



Faculté : des Sciences de l'Ingénierat

Département : de Génie Civil

Domaine : Sciences et Techniques

Filière : Génie civil

Spécialité : Matériaux de Génie civil

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème :

**Influence de l'incorporation du sable recyclé de béton,
comme granulats de base et fillers, sur les propriétés du
béton de sable.**

Présenté par : 1- *M^{me} BOUFERSAOUI Manel*

2- *M. REZZEG BARA Maamer*

Encadrant : Dr. BERREDJEM Layachi

Jury de Soutenance :

M. ARABI Nouredine	Pr.	Université Badji Mokhtar – Annaba	Président
M. BERREDJEM Layachi	MCB	Université Badji Mokhtar – Annaba	Encadrant
M ^{me} MELAIS Fatma Zohra	MCB	Université Badji Mokhtar – Annaba	Examinatrice

Table des matières

Table des matières	II
Liste des figures.....	V
Liste des tableaux.....	VI
Remerciements	VII
المخلص.....	VIII
Résumé.....	IX
Abstract.....	10
Introduction générale	12
I. Chapitre I Etat de connaissance sur les granulats recyclés	15
I.1 Introduction :.....	15
I.1.1 Types de déchet de construction :.....	15
I.2 Valorisation des déchets de construction et de démolition :.....	16
I.2.1 Valorisation des déchets de démolition :.....	17
I.2.2 Recyclage des déchets :	17
Collecte de déchets	17
Transformation	18
Commercialisation et consommation.....	18
I.3 Les granulats recyclés :.....	18
I.3.1 Définition :	18
I.3.2 Introduction	18
I.3.3 Origine des granulats recyclés.....	19
I.3.4 Types de granulats recyclés :.....	21
I.3.5 Elaboration des granulats recyclés :	21
I.3.6 Mode d'exploitation :	23
I.4 Propriétés des granulats recyclés :	24
I.4.1 Distribution granulométrique	24
I.4.2 Masse volumique	24
I.4.3 L'absorption d'eau.....	24
I.4.4 La porosité:.....	25
I.4.5 Résistance à l'abrasion.....	25
I.4.6 Résistance du béton d'origine (béton parent).....	27
I.5 Comparaison de béton ordinaire avec le béton recyclée :.....	28
I.5.1 La maniabilité.....	28
I.5.2 La densité.....	29

I.5.3	Le retrait.....	29
I.5.4	La résistance à la compression.....	29
I.5.5	La résistance à la traction par fendage	30
I.6	Propriétés essentielles des bétons de granulats recyclés :.....	30
I.6.1	Propriétés rhéologiques :.....	30
I.6.2	Propriétés physiques :	31
I.6.3	Propriétés mécaniques :.....	33
I.6.4	Durabilité.....	34
II.	Chapitre II Etat de connaissance sur le béton de sable	38
II.1	Introduction :	38
II.2	Définition :	38
II.3	Domaine d'utilisation	39
II.4	Formulation.....	40
II.5	Constituant de béton de sable :.....	41
II.5.1	Sables.....	41
II.5.2	Ciments	41
II.5.3	Additions minérales.....	42
II.5.4	L'eau de gâchage :.....	43
II.5.5	Les adjuvants :.....	43
II.5.6	Autres ajouts.....	44
II.6	Propriétés générales.....	44
II.6.1	Granulométrie / maniabilité	44
II.6.2	Granulométrie/ résistance.....	46
II.6.3	Propriétés spécifique :.....	47
II.6.4	Propriétés de béton de sable recyclé	53
II.7	Formulation de béton de sable	53
II.7.1	Estimation du dosage en fines d'un béton de sable.....	53
II.7.2	Porosité et dosage en eau dans le béton sable	53
II.7.3	Estimation du dosage en sable.....	54
II.7.4	Estimation de la résistance en compression	54
	Chapitre III :.....	57
III.	Caractérisation des matériaux et formulation du béton de sable	57
III.1	Introduction	57
III.2	Matériaux utilisés	57
III.2.1	Ciment.....	57

III.2.2	Fillers	58
III.2.3	Sables	58
III.2.4	Adjuvants	60
III.2.5	Eau	60
III.3	Essais de caractérisation	60
III.3.1	Analyse granulométrique	60
III.3.2	Module de finesse	61
III.3.3	Mesure de la propreté (l'essai d'équivalent de sable)	61
III.3.4	Masse volumique apparente	62
III.3.5	Masse volumique absolue	62
III.3.6	Teneur en eau	63
III.3.7	Résultat	63
III.4	Formulation de béton de sable	65
III.5	Conclusion	70
Chapitre IV :		72
Synthèse sur des bétons de sable à base de différents types de sables		72
III.6	Introduction	72
III.7	Matériaux utilisés	72
III.8	Propriétés rhéologiques	73
III.9	Comportements mécaniques	73
IV.	Conclusion générale	76
V.	Références bibliographiques	78

Liste des figures

Figure II-1	Photos de déchets de chantier	15
Figure II-2	Photos des déchets de démolition	16
Figure II-3	Photos des déchets de démolition	17
Figure II-4	Photos des déchets d'enrobés.....	19
Figure II-5	Stock à l'air libre de produit fini.....	24
Figure II-6	Relation entre les valeurs à l'abrasion Los Angeles et la résistance en compression du béton parent [20].	26
Figure II-7	Relation entre la quantité de mortier attaché et la densité [20].	27
Figure II-8	Relation entre la quantité de mortier attaché et la capacité d'absorption d'eau [20].	27
Figure II-9	Rapport entre la résistance à la traction par fendage et la résistance à la compression [66]	34
Figure III-1	Domaines d'utilisation du béton de sable	40
Figure III-2	Influence de la nature du sable sur la maniabilité (avec fines d'addition calcaires).....	45
Figure III-3	Maniabilité en fonction de module de finesse [Sablocrete, 1994].....	46
Figure III-4	Effets du dosage et de la finesse de d'addition sur la résistance	46
Figure III-5	Influence de la nature de l'addition sur le niveau de résistance	47
Figure III-6	Effets de la granularité sur la résistance	47
Figure III-7	Variation de l'adhérence d'une armature en fonction de la formulation	48
Figure III-8	Influence de la résistance en traction du béton de sable sur l'adhérence des armatures	48
Figure III-9	Courbe de fatigue	49
Figure III-10	Retrait d'auto-dessiccation.	50
Figure III-11	Retrait total.....	50
Figure III-12	Coefficient d'activité du filler calcaire [Sablocrete, 1994]	55
Figure III-13	Organigramme de formulation du béton de sable.....	55
Figure IV-1	Préparation des Filler recyclé.....	58
Figure IV-2	Photo de sable de carrière utilisé.....	59
Figure IV-3	Photo du Sable recyclé utilisé	59
Figure IV-4	Etapes de préparation du sable recyclé	60
Figure IV-5	Photos des tamis utilisés.....	61
Figure IV-6	Essai d'équivalent de sable des sables utilisés.....	62
Figure IV-7	Essai de mesure de la masse volumique apparente.....	62
Figure IV-8	Mesure de la masse volumique apparente absolue au pycnomètre	63
Figure IV-9:	Courbes granulométrique des sables utilisés	65
Figure IV-1	Morphologie et état de surface des types de sable par le MEB [Melais & al. 2015].....	72

Liste des tableaux

Tableau III-1	Analyse chimique du ciment utilisé	57
Tableau III-2	Caractéristiques physiques du ciment	57
Tableau III-3	Caractéristique de filler de calcaire	58
Tableau III-4	Caractéristiques de l'adjuvant utilisé.....	60
Tableau III-5	Caractéristique physiques des sables utilisés	63
Tableau III-6	Analyse granulométrique du sable recyclé	63
Tableau III-7	Analyse granulométrique du sable de carrière.....	64
Tableau III-8	Résultats de la formulation de béton de sable	69

Remerciements

Avant tout, nous tenons à remercier Dieu le tout puissant pour nous avoir donné la force et la patience pour mener à terme ce travail.

Nous remercions notre encadreur Mr L. Berredjem, pour nous avoir proposé un sujet passionnant, pour ses nombreuses recommandations et ses encouragements permanents.

Nos vifs remerciements à Monsieur le professeur Noureddine Arabi pour avoir aimablement accepté de présider le jury de notre soutenance. Nos chaleureux remerciements et toute notre gratitude au docteur Fatma Zohra Melais pour avoir accepté d'être examinatrice de ce travail et pour ses directives constructives.

Nous tenons à exprimer toutes nos reconnaissances à tous les enseignants qui nous ont formés, et leur tête le chef de département de Génie civil, Monsieur Faycal Slimani, pour sa gentillesse et sa disponibilité. Nos remerciements vont aussi tout naturellement pour le personnel technique du laboratoire de notre département de Génie Civil, MM. Khair Eddine Khoualdi et Kamel Akroum pour leur soutien qu'ils nous ont apporté.

Nos remerciements s'adressent également à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour l'accomplissement de ce travail, Enseignants, Collègues et Amis.

Nos pensées vont finalement à toutes nos familles et particulièrement à nos parents pour leurs soutiens et leurs encouragements permanents durant toutes nos études.

Manal et Maamer

المخلص

في سياق التنمية المستدامة، فإن استعادة نفايات البناء والأشغال العامة ورسكلتها في مشاريع الهندسة المدنية يجعل من الممكن التغلب على نقص الحصى والتخلص من النفايات. من هنا تنبثق فكرة تصنيع مواد بناء جديدة من هاته النفايات، والتي أعطت نتائج إيجابية خاصة في الدول المتقدمة.

من وجهة النظر هذه، فإن اهتمامنا هو تميم الرمل المرسل في الخرسانة الرملية ودمجها كركام أساسي وكماشة حشو. ستجعل هذه المادة من الممكن إعادة تركيز استهلاك الرمال الطبيعية اقتصادياً عن طريق استبدالها بالرمل المرسل.

بسبب الحجر العام لمنع انتشار فيروس كورونا، اقتصر العمل المخبري على إيجاد التركيبة المناسبة. مع ملاحظة أنه من خلال بحثنا عبر الأنترنات، وجد عدد قليل جداً من الدراسات التي اهتمت بدمج الرمل المرسل في الخرسانة الرملية. ومنه وجهنا بحثنا نحو المقارنة بين الخواص الريولوجية والميكانيكية لنوعين من الخرسانة الرملية.

الكلمات المفتاحية: التنمية المستدامة، الرسكلة، رمل مرسل، الخرسانة الرملية، الخصائص الميكانيكية

Résumé

Dans un contexte de développement durable, la valorisation des déchets de la construction, bâtiment et travaux publics dans le génie civil permet de faire face au manque de gisements et à l'épuisement de granulats. De cela émerge l'idée de réaliser à partir de ces déchets des nouveaux matériaux de construction, qui a donné des résultats positifs particulièrement dans les pays développés.

De ce point de vue, notre intérêt est de valoriser le sable recyclé dans le béton de sable et l'incorporant comme granulat de base et comme filler. Cela il permettre de recentrer économiquement la consommation du sable naturel en le substituant par du sable recyclé.

En raison du confinement général, afin de limiter la propagation du COVID-19, les essais sont limités à la recherche de la formulation appropriée. Notant que, à travers notre recherche bibliographique, très peu d'études sont intéressées par l'incorporation du sable recyclé dans le béton de sable. C'est ainsi on a orienté notre travail à un rapprochement des propriétés rhéologique et mécaniques de deux types de béton de sable.

Mots clés : développement durable ; recyclage ; sable recyclé ; béton de sable ; propriétés mécaniques.

Abstract

In a context of sustainable development, the recovery of construction, building and public works waste in civil engineering makes it possible to cope with the lack of deposits and the depletion of aggregates. From this emerges the idea of making new construction materials from this waste, which has given positive results especially in developed countries.

From this point of view, our interest is to valorize the recycled sand in sand concrete and incorporating it as basic aggregate and as filler. This material will make it possible to economically with the consumption of natural sand by replacing it with recycled sand.

Due to general containment, in order to limit the spread of COVID-19, testing is limited to finding the appropriate formulation. Noting that, through our literature search, very few studies are interested in incorporating recycled sand into sand concrete. This is how we oriented our work towards bringing together the rheological and mechanical properties of two types of sand concrete.

Key words: sustainable development; recycling; recycled sand; sand concrete; mechanical properties.

Introduction Générale

Introduction générale

Les chantiers de construction et de démolition génèrent une grande diversité de déchets qui constituent une partie importante des coûts de production des déchets solides dans le monde. Environ 90 % d'entre eux sont éliminés en décharge.

L'épuisement de sources naturelles disponibles des granulats, les lois plus strictes relatives à la protection de l'environnement et les problèmes posés par la destruction des déchets sont tous des facteurs qui favorisent le recyclage des déchets de chantier.

Le recyclage et la valorisation des déchets sont aujourd'hui considérés comme solution d'avenir afin de répondre au déficit entre production et consommation et de protéger l'environnement. La valorisation de déchets de démolition a dépassé le stade d'expérimentation à travers le monde et connaît un développement assez important et le taux de recyclage des débris de construction/démolition a atteint dans certains pays les 80 %.

Plusieurs travaux qui ont été réalisés pour montrer la valorisation des déchets industriels comme des ajouts dans les matériaux cimentaires, et la même chose pour le béton de sable, mais non seulement les déchets industriels qui sont utilisés, il y a aussi les déchets agricoles.

