République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique
Universitaire Yahia FARES de Médéa
Faculté De Technologie
Département de Génie Civil

Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme de Master en Génie Civil

Option : Matériaux en génie civil

Thème :

Valorisation des déchets de coquillage dans le béton de sable fluide

Etudié par :

BADAOUI Ahmed

KEFFAZ Hicham

Encadré par :

Dr .GUENDOUZ Mohamed

Dr .BOUKHELKHEL Djamila

Promotion Juin 2020

Remerciements

Tout d'abord, Nous tiens à remercier ALLAh de m'avoir donné la force et le courage de mener à bien ce modeste travail.

Ce n'est pas qu'il est difficile de remercier tous ceux qui ont participé de prés ou de loin à ce travail, mais il faut avouer que les formules sont nombreuses et que le choix des bons mots a été toujours difficile. Entre vifs, sincères, profonds et nous passons les obscures subtilités de la langue française, le choix de la formule de remerciements est difficile. Nous tiens à remercier :

Nos encadreurs Dr. GUENDOUZ Mohamed et M^{elle} .BOUKHELKHEL Djamila d'avoir accepté de nous encadrer, et pour leurs conseils précieux pendant la réalisation de ce travail. Pour leur disponibilité, pour leur écoute, pour l'aide très précieuse et l'intérêt constant qu'ils ont bien voulu montrer pour ce travail.

Nous sommes grées au membre de jury, d'avoir accepté d'examiner ce travail et de présider le jury de notre travail.

Je leur exprime ma profonde reconnaissance pour leur lecture critique et éclairante sur ce travail de recherche.

Un grand merci est adressé à tous les ingénieurs et les travailleurs du hall pour leurs aides et disponibilités.

Mes sincères remerciements vont également à tous les enseignants du département de Génie civil de l'université de Médéa, qui nous ont offert tout ce savoir.

Et nous n'oublions certainement pas nos parents nos amis ainsi tous ceux qui nous ont aidés dans notre tâche, nous leur dirons merci.

Enfin je remercie tous ceux qui ont contribué de prés ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

Dédicace

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

Je dédie cette mémoire de master :

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

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

À ma mère !

A la chandelle qui allume ma vie, à mon père

À mes frères ,ma sœur et son mari

À mes grands parents et à toute ma famille

À tous mes amis et collègues

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

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

Ahmed

Dédicace

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

Je dédie cette mémoire de master :

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

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

À ma mère !

A la force qui me pousse en avant,à mon père

À tous mes frères et mes sœurs

À mes grands parents et à toute ma famille

À tous mes amis et collègues

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

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

Hicham

ملخص

الهدف الرئيسي من هذا المشروع هو المساهمة في تثمين نفايات المحار ودمجها بشكل حجمي في كتلة الخرسانة الرملية المائعة بنسب مختلفة (10٪، 20٪، 30٪، 40٪، 50٪،60٪ ،70٪، 80٪، 90٪، 100٪) مع دراسة خصائصها في الحالة الرطبة و في الحالة الصلبة ومقارنتها مع خرسانة رملية مائعة عادية.

وقد أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أن تدفق وكثافة الخرسانة الرملية المائعة ازدادت بزيادة النسبة المئوية نفايات المحار.من جهة اخرى أظهرت النتائج أن الخصائص الميكانيكية للخرسانة الرملية المائعة تحسنت على المدى القصير وذلك باستبدال نسبة 20 بالمائة من الرمل الطبيعي بنفايات المحار. لذلك فمن الممكن الحصول على مواد البناء الجديدة التي يمكن استخدامها لأنواع مختلفة من عناصر البناء.

الكلمات المفتاحية : نفايات المحار , الخرسانة الرملية المائعة , الأداء الميكانيكي.

Résumé

L'objectif principal de ce projet consiste à valoriser les déchets de coquillage et incorporé dans la masse du béton de sable fluide par substituions volumique du sable en différents pourcentage (10% ,20%,30%,40%,50%, 60% ,70%,80%,90% et 100%). Les propriétés à l'état frais et à l'état durci des différents mélanges réalisés ont été analysées et comparées aux bétons témoin respectifs.

Les résultats obtenus montrent que l'étalement et la densité de béton de sable fluide est augmenté en fonction d'augmentation de pourcentage de déchets coquillage. Par ailleurs les performances mécaniques à jeune âge de béton de sable fluide sont améliorées en fonction de substitution de 20% du sable naturel par les déchets de coquillage. Donc, il est possible d'obtenir un nouveau éco-matériau de construction utilisable pour différents types d'éléments de construction.

Mots clés : Déchets de coquillage; Béton de sable fluide ; Performances mécanique

Abstract

The main objective of this project is to valorization of the seashells waste into the mass of flowable sand concrete by substituted volumetric sand at different percentage (10% ,20%,30%,40%,50% ,60%,70%,80%,90% and 100%). The properties in a fresh and a hardened state of the various flowable sand concretes carried out were analyzed and compared with control concretes respective.

The results obtained show that the flowability and density of the fluid sand concrete was increased as a function of the percentage increase in seashells waste. However, the mechanical properties at young age of flowable sand concrete were improved with substitution of 20% of natural sand by seashells waste. So, it is possible to obtain a new material which allows a use in the various types of structural components**.**

Key words: Seashells aste; Flowable sand concrete mechanical properties

Sommaire

Sommaire

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

Chapitre 01 : Synthèse bibliographique

1.1 Introduction 3

1.2 Recyclage et valorisation de déchets 3

1.2.1 Déchet et types de déchet 3

1.2.2 Recyclage de déchet 6

1.2.3 Valorisation de déchets 7

1.3 Coquillages 8

1.3.1 Introduction 8

1.3.2 Valorisation de déchets 11

1.4 Le béton de sable 13

1.4.1 Introduction 13

1.4.2 Origines de béton de sable 13

1.4.3 Définition 14

1.4.4 Techniques particulières 14

1.4.5 Béton de sable projeté 14

1.4.6 Bétons de sable fluide 15

1.4.7 Les composants du béton de sable 16

1.4.8 Formulation du béton de sable 17

1.5 Influence de poudre de coquillage sur les propriétés des matériaux cimentaires 29

1.5.1 Etats frais 29

1.5.2 Etats durci 31

1.6 Conclusion 35

Chapitre 02 : Matériaux et essais

2.1 Introduction 37

2.2 Caractérisation des matériaux utilisés 37

2.2.1 Ciment 38

2.2.2 Le sable 40

2.2.3 Fillers (marbre) 42

2.2.4 Adjuvant 42

2.2.5 Eau de gâchage 43

2.2.6 Déchets de coquillage 43

2.3 Composition des bétons 44

2.4 Malaxage et conservation 46

2.5 Essai réalisé sur le béton 47

2.5.1 L'étalement au mini-cône 47

2.5.2 Ecoulement à l'entonnoir en (V-FUNNEL) 47

2.5.3 La densité 48

2.6 Préparation et conservation des éprouvettes 48

2.7 Essais réalisé à l'état durci 49

2.7.1 Essais de compression 49

2.7.2 Résistance à la flexion 51

2.8 Variables étudiées 52

2.9 Conclusion 53

Chapitre 03: Résultats et interprétations

3.1 Introduction 55

3.2 Influence de déchets de coquillage sur le comportement du BSF 55

3.2.1 Caractéristiques du BSF à l'état frais 55

3.2.2 Caractéristiques du BSF à l'état durci 56

3.3 Conclusion 57

Conclusions générales 58
Recommandations 59
Références bibliographiques 60
Annexe 65

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Tableau.2.1.Analyse chimique du ciment…… 38
Tableau.2.2. Caractéristique physiques du ciment…… 38
Tableau. 2.3. Evolution de la résistance du ciment en fonction de l'âge…….. 40
Tableau 2.4 : Compositions chimique du ciment…….. 40
Tableau 2.5 : Compostions minéralogique du ciment CRS…….. 40
Tableau.2.6. Propriétés physiques du sable utilisé…… 42
Tableau.2.7 Caractéristiques physiques des fins de marbre utilisées…… 43
Tableau 2.8 Compositions des Béton de sable fluide à base de déchet de coquillage pour ($1m^3$)…… 46
Tableau 2.9 Essais sur bétons frais…… 48
Tableau. 2.10. Essais de caractérisation sur bétons durci……. 50
Tableau 3.1. Résistance mécanique des BSF à base de déchets de coquillage à 7 Jrs……. 56

Liste des figures

Liste des figures

Figure 1.1 : Les déchets toxiques [1]. 3
Figure 1.2 : Les déchets toxiques [1]. 4
Figure 1.3 : Les déchets d'activités de soins à risques infectieux [1]. 4
Figure 1.4 : Les déchets inertes [1]. 5
Figure 1.5 : Les déchets d'activités agricoles et déchets radioactifs [1]. 5
Figure 1.6 : Coquillage [8]. 8
Figure 1.7 : Les familles de bivalves [9]. 9
Figure 1.8 : Les familles de gastéropodes [9]. 10
Figure 1.9 : mollusques "sans coquilles" - les céphalopodes [9]. 10
Figure 1.10 : Décoration avec coquillage [13]. 12
Figure 1.11 : Les phares d'Égypte : laboratoire et conservatoire de l'ingénierie européenne du xixe siècle [15]. 14
Figure 1.12 : Le béton de sable en projection [17]. 15
Figure 1.13 : Influence du diamètre D du sable sur le dosage en fines [12]. 19
Figure 1.14 : Influence de la dimension d sur la porosité minimale du béton pour deux tailles D du sable [12]. 20
Figure 1.15 : Relation entre l'ouvrabilité et le dosage (e + v) d'une matrice pour une mise en œuvre donnée [12]. 21
Figure 1.16 : Coefficient d'activité du filler calcaire (modèle) [12]. 23
Figure 1.17 : Organigramme de la méthode théorique [12]. 24
Figure 1.18 : masse volumique apparente en fonction du dosage en fines d'addition [12]. 28
Figure 1.19 : Evolution de la maniabilité en fonction du dosage en fines d'addition [12]. 28
Figure 1.20 : Influence de déchets de coquillage sur la fluidité du mortier autoplaçant [20]. . 29
Figure 1.21 : Influence de substitution de ciment par le coquillage sur la densité de ciment [21]. 30
Figure 1.22 : Effet de déchets de coquillers sur la densité de béton [22]. 30
Figure 1.23 : Influence de substitution de sable par le coquillage sur la densité de MAP [20]. 31
Figure 1.24 : Effet de sable de coquillage sur la porosité du béton ordinaire [22]. 31

Figure 1.25 : Influence de substitution de sable par le coquillage sur la Rc et Rt de MAP [20]. 32
Figure 1.26 : Effet de sable de coquillage sur la résistance à la compression du béton ordinaire [22]. 33
Figure 1.27 : Influence de substitution de ciment par le coquillage sur la Rc de ciment [21]. 33
Figure 1.28 : Influence de substitution de ciment par le coquillage sur la Rt de ciment [21].. 34
Figure 1.29 : Influence de substitution de sable par le coquillage sur le module d'élasticité de MAP [20]..... 34
Figure 2.1 : Le ciment utilisé [24]..... 38
Figure 2.2 : Sable utilisé..... 40
Figure 2.3 : La granulométrie du sable et de déchets de coquillages utilisés. 41
Figure 2.4 : Le MEDAFLOW30. 42
Figure 2.5 : les étapes de préparation de coquillage..... 44
Figure 2.6 : Séquence de malaxage du béton de sable fluide..... 46
Figure 2.7 : Mesure de l'étalement du béton de sable fluide 47
Figure 2.8 : Essai d'écoulement à l'entonnoir en V**.** 48
Figure 2.9 : Mesure de la densité du béton de sable fluide. 48
Figure 2.10 : Fabrication des éprouvettes. 49
Figure 2.11 :Presse hydraulique. 50
Figure 2.12 : Dispositif de rupture à la compression [40]. 50
Figure 2.13 : Essai de traction par flexion 51
Figure 2.14 : Variables étudiées. 52
Figure 3.1 : Étalement de BSF à base de déchets de coquillage. 55
Figure 3.2 : La densité des BSAPG à base de déchets de granito. 56
Figure A.1 : Collecte des coquillages…… 65
Figure A.2 : Concasseur électrique ……... 66
Figure A.3 : los Angelos…… 66
Figure A.4 : Déchets de coquillage…… 67
Figure A.5 : Tamiseuse électrique …… 67
Figure A.6 :Malaxeur électrique ……..… 68
Figure A.7 : essai de l'étalement …….. 68

Liste Des Symboles Et Abréviations

Liste des symboles et abréviations

C : carbone

H : hydrogène

O : oxygènent

A : azote

BS : béton de sable

CRS : ciment résistant aux sulfates

V : Volume des vides du mélange granulaire ;

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

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

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

Ps (v) : Porosité du sable

Dmax : Diamètre maximal du plus gros grain du mélange.

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

ρ : densité du constituant exprimée en g/cm3.

K : constante comprise entre 0.2 et 0.25. Kf : coefficient granulaire compris entre 4.5 et 5 ;

Rc : classe vraie du ciment (MPa) ;

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

V : air piégée (l/m3) ;

C : dosage en ciment (kg/m3) ;

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

K1 : coefficient pouzzolanique

K2 : coefficient d'activité du filler calcaire.

α: compris entre 0.1 et 0.15 ;

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

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

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

MVA sable : masse volumique absolue du sable.

V sable : volume du sable.

Si : dosage en sable après correction

Si-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

BSFT : Béton de sable fluide témoin.

BSF DC : Béton de sable fluide à base de déchets de coquillage

R_c : Résistance à la compression en (MPa).

F : Charge de rupture en (N). DIS : Déchets industriels spéciaux

DMS : Déchets ménagers spéciaux

BS : Béton de sable

C : Dosage en ciment

C2S : Silicate bicalcique (belite)

C3A : Aluminate tricalcique

C3S : Silicate tricalcique (alite)

C4AF : Aluminate-ferrite tétracalcique

Fe2O3 : Oxyde de fer

Cao : Oxyde de calcium

SiO2 : Silicium

MgO : Magnésium

Dmax : Diamètre maximale des granulats

G/S: Gravillons sur sable

ES : Equivalent de sable

R7j : Résistance à 7 jours

R28j : Résistance à 28 jours

R90j : Résistance à 90 jours

Introduction générale

Introduction générale

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

Les déchets organiques ont trouvé leur place comme matériaux cimentaires dans la fabrication des bétons ou des mortiers de ciment comme ajout minéral ou granulat fin, afin d'améliorer certaines propriétés à l'état frais ou l'état durci, Parmi ces déchets, les déchets de bois d'arbre, les noyau d'olive, les palmier dattier, les résigne d'arbre, les feuille de vigne, les coquilliers…….etc. Ces déchets peuvent être recyclés et utilisés dans les matériaux cimentaire comme les bétons et les mortiers.

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. La valorisation des matériaux locaux ainsi que la réutilisation des déchets de différentes nature actuellement l'objet de différentes recherches.

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

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

- Un seul type de sable : il s'agit d'un sable roulé d'Oued Souf.
- Un seul type de déchets : Il s'agit de déchets de coquillage provient de la plage de Kadous de la wilaya d'alger.

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, coquillage et déchets de coquillage et l'effet et l'effet de déchets de coquillage sur les caractéristiques des matériaux cimentaire ;

- Dans le deuxième chapitre, nous présentons les caractéristiques des matériaux de base, la formulation du béton de sable fluide, et les techniques expérimentales utilisées durant cette étude pour évaluer les propriétés à l'état frais (étalement, temps d'écoulement et densité), les propriétés mécaniques (résistance à la compression), 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 01 :

Synthèse Bibliographique

1.1 Introduction

Dans le domaine du génie civil réputé par sa grande consommation de matériaux naturels, les avancées scientifiques ont permis de valoriser différentes variétés de sous-produits industriels dans les applications de béton et en technique routière, dans une démarche d'économie circulaire. Cependant, les méthodes de formulation n'ont pas évolué autant. La récupération et recyclage des déchets touchent 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.

1.2 Recyclage et valorisation de déchets

1.2.1 Déchet et types de déchet

- **Définition**

Selon le Code de l'Environnement (art. L541-1), un déchet est « tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau, produit ou plus généralement tout bien, meuble abandonné ou que son détenteur destine à l'abandon ». Autrement dit, tout élément qui est abandonné est un déchet. Ce n'est pas pour autant que cet élément est inutilisable, en l'état ou après modification. Seuls ceux qui sont qualifiés de déchets ultimes sont réellement inutilisables et doivent être stockés pour éviter des pollutions de l'environnement. [1]

- **Type de déchets**

- **Les déchets toxiques des activités économiques**

Ce sont les déchets d'entreprises ou d'industriels qui contiennent des produits toxiques : solvants, vernis, colles, goudrons, huiles, déchets d'équipements électriques et électroniques. Ces déchets sont toxiques et représentent un réel danger pour la santé et pour l'environnement. Ils sont collectés et traités par des sociétés spécialisées. [1]



Figure 1.1 : Les déchets toxiques [1].

