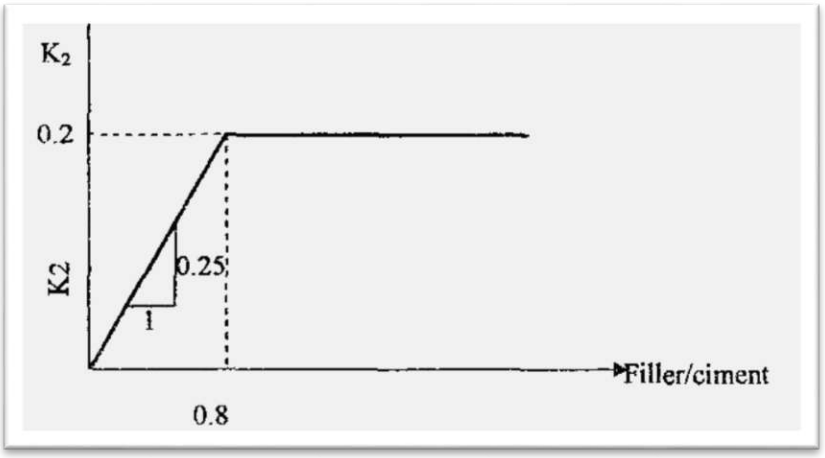


Fig. 1.37 Coefficient d'activité du filler calcaire (modèle) **[54]**

Ainsi il y a d'autre paramètre qui s'ajoutant pour le dosage en fines, toute fois le dosage en fines est estimé en terme de compacité, ces fines regroupant le ciment, l'addition (filler calcaire, cendres volantes …) et la fraction du sable inférieur à 80 µm, ainsi que l'optimum de la résistance serait atteint pour les dosages en ciment et en addition, solution du système suivant :

- Dosage en ciment + dosage en fines d'addition = dosage en fines.
- Dosage en fines d'addition / dosage en ciment = optimum d'activité.

Cette formulation théorique simple et performante donne la possibilité au formateur de jouer sur certains paramètres en restant à la compacité maximale, elle constitue une bonne base pour la mise au point d'une formulation de béton de sable.

Elle ne peut être utilisée que dans un cadre limité, ceci est dû aux nombreuses hypothèses qui la jalonnent, c'est aussi pour cela que cette approche ne sera acceptée qu'après passage à l'expérience qui la confirme.

On peut résumer toutes les étapes de la formulation théorique sous forme d'organigramme comme indique la Figure (1.38).

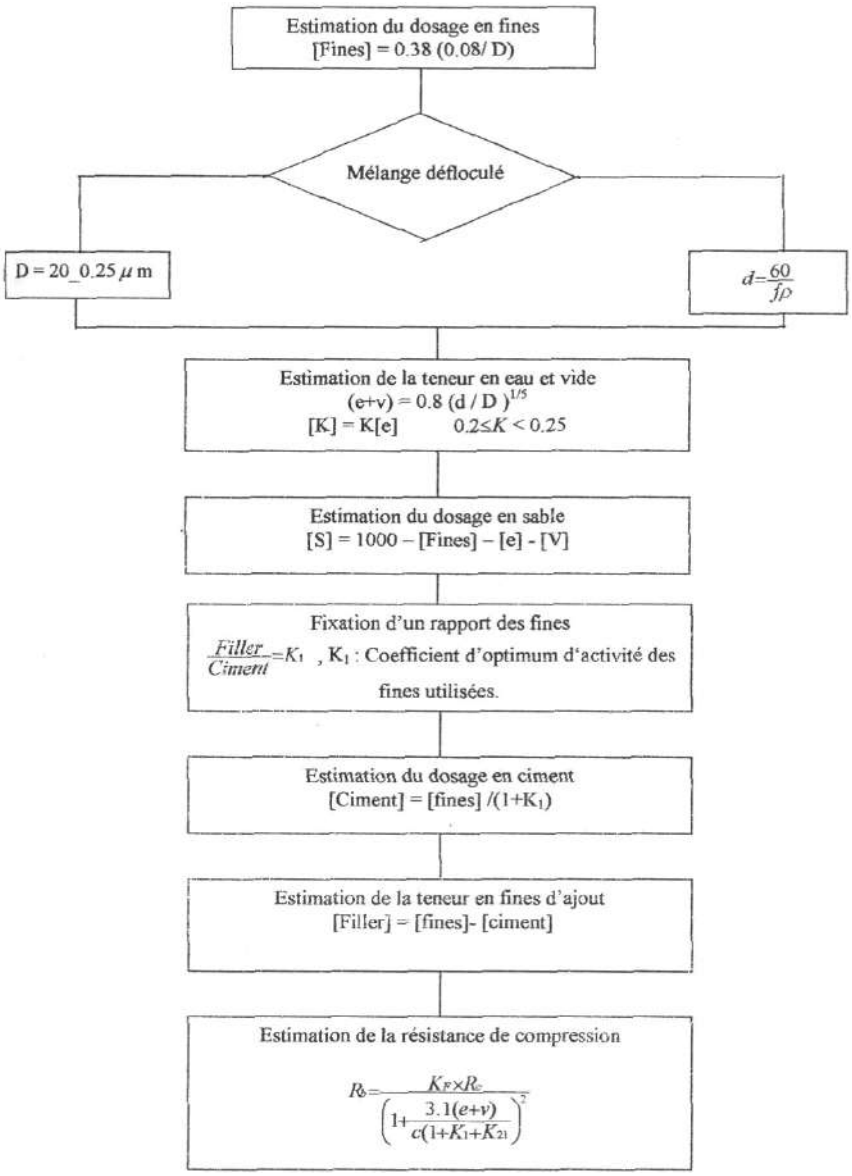


Fig. 1.38 Organigramme de la méthode théorique **[54]**

1.4.8.2 Méthode expérimentale de formulation des bétons de sable

- **Détermination d'une formule de base sans fines d'addition**

Pour cela on cherche à réaliser un béton de sable dont la maniabilité est comprise entre 7 et 10 secondes au maniabilimètre LCPL ; ce béton est composé seulement de ciment, d'eau et de sable. **[55]**

✓ **Le dosage en ciment**

Les dosages en ciment sont souvent influencés par la destination du béton (bâtiment, barrage, milieu agressif...etc.), mais on opte toujours à des minimums selon les prescriptions et les normes en vigueur. Ces dosages sont fixés lors de l'étude et sont notés par C (kg/m3). **[55]**

✓ **Dosage en eau**

L'estimation du dosage en eau est approximative. A ce stade de la formulation et sur la base de l'expérience, les praticiens donnent à titre indicatif un dosage en eau de 220 l/m3 pour un dosage en ciment de 350kg/m3, 250l/m3 d'eau pour un dosage en ciment de 400Kg/m3, mais on peut toujours utiliser la formule exposée dans la méthode théorique permettant d'estimer le dosage en eau en fonction de la porosité du squelette granulaire. **[37]**

$$E = \frac{800}{1+\alpha} * \left(\frac{d}{D}\right)^{\frac{1}{5}}$$

α: compris entre 0.1 et 0.15 ;

d : est la borne inférieure de la phase solide du béton (mm) ;

D : est la borne supérieure de l'étendue granulaire du sable (mm) ;

✓ **Détermination du dosage en sable**

Dans un premier temps et pour permettre la défloculation des fines, on utilise un fluidifiant réducteur d'eau au dosage normal préconisé par le fabricant (N% du poids des éléments inférieurs à 80 μm) .

Le béton contient toujours un volume d'air Vair , la teneur en air des bétons est de l'ordre 3% en volume. Cette valeur est supérieure pour le béton de sable et se situe entre 5% et 7 % du volume. Le dosage en sable peut être calculé par soustraction des différents volumes des constituants précédents **[55]**

$$V_{sable} = 1000 - V_c - V_{adj} - V_{air} - V_{eau} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (8)$$

Connaissant la masse volumique absolue du sable, on peut déduire la masse nécessaire pour la formulation d'un mètre cube du béton de sable.

$$M_{sable} = MVA * V_{sable} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (9)$$

Msable: masse nécessaire pour 1 m3 du béton de sable.

MVA sable : masse volumique absolue du sable.

V_{sable} : volume du sable.

Après détermination des différentes proportions des constituants, cette formulation permet de calculer la masse volumique apparente théorique (MVAT) en sommant l'ensemble des masses ainsi calculées pour le volume unitaire (1 m3).

$$MVAT = m_{ciment} + m_{eau} + m_{adj} + m_{sable} \text{ ……...(10)}$$

- ✓ **Réglage de la maniabilité et du rendement de la formule**

Le mélange obtenu selon les formules précédentes doit répondre aux objectifs fixés et qui se résument dans les deux critères essentiels :

• La masse volumique apparente réelle doit être égale à la masse volumique apparente théorique calculée par la formule (9)

• La maniabilité du mélange sera comprise entre 7 et 10 s selon le maniabilimètre LCPC.

L'objectif est d'obtenir une formule de un mètre cube (c'est-à-dire faire tendre la masse volumique apparente théorique (MVAT) vers la masse volumique apparente réelle (MVAR)) et le temps d'écoulement de 7 à10 S.

La formule du béton doit être corrigée à l'aide de l'équation itérative suivante (correction sur le sable).

$$Si = S_{i-1}(MVAT_{i-1} - MVAR_{i-1}) + V * MVA_{sable}. \text{ …… (11)}$$

Où

Si : dosage en sable après correction

S_{i-1} : dosage en sable avant correction MVAT,

MVAR : les masses volumiques du béton théorique et réel

MV sable : masse volumique absolue du sable

V : le volume d'eau à rajouter ou à retrancher selon l'écoulement.

Il sera rajouté si 1'écoulement au maniabilimètre est supérieur à 10s (-V dans la formule précédente n° 10). Il sera retranché si 1'écoulement au maniabilimètre est inférieur à 7s (+V dans la formule n° 10) Après chaque correction la masse volumique théorique sera comparée à la masse volumique réelle. En ajustant le dosage en eau et en sable conformément à ce principe, le dosage en eau devient définitif et le temps d'écoulement est alors compris entre 7 et 10 s, et la formule fait le mètre cube du béton de sable. **[55]**

- ➢ **Détermination du dosage en fines d'addition**

Les fines d'ajout sont destinées à corriger l'indice des vides des sables et à limiter le dosage en ciment des bétons de sable. Elles sont incorporées au mélange de base à un

rapport E / C constant et à un dosage optimal permettant d'augmenter la compacité sans changement du volume total (MVAR=(MVAT).

