MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ Dr YAHIA FARÈS DE MÉDÉA

Faculté de la **T**echnologie

Département génie civil



Projet de Fin d'études

Présenté pour l'obtention du diplôme de Master

Spécialité : Génie Civil

Option : Structure

Effet de déchets de tuile sur les caractéristiques physico-mécaniques d'un béton de sable autoplaçant

Préparés par :

M elle.Brahimi Nouria

M elle. Meskine Yamina

Encadré par :

Dr .GUENDOUZ Mohamed

Melle.BOUKHELKHEL Djamila

juin 2017


بسم الله الرحمن الرحيم

Remerciements

Au terme de ce travail, je tiens à remercier en premier lieu DIEU

Miséricordieux qui m'a donné la force et la patience à achever ce mémoire.

Nous remercie Notre encadreurs M^{elle} BOUKHELKHAL DJAMILIA

Qu'elle m'aidé à finir ce travail

J'adresse mes plus sincères remerciements et toute ma gratitude, à :

Monsieur** Dr. **GUENDOUZ MOHAMED notre promoteur.

Tous les enseignants de l'institut de génie civil de l'université de MEDEA.

Tous les membres de jury qui nous ont fait l'honneur d'examiner mon travail.

Toutes les personnes qui ont contribué de prés ou de loin, à la réalisation de

Ce mémoire.

Nouria et Yamina

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

A mes très chers parents qui m'ont guide durant les moments les plus Pénétrables

De ce long chemin, ***ma mère*** *qui a été à mes cotes et ma soutenu durant toute ma vie, et* ***mon père*** *qui à sacrifie toute sa vie à fin de me voir devenir ce que je suis merci mes parents*

A mes chères sœurs et mes chers frères : ***Ibrahim,*** *Mohamed*

qui m'ont toujours soutenu dans mes choix, m'ouvrant je l'espère les portes d'un métier que je trouve passionnant.

- A mon fiancé ***Ameur*** *et tout la famille* ***Bou Bakkah***

m'aura soutenu dès le début et m'aura aidé dans les périodes de doute et de m'avoir partagé ce modeste travail.

A la famille: ***BRAHIMI*** *et* ***YOUSSFI***

A mon binôme ***YAMINA*** *pour la quelle je souhaite une vie plein de joie et de réussite.*

A tous mes amis en particulier ***AHLEM ,SOUMIA,KHADIDJA, AMIRA ,HASSINA et DJAZYA***

*** اللّهمَ وفقنا لما تحبه و تر ضاه ***

NOURIA

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

A mes très chers parents qui m'ont guide durant les moments les plus Pénétrables

De ce long chemin, ***ma mère*** *qui a été à mes cotes et ma soutenu durant toute ma vie, et* ***mon père*** *qui à sacrifie toute sa vie à fin de me voir devenir ce que je suis merci mes parents*

A ma chère sœur : ***SOUAD***

A mes chers frères : ***Abdelkader, Ibrahim, AbdeLnour, Djamel***

A la famille: ***MESKINE*** *et* ***BENLAKHDAR***

A mon binôme ***NORIA*** *pour la quelle je souhaite une vie plein de joie et de réussite.*

A tous mes amis en particulier ***FATIMA ,SOUMIA*** *et* ***ZAHRA***

A tous ceux qui m'a aidé en particulier madame

BOUKALKALE, *madame* ***HARNOUNE*** *et* ***habiba***

* اللّهمَ وفقنا لما تحبه و تر ضاه *

YAMINA

RESUME

ملخص

الهدف الرئيسي من هذا المشروع هو المساهمة في تثمين و رسكلة نفايات القرميد و دمجها بشكل حجمي في كتلة الخرسانة الرملية المائعة بنسب مختلفة (5٪، 10٪، 15٪، 20٪، 25٪) على التوالي مع دراسة خصائصها في الحالة الرطبة و في الحالة الصلبة ومقارنتها مع خرسانة رملية مائعة عادية .

وقد أظهرت النتائج أن الخصائص الميكانيكية للخرسانة الرملية المائعة تتحسن بزيادة نسبة نفايات القرميد (نسبة 25٪). لذلك فمن الممكن الحصول على مواد البناء الجديدة التي يمكن استخدامها لأنواع مختلفة من عناصر البناء

Résumé

L'objectif principal de ce projet consiste à valoriser et recycler les déchets de tuile et incorporer dans la masse du béton de sable autoplaçant par substituions volumique du sable en différents pourcentages (5% ,10%,15%,20% et 25%). Les propriétés à l'état frais et à l'état durci des différents mélanges réalisés ont été analysées et comparées aux bétons de sable autoplaçant témoin respectifs.

Les résultats obtenus montrent que la résistance à la compression du béton de sable autoplaçant est améliorée en fonction d'augmentation de pourcentage de déchets de tuile (optimum de 25%). 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 to recycle the waste tiles and incorporated in the mass of self compacting sand concrete by substitution volumetric sand at different percentages (05%, 10%, 15%, 20% and 25%). The properties in a fresh and a hardened state of the various self compacting sand concretes carried out were analyzed and compared with control self compacting sand concretes respective.

The results obtained show that the mechanical performance of the self compacting sand concrete increases according to increase in percentage of the waste tiles (optimum 25%). So, it is possible to obtain a new material which allows a use in the various types of structural components**.**

SOMMAIRE

Sommair

Remerciement

Dédicaces

Résumés

Liste des tableaux

Liste des figures

Symboles et Abréviations

Introduction générale……..……1

CHAPITRE 1 : ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1 V**alorisation des déchets et activité de recyclage en construction…….3**
1.1 Introduction ……..3

1.2. Valorisation des déchets et sous produits industriels dans le domaine génie civil……3
. 1.2.1La Valorisation…….....3

1.2.1.1 Stratégies de traitement des déchets…….…….…….….3

1.2.2 Le déchet…….……...…5

1.2.2.1 Différents déchets utilisés en génie civil ……...5
1.3 Activité du recyclage des déchets en construction……..……..…7
1.3.1 Recyclage des déchets……..…7
1.3.2 Technique de recyclage…….…...8
1.3.3 Type de recyclage……..9
1.3.4 Impacts du recyclage sur l'environnement……...…….9

1.4 Tuile et déchets de tuile…….…….....……....10
1.4.1Définition ……..……10

1.4.2 Etapes de la fabrication de tuiles……..……....……11
1.4.3 Différents types de tuiles ……...…….……...13
1.4.4 Tuile en chiffre ……...…….…….…..17

1.5 Le béton de sable…….…….…....18

1.5.1 Introduction…….…….....…18

1.5.2 Définition…….....17

1.5.3 Historique ……..19

1.5.4 Caractéristiques générales des bétons de sable…….……..19
1.5.5 Les composantes de béton de sable…….....22

1.5.5.1 Les sables…….……22

1.5.5.2 Les fines d'ajout (ou addition) …….……..…23

1.5.5.3 Les ciments …….……...…26
1.5.5.4 L'eau ……...……...26

1.5.5.5 Adjuvants…….....26

1.5.5.6 Autres ajouts …….....26

1.5.6 Propriétés essentielles du béton de sable……...27

1.5.6.1 Propriétés générales…….…27

1.5.7 Domaines d'emploi des bétons de sable……..……...…...31

1.5.7.1 Fondations profondes……...31

1.5.7.2 Bâtiment……...31

1.5.7..3 La préfabrication……..……...…….....32

1.5.7.4 Routes, chaussé et dallage ……..……..…33

1.5.7.5 Autres applications ……..34

1.5.7.6 Techniques particulières……...…….……..34
1.5.8 Intérêts et limites des bétons de sables……..……37

1.5.9 Méthodes de formulation des bétons de sable …….……38

1.5.9.1 Approche théorique de la formulation des bétons de sable ……..……..39

1.5.9.2 Méthode expérimentale de formulation……..…….……47

1.5.9.2.1 Les différentes étapes de la formulation……..…..……47

1.6 Béton Autoplaçant…….……..……..…..51

1.6.1 Historique……...…….51

1.6.2 Définition d'un béton autoplaçant…….……..52

1.6.3 Les avantage……...…52

1.6.4 Les composants d'un BAP……..…53

1.6.4.1 Les granulats. ……54

1.6.4.2 Le Ciments …….…..……54

1.6.4.3 Les ajouts minéraux……...……55

1.6.4.4 Les adjuvants…….55

1.6.4.5 L'eau de gâchage…….……..55

1.6.4.6 Les agents de viscosité…….…….55

1.6.5 Les Propriétés et Caractérisation des BAP à l'état frais…….……....55

1.6.5.1 Propriétés des BAP à l'état frais…….……...55

1.6.5.2Caractérisation des BAP à l'état frais…….57

1.6.5.2.1 Essai d'étalement au cône d'Abrams……..57

1.6.5.2.2 Essai d'écoulement à la boîte en L ou L – BOX……....58

16.5.2.3 Essai de J-Ring ……..……..59

1.6.5.2.4 Essai de stabilité au tamis ……...…60

1.6.5.2.5 Essai de l'entonnoir en (V -funnel)…… 60

1.6.6 Propriétés du béton fluide (BAP) à l'état durci……..…61

1.6.7 Formulations et Compositions des BAP ……...…..61

1.7 Valorisation des déchets de tuile dans les matériaux à base cimentaire…....65

1.7.1 Introduction …….……65

1.7.2 Effet de déchets de tuile sur les propriétés à l'état frais ……...…65

1.8 Conclusion……...…..68

CHAPITRE 2 : ÉTUDE EXPÉRIMENTALE

2.1 Introduction …….....69

2.2 Matériaux utilisés……...……..…69

2.2.1Le sable……..…….....69

2.2.2 Ciment ……...71

2.2.3Fillers……...……72

2.2.4. Adjuvant ……...…….……..…..73

2.2.5 Eau de gâchage ……..……..…74

2.2.6 Déchets tuile……...…….…….……74

2.3 Composition des mélanges……..…….……..75

2.4 Malaxage et conservation…….…....75

2.5 Essai réalisé à l'état frais……..…....76

2.5.1 L'étalement……..…..……..….77

2.5.2 La densité ……..…...77

2.5.3 Essai de l'entonnoir en (V -funnel) ……...…….……..77

2.6 Fabrication et confection des éprouvettes…….…….....78

2.7. Essais sur béton de sable durci…….78

2.7.1 Essais de compression ……...……..79

2.7.2 Essais sur l'approche de durabilité…….……...…80

2.7.2.1Absorption capillaire …….....80

2.7.2.2Les variations dimensionnelles……...……80

2.7.2.3Mesure des variations de longueur……...……..….81

2.8 Variables étudiées…….……..….82

2.9 Conclusion……..……..83

CHAPITRE 3 : RESULTATS ET INTERPRETATION

3.1Introduction ……87
3.2 Caractéristiques du BSAP à l'état frais……..……...…….87

3.2.1 Etalement…….....87
3.2.2 V-fanal……...88

3.2.3 Densité ……..…….....89

3.2.4 L'air Occlus……....89

3.3.1. Résistances à la compression…….....90

3.4 Approche de durabilité…… ……...….91

3.4.1 Absorption capillaire…….…….…….91

3.4.2 Retrait……..…….……...92

3.4.3 Gonflement……...…92

3.5 Conclusion …….……..……..94

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS.....95
Recommandation……...96
Références bibliographique……...97
Annexe……...……..102

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE 1 : ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE

Tableau 1.1. Relation entre la granulométrie et le dosage en ciment …….24

CHAPITRE 2: ÉTUDE EXPÉRIMENTALE

Tableau 2.1. Caractéristiques physiques de sable utilisé ……...70

Tableau 2.2. Composition chimique de ciment utilisé…….72

Tableau 2.3. Composition minéralogique de ciment utilisé……72

Tableau 2.4 : Essai physiques sur le ciment utilisé……..72

Tableau.2.5. Caractéristiques physiques des fins de marbre utilisées…….73

Tableau 2.6. Caractéristiques des déchets de tuile utilisées……74

Tableau. 2.7. Compositions des bétons de sable autoplaçant à base de déchets de tuile …75

Tableau 2.8. Essais sur bétons frais…….76

Tableau 2.9. Essais sur bétons de sable durci……...78

LISTE DES FIGURES

Liste des figures

CHAPITRE 1 : ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE

Fig.1.1. Stratégies de traitement des déchets……4

Fig. 1.2. Valorisation des déchets…….4

Fig.1.3. Composition des déchets ménagers en Algérie (2010)……...7

Fig.1.4. Différents forme de tuile …….....11

Fig.1.5. Tuiles alsciennes dites Biberschwanz……14

Fig .1.6. Toit en tuile canal …….15

Fig.1.7. Tuile à emboitement ……...…..…16

Fig.1.8. Déchets de tuile en chiffre……17

Fig.1.9. Situation géographique du Sahara Algérien……..……19

Fig.1.10. Phare de port Saïd réalisé en béton aggloméré Coignet ……20

Fig.1.11. Métro de Saint-Pétersbourg……..…21

Fig.1.12. Fines anguleuses……..24

Fig.1.13. Fines sphériques……..…….24

Fig.1.14. Influence du module de finesse maniabilité d'un BS ……..….28

Fig.1.15. Influence de la nature du du sable sur la maniabilité…….28

Fig.1.16. Effet de fillers calcaire sur la densité des sables DS, RS et RDS ……..…….29

Fig.1.17. Effet du dosage et de la finesse de l'addition sur la résistance…….....30

Fig.1.18. Influence de la nature de l'addition sur le niveau de résistance……30

Fig.1.19.Bétonnage au tube plongeur d'un pieu foré en béton de sable……..31

Fig .1.20 Bâtiment à Toitures à plis en béton de sable……..…32

Fig. 1.21. Moulage d'un élément……..32

Fig. 1.22. Ombrelles d'étanchéité en place…….……32

Fig.1.23. Tunnel du métro de Leningrad…….……32

Fig. 1.24. Une abondante ressource locale en sable……...……..33

Fig.1.25. Déroulement d'un film polyane……..33

Fig.1.26. Le béton de sable en projection……..35

Fig. 1.27. Dallage en BS fluidifié autocompactant…….37

Fig.1. 28. Influence du diamètre D du sable sur le dosage en fines…….…..41

Fig.1.29.Influence de la dimension d sur la porosité minimale du béton …….....42

Fig.1.30. Relation entre l'ouvrabilité et le dosage (e + v) ……..42

Fig.1.31. Coefficient d'activité du filler calcaire…….……..44

Fig.1.32. Organigramme de la méthode théorique……46

Fig.1.33. Evolution de la maniabilité en fonction du dosage en fines d'addition……50

Fig.1.34. masse volumique apparente en fonction du dosage en fines d'addition ……....50

Fig 1.35. Composition d'un béton ordinaire (BO) et d'un BAP……54

Fig 1.36. Représentation en plan d'un blocage de granulats à travers deux armatures……...56

Fig.1.37. Essai d'étalement au cône d'Abrams……58

Fig. 1.38. Procédure d'essai d'étalement……..……..58

Fig.1.39. Essai de L-Box……....59

Fig.1.40. Essai de J-Ring…….59

Fig.1.41. Essai de stabilité au tamis……..……60

Fig. 1.42 Essai de l'entonnoir en ……....60

Fig.1.43. L'ouvrabilité en fonction de déchets de tuile……....66

Fig.1.44. La densité en fonction de déchets de tuile…….…66

Fig.1.45. La résistance à la compression en fonction de déchets de tuile……... 67

Fig.1.46. Variation de la résistance à la compression en fonction de déchets de tuile ……67

CHAPITRE 2 : ÉTUDE EXPÉRIMENTALE

Fig. 2.1: Le sable utilisée……..70

Fig.2.2. Courbe granulométrique du sable et de déchets de tuile utilisée……70

Fig. 2.3. Ciment MATINE utilisés……...…71

Fig.2.4. Diagramme de DRX appliqué sur le ciment utilisé…….72

Fig.2.5. Les fillers de marbre utilisés……....73

Fig.2.6. Le type d'adjuvant utilisé……..…73

Fig.2.7. Déchets de tuile utilisés……..74

Fig. 2.8. Procédure de malaxage……..76

Fig.2.9. Mesure de l'étalement du béton de sable autoplaçant…….77

Fig.2.10. Mesure de la densité du béton de sable autoplaçant…….77

Fig. 2.11. Protocole de l'essai d'entonnoir (V- funnel)……78

Fig.2.12. Dispositif de rupture à la compression…….79

Fig.2.13. Essais de compression……...…79

Fig.2.14. Absorption d'eau par succion capillaire……...80

Fig.2.15. La mesure à l'aide de déformètre……..…81

Fig.2.16. Variables étudiées……..83

CHAPITRE 3 : RESULTATS ET INTERPRETATION

Fig.3.1. Etalement des BSAP à base de déchets de tuile…….……..…87

Fig.3.2. Etalement des BSAP à base de déchets de tuile…….…….88

Fig.3.3. V-fanal des BSAP à base de déchets de tuile……...…88

Fig.3.4. Densité des BSAP à base de déchets de tuile…….89

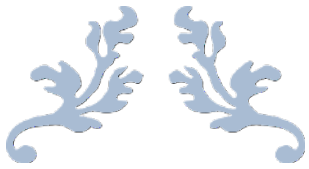
Fig.3.5. Air Occlus des BSAP à base de déchets de tuile……89

Fig.3.6 Résistance à la compression des BSAP à base de déchets de tuile……....90

Fig.3.7 Absorption capillaire des BSAP à base de déchets de tuile……..91

Fig. 3.8 retrait des BSAP à base de déchets de tuile…….92

Fig.3.9 gonflement des BSAP à base de déchets de tuile……93



SYMBOLES ET ABREVIATIONS





DIS Déchets industriels spéciaux

DMS Déchets ménagers spéciaux

D.I.B Déchets industriels banals

PE Le polyéthylène

PVC chlorure de polyvinyle

PEhd polyéthylène haute densité

PEbd polyéthylène basse densité

PP le polypropylène

PS le polystyrène

PET le polyéthylène téréphtalate

CaO La chaux

SiO_2 La silice

Al_2O_3 L'alumine

Fe_2O_3 L'oxyde de fer

$3CaO\ SiO_2$ (C_3S) Le silicate tricalcique impur (Alite)

$2CaO\ SiO_2$ (C_2S) Le silicate bi-calcique impur (Bélite)

$3CaO\ Al_2O_3$, (C_3A) L'aluminate tricalcique (Célite) :

$4CaO\ Al_2O_3\ Fe_2O_3$ (C4AF) L'alumino-ferrite tétra-calcique

(F) Les fillers

(D) Les fumées de silice

CPA Le ciment portland artificiel

CHF Ciment de haut fourneau

CPJ Le ciment portland composé

f_c Résistance souhaitée du béton a 28 jours;

f_{mc} Résistance nominale du ciment;

ΔL Variation de longueur par apport à la longueur origine,

L_0 Longueur de base, prise égale à 280mm.

ΔM Variation de masse par apport à la masse au moment du démoulage,

M Masse de l'éprouvette au moment du démoulage.

M Moment de flexion entre les deux points d'application de la charge

I Moment d'inertie de la section transversale

BT Béton témoin (sans déchets)

BSAP 5% Bétonde sable autoplaçant de déchets de tuile a 5%

BSAP 10% Bétonde sable autoplaçant de déchets de tuile a 10%

BSAP 15% Bétonde sable autoplaçant de déchets de tuile a 15%

BSAP 20% Bétonde sable autoplaçant de déchets de tuile a 20%

BSAP 25% Bétonde sable autoplaçant de déchets de tuile a 25%

INTRODUCTION GENERALE

Introduction général

Les déchets constituent un réel problème, inhérent à toute vie biologique et à toute activité industrielle, agricole ou urbaine, et à ce titre, la recherche de solutions est une vraie nécessité pour les collectivités. Le déchet est par définition «matière» et à ce titre la bio physicochimie, la mécanique et la thermique sont au premier chef sollicitées pour le traiter. Cette matière n'est pas banale. Elle à une vie, elle a souvent muté au cours de son existence pour se retrouver dans les poubelles et les décharges. Avec une telle diversité moléculaire, qu'il est nécessaire de trouver les moyens pour en extraire les fractions valorisables ou pour atténuer les capacités de nuisances. Parmi ces déchets on peut citer les déchets de céramiques qui sont en générale considéré parmi les plus trouvés dans nos chantiers. Les premiers procédés mis en place pour les traiter furent l'enfouissement. Le recyclage de ces déchets dans le domaine de construction pourra résoudre un double problème : d'une part les problèmes environnementaux et d'autre part les problèmes économiques et techniques rencontrés dans le domaine de la construction.

C'est dans ce contexte que 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.

Ce travail consiste donc à récupérer des déchets de céramique, plus précisément les déchets de tuile, rejetées dans la nature, après avoir été collectés, sont lavées, concassés, broyées puis extrudées sous forme de poudre, puis incorporées dans le béton de sable autoplaçant par substitution et par ajouts. Le composite ainsi réalisé est appelé ***''béton de sable autoplaçant à base de déchets de tuile***. 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 seul type de sable : Il s'agit d'un sable roulé

- Deux déchets d'origines différentes : le ***marbre*** provenant d'une carrière de Skikda abandonnée se trouvant dans l'usine de marbre de Zawya wilaya de Blida et les ***déchets de tuile sous forme de poudre*** provenant de la décharge naturelle.

Pour atteindre ces objectifs, le travail présenté poursuit une démarche progressive s'articulant autour des trois chapitres suivants :

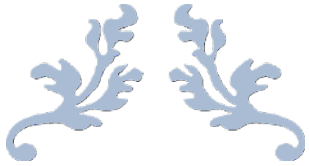
Nous présentons tout d'abord dans le premier chapitre, une synthèse bibliographie regroupant en général la valorisation des déchets et l'activité de recyclage en construction.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons les caractéristiques des matériaux de base, la formulation du béton de sable autoplaçant, et les techniques expérimentales utilisées durant cette étude pour évaluer les propriétés à l'état frais (étalement, temps de passage, densité, air occlus), les propriétés mécaniques (résistance à la compression), la durabilité (absorption d'eau, variations dimensionnelles (retrait et gonflement).

Le troisième chapitre présente l'analyse et la discussion des résultats obtenus.

Enfin des conclusions générales et des recommandations sont présentées pour achever ce modeste travail de recherche.

CHAPITRE 1



ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE





1.1 Introduction

Toute activité de production où de consommation génère des déchets, qui sont souvent associés à la détérioration de notre environnement et a de multiples risques pour la santé humaine.

L'industrie en Algérie a une part de responsabilité majeure dans la pollution globale du pays, notamment l'industrie pétrochimique, chimique, métallurgique et de traitement des minerais. Certes, l'industrie de production reste un moteur essentiel de la croissance économique et de la compétitivité, mais il est également reconnu qu'une réduction de la pollution et l'utilisation rationnelle des ressources et de l'énergie, constituent des impératifs de développement durable et rendent fréquemment les coûts unitaires des produits moins élevés.

1.2. Valorisation des déchets et sous produits industriels dans le domaine génie civil

1.2.1 La Valorisation

La valorisation est définie comme "L'élimination des déchets comporte les opérations de collecte, transport, stockage, tri et traitement nécessaires à la récupération des éléments et matériaux réutilisables ou de l'énergie, ainsi qu'au dépôt ou au rejet dans le milieu naturel de tous autres produits dans des conditions propres à éviter les nuisances [1].

1.2.1.1 Stratégies de traitement des déchets

Malgré les quantités importantes des déchets dans notre pays qui atteignent actuellement 4.892.000 tonnes/an (dont 184.000 tonnes sont considérés dangereux et toxiques) une gestion des déchets solides n'est pas à l'heure actuelle développée [2]. Quelquefois la récupération de certaines matières valorisables est pratiquée, mais la qualité reste très insuffisante.

La stratégie d'une bonne gestion des déchets s'appuie sur deux grands principes :

- Il faut prendre en compte simultanément les notions de matière, d'énergie, d'environnement et d'économie.
- Des lorsque ces stratégies ont pour objectif le retour des déchets dans le milieu naturel, il y a lieu de s'inspirer des lois qui régissent le fonctionnement de ce milieu.

Ces lois existent à travers les cycles biogéochimiques qui régentent la circulation des éléments chimiques.

La gestion des déchets passe par cinq stratégies possibles qui sont représentés à la figure 1.1

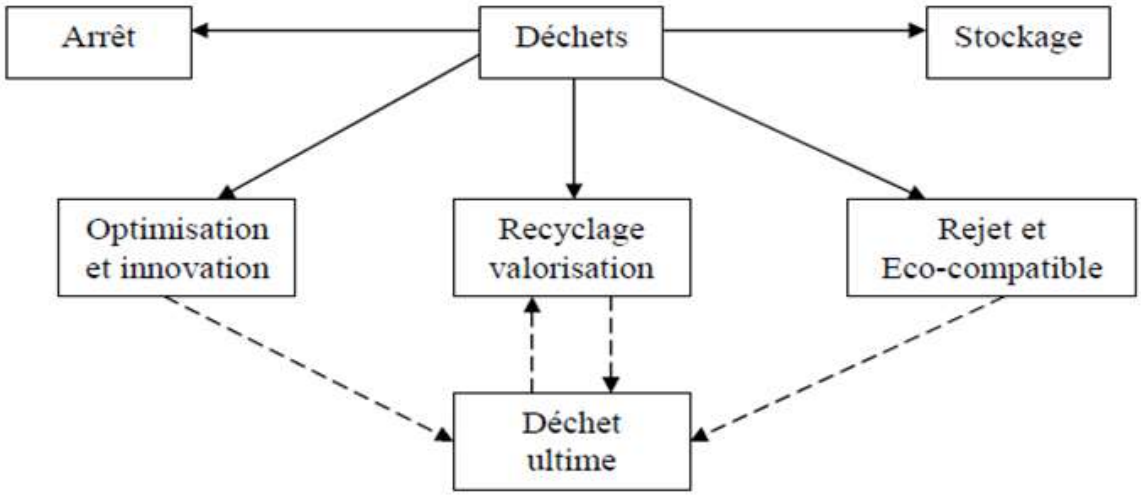


Fig.1.1. Stratégies de traitement des déchets. [2]

Seules les stratégies de valorisation, de rejet éco-compatible et de stockage concernant directement la gestion des déchets. Leur mise en œuvre concrète passe par un certain nombre de filières techniques, elles articulent autour des objectifs généraux suivants :

• Valorisation énergétique.
• Valorisation en matière première organique et minérale.
• Valorisation en science des matériaux.
• Valorisation en agriculture.
• Valorisation en technique de l'environnement.