- **Les déchets non dangereux des activités économiques :**

Ce sont les déchets d'entreprises ou d'industriels qui ressemblent aux déchets ménagers : papiers de bureau, cartons, emballages, palettes de bois, invendus d'un supermarché… Ces déchets sont traités comme des déchets ménagers mais comme ils sont produits en grandes quantités, ils sont collectés et traités par des sociétés privées. [1]



Figure 1.2 : Les déchets toxiques [1].

- **Les déchets d'activités de soins à risques infectieux :**

Ce sont des déchets de soins des particuliers, laboratoires ou hôpitaux : seringues, pansements, matériel de soins. Ces déchets présentent un risque infectieux et de contamination pour l'homme et l'environnement et ont un traitement particulier. [1]

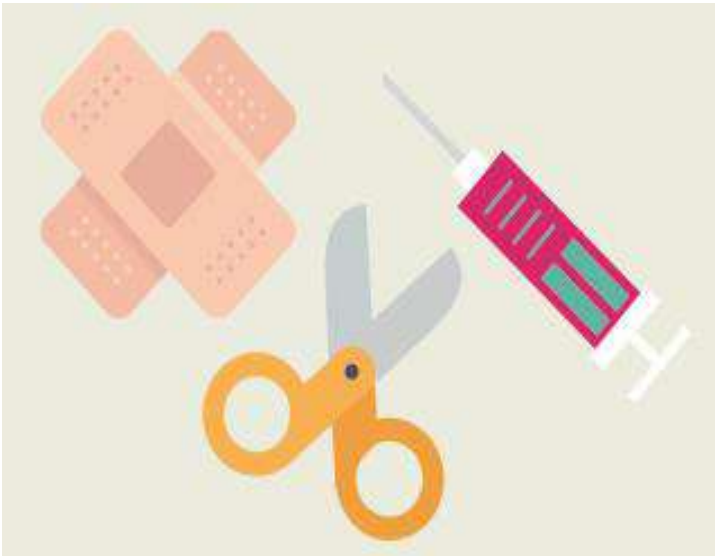


Figure 1.3 : Les déchets d'activités de soins à risques infectieux [1].

- **Les déchets inertes :**

Ce sont les gravats de démolition des entreprises de construction ou de travaux publics : briques, blocs de béton, parpaings, terre, carrelage, tuiles, vitrage…

Comme leur nom l'indique, ces déchets ne bougent pas. Ils ne se décomposent pas et ne se dégradent pas et sont réutilisés en sous-couches pour les routes ou enfouis dans un centre de stockage. [1]



Figure 1.4 : Les déchets inertes [1].

- **Les déchets d'activités agricoles et déchets radioactifs :**

Les déchets d'activités agricoles (purins, fumiers, films de paillage, huiles usagées…) proviennent des élevages ou des cultures et sont traités par des centres spécialisés.

Les déchets radioactifs des centrales nucléaires sont placés sous la responsabilité d'un organisme public l'Andra (Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs). [1]



Figure 1.5 : Les déchets d'activités agricoles et déchets radioactifs [1].

1.2.2 Recyclage de déchet

- **Définition** :

Le recyclage consiste à récupérer des matériaux qui seraient normalement traités comme des déchets. Il permet la réutilisation des matériaux pour la même finalité ou à des fins différentes. Les déchets métalliques, les bouteilles en verre, le bois, les textiles et les plastiques en sont des exemples courants. Les matériaux à recycler peuvent être collectés séparément ou extraits des déchets. Il existe pour cela différentes méthodes, comme le tri mécanique par taille ou densité, le tri manuel ou le tri magnétique. Les déchets inutilisables et contaminants doivent être isolés des matériaux recyclables. Les déchets résiduels sont parfois incinérés pour extraire l'énergie qu'ils renferment sous forme de chaleur ou d'électricité. Les entreprises de recyclage sont de toutes tailles, et vendent généralement leur production sur les marchés d'occasion (textiles) ou à d'autres industries pour transformation ultérieure (déchets métalliques). [2]

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

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.[3]

- **Les types de Recyclage de déchets :**

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 ou pour séparer par courants de Foucault.
- Le recyclage dit « organique » consiste, après compostage ou fermentation, à produire des engrais ou du carburant tel que le biogaz. [4]

1.2.3 Valorisation de déchets

La définition de la valorisation des déchets par l'ADEME, (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie), est la suivante : « *le réemploi, le recyclage ou toute autre action visant à obtenir, à partir des déchets, des matériaux réutilisables ou de l'énergie » (loi du 13 juillet 1992).*

La valorisation apporte une nouvelle valeur aux déchets, en les sortants du circuit de collecte et de traitement. La valorisation s'oppose à l'élimination. Elle permet de faire des économies de matières premières et contribue au respect de la planète et à son développement durable. [5]

On comptabilise trois types de valorisation :

- ✓ la valorisation **matière**,
- ✓ la valorisation **organique**,
- ✓ la valorisation **énergétique**,

1.2.3.1 La valorisation matière

C'est, utiliser une partie ou la totalité de la matière du déchet dans un nouveau processus de production. La valorisation de matière peut être assimilée au recyclage et au réemploi. [5]

1.2.3.2 La valorisation organique

La valorisation organique repose sur le compostage et la méthanisation. Le compost créé à l'issue du compostage sert à la régénération des sols.

La méthanisation est comme le compostage, c'est un procédé de fermentation qui créé du méthane. L'utilisation du méthane est la même que le gaz naturel, il s'utilise dans les mêmes applications. [5]

1.2.3.3 La valorisation énergétique

La valorisation énergétique se fait via l'incinération des déchets, à l'aide de fours spécifiques. L'incinération des déchets permet de créer de la chaleur qui permet d'alimenter les systèmes d'électricité et de chauffage.

Il existe un nouveau système appelé : pyrolyse. Les déchets sont chauffés entre 400 à 600°C, les déchets sont alors soumis à une réaction thermique et se décomposent. Les déchets sont alors utilisés en tant que combustible liquide, solide ou gazeux. [5]

1.3 Coquillages

1.3.1 Introduction

Le monde des mers est plein de nombreux miracles. Ce sont d'autres espèces sur cette planète qui vivent une vie complète qui n'est rien de moins que la vie sur terre, en l'occurrence les coquilles. Ces dernières, également connues sous le nom de coquillages, sont une couche extérieure dure et protectrice créée par un animal qui vit dans le milieu maritime. En fait, elles vivent dans le sable près des rives des mers et des océans, où elles ont une grande capacité à creuser et à s'enterrer pour se protéger des poissons qui s'en nourrissent et ne pas se préparer à geler en hiver et à brûler en été. Sachant qu'elles se trouvent en abondance dans de nombreuses régions du monde. Par exemple, leCAP Atlantique dispose sur son territoire les deux premiers ports de pêche de Loire-Atlantique à savoir le port de La Turballe et du Croisic. Cela représente environs 7 500 tonnes de productions conchylicoles (moules, coques, huîtres, palourdes), sans compter la pêche à pied.

Labellisé Territoire Zéro Déchet et Zéro Gaspillage, Le CAP Atlantique a souhaité proposer une opération de collecte ponctuelle de ces déchets, généralement déposés avec les ordures managères . [6]

Il est alors fort intéressant de tirer profit de ces déchets maritimes en vue d'une meilleure exploitation dans les domaines ayant trait au génie civil. Dans ce contexte, nous visons dans le cadre de ce mémoire de mettre en évidence l'intérêt certain que représente cette exploration pour le génie civil.

1.3.1.1 Définition

Un coquillage est un animal aquatique (généralement marin), qui appartient au groupe des mollusques, et dont le corps est protégé par une coquille bien visible.[7]



Figure 1.6 : Coquillage [8].

On parle de coquillage principalement dans deux domaines :

- Dans l'alimentation, les coquillages sont un des principaux types de fruit de mer : ce sont les fruits de mers à coquille, et la plupart d'entre eux appartiennent au groupe des bivalves (voir plus bas)
- Dans la vie courante, les coquillages sont les coquilles vides d'animaux marins, que l'on peut trouver, notamment, sur la plage. Certains les collectionnent, ou en font des bijoux, etc. Ce genre de coquillage appartient principalement au groupe des gastéropodes (voir plus bas).[7]

1.3.1.2 Type de Coquillages

On distingue trois types de coquillage [9]

a) Les bivalves

Il est Composé de 2 coquilles s'articulant autour d'une charnière et reliées par un ligament.Il existe plusieurs familles, dont :

a) Coques

b) Coquilles Saint-Jacques & pétoncles

c) Huîtres

d) Moules

d) Amandes de mer

e) Couteaux

f) Palourdes, clams, praires, vernis, telline...

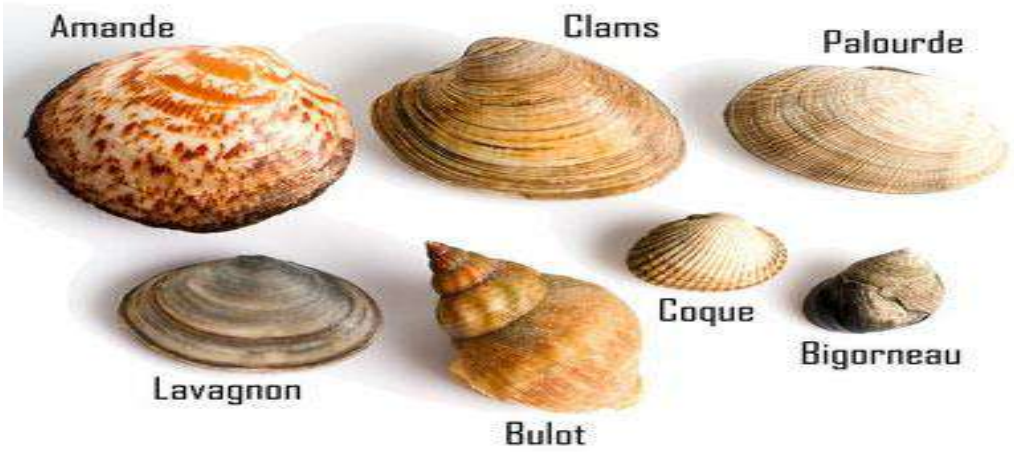


Figure 1.7 : Les familles de bivalves [9].

b) Les gastéropodes

Sont des coquilles d'une seule pièce, souvent enroulée en spirale.

On y trouve notamment les familles suivantes :

a) Ormeaux

b) Bigorneaux

c) Bulots



Figure 1.8 : Les familles de gastéropodes [9].

c) mollusques "sans coquilles" - les céphalopodes

Les Céphalopodes forment une classe de mollusques. Ils sont appelés ainsi parce qu'ils possèdent des tentacules à ventouses reliées à leur tête, comme: La pieuvre, le calmar ou la seiche.

Ils n'ont pas le corps recouvert d'une coquille, mais il en reste une trace sous forme d'un cartilage interne. Chez la seiche, c'est ce qu'on appelle « l'os de seiche », léger, plat et bombé, que l'on retrouve parfois sur les plages.

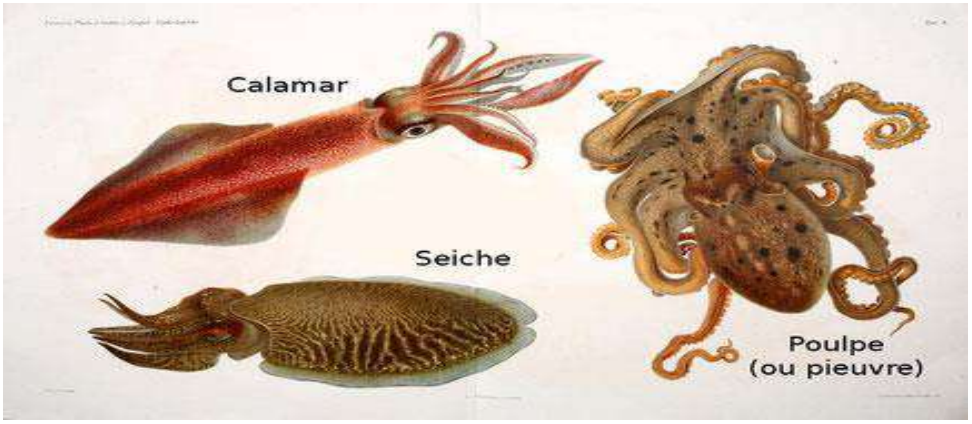


Figure 1.9 : mollusques "sans coquilles" - les céphalopodes [9].

1.3.1.3 Composition du Coquillages

La coquille des mollusques est constituée d'un assemblage intime et complexe de carbonate de calcium (CaCO3; appelé calcaire lorsqu'il s'agit d'une roche) et de matière organique (protéines essentiellement ; association de carbone/C; hydrogène/H; oxygène/O et azote/N), le tout secrété par l'organisme. On parle de biominéral ou bicarbonate.

Même s'il n'est pas possible d'ignorer la matrice organique des biominéraux, cette matrice étant essentielle lors de la formation de ces biominéraux, les deux constituants principaux des coquilles (CaCO3 et matrice organique) seront traités dans deux paragraphes distincts. [10]

A. Constituant "calcaire"

Le carbonate de calcium qui est fabriqué par l'animal pour faire sa coquille peut avoir deux formes minéralogiques, la calcite et/ou l'aragonite ; qui restent toujours associées à de la matière organique. La calcite et l'aragonite, toutes deux CaCO3, n'ont pas la même organisation au niveau de leur réseau. La calcite cristallise dans le système rhomboédrique et l'aragonite dans le système orthorhombique. [10]

B. Constituants organiques

Il est possible d'identifier biochimiquement les phases organiques présentes au sein des biominéraux, et dont le rôle est essentiel dans le processus de bio-minéralisation. Pour cela, il faut éliminer le composant calcaire en utilisant des acides, c'est ce qu'on appelle la décalcification. Les composés organiques ainsi recueillis ont des propriétés différentes et se divisent en deux grandes classes, les composés organiques solubles et insolubles. On peut séparer ces 2 grands types de composés par centrifugation par exemple, ceux qui restent en suspension dans le liquide sont dits solubles tandis que ceux qui sédimentent sont insolubles. Ces composés ne joueraient pas le même rôle lors du processus de bio-minéralisation.

La matrice organique des biominéraux, soluble et insoluble, dont les composants élémentaires sont C, H, O et N, est constituée de protéines et de glucides. Les constituants des protéines sont les acides aminés qui sont eux-mêmes classés selon leur structure. Ces composants organiques sont très divers, même au sein d'une couche de coquille identifiée par sa microstructure (par ex. couche prismatique).[10]

1.3.2 Valorisation de déchets

L'arrivée de l'archéomalacologie en tant que discipline nouvelle de l'archéologie ne cesse de mettre en évidence des utilisations parfois oubliées des coquillages le long du littoral atlantique français. Plusieurs activités nécessitent la collecte de l'animal vivant ou coquillage telles la

consommation alimentaire ou l'extraction de colorant, d'autres n'utilisent que le test ou la coquille (parure, éléments de construction, décor mural, outil…). Tout au long de la chronologie, un même phénomène semble se répéter. Les coquilles des coquillages consommés sont rarement recyclées. L'archéologie permet de mettre en lumière cette dichotomie dès leur acquisition. Ainsi, la collecte du coquillage frais semble correspondre à une activité différente de celle qui consiste à ramasser des coquilles dépourvues de la chair de l'animal. [11]

Par exemple la société Ovive S.A. a pour activité la collecte et la valorisation des déchets coquilliers issus des élevages ostréicoles et des entreprises de décoquillage. La majorité des coquilles traitées et transformées (+/- 90%) sont destinées à être intégrées à l'alimentation des poules pondeuses et pigeons sous forme de complément alimentaires. Les écailles proposées vont leur fournir un apport en calcium organique de qualité pour consolider leur squelette et renforcer la coquille de leurs œufs. Depuis 2010, Ovive propose des écailles grossières de coquilles traitées utilisables en paillage décoratif par les paysagistes et les services espaces-verts des collectivités. Enfin, nous sommes aussi en mesure de traiter certains des matériaux issus du nettoyage mécanique des plages. [12]



Figure 1.10 : Décoration avec coquillage [13].