Ce qui revient à dire que la masse volumique théorique du mélange et la masse volumique réelle restent égales. Pour cela des gâchées de béton de sable seront réalisées aux différents dosages en fines dans leur plage d'emploi usuelle. Pour chaque gâchée, les essais de maniabilité et la détermination de la masse volumique doivent être réalisés et fixés précédemment afin de les comparer aux critères imposés. Si ces derniers ne sont pas vérifiés, la correction sur le sable s'effectue toujours selon la formule suivante jusqu'à égalité des masses volumiques théorique et expérimentale.

$$Si = S_{i-1}-(MVAT_{i-1} -MVAR_{i-1}) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(12)$$

1.5 Influence des déchets de fonderie sur les propriétés des matériaux cimentaires

1.5.1 Etats frais

- **Maniabilité**

Joy et Mathew **[58]** ont constaté que l'ouvrabilité du béton est diminué en fonction d'augmentation du pourcentage de sable de fonderie**.[59]**

Khatib et al. **[60]** ont trouvé que le remplacement de (0%, 20%, 40%, 60%, 80% et 100%) du sable par le sable de fonderie influe négativement sur l'affaissement du béton ordinaire ce qui confirme les résultats de Aggarwal and Siddique **[61],**qui ont trouvé aussi que l'affaissement du béton ordinaire est diminué en fonction d'augmentation du pourcentage de déchets de fonderie et qui ont expliqué cette diminution par l'absorption d'eau de grain de déchets de fonderie qui est plus importante que celle du grain du sable naturel.

Prabhu et al. **[62]** ont trouvés aussi que l'ouvrabilité du béton ordinaire est diminuée en fonction de substitution du sable par le sable de fonderie, ce qui confirme les résultats de Guney et al. (Fig. 1.39**)**

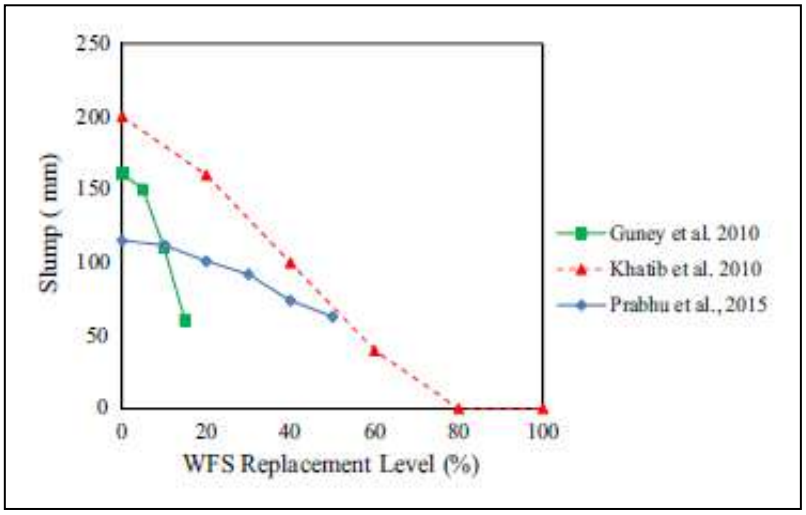


Fig. 1.39 L'affaissement du béton ordinaire en fonction de déchets de fonderie **[55]**

- **La densité**

Basar et al. **[63]** ont étudié l'influence de substituions de (0%, 10%, 20%, 30% et 40%) du sable par le déchet de sable de fonderie. Ils ont trouvé que plus le pourcentage de sable de fonderie augmente plus la densité diminue.

Plusieurs auteurs [**62,64,65]** ont constaté que quelque la densité du béton est diminué en fonction d'augmentation du pourcentage de déchets de sable de fonderie .Ils ont expliqué cette diminution par l'augmentation de la porosité induit par la mauvaise adhérence entre la pâte cimentaire et le grain de sable de fonderie. Ce résultat confirme les résultats de Parashar et al. **[66]**

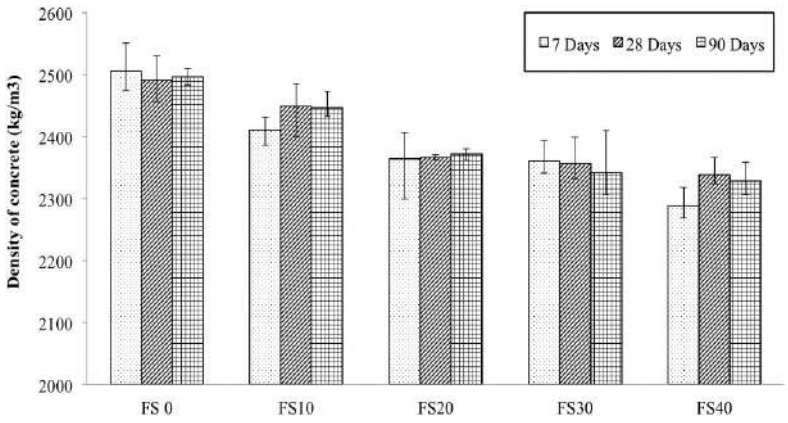


Fig. 1.40 La densité de béton auto plaçant à base de déchets de fonderie [66]

1.5.2 Etats durci

- **La résistance à la Compression**

Naik et al. **[67]** ont étudié l'effet de remplacement partiel (25% et 35%) du sable par du sable de déchets de fonderie sur la résistance du béton ordinaire. Ils ont constaté que la résistance de compression à 28 jours du béton à base de 25% et 35% est diminuée 23% et 35% respectivement par rapport à la résistance à la compression du béton témoin. Ce résultat confirme les résultats de Parashar et al. [66] (Fig.41)

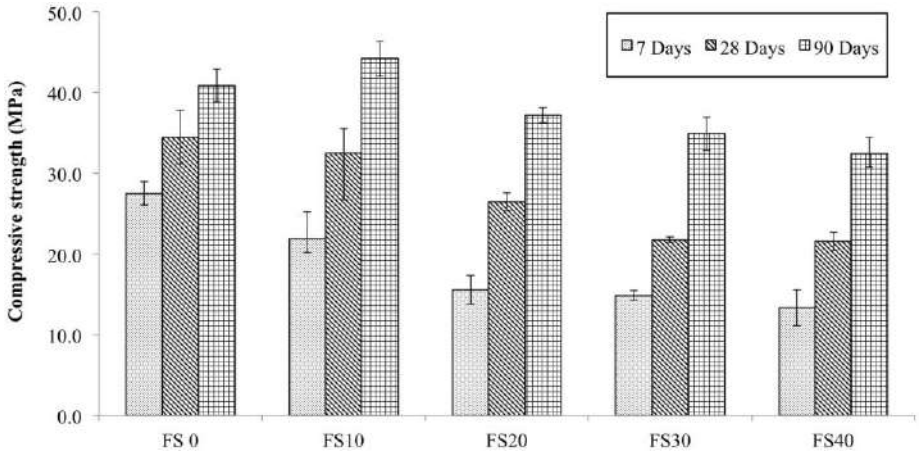


Fig. 1.41 Résistance à la compression de béton auto plaçant à base de déchets de fonderie [66]

Siddique et al. **[68,69]** ont constaté que la résistance à la compression du béton ordinaire augemente quand le remplacement du sable naturel par le déchet de sable de fonderie est plus que 30% ce qui confirme les résultats de Pathariya et al. **[70].** Siddique et al. **[71]** ont trouvé que la résistance à la compression de béton à base de 30%, 40% et 50% est plus importante que celle du béton témoin à l'age de 28 ,90 et 365 jours **[64].** Ce résultat confirme les résultats trouvé par Siddique et al. **[64];** Aggarwal et Siddique **[61];** Prabhu et al**. [62];** Khatib et al. **[60]** qui sont présenté dans la (Fig. 1.42)

.

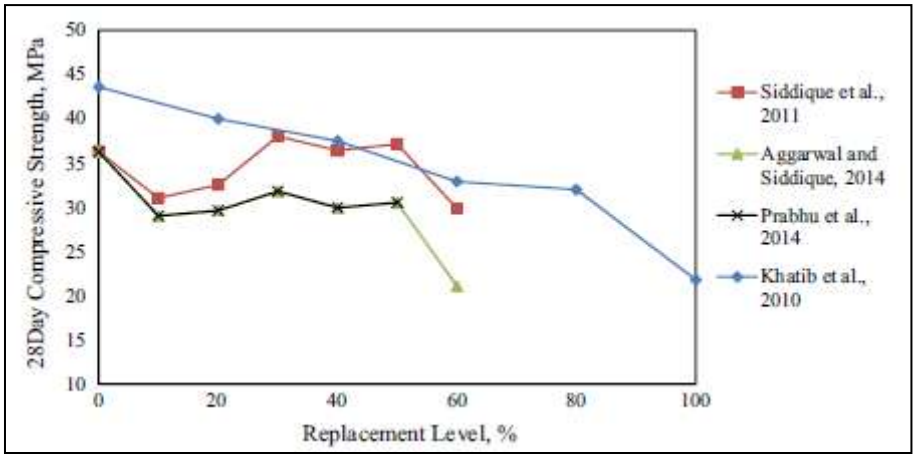


Fig. 1.42 La résistance à la compression des bétons à base de déchets de fonderie [**55**]

Torres et al. **[74]** ont trouvé que la résistance à la compression de béton ordinaire est augmenté en fonction d'incorporation de 10%,20%,30% de gros granulats et fin granulat de fonderie, mais elle est diminué si on mélange les gros granulats avec les fin granulats (Fig. 43)