Technique dite d'élimination. Ces objectifs sont représentés à la figure 1.2.

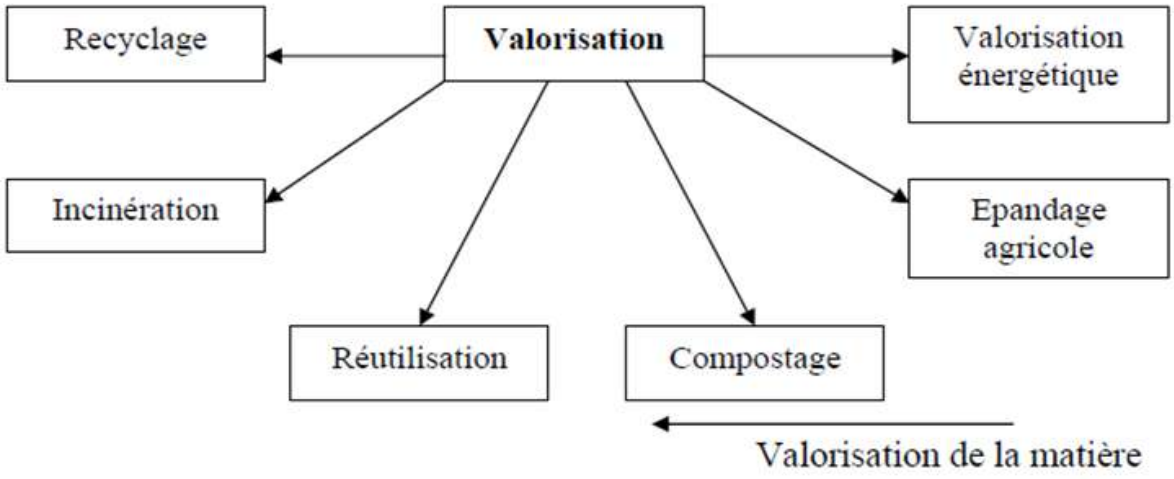


Fig. 1.2. Valorisation des déchets [2].

1.2.2 Le déchet

Tout objet qui doit être jeté car il est cassé, usé, contaminé, ou abimé d'une manière ou d'une autre, pour certains, sera qualifié de déchet, mais ne sera pas nécessairement considéré comme tel par les autres [2].

D'après le code française de l'environnement, article L541-1, le déchet est ainsi qualifié de façon essentiellement subjective, où l'acte ou l'intention du détenteur de se défaire/éliminer/abandonner importe plus que de savoir si l'objet est devenu impropre à l'usage, a perdu toute valeur économique ou présente un danger pour l'environnement [1].

1.2.2.1 Différents déchets utilisés en génie civil

En général les déchets sont classés en cinq catégories comme illustrés ci –dessous ; bien que les déchets utilisables en génie civil soient les déchets inertes, les déchets ménagers et les déchets en sous produits industriels dans des conditions spécifiques [4].

A. Déchets industriels dangereux mais non toxiques

Ce type de déchets regroupe généralement ;

- Des déchets de fer, de cuivre, de plomb,
- Des déchets contenant des fibres d'amiante,
- Des produits de préservation du bois,
- Des déchets solides dangereux de construction et de démolition de bâtiment à caractère industriel.

B. Déchets inertes

Ce sont des déchets non susceptibles d'évolution physique, chimique ou biologique importante. Ils sont essentiellement constitués de déblais et gravats et ne doivent pas être mélangés avec d'autres déchets. Les dépôts de déchets inertes sont souvent à l'origine de décharges sauvages [2].

Ce type de déchets regroupe :

- Des déchets solides de construction et de démolition des bâtiments à caractère d'habitation situé ou non sur un site industriel.
- Des déchets solides et inertes de travaux routiers,
- Des éléments en béton, mortier de ciment et béton,
- Des terres de déblais non contaminées.

C. Déchets toxiques

Ils sont à caractère industriel et obtenus en général après traitement chimique des matériaux synthétiques.

Certains déchets toxiques sont mélangés en faible quantité à des produits non polluants. Il est alors impossible de recycler ces produits sans les avoir débarrassés des déchets toxiques [1].

D. Déchets industriels dans des conditions spécifiques

Ils proviennent d'industries générant de très grandes quantités de déchets en sous produits industriels, dont les caractéristiques sont bonnes et relativement stables (cendres volantes les scories d'aciéries, le laitier, les cendre volante, etc.) [4].

E. Déchets ménager et assimilés

Ce type de déchets regroupe :

- Des déchets en matériaux de synthèse,
- Des déchets solides non dangereux de construction ou de démolition de bâtiment à caractère industriel.
- Déchets volumineux ou "encombrants" soit collectés en porte à porte, soit réceptionnés dans une installation mise à la disposition des ménages.
- Déblais et gravats produits par les ménages réceptionnés dans des déchetteries ou des dépôts réservés aux seuls déchets inertes.
- Déchets de matière alimentaire.
- Déchets ménagers spéciaux (DMS), ne pouvant en raison de leur danger être éliminés sans risques avec les déchets ménagers. Ils sont réceptionnés dans des déchetteries équipées à cet effet.
- Déchets végétaux issus de l'habitat pavillonnaire.
- Déchets de l'automobile (huiles, épaves, batteries, pneus, …).
- Des déchets commerciaux, emballages et autres résidus générés par les activités commerciales comme les déchets plastiques**.**



Fig.1.3. Composition des déchets ménagers en Algérie (2010) [5]

F. Les déchets industriels banals (D.I.B.)

Appelés quelquefois déchets industriels assimilés aux déchets ménagers, sont constitués de déchets non dangereux et non inertes. Ils contiennent effectivement les mêmes composants que les déchets ménagers mais en proportions différent.

1-3 Activité du recyclage des déchets en construction

1-3-1 Recyclage des déchets

Le recyclage est un procédé de traitement des déchets industriels et des déchets ménagers qui permet de réintroduire, dans le cycle de production d'un produit, des matériaux qui le composent.

Le recyclage a deux conséquences écologiques majeures : la réduction du volume de déchets et la préservation des ressources naturelles. C'est une des activités économiques de la société de consommation. Certains procédés sont simples et bon marché mais, à l'inverse, d'autres sont complexes, coûteux et peu rentables. Dans ce domaine, les objectifs de l'écologie et ceux des consommateurs se rejoignent mais parfois divergent ; c'est alors le législateur qui intervient.

Ainsi, en particulier depuis les années 70, le recyclage est une activité importante de l'économie et des conditions de vie des pays développés [6].

Le recyclage s'inscrit dans la stratégie de traitement des déchets dite des trois R :

- réduire, qui regroupe tout ce qui concerne la réduction de la production de déchets.

- ❖ réutiliser, qui regroupe les procédés permettant de donner à un produit usagé un nouvel usage.
- ❖ recycler, qui désigne le procédé de traitement des déchets par recyclage.

1.3.2 Technique de recyclage

A. Procédés du recyclage

Il existe trois grandes familles de techniques de recyclage : chimique, mécanique et organique.

- ➢ Le recyclage dit « **chimique** » utilise une réaction chimique pour traiter les déchets, par exemple pour séparer certains composants.
- ➢ Le recyclage dit « **mécanique** » est la transformation des déchets à l'aide d'une machine, par exemple pour broyer.
- ➢ Le recyclage dit« **organique** » consiste, après compostage ou fermentation, à produire des engrais et du carburant tel que le biogaz.

B. La chaîne du recyclage

B.1 Collecte de déchets

Les opérations de recyclage des déchets commencent par la collecte des déchets. Les déchets non recyclables sont incinérés ou enfouis en centres d'enfouissement technique.

Les déchets collectés pour le recyclage ne sont pas destinés ni à l'enfouissement ni à l'incinération mais à la transformation. La collecte s'organise en conséquence. La collecte sélective, dite aussi séparative et souvent appelée à tort tri sélectif est la forme la plus répandue pour les déchets à recycler. Le principe de la collecte sélective est le suivant : celui qui crée le déchet le trie lui-même.

À la suite de la collecte, les déchets, triés ou non, sont envoyés dans un centre de tri où différentes opérations permettent de les trier de manière à optimiser les opérations de transformation. Le tri manuel est une de ces opérations [7].

B.2 Transformation

Une fois triés, les déchets sont pris en charge par les usines de transformation. Ils sont intégrés dans la chaîne de transformation qui leur est spécifique. Ils entrent dans la chaîne sous forme de déchets et en sortent sous forme de matière prête à l'emploi.

B.3 Commercialisation et consommation

Une fois transformés, les produits finis issues du recyclage sont utilisés pour la fabrication de produits neufs qui seront à leur tour proposés aux consommateurs et consommés. Pour être en fin de vie, à nouveau jetés, récupérés et recyclés.

1.3.3 Type de recyclage

On peut distinguer trois types de recyclage :

- **le recyclage in situ** : les installations de recyclage sont mobiles et il s'effectue sur le chantier de démolition ;
- **le recyclage sélectif** : il est choisi lorsque les matériaux de démolition sont homogènes ;
- **le recyclage en site fixe** : les matériaux de démolition sont acheminés vers des installations montées en permanence sur un même site.

L'avantage du premier type de recyclage consiste en la réutilisation immédiate des déchets. De plus, le transport n'intervient pas dans le coût des granulats. Dans le domaine routier, par exemple la nouvelle chaussée est réalisée à partir du matériau de recyclage de l'ancienne chaussée. L'Allemagne et l'Angleterre possèdent plus d'installations mobiles que fixes.

Le deuxième type de recyclage nécessite que les quantités stockées soient suffisantes [8].

Le troisième type de recyclage s'effectue dans des conditions industrielles. La nature spécifique des matériaux de démolition et de construction, un certain nombre d'opérations sont ajoutées aux fonctions traditionnelles de concassage-criblage :

- stockage sélectif des matériaux réceptionnés ;
- prétraitement : réduction des gros éléments, cisaillage des ferraillages ;
- dé ferraillage (magnétique) : il peut être effectué en deux phases, l'une à la sortie du premier broyeur et la seconde après le criblage ;
- des tris manuels et mécaniques pour la récupération des papiers, des bois, des plastiques, etc. : il existe différents systèmes de séparation et de tri, en fonction des éléments à retirer (épuration par flottaison, tables densimétriques, séparation au moyen d'un courant d'air, etc.)

1.3.4 Impacts du recyclage sur l'environnement

La récupération des déchets touche deux impacts très importants, l'impact environnemental qui est résout par l'évacuation de ces déchets et l'impact économique qui est l'utilisation de

ces derniers dans l'industrie ou dans le domaine de la construction, ces déchets ont l'avantage d'être disponibles en grande quantité et avec de faible valeur marchande [8].

Le recyclage de déchets permet de :

- ✓ Réduire l'extraction de matières premières.
- ✓ Réduire des pollutions et nuisances
- ✓ Préservé de la diversité biologique et des espaces naturels
- ✓ Protection des recoures naturels
- ✓ La protection de l'atmosphère
- ✓ Contrôle et déduire des déchets dangereux

Par exemple:

• l'acier recyclé permet d'économiser du minerai de fer ;
• chaque tonne de plastique recyclé permet d'économiser 700 kg de pétrole brut ;
• le recyclage de 1 kg d'aluminium peut économiser environ 8 kg de bauxite, 4 kg de produits chimiques et 14 kWh d'électricité ;
• l'aluminium est recyclable à 100% ; 1 kg d'alu donne 1 kg d'aluminium (après avoir été fondu).
• chaque tonne de carton recyclé fait économiser 2,5 tonnes de bois ;
• chaque feuille de papier recyclé fait économiser 11 d'eau et 2,5 W d'électricité en plus de 15 g de bois.

1.4 Tuile et déchets de tuile

1.4.1 Définition

Une **tuile** est un élément de construction utilisé dans le bâtiment comme pièce de couverture de bâtiment et de chaperon de mur.

Ce terme dérive du mot latin **tegere** qui signifie « couvrir ». La forme tuile est due à la métathèse du i de tuile. Le terme toit a la même origine. Les tuiles sont généralement fabriquées dans des tuileries [10].



Fig.1.4. Différents formes de tuile [10].

1.4.2 Etapes de la fabrication de tuiles

- **La fabrication comprend plusieurs stades**

La préparation, le façonnage, le séchage, la cuisson. Les gisements utilisés pour la fabrication de produits en Terre Cuite se trouvent pratiquement à tous les étages géologiques. Les carrières sont à ciel ouvert, la plupart des tuileries et des briqueteries travaillent à proximité des gisements [9].

- **L'extraction**

Elle peut se faire de différentes façons, à la pelle mécanique, à l'excavateur, à l'aide de bouteurs, pelles, chargeuses etc. Elle est réalisée couche par couche selon des règles légales régies, par le code des mines, soucieux de préserver l'environnement. En fin de vie, les terrains sont réaménagés. Après extraction, la terre est acheminée vers un lieu de « stockage » afin de la faire sécher. Cette première phase permet aux fabricants de pratiquer ainsi une première homogénéisation des différentes couches. L'homogénéisation sera achevée et complétée lors de l'étape de la préparation. D'autres éléments peuvent aussi être ajoutés à la matière première pour améliorer son comportement à la fabrication ou ses performances : par exemple, du sable ou d'autres adjuvants [9].

- **La préparation de la pâte**

La préparation de la pâte a pour but d'éliminer les impuretés, d'émietter les argiles, de former des mélanges et d'homogénéiser et d'humidifier l'ensemble. On parle de « concassage », de « dosage » « de broyage » « de malaxage ». Pour toutes ces opérations, on utilise un appareillage spécifique (brise mottes cylindrique, trémie, distributeur doseur, broyeur à meule ou cylindre a tamis, moulleurmelangeur).Au cours de la préparation, la pâte est rendue

plastique par ajout d'eau. La plasticité d'une argile varie selon sa nature minéralogique, sa finesse et sa composition en éléments inertes (sable par exemple). La méthode appelée « l'enfossage ou encore pourrissage » améliore la plasticité du produit, l'argile ayant déjà subi une première préparation est stocké pendant plusieurs semaines dans des fosses. La préparation de la pâte est une étape primordiale qui conditionne différents aspects finaux du produit [9].

- **Le façonnage**

Le fabricant peut alors procéder au façonnage des produits. Le façonnage répond à deux objectifs, le premier c'est de donner à la pâte une cohésion suffisante, le second c'est d'attribuer la forme souhaitée.

En Terre Cuite, deux procédés de façonnage cohabitent : « l'étirage » (les appareils se nomment étireuses, mouleuse ou extrudeuses dont le débit varie de 3 à 40t/h environ) et « le pressage » en pâte molle ou pâte dure à l'aide de moules en plâtre, en bois, en acier ou en caoutchouc. Les tuiles canal et les tuiles plates sont souvent façonnées par étirage. Il est intéressant de noter que les tuiles plates peuvent être aussi pressées. Le façonnage par extrusion est le mode le plus répandu pour les carreaux de Terre Cuite. La pâte est soit simplement tronçonnée par un coupeur à fil, soit découpées suivant des formes spéciales (hexagone, trèfle, écaille etc.). La filière placée à l'extrémité de l'appareil donne au produit sa forme finale [9].

- **Le séchage**

Le produit ayant maintenant sa forme définitive, il faut éliminer la presque totalité de l'eau (teneur en eau 15 à 30% par rapport à son poids sec) qui a permis le façonnage pour que celle-ci ne perturbe pas la cuisson. C'est l'opération de séchage, une opération de dessiccation extrêmement délicate. Cela demande un savoir faire particulier car on doit veiller à la bonne humidification et ventilation des produits.

Le séchage peut s'effectuer de manière naturelle à l'air libre ou être accéléré par un dispositif industriel : les séchoirs, qui accueilleront les wagons ou les nacelles chargés avec les produits crus. Il existe plusieurs types de séchoirs industriels où la circulation de l'air chaud et des produits est optimisée en fonction de la matière première, de la forme du produit et du type de chargement [9].

- **La cuisson**

Une fois l'eau éliminée, les produits secs sont cuits. L''action de la chaleur provoque des modifications de masse volumique, de dureté, etc.… Ainsi nait la Terre Cuite. A partir de ce

moment, le phénomène de transformation de l'argile en Terre Cuite devient irréversible. Cette dernière étape définit et pérennise les propriétés intrinsèques du produit : résistance mécanique, porosité, absorption d'eau, résistance au gel, couleurs et textures, et stabilité définitivement de sa forme. La cuisson se fait en trois phases :

-le préchauffage (montée progressive en température),

- la cuisson proprement dite (entre 900°C et 1200°C selon les matières premières et les produits),

-le refroidissement,

La durée du cycle de cuisson de 12h à 48h peut varier selon les argiles utilisées, la température de cuisson. Les fours les plus utilisés sont les fours tunnels, qui permettent une production en continu, alimentés au gaz naturel. Les artisans utilisent des fours intermittents destinés à des petites séries, où le cycle de cuisson peut être adapté aux types de produits. Certains sont dotés de fours continus à feu mobile de type Hoffmann, Migeon. Les énergies utilisées sont le charbon et le bois, ou encore l'électricité, voire des combinaisons. La chaleur dégagée par le four est réinjectée le plus souvent dans le séchoir pour optimiser les flux d'énergie. En sortant du four, comme après chaque étape du procédé de fabrication (préparation du mélange, façonnage, séchage), les produits sont contrôlés. Le cas échéant, les produits refusés sont recyclés soit directement dans le mélange de fabrication si l'imperfection est détectée avant cuisson, soit concassé pour être réintroduit comme additif dans le mélange ou servir de remblai [9].

- **Contrôles et recyclage**

Du stockage à la cuisson, en passant par le mélange, le façonnage et le séchage, les produits sont constamment contrôlés. Les produits refusés sont recyclés dans la mesure du possible, afin d'éviter tout gaspillage. Avant la cuisson, l'excédent du moulage par exemple retourne dans le mélange de fabrication. Après la cuisson, les produits non conformes sont réintroduits comme additif dans le mélange ou sont utilises comme remblai. Les produits finis sont alors conditionnés et prêts à être livrés [9].

1.4.3 Différents types de tuiles

Il y a la tuile plate, la tuile canal, la tuile panne, la tuile à emboîtement, et la tuile en bois.

- **Tuile plate**

La tuile plate de forme rectangulaire, garnie au dos d'un ergot permettant de l'accrocher aux liteaux, est la tuile historique du Bassin parisien, conçue pour des toits dont la pente fait 45°

voire un peu plus, de même que l'ardoise qui la remplace dans les régions où existent des gisements (Bretagne, Maine, Anjou, Ardennes, Massif Central, ainsi que certaines régions pyrénéennes). Elle est présente sur la majeure partie du territoire français, y compris dans le Sud-Ouest (Périgord, Quercy et jusqu'en Béarn), hormis les zones de plaine où prédomine l'architecture de tradition méditerranéenne.

Elle survit à Paris même sur les plus anciennes constructions restées intactes au centre des anciens villages absorbés par la ville, comme le village de Vaugirard au cœur du 15^{e} arrondissement [10].



Fig.1.5. Tuile salsaciennes dites Biberschwwanz

- **La tuile canal**

La tuile canal, appelée aussi tuile ronde, tuile creuse ou tuile méditerranéenne, très utilisée s'inspire des formes et surtout de l'aspect, une fois posée, des tuiles romaines telles qu'on peut encore en voir sur les toitures des vieux quartiers des villes italiennes. Ces tuiles étaient de forme différente selon qu'il s'agissait de la tuile du dessous, plate avec deux bords latéraux relevés, ou de celle de dessus, de section semi-circulaire (*tegula* et *imbrex*) [10].

Les tuiles canal, qui ont voisiné avec les tuiles romaines, étaient fabriquées moulées à partir d'un à-plat de terre de forme rectangulaire et ensuite coupées sur les bords au moulage ou bien à partir d'un trapèze de terre. Un ergot moulé en bout extrême pour accrochage à la volige ou ergot en bout correspondant au pureau (partie découverte) permettait l'accrochage sur les

pentes assez fortes (jusqu'à 30 %). Ces tuiles historiques étaient scellées avec des patins de mortier, au mortier de chaux dans certains cas de froidure de climat. La tuile canal ne supporte pas la neige qui s'insère, les forts vents qui font refluer l'eau dessous.



Fig. 1.6. Toit en tuile canal [10].

- **Tuile panne**

Fréquemment appelée aussi « panne flamande », c'est une tuile généralement de larges dimensions, caractérisée par sa section en S et son double emboîtement latéral et supérieur. Fortement associée à l'architecture flamande-néerlandaise et à la civilisation hanséatique, elle est répandue le long des côtes de la Mer du Nord et de la Baltique, y compris dans les pays baltes et jusque dans le sud de la Finlande. On la rencontre également dans l'est de l'Angleterre. Elle est traditionnellement présente en France au nord de la Somme [10].

- **Tuile anecdotique**

Les **tuiles anéchoïques** sont un revêtement de caoutchouc ou de *sorbothane* incluant des milliers de minuscules cavités. Elles sont posées sur l'extérieur de la coque de sous-marins ou de bâtiments militaires, ainsi que dans les chambres anéchoïques. Elles ont deux fonctions dans un rôle de furtivité :

- absorber les ondes sonar en réduisant et déformant le signal retourné, réduisant ainsi sa portée effective ;
- atténuer les sons émis par le bâtiment (bruit moteur essentiellement), réduisant ainsi la distance à laquelle le bâtiment peut être détecté par un sonar passif [10].

➢ Tuile à emboitement

La **tuile à emboîtement**, improprement appelée *tuile mécanique*, est un matériau de couverture des toits en terre cuite qui a été inventé et breveté par le Français Xavier Gilardoni le 25 mars 1841. En 1850 les frères Gilardoni créent une tuile à double emboîtement qui sera primée à l'exposition de 1855. Plus rapides à mettre en œuvre, elles permettent de réduire le nombre de tuiles, tout en empêchant le glissement par un système d'emboîtement. Par simple, double ou triple emboîtement, les systèmes de cannelures et de nervures assurent l'étanchéité et le maintien les unes par rapport aux autres [10].

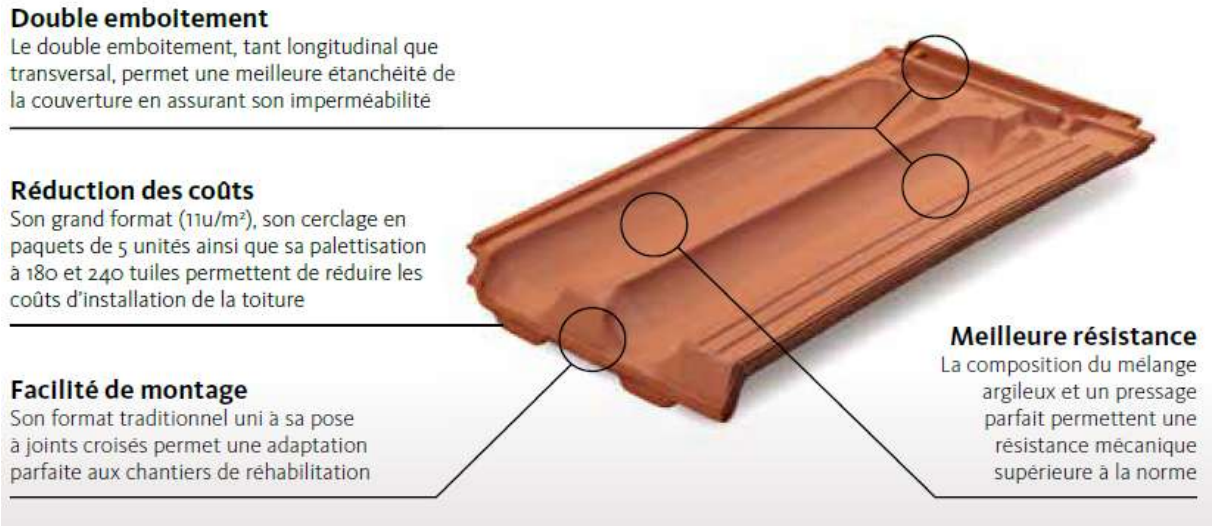


Fig.1.7. Tuile à emboitement [10].

o Avantages

Le poids d'une tuile en terre cuite est d'environ 2 800 g, mais le faible recouvrement réduit considérablement le poids de la couverture (38 kg/m^2 contre 65 kg/m^2 pour la tuile plate), la charpente (14 à 15 tuiles au mètre carré au lieu de 65 ou 75 pour les tuiles plates selon le modèle) et réduit considérablement le temps de travail puisqu'il faut trois épaisseurs de tuiles plates pour garantir l'étanchéité et 4 à 5 fois moins de liteaux pour servir d'accroche aux tuiles[10].

o Inconvénients

Cette tuile à deux inconvénients :

- ❖ Un aspect moins esthétique que la tuile plate en terre cuite (inconvénient nuancé de nos jours avec des couleurs et des rainures imitant les petites tuiles anciennes)

- Une couverture de toiture qui ne permet aucune rupture d'unité, en effet les petites tuiles plates recouvrent la toiture en couches successives, et un manque d'une tuile n'entraîne pas de voie d'eau, ce qui n'est pas le cas pour les tuiles mécaniques.

- Au point de vue acoustique celle-ci présente des caractéristiques moins avantageuses que la tuile plate de l'ordre de 5dB (Rw+C et Rw+Ctr) lorsqu'elles sont couplées à de la laine de verre + BA13.