1.4 Le béton de sable

1.4.1 Introduction

Le béton de sable est un matériau ancien utilisé antérieurement au béton traditionnel. Il est tombé en désuétude, avec l'abondance des granulats du plus gros calibre permettant d'obtenir facilement des nouveaux élevés de résistances. Il retrouve cependant de nos jours un intérêt certain du fait des propriétés spécifiques de ce matériau, par rapport au béton traditionnel : excellente maniabilité et cohésion, bonne adaptation aux milieu fortement ferraillés, qualités esthétiques, etc. Par ailleurs, dans certaines régions riches en sable, il peut procurer des économies par rapport au béton traditionnel. Dans ce chapitre on présentera un aperçu général sur les BS, ou on va exposer d'abord l'historique et l'origine des bétons de sable ainsi que leur définition et la différence entre les BS et les mortiers. Ensuite, on donnera une description des constituants entrant dans la fabrication, on décrit les propriétés mécaniques et hygrométriques, puis on explique le caractère non fissurant du BS. Finalement, on met en relief les innovations et les avantages apportés par les BS et on donnera quelques exemples de réparation structurale réalisés par ce matériau. [14]

1.4.2 Origines de béton de sable

Le béton de sable trouve ses origines en France dans le béton aggloméré confectionné par F.coignet dans le 3ème quart de XIX siècle. Il était constitué de sable, de ciment, de chaux et d'eau. Le mur de soutènement a Passy, la maison Coignet à Saint-Denis, constituent les premières applications de cette technique que l'on retrouve aussi dans la réalisation de la tour de Port Said en Egypt (hauteur : 52m) et du pont de New-York .Les premières tentatives de correction granulaire reste l'apanage de F.Coignet qui, pour les besoins de réalisation de certaines parties de l'aqueduc de Vanne construit entre 1869 et 1872, mélangea un sable fin traditionnel à un sable non utilisé à l'époque car jugé impropre à la construction. Cette technique a été mise au point depuis des décennies, en URSS, en témoignent les réalisation du port Kaliringrad en Prusse- Orientale en béton de sable au début du siècle et aussi du pont de Chernavskif coulé sur place à Voronej (500Km de Moscou) .A la fin du second conflit mondial, le professeur académicien Rebinder a permit l'utilisation de ce matériau dans plusieurs domaines : (les chaussés, les pistes d'aviation, élément de remplissage, murs architecturaux, planchers, dalles, réhabilitation, etc.).[14]



Figure 1.11 : Les phares d'Égypte : laboratoire et conservatoire de l'ingénierie européenne du xixe siècle [15].

1.4.3 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 [14]

1.4.4 Techniques particulières

Le béton de sable peut être utilisé dans différents domaines, et sous plusieurs formes. La plupart des applications actuelles du béton de sable tiennent davantage à ses propriétés spécifiques, par rapport au béton traditionnel, qu'à l'économie qu'il pourrait représenter en remplaçant celui-ci.[16]

1.4.5 Béton de sable projeté

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

- La réhabilitation de collecteur d'assainissement.

- La stabilisation de parois ou talus.

En général, le béton de sable peut être également utilisé en projection dans des travaux de

Rénovation, de ponts, d'égouts visitables et de bâtiments[16]



Figure 1.12 : Le béton de sable en projection [17].

1.4.6 Bétons de sable fluide

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

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

Rapidité et simplicité d'exécution ;

Limitation des moyens en personnel et en matériels ;

Nuisances réduites (absence de vibration).

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

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

- Risques de ségrégation préjudiciables ;

- Forte densité de ferraillages ;

- Recherche d'un produit fini ;

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

Indépendamment à l'aspect économique et aux gains de productivité, le BS fluidifié peut être une meilleure adaptation aux plusieurs applications mal assurées par les bétons traditionnel[18]

1.4.7 Les composants du béton de sable

Un béton de sable est composé de sable, de fines d'ajouts, de ciment et d'eau. Par rapport à cette composition de base et pour répondre aux besoin de certains usage, d'autres ajouts spécifiques peuvent être envisagés : gravillons, fibres, adjuvants[14]

1.4.7.1 Les Sables

Par sable on entend tous granulats 0/D conformes aux définitions des normes NF P 18- 540 et NF P 18-101 il peut s'agir soit d'un sable naturel alluvionnaire ou de ballastière, soit d'un sable de carrière issu du concassage d'une roche massive ou détritique. Aucun critère granulométrique n'est a priori exigible pour réaliser un béton de sable : on peut aussi bien utiliser un sable fin (même homométrique, type sable de dune) qu'un sable alluvionnaire moyen ou grossier, ou un O/D de concassage. La seule restriction d'emploi des sables réside dans leur propreté. [14]

1.4.7.2 Les fines d'ajout (filler)

Le terme filler fait référence à tout produit obtenu par broyage ou par pulvérisation de certaines roches (calcaire, basalte, laitiers, bentonite, cendres volantes...) naturelles ou non.

Ce mot filler provient de l'anglais « to fil » signifiant remplir, dont le plus gros grain de ces matériaux ne dépasse pas 0.2mm. L'ajout de fillers permet souvent d'améliorer certaines

propriétés du béton à l'état frais (accroissement de la maniabilité, réduction du ressuage, . . .) et du béton durci (diminution de la perméabilité et de la capillarité, réduction des risques de fissuration, . .) L'effet du filler sur la maniabilité dépend surtout de sa finesse. Si le filler est finement broyé, il y aura réduction de la quantité d'eau pour une maniabilité fixe. [14]

1.4.7.3 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. [14]

1.4.7.4 L'eau

L'eau utilisée pour la confection des bétons de sable est conforme à la norme NFP18- 303. L'eau efficace comprend, en plus de l'eau de gâchage, une quantité non négligeable d'eau apportée par les additions, adjuvants et autres ajouts, et surtout par les sables.

1.4.7.5 Les 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. La spécificité du béton de sable privilégie toutefois l'usage du plastifiants ou superplastifiant : ils améliorent la maniabilité, le plus souvent avec augmentation de résistance par suite d'une diminution de la teneur en eau et de la défloculation des éléments fins. On se contentera à expliquer ceux qui on été utilisés dans cette étude. Les adjuvants employés devront par ailleurs être conformes à la norme NF P 18-103. [14]

1.4.8 Formulation du béton de sable

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

Les granulats d'un béton jouent un rôle d'ossature et la pâte (généralement le ciment avec l'eau) assure, dans un premier temps, la cohésion et l'écoulement, et joue aussi le rôle d'une colle liant les granulats en donnant une certaine durabilité au matériau durci. Le premier problème qui se pose lors d'une formulation d'un béton est la compacité du squelette granulaire définie comme le rapport du volume des constituants solides sur le volume total du mélange ; il faut assurer au mélange une compacité maximale et donc diminuer au maximum la porosité.

Cependant la détermination de cette compacité maximale n'est pas facile et fait l'objet de modélisation poussée. Caquot [19] 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). Pour ce mélange optimisé la relation de Caquot s'écrit comme suit :

$$V=Vo\ (d\ /D\ max)\ 1/5 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(1)$$

V : Volume des vides du mélange granulaire ;

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

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

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

Cette formule est à la base de nombreuses méthodes de formulation des bétons qui consistent généralement à définir une courbe granulaire de référence telles que la méthode de Faury, Bolomey, Dreux, etc.

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

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

A) Les éléments fins qui regroupent tous les grains de taille inférieure à 80 µm et qui sont le ciment, les fines d'ajout et la fraction du sable inférieure à 80 µm.

B). Toute l'étendue du sable comprise entre 80 µm et le diamètre maximal du sable Dmax, ainsi que l'éventuelle fraction des éléments supérieurs à 80 µm, provenant des fines d'ajout. En faisant cette distinction entre les fines incluant les éléments inférieurs à 80 µm et l'étendue du sable comprise entre 80 µm et le diamètre maximal du sable, la porosité du sable peut être calculée selon la formule précédente de Caquot :

$$Ps = V = 0.75\ (0.08/D)1/5 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(2)$$

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

Dmax : Diamètre maximal du plus gros grain du mélange.

La constante expérimentale (Vo) est prise comme étant la moyenne des valeurs extrêmes (0.7, 0.8). Un dosage optimal en fines d'ajout sert à compléter l'étendue granulaire bornée inférieurement par la coupure 80 µm, et à combler la porosité du sable ainsi calculée. En effet,

il est impossible de prendre en compte la distribution de la taille des particules pour les fines d'ajout car l'assemblage géométrique relève surtout des forces électriques inter-granulaires.

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

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

$$[\text{Fines}] = 0.38\ (0.08/\text{Dmax})1/5 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (3)$$

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 Figure (1.13).

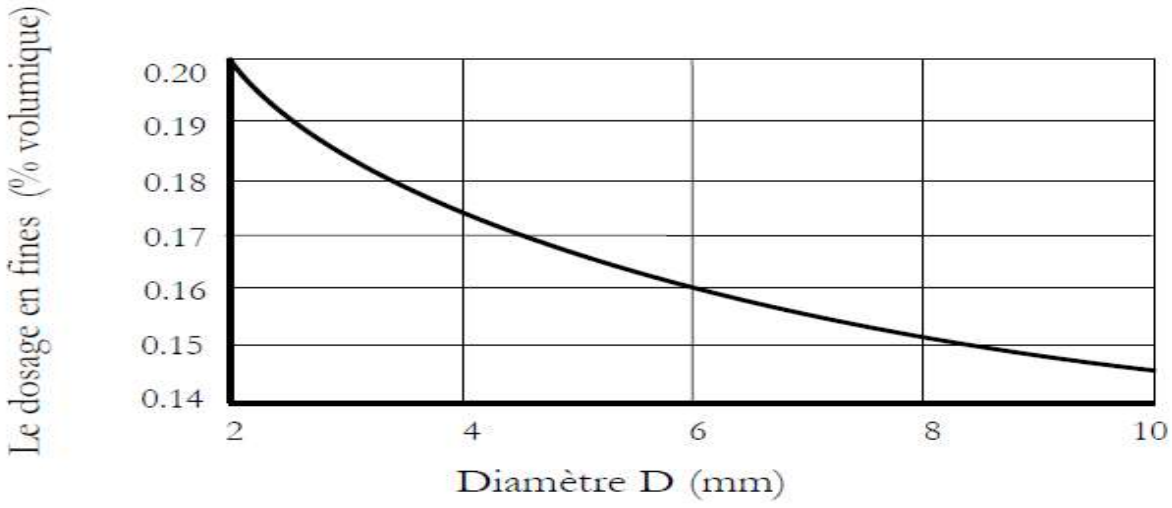


Figure 1.13 : Influence du diamètre D du sable sur le dosage en fines [12].

- **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.

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

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

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

Avec:

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

ρ: densité du constituant exprimée en g/cm3.

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

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

La dimension des flocs relevant des considérations physico-chimiques très complexes. Un ordre de grandeur peut être avancé de l'ordre de 20 à 25 μm pour le diamètre ; ainsi l'élargissement de l'étendue est la seule solution pour la réduction de la porosité théorique minimale. (Fig. 1.14)

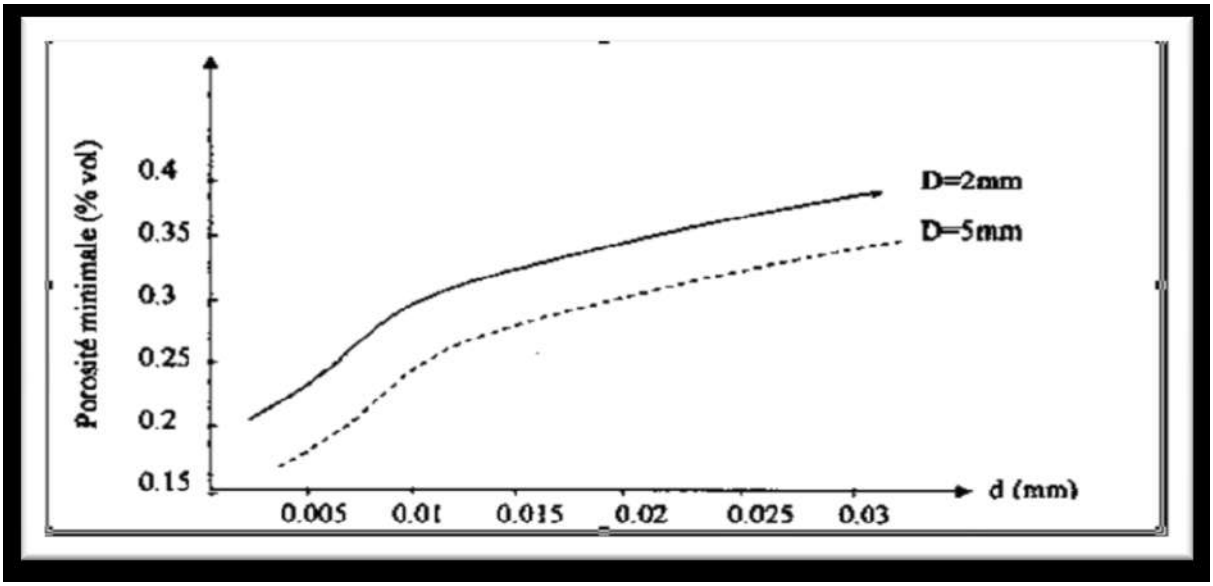


Figure 1.14 : Influence de la dimension d sur la porosité minimale du béton pour deux tailles D du sable [12].

L'expérience montre que pour des quantités d'eau inférieures à la quantité d'eau permettant d'obtenir l'ouvrabilité optimale, le mélange piégera une forte quantité d'air quelques soient les moyens de serrage utilisés, et par suite une porosité (e+v) supérieure à (e+v) min, alors pour

des quantités d'eau supérieures à celles qui donnent l'ouvrabilité optimale, la quantité d'air piégée reste stable et l'ouvrabilité augmente de façon linéaire. (fig.1.15)

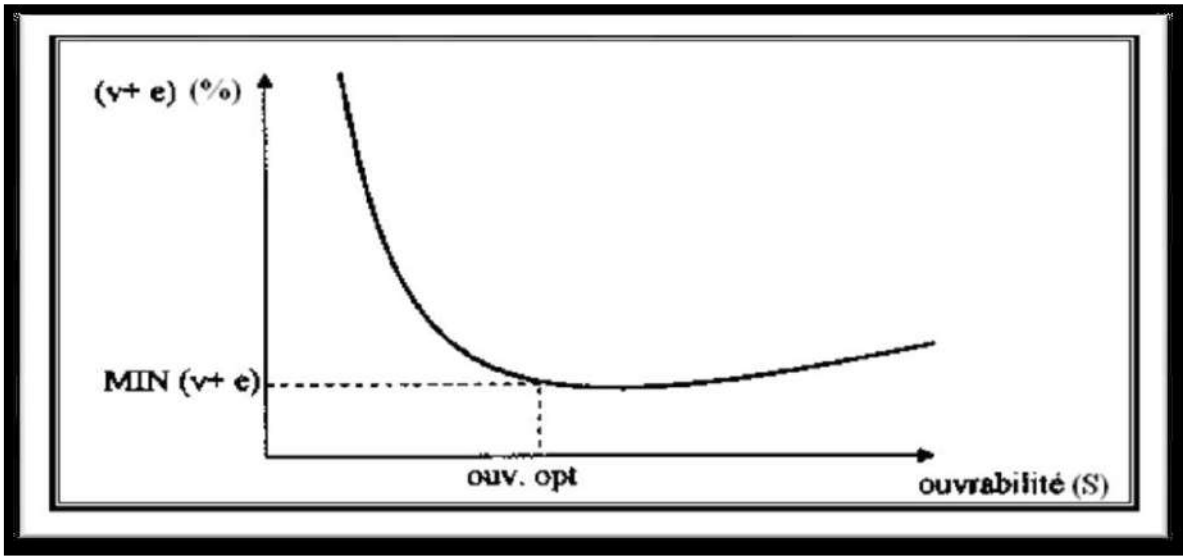


Figure 1.15 : Relation entre l'ouvrabilité et le dosage (e + v) d'une matrice pour une mise en œuvre donnée [12].

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

$$[\text{Vide}] = K\,[\text{eau}] \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (6)$$

Avec :

K : constante comprise entre 0.2 et 0.25.

- **Dosage en sable**

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

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

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

- **Estimation de la résistance en compression**

L'estimation de la résistance en compression se fait par référence aux méthodes classiques adoptées pour les matrices cimentaires qui consistent à partitionner lacontribution du squelette granulaire, de la nature du liant et des dosages des constituants de la pâte.

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

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

Kf : coefficient granulaire compris entre 4.5 et 5 ;

Rc : classe vraie du ciment (MPa) ;

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

V : air piégée (l/m3) ;

C : dosage en ciment (kg/m3) ;

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

K1<0.2

K1 : coefficient pouzzolanique

K2 : coefficient d'activité du filler calcaire.