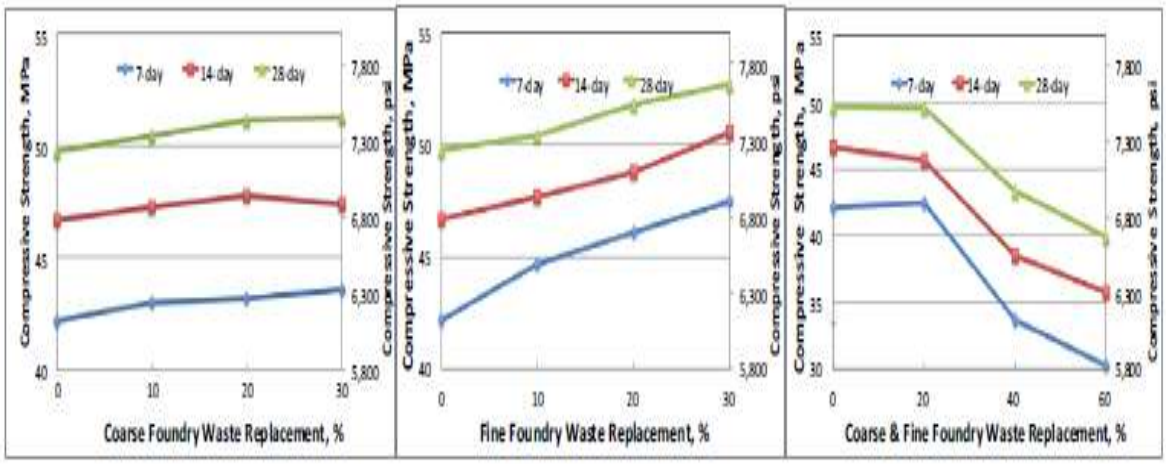


Fig. 1.43 Résistance à la compression de béton en fonction d'ajouts de gros et fin granulats de fonderie **[74]**

- **La résistance à traction**

De la même façon que la résistance à la compression Basar et al**. [63]** ont étudié l'effet de remplacement de (0%,10%,20%,30% et 40%) du sable naturel par le sable de fonderie sur la résistance à la flexion du béton. Ils ont constaté que plus le pourcentage de déchets de

fonderie augmente plus la résistance à la flexion diminuée et cela pour tous les âges (Fig. 1.44).

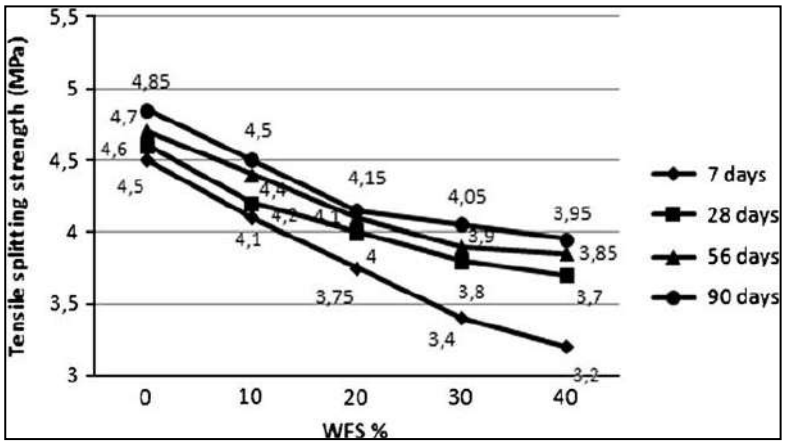


Fig. 1.44 La résistance à la traction du béton en fonction d'âge **[60]**

Torres et al. **[74]** ont trouvé que la résistance à la compression de béton ordinaire est augmenté en fonction d'incorporation de 10%,20%,30% de gros granulats et fin granulat de fonderie, mais elle est diminué si on mélange les gros granulats avec les fin granulats (Fig. 45)

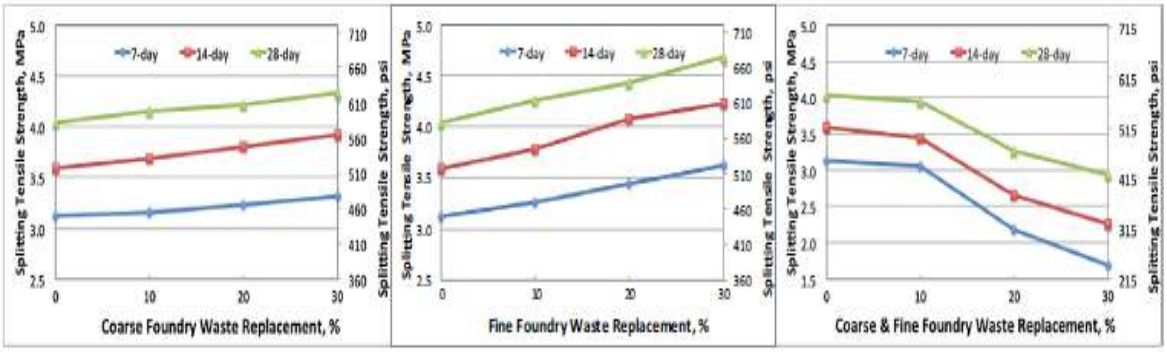


Fig. 1.45 Résistance à la traction de béton en fonction d'ajouts de gros et fin granulats de Fonderie **[74]**

- **Module d'élasticité**

Basar and Aksoy **[63]** ont trouvé que le remplacement du (0, 10, 20, 30 and 40%) sable naturel par des déchets de fonderie influe négativement sur le module d'élasticité.

Prabhu et al. **[62]** ont aussi constaté que le module d'élasticité du béton diminué en fonction d'augmentation de déchets de fonderie (Fig. 1.36).

Singh and Siddique **[71]** ont constaté que le module d'élasticité du béton ordinaire augmente en fonction de la substitution du (0%,5%,10%,15% et 20%) du sable naturel par de sable de fonderie (Fig. 1.36). Ce résultat confirme les résultats de Parashar et al. [66](Fig.46)

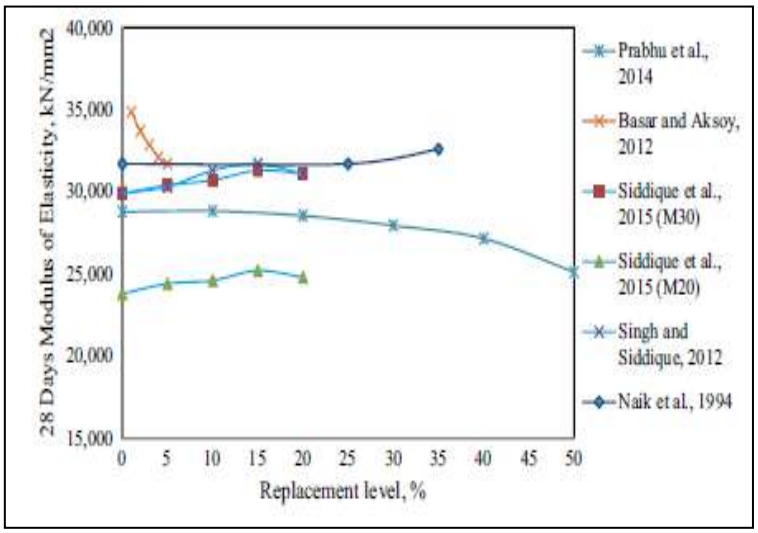


Fig. 1.46 Le module d'élasticité du béton à base de déchets de fonderie [55]

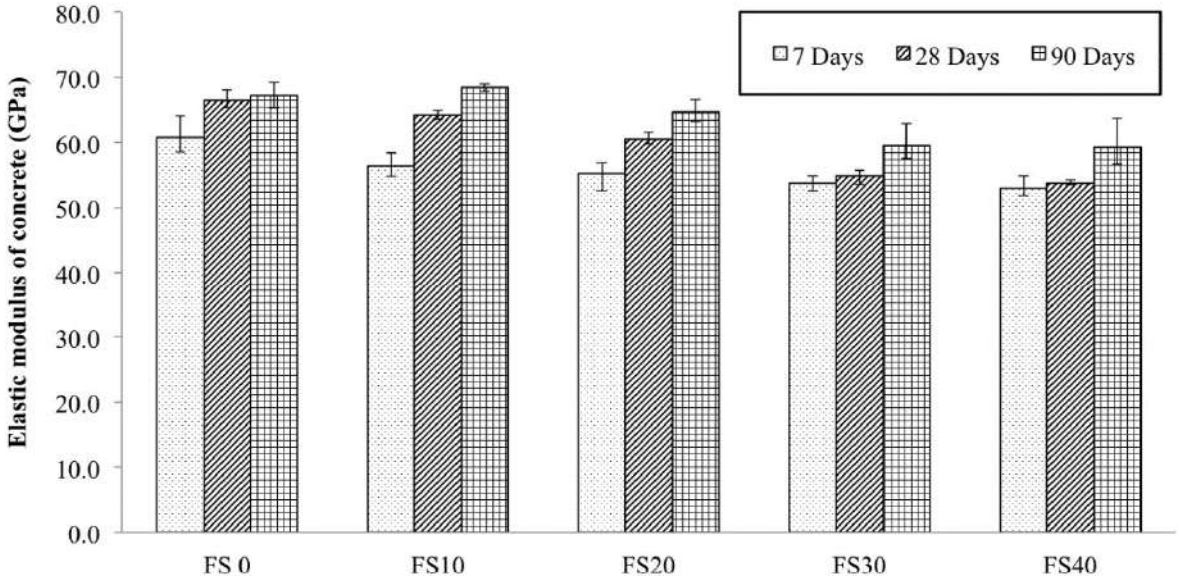


Fig. 1.47 Le module d'élasticité de béton auto plaçant à base de déchets de fonderie [66]

1.6 Conclusion

Plusieurs types de déchets et de sous-produits peuvent être utilisés comme granulats. Parmi ces déchets on a vu les déchets de fonderie. L'utilisation des divers déchets est fonction de leur rentabilité d'exploitation et de leurs propriétés. De nombreux types de déchets ne pourront peut-être pas être utilisés à une grande échelle étant donné la diversité de leurs caractéristiques physiques et chimiques.

Dans ce chapitre nous avons passé en revue la problématique des déchets usagés non réutilisables, ainsi que de leurs recyclage et valorisations. Puis on a donné une généralité sur le déférant déchet de la fonderie (définition, composition, propriétés, utilisation), et le béton de sable (définition, composition, utilisation, formulation), ainsi que finalement un aperçu sur l'effet de valorisation de différents types de déchet de fonderie sur les caractéristique de matériaux à base cimentaire.