Comme le béton constitue presque 75%, en poids, des constructions. Il s'ensuit donc que la plus grande partie des rebuts de démolition soit du béton. Dans ce contexte, notre travail s'inscrit, il a pour objectif principal de contribuer à la valorisation de la fraction inerte des matériaux de démolition et principalement les sables comme substitut aux granulats naturels, dans la production de nouveaux bétons de sable, dans le but de :

- ☛ Contribuer à préserver l'environnement par l'élimination du dépôt sauvage des gravats et la limitation d'extraction des granulats de carrière et alluvionnaires.
- ☛ Répondre à la demande croissante en granulats.
- ☛ Contribuer à mettre en valeur des granulats recyclés.
- ☛ Contribuer aux études menées sur l'emploi des granulats recyclés dans les bétons en substitution des granulats naturels.

La pratique usuelle de la formulation du béton de sable est de recourir à des constituants de bonnes caractéristiques. Par exemple, le béton de sable est exclusivement fabriqué avec de sable de rivière ayant de bonnes qualités et l'utilisation de ciment Portland est privilégiée. Cependant, le monde de construction souffre d'un manque important en ce type de sable approprié et d'un impact écologique souvent négatif dû à l'exploitation excessive de gisements cimentaires. D'autre part, l'utilisation des coproduits de carrière, comme le sable concassé et les fillers calcaires, en substitution le sable de rivière et le ciment, dans les bétons est toujours préféré par les formulateurs. Or, les coproduits de carrière deviennent de plus en plus chers à cause de sa vulgarisation vers plusieurs secteurs de bâtiments, travaux publics et hydrauliques (BTPH). Par ailleurs, les chantiers de déconstruction génèrent une grande diversité de déchets

et leurs éliminations sont souvent onéreuses. Dans la perspective de développement durable, une réflexion sur la valorisation d'autres matériaux de genre déchet de démolition est intéressante dans la formulation des bétons de sable en remplaçant partiellement ou totalement le sable et les fillers.

Objectifs

L'objectif principal de cette étude est de développer des formulations économiques et écologiques de béton de sable par la valorisation de sable recyclé et fillers recyclés, issus de déchets de démolition. Cette étude permet également de déterminer l'effet de l'incorporation de sable recyclé et de fillers recyclés en substituant le sable de carrière d'une part, et l'incorporation des fillers recyclés en substituant le ciment et le fillers calcaire d'autre part, sur la maniabilité et les résistances en compression des différents types de bétons de sable.

Ce manuscrit comporte quatre chapitres :

Le premier chapitre du mémoire présente des généralités sur la valorisation des déchets de démolition sous forme de granulats, les différents types particulièrement le sable recyclé utilisé dans ce travail expérimental.

Le deuxième chapitre présente une analyse bibliographique qui synthétise les travaux de recherches effectués sur les bétons de sable et leurs comportements. Ce chapitre comporte des généralités sur les bétons de sable, leurs caractéristiques physico-mécaniques, leurs applications ainsi que leurs inconvénients et les possibilités d'amélioration de leurs propriétés. Notant que, à travers notre recherche bibliographique, très peu d'études sont intéressées par l'incorporation du sable recyclé dans le béton de sable.

Le troisième chapitre expose les modes opératoires des essais sur les matériaux employés dans cette étude, ainsi que les différentes méthodes expérimentales, selon les normes en vigueur, nécessaire pour la caractérisation physique de ces matériaux. La dernière partie de ce chapitre présente la méthode et les conditions de formulation des bétons de sable.

Le quatrième chapitre, en raison du confinement général, les essais sur nos bétons de sable n'ont pas été réalisés, dont on a recours à faire une étude comparative entre des travaux de recherche sur les bétons de sable à base de différents types de sables.

Chapitre I :

Etat de connaissance sur les granulats recyclés

Chapitre I

Etat de connaissance sur les granulats recyclés

I.1 Introduction :

Les travaux de construction et de démolition, la réhabilitation, les catastrophes naturelles et les processus technologiques de construction génèrent de grand volume de déchets. La récupération et la réutilisation de ces matériaux issus de déchets sont donc devenues un sujet fondamental auprès des instances régissant le domaine de la construction.

C'est pourquoi le recyclage et la valorisation de ces déchets de construction et de démolition (C&DW) sont aujourd'hui considérés comme une solution d'avenir. L'utilisation de granulats recyclés dans la construction en béton devient une alternative incontournable, tant au niveau économique qu'environnemental, elle répond au besoin d'une autre source naturelle et en réduisant les coûts d'élimination des déchets.

I.1.1 Types de déchet de construction :

I.1.1.1 Déchets de chantier :

Les déchets de chantiers sont composés essentiellement de déchets provenant des chantiers du bâtiment et des travaux publics et des activités industrielles de fabrication des matériaux de construction. Ils sont définis comme étant des déchets inertes qui ne se décomposent pas, ne brûlent pas, ne produisent aucune autre réaction physique ou chimique, ne sont pas biodégradables et ne détériorent pas d'autres matières avec lesquelles ils entrent en contact, d'une manière susceptible d'entraîner une pollution de l'environnement ou de nuire à la santé humaine [11].

Les déchets admissibles sont : les bétons, les pierres, les tuiles, les céramiques, les briques, les carrelages ainsi que les enrobés bitumineux sans goudron. L'amiante est considérée comme déchets inertes mais son utilisation est interdite pour raison de santé [12].



Figure I-1 Photos de déchets de chantier

I.1.1.2 Déchets de démolition :

Les déchets de démolition sont une sous-catégorie des déchets du bâtiment qui regroupent tous les matériaux de déconstruction ou de réhabilitation. Comme le béton constitue presque 75 % en poids de tous les matériaux de construction, il s'en suit donc que les fortes proportions des rebuts de démolition soient du béton [14].

I.2 Valorisation des déchets de construction et de démolition :

La réutilisation des déchets de démolition a été effectuée la première fois après la deuxième guerre mondiale en Allemagne. Depuis cette date, plusieurs recherches ont été menées dans beaucoup de pays pour développer l'utilisation des déchets de démolition comme constituants de nouveau béton. Ces déchets peuvent être de béton démolé (déchets des éprouvettes écrasé dans laboratoire, déchets du bâtiment, des plates-formes des aéroports en béton, chaussées des routes en béton etc.), déchets de brique du bâtiment, ou déchets des éléments de trottoir. Les granulats fabriqués par ces déchets sont dits «Granulats Recyclés», et le béton fabriqué à base de ces granulats est dits : «Béton Recyclé». [12]

D'autres part, la qualification et la valorisation des matériaux de démolition dépendent de la teneur en matières polluantes (plâtre, bois, plastique, papier,...) et leur acceptabilité est fixée par rapport à leur niveau en contaminants [9]. Ceci ne peut être amélioré que par un traitement avant élaboration des granulats recyclés. En Algérie, une utilisation abusive d'une ressource non renouvelable de granulats naturels est constatée même pour la production d'éléments simples tels que trottoir. Pour cet usage, les matériaux de démolition peuvent constituer une alternative 'économique et écologique [14].



Figure I-2 Photos des déchets de démolition

Les considérations économiques et environnementales affectent de plus en plus l'approvisionnement en granulats. Il y a des grands défis à la réalisation et au sens opposé des grandes objections à l'ouverture de nouveaux bancs de carrières. En même temps, on se heurte dans certains pays, à des difficultés pour à la déposer à la décharge gravats et de sous-produits inertes de l'industrie et dans d'autres pays, à l'existence des décharges sauvages qui affectent l'environnement.

I.2.1 Valorisation des déchets de démolition :

Les déchets de démolition de bâtiments ou de routes peuvent donc être constitués de l'ensemble de ces types de déchets. Ces démarches de valorisation des déchets du BTP et d'utilisation des produits s'inscrivent dans une logique de développement durable qui permettra :

- De minimiser la consommation de matériaux de carrières (préservation des ressources naturelles) ;
- De diminuer les volumes de stockage de déchets.

I.2.2 Recyclage des déchets :

Le recyclage a deux conséquences écologiques majeures : la réduction du volume de déchets et la préservation des ressources naturelles. C'est une des activités économiques de la société de consommation. Certains procédés sont simples et bon marché mais à l'inverse, d'autres sont complexes, coûteux et peu rentables. Dans ce domaine, les objectifs de l'écologie et ceux des consommateurs se rejoignent mais parfois divergent, c'est alors le législateur qui intervient. Ainsi, en particulier depuis les années 70, le recyclage est une activité importante de l'économie et des conditions de vie des pays développés.

En Algérie, les déchets de construction et de démolition, qui sont généralement classés parmi les déchets industriels, restent inconnus et sont estimés approximativement à des millions de tonnes par an.



Figure I-3 Photos des déchets de démolition

I.2.2.1 Procédés de recyclage

Collecte de déchets

Les opérations de recyclage des déchets commencent par la collecte des déchets, Les déchets non recyclables sont incinérés ou enfouis en centres d'enfouissement techniques. Les déchets collectés pour le recyclage ne sont pas destinés ni à l'enfouissement ni à l'incinération

mais à la transformation. La collecte s'organise en conséquence. La collecte sélective, dite aussi séparative et souvent appelée à tort tri sélectif est la forme la plus répandue pour les déchets à recycler. Le principe de la collecte sélective est le suivant : celui qui crée le déchet le trie lui-même. À la suite de la collecte, les déchets, triés ou non, sont envoyés dans un centre de tri où différentes opérations permettent de les trier de manière à optimiser les opérations de transformation. Le tri manuel est une de ces opérations.

Transformation

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

Commercialisation et consommation

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

I.3 Les granulats recyclés :

I.3.1 Définition :

Le granulats recyclés est le granulats résultant de la transformation de matériaux inorganiques antérieurement utilisés en construction. Dans cette catégorie se rangent des granulats, comme le béton concassé, le fraisât d'enrobés bitumineux...

Les matériaux de démolition et déchets de construction sont la source principale des granulats de recyclage et sont également valorisables en matériaux pour génie civil : les matériaux grossiers (béton armé, béton cellulaire), Les matériaux plus tendres (brique, tuiles, céramiques, etc.)

I.3.2 Introduction

Dans les dernières années, les propriétés des granulats recyclés de béton (GR) et les effets de leur incorporation dans le béton ont attiré l'attention de divers chercheurs [3]. Malgré les avantages évidents pour l'environnement, ce matériau possède des propriétés distinctes de celles de granulats naturels (GN) qui ont entravé leur utilisation fréquente.

Par ailleurs, le béton constitue presque 75 %, en poids de tous les matériaux de construction utilisés dans le génie civil en général en plus des quantités fournies par les sinistres, ce qui résulte que la plus grande partie de rebuts de démolition est constituée de béton. De ce fait, la maîtrise de la gestion des déchets du bâtiment et des travaux publics participe activement à la protection de l'environnement, en contribuant à limiter le développement des décharges sauvages et du brûlage et l'enfouissement sur les chantiers, en limitant la pollution des sols, des

eaux, de l'air [8]. Selon les données sur la gestion des déchets solides en Algérie (Avril 2014), la production de déchets de Démolition/Construction : est estimée à 11 million de tonnes/an (2012), chiffre en constante augmentation.

I.3.3 Origine des granulats recyclés

Dans le secteur de bâtiment et TP, le recyclage s'organise deux filières :

I.3.3.1 Filière de la déconstruction :

Elle traite les matériaux issus de la démolition de bâtiments ou de chaussées :

☛ Granulats issus de C&DW

On parle de granulats recyclés car la matière première utilisée pour les produire est elle-même constituée de granulats «purs» ou combinés à des liants (dans le béton et les enrobés routiers).

Chantiers routiers : un recyclage courant des matériaux sur place.

Le secteur routier est en pointe puisque plus de 90 % des granulats recyclés proviennent du décapage de routes. Le recyclage des matériaux peut atteindre 100 %. La récupération des enrobés, c'est-à-dire de la couche de roulement constituée d'un mélange de bitume et de granulats, est aussi couramment pratiquée. Ces matériaux sont traités sur place ou dans des installations spécifiques appelées «plates-formes de recyclage» avant d'être réutilisés dans la construction de nouvelles chaussées.

La réglementation française autorise l'incorporation de 10 % d'enrobés recyclés (Circulaire du 18 juin 2001) [11].



Figure I-4 Photos des déchets d'enrobés.

- Déconstruction des bâtiments : valoriser les bétons

En revanche, le recyclage du béton (qui, rappelons-le, est constitué pour l'essentiel de granulats) s'avère parfois plus complexe : Les ouvrages d'art sont faciles à recycler (car constitués de béton pur), mais dans un bâtiment, le béton «cohabite» avec d'autres matériaux tels que le verre et l'aluminium (fenêtres), le bois, le plâtre, le plastique, la brique, etc.



Figure 1 .5 : Déchets de déconstruction.

Le recyclage du béton suppose alors un tri préalable lors de la démolition du bâtiment. On parle alors de «déconstruction» .

Des granulats artificiels peuvent être employés pour réaliser des bétons à usages spécifiques. Pour développer l'utilisation de granulats recyclés dans la fabrication de béton, des études sont actuellement en cours. Elles visent à :

- ✓ Préciser les utilisations possibles des granulats recyclés dans différents types de bétons.
- ✓ Evaluer le nombre de recyclages successifs qui peuvent être opérés sur les matériaux de démolition.

Le dispositif normatif qui s'applique aux granulats recyclés est le même que celui en vigueur pour les granulats naturels, moyennant quelques caractéristiques spécifiques aux granulats recyclés.

1.3.3.2 Filière des sous-produits industriels :

Les industries de la houille, les hauts fourneaux et les aciéries, ainsi que les usines d'incinération des ordures ménagères produisent des déchets qui sont valorisés à travers la production de granulats artificiels car la matière première utilisée n'est pas du sable et des graviers mais des résidus de procédés industriels «matériaux valorisés».

- ☛ Granulats issus de sous-produits industriels.