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

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

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

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

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

présente un optimum au-de là duquel la contribution de l'activité de filler ne participe plus aux développements de performances mécaniques. (fig.1. 16)

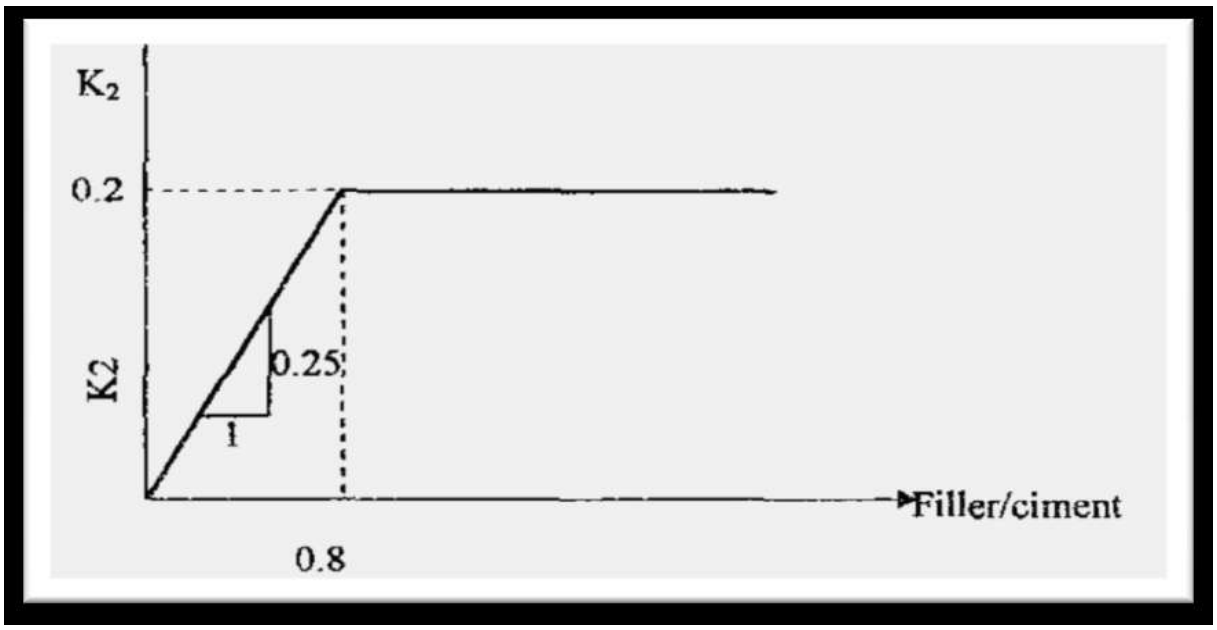


Figure 1.16 : Coefficient d'activité du filler calcaire (modèle) [12].

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

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

Cette formulation théorique simple et performante donne la possibilité au 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

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

On peut résumer toutes les étapes de la formulation théorique sous forme d'organigramme comme indique la Figure (1.17).

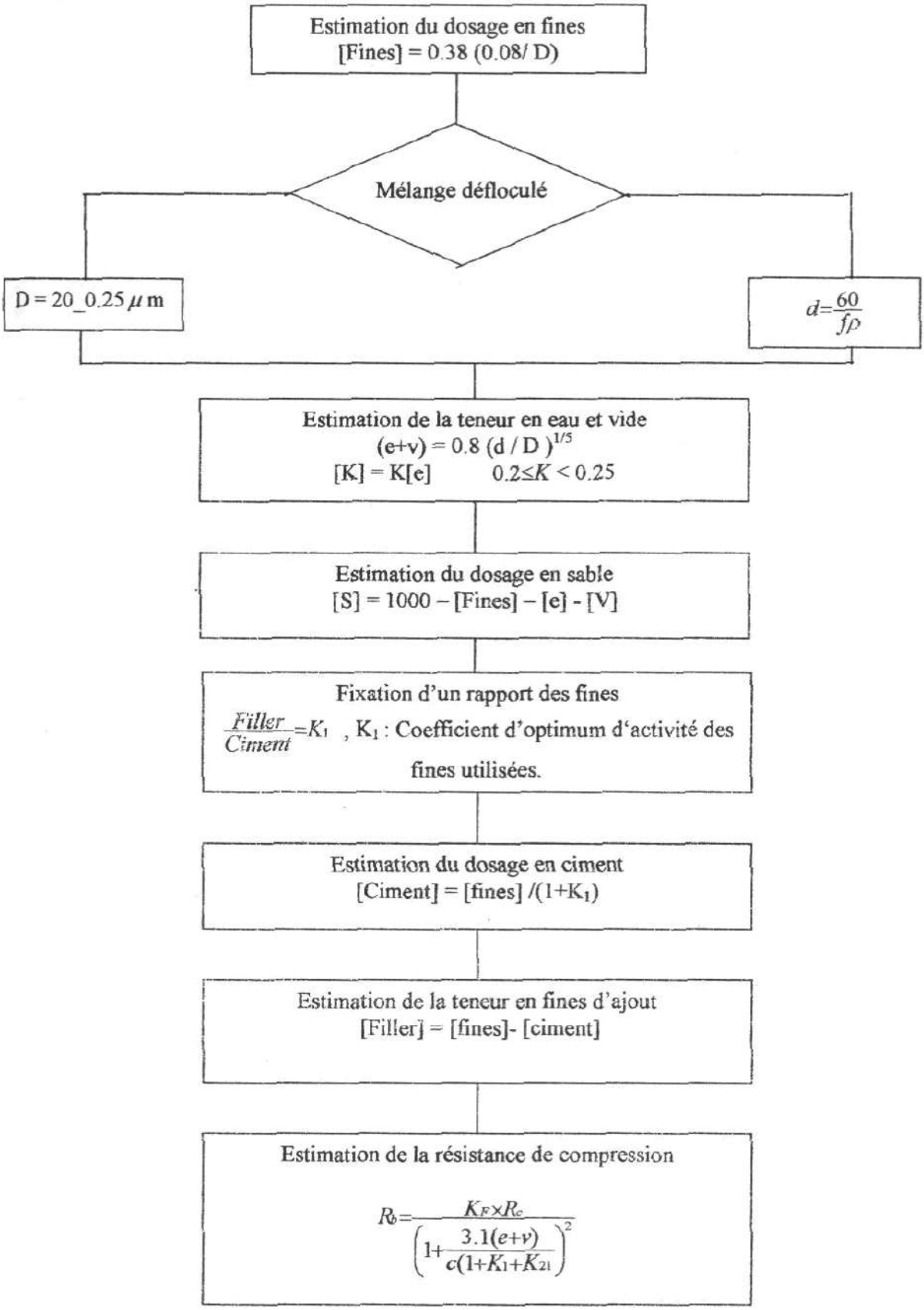


Figure 1.17 : Organigramme de la méthode théorique [12].

1.4.8.2 Méthode expérimentale de formulation des bétons de sable

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

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

- ✓ **Le dosage en ciment**

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

- ✓ **Dosage en eau**

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

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

α: compris entre 0.1 et 0.15 ;

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

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

- ✓ **Détermination du dosage en sable**

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

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

Vsable = 1000 –Vc -Vadj– Vair -Veau ……(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.

$$Msable = MVA * Vsable \quad \text{..... (9)}$$

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

MVA sable : masse volumique absolue du sable.

Vsable : volume du sable.

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

$$MVAT = mciment + meau + madj + msable \quad \text{.....(10)}$$

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

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

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

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

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

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

$$Si = Si\text{-}1(MVATi\text{-}1 - MVARi\text{-}1) + V * MVAsable. \quad \text{..... (11)}$$

Où

Si : dosage en sable après correction

Si-1 : dosage en sable avant correction MVAT,

MVAR : les masses volumiques du béton théorique et réel

MV sable : masse volumique absolue du sable

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

Il sera rajouté si 1'écoulement au maniabilimètre est supérieur à 10s (-V dans la formule précédente n° 10). Il sera retranché si 1'écoulement au maniabilimètre est inférieur à 7s (+V dans la formule n° 10) Après chaque correction la masse volumique théorique sera comparée à la masse volumique réelle. En ajustant le dosage en eau et en sable

conformément à ce principe, le dosage en eau devient définitif et le temps d'écoulement est alors compris entre 7 et 10 s, et la formule fait le mètre cube du béton de sable.

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

Les fines d'ajout sont destinées à corriger l'indice des vides des sables et à limiter le dosage en ciment des bétons de sable. Elles sont incorporées au mélange de base à un rapport E / C constant et à un dosage optimal permettant d'augmenter la compacité sans changement du volume total (MVAR=(MVAT).

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

$$Si = Si\text{-}1\text{-}(MVATi\text{-}1 - MVARi\text{-}1) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (12)$$

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/m3 de fines. Figures 1.29 et 1.30.

- **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.

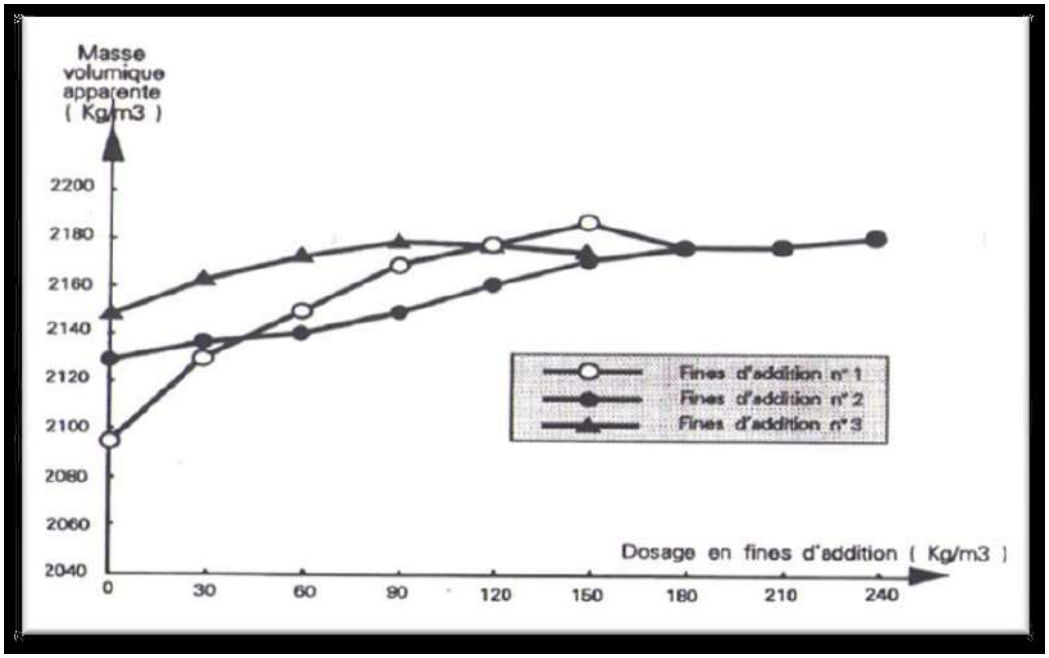


Figure 1.18 : masse volumique apparente en fonction du dosage en fines d'addition [12].

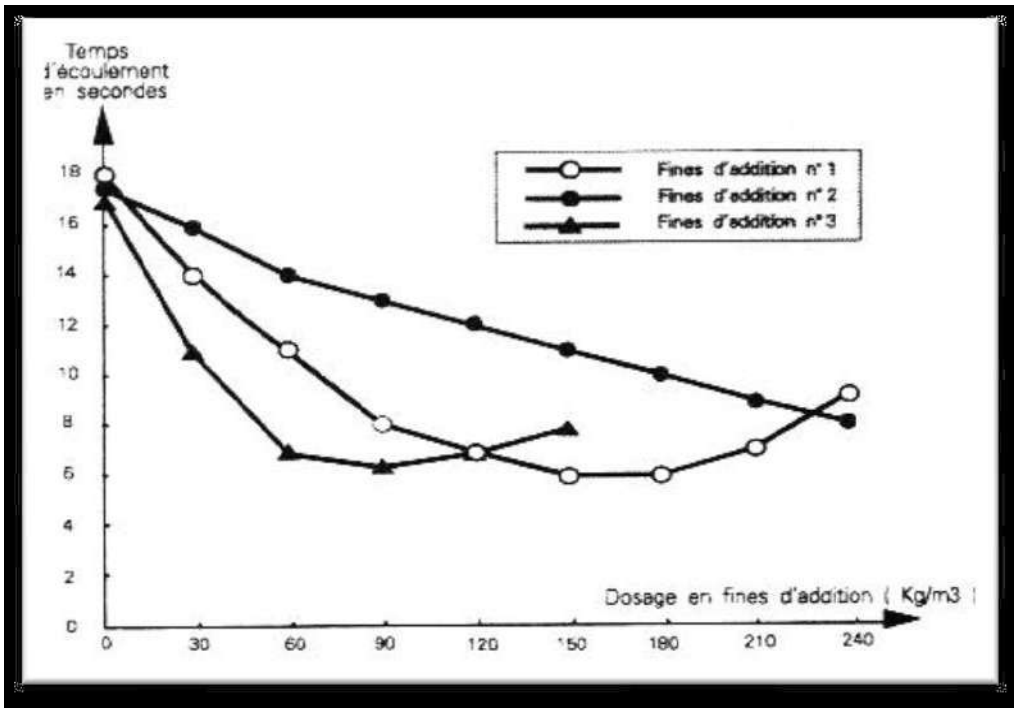


Figure 1.19 : Evolution de la maniabilité en fonction du dosage en fines d'addition [12].

1.5 Influence de poudre de coquillage sur les propriétés des matériaux cimentaires

Plusieurs études ont été faites sur l'étude de l'effet de l'incorporation des déchets de coquillage sur le comportement des matériaux cimentaire à l'état frais et durci

1.5.1 Etats frais

- **La maniabilité**

Safi et al [20] ont constaté que le remplacement de (0% à100%) du sable naturel par le déchet de coquillage (concassé) influe négativement sur la fluidité du mortier auto plaçant (Fig.20).

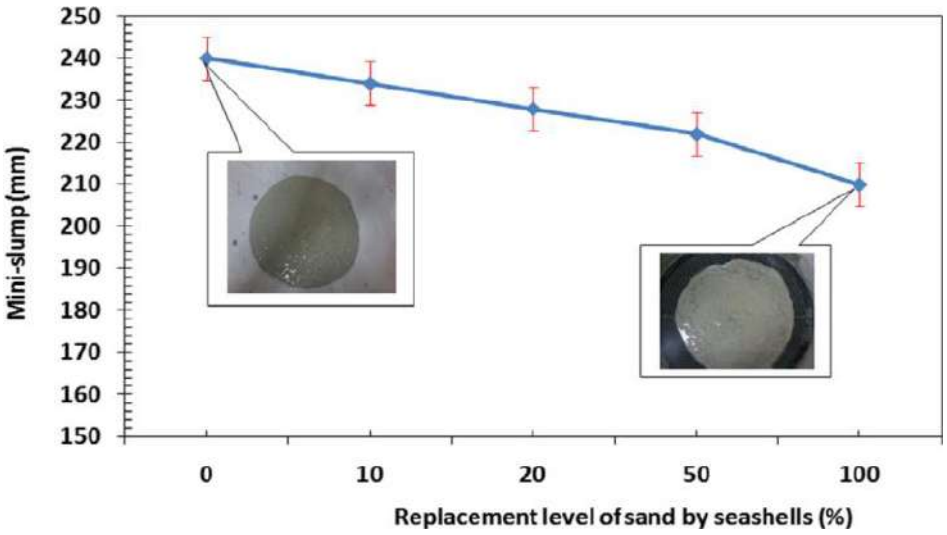


Figure 1.20 : Influence de déchets de coquillage sur la fluidité du mortier autoplaçant [20].

- **La densité**

Soltanzadehet al. [21] ont étudié l'influence de substituions declinker par le déchet de coquillage sur la densité du ciment. Ils ont trouvé que plus le pourcentage de coquillers de augmente plus la densité diminue (Fig.1.21/a Fig.1.21/b).Ce résultat confirme les résultats de Nguyen et al [22]

Safi et al [20] ont constaté que la densité demortier autoplaçant est augmenté linéairement en fonction d'augmentation du pourcentage de coquillers .Ils ont expliqué cette augmentation par la densité du coquillage qui 'est plus grande que celle de sable substitute (Fig 1.23).

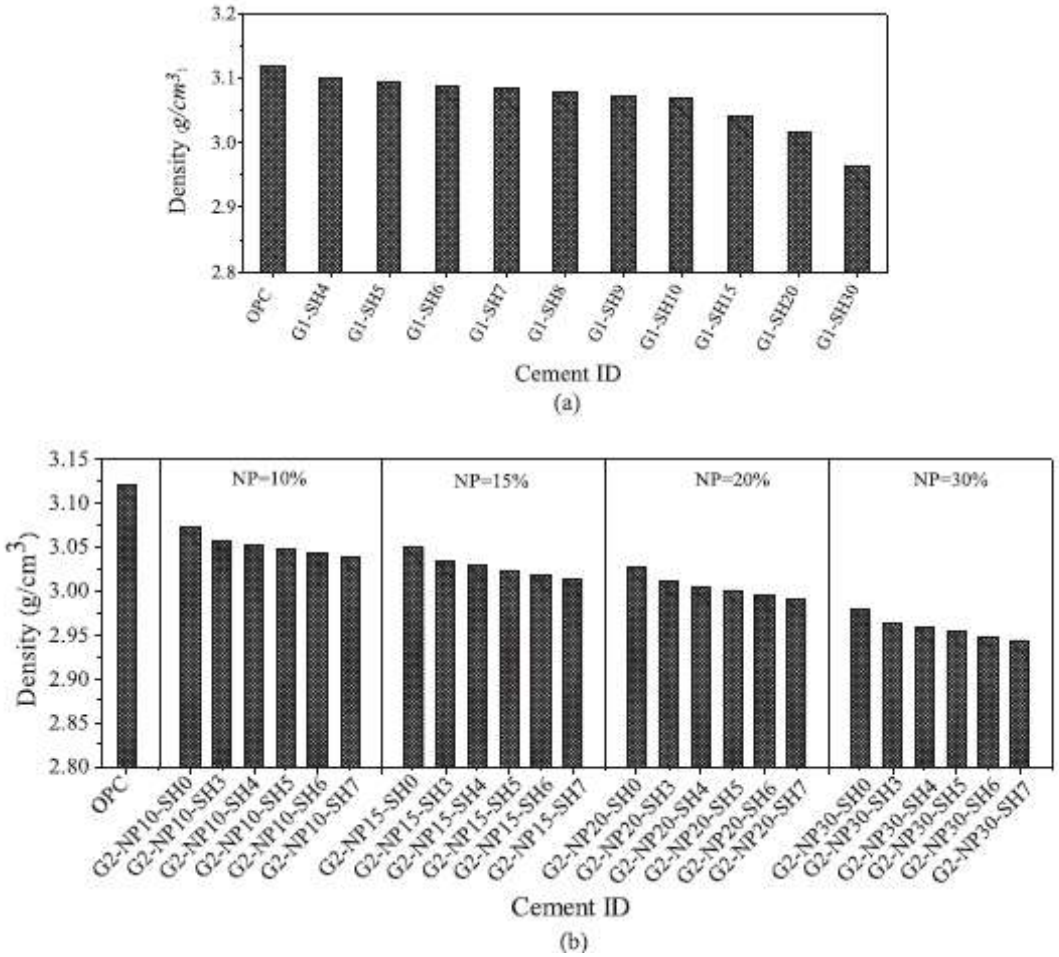


Figure 1.21 : Influence de substitution de ciment par le coquillage sur la densité de ciment [21].