Chapitre 02 :
Matériaux et essais

2.1. Introduction

Dans ce chapitre nous présenterons, les caractéristiques des matériaux utilisés durant ce projet de recherche, la procédure du malaxage pour confectionner nos mélanges, les compositions des différents mélanges utilisés dans le cadre de cette étude, les différents essais expérimentaux pour caractériser les mélanges à l'état frais et durci.

2.2. Caractérisation des matériaux utilisés

2.2.1. Le sable

Nous avons utilisé dans notre projet un sable de carrière d'OUED SOUF, Cet wilaya est situé à Sud Est de l'Algérie à 500 km de la capitale d'Alger, Ce sable a la classe granulaire est 0/3 comme il apparaît sur la figure **2.1**. La granulométrie de ce sable est présenté dans la figure **2.2** et les caractéristiques physique sont présenté dans le tableau **2.1**



Fig.2.1 Sable utilisé.

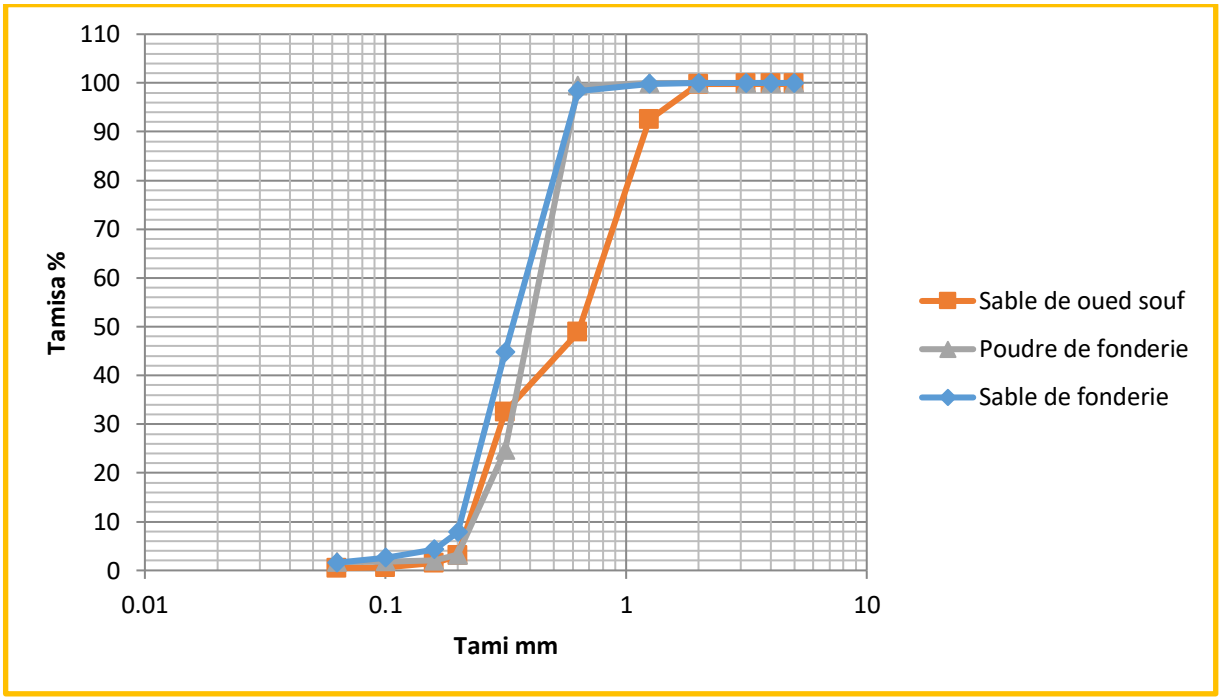


Fig.2.2 Courbe granulométrique de sable utilisée.

Tableau .2.1 Caractéristiques physiques des sables utilisés.

Caractéristiques	**Sable**	**Normes**
Classe granulaire	0/3	NF EN 933-1 **[72]**
Module de finesse	2.24	NF EN 933-1 **[72]**
Masse volumique absolue (Kg/ m^3)	2.63	NF EN 1097-6 **[73]**
Masse volumique apparente (Kg/m^3)	1.56	NF EN 1097-3 **[76]**
La compacité (%)	59	NF EN 1097-3 **[76]**
La porosité (%)	41	NF EN 1097-3 **[76]**
Equivalent de sable (%)	81.9	NF EN 933-8 **[75]**
Coefficient d'absorption d'eau (%)	0.42	NF EN 1097-6 **[73]**

2.2.2 Ciment

Le type de ciment utilisé au cours de cette étude expérimentale est le ciment sous le nom "Mokaouem plus ". Il s'agit d'un ciment résistant au sulfate "Ciment CRS" composé CEM I/A 42.5, produit par cimenterie de (Msila)

La composition de ce ciment est:

- 95% de clinker.
- Des constituants secondaires (de 0 à 5%).
- Le sulfate de calcium sous forme de gypse est rajouté en tant que régulateur de prise.



Figure.2.3 Le ciment utilisé.

- **Analyse et caractérisation**

Les caractéristiques du ciment et composition hypothétique du clinker

Les caractéristiques du ciment et composition hypothétique du clinker sont résume dans le Tableau **2.2** selon la fiche technique du ce ciment.

Tableau.2.2. Les caractéristiques du ciment

Caractéristique physiques du ciment.	Finesse (Cm^2/g)	3200 à 3800
	Consistence normal (%)	25 à 28
	Chaleur d'hydratation	<270j/g
	Retrait à 28 jours (µm/m)	<1000
	Expantion (mm)	≤ 2.0
Analyse chimique du ciment	Perte au feu (%)	0,5 à 3 %
	Residues insoluble (%) (NA 5042)	≤ 3
	Teneur en sulfates SO3 (%) (NA 5042)	1,8 à 3
	Teneur en chlorures (%) (NA 5042)	0,01 à 0,05
	Teneur en oxyde de magnésium MgO(%)	≤ 5.5
Temps de prise (NA 230)	Début de prise (min)	> 60
	Fin de prise (min)	240 à 400
Résistance à la compression	2 jours (Mpa)	≥10
	28 jours (Mpa)	≥42.5
Composition minéralogique	Taux d'aluminate C3A	<3.0%
Composition hypothétique du clinker	Silicates tricalciques C3S (%)	≤ 50
	Aluminates tricalciques C3A (%)	≤ 5

- **La finesse**

La finesse du ciment influe d'une façon considérable sur la résistance mécanique, la consistance normale et le temps de prise. La finesse est déterminée par la surface spécifique de Blaine. Elle est calculée en fonction du temps à l'aide du perméabilimètre de Blaine d'après la norme [NF P 15-476] **[77]**.

- **La consistence normal**

C'est la quantité d'eau de gâchage qu'il faut ajouter à une quantité de ciment préalablement pesée pour obtenir une pâte dite normale, elle est mesurée à l'aide de l'appareil de Vicat d'après la norme [NF P 15-431] **[78]**.

- **Le temps de prise**

Le début et la fin de prise sont déterminés à l'aide de l'aiguille de Vicat sur une pâte de consistance normale placée dans un moule tronconique d'après la norme NF P 15-473 **[79].**

- **Essais mécaniques sur le ciment**

Selon la fiche technique les essais mécaniques sur le ciment ont été effectués conformément à la norme NF P 15-471 **[80]** sur des éprouvettes prismatiques 4x4x16 cm^3 à raison de trois éprouvettes rapportées à la moyenne par âge. Le mortier utilisé est un mortier normalisé: 450 g de ciment, 1350 g de sable naturel et 225 g d'eau.

2.2.3 Ajouts (fillers)

Nous avons utilisé dans notre projet de recherche des fillers de nature marbre (Fig.**2.4**). Ces fillers sont obtenus par broyage des déchets de marbre abandonné dans le concasseur de produit de marbre. La poudre de marbre sont l'un des meilleurs fillers pour le béton et donnent de meilleures performances **[81]**. Leur caractéristique physique est mentionnée dans le Tableau.**2.3**.



Fig.2.4 Les fines de marbre.

Tableau.2.3 Caractéristiques physiques des fines de marbre utilisées.

Caractéristiques	Valeurs
La masse volumique apparente (Kg/m^3)	1.083
La masse volumique absolue (Kg/ m^3)	2.73
La finesse	3200
La compacité(%)	39.6
La porosité(%)	60.4

2.2.4 Adjuvant

Un seul type d'adjuvant à été utilisé au court de ce travail il s'agit d'un adjuvant 'MEDAFLOW30', C'est un Super plastifiant-Haut réducteur d'eau fabriqué par la société Algérienne GRANITEX de forme liquide ; de couleur brai clair ; d'un PH égal à 6-6.5, de densité 1,07 ± 0,01 et d'une teneur en chlore< 0.1g/L (Fig.**2.5**).



Fig.2.5 Super plastifiant-Haut réducteur d'eau.

2.2.5 Eau de gâchage

Dans ce travail, l'eau qui utilisée pour le gâchage est l'eau de robinet de notre laboratoire, exempte d'impuretés, et sans aucun traitement supplémentaire. Son PH mesuré régulièrement est voisin de 7,5.

2.2.6 Déchets de fonderie

Le déchet de fonderie utilisé au court de ce travail est provient de l'usine de des pompes d'eau (SONACOM POVALE d'El Berrouaghia). Après le démoulage de pièce métallique, nous avons récupérés nos déchets et les séchée dans des étuves de séchage ,et incorporer dans la masse de béton de sable fluide par substitution volumétrique de sable (0%,10%,20%,30%,40%) et par ajouts (0%,10%,20%,30%,40%). L'analyse granulométrie de ces déchets est représentée dans la figure.**2.2**, et leurs caractéristiques physiques sont présentées dans le tableau **2.4** suivant :

Tableau 2.4 Caractéristiques physiques de déchet de fonderie utilisé.

Caractéristiques	Poudre de fonderie	Sable de fonderie
Masse volumique absolue (kg/m^3)	6.24	3
Masse volumique apparente (kg/m^3)	1.75	1.24
Module de finesse	1.52	1.73
La compacité (%)	28	51
La porosité (%)	72	49



Fig.2.6 Déchet de poudre de fonte utilisé.



Fig.2.7 Déchet de sable de moulage utilisé.