Les unités de traitement de ces sous-produits industriels se situent à proximité des gisements en question. Les granulats ainsi produits sont en général employés sur les chantiers routiers, en sous-couches.

- ✓ Schistes houillers sont des sous-produits de l'industrie minière de la houille. Lors de l'extraction du charbon dans la mine, des bancs intercalaires de matériaux stériles accompagnent inévitablement le charbon. Le terme «schistes houillers» désigne le sous-produit résultant de la séparation entre le charbon et le stérile.

- ✓ Laitiers de hauts-fourneaux ou d'aciéries font partie de la gamme des coproduits sidérurgiques. Le laitier de haut-fourneau résulte de la production de la fonte : c'est la partie liquide surnageant à la surface du fer en fusion dans le haut-fourneau qui va être concassée après sa solidification.
- ✓ Mâchefers d'incinération d'ordures ménagères sont la fraction incombustible des déchets restituée à la sortie du four sous forme d'un matériau solide.
- ☛ Granulats à hautes caractéristiques

Il s'agit de **granulats** élaborés industriellement pour répondre à certains emplois, notamment granulats très durs pour renforcer la résistance à l'usure de dallages industriels (granulats ferreux) ou granulats réfractaires.

I.3.4 Types de granulats recyclés :

Les granulats recyclés proviennent des déchets de démolition de bâtiments ou de routes. Ces déchets de chantiers ont constitué de résidus des procédés de production et de transformation (déchets chimiques, emballages, bois traités ou non traités...). Les matériaux de recyclage proviennent de la déconstruction de bâtiments et de routes ou de déchets de chantier de construction. On distingue actuellement trois types de granulats recyclés :

- ✓ Les granulats recyclés de béton désignés par RTB : recyclé tout béton
- ✓ Les granulats recyclés comportant de l'enrobé, désignés par RE ou REB : recyclé enrobé ou recyclé enrobé/béton.
- ✓ Les granulats mixtes comportant des matériaux de construction variables non triés (béton, brique, carrelage...) désignés par RTV : recyclé tout venant.

I.3.5 Elaboration des granulats recyclés :

Les installations de production de granulats recyclés ne sont pas tellement différentes des installations de concassage des granulats naturels, ce qui les différencie c'est la présence des impuretés dans les matériaux.

Pour enlever ces impuretés, à différents moments au cours du processus de concassage des opérations de triage manuel ou mécanique sont effectuées. Les plus gros débris comme les plaques de métal, les panneaux de bois, les aciers d'armature, le papier, le plastique, etc. sont enlevés à la main avant l'entrée des matériaux au concasseur primaire, tandis que pour enlever les impuretés légères, Quebaud [15] propose deux procédés : l'épuration à l'air et l'épuration par voie humide.

Pour la première solution, les granulats sont entraînés par un courant d'air sur des distances variables selon leur forme et leur nature.

Le deuxième cas, l'épuration par voie humide (flottaison), la séparation est réalisée au moyen d'un bain dans lequel les granulats recyclés sont transportés par bande immergée et les fractions légères qui flottent sont séparées par des jets d'eau à contre-courant. Des électro-

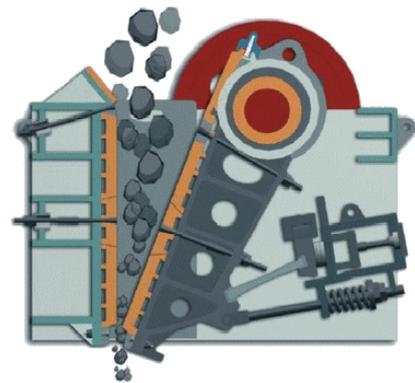
aimants sont ajoutés au circuit de concassage pour enlever les débris métalliques. Ces électro-aimants seront installés à la sortie des concasseurs et recueilleront les éléments métalliques comme les aciers d'armature.

Les différentes phases d'élaboration des produits issus du recyclage des matériaux de démolition sont :

- ☛ Sélection, stockage et traitement des produits bruts.
- ☛ Préparation des matériaux avant concassage : cette étape consiste à réduire les plus gros éléments l'aide d'un brise roche hydraulique (BRH) et à retirer les impuretés les plus grosses.
- ☛ Concassage et criblage : étape destinée à éliminer les matériaux de faibles caractéristiques.
- ☛ Concassage secondaire éventuel de la fraction supérieure issue du concassage primaire.
- ☛ Stockage

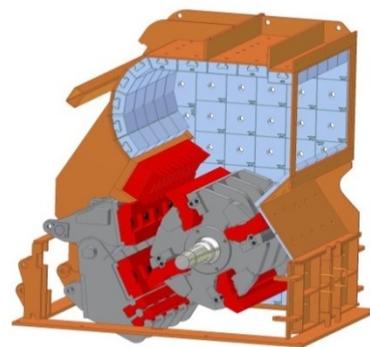
Le choix des concasseurs est aussi un élément important de la production de ce type de granulat.

Les concasseurs à mâchoires donnent une granulométrie plus grossière, rendant ainsi la réduction de la granulométrie insuffisante, ce qui nécessitera un deuxième concassage. Par contre, le RILEM [13] affirme que ce sont ces concasseurs qui assurent la meilleure distribution granulométrique pour la production de granulats recyclés fabriqués à partir de béton de ciment.



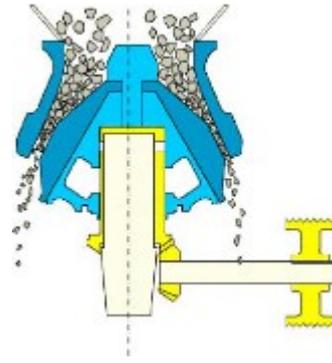
Concasseurs à mâchoires

Les concasseurs à impacts (ou à percussion) permettent une bonne réduction de la granularité lors du premier concassage et séparent très bien les armatures du béton ; cependant, ils subissent une usure très importante et les dimensions des matériaux à concasser sont limitées. Ces deux premiers types de concasseurs génèrent à peu près la même quantité de particules fines (particules $< 63 \mu\text{m}$).



Concasseurs à impacts

Le troisième type de concasseur à cône, est beaucoup moins utilisé, mais il est très utile comme concasseur secondaire avec des granulats entrant de grosseur maximale de 200 millimètres.



Concasseur à cône

I.3.6 Mode d'exploitation :

Les différentes phases de récupération des produits issus du recyclage sont les suivantes :

I.3.6.1 Réception et tri des matériaux :

La réception se fait à l'entrée du centre de recyclage par contrôle visuel. A l'issue de ce contrôle, les camions jugés trop riches en éléments indésirables (bois, plâtre, plastique...) sont refusés, les autres sont acceptés. Les matériaux sont stockés en fonction de leur nature (béton, briques, enrobés) et du prétraitement qu'ils devront recevoir : brise roche hydraulique, pinces à ferrailles, tri manuel (des plastiques, bois, etc...).

I.3.6.2 Prétraitement

Le prétraitement consiste à réduire les plus gros éléments (Brise Roche Hydraulique), et à couper les éléments les plus longs (cisaille hydraulique) notamment lorsqu'ils sont ferrillés.

I.3.6.3 Criblage- Scalpage :

Le criblage ou le Scalpage, consiste à éliminer la fraction fine dans laquelle le risque de présence d'argile est le plus grand. d. Concassage Le concassage consiste à fragmenter et réduire les matériaux jusqu'à un diamètre préalablement défini.



Figure 12 : Concasseur mobile.

I.3.6.4 Dé-ferrailage

Le dé-ferrailage est avant et après le concasseur par bande électromagnétique pour enlever les ferrailles après sa libération des blocs de béton. Une ou plusieurs bandes sont disposées au long du processus de production.

I.3.6.5 Tri aval

Un **tri manuel** est effectué sur certaines installations, pour éliminer les impuretés résiduelles avant stockage.

I.3.6.6 Produit fini

Après l'élimination des impuretés, le produit fini est stocké en tas comme le montre la figure suivante :



Figure I-5 Stock à l'air libre de produit fini.

I.4 Propriétés des granulats recyclés :

La présence du mortier résiduel attaché au granulat original affecte plusieurs propriétés du granulat [16]. Dans cette partie sont détaillées les propriétés les plus indicatives dans la qualification des granulats recyclés.

I.4.1 Distribution granulométrique

En distribution granulaire, les granulats recyclés ne diffèrent pas trop des granulats naturels. Les auteurs [Padm et al 2009][17] constatent que plus la taille maximale des granulats recyclés est petite, aboutit à une réduction de la résistance mécanique variant entre 10 à 35% en fonction de la grosseur des granulats recyclés. D'autre part les granulats recyclés ont souvent plus de particules fines que les granulats naturels [18]. Cependant, on ne peut pas généraliser cette caractéristique puisqu'elle varie beaucoup en fonction du type de granulat recyclé utilisé et du type de granulat naturel auquel on le compare.

I.4.2 Masse volumique

La densité relative du granulat recyclé est moins grande que celle du granulat naturel [19, 20, 21, 17, 18]. La littérature à indiquer que la densité relative des granulats recyclés se situe généralement entre 2,4 et 2,5 (2400 à 2500 kg/m³) alors que les granulats naturels ont généralement une masse volumique de l'ordre de 2,75 (2750 kg/m³).

I.4.3 L'absorption d'eau

Cette caractéristique est importante pour les granulats recyclés que pour les granulats naturels, [19, 22, 23, 17, 18, 24,25]. Cette différence est principalement due à la présence de résidu de mortier adhérent au granulat naturel de départ, et qui est plus poreux que la pierre en elle-même. Plus les granulats recyclés sont riches en ancien mortier plus ils sont poreux [26] ce qui augmente par conséquent l'absorption d'eau du nouveau granulat [27].

L'absorption d'eau des granulats recyclés est comprise entre 3 et 12% [28, 29, 30, 23], elle peut même atteindre 15% [31] comparativement à une valeur entre 1 et 5% pour les granulats naturels.

Plusieurs autres paramètres régissent l'absorption d'eau des granulats recyclés [17] :

- ✓ Le type de granulat dans le béton parent,
- ✓ Les performances mécaniques du béton parent,
- ✓ La taille maximale de granulat utilisé dans le béton parent.

Les bétons formulés avec les granulats recyclés doivent impérativement subir une correction en eau, et qui se caractérise par une quantité totale d'eau composée par l'eau efficace plus l'eau d'absorption des granulats recyclés dans le but de maintenir l'ouvrabilité du béton frais à une consistance désirée [30]. L'eau d'absorption peut être ajoutée de différentes manières, soit en pré-saturant les granulats préalablement au malaxage, soit en compensant par un ajout direct de l'eau d'absorption dans la quantité d'eau de gâchage [32, 26].

Les granulats recyclés doivent être stockés de façon à permettre de garder ces conditions constantes. Ils sont plus sensibles aux conditions environnementales lors du stockage que les granulats naturels.

I.4.4 La porosité:

Elle est à l'origine de l'adsorption d'eau importante. Cette porosité élevée est une propriété physique du matériau qui dépend de la composition des granulats recyclés.

Le taux de ciment dans le béton parent influe également sur la porosité des granulats recyclés. Celle-ci augmente significativement avec l'augmentation de la quantité de pâte de ciment [29].

Ce vieux mortier de ciment est poreux et contient des microfissures en raison des contraintes endurées pendant sa durée de vie fonctionnelle et aussi lors du processus de concassage pour la préparation des granulats recyclés [16], [29].

Grâce à des analyses microscopiques, [23] ont décrit la géométrie de la porosité de granulats recyclés. Selon eux, des pores sont présents entre les granulats naturels et la pâte de ciment. Ces pores fragilisent le matériau et limitent l'emploi de ces granulats recyclés dans la fabrication des bétons.

I.4.5 Résistance à l'abrasion

Pour le cas des granulats recyclés, l'essai de résistance à l'abrasion plus connu sous le nom d'essai Los Angeles est le plus indiqué. Lors de cet essai, tout le mortier résiduel lié au granulat d'origine se détache de celui-ci sous l'effet de l'abrasion [20]. On observe ainsi une grande perte de masse pour le granulat recyclé ce qui explique des coefficients Los Angeles plus élevés que ceux généralement relevés avec les granulats naturels [18], [34], [17], [33], [19]. La résistance à l'abrasion est donc directement reliée à la teneur en mortier résiduel [20] ; ce qui réduit par conséquent la résistance aux chocs, à l'usure et au gel [35], [36].

Plus la résistance à la compression du béton parent est bonne plus la résistance à l'abrasion des granulats recyclés est meilleure (figure I.8) [20]. Celle-ci peut être améliorée en modifiant la procédure de concassage.[37] a déterminé la valeur de Los Angeles à l'abrasion de 24,2% pour des granulats recyclés écrasés à l'aide d'un concasseur à mâchoires, et une valeur de 20% quand un concasseur à percussion est utilisé après l'écrasement des granulats par un concasseur à mâchoires. D'autres auteurs l'ont confirmé aussi, le type de concasseur utilisé affecte le contenu de mortier adhéré au granulat d'origine [38], [16].