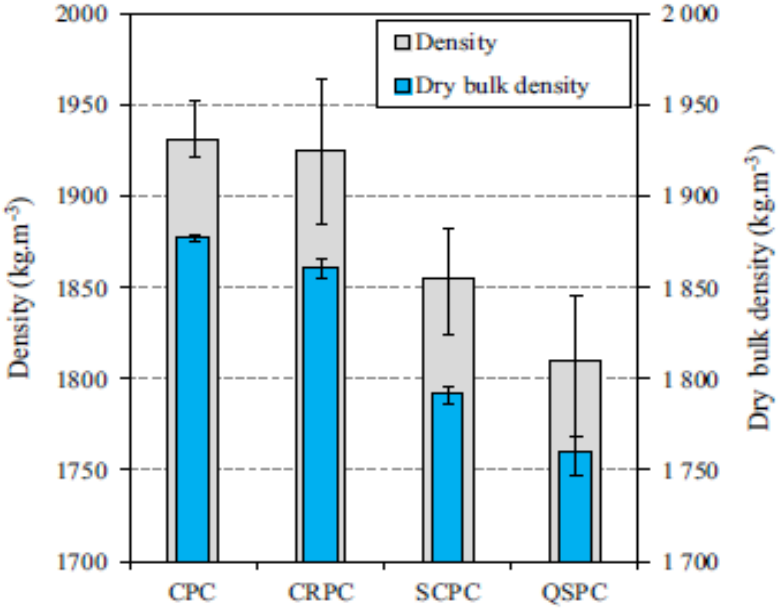


Figure 1.22 : Effet de déchets de coquillers sur la densité de béton [22].

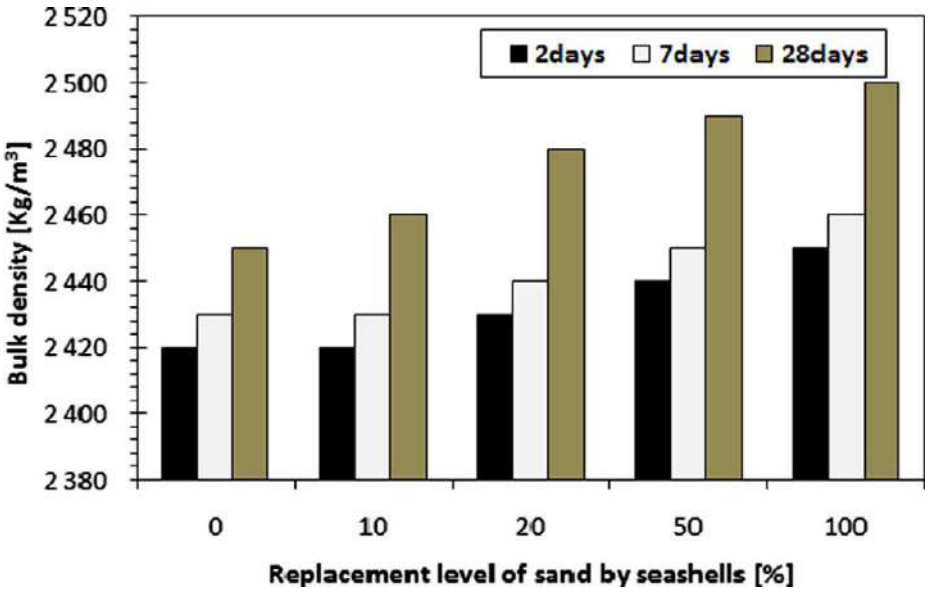


Figure 1.23 : Influence de substitution de sable par le coquillage sur la densité de MAP [20].

1.5.2 Etats durci

- **La porosité**

Nguyen et al [22] ont constaté que la porosité du béton ordinaire est augmentée en fonction de substitution de granulat naturel par le déchet de coquillage [Fig.1.24]

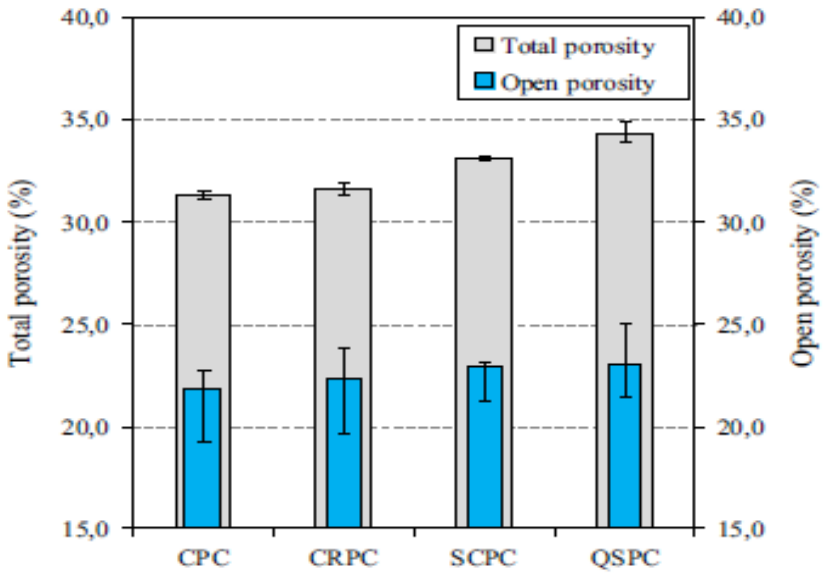


Figure 1.24 : Effet de sable de coquillage sur la porosité du béton ordinaire [22].

- **La résistance à la compression et la flexion**

Safi et al[20] ont trouvé que la résistance à la compression et à a flexion demortier autoplaçant est diminuée légèrement en fonction d'augmentation du pourcentage de coquillers (Fig1.25)

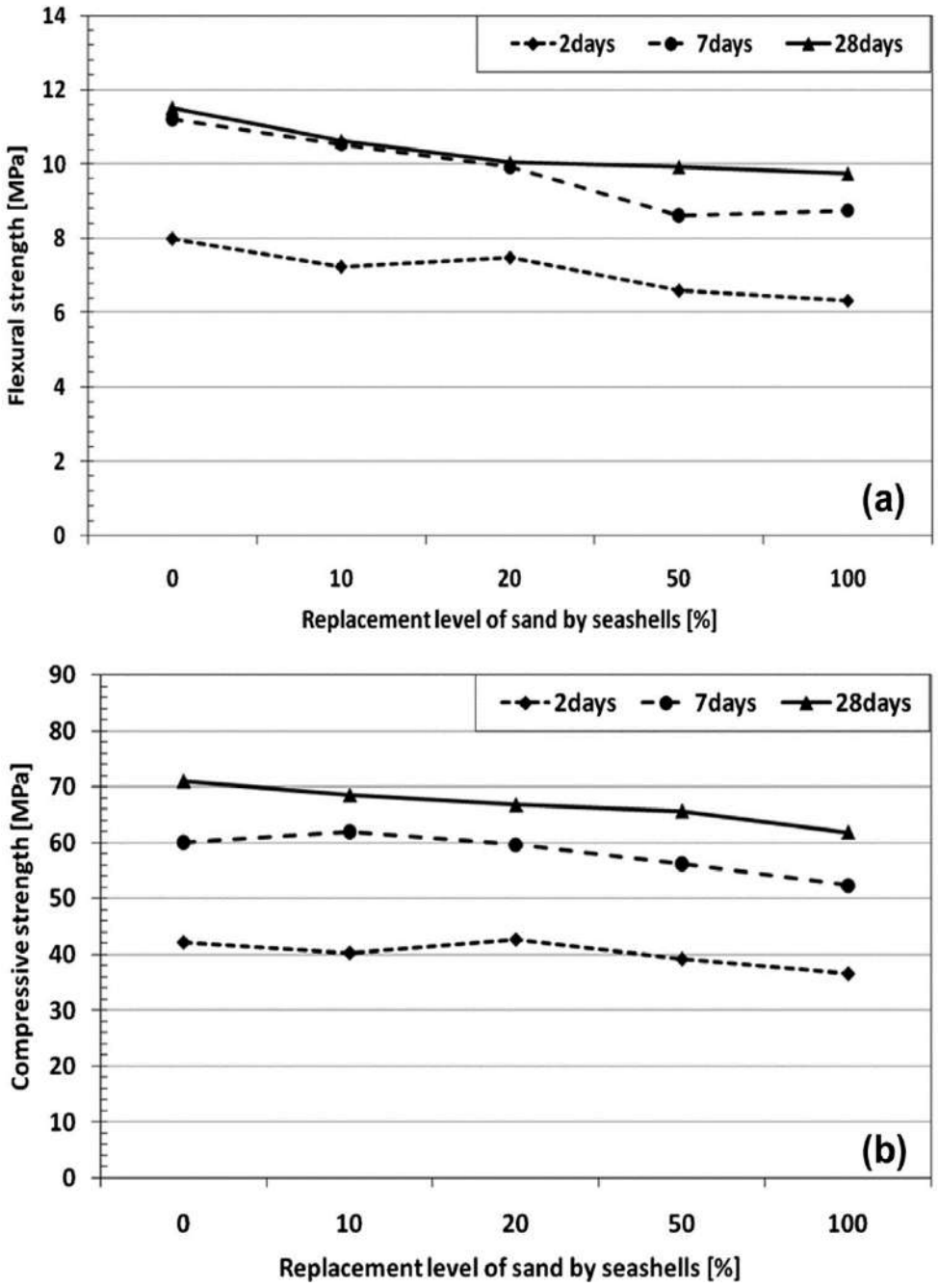


Figure 1.25 : Influence de substitution de sable par le coquillage sur la Rc et Rt de MAP [20].

Nguyen et al [22] ont observé que la résistance à la compression du béton ordinaire est diminuée en fonction de substitution de granulat naturel par les déchets de coquillage (Fig 1.26).

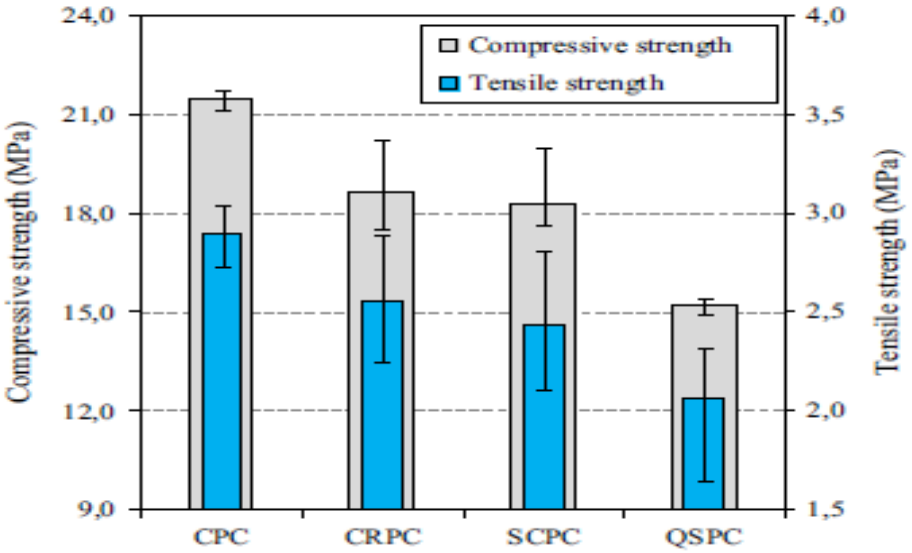


Figure 1.26 : Effet de sable de coquillage sur la résistance à la compression du béton ordinaire [22].

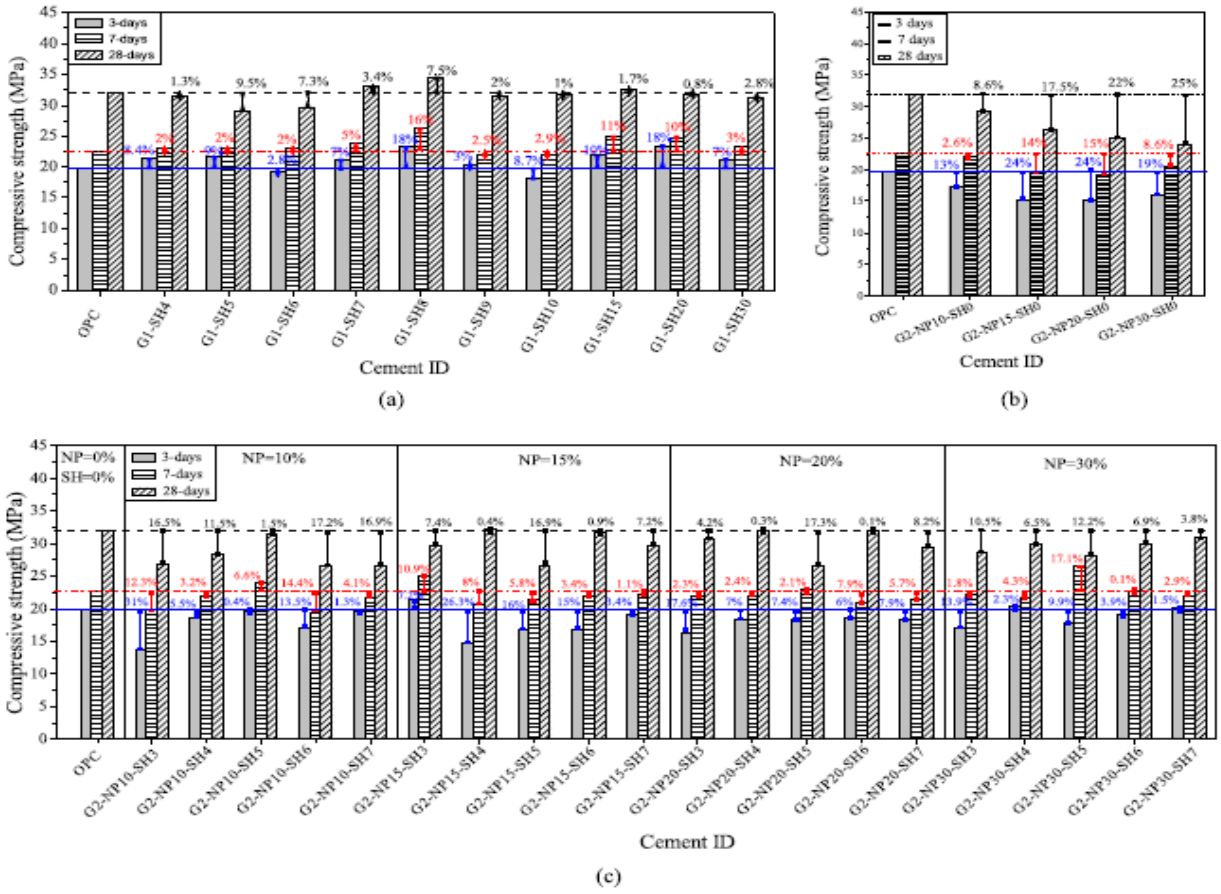


Figure 1.27 : Influence de substitution de ciment par le coquillage sur la Rc de ciment [21].

Soltanzadehet al. [21] ont étudié l'influence de substituions declinker par le déchet de coquillage sur la résistance mécanique du ciment. Ils ont trouvé une amélioration de la

résistance mécanique en fonction d'augmentation de déchets de coquillers (Fig.1.27/a Fig.1.27/b).