2.3 Composition des mélanges

On utilisant la méthode théorique SABLOCRETE 1994 **[54]** pour la composition du béton de sable fluide pour la confection des éprouvettes, Le déchet de sable de moulage est incorporé dans la masse du béton de sable fluide par substitution volumique du ciment avec de pourcentage de (0%,10%,20%,30%,40%) et le déchet de poudre de fonte est incorporé dans la masse du béton de sable fluide comme un addition avec de pourcentage de (0%,10%,20%,30% et 40%)

Les tableaux suivants résument les différentes compositions du BSF obtenus :

Tableau 2.5 Compositions des Béton de sable fluide à base de déchet de poudre de fonderie pour ($1m^3$).

Béton de sable fluide	Sable (Kg/m^3)	Ciment (Kg/m^3)	Fillers de Marbre (Kg/m^3)	Poudre de fonte (Kg/m^3)	Eau (l/m^3)	Adj (Kg/m^3)
BSFT	1400	400	200	0	250	7.2
BSF 10%PF	1400	370.32	200	29.67	250	7.2
BSF 20%PF	1400	340.64	200	59.35	250	8.4
BSF 30%PF	1400	310.96	200	89.03	250	9.6
BSF 40%PF	1400	281.3	200	118.70	250	10.8

Tableau 2.6 Compositions des Béton de sable fluide à base de déchet de sable de fonderie pour ($1m^3$).

Béton de ciment fluide	Sable (Kg/m^3)	Ciment (Kg/m^3)	Fillers de Marbre (Kg/m^3)	Sable de moulage (Kg/m^3)	Eau (l/m^3)	Adj (Kg/m^3)
BSFT	1400	400	200	0	250	7.2
BSF 10%SF	1255.21	400	200	144.79	250	7.5
BSF 20%SF	1110.42	400	200	289.58	250	8.7
BSF 30%SF	965.63	400	200	434.37	250	10.5
BSF 40%SF	820.84	400	200	579.16	250	11.4

Avec :

BSFT : Béton de sable fluide témoin.

BSFPF : Béton de sable fluide à base de déchet poudre de fonderie.

BSFSF : Béton de sable fluide à base de déchet de sable de fonderie.

2.4 Malaxage et conservation

On fait le malaxage des bétons obtenus à l'aide d'un malaxeur de mortier à axe vertical d'une capacité de 5L pour la confection des éprouvettes 4*4*16cm. Dans cette opération l'introduction des constituants se fait du plus gros au plus fin. Et pour assurer un mélange homogène et pour obtenir ainsi les mêmes propriétés il faut répartir chaque constituant le plus régulièrement possible Fig.**2.8**.

Nous faisons les mêmes procédures pour le malaxage de chaque mélange avec la manière suivante :

- Premièrement on verse les plus gros grains qui est le sable ;
- Puis on ajoute les fillers et le ciment et on commence le malaxage à sec pendant 30 sec ;
- On verse deux tiers d'eau de gâchage, puis on recommence le malaxage pendant 1 minutes ;
- Après on ajoute notre super plastifiant 'MEDAFLOW30' avec le tiers de la quantité d'eau nécessaire et on mélange pendant 1 minute ;
- Malaxé le mélange à vitesse rapide pendant 3 minutes, puis on laisse le mélange repose 3 minute ;
- Puis relancer à vitesse rapide pendant 1 minute et 30 sec.

- L'Introduction du déchet de fondrie à été effectué au départ (après l'introduction du sable).

- La mesure la densité et l'ouvrabilité du béton frais immédiatement au fin malaxage.



Fig.2.8 le malaxage au laboratoire.

2.5 Essai réalisé sur le béton

On réalise deux types d'essais sur le béton :

- les essais à l'état frais.
- les essais à l'état durci.

- **A l'état frais**

Les différents essais réalisés sur le béton de sable fluide obtenus sont résumés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 2.7 Essais sur bétons frais.

Essais	Appareil	Nombre d'essais
Etalement	mini cône	5
Temps d'écoulement	l'entonnoir en (V-funnel)	5
Densité	Moule (1L) + balance	5

2.5.1 L'étalement au mini-cône

L'appareil utilisé dans cet essai :

- Table d'étalement : table mobile, comportant un plateau plan et carré d'au moins 900 mm de côté, qui est destiné à recevoir le béton. Le plateau de la table d'étalement doit être recouvert d'une plaque en acier inoxydable, d'une épaisseur minimale de 2 mm,
- Mini cône : moule en métal, d'une épaisseur min. de 1,5 mm. La paroi intérieure du moule doit être lisse, sans aspérités telles que des protubérances de rivets et sans déformations locales

L'essai d'étalement consiste à remplir un moule tronconique place sur une surface horizontale lisse, une fois le moule soulève, le diamètre d'étalement du mortier est mesure suivant deux directions perpendiculaire, la moyenne est retenu. La figure **2.9** montre les étapes de l'essai d'étalement mini cône selon la recommandation EFNARC 2002 **[82]**.



Fig.2.9 Mesure de l'étalement du béton de sable fluide.

2.5.2 Ecoulement à l'entonnoir en V-FUNNEL

Cet essai fait selon la norme NF EN 12350-9 **[83]** il décrit la méthode de détermination de la durée d'écoulement du BAP à travers l'ouverture d'un entonnoir en V figure **2.10**.

L'appareil utilisé dans cet essai :

- Un entonnoir en forme de V
- une trappe

Pour cet essai, un entonnoir en forme de V, équipé d'une trappe, est rempli de béton frais. La trappe est ouvert 10 secondes après le remplissage et le temps nécessaire à l'écoulement du béton hors de l'entonnoir est mesuré et consigné comme la durée d'écoulement à l'entonnoir en V. Il permet d'évaluer la viscosité du BF. Si le béton a une faible résistance à la ségrégation statique, un blocage partiel des granulats pourra également être observé.



Fig.2.10 Essai d'écoulement à l'entonnoir en V.

2.5.3 La densité

La masse volumique du béton de sable a été mesurée selon la norme NF EN 12350-6 **[84]** NA436 **[85]**.



Fig.2.11 Mesure de la densité du béton de sable fluide.

2.6 Préparation et conservation des éprouvettes

Le béton de sable fluide a été coulé dans des moules métalliques de forme prismatiques 4x4x16 cm destinées aux essais de compression et de variation dimensionnelles, ainsi que des éprouvettes 4×10×10 cm destinées pour les essais thermiques conformément à la norme NF EN 12390-2 **[86].**

Les éprouvettes confectionnées ont été coulées dans les moules en plusieurs couches et mises en place par vibration manuel.

Juste après la confection, toutes les éprouvettes ont été couvertes afin d'éviter le risque d'évaporation excessive et le retrait plastique. Après 24 heures de la confection, les éprouvette sont été démoulées et conservées selon deux modes différents : dans l'eau à 20°C ± 2°C (Figure.**2.12**) et à l'air libre d'un climat moyen (laboratoire).

Les échantillons conservés dans l'eau ont été séchés à l'atmosphère de laboratoire pendant environ 24 heures avant l'âge d'essai et jusqu'à poids constant.



Fig.2.12 Fabrication des éprouvettes.

2.7 A l'état durci

Les différents essais réalisés sur le béton de sable fluide obtenus sont résumés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 2.8 Essais sur bétons durci.

Essais	Appareil	Nombre d'essais
Résistance à la compression	Presse Hydraulique (2000KN)	10
Résistance à la traction	Presse Hydraulique (2000KN)	5

2.7.1 Résistance a la compression

La résistance à la compression d'un matériau est l'effort de compression uniaxial atteint à la rupture complète du matériau. Si le matériau est ductile cette rupture n'aura pas lieu mais le matériau se déformera de manière irréversible, Elle a été mesurée selon la norme [NF EN 196-1] **[87]** pour demi-prisme d'éprouvettes prismatiques de dimensions (4×4×16) cm, à l'âge 3,7 et 28 jours, à l'aide d'une presse hydraulique de capacité maximale de 2000 KN conforme a la norme [NF P 18-412] **[88]** fig.**2.13** pendant l'essai, la vitesse de chargement est constante.

La résistance à la compression est le rapport entre la charge de rupture et la section transversale de l'éprouvette correspond à la contrainte moyenne d'écrasement sur trois éprouvettes à chaque âge d'essai (3j.7j.28j).

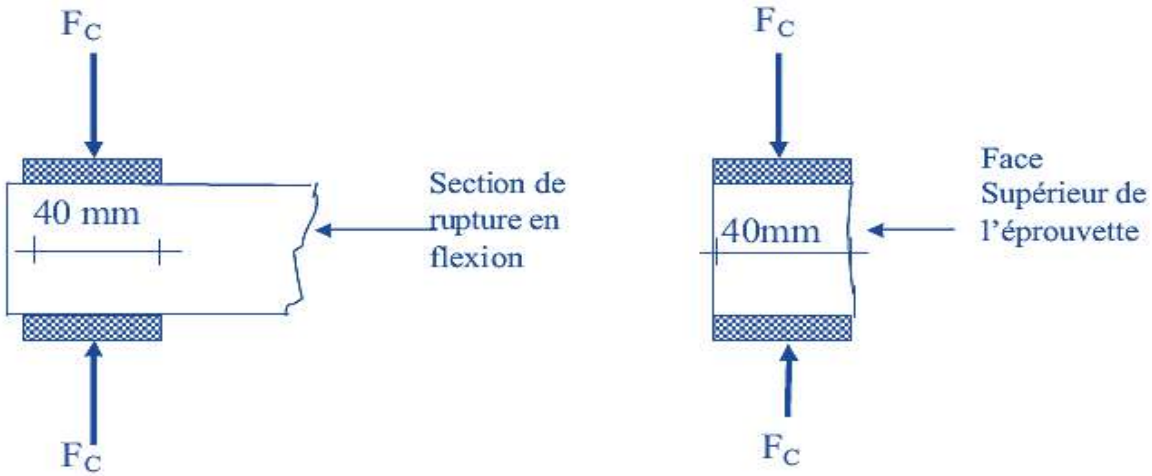


Fig.2.13 Dispositif de rupture à la compression.

La contrainte de rupture est calculée comme suit :

$$R_C = \frac{F_C}{b^2} \qquad \textbf{(Equation 2.1)}$$

R_C : Résistance à la compression en (MPa) ;

F_C: Charge de rupture en (N) ;

b : Côte de l'éprouvette est égale à 40mm.



Fig.2.14 Presse Hydraulique (2000KN).