1.4.4 Tuile en chiffre

Les tuiles sont utilisées comme matériau de construction depuis la plus haute Antiquité. Les constructions en terre cuite ont une durée de vie qui peut atteindre plusieurs siècles. De sable clair à noir, il existe en France plus de 4OO couleurs et 25O modèles de tuiles et accessoires. La tuile terre cuite offre ainsi une grande liberté architecturale aux concepteurs et constructeurs pour réaliser des toitures qui ont de la personnalité et qui contribuent à la beauté et à la diversité des paysages.

La tuile descend désormais de la toiture pour venir habiller la façade d'un bardage qui apporte un design innovant tout en facilitant une isolation par l'extérieur qui sera alors parfaitement protégée par un matériau d'entretien facile [10].

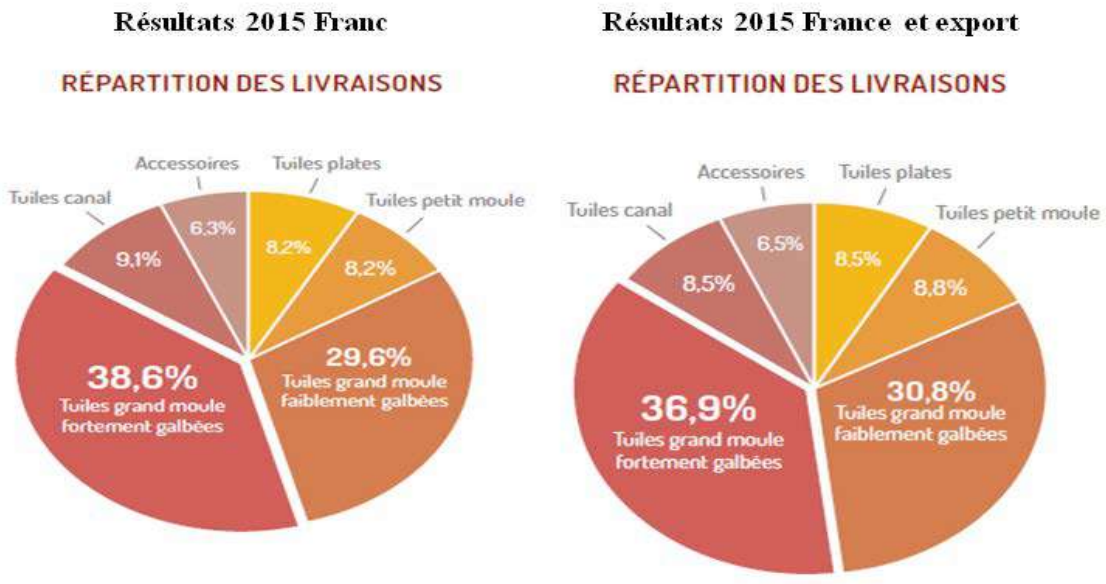


Fig.1.8. Déchets de tuile en chiffre [10].

- **Données d'émission**

La fabrication de tuiles donne lieu à des émissions dans l'air et l'eau, des déchets de production et également des émissions de bruit. Dans la présente section, les plages d'émissions de polluants atmosphériques sont présentées pour la cuisson des tuiles. Les émissions dans l'air provenant d'autres étapes de procédé, les émissions dans l'eau et les déchets de production sont également décrits [10].

- **Emissions dans l'air**

Des émissions importantes dans l'air lors de la fabrication de tuiles se produisent dans le procédé de cuisson. Dans ce contexte, il doit être mentionné que les émissions varient dans une grande mesure d'un pays à l'autre et au sein des pays, d'un site à l'autre, en fonction des différentes matières premières argileuses utilisées – en raison des variations géologiques et géographiques – comme décrit dans la section 2.3.1.1 et également en fonction des différences des techniques de fabrications appliquées pour s'adapter à la diversité de l'éventail de produits.

Dans ce contexte, les données indiquées dans le tableau suivant, montrent les plages d'émissions produites dans certains pays européens pour les fluorures, chlorures, oxydes de soufre, oxydes d'azote, poussières et monoxyde de carbone. L'ensemble des données fournies dans ce tableau sont les émissions dans les effluents gazeux non épurés sortant des fours, à savoir, sans tenir compte des équipements de réduction [10].

1.5 Le béton de sable

1.5.1 Introduction

Le besoin en granulats connaît, en Algérie, une croissance considérable en rapport avec les travaux de construction et de développement qui ont été lancés dans cette dernière décennie. Dans le sud d'Algérie, où les gros granulats sont peu disponibles et coûteux en raison de leur transportation d'autres régions, une exploitation rationnelle des agrégats dont disposent le pays et une valorisation des ressources existantes s'imposent : sable de dunes et sable alluvionnaire .Etant donné l'abondance de sable de dunes, particulièrement dans les déserts de Sahara qui occupe une grande partie du territoire Algérien (Fig. 1.10), l'idée de promouvoir sa valorisation dans la fabrication des bétons est d'une grande importance économique. En Algérie, l'intérêt à la valorisation du sable de dunes dans les bétons, notamment dans le béton de sable (BS) est apparu dans la fin des années 80.

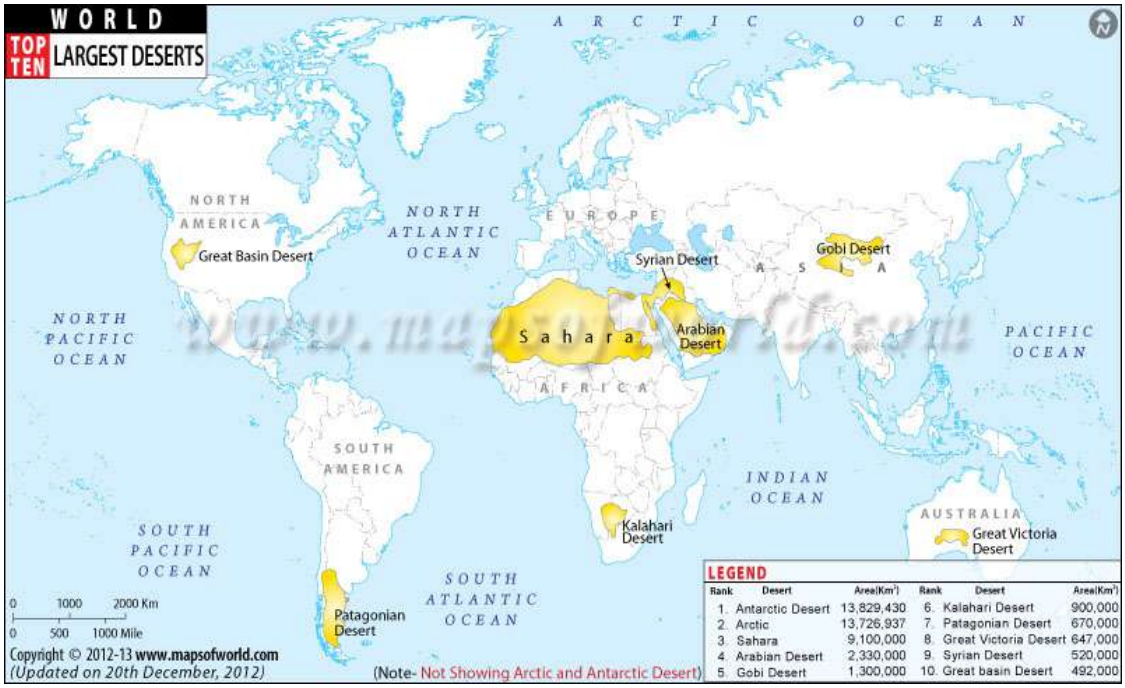


Fig.1.9. Situation géographique du Sahara Algérien [11]

1.5.2 Définition

Le béton de sable est un matériau constitue principalement de ciment, de sable d'eau et de filler naturel ou industriel. Ce qui distingue le béton de sable du béton ordinaire réside essentiellement dans l'emploi de granulats, le béton traditionnel est généralement constitué d'un granulat 0/16 à 0/22.5, par contre le béton de sable est constitué de granulat de faible diamètre Ø<10mm

- **La différence entre le béton de sable et le mortier**

Le béton de sable comme son nom l'indique est un béton ou le gros granulat est le sable (Dmax = 5mm), il ne consomme que (250 à 400) Kg/m3 de ciment, dosage habituel des bétons classiques, la compacité optimal étant atteinte par un ajout complémentaire de fines (fillers) et de plastifiant, tandis que le mortier utilise un fort dosage en ciment de (400à 600) Kg/m^3).

1.5.3 Historique

Le béton de sable est un matériau ancien, utilisé bien antérieurement au béton traditionnel d'aujourd'hui. Il trouve ses origines au milieu du 19ème siècle, c'est à dire au début du développement du ciment armé. En 1853 l'ingénieur François COIGNET a conçu ce qu'il appelait le béton aggloméré. Il s'agissait, en effet d'un mélange sans caillou, de cendres de scories de charbon brûlé, de terre argileuse cuite et pilée, de chaux hydraulique naturelle et d'eau en faible quantité [12] Il construit pour sa famille une vaste maison à saint Denis (Nord de Paris France) entièrement édifié en béton aggloméré. En 1869, le phare de Port-Saïd en

Égypte de 52 mètres de hauteur fut construit en béton de sable de plage avoisinante et chaux importée de France.

Vers les années 1869 et 1872 un aqueduc de 40 km fut construit en béton aggloméré et sert à relier Fontainebleu à Orléans. Cette fois le mélange était constitué de 4 parts de sable de Fontainebleu et une part de liant (2/3 chaux, 1/3 ciment) et de 0,5 part d'eau ; ce qui correspond à un dosage en liant de 400 kg/m3; très proche du dosage du béton de sable que de celui des mortiers [12].

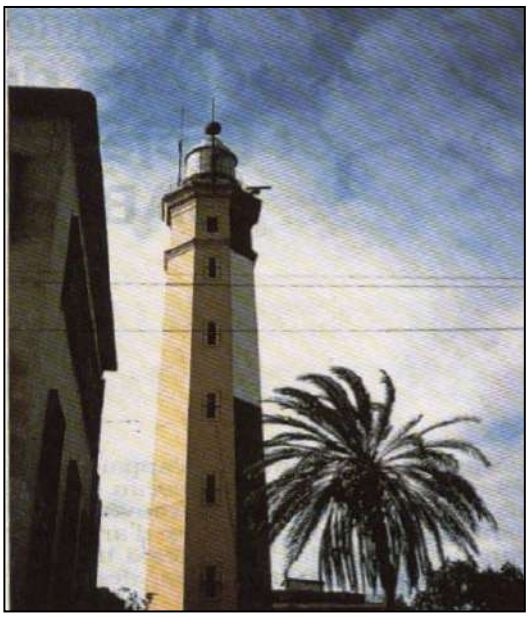


Fig.1.10. Phare de port Saïd réalisé en béton aggloméré Coignet (Egypte) [12]

François COIGNET exporta sa technique jusqu'aux USA et c'est à New York que son entreprise (New York and long Island Coignet stone compagny) construit vers les années 1871 et 1872 le pont de Brooklyn en blocs de béton aggloméré. En 1918 on note l'expérience très originale qui fut faite par Nicolas DE ROCHEFORT à Saint -Peters Bourg (Russie). Cette expérience consistait à broyer ensemble une part de sable avec une autre part égale en ciment. Ce produit de broyage était ensuite mélangé avec trois parts de sable. Les résistances obtenues par le mélange furent les mêmes que celles d'un mélange composé d'une part de ciment et 2 parts de sable. La Figure 1.11 montre l'illustration de métro de Saint- Petersbourg. Voûte mince en béton de sable, préfabriquée, à double courbure.



Fig.1.11. Métro de Saint-Pétersbourg [12]

A partir de l'année 1910, avec le développement du béton à gros granulats et le remplacement de la chaux par le ciment, le béton aggloméré, ancêtre du béton de sable tombait en désuétude, sauf l'union soviétique qui ne cessa de réaliser diverses constructions avec des bétons composés essentiellement de sable et d'un ou deux liants. Dans les années soixante dix, notamment en France, on constatait que les sables provenant de concassage des roches massives sont excédentaires, alors les extractions de granulats dans les lits des fleuves et des rivières compromettent les équilibres écologiques avec des conséquences irréversibles. Dans ce contexte s'ouvre la réflexion sur la formulation des nouveaux bétons de sable qui utiliseraient les ressources peu exploitées, ou complètement abandonnées et présenteraient des caractéristiques comparables à celles des bétons traditionnels. A partir des années quatre-vingt, après le succès des premières applications de ce béton à l'initiative du laboratoire régional des ponts et chaussées de Bordeaux, et qui ont trouvé un écho auprès des autres organismes, que le béton de sable retrouve son grand intérêt au stade où on a enregistré un projet national appelé SABLOCRET [12], pour la promotion et le développement de ce matériau. Mais promouvoir le développement de l'usage courant des bétons de sable nécessite de regrouper les initiatives et d'élaborer un solide programme de travail permettant d'enrichir les connaissances sur le matériau, son comportement et ses modes de mise en œuvre. Dans les dernières décennies, et vu l'insuffisance des résultats de son comportement mécanique, le béton de sable a fait l'objet de plusieurs recherches. Plusieurs entreprises et laboratoires, dans différents pays, ont lancé des programmes de recherches sur ce matériau comme par exemple : CNERIB et ENPA en Algérie, CEBTP et LRPC en France, Des laboratoires en URSS. Au début, les recherches se limitèrent à un béton de sable ordinaire sans aucune correction granulaire et sans adjuvants, puis elles s'étendent à la recherche d'une meilleure correction granulaire du sable dans sa partie fine par l'utilisation de filler (généralement calcaire) et à

l'utilisation des adjuvants (plastifiant, réducteur d'eau). Plusieurs compositions de base ont été données, mais pour des matériaux bien déterminés. D'autres études ont essayé d'approfondir le sujet (retrait, fluage, adhérence aux armatures) mais les résultats obtenus restent toujours insuffisants.

1.5.4 Caractéristiques générales des bétons de sable

Le béton de sable a les particularités suivantes :

* Il se distingue des mortiers par son dosage en liant moindre, sa résistance plus élevée et sa destination (essentiellement destiné aux usages traditionnels du béton) ;

* Il se distingue d'un béton ordinaire par son dosage en sable(s) élevé, par l'absence ou le faible dosage en gros granulats (une rigidification par des gravillons tels que le rapport G/S soit inférieur à l'unité peur être nécessaire), et l'incorporation d'ajout(s) ;

* Il ressemble au béton ordinaire par son dosage en liant et sa résistance similaire et parce qu'il peut être utilisé pour la réalisation des éléments de résistance pour bâtiments et chaussées.

C'est donc un matériau répondant aux critères d'un béton traditionnel en termes de performances, de durabilité et de comportement.

Les composants rentrant dans la composition d'un béton de sable sont ceux du béton traditionnel, matériau normalisé et par conséquent eux-mêmes normalisés et répondant à des avis techniques pour une utilisation dans le béton .

1.5.5 Les composantes de béton de sable

Le béton de sable a fait l'objet d'une norme expérimentale P18 500 révisée en octobre 1987 par l'AFNOR Il y a lieu cependant de souligner que les constituants entrant dans la composition d'un béton de sable sont ceux du béton, produit normalisé.

Un béton de sable est composé : de sable, de fines d'ajout, de ciment et d'eau. Par rapport a celle composition de base et pour répondre aux besoins de certains usages, d'autres ajouts spécifiques peuvent être envisagés : gravillons, fibres, adjuvants…

1.5.5.1 Les sables

On définit les sables comme étant la fraction des granulats pierreux dont les grains ont des dimensions comprises entre 80 μm et 05 mm; 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 à 80 microns n'excède pas 30% [12].

Dans le sens le plus courant, on entend par "sable" les éléments de dimensions 0 à 5 mm, non compris les fillers. A cette définition se rattachent les sables de concassage ; mais lorsqu'on dit sable, on pense essentiellement aux sables naturels abondants dans de nombreux pays et dont les réserves sont quasi inépuisables. En fait, la définition granulométrique du sable est plus compliquée, elle varie suivant les époques et diffère suivant les pays et selon la destination.

1.5.5.2 Les fines d'ajout (ou addition)

La qualité essentielle du béton de façon générale est sa compacité. Les paramètres essentiels qui vont jouer sur la compacité sont [12]:

- ✓ La granulométrie du mélange et sa teneur en eau.
- ✓ L'énergie de mise en place.

La différence entre le béton classique et le béton de sable réside principalement dans la granulométrie différente.

L'optimisation de la compacité, en relation avec la granulométrie, obéit à certaines règles, le principe est simple : les éléments les plus fins se logent dans les éléments les plus gros ; c'est en quelque sorte le principe des tables gigognes. Dans le cas d'un béton classique, on part des éléments les plus gros qui sont les gravillons (10 à 20 mm) ; ils créent des macrovides que l'on peut remplir par des sables et les vides du sable par des fines. Et ces fines sont du ciment, puisque la quantité nécessaire de ciment pour assurer la résistance coïncide avec celle qu'il faut en fines pour obtenir la bonne compacité. Cette concordance entre le besoin en fines et le dosage en ciment est interprétée par la règle suivante: [12]

C =550/$\sqrt[5]{D}$ ou C =700/$\sqrt[5]{D}$ (selon l'usage du béton)

Donnant le dosage minimum en ciment en fonction du diamètre (D) du granulat employé.

Tableau 1.1. Relation entre la granulométrie et le dosage en ciment [12]

	Granularité	$\sqrt[5]{D}$	$_{550/}\sqrt[5]{D}$	$_{700/}\sqrt[5]{D}$
BETON	0/25	1.904	290	370
	0/20	1.821	300	385
	0/16	1.741	315	400
	0/8	1.516	360	460
	0/6.3	1.445	380	480
MORTIER	0/4	1.320	415	530
	0/2	1.149	480	610
	0/1	1.000	550	700

La forme des grains et la nature géologique des fillers influent sur la quantité d'eau requise pour obtenir un mélange maniable. Ainsi, des fillers avec des grains sphériques type filler calcaire, nécessitent moins d'eau que ceux à grains anguleux type filler siliceux, et par conséquent, assurent une meilleure compacité au mélange durci. (Fig. 1.14 et 1.15). On distingue des fines actives (laitiers moulus et cendres volantes) et des fines passives, résultant du broyage de roches massives (fillers calcaires et fillers siliceux).

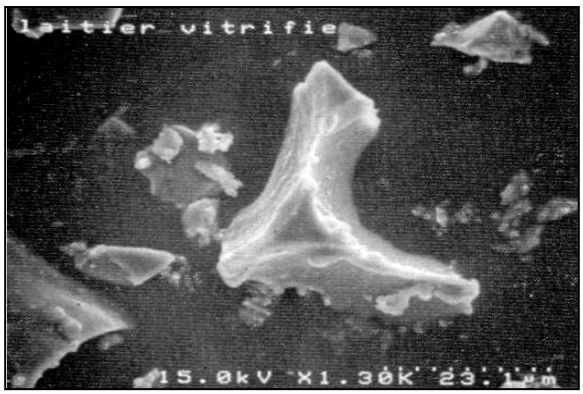


Fig.1.12. Fines anguleuses [12]

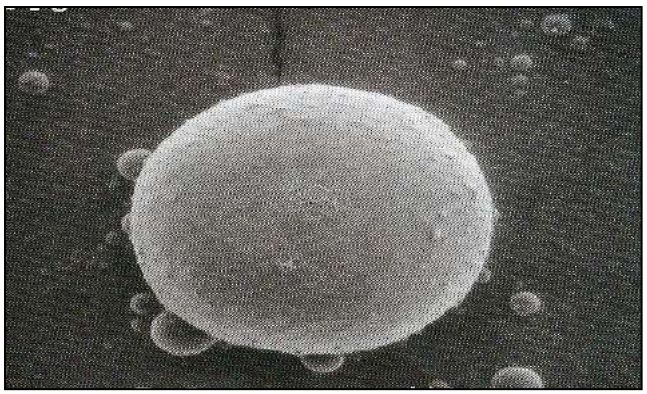


Fig.1.13. Fines sphériques [12]

Les dosages en fines d'addition seront souvent importants : entre 70 et 200 kg/m^3 et même au-delà. Par voie de conséquence leurs caractères (nature géologique, forme, etc.) vont influer grandement sur les caractéristiques de la formule employée.

- **Les fillers calcaire**

Le filler calcaire est un matériau très finement broyé, dont les plus gros grains ne dépassent pas 80 μm, ayant une finesse à peu près identique à celle du ciment portland. Il a pour rôle de remplir les vides entre les sables. Le filler calcaire n'est pas considéré comme une pouzzolane puisqu'il n'est pas réactif [13].

L'addition de filler calcaire peut avoir plusieurs fonctions, comme par exemple compléter la courbe granulométrique d'un ciment déficient en grains fins, et compléter aussi la granulométrie du sable comme le cas des bétons de sable, les filler peuvent également influencer l'hydratation, être présents dans les pores capillaires (ce qui rend plus difficile la percolation de l'eau) et influencer les paramètres rhéologiques du béton [14].

- **Fumé de silice**

L'incorporation de fumée de silice dans les bétons conduit à des améliorations remarquables des caractéristiques rhéologiques et mécaniques des bétons. Pour les bétons frais, la fumée de silice complète le fuseau granulaire et supprime les tendances au ressuage ou à la ségrégation tout en réduisant les chaleurs d'hydratation. Pour les bétons durcis, la finesse de la fumée de silice permet de créer une microstructure très dense qui conduit à des bétons extrêmement compacts, à caractéristiques mécaniques élevées en réduisant les teneurs en eau grâce à l'adjuvantation . Ces bétons ont ainsi une résistance nettement renforcée vis-à-vis des agents ou des phénomènes agressifs : attaques chimiques, acides, sulfates, abrasion
gel/dégel, en réduisant significativement la porosité et la perméabilité, la carbonatation, les phénomènes d'alcali-réaction et de réaction sulfatique interne [14,15].

- **Laitier**

Ce sont des résidus minéraux résultant du refroidissement rapide des scories provenant de la fusion de minerais de fer en haut fourneau. Ce sont des combinaisons d'oxydes de calcium (CaO), de silicium (S_iO_2) et de magnésium(MgO).Les ciment en laitier offrent une meilleure résistance chimique aux environnements agressifs (eau sulfatées, milieu marin) et permettent l'obtention d'une bonne durabilité du béton. Il existe deux types de laitiers :

- **Le laitier granulé** : sable friable de couleur claire utilisé souvent comme liant hydraulique ;

- **Le laitier solidifié à l'air libre** : se présente sous forme de roches prêtes au concassage à la granulométrie voulue. Ce laitier est employé comme granulats dans les chaussées.

- **Cendres volantes**

Ce sont des produits pulvérulents provenant du dépoussiérage électrostatique ou mécanique des gaz brûlés des chaudières industrielles alimentées en charbon pulvérisé. Essentiellement siliceuses, parfois calciques, elles ont des propriétés hydrauliques et/ou pouzzolaniques.

1.5.5.3 Les ciments

Comme pour le béton classique, le ciment utilisé pour la confection d'un béton de sable est conforme à la norme NF P 15-301. Le choix du ciment est fait à partir de sa classe de résistance, de ses caractéristiques d'hydratation, de l'agressivité du milieu…et, d'une façon plus générale, de la composition du béton et de l'usage auquel on le destine [17].

1.5.5.4 L'eau

Les bétons de sable nécessitent une qualité d'eau de mouillage importante en raison de la proportion élevée en éléments fins qui génèrent une surface spécifique importante: le rapport eau/ciment (E/C) est supérieur à celui des bétons de gravillons et pour le réduire on a recours à des adjuvants plastifiants et on sélectionne les fillers nécessitant la plus faible quantité d'eau de mouillage. Le rapport E/C est généralement compris entre 0.6 et 0.7.

1.5.5.5 Adjuvants

Les adjuvants sont des agents chimiques qui sont ajoutés en petites quantités pour modifier certaines propriétés du béton comme la rhéologie, la durabilité et les propriétés mécaniques. Il existe beaucoup de types d'adjuvant, on les définit d'après leur action principale, même s'ils ont plusieurs actions secondaires. On utilise dans les bétons de sable les mêmes adjuvants que dans les bétons traditionnels, et pour en exploiter les mêmes propriétés [17].

1.5.5.6 Autres ajouts

- **Les fibres**

Elles sont surtout utilisées dans le but de réduire le retrait au premier âge : dosage et nature sont des paramètres très importants pour assurer l'efficacité de cet ajout. On utilise dans la plupart des cas des fibres organiques (polypropylène) pour contrecarrer les effets du retrait de

prise et éviter la fissuration qui en résulte. Si l'on veut améliorer la ductilité, on pourra utiliser des fibres d'acier ou des fibres de fonte amorphe [12].

❖ **Les gravillons**

Les gravillons: il est possible de "raidir" (augmenter le module d'élasticité) la formulation d'un béton de sable en y ajoutant des gravillons. Dans un rapport gravillon/sable restant inférieur à 1: il s'agit alors d'un béton de sable chargé. Le rapport gravillons/sable est situé entre 1.4 et 1.7 pour le béton classique. L'ajout de gravillons permet d'augmenter la compacité et à même dosage en ciment la nature de sable se trouve enrichie en ciment.
Les ajouts peuvent être employés soit seuls soit en associât ion; la synergie ainsi i créée permet d'augmenter davantage les performances. Cependant, il faudra prendre en compte l'aspect économique et la plus-value que représentent ces ajouts excessifs. L'aspect économique n'est cependant pas limité au coût matière: dans la mesure où le béton de sable peut répondre à un problème mal résolu par le béton classique, un coût équivalente même une plus value sont envisageables. En d'autres termes, pour des utilisations plus adaptables au béton de sable même si le coût est plus élevé que celui du béton classique. le béton de sable est préféré [19].

❖ **Les colorants**

On utilise particulièrement des colorants pour des raisons d'esthétique. Pour la plupart, ce sont des oxydes minéraux. La teinte finale recherchée dépend essentiellement du dosage et de la nature du colorant employé [17].