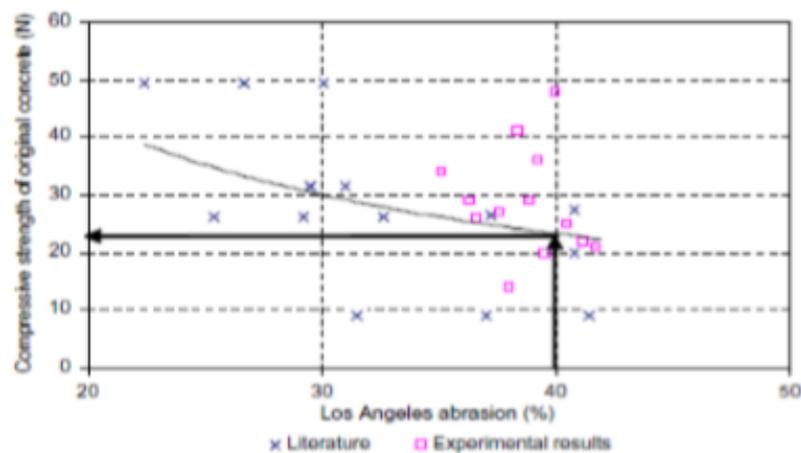


Figure I-6 Relation entre les valeurs à l'abrasion Los Angeles et la résistance en compression du béton parent [20].

Les principaux facteurs qui influent sur la quantité de mortier adhéré au granulat recyclé sont : le rapport E/C, la résistance initiale du béton et la taille des granulats. Nous illustrons par des graphes (figures I.7 et I.8), qui sont tirés de la littérature, les différentes propriétés des bétons de granulats recyclés auxquelles le volume de mortier attaché est un facteur prépondérant.

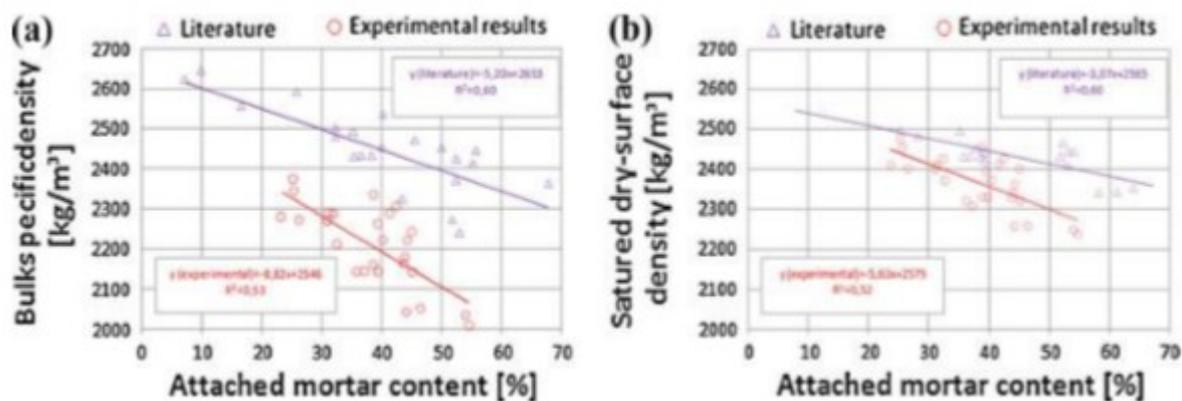


Figure I-7 Relation entre la quantité de mortier attaché et la densité [20].

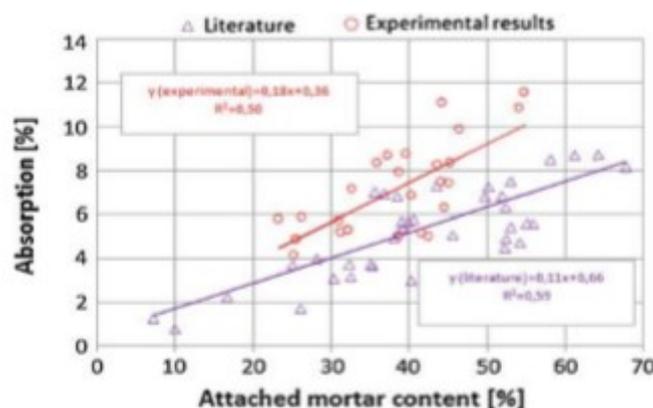


Figure I-8 Relation entre la quantité de mortier attaché et la capacité d'absorption d'eau [20].

I.4.6 Résistance du béton d'origine (béton parent)

La résistance des granulats influence la résistance du béton obtenu. Celle-là dépend de la composition, la texture et la structure de l'agrégat [39]. Selon la norme BS 882 (1992), un effort de valeur minimale de 150 kN lors de l'essai d'écrasement, est nécessaire pour que les granulats puissent être utilisés dans des éléments structuraux. Cependant, un minimum de 100 kN est acceptable pour des éléments mineurs de structure. Ces critères sont aussi valables dans le cas d'utilisation des granulats recyclés dans la formulation des bétons hydrauliques.

Comme les granulats recyclés sont dérivés du béton parent, d'où la qualité de ces granulats est étroitement liée à celle du béton parent ; la résistance à l'écrasement des granulats recyclés a été largement abordée dans différents travaux. Selon certains auteurs [17], [30] la résistance de ces granulats est rapportée à une valeur conventionnelle de 10% de la résistance à l'écrasement. Cette valeur varie de 117 à 160 kN, tandis qu'elle se situe entre 159 et 289 kN pour les granulats naturels. D'autres auteurs [40] ont testé des granulats recyclés de fraction 10-14 mm jusqu'à 20% de l'effort d'écrasement, la valeur de l'effort atteint ne représentait que 14% dans le cas des granulats naturels de taille similaire.

Padmini et al [17] ont étudié l'influence du béton parent sur les propriétés des bétons de granulats recyclés Il en ressort de cette étude ce qui suit :

- pour une résistance moyenne ciblée, elle augmente avec une augmentation de la taille maximale des granulats obtenus à partir d'un même béton parent,
- pour un granulats recyclé donné, la résistance mécanique obtenue augmente avec une augmentation de la résistance du béton de granulats recyclés,
- pour une résistance donnée du béton de granulats recyclés, la résistance mécanique obtenue diminue avec l'augmentation de la résistance du béton parent à partir de duquel l'agrégat recyclé est dérivé. Avec l'augmentation de la résistance du béton parent, la présence d'ancien mortier dans les granulats recyclés augmente indépendamment de la taille de l'agrégat. Cela a aussi une influence dans la détermination de la résistance des bétons de granulats recyclés.

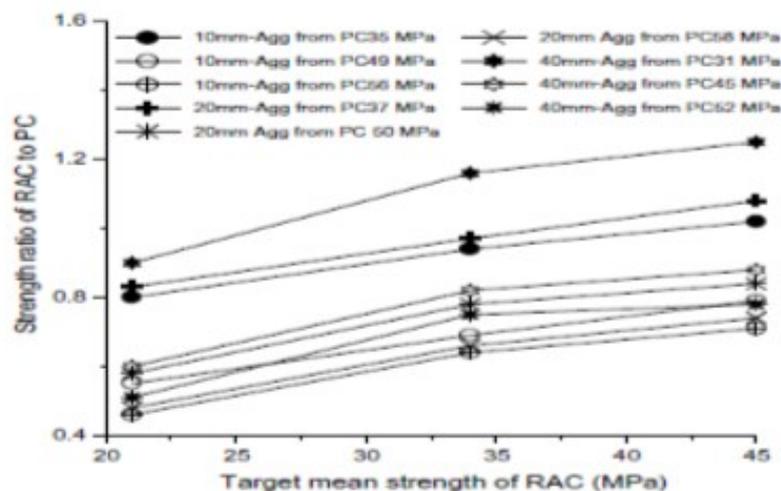


Figure I.12 Influence du béton parent sur les bétons de granulats recyclés [17].

I.5 Comparaison de béton ordinaire avec le béton recyclée :

La principale différence entre granulats naturels et celui recyclé est la pâte cimentaire rattachée à la surface de ce dernier, qui est l'une des principales raisons de perte des qualités des granulats recyclés par rapport aux granulats naturels [3].

Tandis que celle des granulats naturels se distingue par la nature des pores qui sont habituellement non interconnectés en plus lorsque les granulats sont enrobés par la pâte de ciment, ceux-ci ne participent ne presque pas à la perméabilité du béton [7].

I.5.1 La maniabilité

L'affaissement du béton contenant tout type d'agrégat recyclés devrait être inférieur que celui du béton classique à cause de la plus grande capacité d'absorption d'eau des granulats recyclés que celle des granulats naturels. La texture de surface et l'angularité des granulats recyclés ont aussi une influence considérable sur l'ouvrabilité du béton [41].

Une maniabilité inférieure, des bétons contenant des granulats recyclés par rapport à des bétons de granulats naturels, a été rapportée dans plusieurs publications et travaux antérieurs où une quantité d'eau supplémentaire a été ajoutée pour contrôler l'ouvrabilité [42], [44], [43]. En raison de la plus grande capacité d'absorption d'eau par les granulats recyclés, plusieurs méthodes ont été testées pour mieux contrôler la maniabilité.

Dans ce contexte, Poon et al [31] ont testé plusieurs méthodes d'humidification des granulats recyclés avant introduction dans le malaxeur. Il s'est dégagé de ce travail que la perte d'affaissement est liée à l'état d'humidité des granulats recyclés, la figure I.15 illustre les variations de l'affaissement des bétons contenant différents types de granulats.

I.5.2 La densité

La masse volumique du béton frais contenant des granulats recyclés est légèrement inférieure à celle du mélange contenant des granulats naturels, la densité des granulats recyclés étant inférieure à celle des granulats naturels. La présence du mortier de ciment résiduel attaché à l'agrégat est le principal facteur de diminution de la densité [45].

Katz [29] n'a observé aucune différence significative de la densité des bétons contenant RCA préparé à partir de vieux béton de trois âges différents (1, 7 et 28 jours), ce qui suggère que la quantité de mortier collé dans les différents agrégats de béton était similaire quel que soit leur âge d'écrasement.

Soutsos et al. [46] ont observé une densité à l'état frais légèrement inférieure dans le béton contenant RCA que dans le béton contenant un agrégat de calcaire en raison de la substitution volumétrique plutôt que sur la base du poids de l'agrégat.

L'absorption d'eau d'un béton recyclé est plus élevée que celle du béton naturel (presque 3 fois). OLORUNSOGO & PADAYACHEE (2002) [80] ont constaté que l'eau absorbée par un béton à 100% de granulats recyclés était d'environ 39% plus élevée que celui du béton à base des granulats naturels après 28 jours de séchage.

I.5.3 Le retrait

Il a été préconisé par celle-ci de remplacer pour atténuer les effets du retrait et fluage, le sable issu du béton recyclé par un sable naturel. HASABA & ALL. [83] ont signalé que le retrait de séchage du béton à base de granulats recyclés et de sable naturel est de 50% plus élevé que celui du béton conventionnel, et lorsque on utilise les deux granulats recyclés (gros et fins), le retrait de séchage du béton recyclé peut augmenter jusqu'à 70% plus élevé que celui de béton conventionnel. Ces auteurs soutiennent que le facteur responsable qui a induit l'effet de retrait dans ce type de béton, est la forte absorption d'eau des granulats recyclés.

I.5.4 La résistance à la compression

La résistance mécanique d'un béton est étroitement liée aux caractéristiques mécaniques des granulats. D'après certains auteurs [44], [25], les bétons formulés avec des granulats recyclés

assurent de bonnes résistances mécaniques et peuvent atteindre des résistances à la compression équivalentes à celles d'un béton conventionnel. La résistance à la compression des bétons de granulats recyclés est influencée directement par la résistance des granulats utilisés. Comme les granulats de recyclage présentent généralement une densité inférieure à celle des granulats naturels, en raison de la présence de l'ancien mortier de composition souvent hétérogène, la résistance à la compression des bétons recyclés est généralement moindre [35].

I.5.5 La résistance à la traction par fendage

Comme pour la résistance à la compression, la résistance à la traction par fendage des bétons contenant des granulats recyclés est évidemment inférieure à celle du béton classique et elle diminue davantage lorsque la quantité des granulats recyclés augmente.

Dans plusieurs études, il a été signalé que la résistance à la traction par fendage, des bétons contenant des granulats recyclés, est sensiblement améliorée lorsque des durées de murissement sont assez longues et dans certains cas, la résistance du béton contenant des granulats recyclés était encore meilleure que celle du béton classique.

I.6 Propriétés essentielles des bétons de granulats recyclés :

La diversité des bétons actuels, aux propriétés extrêmement variables, ne permet pas d'imaginer un principe de formulation commun. Celle-ci est orientée vers les propriétés principales demandées au matériau et adaptée en fonction des propriétés secondaires recherchées. Un bon béton n'est acquis, que lorsque trois objectifs principaux sont atteints : obtenir une résistance mécanique, obtenir une rhéologie qui permet une mise en œuvre facile et un squelette granulaire donnant une compacité maximale, et qui peut être une propriété secondaire recherchée. Comme il n'existe pas une grande variété de granulats disponibles en un lieu donné, la formulation d'un béton devra tenir compte des ressources locales et des coûts. C'est pourquoi les propriétés intrinsèques des granulats ne sont pas toujours valorisées dans les bétons.

Dans ce contexte, nous présentons un état des lieux de l'influence des granulats sur les propriétés du béton et plus particulièrement le cas des granulats recyclés.

I.6.1 Propriétés rhéologiques :

I.6.1.1 Influence des granulats sur la maniabilité :

La maniabilité est une caractéristique d'aptitude à la mise en œuvre d'un béton [59]. Sa mesure, est appréciée à l'aide de différents appareillages dont le plus répandu est l'essai d'affaissement au cône d'Abrams.

Pour un béton classique, cette caractéristique est souvent difficile à quantifier à cause de la conjugaison de plusieurs paramètres intrinsèques de la composition d'un béton (le dosage en eau, le dosage et la nature du liant, la forme et la texture des granulats, la granulométrie et la dimension maximale du granulat) [7, 60]. D'autres paramètres, s'ils ne sont pas contrôlés,

peuvent affecter d'avantage la maniabilité tels que : le malaxage, le transport du béton, la température, l'hygrométrie, les fines des sables et l'influence des adjuvants [59].