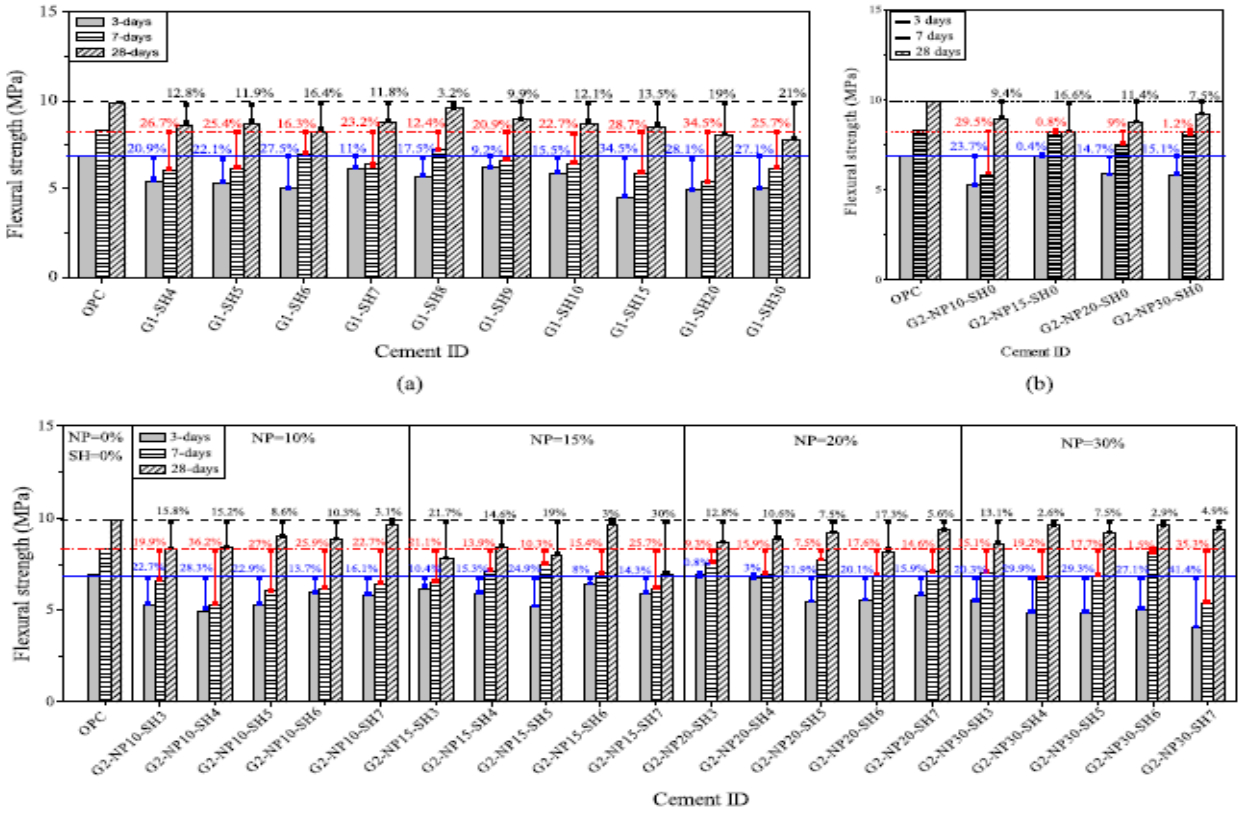


Figure 1.28 : Influence de substitution de ciment par le coquillage sur la Rt de ciment [21].

- **Le module d'élasticité**

Comme les résistances mécanique Safi et al [20] ont constaté que le module d'élasticité de mortier autoplaçant est diminuélégèrement en fonction d'augmentation du pourcentage de coquillers (Fig 1.29).

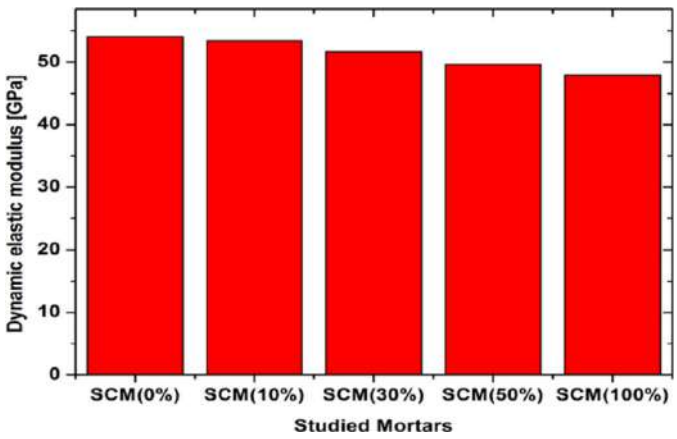


Figure 1.29 : Influence de substitution de sable par le coquillage sur le module d'élasticité de MAP [20].

1.6 Conclusion

Parmi les déchets le plus trouvé dans notre vie quotidienne est les déchets végétaux. Ces dernier génèrent des déchets volumineux par rapport à leurs poids et volume, il est nécessaire donc de trouve les moyens pour les réutilisé et les valoriser dans des plusieurs domaine et notamment le domaine de construction comme un granulat pour un béton ou un mortier.

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

Chapitre 02 :

MATERIAUX ET ESSAIS

2.1 Introduction

Ce chapitre présente à la fois les matériaux que nous utiliserons, et les méthodes qui Seront mises en œuvre dans la suite de ce travail, après on exposera les caractéristique Bien connues à savoir

- la granularité ou le fuseau granulaire du squelette.

- les dosages en sable, ciment, d'addition, d'eau et d'adjuvant.

-La caractérisation des bétons de sable fluide à base de ciment, à l'état frais et à l'état durci, nécessite de définir les corps d'épreuve sur lesquels seront mesurées les grandeurs spécifiques du matériau et les techniques d'essai. Les différents essais faits au cours de ce travail sont

- **Sur béton frais**

  - Etalement
  - Temps d'écoulement
  - Densité

- **Sur béton durci**

  - La résistance a la compression et flexion pour demi-prisme d'éprouvettes prismatiques de dimensions 4×4×16cm
  - Résistance thermique

2.2 Caractérisation des matériaux utilisés

Pour la confection des bétons, des matériaux locaux ont été utilisés et caractérisés expérimentalement au laboratoire de génie civil du Hall de Technologie de l'université de Médéa et suivant les normes en vigueur.

Le choix des matériaux s'est porté, tout d'abord, sur leur disponibilité dans la région (Médéa) et surtout pour fabriquer un béton comparable à celui utilisé dans les chantiers.

2.2.1 Ciment

Le ciment utilisé dans cette étude est le CRS (M'Sila) , ce ciment a été choisi pour sa capacité de résister aux agressions chimiques et pour le fait que tous les travaux en béton enterré sont faits avec ce ciment. Le Ciment CRS (ciment résistant aux sulfates) est constitué de : * 95% de clinker, des constituants secondaires (de 0 à 5%) peuvent être incorporés Dans Ce ciment.

* Du sulfate de calcium sous forme de gypse est rajouté en tant que régulateur de prise. [23]



Figure 2.1 : Le ciment utilisé [24].

- **Analyse et caractérisation**

Le Tableau **2.1** résume l'Analyse chimique du ciment et composition hypothétique du clinker, selon la fiche technique du ciment.

Tableau.2.1.Analyse chimique du ciment [25]

Analyse chimique du ciment	Perte au feu (%)	≤ 4
	Résidus insolubles (%) (NA 5042)	≤ 3
	Teneur en sulfates SO3 (%) (NA 5042)	≤ 3.5
	Teneur en oxyde de magnésium MgO(%)	≤ 5.5
Composition hypothétique du clinker	Silicates tricalciques C3S (%)	≤ 50
	Aluminates tricalciques C3A (%)	≤ 5

- **Essais physiques**

- **La finesse**

La finesse du ciment influe d'une façon considérable sur la résistance mécanique, la consistance normale et le temps de prise. La finesse est déterminée par la surface spécifiquede Blaine. Elle est calculée en fonction du temps à l'aide du perméabilimètre de Blaine d'après la norme [NF P 15-476] **[25]**.

- **La consistance normale**

C'est la quantité d'eau de gâchage qu'il faut ajouter à une quantité de ciment préalablement pesée pour obtenir une pâte dite normale, elle est mesurée à l'aide de l'appareil de Vicat d'après lanorme [NF P 15-431] **[26]**.

- **Le temps de prise**

Le début et la fin de prise sont déterminés à l'aide de l'aiguille de Vicat sur une pâte deconsistance normale placée dans un moule tronconique d'après la norme **[27]**.Le Tableau.**2.2**résume les résultats des essais physiques sur le ciment utilisé.

Tableau.2.2. Caractéristique physiques du ciment. [25]

Caractéristiques	**Valeurs**
Finesse (Cm^2/g)	4050
Consistance normale (%)	27
Le temps de prise (min)	2:40-3:45
Surface spécifique de Blaine (cm^2/g)	3200 ±250

- **Essais mécaniques sur le ciment**

Selon la fiche technique les essais mécaniques sur le ciment ont été effectués conformément la norme NF P 15-471 **[28]** sur des éprouvettes prismatiques 4x4x16 cm^3 à raison de trois éprouvettes rapportées à la moyenne par âge. Le mortier utilisé est un mortier normalisé : 450 g déciment, 1350 g de sable naturel et 225 g d'eau. Les résultats obtenus par cet essai sont acceptables pour la confection d'un béton et sont résumés dans le Tableau.**2.3**.

Tableau. 2.3. Evolution de la résistance du ciment en fonction de l'âge **[28].**

Ages (jour)	Résistance à la compression (MPa)
2	19.3
28	45.7

- **Caractéristiques chimiques et minéralogiques du ciment:**

Les essais de composition du ciment ont été effectués au niveau du laboratoire de département de chimie de la cimenterie La compostions chimique du ciment CRS ainsi que sa composition minéralogique sont données respectivement aux tableaux : [23]

Tableau 2.4 : Compositions chimique du ciment CRS [23]

Elément	SiO2	AL2O3	Fe2O3	Cao	Mgo	SO3	K2O	Na2O	P.F
%	21.33	3.63	4.31		2.29	1.82	0.56	0.09	64.97

Tableau 2.5 : Compostions minéralogique du ciment CRS [23]

Minéraux ciment	C3S (%)	C2S (%)	C3A (%)	C4AF (%)
CRS	60.90	15.23	2.33	13.10

2.2.2 Le sable

Le sable utilisé est un sable roulé provient de la région de Oued-Souf. Il est propre, les grains sont de forme généralement isométrique et arrondie (figure 2.2). Il est séché pondant 24h à température de 120 °C. Les caractéristiques physiques de ce sable sont représenté dans le tableau 2.2 .L'analyse granulométrique de sable utilisée est présentée sur la Figure.2.2 suivante.



Figure 2.2 : Sable utilisé.

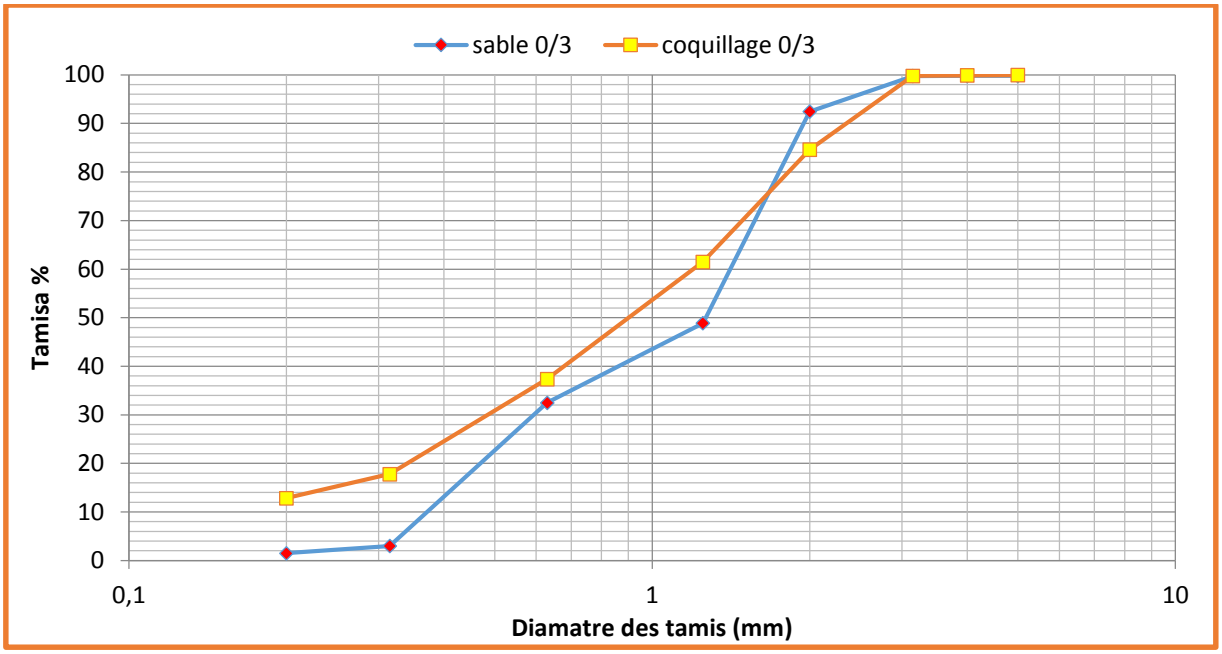


Figure 2.3 : La granulométrie du sable et de déchets de coquillages utilisés.

Tableau.2.6. Propriétés physiques du sable utilisé

Caractéristique	**Type de sable**	**Normes**
Provenance	**Sable**	
Classe granulaire	0 /3	NF EN 933-1**[29]**
Module de finesse	2.25	
Masse volumique absolue (g/cm3)	2.64	NF EN 1097-6**[30]**
Masse volumique apparente (g/cm3)	1.58	NF EN 1097-3**[31]**
Equivalent de sable (%)	à vue : 88.01	NF EN 933-8**[31]**
	à piston : 82.11	

2.2.3 Fillers (marbre)

Les fillers utilises dans notre cas sont de nature marbre. Ils sont obtenus par broyage des déchets de concassage de déchets de marbre. Rappelons que la poudre de marbre sont les plus adaptés au béton et donnent de meilleures performances**.** Leur caractéristique physique est mentionnée dans le Tableau.2.7.

Tableau.2.7Caractéristiques physiques des fins de marbre utilisées.

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

2.2.4 Adjuvant

L'adjuvant utilisé est un super plastifiant haut réducteur d'eau fabriqué par la société, Algérienne Granitex commercialisé sous l'appellation 'MEDAFLOW30', de forme liquide ; de couleur marron ; d'un PH égal à 6-6.5, de densité 1,07 ± 0,01et d'une teneur en chlore < 0.1g/L



Figure 2.4 : Le MEDAFLOW30.

2.2.5 Eau de gâchage

L’eau de gâchage est un élément essentiel pour la fabrication du béton. Elle est ajoutée lors du mélange afin d’hydrater le ciment et permet de lier les constituants du béton entre eux. L’eau rend également le mélange bien plus maniable, ce qui facilite l’application du béton. Elément indispensable pour obtenir du béton, l’eau utilisée doit absolument être propre et ne doit pas être ajoutée avec excès. Si ces deux conditions ne sont pas respectées, votre béton risque d’être fragile et ses performances seront altérées. [32]

2.2.6 Déchets de coquillage

Souvent considérés comme des déchets, les projectiles ont été utilisés dans le cadre de notre projet à d'autres fins. Tout d'abord, ils ont été collectés dans leur source naturelle. Nous les avons ramenés au laboratoire UNV / Médée dans le but de les soumettre à des laveurs consécutifs visant à purifier et éliminer toutes sortes d'impuretés. Ensuite, nous l'avons mis dans un four à 200 ° C pendant 24 heures. À la suite de ce dernier procédé, il a été broyé et tamisé avec un tamis à trous de 3,15 mm, afin d'obtenir les déchets de coquillage de la même forme que le sable utilisé. Il le remplacera en différentes proportions afin d'étudier et d'évaluer le succès de ce procédé.



Figure 2.5 : les étapes de préparation de coquillage.

2.3 Composition des bétons

La composition du béton de sable fluide pour la confection des éprouvettes est basée sur la méthode théorique SABLOCRETE 1994 **[33]**. Le déchet de coquillage incorporé dans la masse

du béton de sablefluide par substitution volumétriquedu sable avec des pourcentages de(0% à100%).Le tableau 2.8 résume les différentes compositions du BSF obtenus :

Tableau 2.8 Compositions des Béton de sable fluide à base de déchet de coquillage pour ($1m^3$).

Béton de sable fluide	Sable (Kg/m^3)	Ciment (Kg/m^3)	Fillers de Marbre (Kg/m^3)	Déchets de coquillage (Kg/m^3)	Eau (l/m^3)	Adj (%)
BSFT	1400	400	200	0	250	1
BSF 10%DC	1252.54	400	200	0	250	1.2%
BSF 20%DC	1106	400	200	147.45	250	1.4%
BSF 30%DC	957.64	400	200	294	250	1.65%
BSF 40%DC	810.19	400	200	442.35	250	1.7%
BSF 50%DC	662.73	400	200	589.8	250	1.4%
BSF 60%DC	515.28	400	200	737.26	250	1.0%
BSF 70%DC	367.84	400	200	884.71	250	0.7%
BSF 80%DC	220.38	400	200	1032.15	250	0.5%
BSF 900%DC	72.92	400	200	1179.62	250	0.4%
BSF 100%DC	0	400	200	1327.07	250	0.3%

Avec :

BSFT : Béton de sable fluide témoin.