1.5.6 Propriétés essentielles du béton de sable

1.5.6.1 Propriétés générales

- **Granulométrie et maniabilité**

Une des particularités du béton de sable est de nécessiter davantage d'eau que les bétons classiques; ceci se traduit par des valeurs du rapport *E/ C* systématiquement supérieures à 0,5. Ce rapport est généralement compris entre 0,6 et 0.8 par rapport à un *E/ C* de 0,5 à 0,6 pour le béton ordinaire avec des maniabilités comparables ; cette particularité est due à une surface spécifique plus importante du mélange qui a besoin d'être mouillée.

La granulométrie du sable influe sur les besoins en eau de mélange; plus le sable est riche en éléments grossiers plus la maniabilité s'améliore comme le traduit la Figure 1.14 qui exprime une relation entre le module de finesse et la maniabilité.

La figure 1.14 montre clairement que la maniabilité est améliorée quand le rapport *E/C* augmente. Cependant pour un rapport *E*/*C* fixe, la maniabilité dépend da la nature des fines d'ajout.

La faible étendue granulaire du béton de sable et donc la grande homogénéité combinée à une bonne maniabilité attribuent au béton de sable un meilleur comportement que les bétons traditionnels, vis-à-vis de la ségrégation.

On constate ainsi que la relation entre le dosage en fines et la maniabilité dépend aussi de la nature du sable et sa granulométrie. Les graphiques de la Figure 1.15 montrent l'effet différent de fines calcaires sur un sable alluvionnaire 0/4 et un sable de dune. Pour le sable de dune, l'ajout de fines jusqu'à 200 kg/m^3 entraîne une chute de maniabilité, ce qui n'est pas le cas pour le sable alluvionnaire (plus compact) [12].

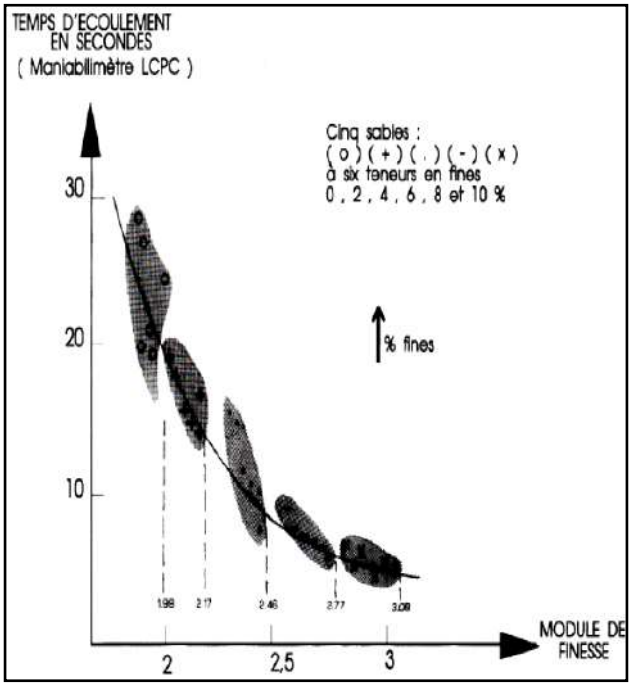


Fig.1.14. Influence du module de finesse maniabilité d'un BS [12]

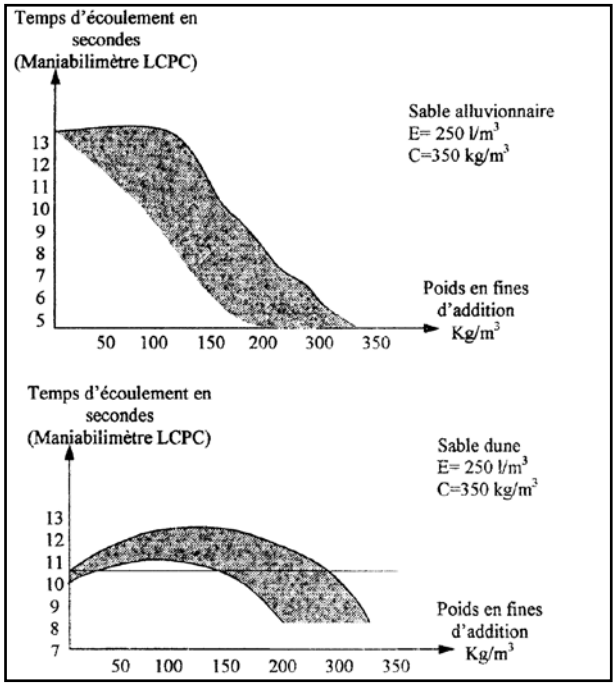


Fig.1.15. Influence de la nature du du sable sur la maniabilité (avec fines d'addition calcaire) [12]

Un BS se diffère d'un béton traditionnel par sa granulométrie fine. Donc, la porosité dans le cas du BS est élevée et par conséquence le dosage nécessaire du ciment sera très important. L'utilisation du ciment seul n'est pas économique et en plus le BS ne sera finalement qu'un mortier. A cet effet, l'introduction de fines d'ajout est indispensable dans le cas des BS. L'ajout de fines entraîne une amélioration de la compacité du squelette granulaire et améliore par conséquence la maniabilité du BS [21]. La Figure 1.16 montre l'effet de fillers calcaires sur la densité des sables sable alluvionnaire RS, sable de dune DS et le mélange RDS.

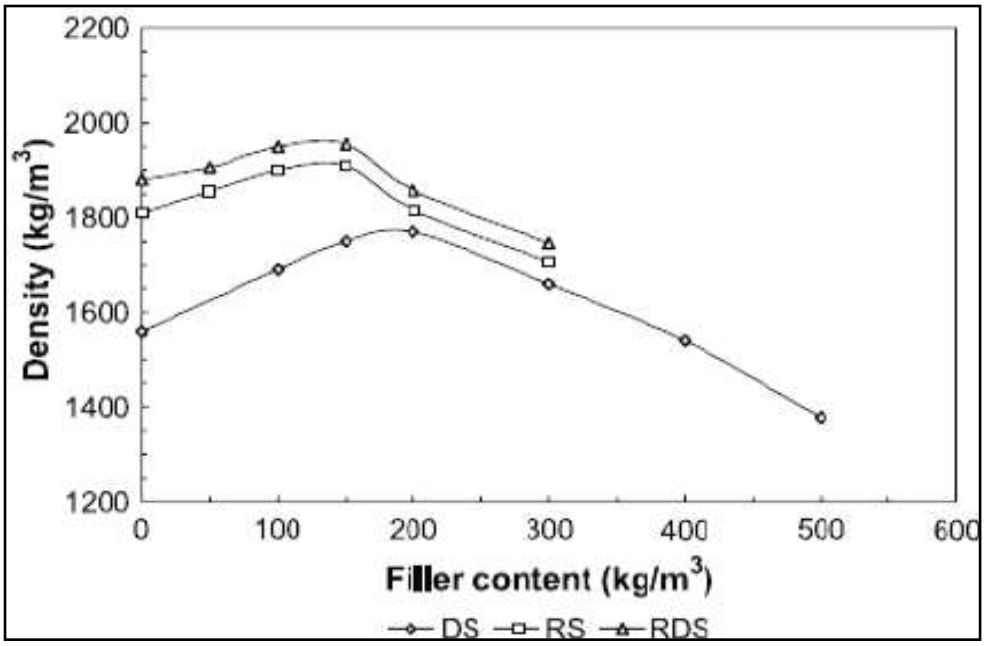


Fig.1.16. Effet de fillers calcaire sur la densité des sables DS, RS et RDS [20]

D'après la Figure 1.16, on remarque qu'il existe un dosage optimal de fillers calcaires où la compacité est maximale. L'amélioration de la compacité par l'ajout de fillers calcaires devrait rendre l'eau plus efficace et donc améliorer la maniabilité.

- **Granulométrie et résistance**

A dosage en ciment constant, la résistance peut être différente en fonction d'un certain nombre de paramètres et en particulier [12]:

- **La finesse de l'adition** : plus l'addition est fine plus elle est efficace au niveau du gain en compacité et donc en gain de résistance ; ce résultat est valable quelque soit la granulométrie du sable. (Fig. 1.17)

- **La nature de l'addition**

  A même dosage selon la Figure 1.21, on peut 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.

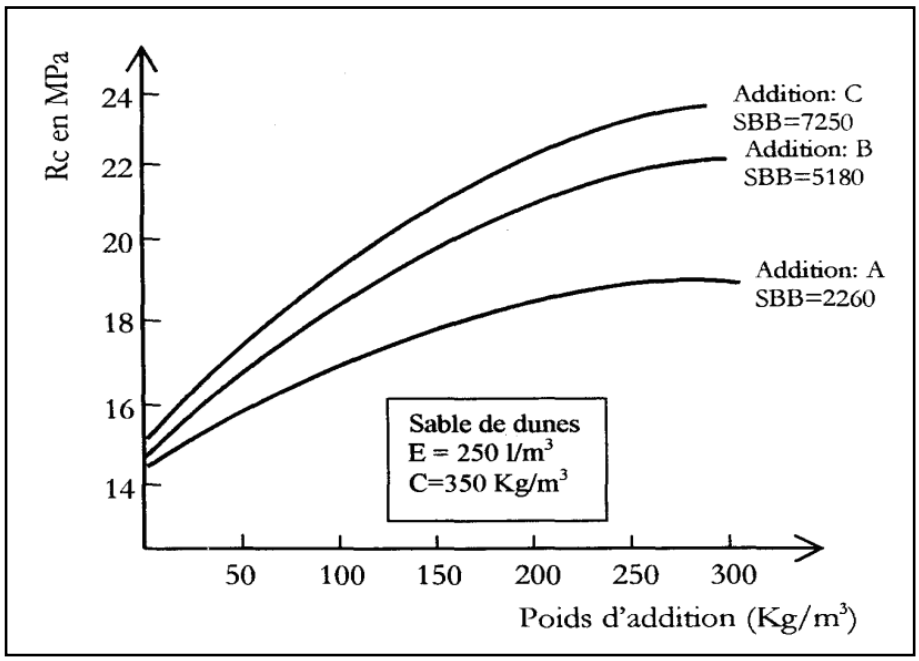


Fig.1.17. Effet du dosage et de la finesse de l'addition sur la résistance [12]

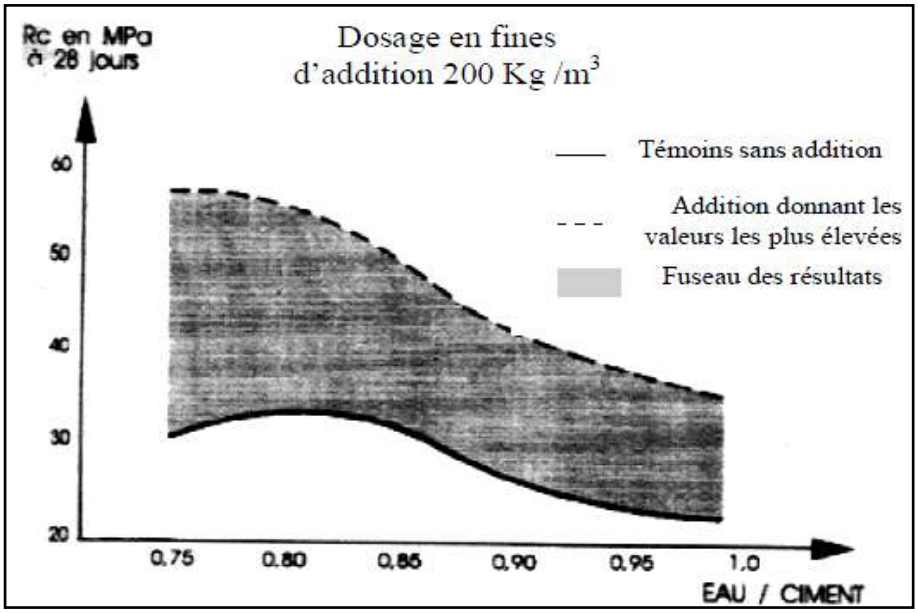


Fig.1.18. Influence de la nature de l'addition sur le niveau de résistance [12]

❖ La dimension du D_{max} (0/D)

Pour une même valeur du rapport E/C, on constate que l'effet du diamètre Dmax est peu important, mais par contre il influe sur la maniabilité; ou il faut employer un plastifiant réducteur d'eau, afin de fixer la maniabilité et atteindre la résistance voulu.

1.5.7 Domaines d'emploi des bétons de sable

Le béton de sable est un matériau ancien utilisé bien avant le béton traditionnel et présente sous sa forme actuelle certaines propriétés spécifiques par rapport au béton classique, et peut procurer des économies dans certaines régions et pour certains usages.

Les principaux domaines d'utilisation des bétons de sable, établis sur ces données sont les suivants :

1.5.7.1 Fondations profondes

Le béton utilisé dans le bétonnage des pieux profonds doit présenter des spécificités par rapport au béton traditionnel utilisé dans les fondations superficielles. Ainsi, des règles et recommandations énoncent les caractéristiques fondamentales suivantes des bétons pour pieux exécutés en place [12].



Fig.1.19.Bétonnage au tube plongeur d'un pieu foré en béton de sable (sous bentonite)[12]

1.5.7.2 Bâtiment

Presque toutes les applications en bâtiment sont réalisables en béton de sable, il est surtout utilisé pour son ouvrabilité excellente et son esthétique [12].

1.5.7.3 La préfabrication

Le béton de sable est plus adapté à la préfabrication, on constate que les performances recherchées en préfabrication sont réunies dans le béton de sable (facilité en moulage, la montée en résistance, démoulage rapide, aspect de surface exceptionnel) [12].

- **Toiture à plis**

Ces éléments préfabriqués ont une épaisseur de 5 cm, une hauteur de 2 m et une longueur pouvant atteindre 32m.

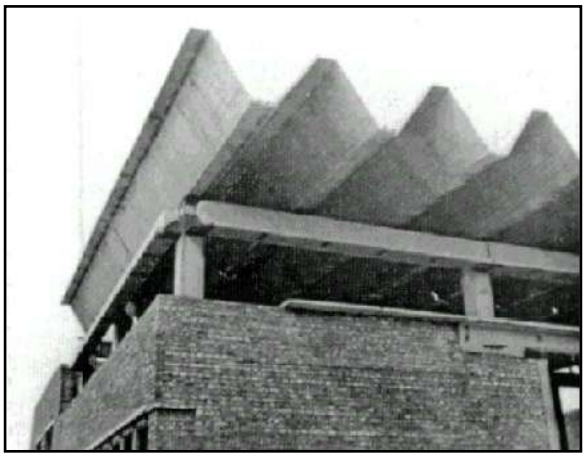


Fig .1.20 Bâtiment à Toitures à plis en béton de sable [12]

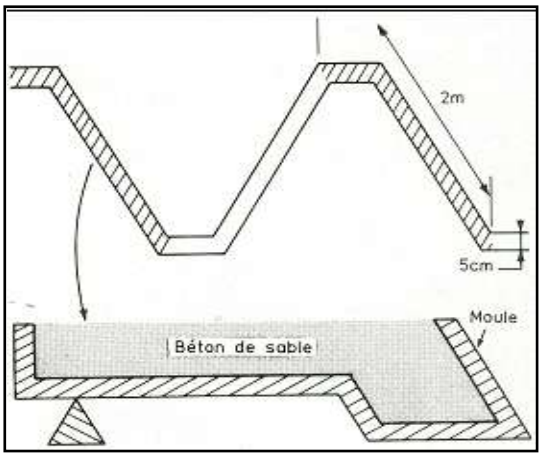


Fig. 1.21. Moulage d'un élément[12]

- **Ombrelles d'étanchéité**

La finition du métro de Leningrad en Russie est assurée par la mise en place d'une ombrelle d'étanchéité (Fig.1.22) ; il s'agit d'une voûte à caractère autoporteur constituée de plusieurs éléments (généralement trois) assemblés sur place et réalisés dans une usine de préfabrication (Fig.1.22).

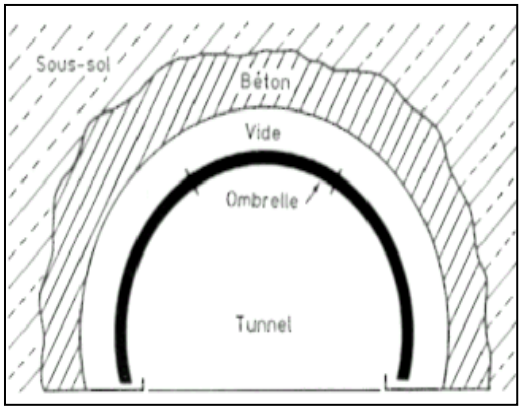


Fig. 1.22. Ombrelles d'étanchéité en place [12]



Fig.1.23. Tunnel du métro de Leningrad [12]

1.5.7.4 Routes, chaussé et dallage

Dans le domaine des routes et autoroutes (Fig.1.24 et 1.25), dans les aérodromes et en bâtiment, les BS peuvent être utilisés dans la réalisation des structures de chaussées pour améliorer leur résistance à l'usure et dans la production des équipements de voirie extrudés (ex : caniveaux, bordures, séparateurs, etc.)[12].

L'utilisation de BS dans ces domaines se trouve en premier lieu justifiée par l'économie sur le coût des matériaux, la facilité de mise en œuvre et la qualité esthétique des produits. Dans le cas des structures de chaussées ou des dallages utilisant le BS, une étude de dimensionnement est nécessaire. Les calculs doivent être réalisés en respectant les normes et les règles en vigueur, notamment celles des performances mécaniques.



Fig. 1.24. Une abondante ressource locale en sable présente un réel intérêt économique. [12]



Fig.1.25. Déroulement d'un film polyane (cure) [12]

1.5.7.5 Autres applications

L'utilisation du BS peut s'étaler aux applications spéciales telles que : les ouvrages d'art, l'enrochement artificiel et les accessoires de VRD (Voiries, Routes et Divers). Le BS peut constituer une réponse technique et économique avantageuse pour certains domaines d'ouvrages d'art privilégiant les qualités de maniabilité et d'esthétique. La réalisation des ouvrages d'art nécessite des bétons de hautes performances et très hautes performances. Formuler un BS de hautes performances est évidemment contrarié par l'absence partielle ou totale de gravillons. Mais on peut optimiser le squelette granulaire des granulats du BS par l'utilisation des éléments fins, qui limitent en même temps le rapport eau/ciment sans affecter d'une manière considérable la maniabilité [21].

Dans le domaine de préfabrication d'accessoires de VRD, le BS est plus convenable notamment dans la préfabrication de tuyaux, de regards et tout accessoires utilisés dans les canalisations étanches d'assainissement destinés à l'évacuation des eaux usées ou des eaux pluviales. Toutefois, il existe encore d'autres applications qui pourraient trouver intérêt à utiliser le BS tels que : les travaux souterrains (tunnels, galeries, collecteurs,..), les barrages et les travaux portuaires [12].

Cependant, presque toutes les applications du béton traditionnel sont également réalisables en BS. Seuls les critères technico-économiques font la différence de choix.

1.5.7.6 Techniques particulières

Les applications citées précédemment, ont privilégié dans certains cas l'utilisation des BS par rapport aux bétons traditionnels. Dans certaines techniques de mises en œuvre, l'utilisation du BS répond parfaitement à la solution de quelques problèmes, qui restent à nos jours, mal résolus par le béton traditionnel. C'est le cas des techniques de projection de béton et de bétons fluides.

- **Béton de sable projeté**

La technique de la projection de béton est apparue au début de vingtième siècle aux Etats-Unis et en France. Le domaine d'application de la projection de béton comprend la réparation et les renforcements des ouvrages en béton et en maçonnerie ainsi que les constructions de formes complexes [12].

La projection de BS est une technique intéressante spécialement dans le cas des réhabilitations des structures d'ouvrages souterraines (Fig.1.26). Par sa finesse granulométrique, le BS représente une alternative aux bétons traditionnels, particulièrement dans le cas de présence des ferraillages denses. Le faible taux de perte liée à l'utilisation de BS 20 projeté, sa granulométrie fine et donc sa pompabilité en fait du BS projeté une solution adapté à des problèmes mal résolus par les bétons traditionnels [12].

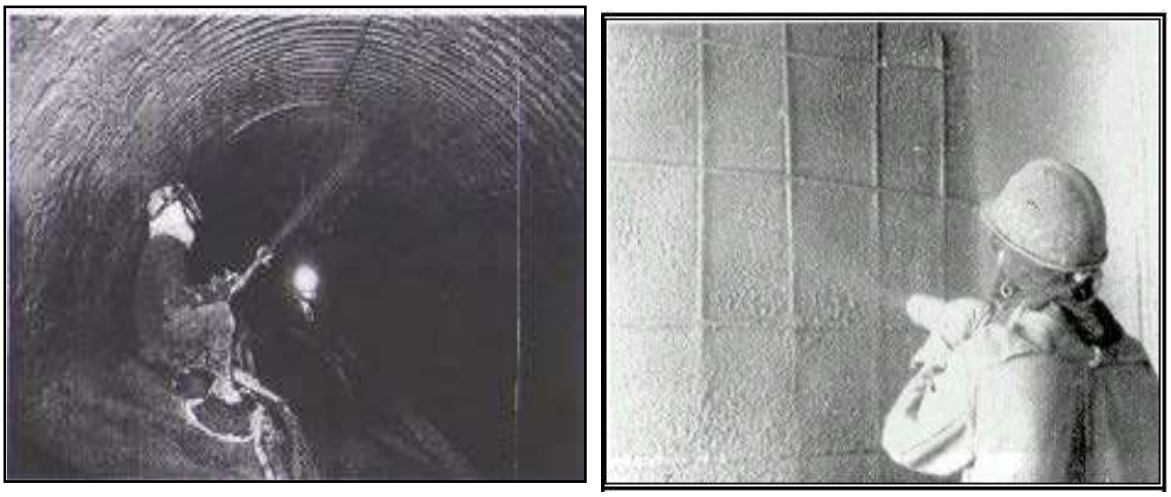


Fig.1.26. Le béton de sable en projection [12]

- **Bétons de sable autoplaçant**

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 [21].

La fluidité doit être assurée par l'utilisation des adjuvants superplastifiants 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-œuvre. 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 [21,22].
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 traditionnels.



Fig. 1.27. Dallage en BS fluidifié autocompactant (Base aérien de Dijon) [12**]**

1.5.8 Intérêts et limites des bétons de sables

❖ Intérêt des bétons de sable

Dans de nombreux usages, le béton ne nécessite pas un niveau très élevé de résistance. Cependant il exige, parfois, des caractéristiques qui peuvent être mieux assurées par le béton de sable. Parmi ces caractéristiques :

La maniabilité : Le béton de sable étant très maniable, sa mise en œuvre, sa capacité à remplir des moules avec une énergie de serrage moindre et sans préjudice pour les autres propriétés de matériau, constituent un atout significatif.

La cohésion et l'absence de ségrégation: La variation entre les dimensions des gains n'étant pas trop importante, ce matériau présente une assez bonne cohésion, faible ressuage et surtout une absence totale du problème de ségrégation. La petite granulométrie et la faible dimension des grains : le matériau serait utile dans les travaux d'injection, dans la mise en œuvre des structures à fortes densités de ferraillage, ainsi que dans les travaux de rénovation de structures.

- ✓ Le transport : Le transport du béton de sable du lieu de production au lieu d'utilisation s'effectue par les mêmes moyens que les bétons classiques, bien que les bétons de

sable soient généralement plus plastiques et les risques de ségrégation pendant le transport faibles ce qui permet son transport à des distances lointaines.

- ✓ L'aspect de surface: La granulométrie continue et serrée des bétons de sable permet la réalisation des effets architectoniques très esthétiques, soit sur la forme des éléments, ou bien sur l'aspect de surface. Cet aspect est un souci de plus en plus recherché pour toutes les constructions.

En plus de ces caractéristiques, le béton de sable possède un autre intérêt plus important pour les régions du sud algérien et qui consiste à utiliser les sables qui se trouvent en abondance dans ces régions, ce qui conduit à des économies certaines.

- ❖ **Limites des bétons de sable**

- **Raisons économiques :** l'expérience a montré que, par l'utilisation des ajouts, on peut augmenter d'une façon considérable la résistance d'un béton de sable. Toutefois, la multiplication des ajouts ou l'augmentation du dosage en ciment ne sont pas sans incidence sur le coût. Dans la mesure où ce béton n'apporte pas "un plus" dans l'usage envisagé, il est donc inutile de chercher des performances supérieures. Tout sera donc fonction du contexte local en matière de granulats et de l'usage envisagé. En ce qui concerne notre pays il existe des déchets de carrière de concassage à partir desquels nous pouvons tirer des fillers. Il existe également des fillers naturels dans certaines régions, notamment dans le sud du pays.

- **Raisons techniques :** On n'a que peu de connaissances sur les caractéristiques et le comportement du béton de sable, comme le retrait, le fluage et la durabilité, ce qui exclut, peut être, ce matériau des éléments fortement sollicités ou précontraints.

1.5.9 Méthodes de formulation des bétons de sable

Dans la formulation des bétons traditionnels, on cherche généralement d'obtenir les propriétés essentielles : l'ouvrabilité et la résistance mécanique, à partir d'une combinaison de leurs constituants (sable, gravillon, ciment et eau). Dans ce cas, il existe plusieurs méthodes de formulation permettant de viser ces propriétés, en se fixant généralement la taille des plus gros granulats sur la base de considérations technologiques.

Dans le cas du BS (caractérisés par sa granulométrie fine), l'application directe des méthodes de formulation adaptées aux bétons traditionnels conduit généralement à des dosages très

élevés en ciment. A cet effet, les pâtes de ces bétons contiennent toujours, en supplément du ciment et de l'eau, des ajouts et des adjuvants, afin de minimiser le dosage de ciment.

Deux types d'approches de formulation sont présentées : une approche théorique, basée essentiellement sur l'optimisation de la compacité du BS en partant de la relation de Caquot et une méthode expérimentale, basée sur la réalisation de gâchées [12].