La quantité d'eau, nécessaire pour une maniabilité donnée, augmente avec l'augmentation de l'indice de la forme et la texture des gros granulats [61]. Il est préconisé de réduire le diamètre et la quantité des plus gros granulats afin d'éviter la ségrégation [10, 62]. Les granulats anguleux avec une texture de surface rugueuse (tels que les granulats concassés et recyclés) nécessitent plus d'eau pour une maniabilité donnée que les granulats arrondis à texture lisse [24, 7], de plus, leur coefficient de frottement relativement important, les rend défavorables pour la maniabilité [10, 62].

La présence de fillers favorise la maniabilité du béton, en facilitant le mouvement des granulats. L'influence des propriétés des granulats sur la maniabilité diminue à mesure que le mélange devient plus riche en ciment [10, 63] et peut même disparaître lorsque le rapport G/C est de l'ordre 2,5 ou de 2 [7, 61].

L'ouvrabilité des bétons recyclés est généralement affectée par la capacité d'absorption d'eau des granulats [39, 64, 65]. La forme et la texture des granulats peuvent également affecter l'efficacité de l'ouvrabilité des bétons cités. Cela dépend du type de broyeur utilisé [39].

La forte absorption d'eau est attribuée à la présence de l'ancien mortier attaché aux granulats recyclés et plus celui-ci est important plus la maniabilité se réduit davantage [66]. D'après certaines expériences, les bétons recyclés à base de granulats recyclés et sable naturel nécessitent 5 % d'eau que le béton conventionnel avec la même ouvrabilité [40, 67, 68]. Certains chercheurs conseillent l'utilisation des granulats recyclés saturés en eau ou très humides. [69]

D'après une étude menée par M. BARRA & ALL. (1998) [70], lorsque les granulats recyclés sont saturés, la zone inter faciale n'est pas efficace, et pour l'améliorer une humidification des granulats à 80-90 % (plus proche de saturation).

I.6.2 Propriétés physiques :

I.6.2.1 Influence de l'interface pâte de ciment-granulat:

Les bétons recyclés présentent deux zones inter faciales : l'une constituée dans le granulat recyclé (liaison granulat-pâte ancienne) et l'autre nouvellement créée entre le granulat recyclé (y compris le mortier ancien) et la pâte cimentaire nouvelle [39]. Ces zones doivent être prises en considération lors de l'étude de la perméabilité et la résistance du béton.

I.6.2.2 Influence de l'ancien mortier :

Une des tares du granulat issu de la démolition, est l'ancien béton collé au granulat et qui ne peut être éliminé facilement. Sa quantité est aléatoire et dépend de la qualité d'adhérence granulat-pâte de ciment et ainsi que de la puissance de concassage lors de la fabrication des recyclés.

Cette quantité de béton attaché aux granulats recyclés porte atteinte à la résistance du béton à long terme. Kokubu & Ueno (2000) [71] a démontré que si le rapport E/C du béton d'origine est faible, l'effet de la pâte cimentaire n'influe pas beaucoup la résistance à long terme. Néanmoins, la quantité du béton attaché aux granulats recyclés influe la résistance à la flexion et l'énergie de rupture, elles diminuent avec l'augmentation de la quantité du béton.

1.6.2.3 Perméabilité, porosité et absorption d'eau:

Pour la bonne conservation (durabilité) du béton, il est nécessaire d'avoir des exigences de perméabilité, à l'eau, à l'air ou à certains gaz et de résistance à la diffusion d'ions. Même si les mécanismes et les lois qui les régissent sont différents, les moyens d'action limitant ces effets sont les mêmes : limiter le volume occupé par l'eau et la connectivité du réseau capillaire.

La perméabilité du béton se singularise par la perméabilité de la pâte de ciment et la perméabilité des granulats. Si la perméabilité de la pâte de ciment hydraté est liée à la nature du réseau poreux à l'intérieur même de la pâte de ciment, mais aussi de la zone voisine de l'interface entre la pâte de ciment et les granulats. En revanche, l'utilisation de granulats de grand diamètre et avec une grande proportion augmente la perméabilité [76], qui a été remarquée plus aigüe dans l'interface pâte granulat. Il est à noter que la perméabilité du béton diminue de façon très significative avec la diminution du rapport E/C.

On ne peut parler de perméabilité sans évoquer la porosité dont le volume seul n'influe pas de manière significative sur la perméabilité. Celle-ci est en fonction de la dimension, de la distribution, de la forme, de la sinuosité et la continuité des pores. Etant donné que cette relation perméabilité-porosité est très étroite, Le volume des pores d'un béton, indépendamment de la facilité avec laquelle un fluide peut le traverser, se mesure par l'absorption d'eau. Celle-ci est un phénomène physique représentatif du comportement hydrique du béton durci.

C'est une propriété de transfert du matériau poreux qui caractérise son aptitude à absorber et à transporter un liquide mouillant par capillarité. Le processus d'absorption d'eau peut être qualifié par deux paramètres : l'absorption initiale, représentative de la dimension des gros capillaires, et l'absorptivité, représentative du volume des capillaires fins [78].

Lors de la fabrication de ces bétons, il est difficile de maintenir une ouvrabilité constante compte tenu de la grande absorption d'eau des granulats recyclés. Il ressort que le matériau posant le plus de problèmes est le sable recyclé. L'élaboration des bétons contenant des sables naturel et sables recyclés demande donc quelques précautions particulières:

- l'utilisation d'un super plastifiant permet de résoudre en partie les problèmes de confection et d'assurer un comportement acceptable ;
- un pré mouillage éventuel des granulats est nécessaire afin d'améliorer la mise en œuvre du béton et de réduire les migrations d'eau de la pâte de ciment vers les granulats ;
- un moyen certain d'atteindre la classe de résistance escompté est l'ajout de ciment d'environ 50 kg/m³ par rapport aux bétons contenant du sable naturel [79]. .

I.6.2.4 Retrait et fluage :

Le retrait et le fluage sont deux déformations indissociables du comportement du béton. Ils trouvent leur origine dans la pâte de ciment. Ces déformations doivent donc, en toute circonstance, être prises en compte.

Le retrait de la pâte de ciment est d'autant plus grand que le rapport E/C est plus élevé. Cependant, le retrait de séchage qui peut effectivement se produire, est limité par les granulats si ceux-ci sont à des pourcentages élevés. Selon certaines études la dégradation (fissuration) qui en découle du retrait se trouve favorisée par la présence des granulats plats qui peuvent constituer des drains s'ils sont juxtaposés [24], par la présence des argiles et fines dans les granulats [10] et à la grandeur du module élastique de ces derniers [77]. Le retrait est plus important dans le cas d'utilisation des granulats légers qui possèdent un module élastique plus faible et qu'ils offrent donc moins d'opposition au retrait potentiel de la pâte de ciment [77].

Les bétons à base de granulats de recyclage tendent à avoir un retrait et un fluage plus importants. Cette tendance augmente avec la proportion de granulats de recyclage. Le retrait et le fluage sont signalés excessifs en cas d'utilisation de sable de béton concassé et le mouillage préalable des granulats, selon une étude [82].

I.6.3 Propriétés mécaniques :

I.6.3.1 Résistance à la compression :

La résistance mécanique d'un béton est fondamentalement liée aux performances mécaniques des granulats [7]. D'après certains auteurs [86, 87], les bétons fabriqués avec des granulats recyclés obtiennent de bonnes résistances mécaniques et peuvent atteindre des résistances à la compression équivalentes à celles d'un béton conventionnel.

La résistance à la compression des bétons à base de granulats de recyclage est influencée directement par la résistance des granulats utilisés. Celle-ci dépend à son tour de la densité brute des granulats. Comme les granulats de recyclage présentent généralement une densité inférieure à celle des granulats naturels, en raison de la présence de ciment et d'une composition souvent hétérogène, la résistance à la compression des bétons de recyclés est généralement moindre.

➤ Relation entre la résistance à la compression à celle de traction :

La résistance à la traction (R_t) augmente avec la résistance en compression (R_c), mais à un taux allant en diminuant. Plusieurs facteurs influent sur la relation entre les deux résistances : les gros granulats concassés, les propriétés des granulats fins, la granulométrie des granulats et l'âge du béton. Un certain nombre de formules empiriques reliant R_t et R_c ont été proposées. L'expression suivante semble donner la meilleure relation entre R_t et R_c : $R_t = 0,7(0,2 + 0,02 R_c) R_c$ (I.2), où les résistances sont exprimées en MPa [7]. Pour le béton recyclé.

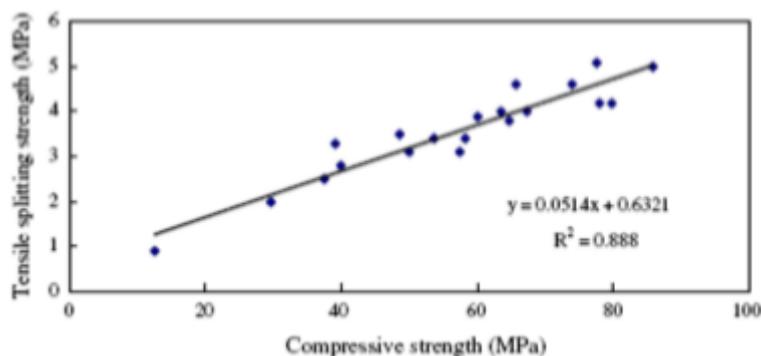


Figure I-9 Rapport entre la résistance à la traction par fendage et la résistance à la compression [66]

I.6.3.2 Influence des granulats sur le rapport e/c :

Il est connu que les bétons conçus avec des granulats concassés génèrent une surface spécifique plus développée et demandent plus d'eau que les granulats roulés ce qui affecte la résistance. La rétention d'eau par les granulats recyclés, conduit à réaliser les bétons recyclés avec des rapports E/C supérieurs à ceux des bétons classiques [51], MUKAI & ALL (1979) [92] propose une relation entre le rapport E/C et la résistance de compression en fonction du pourcentage des granulats recyclés utilisé selon la figure

I.6.3.3 Influence de l'origine et résistance des granulats:

Comme les trois quarts du volume d'un béton sont occupés par les granulats, ce qui revête que la qualité de ces derniers est d'une grande importance sur la résistance à la compression du béton. Celle-ci ne peut excéder de manière significative celle de la plupart des granulats et cela dépend d'une part, de la nature de la roche mère qui a été concassée ou usée à la dimension actuelle [81, 94] et d'autre part, du processus de concassage adopté [95].

I.6.3.4 Module d'élasticité (E) :

Le module d'élasticité est l'une des propriétés les plus touchées de bétons recyclés, même à des taux de substitution faibles en granulats recyclés [81]. Le module d'élasticité du béton recyclé a été signalé comme étant de l'ordre de 50-70% par rapport à celui du béton ordinaire, comme l'ont rapporté certains auteurs [50, 96, 97, 98]. Ceux-ci ont constaté qu'avec des niveaux de remplacement en granulats recyclés de 20, 50 et 100% dans des bétons, les valeurs moyennes du module d'élasticité sont de 10, 20 et 40% respectivement inférieures à celles enregistrées pour un béton conventionnel [85] comme l'illustre la figure (I.17). Sur celle-ci on remarque que la perte de rigidité pour les bétons recyclés s'accroît d'avantage avec l'accroissement du rapport E/C. Une certaine corrélation se dégage entre les modules élastiques statiques du béton conventionnel et du béton recyclé.

I.6.4 Durabilité

I.6.4.1 Gel-dégel

Un granulat ne sera pas sensible au gel s'il possède une porosité très faible ou si son système capillaire est interrompu par un nombre suffisant de macropores (qui jouent le rôle de bulles d'air). Le volume d'eau susceptible de geler ne doit pas excéder le volume des vides de l'air entraîné du béton. Cette condition se traduit par la nécessité d'avoir un apport E/C suffisamment faible, ce qui assure par la même une bonne résistance au béton qui peut mieux résister aux forces de dégradation induites par le gel. Le béton de granulats recyclés n'échappe pas à cette règle et il est plus exposé à de telles dégradations à cause du fort taux d'absorption d'eau par les granulats.

Plusieurs travaux ont été entrepris relativement à l'utilisation de granulats recyclés disponibles sur le marché ou fabriqués à partir de bétons de laboratoire, avec ou sans un bon réseau d'air, ont indiqué que le comportement au gel des bétons élaborés uniquement à partir de granulats recyclés est assez médiocre, mais l'emploi des bétons à base de sable naturel et de gravillon recyclé dans des conditions de gel modéré peut être envisagé. La mesure de la gélivité peut être quantifiée par la dégradation granulométrique des granulats soumis à des cycles gel-dégel ou bien à partir de la résistance gel-dégel du béton, mais aucune relation simple entre ces essais n'a été établie.

Il en résulte que les faibles performances au gel du RAC provenaient des bétons réutilisés ayant déjà un mauvais réseau d'air ou comportés déjà des fissurations occasionnées lors de la fabrication (en concassage).

1.6.4.2 Retrait

Le retrait du béton peut être défini comme la déformation d'un élément de béton libre de toute sollicitation mécanique extérieure dans une ambiance thermodynamique constante, ainsi on distingue le retrait dans une ambiance sèche et le gonflement dans une ambiance saturée. La prédiction de cette déformation est d'une très grande importance pour l'étude de la durabilité et de l'aptitude au fonctionnement à long terme des structures en béton (ponts, ouvrages hydrauliques, etc.). En effet, elles peuvent être à l'origine de la fissuration, de pertes de précontrainte, d'une redistribution des contraintes, et même, plus rarement, de la ruine de l'ouvrage. Cette variation dimensionnelle dépend de plusieurs paramètres tels que la composition du béton, la qualité de ses constituants, la taille des éléments ainsi que les conditions extérieures de conservation. Le retrait du béton possède différentes origines d'où on peut distinguer les différents retraits qui caractérisent le séchage du béton.