2.7.2 Résistance à la traction

La résistance à la traction est une caractéristique matériau pour l'évaluation du comportement de résistance et de déformation. La résistance à la traction est la contrainte de traction mécanique maximale avec laquelle une éprouvette peut être chargée - par rapport à la section transversale. Lorsque la résistance à la traction est dépassée, le matériau défaille: l'éprouvette de matériau se déchire pendant l'essai de traction. Le matériau se déforme cependant plastiquement avant même que la résistance à la traction n'ait été approchée fig.**2.15**.

La résistance à la traction est calculée à partir des résultats de l'essai de traction: Résistance à la traction Rm = charge de traction maximale Fm / section de contrainte

La résistance à la traction est mesurée en N/mm². **[89]**



Fig.2.15 résistance à la traction.

2.8 Variables étudiées

Les variables d'étude utilisés au cours de ce travail sont résumées dans la figure suivant :

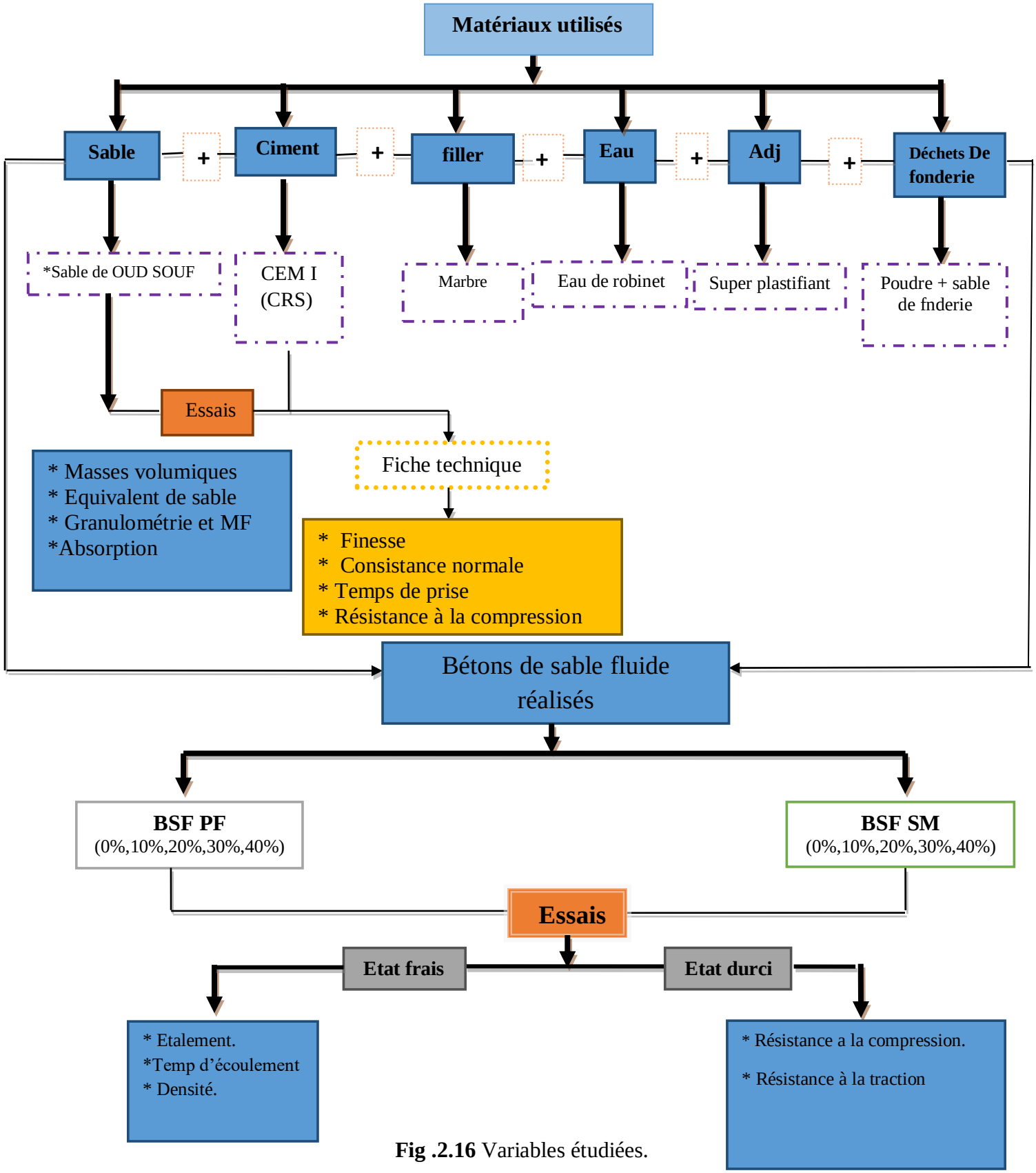


Fig .2.16 Variables étudiées.

2.9 Conclusion

Dans la fabrication du Béton de sable fluide, L'utilisation des matériaux locaux et des déchets industriels recyclés constitue une alternative économique et technologique importante dans certains pays en voie de développement. Cette recherche présente une contribution à l'étude de l'effet des déchets de fonderie sur les propriétés frais et durci des bétons de sables.

Avec ces études on a traité les caractérisations physiques et chimiques des matériaux utilisés et tous les procédures expérimentales et les essais réalisés sur les différents bétons de sable fluide pour évaluer la durabilité du ce béton.

Conslusions générales

Conclusions générales

L'analyse des études antérieurs et des résultats expérimentaux de l'influence de déchets de fonderie sur le comportement du BSF peut mener aux quelques conclusions suivantes :

- L'étalement des BSF diminue et le temps d'écoulement augmente et cela quelque soit le type d'incorporation de déchets de fronderie dans la masse du béton de sable fluide (Substitution du ciment ou sable).
- La substitution du sable par les déchets de fonderie engendre toujours une augmentation de la densité.
- D'après la littérature les performances mécanique des bétons sont diminué en fonction d'incorporation de déchets de fonderie, mais les résistances obtenues restent acceptable pour l'application aux bétons de construction.

Sur la base des résultats obtenus, on peut conclure que l'utilisation des déchets de fonderie (sable de fonderie et poudre de fonderie) constitue une alternatif économique, environnementale et technologique très importante pour le pays.

Recommandations

Recommandations

Nous recommandons ce qui suit :

- Etude de la rhéologie du béton de sable fluide à base de déchets de fonderie.

-Valorisation d'autres types de sable de moulage et de déchets de fonte dans le BSF.

- Effet synergétique du sable de fonderie et de sable de moulage sur le comportement et la durabilité de BSF.

- Etude des performances de déchets de fonderie et de fibres métalliques.

- Durabilité de BSF à base de déchets de fonderie.

Références Bibliographiques

Références bibliographiques

[1] https://theconstructor.org/concrete/construction-waste-recycling/1088/

[2] https://recyclage.ooreka.fr/comprendre/valorisation-dechets

[3] Sidi Ould ALOUEIMINE 'METHODOLOGIE DE CARACTERISATION DES DECHETS MENAGERS A NOUAKCHOTT (MAURITANIE) : CONTRIBUTION A LA GESTION DES DECHETS ET OUTILS D'AIDE A LA DECISION'. THESE Pour obtenir le grade de DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE LIMOGES. 2005 – 2006

[4] https://www.notre-planete.info/ecologie/dechets/dechets.php

[5] https://fr.scribd.com/document/293023330/Les-Dechets

[6] https://fr.scribd.com/presentation/133635063/Recycling

[7] https://fr.scribd.com/document/366905164/Recycling-Reading-Comprehension-Exercises-102910

[8] https://fr.scribd.com/presentation/89840812/Fonderie

[9] https://www.estrepublicain.fr/edition-de-nancy-ville/2018/05/18/la-fonderie-a-loritz-c-est-canon

[10] http://www.cd2e.com/node/266

[11] https://www.reliance-foundry.com/wp-content/uploads/ferrous-steel-wheels-1.jpg

[12] https://www.hellopro.fr/images/produit-2/2/9/9/fonderie-non-ferreux-6403992.jpg

[13] http://www.reliance-foundry.com/blog/definition-fonderie-fr#gref

[14]http://www.fonderie-roux-gallois.com/wp-content/uploads/2018/08/4-moulage-piece-bronze-aluminium.jpg

[15] https://fr.wikipedia.org/wiki/Fonderie_d%27art.

[16] https://www.fonderie-piwi.fr/blog/public/2019/T2/cycl.jpg

[17] http://dictionnaire.sensagent.leparisien.fr/Fonderie%20typographique/fr-fr/.

[18]https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/c/c9/Schlagstempel_001.jpg/220px-Schlagstempel_001.jpg

[19]https://www.globalspec.com/learnmore/manufacturing_process_equipment/manufacturing_equipment_components/foundry_equipment_supplies

[20] http://www.officiel-prevention.com/formation/fiches-metier/detail_dossier_CHSCT.php?rub=89&ssrub=206&dossid=426

[21] https://www.solexthermal.com/resources/articles/what-is-foundry-sand

[22] https://sc02.alicdn.com/kf/HTB1N712CH1YBuNjSszeq6yblFXak.jpg_350x350.jpg

[23] https://fr.wikipedia.org/wiki/Sable_(fonderie)

[24] https://fr.scribd.com/document/19349930/Properties-of-Foundry-Sand

[25] Sahraoui AISSAT et Amine KACIMI 'Caractérisation physico-chimique des sables usés de la fonderie de Tiaret (Algérie), en vue de leur valorisation' Laboratoire de Recherche des Technologies Industrielles, Département de Génie Mécanique, Université Ibn Khaldoun – TIARET, B.P. 78 – 14000 TIARET, Algérie.

[26] http://souspression.canalblog.com/archives/2011/09/07/21929497.html.