1.5.9.1 Approche théorique de la formulation des bétons de sable

Les agrégats 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, puis joue le rôle d'une colle liant les agrégats et 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 [22] 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).

$$V=V_0\left(\frac{d}{Dmax}\right)^{1/5} \quad \textbf{.....(Equation 2.1)}$$

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 ;

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

Cette formule a innové le domaine de formulation des bétons et elle est à la base de nombreuses méthodes utilisées telles que l'approche de Faury, Bolomey, Dreux, etc. Elle trouve aussi son application aux bétons de sable pour la détermination des différents dosages des constituants, tout en faisant quelques adaptations à ce cas précis.

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

Dans le but d'optimiser la compacité du béton de sable, les constituants du mélange sont séparés en deux fractions:

1. Les éléments fins qui regroupent tous les grains de taille inférieure à 80 m m et qui sont le ciment, les fines d'ajout et une fraction du sable.

2. Toute l'étendue du sable comprise entre 80m m 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 80m m et l'étendue du sable comprise entre 80 m m et le diamètre maximal, la porosité du sable peut être calculée selon la formule précédente de Caquot :

$$\mathbf{Ps = V= 0.75\ (0.08/D)^{1/5}} \text{ ……..(Equation 2.2)}$$

Ps(V) : Porosité du sable d'étendue 80m m et Dmax

Dmax : Diamètre maximal du plus gros grain du mélange.

La constante expérimentale (V0) 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 80m m, et à combler la porosité du sable ainsi calculée.

En effet, il est impossible de prendre en compte la distribution de la taille 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 (< 80m m) et le volume des vides associé a 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.

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.

$$\mathbf{[Fines] = 0.38\ (0.08/Dmax)^{1/5}} \text{…… (Equation 2.3)}$$

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 (Fig.1.28).

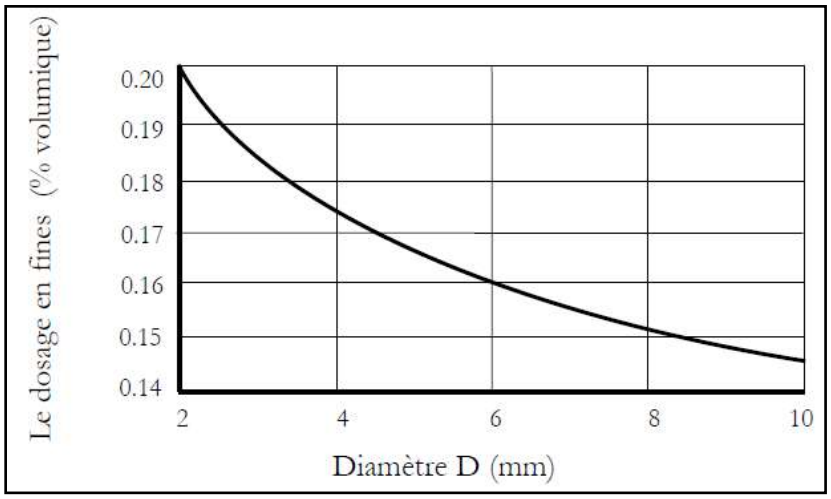


Fig.1. 28. Influence du diamètre D du sable sur le dosage en fines [12]

❖ **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

$$(e + v)min = 0.8\ (d/Dmax)^{1/5} \text{ ……..…..(Equation 2.4)}$$

Cette formule 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 :

$$d = (60 / (f))\ mm \text{…….(Equation 2.5)}$$

Avec:

f : surface spécifique exprimée en cm^2/g du constituant.

d : 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 mm pour le diamètre ; ainsi l'élargissement de l'étendue est la seule solution pour la réduction de la porosité théorique minimale comme la Figure 1.43 le montre :

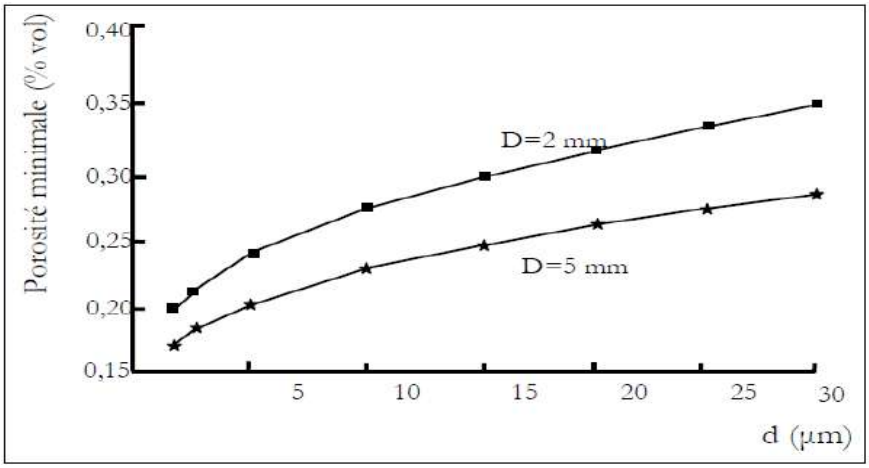


Fig.1.29.Influence de la dimension d sur la porosité minimale du béton pour deux tailles du sable [12]

On remarque que la porosité minimale d'un mélange granulaire varie considérablement avec son étendue granulaire, mais cette porosité est décomposée en un volume d'eau (e) et un volume de vides (v).En pratique, confectionner un béton avec les strictes quantités d'eau conduit à une mauvaise ouvrabilité ; la Figure 1.30 nous montre la relation entre l'ouvrabilité et le dosage en eau.

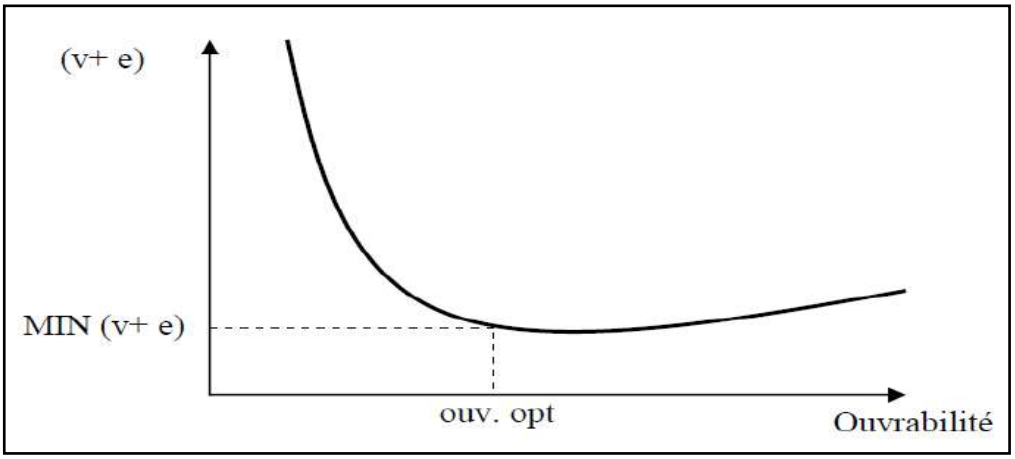


Fig.1.30. Relation entre l'ouvrabilité et le dosage (e + v) d'une matrice pour une mise en œuvre donnée [12]

L'expérience montre que pour des quantités d'eau inférieures à la quantité d'eau permettant d'obtenir l'ouvrabilité optimale, le mélange piègera 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 celle qui donne l'ouvrabilité optimale, la quantité d'air piégée reste stable et l'ouvrabilité augmente de façon linéaire.

Finalement, pour estimer le dosage en eau, il faut préalablement évaluer la quantité d'air piégée.

Dans les 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%.

[Vides] = K [eau] …… (Equation 2.6)

Avec :

K : constante comprise entre 0.2 et 0.25.

- **Dosage en sable**

Afin de compléter un volume unitaire de béton de sable, ($1m^3$), de la formulation, le dosage en sable est obtenu en faisant soustraire au mètre cube du mélange les dosages estimés précédemment des autres constituants (fines, eau, vide).

[Sable]=1000-[fines]-[eau]-[vide] (l/m^3).

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

- **Estimation de la résistance en compression**

Après avoir optimisé la compacité et déterminé les différentes proportions des constituants, il est jugé nécessaire d'évaluer la résistance à la compression de ce mélange. Pour ce faire, comme tous les autres mélanges à base de ciment, les méthodes classiques sont adaptées. Ces méthodes faisant intervenir la contribution de tous les paramètres influant sur la résistance : le squelette granulaire, la nature des liants, et les dosages des constituants de la pâte.

Dans le cas de bétons formulés avec des fines potentiellement réactives, une généralisation de la formule de FERET [24] a été proposée récemment.

$$R_b = \frac{Kf \times Rc}{\left(1 + \frac{3.1(e+v)}{c(1+K_1+K_2)}\right)^2}$$ **……. (Equation 2.7)**

Avec:

Kf : coefficient granulaire compris entre 4.5 et 5 ;

Rc : classe vraie du ciment (MPa) ;

E : dosage en eau total (l/m^3) ;

V : air piégé (l/m^3) ;

C : dosage en ciment (kg/m^3) ;

Rb : 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= Kfil (Fil/C) ;

0< Kfil £ 0.4 K1<0.2

K1 : coefficient pouzzolanique

K2 : coefficient d'activité du filler calcaire. (Voir figure 1.31.)

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

CV, FS, FIL : dosage en cendres volantes, fumée de silice et filler calcaire (kg/m^3).

Cette formule ne peut être utilisée que par une identification précise de l'activité des additions par l'intermédiaire des coefficients déjà mentionnés. 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 [24], alors que d'autres paramètres pourraient influer sur l'activité liante des fillers telles que la répartition granulaire, la forme des grains, et leur porosité. Cette activité pour chaque type de filler présente un optimum au-delà duquel elle ne développe plus des performances mécaniques.

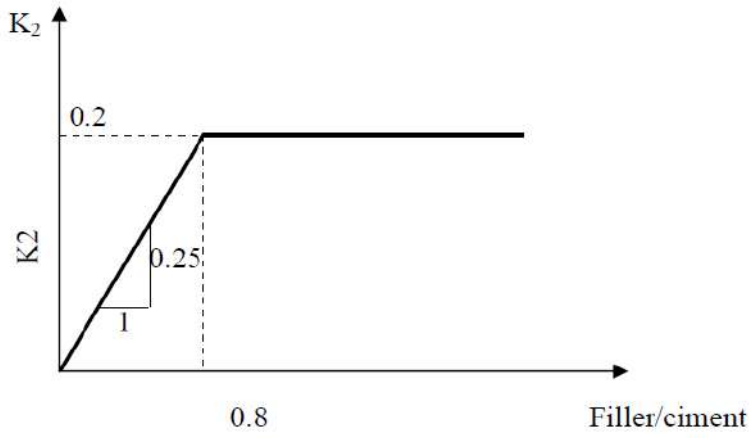


Fig.1.31. Coefficient d'activité du filler calcaire (modèle) [12]

Sur la base de la remarque de l'activité des fillers, un autre paramètre s'ajoute pour le dosage en fines, tonte fois le dosage en fines est estimé en terme de compacité regroupant les fines d'addition et le ciment, alors que l'optimum de la résistance s'obtient en se fixant le rapport des dosages en fines d'addition-ciment au maximum d'activité. Le problème revient à résoudre le système de deux équations simples

· Dosage en ciment + dosage en fines d'ajout = dosage en fines.

· Dosage en fines d'ajout / dosage en ciment = optimum d'activité.

Il en résulte de tout ce qui précède que cette formulation théorique simple et performante donne la possibilité au formulateur 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.

Tout de même elle ne peut être utilisée que dans un cadre limité, ceci est dû aux nombreuses hypothèses qui la jalonnent, c'est aussi pour ça que cette approche ne sera acceptée qu'après passage à l'expérience qui la confirme ou l'ajuste.

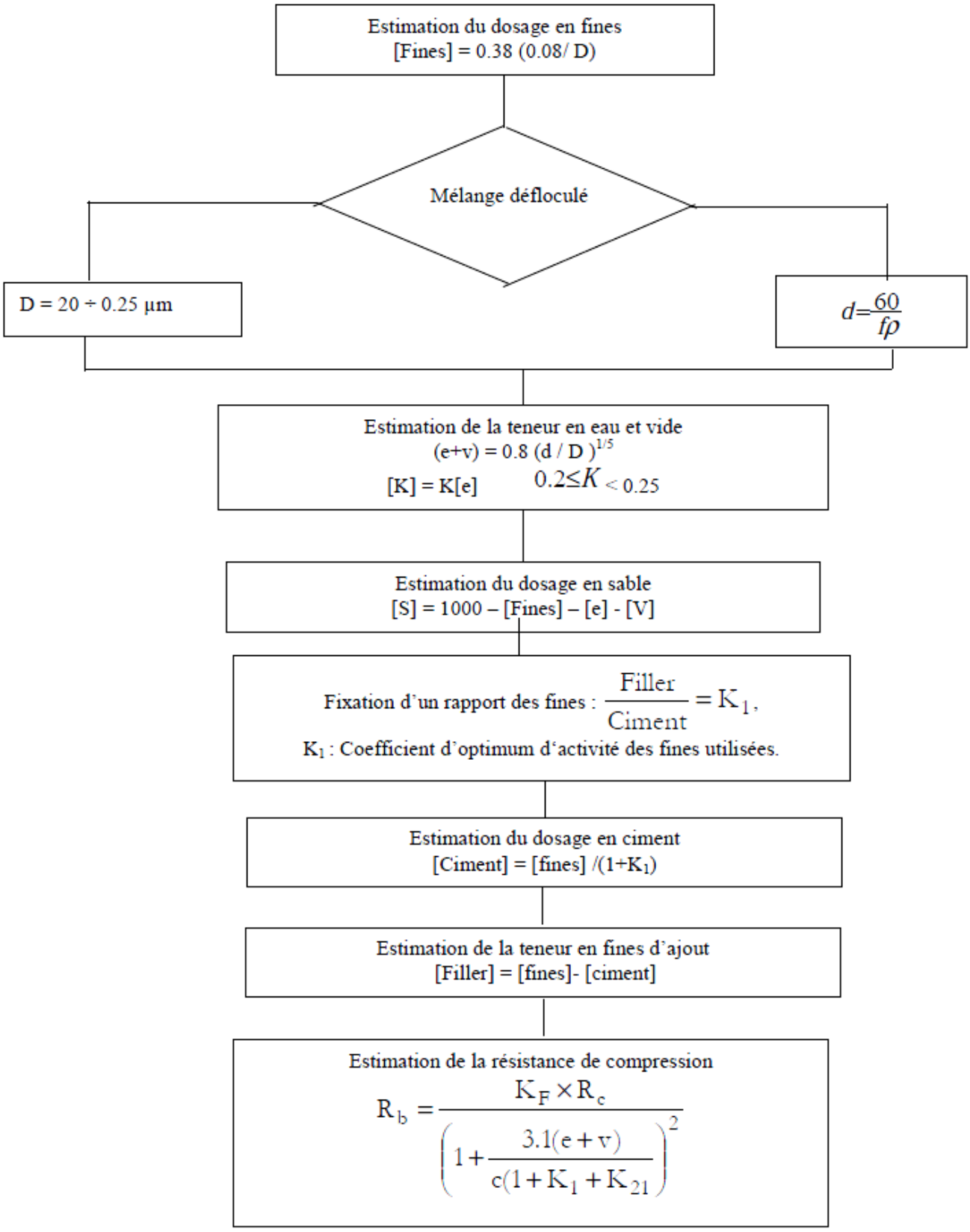


Fig.1.32. Organigramme de la méthode théorique [12]

1.5.9.2 Méthode expérimentale de formulation

La méthode expérimentale, doit permettre de formuler un béton de sable mais son but n'est pas d'expliquer ou de formaliser les phénomènes qui entrent en jeu dans la formulation des bétons.

D'autres méthodes expérimentales existent, elles peuvent différer en fonction des approches théoriques et des habitudes de travail, toutefois, l'objectif reste le même : formuler un béton qui soit le plus compact possible, et par conséquent de bonnes performances.

Dans cette méthode, on travaille à dosage en ciment fixé, de manière à mieux répondre aux prescriptions contractuelles ou normatives qui imposent bien souvent un dosage minimum.

Cette méthode est une adaptation de la méthode dite BARON-LESAGE, elle est itérative et est basée sur la réalisation de gâchées légères. Les gâchées sont caractérisées par des mesures de la maniabilité, au maniabilimètre à mortier LCL, et de la masse volumique apparente.

Diverses formulations de bétons de sable ont déjà été réalisées par cette méthode, on cite à titre d'exemple : le béton de pieux, le béton routier, le béton de projection etc., et ont donné pleine satisfaction [12] .

1.5.9.2.1 Les différentes étapes de la formulation

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

Dans cette partie de la méthode, nous chercherons à déterminer une formule de un mètre cube, constituée de ciment, d'eau, de sable et d'adjuvants, ayant une maniabilité adéquate.

a) Dosage en ciment

Les prescriptions contractuelles ou normatives imposent très souvent un dosage minimum en ciment par mètre cube de béton, en fonction du type d'ouvrage ou bien de l'agressivité du milieu. On choisit donc de travailler avec un dosage en ciment fixé qui ne variera pas tout au long de l'étude, on le note C (Kg/m^3).

b) Dosage en eau

A ce stade de la méthode, une valeur approximative du dosage en eau, E (l/m^3), suffit. Pour estimer ce dosage, les praticiens s'appuient sur l'expérience. Par exemple, on peut prendre 220 litres d'eau pour 350 Kg de ciment, et 250 litres pour 400 Kg de ciment.

c) Détermination du dosage en sable

Dans cette formule, il faut introduire un fluidifiant réducteur d'eau, au dosage préconisé par le fabricant (N% du poids des éléments inférieurs à 80 μm en extrait sec), qui permettra de défloculer les fines. D'autre part, un béton contient toujours un volume d'air, Vair, la teneur en air des bétons de sable est toujours supérieure à celle des bétons ordinaires et se situe entre 5 et 7 % de volume du béton.

Les quantités de ciment, d'eau, d'adjuvant et d'air sont connues, nous devons donc compléter la formule par du sable de manière à obtenir un mètre cube de béton; on aboutit à la relation suivante [12] :

$$\mathbf{V_{air} + V_C + V_E + V_{adj} + V_{sable} = 1000 \text{ (En litres). } \ldots\ldots \text{ (Equation 2.8)}}$$

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

$$\mathbf{Msable = MVA * Vsable\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \text{ (Equation 2.9)}}$$

Msable: masse nécessaire pour 1 m^3 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 m^3).

$$\mathbf{MVAT = m_{ciment} + m_{eau} + m_{adj} + m_{sable} \ldots\ldots\ldots\ldots \text{ (Equation 2.10)}}$$

d) 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 (1)
- 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).

$$S_i = S_{i-1}(MVAT_{i-1} - MVAR_{i-1}) + V * MVA_{sable} \ldots\ldots\ldots \text{(Equation 2.11)}$$

Où

S_i : 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° 2). Il sera retranché si 1'écoulement au maniabilimètre est inférieur à 7s (+V dans la formule n° 2) 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 [12].

Détermination du dosage en fines d'addition

Il faut maintenant introduire dans le béton les fines d'addition et en définir le dosage optimal à rapport E/C constant. Pour cela, il est nécessaire de réaliser des gâchées de béton de sable avec 5 à 6 dosages en fines dans la plage d'emploi usuelle de ces fines.

L'incorporation des fines doit permettre d'augmenter la compacité du béton, en remplissant les vides.

Notre objectif, est d'obtenir une formule de un mètre cube dans laquelle la masse volumique apparente théorique tend vers la masse volumique apparente réelle, et un temps d'écoulement adéquat.

Pour chaque gâchée, on détermine la maniabilité ainsi que la masse volumique apparente réelle (MVAR) que l'on compare à la masse volumique apparente théorique (MVAT) de la formule. Si besoin, la correction sur le sable s'effectue à l'aide de la formule suivante [12] :

$$S_i = S_{i-1}\text{-}(MVAT_{i-1} \text{ -}MVAR_{i-1}) \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \text{(Equation 2.12)}$$

Comme exemple pratique sur cette méthode de formulation, une étude de formulation de béton de sable effectuée au LRPC de Bordeaux.

Dans cette étude, trois différentes fines d'addition ont été utilisées:

- Fine d'addition N° 1 : Son utilisation conduit à une maniabilité optimale entre 150 et 180 Kg/m^3 de fines. Figures 1.33 et 1.34

- Fine d'addition N° 2 : Dans sa plage de dosage (0 à 240 Kg/m3) il n'y pas d'optimum de maniabilité et masse volumique, l'optimum doit exister pour des dosages supérieurs.

- Fine d'addition N° 3 : Son optimum de maniabilité et de masse volumique est compris entre 60 et 90 Kg/m3de fines.

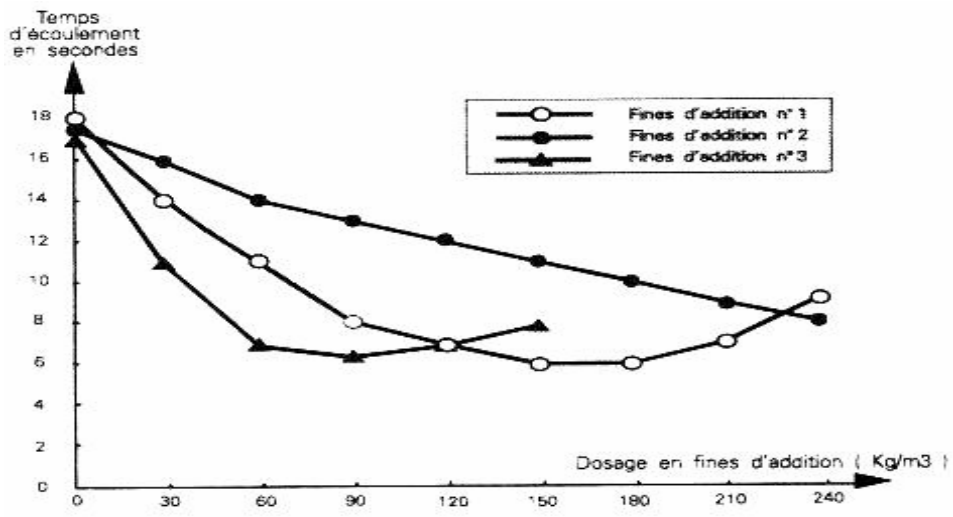


Fig.1.33. Evolution de la maniabilité en fonction du dosage en fines d'addition [12]

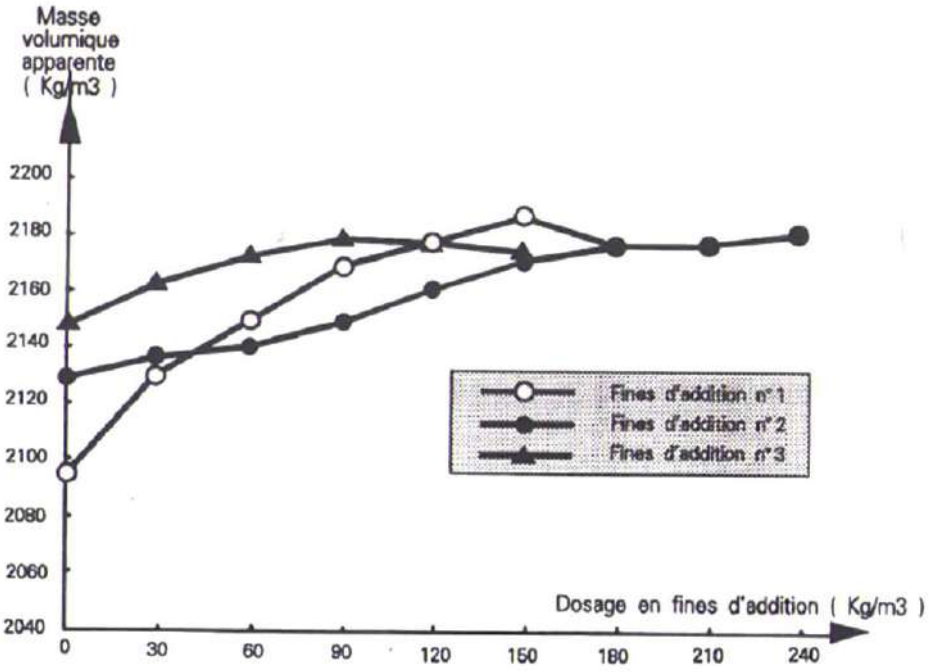


Fig.1.34. masse volumique apparente en fonction du dosage en fines d'addition [12]

1.6 Béton Autoplaçant

1.6.1 Historique

Au Japon, le nombre d'ouvriers qualifiés dans la construction n'a cessé de diminuer depuis le début des années 1980, engendrant une perte de connaissance, notamment dans les techniques de vibration du béton. L'utilisation de bétons très fluides, ne nécessitant pas d'apport d'énergie extérieure pour le serrage, est apparue comme une solution possible à ce problème [25][26].

C'est ainsi qu'est né le concept des bétons autocompactants ("self-compacting concrete", traduit par béton autoplaçant ou béton autonivellant).
La nécessité de ce type de béton a été proposée par OKAMURA en 1986 [27] [28]. Des études pour développer le béton autoplaçant y compris une étude fondamentale sur l'ouvrabilité du béton ont été effectuées par OZAWA et ses collègues à l'université de Tokyo [29] [30].