BSFDC:Béton de sable fluide à base de déchets de coquillage.

2.4 Malaxage et conservation

Le malaxage des bétons de sable fluide se fait en malaxeur à mortier d'une capacité de 5 L, pour la confection des éprouvettes 4*4*16cm. L'introduction des constituants se fait du plus gros au plus fin. Le but recherché est de répartir, le plus régulièrement possible, chaque constituant afin d'assurer un mélange homogène et d'obtenir ainsi les mêmes propriétés. Le malaxage de chaque mélange se fait de la manière suivante :

- On verse les gros grains (le sable) ;
- Puis en ajoute les fillers et le ciment après on malaxe à sec pendant 30 sec ;
- On verse deux tiers d'eau de gâchage,puis on malaxe pendant 1 minutes ;
- Après on ajoute de super plastifiant avec le tiers de la quantité d'eau nécessaire et on mélange pendant 1 minute ;
- Après, malaxé le mélange à vitesse rapide pendant 3 minutes, puis on laisse le mélange repose 3 minute;
- Puis lancer vitesse rapide pendant 1 minute et 30 sec.

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

➢ Mesure la densité et l'ouvrabilité du béton frais immédiatement au fin malaxage.

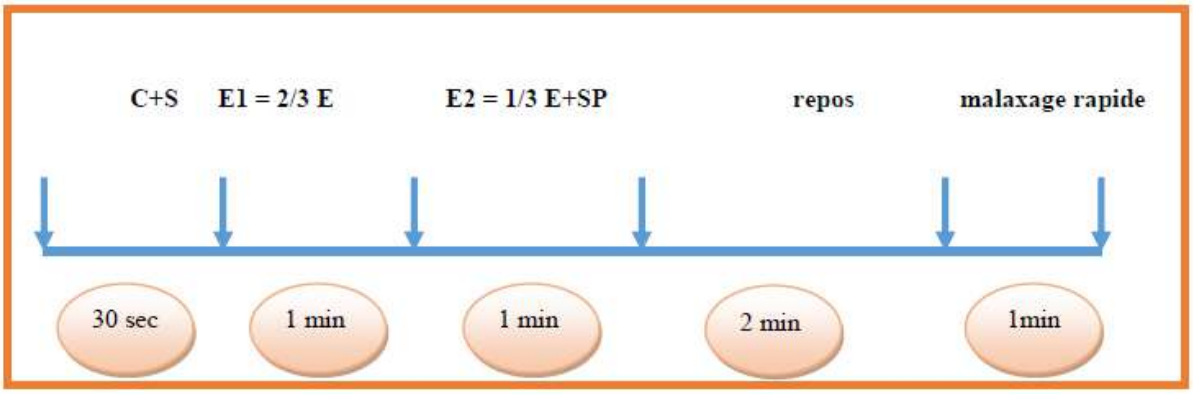


Figure 2.6 : Séquence de malaxage du béton de sable fluide

2.5 Essai réalisé sur le béton

- **A l'état frais**

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

Tableau 2.9 Essais sur bétons frais.

Essais	Appareil	Nombre d'essais
Etalement	Mini Cône	2
Temps d'écoulement	v-funnel	2
Densité	Moule (0.05l) + balance	2

2.5.1 L'étalement au mini-cône

L'essai d'étalement consiste à remplir un moule tronconique place sur une surface horizontale lisse, une fois le moule soulève, le diamètre d'étalement du mortier est mesure suivant deux directions perpendiculaire, la moyenne est retenu. La figure 2.7 montre les étapes de l'essai d'étalement mini cône selon la recommandation EFNARC 2002**[34]**.



Figure 2.7 : Mesure de l'étalement du béton de sable fluide

2.5.2 Ecoulement à l'entonnoir en (V-FUNNEL)

Selon la norme NF EN 12350-9 **[35]** Essai d'écoulement à l'entonnoir en (V-funnel) décrit la méthode de détermination de la durée d'écoulement du BAP à travers l'ouverture d'un entonnoir en V figure 2.13. 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. Figure**. 2.8.**



Figure 2.8 : Essai d'écoulement à l'entonnoir en V**.**

2.5.3 La densité

La masse volumique du béton de sable a été mesurée selon la norme NF EN 12350-6 **[36]**.



Figure 2.9 : Mesure de la densité du béton de sable fluide.

2.6 Préparation et conservation des éprouvettes

Les différents types de bétons de sable sont tous fabriqués dans l'environnement de laboratoire. Le béton a été coulé dans des éprouvettes prismatiques 4x4x16 cm destinées aux essais de compression et de variation dimensionnelles , ainsi que des éprouvettes 4×10×10 cm destinées pour les essais thermiques conformément à la norme NF EN 12390-2 [37]. Les éprouvettes

confectionnées sont au nombre total de 160, et elles ont été coulées dans les moules en plusieurs couches

Juste après la confection, toutes les éprouvettes ont été couvertes afin d'éviter le risque d'évaporation excessive et le retrait plastique. Après 24 heures de la confection, les éprouvette sont été démoulées et conservées dans l'eau.

Les échantillons conservés dans l'eau ont été séchés avant l'âge d'essai et jusqu'à poids constant.



Figure 2.10 : Fabrication des éprouvettes.

Après la confection, toutes les éprouvettes ont été couvertes afin d'éviter le risque d'évaporation excessive et le retrait plastique. Après 24 heures de la confection, les éprouvettes ont été démoulées et conservées dans l'eau à 20°C ± 2°C.

2.7 Essais réalisé à l'état durci

Nous avonsfait deux essais à l'état durcis, il s'agit d'essais de l'essai de la résistance à la compression et à la traction par flexion.

Tableau. 2.10. Essais de caractérisation sur bétons durci.

Essais	Appareil	Nombre d'essais
Compression	Presse hydraulique	6
flexion	Presse hydraulique	6

2.7.1 Essais de compression

La résistance à la compression a été mesurée selon la norme [NF EN 196-1] [38] par compression axiale pour demi-prisme d'éprouvettes prismatiques de dimensions 4×4×16 cm, à 7, 28 et 90 jours, à l'aide d'une presse hydraulique de capacité maximale de 2000 kN conforme à la norme [NF P 18-412] [39] (Figure.2.11).



Figure 2.11 : Presse hydraulique.

Pendant l'essai la vitesse de chargement est constante, la résistance à la compression est le rapport entre la charge de rupture et la section transversale de l'éprouvette correspond à la contrainte moyenne d'écrasement sur trois éprouvettes à chaque âge d'essai (7j.28j.90j). (Figure. **2.12**).

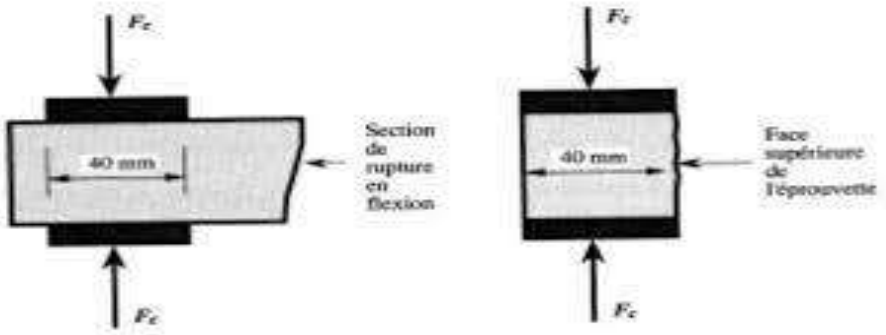


Figure 2.12 : Dispositif de rupture à la compression [40].

Les demi-prismes de l'éprouvette obtenus après rupture à la traction seront rompus à la compression comme indiquée sur la Figure**. 2.12.**

La contrainte de rupture est calculée comme suit :

$$R_c = F_c / b^2$$

R_c: Résistance à la compression en (MPa).

F : Charge de rupture en (N).

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

2.7.2 Résistance à la flexion

Il consiste à rompre en flexion (Par trois points), des éprouvettes de (4x4x16) cm de côté **a** et de longueur **L**. La figure II.20 montre les étapes de l'essai selon la norme [EN 196-1] **[41]**



Figure 2.13 : Essai de traction par flexion

2.8 Variables étudiées

Les variables d'étude utilisés au cours de ce travail sont résumés dans la Figure.**2.14** Suivante

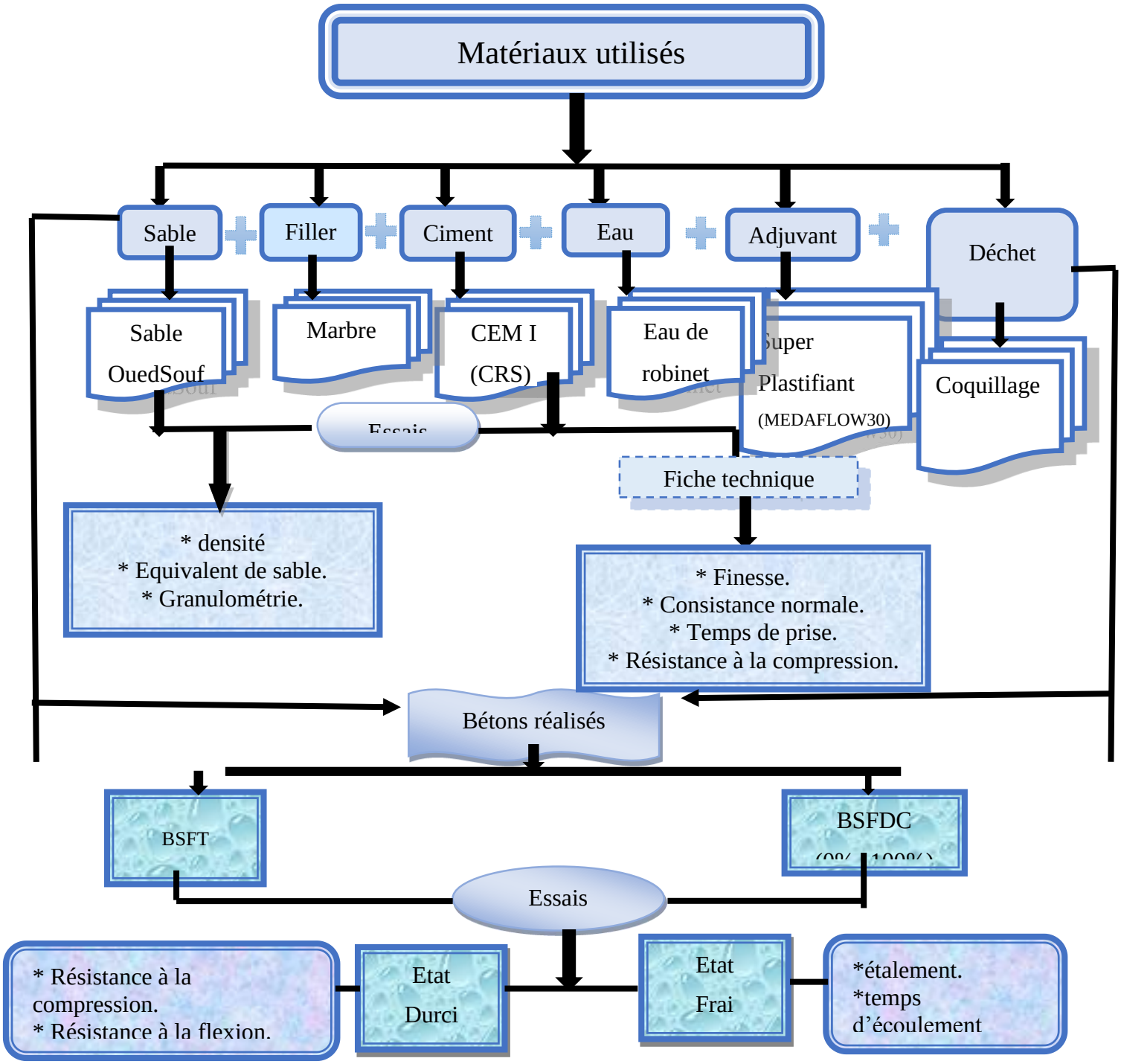


Figure 2.14 : Variables étudiées.

2.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons défini et défini des matériaux utilisés utilisé au court de ce travail pour confectionné notre mélanges le ciment, le marbre, le sable, le mélange d'eau et les déchets de coquillage ,puis on a donné une appréciation sur la composition des mélange et on a présenté finalement les différents essais réalisé sur les composites obtenus .

Chapitre 03 :

Résultats et interprétations

3.1 Introduction

Dans ce dernier chapitre on présente les résultats obtenus pour les différents essais réalisés sur le béton de sable fluide frais et durci. Les résultats sont rassemblés ci-après et les valeurs données sont les moyennes arithmétiques des trois résultats d'essais.

3.2 Influence de déchets de coquillage sur le comportement du BSF

3.2.1 Caractéristiques du BSF à l'état frais

3.2.1.1 Etalement

Les résultats sont représentés sur un histogramme (Figure 3.1 et 3.2) nous permet de comparer les valeurs du l'étalement des différents bétons de sable fluide réalisés.

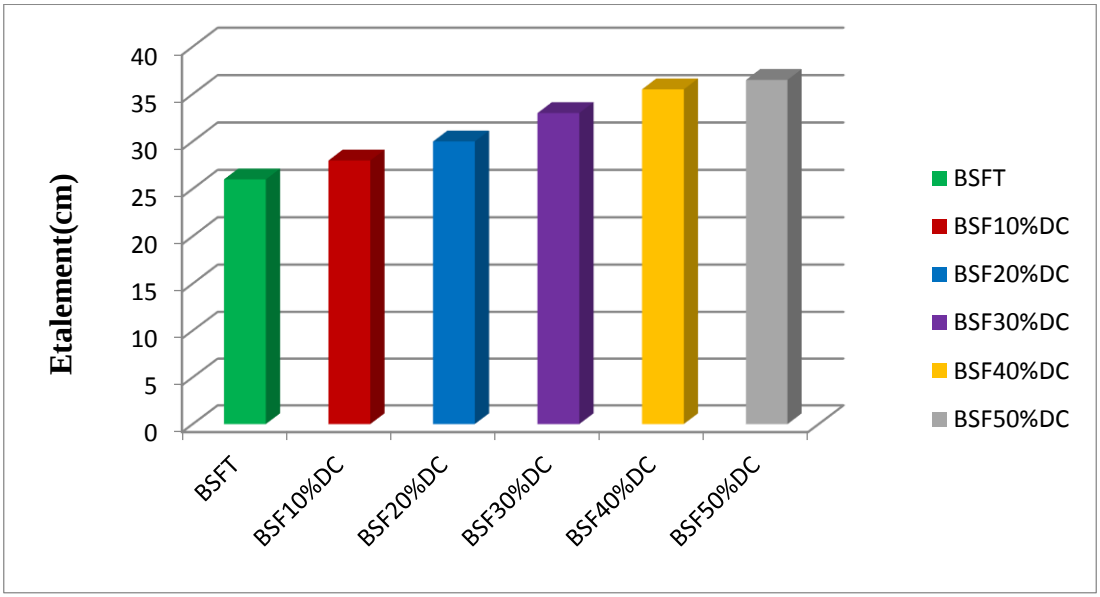


Figure 3.1 : Étalement de BSF à base de déchets de coquillage.

Les résultats obtenus montrent que l'étalement de bétons de sable fluide varie en fonction du pourcentage de substitution du sable par le déchet de coquillage. On constate aussi que plus le pourcentage de déchets coquillage augmente, plus l'étalement est augmenté .Cela est due peut l'absorption de déchets de coquillage qui est plus faible par rapport à l'absorption du sable substitué. Safi et al [42] ont trouvé que le remplacement de (0% à 100%) du sable naturel par le déchet de coquillage (concassé) influe négativement sur la fluidité du mortier auto plaçant

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 (compris entre 26 (Cm) et 28 (Cm) est visé) (Voir tableau de formulation)

3.2.1.2 Densité

La densité des différents bétons réalisés est résumée dans les figures ci-dessous :

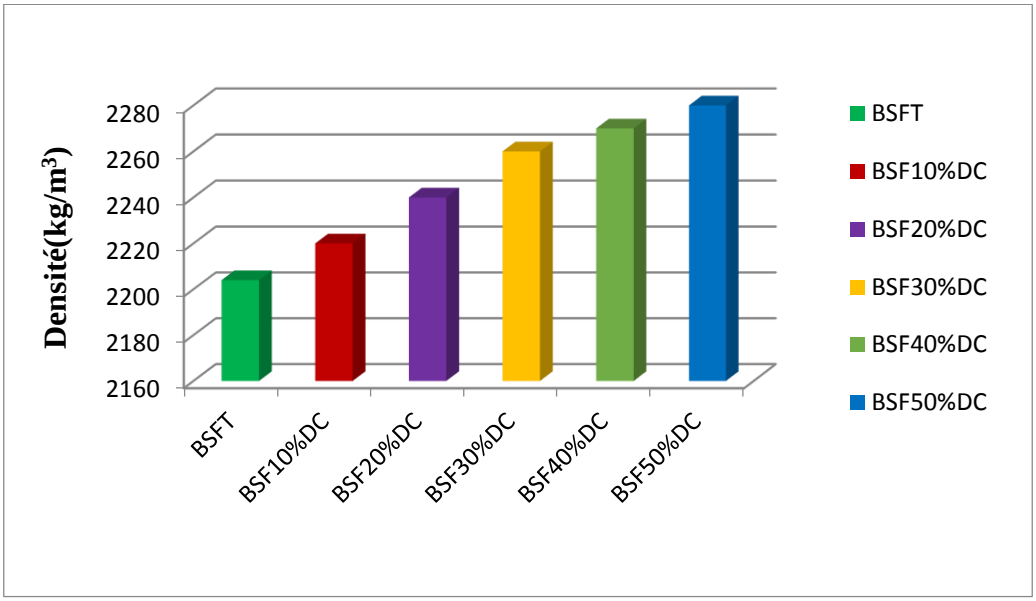


Figure 3.2 : La densité des BSAPG à base de déchets de granito.