[27] http://thomas-eyraud.e-monsite.com/pages/presentation-generale-des-fontes.html

[28]https://www.google.com/search?q=fonte+poudre&sxsrf=ALeKk01oX42CVUIatXd8MzEcHb_sQHFhZA:1590495151982&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwjr27OUwNHpAhXgVBUIHWuVDqcQ_AUoAXoECAsQAw&biw=1366&bih=667#imgrc=Ybo0WwOJqUj-IM

[29] http://www.sorelmetal.com/fr/ductile/frset_types.htm

[30]https://selency.imgix.net/8d29544a-0716-47ea-a93a-c01a854afc09/dessous-de-plat-en-font blanche_original.png?bg=F5F5F5&fit=fill&auto=format%2Ccompress&w=579&h=475&meta_format=product_grey_main&fm=jpg

[31] http://thomas-eyraud.e-monsite.com/medias/images/image.8.jpeg

[32] **http://thomas-eyraud.e-monsite.com/medias/images/1.jpeg**

[33]https://lh3.googleusercontent.com/proxy/xBfRZpE1jQ72mc0fKldrTUq0rNnTF3jxvlvmJteloTVdL4U9vj5B5A2YxumdwdU1w8tKQUw1I-YsRFMeJ57YyddHuT0LHOQYc88G5W0Ta-Daz5TTCEjHNrb5rP-sRoUHdlSUL8i0YgUhQNYJPTbZF-Y

[34]https://thomas-eyraud.e-monsite.com/medias/album/fonte-malleable-a-graphite-nodulaire-et-matrice-ferritique.jpeg

[35]https://static.esska.de/shop/bilder/hauptbilder_neu/96_verschraubungen/961_temperguss/9616/961613300000_700.jpg

[36] http://thomas-eyraud.e-monsite.com/pages/proprietes-mecaniques-des-fontes.html

[37] LÀ FONDERIE GAUTHIER-VILLARS MASSON ET C IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

[38] Technologie des Fabrications Mécaniques Première partie Assurée par :S.ADIMA

[39] https://fr.scribd.com/document/396874526/Cours-02-Procedes-de-moulage-des-metaux-Fonderie-pdf

[40] https://www.gestiondecompras.com/fr/produits/la-fonderie/moulage-au-sable

[41] https://fr.scribd.com/document/357967681/Sand-Casting

[42] https://www.huyghe-modelage.fr/s/cc_images/teaserbox_32751733.jpg?t=1414667203

[43]https://metalblog.ctif.com/wp-content/uploads/sites/3/2018/11/audit-de-fonderie-de-fonte-expertise-qualite-des-pieces.jpg

[44] http://snvigroupe.dz/images/infoen/moulage.jpg

[45] http://snvigroupe.dz/images/infoen/dfr_plan.jpg

[46] https://i.ytimg.com/vi/7s55EDe0HPI/hqdefault.jpg

[47] BANTATA.A,« Etude expérimentale d'un béton avec sable de dune de la région de Ouargla (Ain El Baida) » Mémoire de magister, Université de Ouargla ,2003/2004.

[48] GUENNOUN R, « Etude et formulation d'un béton de sable de dune», P.F.E., ENP, Alger-Algérie juin 2003.

[49] ALIA.A, BAKHMED.A, 2017. L'effet d'ajout des fibres métalliques sur les propriétés physico-mécanique des bétons de sable de dunes. Mémoire de master. Université Kasdi Merbah d'Ouargla

[50] https://www.holcim.be/fr/les-constituants-du-beton-les-additions-et-les-ajouts

[51] https://www.infociments.fr/betons/additions

[52] https://www.infociments.fr/betons/adjuvants

[53]https://www.marefa.org/%D8%AE%D8%B1%D8%B3%D8%A7%D9%86%D8%A9_%D8%B1%D9%85%D9%84%D9%8A%D8%A9

[54] SABLOCRETE,« Bétons de sable : caractéristiques et pratique d'utilisation », Presses de l'école nationale des ponts et chaussées (1994). Paris, France.

[55] REZIG Salima 'Optimisation de la formulation du béton de sable dans le cadre de valorisation des matériaux locaux'. SOUTENANCE DE MEMOIRE DE MAGISTER

[56] BENAISSA A., "Déformations différées d'un béton de sable" - Thèse de doctorat soutenue en novembre 1992, Université de bordeaux, Laboratoire régional des ponts et chaussées.

[57] BENAISSA A., MORLIER, P. ., VIGUIER, C. ., CAUVIN J.J., "Cinétique de dessiccation et retrait du béton de sable", Annales de l'institut technique du bâtiment et de travaux publics (ITBTP) N°504, juin 1992.

[58] J.S. Joy, M. Mathew, Experimental study on geopolymer concrete with partial replacement of fine aggregate with foundry sand, Int. J. Adv. Technol. Eng. Sci. 3 (2015) 559–569.

[59] DREUX G et FESTA J., « Nouveau guide du Béton et de ses constituants », Eyrollesn Huitième édition, Paris 1998.

[**60]** J.M. Khatib, S. Baig, A. Bougara, C. Booth, Foundry Sand Utilization in Concrete Production, in: J. Zachar, P. Claisse, T.R. Naik, E. Ganjian (Eds.), Second International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies, 2010: p. 8. Doi : ISBN 978-1-4507-1490-7.

[61] Y. Aggarwal, R. Siddique, Microstructure and properties of concrete using bottom ash and waste foundry sand as partial replacement of fine aggregates, Constr. Build. Mater. 54 (2014) 210–223, http://dx.doi.org/10.1016/ j.conbuildmat.2013.12.051.

[62] G.G. Prabhu, J.H. Hyun, Y.Y. Kim, Effects of foundry sand as a fine aggregate in concrete production, Constr. Build. Mater. 70 (2014) 514–521, http://dx.doi. org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.070.

[63] H. Merve Basar, Nuran Deveci Aksoy , The effect of waste foundry sand (WFS) as partial replacement of sand on the mechanical, leaching and micro-structural characteristics of ready-mixed concrete, Construction and Building Materials 35 (2012) 508–515

[64] R. Siddique, Y. Aggarwal, P. Aggarwal, E.H. Kadri, R. Bennacer, Strength, durability, and micro-structural properties of concrete made with, Constr. Build. Mater. 25 (2011) 1916–1925, http://dx.doi.org/10.1016/ j.conbuildmat.2010.11.065

[65] T.R. Naik, S.S. Singh, B.W. Ramme, Performance and leaching assessment of flowable slurry, J. Environ. Eng. 127 (2001) 359–368.

[66] Anuj Parashar , Paratibha Aggarwal , Babita Saini , Yogesh Aggarwal , Shashank Bishnoi, Study on performance enhancement of self-compacting concrete incorporating waste foundry sand, Construction and Building Materials 251 (2020) 118875

[67] T.R. Naik, Utilization of used foundry sand in concrete, 6 (1994) 254–263.

[68] R. Siddique, R. Gupta, I. Kaur, Effect of spent foundry sand as partial replacement of fine aggregate on the properties of concrète., in: 22nd International Conference on Solid Waste Technology and Management., 2007.

[69] R. Siddique, G. De Schutter, A. Noumowe, Effect of used-foundry sand on the mechanical properties of concrete, Constr. Build. Mater. 23 (2009) 976–980,

[70] S.C. Pathariya, J.K. Rana, P.A. Shah, J.G. Mehta, A.N. Patel, Application of waste foundry sand for evolution of low-cost concrete, Int. J. Eng. Trends Technol. (IJETT) 4 (2013) 4281–4286.

[71] G. Singh, R. Siddique, Abrasion resistance and strength properties of concrete containing waste foundry sand (WFS), Constr. Build. Mater. 28 (2012) 421–426, http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.08.087.

[72] NF EN 933-1, 1997, « Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats. Partie 1: Détermination de la granularité. Analyse granulométrique par tamisage », AFNOR.

[73] NF EN 1097-6, 2001, « Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats. Partie 6: Détermination de la masse volumique réelle et du coefficient d'absorption d'eau », AFNOR.

[74] Anthony Torres , Laura Bartlett , Cole Pilgrim, Effect of foundry waste on the mechanical properties of Portland Cement. Concrete. Construction and Building Materials 135 (2017) 674–681

[75] NF EN 933-8, 1999, « Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats. Partie 8: Evaluation des fines. Equivalent de sable », AFNOR.

[76] NF EN 1097-3, 1998, « Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats. Partie 3: Méthode pour la détermination de la masse volumique en vrac et de la porosité inter granulaire », AFNOR.

[77] NF P 15-476, Normes AFNOR : « Méthodes d'essais des ciments- Détermination de la finesse », Aout 1990.

[**78]** NF P 15-431, Normes AFNOR : « Liants hydrauliques – technique des, essais détermination du temps de prise sur mortier normal », Février 1994.

[79] NF P 15-473, Normes AFNOR : « Méthodes d'essai des ciments-partie 3 : détermination du temps du prise et de la stabilité », Aout 1995.

[80] NF P 15-471, Normes AFNOR : « Méthodes d'essais des ciments - Partie 1 : Détermination des résistances mécaniques », Aout 1995.j.

[81] Ibrahim Messaoudene, et al. Effet des fillers de laitier et marbre sur la durabilité des ciments Portland dans des environnements de sulfate, XXXe Rencontres AUGC-IBPSA Chambéry, Savoie, 6 au 8 juin 2012.

[82] EFNARC recommandations, 2002, "The European guidelines for self-compacting concrete, specification, production and use", EFNARC Edition, united kingdom, p.63.

[83] NF EN 12350-9 a présente norme européenne spécifie la méthode de détermination de la durée d'écoulement à l'entonnoir en v pour le béton autoplaçant.

[84] NF EN 12350-6, 1999, « Essai pour béton frais. Partie 6 : Masse volumique ».AFNOR.

[85] NA 436 ,1992-08-20 «béton frais, détermination de la consistance-essais d'affaissement».Norme algérienne.

[86] NF EN 12390-2, 2001, « Essai pour béton durci. Partie 2 : Confection et conservation des éprouvettes », AFNOR.RILEM Procédions PRO 7, Paris pp109-120.

[87] NF EN 196-1 Méthodes d'essais des ciments - Partie 1 : détermination des résistances mécaniques - Avril 2006.

[88] NF P 18-412, «caractéristiques particulière des machines hydrauliques pour essais de compression ». 1981.

[89] https://www.zwickroell.com/fr-fr/materials-testing/tensile-test/tensile-strength

Annex



Fig. A. 1 Ciment MOKAOUEM PLUS utilisé.