- **Retrait endogène**

On appelle retrait endogène, le retrait provoqué par des phénomènes strictement internes au béton, en absence de tout échange d'eau avec l'extérieur, c'est ce qu'on appelle en thermodynamique un système fermé : Le retrait endogène est un phénomène propre à l'hydratation du ciment qui témoigne de son évolution et de la quantité des hydrates formés. Ce retrait est rapide et croît lorsque la quantité d'eau diminue, il s'achève (95 %) au bout de (1 à 4) semaines. On distingue d'après l'évolution de la structure du matériau l'apparition de plusieurs

phénomènes qui donnent au retrait endogène plusieurs formes de déformation d'où on présente les formes majeures qui le détermine.

- Retrait de serrage (Contraction Le Chatelier)
 - Retrait thermique
 - Retrait d'hydratation (auto-dessiccation)
- Retrait exogène

Le retrait exogène se produit lorsque les surfaces de l'élément sont libres et peuvent échanger l'humidité avec le milieu extérieur. Ceci provoque une perte d'eau à travers les pores de la pâte ce qui atteste de la qualité de la microstructure à conserver ou à perdre son humidité.

- Retrait de dessiccation
- Retrait de carbonatation

Le retrait de la pâte de ciment est d'autant plus grand que le rapport E/C est plus élevé. Cependant, le retrait de séchage qui peut effectivement se produire, est limité par les granulats si ceux-ci sont à des pourcentages élevés. Selon certaines études la dégradation (fissuration) qui en découle du retrait se trouve favoriser par la présence des granulats plats qui peuvent constituer des drains s'ils sont juxtaposés, par la présence des argiles et fines dans les granulats et à la grandeur du module élastique de ces derniers. Le retrait est plus important dans le cas d'utilisation des granulats légers qui possèdent un module élastique plus faible et qu'ils offrent donc moins d'opposition au retrait potentiel de la pâte de ciment.

Les bétons à base de granulats de recyclage tendent à avoir un retrait plus important. Cette tendance augmente avec la proportion de granulats de recyclage. S.HASABA [11] ont signalé que le retrait de séchage du béton à base de granulats recyclés et de sable naturel est de 50% plus élevé que celui du béton conventionnel, et lorsque on utilise les deux granulats recyclés (gros et fins), le retrait de séchage du béton recyclé peut augmenter jusqu'à 70% plus élevé que celui de béton conventionnel. Ces auteurs soutiennent que le facteur responsable qui a induit l'effet de retrait dans ce type de béton, est la forte absorption d'eau des granulats recyclés.

Chapitre II :

Etat de connaissance sur les granulats recyclés

Chapitre II

Etat de connaissance sur le béton de sable

II.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 au milieu fortement ferrailés, qualités esthétiques, etc. Par ailleurs, dans certaines régions riches en sable, il peut procurer des économies par rapport au béton traditionnel.

Les propriétés rhéologiques et les performances mécaniques du béton de sable sont le résultat d'une interaction complexe entre ses divers constituants. Ainsi, il est indispensable que ces matériaux soient malaxés correctement afin de produire des mélanges homogènes possédant par conséquent des propriétés uniformes. Par ailleurs, pour évaluer ces propriétés, il faut choisir des essais adéquats afin de parvenir à un meilleur contrôle.

II.2 Définition :

Le béton de sable est défini selon la norme NF P18- 500 [NF P18- 500, 2005] comme un béton fin, constitué par le mélange d'un ou plusieurs sable(s), de ciment, d'addition(s) et d'eau. D'autres additions peuvent être incorporées : adjuvants, fibres, gravillons [Achoura, 2005]. L'incorporation des gravillons tels que le rapport massique G/S soit inférieur à 0,7 nous permet d'obtenir un béton de sable chargé. Ce type d'ajout vise à augmenter la rigidité du squelette granulaire du béton de sable [Zri, 2010].

La conception actuelle des bétons de sable, permet leur utilisation pour le remplacement des bétons classiques dans certains éléments de structures de bâtiment peu sollicités ; ainsi que pour la fabrication des éléments de remplissages (briques, parpaings, hourdis...). Dans ce cas les questions qui pourraient se poser sont :

- ✓ Quelle est la différence entre un béton de sable et un mortier ?
- ✓ Quelle est la différence entre un béton de sable et un béton ordinaire ?

On distingue un béton de sable d'un mortier par : la composition (il comporte des additions) ; le dosage en liant (quantité faible) ; la résistance plus élevée et la destination similaire aux usages traditionnels du béton.

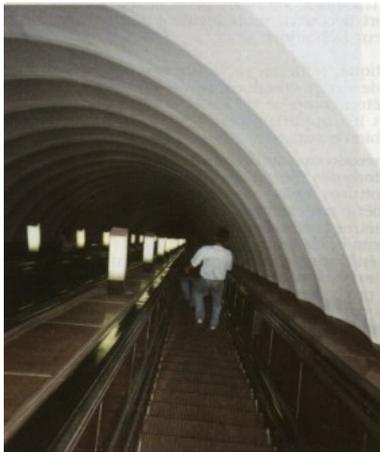
En terme de composition, il se distingue d'un béton ordinaire par un fort dosage en sable ; l'absence ou le faible dosage en gravillons et l'incorporation d'additions. Mais en termes de résistance et le dosage en ciment, ils sont presque similaires. [Zri, 2010], [Ben Amara, 2002].

II.3 Domaine d'utilisation

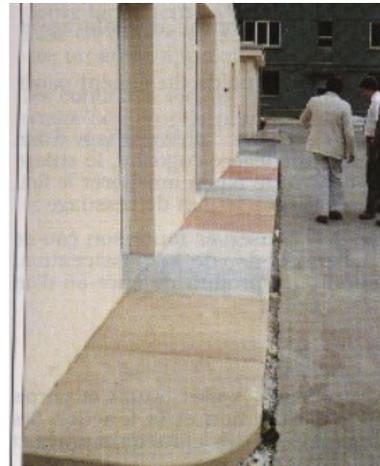
Le béton de sable est un nouveau matériau créé pour remplacer le béton classique dans certains éléments de structure. Les principaux domaines d'utilisation des bétons de sable sont :

- ✓ Travaux avec du béton injecté.
- ✓ Travaux avec un fort cadrage.
- ✓ Pilots de béton armé sur place.
- ✓ Certains travaux de fondations pour les constructions.
- ✓ Travaux pour terrasses.
- ✓ Tuyaux de canalisation en béton simple ou armé.
- ✓ Panneaux préfabriqués pour murs intérieurs et extérieurs portants, ...etc [Achoura, 2005]; [Ambroise et Pera, 1992]

Les bétons de sable peuvent être utilisés dans divers domaines tels que le bâtiment, les routes, les bétons vibrés et la projection. La technique de projection est préconisée notamment dans les travaux de renforcement des structures. Ce matériau se prête également aux travaux en immersion et dans les techniques de reprise en sous- œuvre.



Voûte mince en béton de sable
préfabriquée (Métro de Saint-Pétersbourg)



Dallage colorés en béton de sable



Blocs colorés en béton de sable

Figure II-1 Domaines d'utilisation du béton de sable

II.4 Formulation

L'étude de formulation de béton consiste à trouver le mélange optimal des constituants qui répond à un cahier de charges fixé, généralement la maniabilité et la résistance en compression. Le problème principal de l'utilisation de béton de sable est qu'il n'existe pas à l'heure actuelle de méthode de rationnelle permettant de déterminer précisément les dosages de composants en fonction des propriétés ciblées. Les méthodes disponibles sont toutes semi-empiriques et peu précises.

La formulation se fait par tâtonnement sur la base de plages de dosages (Guinez et al, 1984), (Couret, 1982) ou sur les approximations successives (Delude, 1984), (Chauvin, 1987). Certains formulateurs ont certes développés leur propre outil. Ce sont le plus souvent des méthodes basées sur une courbe granulométrique de référence englobant les fines. Ces approches sont intéressantes dans le sens où elles permettent de détecter les classes granulaires manquantes.

Compte tenu de la granularité de ce matériau, les méthodes utilisées pour la formulation du béton usuel qui consistent généralement à définir une courbe granulaire de référence ne sont pas applicables. Par conséquent, la formule de Caquot est adoptée car elle donne la porosité minimale théorique du béton à partir de l'étendue granulaire du matériau. D'ailleurs, cette formule est la base des méthodes de formulation des bétons de Bolomey, Faury et Dreux-Gorisse. Selon Caquot, la porosité minimale se décompose en la somme d'un volume d'eau et d'un volume piégé, selon la formule suivant ;

$$(e + v)_{\min} = (d/D)^{0,2}$$

où : d/D est l'étendue granulaire y compris les fines.

Toutefois, on ne peut pas considérer ces techniques comme des approches à proprement parler de formulation, car il n'existe pas de courbe de référence. Ce sont plus des supports qui facilitent la formulation.

II.5 Constituant de béton de sable :

Les composants rentrant dans la composition du béton de sable sont ceux du béton traditionnel à l'exception des fines d'ajout. Il s'agit donc de composants normalisés.

II.5.1 Sables

Le terme sable englobe tous les granulats 0/D conformes aux définitions des normes [P 18-541, 2007]. Le sable influe selon ses qualités sur les propriétés des bétons ; il participe à la résistance, il donne la cohésion du mélange et il doit être dense provenant de roches chimiquement inertes tels que : les calcaires durs, les granits et les quartzites

Suivant leurs grosseurs les sables sont classés en :

- ✓ Sable fin de 0.03 à 0.315mm
- ✓ Sable moyen de 0.315 à 2mm
- ✓ Sable gros de 2 à 5mm

Ils peuvent aussi être distingués selon leur origine :

- Sables naturels roulés : Sable de rivière, Sable de mer, Sable de dune, Sable de carrière.
- Sables artificiels : On peut les obtenir par : - Broyage de certains déchets. - Transformation industrielle de l'argile - Trempe à l'eau et à l'air du laitier de haut fourneau... [Lacroix et al, 1982]

II.5.2 Ciments

D'après la norme NF EN 197-1[NF EN 197-1, 2001] le ciment est un liant hydraulique, c'est à-dire un matériau minéral finement moulu qui, gâché avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit par suite de réactions et de processus d'hydratation et qui, après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau.

Le comblement des vides importants contenus dans le sable et l'obtention d'une compacité maximale nécessitent une forte proportion d'éléments fins : ciment et fillers d'ajout assurent ce rôle dans le béton de sable, et le rendement ainsi utilisable en pleine masse en limitant les inconvénients liés aux forts dosages en ciment: coût élevé, retrait, fissuration, etc ...

Le ciment est nécessaire à l'obtention d'une résistance suffisante pour l'usage envisagée alors que les fines (fillers) sont nécessaires à l'obtention d'une bonne compacité.

Les bétons de sable, les ciments utilisés doivent être conformes aux normes. Ils peuvent avoir deux rôles essentiels : assurer la résistance du béton et combler les vides entre les grains de sable... [Achoura, 2005].

II.5.3 Additions minérales

Les additions minérales ou fillers sont des grains qui ne dépassent pas 80 μm . Les fines sont des produits obtenus par broyage fin ou par pulvérisation de certaines roches naturelles ou artificielles (calcaire, basalte, laitier...). D'après la norme NF P18-508[NF P18-508,1995] les fillers sont des matériaux minéraux finement divisés, et peuvent être substitués partiellement au ciment pour améliorer certaines propriétés du béton hydraulique, ou pour lui conférer des propriétés particulières. Il existe deux types d'additions minérales :

- ✓ les additions minérales actives (fine de calcaire, fine organique)
- ✓ les additions minérales inertes (fumé de silice, laitier granulée) [Sablocrete, 1994]

II.5.3.1 Types d'additions minérales :

A/ Laitier cristallisé

Obtenu par refroidissement lent, il correspond à une forme minéralogique stable, il est chimiquement stable, et son pouvoir hydraulique, lorsqu'il existe, ne peut être que modeste. Ses constituants sont essentiellement des silicates et des silico aluminates de calcium. [Alexandre et Sebileau, 1988]

plusieurs travaux réalisés sur l'emploi de laitier cristallisé dans les matériaux cimentaires; [Choquet, 1947], [Alexandre et Sebileau, 1988], [Cherfa et Ait Mokhtar, 2011], ont montré que l'utilisation du laitier cristallisé découle de ces propriétés comme un granulats dans la fabrication du béton et les techniques routières, et son utilisation comme fillers permet juste d'avoir une amélioration de la compacité par l'effet de remplissage.

B/ Laitier vitrifié (granulé)

Défini par la norme NF EN 15167-1[NF EN 15167-1, 2006] comme un matériau vitrifié, il est obtenu par refroidissement rapide (par trempe), et présente une structure vitreuse et par conséquent riche en énergie. Cette forme vitreuse est une forme instable qui présente une hydraulité latente. Donc le laitier granulé est un liant hydraulique qui contient essentiellement quatre oxydes : chaux (CaO), magnésium (MgO), silice (SiO_2) et l'alumine (Al_2O_3), la figure I.5 de spectre DRX d'un laitier vitrifié donne les phases cristallines qui sont présentes, en faibles proportions (5 à 10%), sont la merwinite, la ménilite, la calcite et le quartz [Michel, 2009].