L'idée d'un béton fluide ou béton autoplaçant (BAP) est apparue en 1989, puis a été rapidement reprise par les grands groupes industriels Japonais (Kajima, Taisei, Obayashi, etc.) pour des projets d'envergure[31] alors que les Japonais avaient besoin d'un béton qui n'exige pas une main d'œuvre nombreuse et qualifiée, et qui fournisse une résistance à la compression élevée à jeune âge pour pouvoir augmenter la productivité. Ainsi, le progrès et l'évolution en génie civil dans différentes applications telles que les ponts suspendus, les grattes ciel et surtout la grande orientation de l'usage des bâtiments vers une utilisation spécifique et une qualité architecturale accrue, ont été les enjeux concrets du développement des bétons fluides. [26,32]

L'intérêt des autres pays pour ce type de béton n'est apparu qu'après quelques années, mais il est en plein essor. En France le LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées) se penche sur la question au début des années 90. Les premières applications en grandeur réelle sont réalisées au début de 1988, à Brest, sur le chantier d'extension du parc de loisirs Océanopolis pour des voiles courbes de grande hauteur fortement ferraillés. Aussi lors de la construction d'un collège dont les façades sont inclinées, à géométrie complexe, et des formes non répétitives excluant toute possibilité de préfabrication. [33]

Dans des cas particuliers, le BAP peut être considéré comme un béton autonivelant (BAN). Cette dénomination n'est pas utilisée par tous les auteurs, puisque certains d'entre eux font la distinction entre le béton autoplaçant et le béton autonivelant, le premier terme étant employé lorsqu'il s'agit d'un coulage vertical et le second correspondant à une mise en œuvre horizontale. [31,34] Le premier article sur le béton autoplaçant a été publié en 1989 par OZAWA [35] [36], et en 1992 OZAWA[35][37] et d'autres collègues ont présenté un travail sur ce sujet à une conférence internationale de béton tenu à Istanbul [37]. Cette présentation a accéléré l'intérêt international pour le béton autoplaçant.

En 1998 le premier atelier international sur le béton autoplaçant été tenu à Kochi au Japon. Grace aux efforts de Ozawa et ses collègues une recherche plus intensive prospérée, particulièrement à de grandes compagnies de construction en Asie et en conséquence le béton autoplaçant été employé pour la réalisation de plusieurs structures comme des ponts, tunnels, bâtiments, etc [27][38] .

À titre d'exemple nous citerons quelques réalisations japonaises :

_ _le pont Kiba park. où 650m3 de bétons autoplaçants ont été utilisés avec une résistance à la compression à 28 jours de 60 MPa.

_ _le pont Akashi Kaikyo , le plus long pont suspendu au monde (3910m,

1991m entre les deux pylônes) où 770 000m3 de béton autoplaçant ont été versés dans les coffrages des fondations et des piliers très congestionnés sans vibration (OKAMURA et coll. 1994) [31].

_ Le bâtiment Landmark Tower où un béton autoplaçant d'excellente déformabilité a été mis en place avec succès dans 66 colonnes de 40m de hauteur chacune .

_ Le stade de Fukuoka où 10 000m3 de béton autoplaçant ont été utilisés pour d es sections très ferraillées et de formes compliquées.

1.6.2 Définition d'un béton autoplaçant

De nombreux termes définissent ce béton : béton auto-nivelant, béton auto-compactant (SCC en anglais), ou béton hyper fluide. Cependant, l'appellation la plus utilisée aujourd'hui dans le domaine de construction est béton auto-plaçant. **[**34**]**Les bétons autoplaçants (BAP) sont encore à l'heure actuelle qualifiés de «nouveaux nouveaux bétons » car leur utilisation reste modeste bien qu'ils possèdent un fort potentiel de développement [33].

1.6.3 Les avantage

- ✓ **Avantages techniques**

Avec l'apparition des BAP, les opérations traditionnelles de coulage, d'étalement, de talochage et de surfaçage se réduisent à une étape de coulage suivie d'un débullage dans le cas des applications horizontales. Pour les opérations verticales, les divers déplacements sur les banches, à travers trappes et échelles, sont réduits de manière significative.

On peut résumer ses avantages techniques dans les points suivants:

- Facilité et rapidité dans la mise en œuvre du béton (coulage en un seul point, augmentation du débit de béton pompé).
- Bétonnage en milieux fortement ferraillés.
- Amélioration de la qualité des parements et de l'enrobage des aciers.
- Réalisation d'éléments de forme plus complexe.

- ✓ **Avantages socio-économiques**

Nous avons vu que la fluidité des BAP est telle qu'il n'est plus nécessaire de les vibrer pour les mettre en œuvre. La suppression de la phase de vibration est particulièrement bénéfique pour les personnes chargées de la mise en place, puisque cela implique :

- une diminution du bruit sur site
- une diminution de la pénibilité des tâches
- une réduction des risques d'accident
- Réduction du coût de la main d'œuvre.
- Absence de systèmes de vibration (intérieurs ou extérieurs) réduisant ainsi les coûts et les nuisances sonores dans et au voisinage du chantier.
- Réduction du temps de bétonnage et des besoins de ragréage. Toutefois, certains points restent à surveiller dans l'utilisation du béton autoplaçant
- Augmentation du coût des matières premières, par la présence des nouveaux adjuvants, et des différentes additions minérales.
- Compatibilité des matériaux.
- Etanchéité des coffrages.

1.6.4 Les composants d'un BAP

Les BAP sont des bétons à quatre composants : les granulats, le liant, l'eau et les ajouts. Les granulats et le ciment utilisés pour un BAP sont les mêmes que ceux utilisés pour la

fabrication d'un béton ordinaire. Ce qui particularise la composition des BAP, c'est la proportion des différents constituants et non pas leurs propriétés. En plus des granulats, la formulation d'un BAP se distingue par la présence d'un ajout chimique et /ou minéral. [33,39] Les constituants de base d'un béton ordinaire sont le ciment, l'eau et les granulats. Les différents constituants proposés pour composer les bétons autoplaçants, en plus du ciment et de l'eau dosés de manière à obtenir une résistance mécanique donnée, sont : Les granulats, les fines, le superplastifiant et parfois l'agent de viscosité.

La figure 1.35 montre les composantes des deux types de béton, le béton ordinaire et le BAP

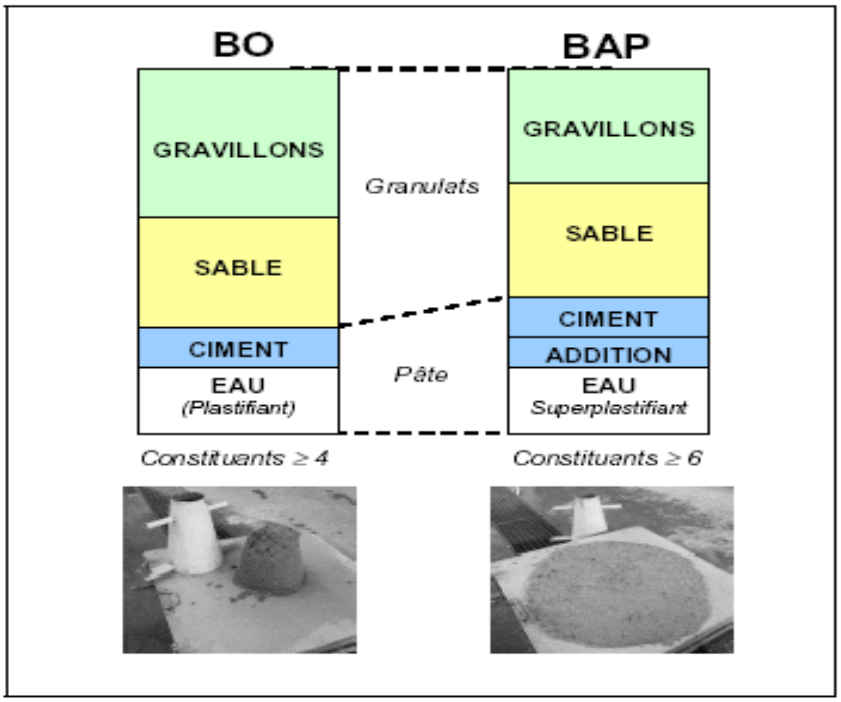


Fig 1.35. Composition d'un béton ordinaire (BO) et d'un BAP. Aspect à l'état frais d'un BO plastique Et d'un BAP [33]

1.6.4.1 Les granulats.

Les BAP sont réalisés avec des granulats roulés ou concassés, toutefois, comme pour un béton ordinaire, la forme des granulats a une influence sur le comportement rhéologique.

Le coefficient de frottement est plus faible entre les granulats roulés qu'entre les granulats concassés.

1.6.4.2 Le Ciments

Les BAP peuvent être réalisés avec la plupart des ciments. Cependant, compte tenu des exigences de démoulage aux jeunes âges, les BAP utilisés dans l'industrie du béton contiennent presque toujours du ciment CPA-CEM I 52.5 ou 42.5 [31].

1.6.4.3 Les ajouts minéraux

Les principaux ajouts minéraux utilisés dans la formulation du BAP sont :

***** La fumé de silice

*Cendres volantes

*Laitier des hauts fourneaux

1.6.4.4 Les adjuvants

L'ajout de superplastifiant et l'augmentation de son dosage apporte une meilleure dispersion des grains de ciment mais favorise également le ressuage. Le meilleur compromis est au point de saturation, où l'excès de conductance inter faciale est semblable avec et sans superplastifiant[40] .D'après des résultats antérieurs sur le même projet, à un E/C de 0,35, ces superplastifiants ont un effet bénéfique sur la zone de transition inter faciale. En conséquence, l'utilisation des superplastifiants comme réducteurs d'eau peuvent améliorer les propriétés mécaniques et la durabilité du béton.

1.6.4.5 L'eau de gâchage

L'eau utilisée ne doit pas présenter un excès d'impuretés [41] qui peuvent étériorer les propriétés des bétons (résistance, propriétés esthétiques, des armatures, etc.).

1.6.4.6 Les agents de viscosité

Généralement les superplastifiants diminuent la viscosité du béton, ce qui rend le matériau plus sensible vis-à-vis du phénomène de ségrégation. Les agents de viscosité ont, eux, la propriété essentielle de modifier le comportement rhéologique des milieux aqueux dans lesquels ils sont utilisés (ce rôle peut aller du simple épaississement jusqu'à la gélification) et peuvent être utilisés avec intérêt dans la composition des BAP.

1.6.5 Propriétés d'un BAP

1.6.5.1 Propriétés des BAP à l'état frais

Les propriétés générales d'un béton autoplaçant frais sont la fluidité et l'homogénéité. Les proprieties à l'état frais du BAP peuvent être définies par quatre caractéristiques: capacité de remplissage, La capacité de passage, Résistance à la ségrégation, viscosité apparent. [42].

- **Capacité de remplissage**

Capacité de remplissage, c'est-à-dire la capacité du BAP à s'écouler librement, par le seul effet de son poids propre, sans énergie de compactage, lorsqu'il n'est pas confiné par le coffrage et/ou le ferraillage. [42]

- **La capacité de passage**

Le béton autoplaçant doit réunir à la fois la fluidité (la capacité de remplissage) et la résistance à la ségrégation pour produire un bon écoulement sur un chantier. Cependant, le blocage des granulats est provoqué d'une part par la quantité importante de granulats dans le béton (plus de gravier, plus de risques de blocages), et d'autre part par la taille des plus gros granulats par rapport à l'ouverture entre armatures ou dans un confinement. Le mécanisme de blocage peut être illustré dans un plan par le schéma de la figure 1.5 qui montre un béton s'écoulant entre deux armatures avant et au moment du blocage [34].

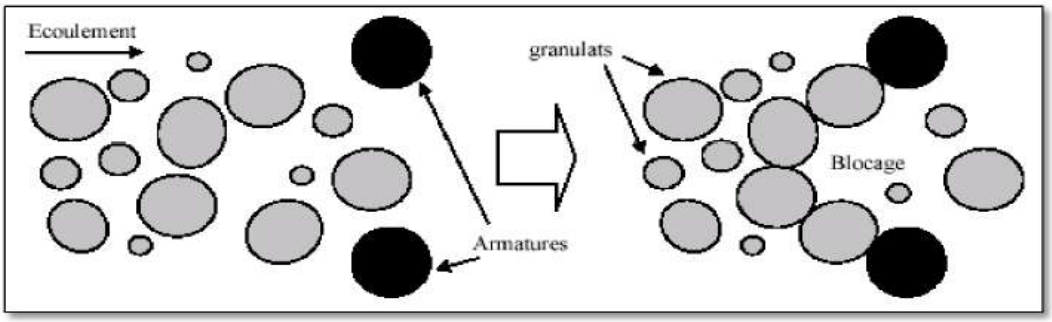


Fig 1.36. Représentation en plan d'un blocage de granulats à travers deux armatures [34].

- **Résistance à la ségrégation**

Résistance à la ségrégation : c'est-à-dire la stabilité d'un BAP vis-à-vis de la ségrégation des granulats. La résistance à la ségrégation devient un paramètre important dans le cas de BAP ayant une mobilité élevée et/ou une viscosité faible ou si les conditions de confinement peuvent entraîner de la ségrégation. [42]

- **viscosité apparente**

viscosité apparente: c'est-à-dire la résistance à l'écoulement, une fois que cet écoulement a commencé. Un BAP à viscosité élevée est plus 'collant', ce qui peut améliorer la résistance à

la ségrégation, mais également altérer les qualités de surface (bulles d'air), liées à la difficulté d'évacuer l'air présent [42]

1.6.5.2 Caractérisation des BAP à l'état frais

L'ouvrabilité d'un béton est sa capacité à être transporté, à être mis en place et à remplir les coffrages tout en restant homogène. C'est une propriété qui évolue dans le temps et qui dépend fortement du contexte de chantier (moyens de transport, moyen de mise en place,…). L'ouvrabilité du béton est caractérisée par la fluidité et l'homogénéité (stabilité) de ce dernier.

La fluidité et l'homogénéité peuvent être appréciées par différents essais suivant trois caractéristiques principales : le remplissage, la résistance à la ségrégation (stabilité) et la capacité de passage à travers les zones confinées (coffrage très ferraillé, droit d'un diaphragme, etc) [AFG, 08]. L'AFGC recommande les essais empiriques pour caractériser les BAP:

- mobilité en milieu non confiné (déterminée par l'essai d'étalement au cône d'Abrams)
- mobilité en milieu confiné (évaluée par l'essai d'écoulement à la boîte en L ou L - Box)
- stabilité (décrite par l'essai de stabilité au tamis)
- Essai de J-Ring
- -Essai de l'entonnoir en (V -funnel)

Les différents matériels et mode opératoire des différents essais sont présentés ci-dessous [43].

1.6.5.2.1 Essai d'étalement au cône d'Abrams

La simplicité de cet essai (facile à être mis en œuvre tant au laboratoire que sur chantier) fait de celui-ci un essai incontournable dans la caractérisation de la consistance des bétons Il permet de tester la capacité des BAP à se déformer uniquement sous le seul effet de leur poids et de s'étaler pour remplir un milieu non confiné par les mesures [43]:

- de la capacité de remplissage (taux de remplissage ou distance atteinte dans l'espace) donnée par le diamètre final atteint par la galette de béton.

- de la vitesse de remplissage donnée par l'inverse du temps (T500) de passage à un diamètre par exemple de 500 ± 1 mm. Le matériel et le protocole d'essai [AFG, 08] sont décrits comme suit :

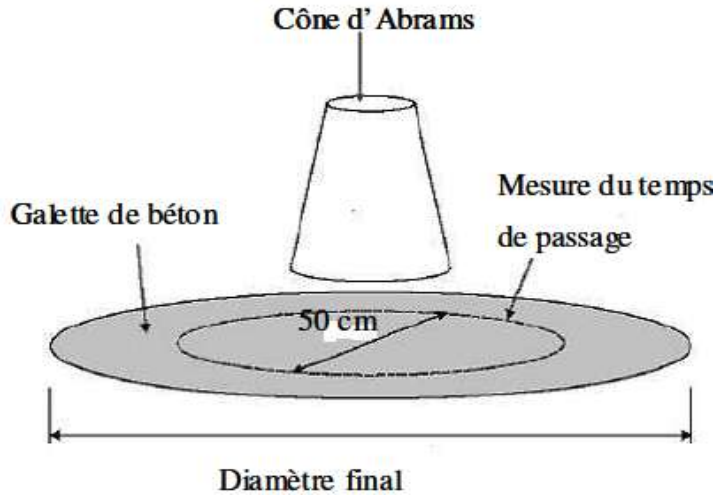


Fig.1.37. Essai d'étalement au cône d'Abrams [43]

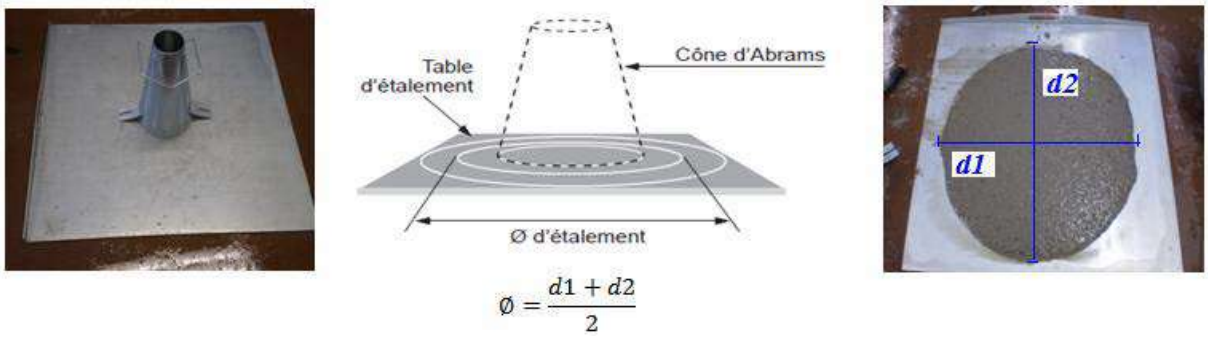


Fig. 1.38. Procédure d'essai d'étalement [43]

Cet essai permet aussi d'évaluer visuellement la tendance à la ségrégation du béton. Pour un béton homogène, les granulats sont repartis uniformément. La présence d'une ségrégation se traduit par l'apparition d'une couche de laitance à la périphérie ou par l'accumulation de graviers au centre de la galette.

Dans ce travail de recherche, l'étalement est fixé à 650 ± 10 mm quelles que soient la quantité d' agent de viscosité et la température du BAP[43].

1.6.5.2.2 Essai d'écoulement à la boîte en L ou L - Box

Cet essai permet de tester la capacité du béton à s'écouler dans un milieu confiné, de mesurer le taux de remplissage et le temps d'écoulement. Le matériel utilisé lors de ce test est une boîte en L et un ferraillage à deux ou trois armatures. L'essai consiste à laisser passer à travers l'espace entre les armatures le béton du compartiment vertical vers la partie horizontale.

Le rapport PA = H2/H1 traduit le taux de remplissage du béton. PA dépend de la catégorie de BAP mais en général, le taux de remplissage d'un BAP doit être supérieur ou égal à 0.8 [AFG, 08].

Un blocage ou une ségrégation dynamique se traduit par un amoncellement de granulats en amont du ferraillage et une valeur faible de PA.

Tous les BAP utilisés dans cette étude ont un taux de remplissage supérieur ou égal à 0.8 quels que soient le dosage en agent de viscosité et la température. [43].

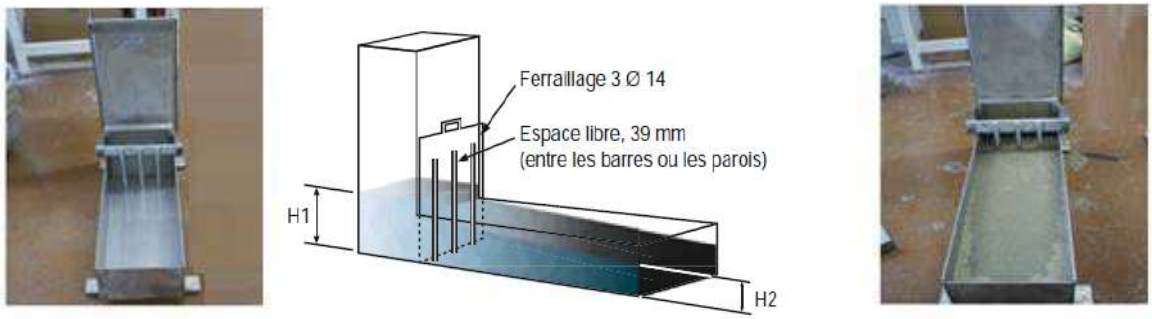


Fig.1.39. Essai de L-Box [43]

1.6.5.2.3 Essai de J-Ring

Cet essai a pour but de vérifier l'aptitude des BAP à s'écouler dans un milieu frottement ferraillé [43].

L'équipement nécessaire à la conduite de cet essai est le même que celui de l'essai d'étalement, en ajoutant un anneau équipé de barres en acier (Figure 1.40) [43].

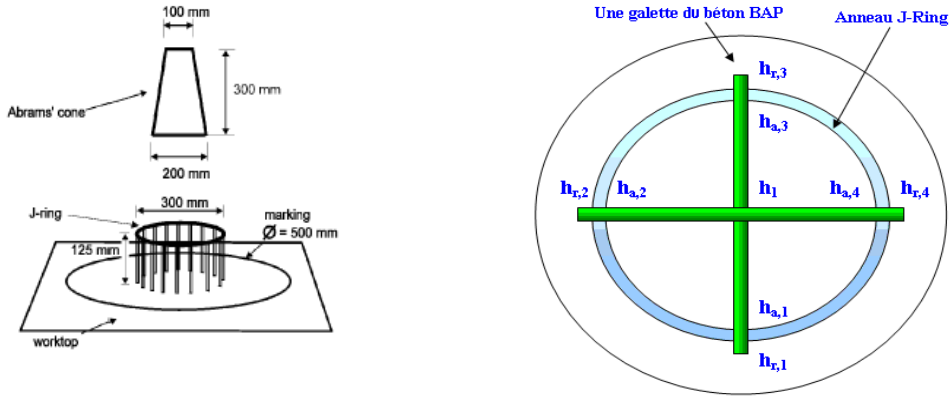


Fig.1.40. Essai de J-Ring [43]

1.6.5.2.4 Essai de stabilité au tamis

Cet essai vise à apprécier le risque de ségrégation statique des BAP. Il complète les essais permettant d'apprécier la mobilité en milieu confiné ou non (Figure 1.41) [43].

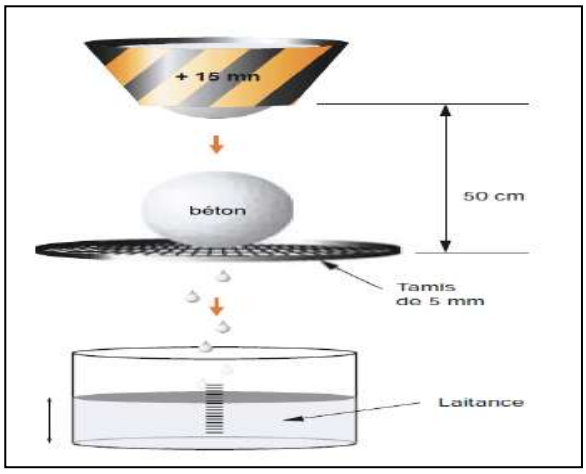


Fig.1.41. Essai de stabilité au tamis [43].

1.6.5.2.5 Essai de l'entonnoir en (V -funnel)

La norme NBN EN 12350-9 ''Essai d'écoulement à l'entonnoir en V'' (V-funnel) [43] décrit la méthode de détermination de la durée d'écoulement du BAP à travers l'ouverture d'un entonnoir en V (Figure1.42). 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 BAP. Si le béton a une faible résistance à la ségrégation statique, un blocage partiel des granulats pourra également être observé, ce qui constitue une différence par rapport à la mesure du t500 au cône d'Abrams. [42].

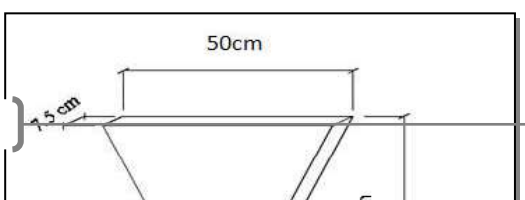




Fig. 1.42 Essai de l'entonnoir en (V -funnel) [44]

1.6.6 Propriétés du béton fluide (BAP) à l'état durci

- **Propriétés mécaniques**

De nombreux travaux ont montré que les déformations des bétons sont sensibles à la proportion de granulats qui entre dans leur composition [44]. Plus précisément, le béton peut être représenté comme une combinaison de deux phases : la pâte de ciment durcie, ou matrice, et les granulats. Les propriétés de ce mélange (module, retrait, fluage) dépendent alors des caractéristiques élastiques respectives de chaque phase, de leur proportion, de leur fluage et de leur retrait. **.**

- **Résistance mécanique**

Les résistances mécaniques d'un BAP sont, comme pour la plupart des bétons directement liées à la qualité du squelette granulaire et au rapport eau efficace sur ciment, elles dépendent aussi de la composition du liant. L'optimisation de ces paramètres permet d'obtenir une large gamme de résistances jusqu'à des BAP à hautes performances (80 à 100 MPa au 28ème jour).

L'utilisation de fillers dans une formulation de béton génère une accélération de sa résistance mécanique aux jeunes âges **.**Les particules fines du filler, lorsqu'elles sont bien défloculées par les superplastifiants, favorisent l'hydratation du ciment, principalement par un effet physique, et conduisent à une matrice cimentaire dont la structure est plus dense. Ces effets ont une influence sensible sur la résistance mécanique jusqu'à 28 jours puis deviennent moins significatifs par la suite. En fonction des propriétés pouzzolaniques des additions, les résistances mécaniques des BAP peuvent continuer à croître au-delà de 28 jours. Le dosage

plus ou moins important en adjuvants dans les formulations de BAP peut aussi avoir une influence sur l'évolution de la résistance mécanique du béton [42].

Ainsi, l'introduction d'un agent de viscosité peut diminuer sensiblement la résistance mécanique d'un BAP aux jeunes âges. De même, certains superplastifiants utilisés pour contrôler la fluidité des formulations ont pour effets secondaires de retarder le temps de prise et d'augmenter le développement de la résistance mécanique **.**Etant donné la défloculation du liant hydraulique qu'ils engendrent, leur dosage important dans les BAP conduit à considérer que ceux-ci sera plus résistant que des bétons vibrés supposés similaires au départ [44].