Les résultats obtenus montrent que la substitution du sable par le déchet de coquillage augmente la densité du béton de sable fluide. Cette augmentation est due sans doute à la densité des grains de coquillage qu'est plus grande que celle du sable substitute. Ce résultat confirme les résultats de Safi et al **[42].**

3.2.2 Caractéristiques du BSF à l'état durci

- **Résistance à la compression et à la traction par flexion**

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 le tableau suivant :

Tableau 3.1. Résistance mécanique des BSF à base de déchets de coquillage à 7 Jrs

DC (%)	Résistance à la compression	Résistance à la traction par flexion
BSFT	23.10	6.78
BSF 10%DC	22,73	9,83
BSF 20%DC	28,2	12,54
BSF 30%DC	26,38	9,56

Les résultats présentés montrent que la résistance à la compression et à la traction par flexion sont améliorés d'environ 18% et 46% respectivement à l'âge de 28 jours avec un taux de 20% d'incorporation de déchets de coquillage. Cette augmentation est liée peut être aux grains de coquillage qui sont plus dure que ceux des grains de sable substitué. Ce résultat confirme les résultats de Soltanzadeh [43]

3.3 Conclusion

Sur la base des résultats obtenus on conclut que :

- L'étalement de BSF est augmenté en fonction d'augmentation de déchets de coquillage.
- La densité de BSF est augmentée en fonction d'augmentation de déchets de coquillage dans le mélange
- La résistance à la compression de BSF à l'âge de 7 jours argumente d'environ 18% en fonction de substitution de 20% de sable naturel par les déchets de coquillage
- La résistance à la traction par flexion de béton de sable fluide à l'âge de 7 jours est augmenté d'envions 46% en fonction d'incorporation de 20% de déchets de coquillage.

Conclusion générale et recommandations

Conclusions générales

L'objectif essentiel de ce travail et de voir l'influence de déchets de coquillage sur les caractéristiques de béton de sable fluide à l'état frais et durci. Les résultats de cette étude ont donné les conclusions suivantes :

- L'étalement du béton de sable fluide est augmenté en fonction d'augmentation de pourcentage de déchets de coquillage.
- La densité du béton de sable fluide est augmentée en fonction d'augmentation de pourcentage de déchets de coquillage.
- La résistance à la compression de béton de sable fluide à l'âge de 7 jours est augmentée d'environ 18% en fonction de substitution de 20% de sable naturel par les déchets de coquillage.
- Une augmentation d'environ 46% de la résistance à la traction par flexion de béton de sable fluide est enregistrée en fonction de substitution de 20% de sable par les déchets de coquillage.

Finalement, sur la base des résultats obtenus, l'application de ce type des bétons est recommandé dans les éléments de béton structuraux (Panneaux préfabriqué, dallage, poteau, poutre).L'emplois et la valorisation des déchets de coquillage comme un matériau alternative dans les domaines de construction peut contribuer à la protection de l'environnement et l'économie du pays.

Recommandations

Nous recommandons pour des futurs travaux l'étude :

- Durabilité du béton de sable fluide à base de déchets coquillage.
- Influence de déchets céramique et de déchets de coquillage sur la performance de BSF.
- Influence des fibres métalliques et de déchets coquillage sur le comportement de béton de sable fluide.
- Propriété thermiques des bétons de sable fluide à base déchets de coquillage

Références Bibliographiques

Références bibliographiques

[1]https://sitetom.syctom-paris.fr/les-dechets/les-categories-de-dechets.html [1]

[2]**KAN A., AND DEMIRBOGA R. A., NOVEL MATERIAL FOR LIGHTWEIGHT CONCRETE PRODUCTION, CEM. CONCR. COMPOS., 31 (2009) 489–95**

[3]https://www.futura-sciences.com/planete/definitions/developpement-durable-recyclage-5774/

[4]http://saintsauveur3c1516g2.over-blog.com/2015/12/les-trois-type-de-recyclage.html

[5]http://cogetrad.com/valorisation-des-dechets/

[6]https://optigede.ademe.fr/fiche/collecte-des-coquillages

[7]https://fr.vikidia.org/wiki/Coquillage

[8]https://chefsimon.com/gourmets/chef-simon/recettes/ouvrir-et-decoquiller-une-coquille-saint-jacques

[9]https://restaurantcfavm.jimdofree.com/produits/coquillages/

[10]https://www.futura-sciences.com/planete/dossiers/zoologie-coquille-mollusques-memoire-environnement-662/page/3/

[11]https://journals.openedition.org/tc/6685

[12]https://www.ovive-sa.fr/traitement-des-dechets/professionnels/?fbclid=IwAR3lvvRwpTOc7R_lytfUxj5h7wtbFO6IXjHZ3CYBcn-Xm31z6DIwA1jvy78

[13]https://www.google.com/search?q=%D8%A7%D9%84%D8%B2%D8%AE%D8%B1%D9%81%D8%A9+%D8%A8%D8%A7%D9%84%D8%A7%D8%B5%D8%AF%D8%A7%D9%81&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwj4ybi_xNnpAhUhxoUKHSzLDwwQ_AUoAXoECAsQAw&biw=1366&bih=608#imgrc=Rf2zHonw6K2WvM

[14]http://thesis.univ-biskra.dz/2429/4/Chapitre%2002.pdf

[15]https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fjournals.openedition.org%2Fabe%2F704&psig=AOvVaw0i9Iq82w5kWFYLs8f6_ViL&ust=1590589901719000&source=images&cd=vfe&ved=2ahUKEwj61--h39HpAhXJwYUKHb1zCv0Qr4kDegUIARDFAQ

[16]https://www.google.com/search?source=hp&ei=O4vRXq-UOc-8aauDiaAH&q=Techniques+particuli%C3%A8res+de+beton+de+sable&oq=Techniques+particuli%C3%A8res+de+beton+de+sable&gs_lcp=CgZwc3ktYWIQAzIFCCEQoAE6BggAEBYQHjoICCEQFhAdEB46BwghEAoQoAE6BAghEBVQ2xVYsXlg9n1oAnAAeACAAdwJiAHpSJIBDTItNS44LjEuMi4yLjKYAQCgAQKgAQGqAQdnd3Mtd2l6&sclient=psy-ab&ved=0ahUKEwjvna2WjtrpAhVPXhoKHatBAnQQ4dUDCAc&uact=5]

[17]https://www.google.com/search?q=Le+b%C3%A9ton+de+sable+en+projection&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwiCguLq4tnpAhUQCWMBHfOPDuQQ_AUoAXoECAwQAw&biw=1366&bih=657#imgrc=A3Hn9woWgHlv6M

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

[19]https://www.google.com/search?source=hp&ei=OoLSXpCqCJLyatK5j7gN&q=la+formule+pr%C3%A9c%C3%A9dente+de+Caquot+pour+formulation+d%E2%80%99un+b%C3%A9ton+de+sable&oq=la+formule+pr%C3%A9c%C3%A9dente+de+Caquot+pour+formulation+d%E2%80%99un+b%C3%A9ton+de+sable&gs_lcp=CgZwc3ktYWIQAzoFCCEQoAE6BAghEBVQkBNYtvwBYPe1AmgAcAB4AIAB9gOIAawXkgELMC44LjIuMS4xLjGYAQCgAQKgAQGqAQdnd3Mtd2l6&sclient=psy-ab&ved=0ahUKEwiQr-7c-dvpAhUSuRoKHdLcA9cQ4dUDCAc&uact=5

[20]Brahim Safi , Mohammed Saidi , Abdelhakim Daoui , Ahmed Bellal , Ali Mechekak , Kamel Toumi ,The use of seashells as a fine aggregate (by sand substitution)in self-compacting mortar (SCM),Construction and Building Materials 78 (2015) 430–438

[21]Fatemeh Soltanzadeh , Mojtaba Emam-Jomeh , Ali Edalat-Behbahani , Zahra Soltan-Zadeh, Development and characterization of blended cements containing seashell powder, Construction and Building Materials 161 (2018) 292–304

[22]Dang Hanh Nguyen , Mohamed Boutouil , Nassim Sebaibi , Fabienne Baraud , Lydia Leleyter, Durability of pervious concrete using crushed seashells, Construction and Building Materials 135 (2017) 137–150

[23]http://dspace.univ-djelfa.dz:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/1117/chapiter%2002.pdf?sequence=3&isAllowed=y

[24]https://www.google.com/search?q=ciment+%D8%A7%D9%84%D9%85%D9%82%D8%A7%D9%88%D9%85&tbm=isch&source=iu&ictx=1&fir=9aTW10H6UfIyeM%253A%252CPgD2g62XzBGoBM%252C_&vet=1&usg=AI4_-kTQ-y_KlqGkxfyoPwsoUa-lO24Y4A&sa=X&ved=2ahUKEwj_povJ79npAhWRyoUKHeURBkgQ9QEwAXoECAoQHQ#imgrc=9aTW10H6UfIyeM

[25]http://dspace.univ-djelfa.dz:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/1117/chapiter%2002.pdf?sequence=3&isAllowed=y

[26]https://www.google.com/search?q=NF+P+15-431&oq=NF+P+15-431&aqs=chrome..69i57.2521j0j7&sourceid=chrome&ie=UTF-8

[27]http://www.cours-genie-civil.com/wp-content/uploads/TP7_Etud_Ciment_Prise_Consistance_4_4_16_laboratoire_materiaux.pdf

[28]http://thesis.univ-biskra.dz/1105/6/Chapitre%2004.pdf

[29]https://www.google.com/search?source=hp&ei=yZTRXrXMCeiKlwSC_pCQCQ&q=+NF+EN+933-1&oq=+NF+EN+933-1&gs_lcp=CgZwc3ktYWIQAzICCAAyAggAMgIIADICCAAyBggAEBYQHjIGCAAQFhAeMgYIABAWEB4yBggAEBYQHjIGCAAQFhAeMgYIABAWEB5QgBZYgBZg3ENoAHAAeACAAasBiAGrAZIBAzAuMZgBAKABAqABAaoBB2d3cy13aXo&sclient=psy-ab&ved=0ahUKEwj11Kmkl9rpAhVoxYUKHQI_BJIQ4dUDCAc&uact=5

[30]https://www.google.com/search?source=hp&ei=yZTRXrXMCeiKlwSC_pCQCQ&q=NF+EN+1097-6&oq=NF+EN+1097-6&gs_lcp=CgZwc3ktYWIQAzICCAAyAggAMgYIABAWEB5QqglYqglg_xhoAHAAeACAAZoBiAGaAZIBAzAuMZgBAKABAqABAaoBB2d3cy13aXo&sclient=psy-ab&ved=0ahUKEwj11Kmkl9rpAhVoxYUKHQI_BJIQ4dUDCAc&uact=5

[31]https://www.google.com/search?source=hp&ei=yZTRXrXMCeiKlwSC_pCQCQ&q=NF+EN+1097-3&oq=NF+EN+1097-3&gs_lcp=CgZwc3ktYWIQAzICCAAyBggAEBYQHlCqDFiqDGDQFWgAcAB4AIABmASIAZgEkgEDNS0xmAEAoAECoAEBqgEHZ3dzLXdpeg&sclient=psy-ab&ved=0ahUKEwj11Kmkl9rpAhVoxYUKHQI_BJIQ4dUDCAc&uact=5

[32]http://www.guidebeton.com/eau-gachage

[33]https://www.ifsttar.fr/collections/BLPCpdfs/blpc__205_49-63.pdf

[34]https://www.google.com/search?ei=k3jSXoSfGOyGjLsP8_mx-AE&q=essai+de+l%27%C3%A9talement+EFNARC+2002+de+4*4*16&oq=essai+de+l%27%C3%A9talement+EFNARC+2002+de+4*4*16&gs_lcp=CgZwc3ktYWIQAzoECAAQRzoECCEQFToFCCEQoAFQmg5Yzz9g7kZoAHABeACAAZ8CiAHuD5IBBTAuNi40mAEAoAEBqgEHZ3dzLXdpeg&sclient=psy-ab&ved=0ahUKEwjEtNzC8NvpAhVsA2MBHfN8DB8Q4dUDCAw&uact=5

[35]https://www.google.com/search?q=la+norme+NF+EN+12350-9+Essai+d%27%C3%A9coulement+%C3%A0+l%E2%80%99entonnoir+en+(V-funnel&spell=1&sa=X&ved=2ahUKEwjSvpOHm9rpAhVPPBoKHeUnBxoQBSgAegQIDBAo&biw=1366&bih=657

[36]https://www.google.com/search?source=hp&ei=DJjRXo6gL8qKlwTV54_YCQ&q=la+norme+NF+EN+12350-6+&oq=la+norme+NF+EN+12350-6+&gs_lcp=CgZwc3ktYWIQDDIFCAAQzQJQtwxYtwxg6ytoAHAAeACAAZYCiAGWApIBAzItMZgBAKABAqABAaoBB2d3cy13aXo&sclient=psy-ab&ved=0ahUKEwiO1uOymtrpAhVKxYUKHdXzA5sQ4dUDCAs

[37]https://www.google.com/search?ei=sJvRXvm4E62alwSy9Kv4Dg&q=la+norme+NF+EN+12390-2+&oq=la+norme+NF+EN+12390-2+&gs_lcp=CgZwc3ktYWIQAzoECAAQE1D6gTBYvp8wYOSuMGgDcAB4AIAB4RCIAeEQkgEDOS0xmAEAoAEBoAECqgEHZ3dzLXdperABAA&sclient=psy-ab&ved=0ahUKEwj50PzundrpAhUtzYUKHTL6Cu8Q4dUDCAw&uact=5

[38]https://www.google.com/search?source=hp&ei=95nRXuitEIayatyRr5gG&q=la+norme+nf+en+196+1+de+compression+-&oq=la+norme+%5BNF+EN+196-1+de+compresio&gs_lcp=CgZwc3ktYWIQARgAMggIIRAWEB0QHjIECCEQCjoGCAAQFhAeUOEQWIVHYLxKaAFwAHgAgAGaBIgBmRqSAQswLjcuNC4yLjAuMZgBAKABAqABAaoBB2d3cy13aXqwAQA&sclient=psy-ab

[39] https://trid.trb.org/view/1044017

[40**]**https://www.google.com/search?q=Compression+de+mortier+4*4*16&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwj26vW-h9rpAhVpAmMBHScpA0IQ_AUoAXoECAwQAw&biw=1366&bih=657#imgrc=gElZHMG3cdNoMM

[41**]**https://www.google.com/search?source=hp&ei=95nRXuitEIayatyRr5gG&q=la+norme+%5BEN+196-1+de+flexion&oq=la+norme+%5BEN+196-

1+de+flexion&gs_lcp=CgZwc3ktYWIQAzIICCEQFhAdEB46BggAEBYQHjoFCCEQoAFQ5RBYwENglk9oAHAAeACAAZIFiAG8GJIBCTAuNi40LjUtMpgBAKABAqABAaoBB2d3cy13aXo&sclient=psy-ab&ved=0ahUKEwiohdWcnNrpAhUGmRoKHdzIC2MQ4dUDCAc&uact=5

[42] Brahim Safi , Mohammed Saidi , Abdelhakim Daoui , Ahmed Bellal , Ali Mechekak , Kamel Toumi ,The use of seashells as a fine aggregate (by sand substitution) in self-compacting mortar (SCM),Construction and Building Materials 78 (2015) 430–438

[43] Fatemeh Soltanzadeh , Mojtaba Emam-Jomeh , Ali Edalat-Behbahani , Zahra Soltan-Zadeh, Development and characterization of blended cements containing seashell powder, Construction and Building Materials 161 (2018) 292–304

Annexe





Figure.A1 **:** Collecte des coquillages.



Figure A.2 **:** Concasseur électrique.



Figure.A.3 **:** los Angeles**.**



Figure A.4 **:** DC de coquillage.



Figure A.5 : Tamiseuse électrique.



Figure A.6 **:** Malaxeur électrique



Figure A.7 **:** essai de l'étalement**.**