Le laitier granulé moulu est défini aussi par la norme NF EN 15167-1[NF EN 15167-1, 2006] comme une fine poudre, il est obtenu par broyage de laitier granulé de haut-fourneau, il est utilisé comme addition minérale dans les mortiers et les bétons.

C/ Fillers calcaire

Les fillers calcaires obtenus par broyage et/ou sélection, proviennent des gisements de roches calcaires. Ils sont essentiellement utilisés comme une addition inerte permettant de remplacer une partie du ciment, et éventuellement d'augmenter le volume de poudre dans le béton ; son influence sur les propriétés du béton depuis l'état frais jusqu'à l'état durci est un

aspect important à prendre en compte pour limiter l'apparition de désordres (homogénéité, aspect de surface, baisse des résistances). [Paco, 2010] ; [Bessa-Baderddine, 2004] [Bella, 2011] a montré que l'augmentation du dosage en addition calcaire est relative à une augmentation de la résistance à la compression des bétons de sable, à cause de l'augmentation de la compacité, jusqu'à arriver à un dosage optimal en addition, c'est-à-dire un optimum de compacité.

II.5.4 L'eau de gâchage :

L'eau de gâchage est un élément indispensable lors de la conception du béton. Elle Permet d'hydrater le ciment, ce qui libère ses capacités de liant, et rend également plus facile l'application du béton. L'eau utilisée doit être propre et prenez garde à ne pas l'ajouter avec excès sous risque les performances de votre béton. En effet, cela pourrait diminuer sa résistance et sa durabilité.

II.5.5 Les adjuvants :

Selon la norme NF EN 934-2 [NF EN 934-2, 2002], les adjuvants sont des produits chimiques incorporés à faible dose (moins de 5% de la masse du ciment) dans le béton ou le mortier, afin de modifier certaines de ses propriétés comme la rhéologie, la durabilité et les propriétés mécaniques. L'incorporation se fait soit avant, pendant le mélange, ou bien au cours d'une opération supplémentaire de malaxage. Les bétons de sable utilisent les mêmes adjuvants que les bétons traditionnels, souvent les plastifiants ou super plastifiants... [Achoura, 2005]

Ils sont classés suivant leur fonction principale et on peut distinguer quatre grandes catégories d'adjuvants :

Nature	Effets
Prise et durcissement	✓ Accélérateur de prise : diminue le temps de prise du béton.
	✓ Accélérateur de durcissement : accélère le temps de durcissement du béton.
	✓ Retardateur de prise : ralentit le temps de prise du béton sans l'altérer.
Ouvrabilité du béton	✓ Plastifiant : améliore la maniabilité du béton sans l'altérer.
	✓ Plastifiant réducteur d'eau : réduit la teneur en eau dans le but d'augmenter la résistance du mélange.
	✓ Super plastifiant :
	✓ Fonction fluidifiant : (dosage en eau normal) améliore la maniabilité mais diminue la résistance.
	✓ Fonction réducteur : (très faible dosage en eau) entraîne une forte réduction en eau dans le mélange tout en conservant une bonne maniabilité.

Nature	Effets
Modification de certaines propriétés	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Entraîneur d'air : permet la formation de petites bulles d'air réparties de manière homogène Ce qui augmente la maniabilité et la résistance au gel du béton a l'état solide. ✓ Hydrofuge : améliore l'imperméabilité du béton en obturant les pores. ✓ Les pigments : offrent la possibilité de modifier la couleur du béton.
Les produits de cure	Produits appliqués à la surface du béton frais, ils ont pour rôle de protéger le béton contre d'éventuels risques de dessiccation.

II.5.6 Autres ajouts

Comme les autres bétons, on peut utiliser d'autres ajouts au béton de sable pour améliorer certaines propriétés, les plus utilisés sont les fibres métalliques (en acier ou en fonte) ou les fibres de polypropylène, les gravillons et les colorants.

II.5.6.1 Les fibres : (polypropylènes, acier, fonte amorphe ... :

Les fibres se présentent le plus souvent en faisceaux qui, une fois dans le malaxeur, se séparent et se répartissent dans la masse du béton. Leurs longueurs les plus courantes varient de 10 à 50mm pour des diamètres compris entre 15 et 250 microns.

Les fibres polypropylènes améliorent la résistance aux chocs, à l'écaillage et limitent les risques de fissuration dus au retrait dans les premiers ages du béton. Par ailleurs leur ajout ne diminue pas la maniabilité du béton mais au contraire aurait tendance à l'améliorer.

II.5.6.2 Les gravillons

On considère qu'un béton de sable peut contenir un certain pourcentage de gravillons et conserver sa domination de béton de sable d'une façon pratique, on pourra considérer qu'on a affaire à un béton de sable tant que le rapport massique G/S (gravillons sur sable) reste inférieur à 0,70. $G/S < 0,70$

II.5.6.3 Les colorants

Les colorants habituellement utilisés dans les bétons traditionnels peuvent également être employés pour certains usages de bétons de sable : ils nécessitent toutefois un soin particulier dans l'homogénéisation et une formulation appropriée du béton de sable pour conserver une stabilité de la teinte au cours du temps.

II.6 Propriétés générales

II.6.1 Granulométrie / maniabilité

Une des particularités des bétons de sable est de nécessiter davantage d'eau que les bétons classiques ; ceci se traduit par des valeurs du rapport E/C (eau/ciment) systématiquement supérieures à 0,5, ce rapport se situant généralement entre 0,6 et 0,7. Cette particularité est due à une surface spécifique plus importante du mélange ; d'ailleurs, si l'on considère non plus le rapport E/C, mais le rapport $E/C + A$ (A = Addition en fines), on obtient des valeurs similaires aux bétons traditionnels. La granulométrie du sable jouera également sur le besoin en eau: plus le sable est riche en éléments grossiers, plus la maniabilité s'améliore. Ceci se traduit par une relation entre module de finesse et maniabilité: l'augmentation du module de finesse entraîne une diminution du temps d'écoulement et donc une amélioration de maniabilité.

Pour chacun des sables l'augmentation de la teneur en fine (diminution du module de finesse) entraîne une maniabilité moins bonne. Le phénomène n'a pas un caractère systématique. Il dépend de la nature des fines incorporées : logiquement l'ajout des fines de type sphérique en diminuant la quantité des vides devrait rendre l'eau plus efficace et donc améliorer la maniabilité. La relation dosage en fines-maniabilité peut dépendre aussi de la nature du sable. On constate en effet :

- Un comportement différent selon la granulométrie du sable ; (la figure 08 montre l'effet différent de fines calcaires sur un sable alluvionnaire 0/4 et un sable de dune, à teneur en eau constante)
- Pour le sable de dune, l'ajout de fines entraîne, jusqu'à 200 kg/m³ une chute de maniabilité ce qui n'est pas le cas pour le sable alluvionnaire (plus compact).

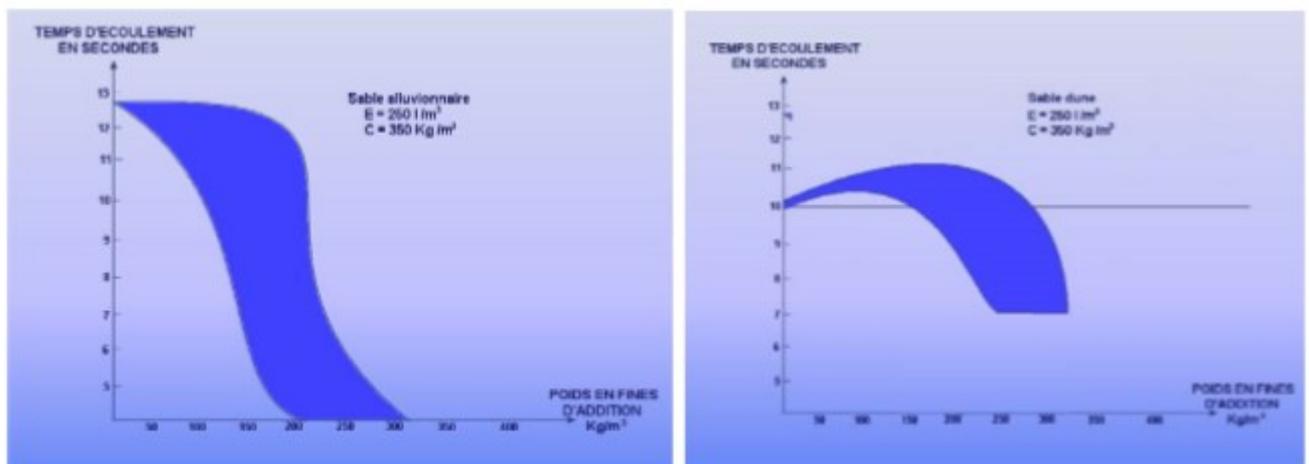


Figure II-2 Influence de la nature du sable sur la maniabilité (avec fines d'addition calcaires)

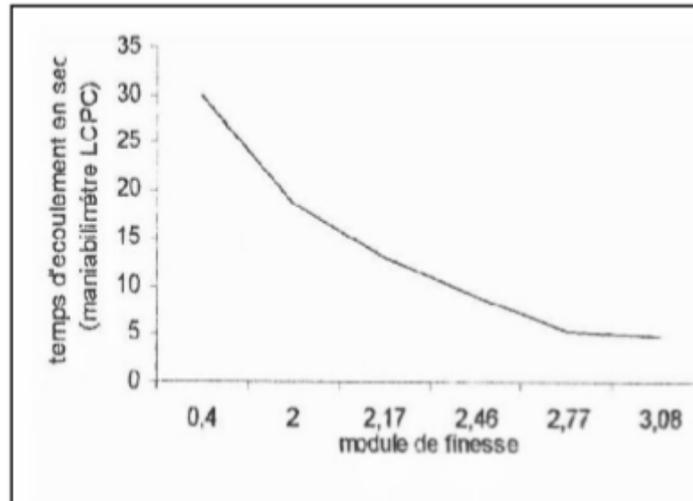
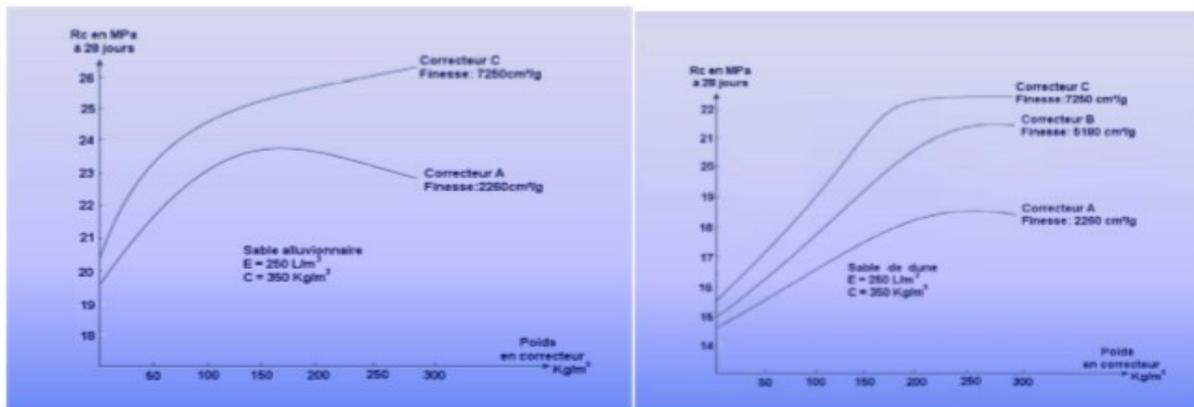


Figure II-3 Maniabilité en fonction de module de finesse [Sablocrete, 1994]

II.6.2 Granulométrie/ résistance

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

- La finesse de l'addition Plus l'addition est fine (et bien défloculée) plus elle est efficace au niveau du gain en compacité (et donc du gain en résistance); ce résultat est valable quelle que soit la granulométrie du sable; on le constate avec des fines calcaires aussi bien sur un sable alluvionnaire (fig : 9 a) que sur un sable de dune (fig : 9 b).



(a) (b)

Figure II-4 Effets du dosage et de la finesse de d'addition sur la résistance

- La nature de l'addition A même dosage, la figure 10, permet de constater l'extrême diversité du niveau de performance atteint selon la nature du filler ; si l'addition de fines permet d'améliorer systématiquement la résistance, ce gain est en effet très variable.

La différence est encore plus considérable si l'on se place à maniabilité constante. Les fillers les plus efficaces sont ceux qui, hydrauliquement actifs, entraînent également une

réduction d'eau. Il convient de noter que ces résultats ont été obtenus sans adjuvant et que l'emploi d'un plastifiant permettrait d'augmenter l'efficacité de certains fillers hydrauliquement actifs mais nécessitant un besoin en eau important.

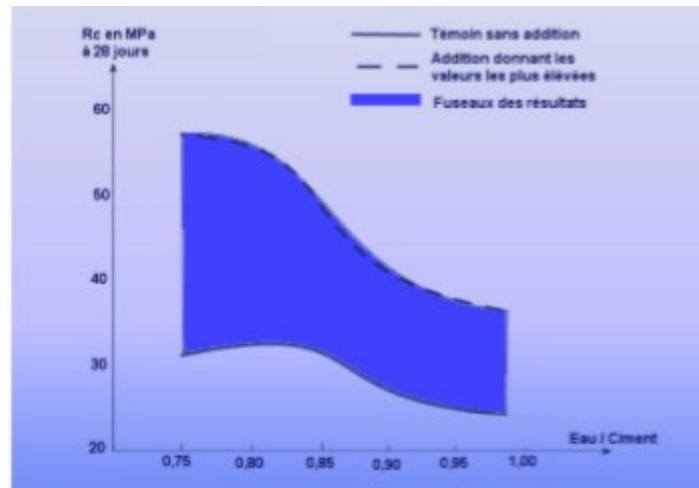


Figure II-5 Influence de la nature de l'addition sur le niveau de résistance

• La dimension du D_{max} ($0/D$) Pour une même valeur du rapport E/C (eau/ciment), on constate (figure: 11-a) que l'effet du diamètre D_{max} du plus gros granulats est peu important et, en tout état de cause, pas défavorable aux sables. Le seul problème tient à la maniabilité très différente selon les bétons : très maniabilité dans le cas d'un 0/20, on aura une maniabilité de type préfabrication dans le cas du sable.