1.6.7 Formulations et Compositions des BAP

La formulation du BAP repose sur les mêmes bases technologiques que celles d'un béton vibré. Dans le cas du béton vibré, il s'agit de remplir les vides entre les granulats avec la pâte de ciment composée de ciment, d'additions et d'eau, afin d'obtenir un béton offrant les qualités requises (ouvrabilité et compacité). Par contre dans le cas du BAP, la pâte de ciment doit non seulement remplir les vides intergranulaires, mais il faut en plus prévoir un volume excédentaire d'environ 65 à 100 l/m^3. Dans le cas d'un mélange constitué exclusivement de granulats concassés, cette valeur peut même s'élever jusqu'à 100 à 120 l/m^3. Cet excédent constitue une condition indispensable aux propriétés de fluidité exceptionnelles des BAP.

Étant donné que le volume des vides du mélange varie en fonction de la nature et de la provenance des granulats, ceci peut entraîner des adaptations et modifications de la composition d'un BAP dans chaque cas particulier.

Les différentes propriétés des bétons autoplaçants (fluidité, viscosité, résistance à la ségrégation, aptitude au remplissage, etc.) rendent leur formulation relativement compliquée. Même si de nombreuses études ont été effectuées pour comprendre les principes qui régissent le comportement de ces bétons en milieux confinés, aucune méthodologie pratique de formulation ne semble avoir été établie, permettant à un chercheur ou à un ingénieur de fabriquer un béton autoplaçant à partir de données de base sur les matériaux locaux et un cahier de charges précis [45].

Réaliser un béton autoplaçant est une opération complexe qui nécessite de trouver une bonne combinaison de matériaux compatibles et le dosage convenable de chacun de ces constituants afin d'obtenir une formulation répondant aux propriétés des BAP.

Il est impossible de réaliser une formulation universelle de béton autoplaçant ; chaque chantier utilisant ses propres matériaux (matériaux locaux) doit mettre au point sa propre formulation.

De multiples approches se sont développées à travers le monde pour la formulation d'un béton autoplaçant. Nous rapportons un exposé général sur les approches principales et de ses quelques modifications [45].

❖ **Formulation OKAMURA ou "La Méthode Générale" (Japon)**

Considérée comme la méthode générale de formulation, la formulation OKAMURA a été développée à l'Université de Tokyo par Okamura, d'après Ozawa et al rapporté par [48].Cette méthode consiste d'abord à fixer le dosage de gravier dans le béton et celui du sable dans le mortier, ensuite de procéder à l'optimisation de la pâte de ciment afin de donner au béton résultant les meilleures performances. Le principe de cette méthode est le suivant:

- La teneur volumique G en gravillons du béton est fixée à 50% du volume du solide. Ce pourcentage permet d'éviter les risques de blocages, à condition que le mortier du béton réponde correctement aux critères d'ouvrabilité testés :

$$G = \frac{50}{100} G_{\lim}(1 - A) \qquad \text{(I.3)}$$

Où: A = quantité d'air choisie en fonction de la résistance au gel-dégel

G_{lim} = volume absolu d'un mètre cube de gros agrégats

- Le volume du sable est fixé à 40% du volume total de mortier:

$$S = \frac{40}{100} \frac{(1 - A - G)}{(1 - K_{sf})} \qquad \text{(I.4)}$$

Où: K_{sf} = taux de fines particules (<0.09 mm) dans le sable

- L'optimisation de la pâte s'effectue sur un mortier dont la teneur volumique en sable est égale à 40%
- L'eau, le superplastifiant et les fines sont ajustés pour les mortiers pour obtenir une viscosité suffisante (mesurée par le temps d'écoulement par l'entonnoir en V) et une fluidité importante (mesurée par l'étalement au cône).

Les auteurs définissent alors deux grandeurs : étalement relatif et vitesse relative d'écoulement.

La fluidité du mortier, donnée par :

$$\Gamma_m = \frac{\left(r_1 r_2 - r_0^2\right)}{r_0^2} \qquad (1.5)$$

Avec r_1 et r_2 les diamètres d'étalement selon deux médianes.

La viscosité du mortier, donnée par :

$$R_m = \frac{10}{t} \qquad (I.6)$$

Avec t le temps d'écoulement à l'entonnoir en V est exprimé en secondes

T_m Selon les auteurs, ces deux grandeurs représentent la fluidité (plus la valeur de est élevées, plus le mortier est fluide) et la viscosité du mortier (plus la valeur de R_m est faible, plus la viscosité est élevée). Le dosage du superplastifiant et le rapport E/C sont optimisés pour obtenir simultanément $T_m = 5$ et $R_m = 1 \pm 0{,}1$. Le béton obtenu est testé pour vérifier les propriétés d'ouvrabilité, et le dosage du superplastifiant peut être réajusté si nécessaire pour obtenir un béton autoplaçant satisfaisant

- **Formulations modifiées de la méthode générale**

La méthode générale n'est pas adaptée pour formuler des bétons avec des agents de viscosité, pourtant elle conduit à la formulation de bétons très visqueux [47]. De ce fait, plusieurs modifications et différents développements sont apportés à cette méthode. Les modifications ont touché surtout les dosages en gravier et en sable.

- **Kochi University of Technology (Japon)**

Edamatsu et al [47] ont réussi grâce à l'utilisation d'additions minérales (fillers calcaire, cendres volantes, laitiers de hauts fourneaux) d'augmenter le dosage de sable dans le mortier à plus que 40% et à réduire donc le volume de

Pâte,et particulièrement du ciment dans le béton

- **University of Tokyo (Japon)**

Ouchi et al rapporté par [46] ont proposé une méthode plus rationnelle pour déterminer une combinaison satisfaisante du rapport eau/poudre et du dosage en superplastifiant que celle utilisée dans la méthode générale. Chaque paramètre est déterminé indépendamment, afin de minimiser le nombre de tests demandés. Ces tests ont montré que la relation entre l'étalement relatif G_m et la vitesse relative d'écoulement R_m est linéaire pour n'importe quelle valeur du dosage du superplastifiant (rapport Sp/P en masse) et pour n'importe quel rapport eau sur poudre (E/P en volume), et á la forme :

$$R_m = A \cdot \Gamma_m^{0,4} \qquad \text{(I.7)}$$

- **Delft University (Denmark)**

Travaillant avec des matériaux locaux, Pelova et al rapporté par [46], ont trouvé qu'il est possible d'augmenter le volume de gravier dans le béton à la hauteur de 60% du volume solide total, tout en limitant la dimension maximale des granulats D_{max} à 16 mm, et obtenir un béton autoplaçant. Le volume total de pâte est réduit de 10% par rapport à celui obtenu avec la méthode générale.

- **Méthode de Domone (U.C.L. Grande Bretagne)**

Selon [46] Domone a proposé les modifications suivantes, sans utilisation d'agent de viscosité:

- Augmenter le volume du sable dans le mortier
- Introduire des ajouts minéraux dans la pâte de ciment
- Obtenir le rapport maximum eau/poudre, en utilisant le test d'étalement au cône sur mortier, de manière à assurer la résistance à la ségrégation.
- Déterminer le dosage en superplastifiant de la même manière que la méthode générale.
- Tester le mélange de béton à :
- L'étalement : jusqu'à obtenir des valeurs entre 650 et 700 mm.

1.7. Valorisation des déchets de tuile dans les matériaux à base cimentaire

1.7.1 Introduction

Depuis ces vingt dernières années, les déchets en matières plastiques représentent une part importante des déchets solides municipaux. De plus, ils posent un sérieux problème à cause de leur durée de vie et parce que ce sont des déchets voyants. Leur gestion est donc nécessaire

que ce soit d'un point de vue environnemental, économique ou social. Les premiers procédés mis en place pour les traiter furent l'enfouissement et l'incinération

1.7.1.1 Effet de déchets de tuile sur les propriétés à l'état frais

- **L'ouvrabilité**

Daniyal et al [48] ont étudié l'influence de déchets de tuile (0%,10%,20%,30% ,40%, et 50%) sur l'ouvrabilité du béton ordinaire. Ils ont trouvé que l'ouvrabilité est diminue en fonction d'augmentation de pourcentage de déchets de tuile.

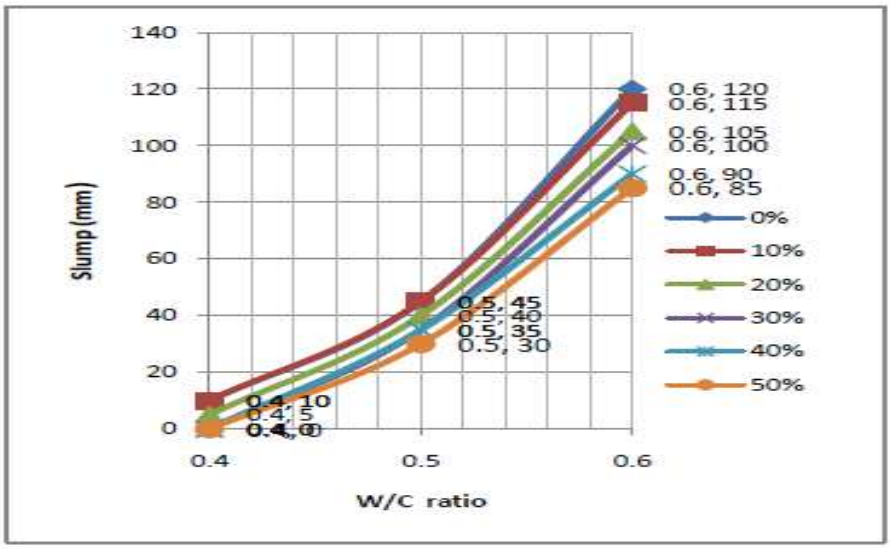


Fig.1.43. L'ouvrabilité en fonction de déchets de tuile [48]

- **La densité**

Daniyal et al [48] ont constaté dans son étude de l'influence de déchets de tuile sur les propriétés physiques du béton ordinaire, que la densité est diminuée en fonction d'augmentation de pourcentage de déchets de tuile (Fig.1.44.)

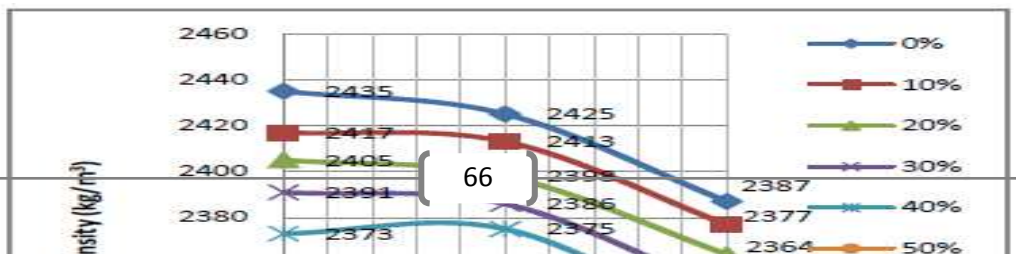


Fig.1.44. La densité en fonction de déchets de tuile [48]

- **la résistance à la compression**

Md Daniyal et al [48] ont étudié l'influence de déchets de tuile (0%,10%,20%,30% ,40%, et 50%) sur la résistance à la compression du béton ordinaire. Ils ont conclue que la résistance à la compression du béton est améliorée en fonction de substituions de 10jusqu'à 40% de granulats naturel par les déchets de tuile.

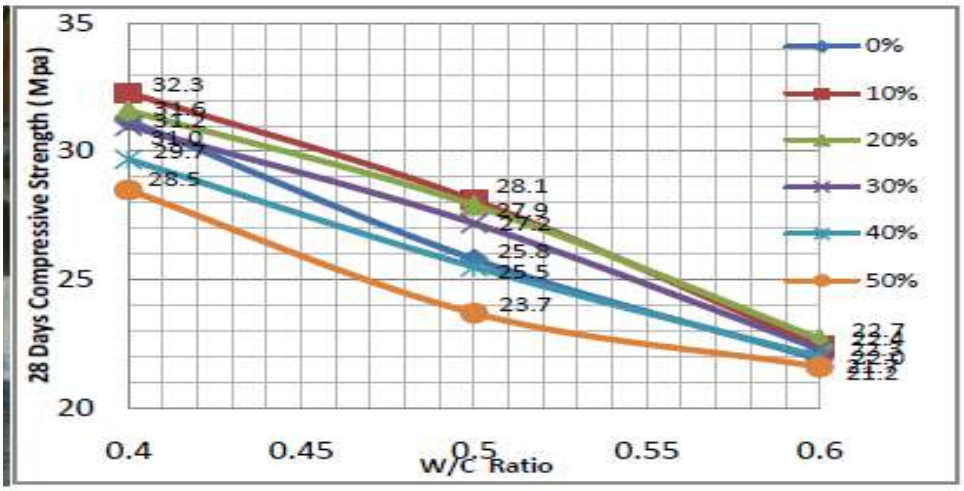


Fig.1.45. La résistance à la compression en fonction de déchets de tuile [48]

Hemanth Kumar Ch1et al [49] ont aussi trouvé que la résistance à la compression du béton ordinaire est améliorés pour une substitution 10% du sable naturel par les déchets de tuile.



Fig.1.46. Variation de la résistance à la compression en fonction de déchets de tuile [49]

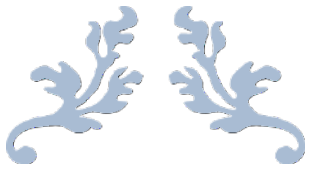
1.8 Conclusion

Les déchets constituent un réel problème, inhérent à toute vie biologique et à toute activité industrielle, agricole ou urbaine, et à ce titre, la recherche de solutions est une vraie nécessité pour les collectivités. Le déchet est par définition «matière» et à ce titre la biophysicochimie, la mécanique et la thermique sont au premier chef sollicitées pour le traiter. Cette matière n'est pas banale.

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 Déchet de tuile (définition, origine, composition, propriétés, utilisation), puis on a terminé ce chapitre par le béton de sable et le béton de sable autoplaçant (définition, composition, utilisation, formulation).

CHAPITRE 2

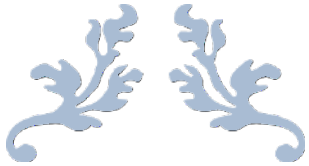


ÉTUDE EXPÉRIMENTALE





CHAPITRE 3



RESULTATS ET INTERPRETATIONS





3.1 Introduction

L'objet de ce chapitre est l'analyse et l'interprétation des résultats obtenus pour les différents essais réalisés. Nous nous intéresserons à l'étude des résultats des essais effectués sur le BSAP après avoir fixé tous les paramètres avec pour seule variable le pourcentage de déchet de céramique (faïence), nous étudierons ensuite l'effet de ces déchets sur le comportement des BSAP à l'état frais et à l'état durci.

3.2 Caractéristiques du BSAP à l'état frais

3.2.1 Etalement

L'étalement des différents bétons de sable à base de tuile autoplaçon obtenus est représenté dans la figure 3.1 ci-dessous :

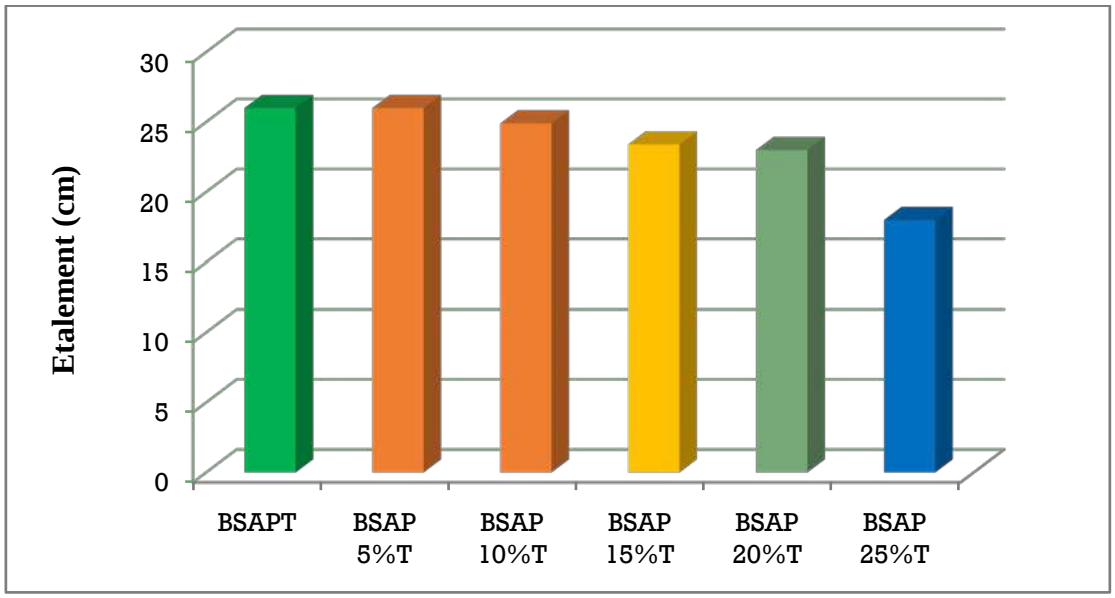


Fig.3.1. Etalement des BSAP à base de déchets de tuile

D'après les figures ci-dessus, on remarque que l'étalement de bétons de sable autoplaçon varie en fonction du pourcentage de substitution du sable par le déchet de tuile. On constate aussi que plus le pourcentage de déchets de tuile augmente, plus l'étalement ne diminue. Cela est due peut à l'absorption de déchets incorporé, ce qui confirme les résultats trouvés par plusieurs chercheurs [50].

Pour ce qui s'en suit, et pouvoir comparer les résultats obtenus à l'état durci, on a varié la quantité d'adjuvant pour obtenir un étalement constant (étalement entre 26 (s) et 27.3 (s) est visé) comme indiquent la figure suivante :

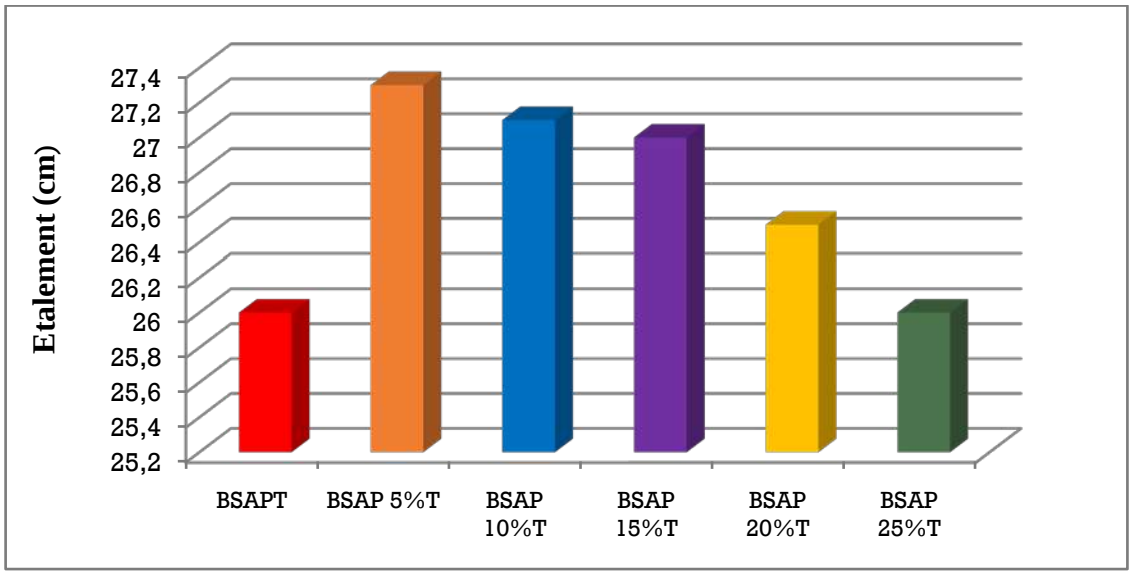


Fig.3.2. Etalement des BSAP à base de déchets de tuile

3.2.2 V-fanal

La mesure du temps de d'écoulement de différents BSAP à base de déchets de tuile obtenus est représentée dans la figure ci-dessous :

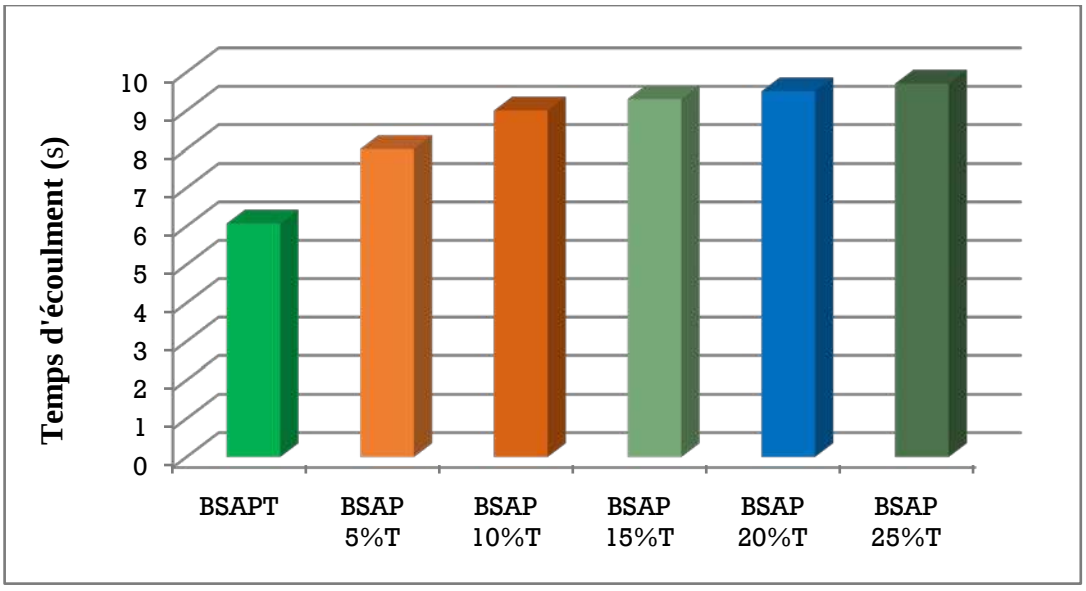


Fig.3.3. temps d'écoulement des BSAP à base de déchets de tuile

De la même façon que l'étalement, les résultats d'essais V-funnel montrent que le temps d'écoulement augmente en fonction d'augmentation de déchets de tuile. Cette augmentation est liée à la forme anguleuse de graine de tuile incorporé qui joue un rôle d'obstacle. Ce résultat confirme les résultats de plusieurs chercheurs dans le domaine **[**50**].**

3.2.3 Densité

La densité des différents bétons de sable autoplaçon à base de tuile obtenus est représentée dans la figure 3.1 ci-dessous :

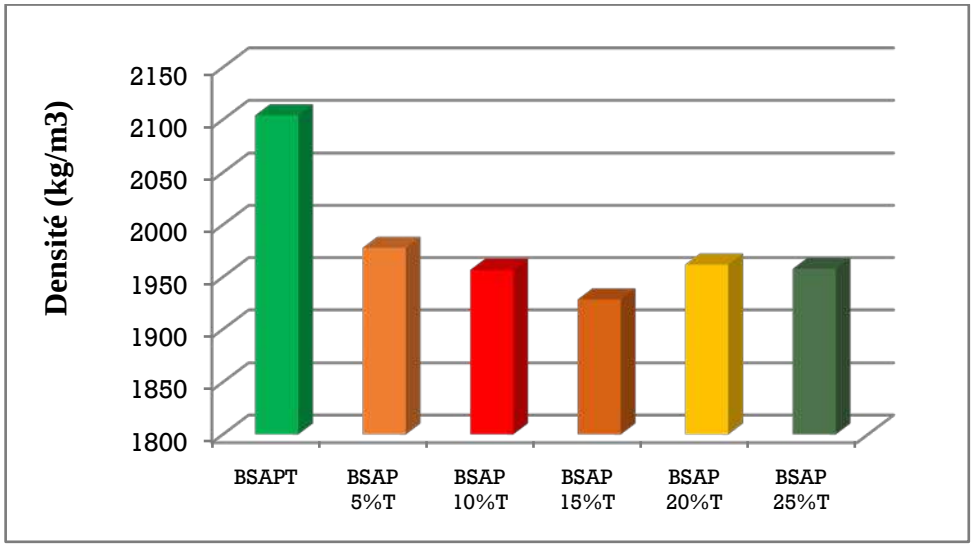


Fig.3.4. Densité des BSAP à base de déchets de tuile

D'après la figure précédente on remarque que la densité de béton de sable autoplaçant à base de déchets de tuile est diminué en fonction d'augmentation de pourcentage de déchets de tuile .Cette diminution est lié probablement à la porosité induite par la forme de grain de tuile incorporés à la masse du béton ce qui confirme les résultats trouvés par Daniyal et al [50].