APPLICATIONS RECOMMANDÉES

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



FORMULATION CONSEILLÉE

	Ciment	Sable (sec) 0/5	Gravillons (sec) 8/15mm 15/25mm		Eau (litres)
Dosage pour béton C25/30	X 1	+ X7	+ X5	+ X4	+ 25 L

Remaque: un bidon = 10 Litres

Formulation de béton à suivre dans le cas de l'absence d'une étude délivrée par un laboratoire*

CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES

• Analyses chimiques	Valeur
Perte au feu (%) (NA5042)	0,5 à 3 %
Teneur en sulfates (SO3) (%)	1,8 à 3
Teneur en oxyde de magnésium MgO (%)	1,2 à 3
Teneur en Chlorures(NA5042) (%)	0,01 à 0,05

• Temps de prise à 20° (NA 230)	Valeur
Début de prise (min)	> 60
Fin de prise (min)	240 à 400

• Composition minéralogique	Valeur
Taux d'aluminate C3A	<3.0%

• Résistance à la compression	Valeur
2 jours (MPa)	≥10
28 jours (MPa)	≥42.5

• Propriétés physiques	Valeur
Consistance Normale (%)	25 à 28
Finesse suivant la méthode de Blaine (cm^2/g) (NA231)	3200 à 3800
Retrait à 28 jours (µm/m)	< 1000
Expansion (mm)	≤2,0
Chaleur d'hydratation	<270j/g

Ces valeurs sont données à titre indicatif et ne peuvent être considérées comme absolues

Conditionnement:

CONSIGNES DE SÉCURITÉ

1- **PROTÉGEZ VOTRE PEAU :** Portez les équipements adaptés dans vos chantiers: casques, lunettes, gants, genouillères, chaussures et vêtements de sécurité.

2- **MANUTENTION :** levez le sac en pliant les genoux et en gardant le dos droit.

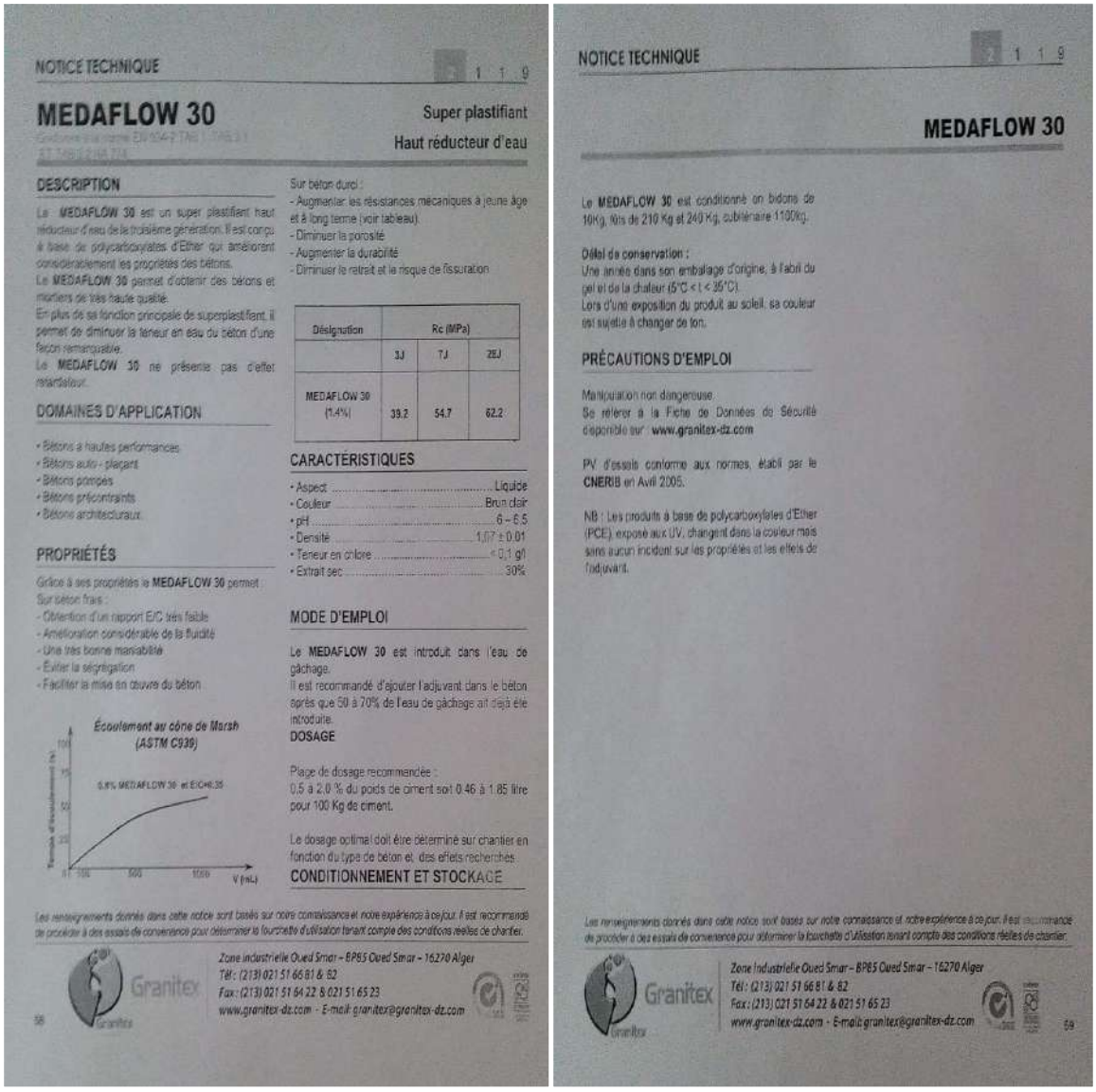


A member of LafargeHolcim

LAFARGE ALGÉRIE
Centre commercial Bab Ezzouar, Tour n°02,
Etages 05 & 06, Bab Ezzouar Alger, Algérie
Tél: + 213 (0) 21 98 54 54
Fax: + 213 (0) 23 92 42 94
www.lafargealgerie.com
dz.satisfaction-clients@lafargeholcim.com
Tél: 021 98 55 55

LAFARGE لافارج

Fig. A.2 La fiche technique ciment.



NOTICE TECHNIQUE

1 1 9

MEDAFLOW 30

Super plastifiant
Haut réducteur d'eau

DESCRIPTION

Le **MEDAFLOW 30** est un super plastifiant haut réducteur d'eau de la troisième génération. Il est conçu à base de polycarboxylates d'Ether qui améliorent considérablement les propriétés des bétons.
Le **MEDAFLOW 30** permet d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité.
En plus de sa fonction principale de superplastifiant, il permet de diminuer la teneur en eau du béton d'une façon remarquable.
Le **MEDAFLOW 30** ne présente pas d'effet retardateur.

DOMAINES D'APPLICATION

- Bétons à hautes performances
- Bétons auto - plaçant
- Bétons pompés
- Bétons précontraints
- Bétons architecturaux

PROPRIÉTÉS

Grâce à ses propriétés le **MEDAFLOW 30** permet :
Sur béton frais :
- Obtention d'un rapport E/C très faible
- Amélioration considérable de la fluidité
- Une très bonne maniabilité
- Éviter la ségrégation
- Faciliter la mise en œuvre du béton

Sur béton durci :
- Augmenter les résistances mécaniques à jeune âge et à long terme (voir tableau).
- Diminuer la porosité
- Augmenter la durabilité
- Diminuer le retrait et le risque de fissuration

Désignation	Rc (MPa)		
	3J	7J	28J
MEDAFLOW 30 (1.4%)	39.2	54.7	62.2

CARACTÉRISTIQUES

- Aspect ..... Liquide
- Couleur ..... Brun clair
- pH ..... 6 – 6.5
- Densité ..... 1,07 ± 0.01
- Teneur en chlore ..... < 0,1 g/l
- Extrait sec 30%

MODE D'EMPLOI

Le **MEDAFLOW 30** est introduit dans l'eau de gâchage.
Il est recommandé d'ajouter l'adjuvant dans le béton après que 50 à 70% de l'eau de gâchage ait déjà été introduite.

DOSAGE

Plage de dosage recommandée :
0,5 à 2,0 % du poids de ciment soit 0.46 à 1.85 litre pour 100 Kg de ciment.

Le dosage optimal doit être déterminé sur chantier en fonction du type de béton et des effets recherchés.

CONDITIONNEMENT ET STOCKAGE

Les renseignements donnés dans cette notice sont basés sur notre connaissance et notre expérience à ce jour. Il est recommandé de procéder à des essais de convenance pour déterminer la fourchette d'utilisation tenant compte des conditions réelles de chantier.

Granitex
Zone Industrielle Oued Smar – BP85 Oued Smar – 16270 Alger
Tél : (213) 021 51 66 81 & 82
Fax : (213) 021 51 64 22 & 021 51 65 23
www.granitex-dz.com - E-mail: granitex@granitex-dz.com

58

NOTICE TECHNIQUE

1 1 9

MEDAFLOW 30

Le **MEDAFLOW 30** est conditionné en bidons de 10Kg, fûts de 210 Kg et 240 Kg, cubitainer 1100Kg.

Délai de conservation :
Une année dans son emballage d'origine, à l'abri du gel et de la chaleur (5°C < t < 35°C).
Lors d'une exposition du produit au soleil, sa couleur est sujette à changer de ton.

PRÉCAUTIONS D'EMPLOI

Manipulation non dangereuse.
Se référer à la Fiche de Données de Sécurité disponible sur : **www.granitex-dz.com**

PV d'essais conforme aux normes, établi par le **CNERIB** en Avril 2005.

NB : Les produits à base de polycarboxylates d'Ether (PCE) exposé aux UV, changent dans la couleur mais sans aucun incident sur les propriétés et les effets de l'adjuvant.

Les renseignements donnés dans cette notice sont basés sur notre connaissance et notre expérience à ce jour. Il est recommandé de procéder à des essais de convenance pour déterminer la fourchette d'utilisation tenant compte des conditions réelles de chantier.

Granitex
Zone Industrielle Oued Smar – BP85 Oued Smar – 16270 Alger
Tél : (213) 021 51 66 81 & 82
Fax : (213) 021 51 64 22 & 021 51 65 23
www.granitex-dz.com - E-mail: granitex@granitex-dz.com

59

Fig. A.3 fiche technique d'adjuvant utilisé.



Fig. A.4 Tamiseuse électrique.



Fig. A.5 Malaxeur.





Fig. A.6 broyage par broyeur.



Fig. A.7 essai de l'étalement**.**



Fig. A.8 essai v-funnel.