3.2.4 L'air Occlus

Dans cet essai, l'air occlus est mesuré (en pourcentage) pour chaque gâché du béton de sable autoplaçant et les résultats obtenus sont résumés dans la figure suivante :

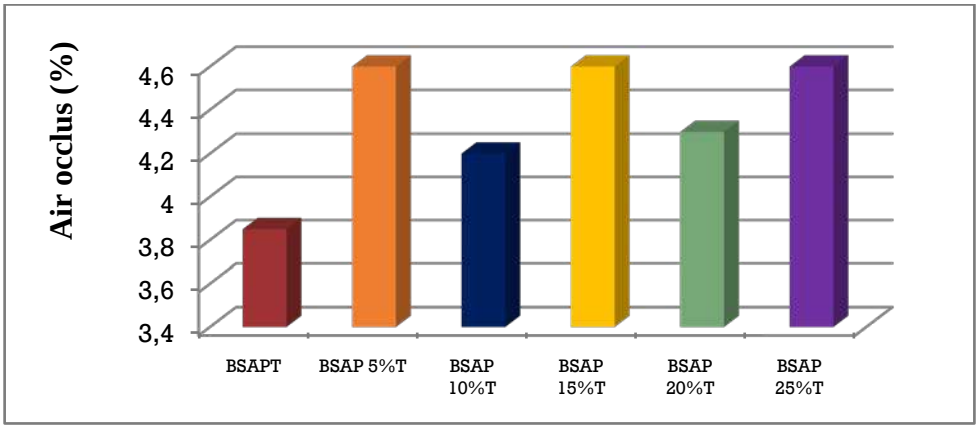


Fig.3.5. Air Occlus des BSAP à base de déchets de tuile

D'après les résultats obtenus, on remarque que l'incorporation de déchets de tuile à la masse de différents types de béton de sable autoplaçant cause plus d'air occlus par rapport au béton de sable autoplaçant témoin. Cette augmentation est liée probablement au volume de vide induit par la forme de déchets de tuile incorporés à la masse du béton. Cela explique que ces types de bétons sont moins compactes et par conséquence plus poreux. Ce qui confirme les résultats de Plusieurs chercheurs **[**50,51**].**

3.3 Caractéristiques du BSAP à l'état durci

De la même façon que le béton de sable frais, les résultats des différents essais réalisés sur les bétons de sable autoplaçant durcis sont résumés ci-dessous :

3.3.1. Résistances à la compression

Pour chaque essai, les résultats sont la moyenne de trois (03) mesures prises sur des éprouvettes de 4x4x16cm^3 à l'âge de 3,7 et 28 jours. Les résultats obtenus sont illustrés dans la figure suivante :

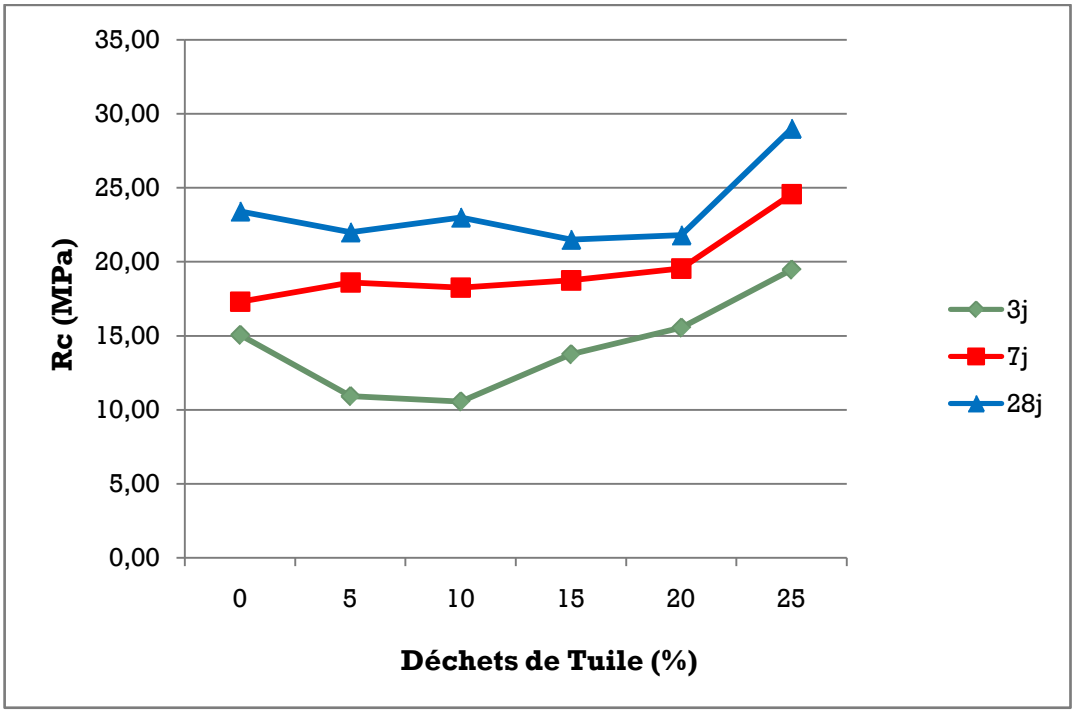


Fig.3.6 Résistance à la compression des BSAP à base de déchets de tuile

Les résultats obtenus montrent que la résistance à la compression des différents bétons de sable autoplaçant augmente en fonction de l'âge et suit la même cinétique que celle du béton de sable autoplaçant de référence. La figure ci-dessus montre que la résistance à la compression argumente et passe par un optimum de 25% pour une substitution de 25% du

sable par les déchets de tuile. Cette augmentation peut s'expliquer par la combinaison entre le sable et le grain de tuile qui a mène à l'augmentation de la résistance .Au delà de 25% la résistance commence à diminué Ce qui en concordance avec les résultats de Daniyal et al [50], Hemanth Kumar Ch1et al [51].

3.4 Approche de durabilité

3.4.1 Absorption capillaire

Les résultats d'absorption d'eau par capillarité des différents bétons de sable autoplaçant réalisés sont illustrés dans les figures 5.41 – 5.44 suivantes :

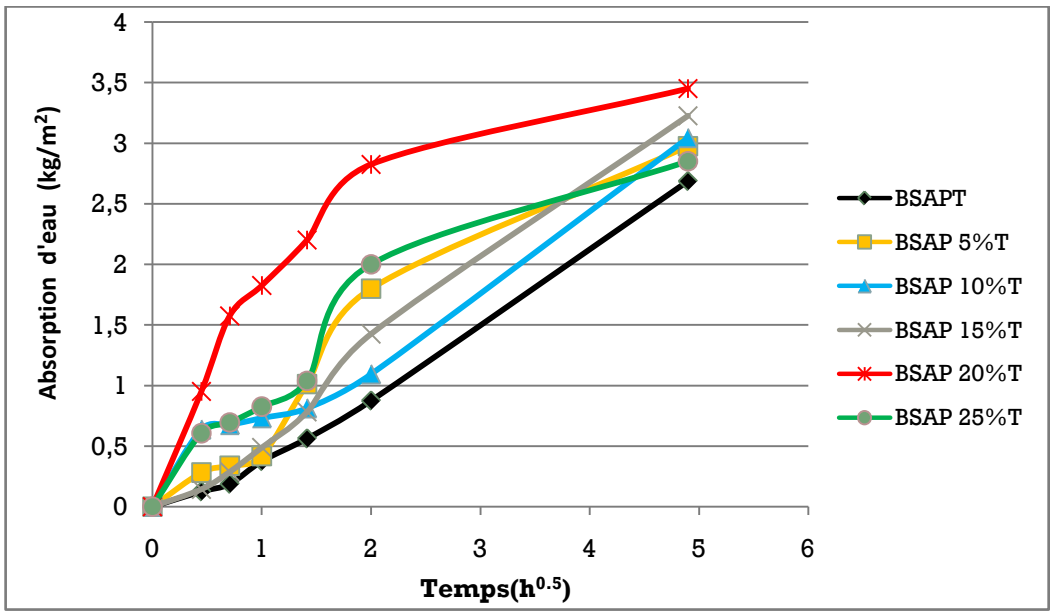


Fig.3.7 Absorption capillaire des BSAP à base de déchets de tuile

A partir les résultats précédents on constate que l'absorption de tous les bétons de sable autoplaçant à base de déchets de tuile est nettement plus importante que celle du béton autoplaçant de référence. Cette augmentation est liée à la fois à l'incorporation de déchets de tuile dans la masse du béton, qui se traduit par une augmentation plus ou moins prononcée du volume de vides, associée à une diminution de la compacité du matériau, ainsi que et à l'absorption de déchets de tuile incorporé. Hemanth Kumar Ch1et al [51] ont trouvé une

faible capacité d'absorption d'eau pour les bétons avec ajout de poudre de céramique comparée au béton de contrôle. Ceci est un indice d'une compacité accrue de ces bétons.

3.4.2 Retrait

Le retrait des différents bétons de sable autoplaçant obtenus est représenté dans la figure 3.1 ci-dessous :

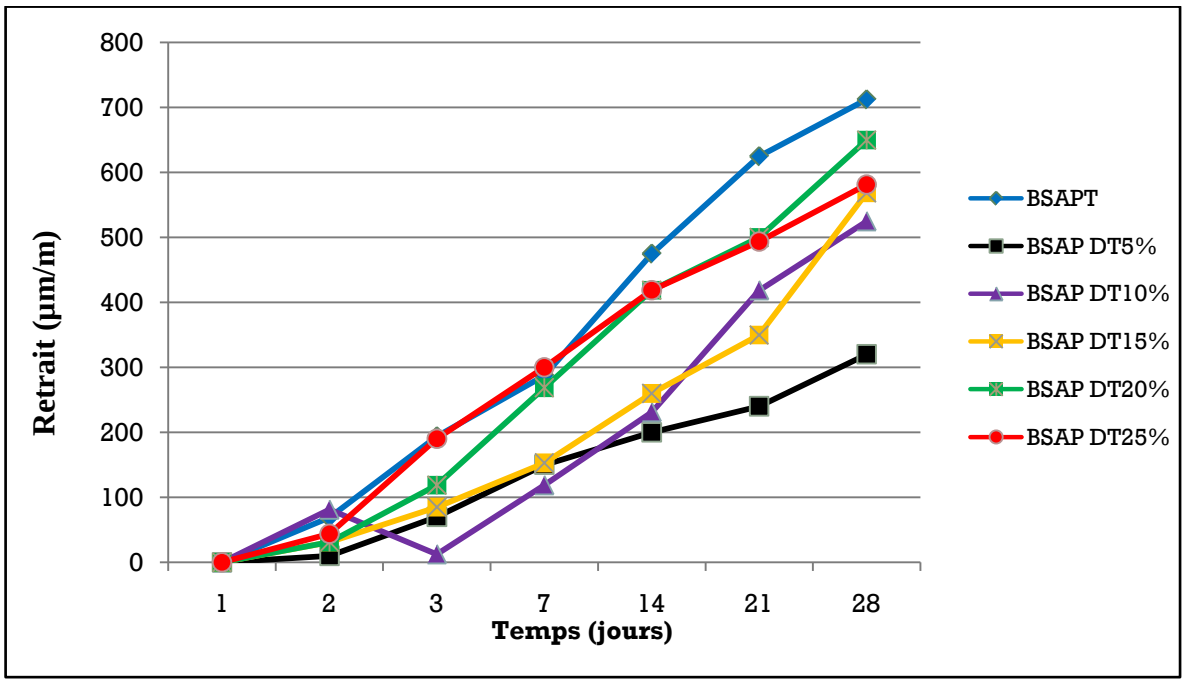


Fig. 3.8 Retrait des BSAP à base de déchets de tuile

Nous pouvons remarquer clairement que le retrait de béton de sable autoplaçant à base de déchets de tuile est nettement moins important que celui du béton de sable autoplaçant de référence. Cependant ces valeurs du retrait sont acceptables pour divers usages de béton structural.

3.4.3 Gonflement

Le retrait des différents bétons de sable autoplaçant obtenus est représenté dans la figure 3.1 ci-dessous :

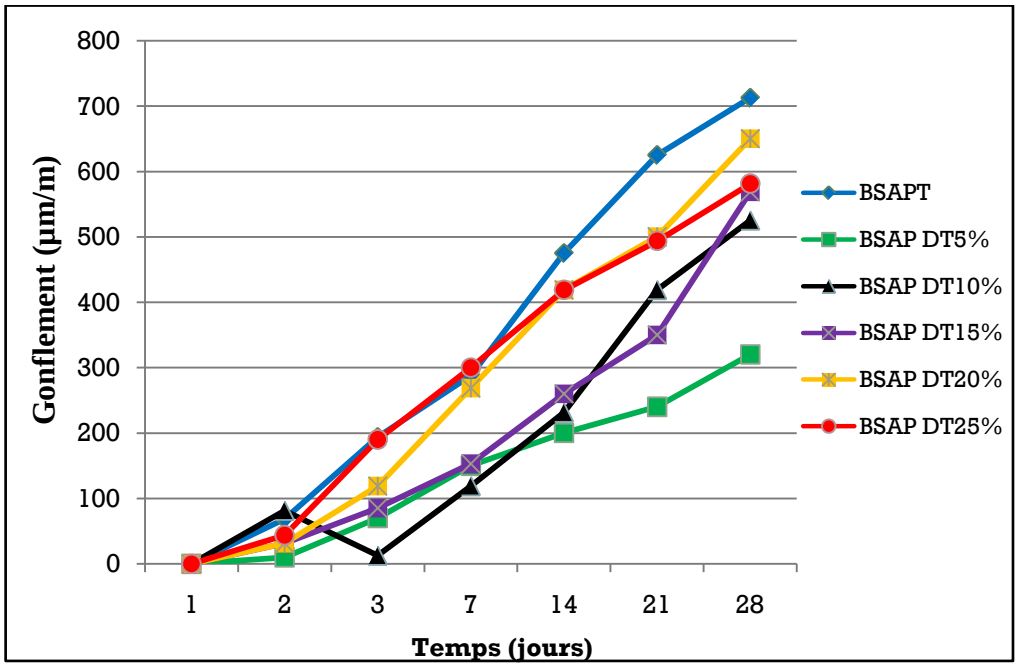


Fig.3.9 Gonflement des BSAP à base de déchets de tuile

D'après les figures ci-dessus, on remarque les valeurs du gonflement varient d'un béton à un autre selon le pourcentage de déchets de tuile incorporés. On remarque aussi que le taux de gonflement de béton de sable autoplaçant à base de déchets de tuile est moins important que celle du BSAP témoin. Ce changement est lié à la porosité discontinue ainsi que à l'absorption de chaque type de béton.

3.5 Conclusion

L'analyse des résultats expérimentaux peut mener aux quelques conclusions suivantes:

- L'étalement de BSAP est diminué en fonction d'augmentation de déchets de tuile.
- Le temps d'écoulement augmente avec l'augmentation de pourcentage de déchets de tuile.
- La densité de tous les BSAP est diminuée avec l'augmentation de pourcentage de déchets de tuile.
- L'air occlus des différents BSAP augmente en fonction d'augmentation de déchets de tuile.
- la résistance à la compression augmente en fonction de substitution de 25% du sable par le déchet de tuile.
- L'absorption capillaire initiale de tous les BSAP à base de déchets de tuile est plus importante que celle de BSAP témoin.
- Tous les BSAP à base de déchets de tuile présentent un retrait moins important par rapport au BSAP témoin .Cependant, le taux de gonflement de BSAP à base de déchets de tuile est aussi moins important que celle du BSAP de référence.

CONCLUSIONS GENERALES ET RECOMMENDATION

Conclusions générales

L'analyse des résultats expérimentaux peut mener aux quelques conclusions suivantes:

- L'étalement des BSAP diminue et le temps de passage augmente en fonction d'augmentation de déchets de tuile.
- La substitution du sable par les déchets de tuile influe négativement sur la densité du béton de sable autoplaçant.
- L'air occlus des BSAP augmente en fonction d'augmentation de déchets de tuile.
- La résistance à la compression argumente en fonction de substitution de 25% du sable par le déchet de tuile.
- L'absorption capillaire de BSAP augmente en fonction de substitution du sable par les déchets de tuile.
- Les BSAP à base de déchets de tuile présentent un retrait et un gonflement moins important par rapport au BSAP témoin.

Sur la base des résultats obtenus, on peut conclure que l'utilisation des déchets de marbre et de verre constitue une alternatif économique, environnementale et technologique très importante pour le pays. L'utilisation de ces types de béton (BSAP à base de déchets de tuile) est conseillé pour les différent voie de construction (béton structurel, dallage, route, chaussé, réparation, ouvrage d'art…..)

Recommandations

Nous recommandons ce qui suit :

- Etude de la rhéologie du béton de sable autoplaçant à base de déchets de tuile

-Valorisation de déchets de tuile dans le béton de sable de dune autoplaçant.

- Etude de l'effet du mode et du retard de la cure sur les différentes caractéristiques des BSAP à base de déchets de tuile.

- Etude du pompage de BSAP à base de déchets de tuile.

-Influence d'autres types de déchets de construction sur le comportement de BSAP.

-Influence de fibres (métallique, végétale, de verre, de carbone,….) sur le béton de sable autoplaçant .

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

[1] PIMIENTA. P & REMOND. ‘‘Bétons de déchets : prévenir les risques’’, CSTB magazine, n° 109, novembre 1997, pp. 28-30.

[2] Boutemeur et al, 2002 Référence.

[3] Debieb F. Performances et durabilité du béton à base de granulats recyclés contaminés par les chlorures et sulfates. Thèse PhD, Departement génie civil, Université Houari Boumediene Algies ; 2007.

[4] Courard L., ‘*Valorisation des déchets et sous-produits dans le génie civil*’, Notes de cours (Université de Liège, Faculté des Sciences Appliquées, Service des Matériaux de Construction, 1998), 195 p.

[5]Politique de gestion de déchets en Algérie : http://maghrebemergent.info/politiques-publiques/algerie/l-algerie-veut-recycler-40-de-ses-dechets-en-2016.html

[6] Caractérisation de la longévité des briques brutes et très bien écrasées réutilisées d'employer de bétons et des agrégats, des matériaux et du RILEM concrets (2011). http : //www.rilem.net/ms.php

[7] Propriétés mécaniques et de longévité des agrégats réutilisés souillés employant béton.Ciment et composé concret, 32(2010) 421-426.Elsevier, la science directe.

[8] Quebaud M., ‘Caractérisation des granulats recyclés - Etude de la composition et du comportement de bétons incluant ces granulats’, Thèse de doctorat, Université d’Artois, France, décembre 1996.

[9] Djouhri Mohamed, mémoire Présenté en vue de l'obtention du diplôme de magister Filière : aménagement hydraulique et génie civil, thème : Confection d’une brique à base de sable de dunes, pp83, 2007.

[10] M. Kornmann et CTTB, *Matériaux de construction en terre cuite, fabrication et propriétés*, Édit. Septima, Paris (2005), (ISBN 978-2904845321).

[11] Desert-Map, 2012 Carte des déserts du monde, téléchargeable du site Internet: http://fr.mapsofworld.com/world-desert-map.htm#

[12] SABLOCRETE, (1994) « Béton de sable », Presse de l'école nationale des ponts et chaussées, Paris, France.

[13]Sandrine Catinard, « Durabilité à long terme de matériaux cimentaires, avec ou sans fillers calcaire en contact avec des solutions salines ».Thèse (P.H.D), Université LAVAL (Québec) CANADA (2000).

[14]Yanéric Roussel, « Béton autoplaçant avec fibres comme matériau de réparation du béton » Mémoire de maîtrise ès science appliquées, Université Sherbrooke (Québec) CANADA (2000).

[15] Mélanie SHINK, « Fissuration des matériaux cimentaires renforcés de microfibres d'aciers » Mémoire de maîtrise ès sciences appliquées, Université LAVAL CANADA (2000).

[16] boukerrou mohamed, mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de magister en genie civil, étude des propriétés rhéologiques et physico-mécaniques du béton de sable avec référence particulière au sable de dune, pp123, 2012.

[17] RAKOTONIAINA Volasolo, Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplome d'etudes approfondies (d.e.a), contribution a l'étude du béton de sable –applications), pp83, 2006.

[18] ndiaye massamba diene el hadji, senegal ,Juillet 1993.

[19] Bédérina M., Khenfer M. M., Dheilly R. M. and Quéneudec M. "Reuse of local sand: effect of limestone filler proportion on the rheological and mechanical properties of different sand concretes", Cement and Concrete Research, 35 (2005): 1172-1179.

[20] M .BEDERINA; « Caractérisation Mécanique et Microstructure des bétons de sables locaux : Effet des fillers et de la nature des sables sur le comportement mécanique du matériau » ; Thèse de Magister. CU de LAGHOUAT 2000, Encadré par Dr KHENFER.Med.

[21] Rapport de Laboratoire Central des Ponts et Chaussés. "Les pieux forés : recueil des règles de l'art", Décembre 1979.

[22] Coquillat G., "Béton de sable à haute performance", Centre Expérimental de Recherches et d'Etudes du BTP (CEBTP), Rapport de recherche. Bordeaux, Juin 1992.

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

[24] CHAUVIN, J.J. « Béton de sable en Union Soviétique », Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées (LCPC), n°174, juill. - août 1991.

[25] Baron J. et Ollivier J.P., *« Les bétons – Bases et données pour leur formulation »* Editions Eyrolles, 1996, 243 p.

[26] Okamura H. and Ouchi M. « Self-compacting concrete » Journal of advanced Concrete Technology, 2003, vol 1, n°1, pp. 5-15.

[27] Okamura. H, and M. Ouchi, «S*elf Compacting Concrete: Development,present use and future*», In self compacting concrete: Proceedings of the first international RILEM symposium, A. Skrendahl, and O. Petersson, Eds. RILEM Publications, Cachan, France, 1999.

[28] Walraven *« Structural aspect of self-compacting concrete »* proceedings of the third international RILEM conference on SCC, août 2003, Reykjavik, Islande, pp. 15-22.

[29] Association française de Génie Civil (AFGC) *« Bétons Auto-Plaçants Recommandations provisionne »* juillet 2002, 63 pages.

[30] Billberg P. *« Form Pressure generated by self-compacting concrete »* Proceedings of the third international RILEM conference on SCC, août 2003, Reykjavik, Islande, pp. 271-280.

[31] ZAHOUANI Hassan etTOUAITI Abdelaziz , En vue de l'obtention du diplôme de master en génie civil, (*elaboration d'un beton autoplacant a base du laitier de haut fourneau)* , universite kasdi merbah OUARGLA , 2011

[32] H. Okamura, K. Ozawa and M. Ouchi. *«Self-compacting concrete»*. Structural Concrete, 17, March 2000.

[33] RAHIM HAMZA ET BELLAL AHMED (*L'effet de la nature et dimensions des granulats surl'ouvrabilité et les résistances mécaniques d'un béton Autoplçant)* 2012 .
[34] chekhtouhami mohamed amine, *projet de fin d'etude Pour l'obtention du diplôme de master en Génie Civil,*(*etude de l'influence des différents superplastifiants sur les propriétés rhéologiques et mécaniques d'un béton fluide (autoplaçant)*), *2012* .

[35] C. Ozyildrim, D.S. Lane, « *Investigation of Self Compacting Concrete* », Virginia Transportation Research Council, 2003.

[36] Maher EL BARRAK « *contribution à l'étude de l'aptitude a l'écoulement des bétons autoplaçant à l'état frais »*.

[37] Ozawa. K, et. al. «*Development of high performance concrete based on the durability design of concrete structures*», Proceedings of the second East- Asia and Pacific Conference on Structural Engineering and Construction (EASEC), Vol.1, pp 445-450, January, 1989.

[38] G.Dreux, J.Festa, «*Nouveau Guide du Béton et Ses Constituants* », 8ème Edition, Edition Eyrolles.1998.

[39] J-C.BRAQUENIER et J.DESNYTER, *le béton autoplaçant ou autocompactant*, 2000.

[40] Flatt R.J. *« Polymeric dispersants in concrete in Polymers in particulatesystems - Properties and applications »* Marcel Dekker, Inc., 2002, 249 pages.

[41] NF EN 1008 *« Eau de gâchage pour bétons – Spécifications d'échantillonnage, d'essais et d'évaluation de l'aptitude à l'emploi, y compris les eaux des processus de l'industrie du béton, telle que l'eau de gâchage pour béton (indice de classement : P18-211) »*, Juillet 2003.

[42] *V. Dieryck, ir., chef adjoint du laboratoire Technologie du béton,* (Prescrire un béton autoplaçant) *Cet article a été rédigé dans le cadre de la Guidance technologique NeoCrete 'Nouveaux bétons spéciaux' subsidiée par la Région wallonne.*

[43] Benjamin H-M(*Influence de la température sur la thixotropie des bétons autoplaçants)*
[44] thèse BELARIBI OMAR *« Durabilité des bétons autoplaçants à base de VASE ET DE pouzzolane»* ,2015.

[45].thèse Mohammed Rissel KHELIFA (effet de l'attaque sulfatique externe sur la durabilité des bétons autoplacants).

[46] Sedran T., "Les bétons autonivelants - Synthèse bibliographique", Bulletin liaison des laboratoires des ponts et chaussées N°169, mars-av 1995, pp. 53-60.

[47] Turcry P. et Loukili A. "Différentes approches pour la formulation des bétons autoplaçants: incidence sur les caractéristiques rhéologiques" Forum des associations AFGC/AUGC/IREX : innovation et développement en génie civil et urbain - nouveaux bétons, Toulouse, 30-31 mai 2002.

[48] Md Daniyal, Shakeel Ahmad, Application of Waste Ceramic Tile Aggregates in Concrete, International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology, Vol. 4, Issue 12, December 2015.

[49] Hemanth Kumar Ch1,Ananda Ramakrishna K2, Sateesh Babu K3, Guravaiah T4, Naveen N5, Jani Sk6, Effect of Waste Ceramic Tiles in Partial Replacement of Coarse and Fine Aggregate of Concrete, *International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology Vol. 2, Issue 6, June 2015.*

[50] NF 15-301, Normes Européenne : « Ciments courants »,1994

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

[52]CEN EN 196-1, Normes AFNOR : « *Méthodes d'essais des ciments – Partie 1 : détermination des résistances mécaniques (indice de classement P15- 471)* », Aout 1995.

[53] Norme Francaise, NF P 18-412 « *Béton : Caractéristiques communes des machines hydrauliques pour essais de compression, flexion et traction des matériaux durs*», Norme enregistrée, Déc. 1981.

[54] NBN NE 13057, Normes Belge, « *Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton-Méthodes d'essai-détermination de l'absorption capillaire*», Octobre 1997, Mai 2002.

[55] DUPAIN.R et all, « Granulats, sols, ciment et béton : Caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire » ,2eme édition CASTEILLA, Paris ,2000.

[57] [NF P 18-404], Normes AFNOR : « *Essais pour béton durci - Partie 1 : Forme, dimensions et autres exigences relatives aux éprouvettes et aux moules* », 1989.

[58] [NF EN 12350-9] a présente norme européenne spécifie la méthode de détermination de l'étalement pour le béton autoplaçant

ANNEXES