A même dosage en ciment (Figure :11- b) mais à E/C différent, les différences sont beaucoup plus importantes. Les maniabilités étant identiques, il faudra beaucoup plus d'eau dans le cas des sables, ce qui aura pour conséquence une chute de la résistance. Là encore, on peut minimiser cette chute par l'emploi d'un plastifiant réducteur d'eau.

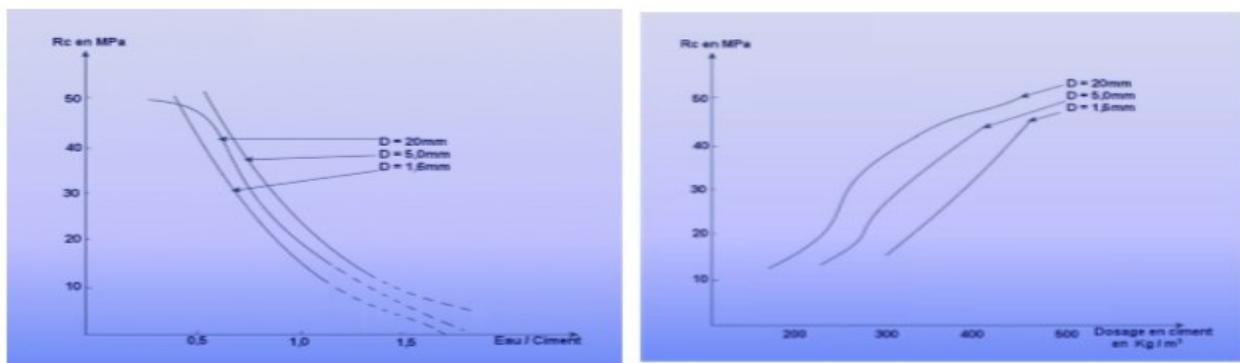


Figure II-6 Effets de la granularité sur la résistance

II.6.3 Propriétés spécifique :

II.6.3.1 Adhérence aux armatures

Quelques comparaisons ont été trouvées entre les différentes formulations de béton de sable et un béton témoin traditionnel à l'aide de l'essai pull-out. Cet essai consiste à mesurer le

déplacement d'une armature, noyée dans le matériau durci, en fonction de l'effort de traction qui lui est appliqué.

Selon la formulation du béton de sable et donc son niveau de performance, on obtient des résultats meilleurs ou moins bons que le béton de référence. Il est vraisemblable que les mêmes variations de composition appliquées à ce béton auraient mené à des écarts du même ordre. Ce qui conduit à penser que les bétons de sable ne se distinguent pas particulièrement, sur cet aspect, des bétons classiques.

Si l'on considère les résultats de cet essai pour les petites déformations (partie initiale), on constate que la contrainte correspondant au même niveau de déformation (50 microns) est d'autant plus forte que la résistance en traction du béton de sable est élevée

Enfin, la granularité du béton de sable n'est pas un élément essentiel, puisque, à même niveau de résistance, l'adhérence avec un sable dunaire très fin a été supérieure à celle obtenue avec un sable alluvionnaire.

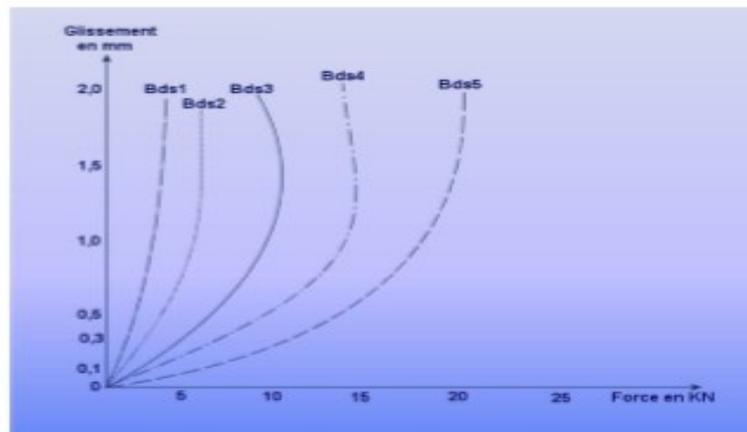


Figure II-7 Variation de l'adhérence d'une armature en fonction de la formulation

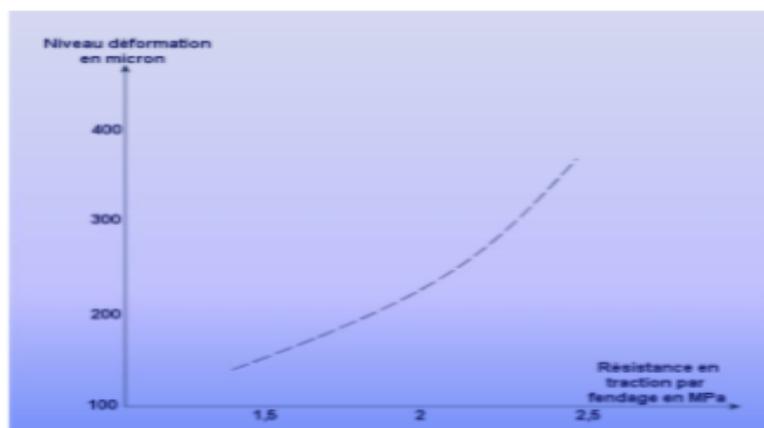


Figure II-8 Influence de la résistance en traction du béton de sable sur l'adhérence des armatures

II.6.3.2 Tenue en fatigue

Le comportement en fatigue des bétons de sable est important à connaître pour le dimensionnement des chaussées.

Ce dimensionnement s'effectue en effet à partir de la contrainte qui, appliquée au matériau, provoque sa rupture au bout de 10^6 chargements; l'essai est réalisé sur éprouvette trapézoïdale encastrée à la base et sollicitée en tête. L'essai est réalisé à différents niveaux de contrainte; à chaque niveau de contrainte correspond un nombre N de sollicitations provoquant, la rupture de l'éprouvette et correspondant à sa durée de vie : c'est la courbe de fatigue (linéaire en coordonnées semi-logarithmiques). De cette courbe on déduit la valeur : cette valeur permet de calculer la contrainte admissible pour le matériau, et, par là, l'épaisseur à adopter.

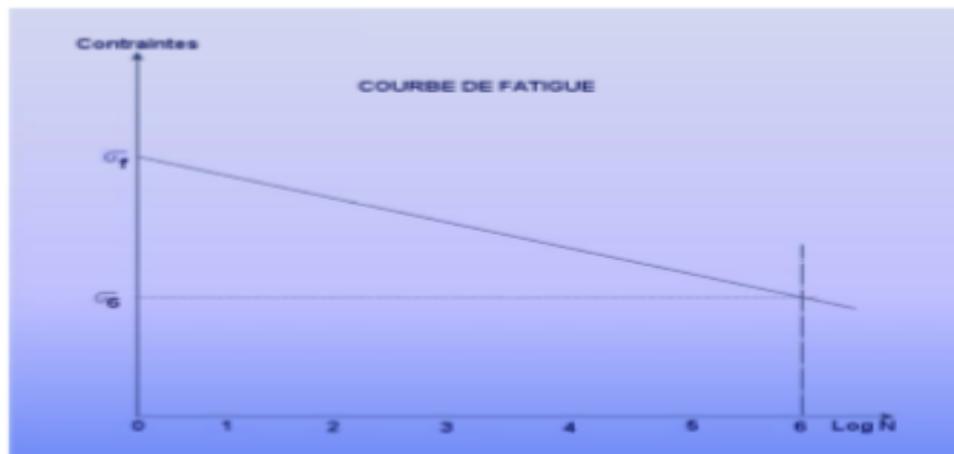


Figure II-9 Courbe de fatigue

II.6.3.3 Retrait et fluage

Des essais de retrait et de fluage ont été réalisés sur béton de sable en comparaison avec un béton classique.

Pour ce qui est du retrait, ils ont permis de constater (Figure : 15) que, lorsqu'on isolait le matériau de l'extérieur (milieu étanche), le retrait, dit d'auto-dessiccation, du béton de sable était voisin de celui du béton traditionnel. Si on laisse le béton sécher (milieu non étanche) le retrait du béton de sable peut atteindre des valeurs doubles de celui d'un béton classique. Le phénomène a été expliqué et est lié, vraisemblablement, à une distribution et une taille des vides différentes entre les deux matériaux.

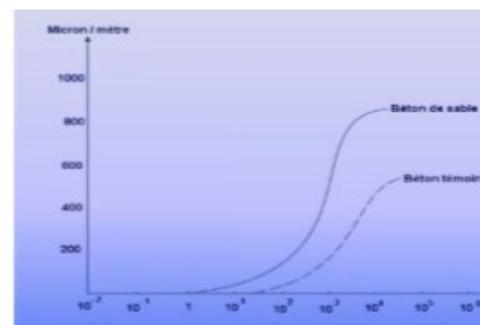
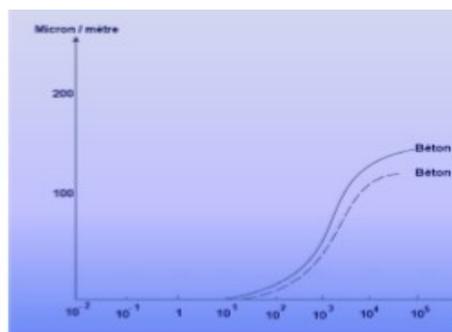


Figure II-10 Retrait d'auto-dessiccation.**Figure II-11 Retrait total**

On observe en matière de fluage : une variation semblablement à la structure du matériau qui conditionne par ailleurs les valeurs du module d'élasticité, les différences entre béton de sable et béton classique (le module de béton de sable étant plus faible).

Il faut signaler toute fois que des résultats comparatifs ont été faits à un module de résistance en compression de 25 MPa et qu'en matière de fluage notamment un béton de sable plus résistant n'a pas le même comportement : fluage plus faible, voisin de celui d'un béton classique. L'hypothèse ont confirmé, cette hypothèse puisque, en passant de 25 à 50 MPa. On divise le fluage par 5. Au même niveau de résistance dans ce cas 50 MPa, le fluage du béton de sable n'est supérieur à celui d'un béton classique de même niveau de résistance que de 20%.

✓ Durabilité du béton de sable

Conventionnellement, la durabilité d'un béton est reliée à ses capacités d'échange avec le milieu extérieur. De ce fait, il est évident que les paramètres tels que porosité, organisation géométrique des pores et perméabilité sont des paramètres physiques de premier ordre de la durabilité. De même, les phénomènes internes tels que l'alcali réaction ou l'attaque sulfatique différée sont aussi des processus d'altération du béton accélérés par les échanges hydrauliques avec le milieu extérieur.

La tenue d'un béton vis-à-vis des phénomènes d'échange dépend aussi de l'environnement de celui-ci, raison pour laquelle l'estimation de la durabilité s'effectue généralement par un ou plusieurs essais suivants, selon l'environnement prévisible du matériau (milieu urbain, région montagneuse, milieu marin, ambiances agressives...) :

- ☛ Perméabilité à l'air et à l'eau ;
- ☛ Gel-dégel ;
- ☛ Carbonatation ;
- ☛ Pénétration des ions chlorure.

D'une façon générale, les bétons de sable sont plus poreux que les bétons traditionnels : s'ils ont d'avantage de vides, la taille et le nombre de ces vides se distinguent de ceux du béton traditionnel; ils sont plus nombreux, plus petits et davantage monodimensionnels. Leur nombre plus élevé entraîne une probabilité de colmatage plus fréquente et plus aisée compte tenu de leur faible taille.

II.6.3.4 La résistance au délavage du béton de sable

Le délavage se manifeste sur des bétons frais, immergés, et se traduit sous forme de perte de cohésion entre les éléments les plus grossiers et les éléments plus fins du béton, ces derniers étant entraînés par l'eau pour limiter ce phénomène qui, pour des coulages sous l'eau, tend à

produire des bétons sans cohésion ni compacité, et donc impropres à leur destination, des adjuvants anti-délavage peuvent être utilisés.

Mais il est également possible d'affiner la composition, notamment la granulométrie, en particulier les bétons de sable, par leur finesse et leur meilleure homogénéité ont paru aptes à bien résister au délavage : cette aptitude a effectivement été constatée lors de chantiers de coulage de bétons de sable immergés (comblement de cavités sous piles de pont par exemple), et elle a été mise également en évidence en laboratoire.

II.6.3.5 Phénomènes de ségrégation des constituants

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

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

II.6.3.6 Influence de l'ajout de gravillons

L'idée d'incorporer des gravillons dans une composition de béton de sable peut surprendre, ou paraître contradictoire avec la volonté d'utiliser ce type de béton; un tel ajout ne modifiait pas les propriétés spécifiques du béton de sable, pour peu que le dosage en gravillons soit faible.

Un tel ajout a par contre un effet bénéfique sur certaines caractéristiques notamment le fluage. Il a paru intéressant de vérifier cet effet sur d'autres caractéristiques des bétons de sable et en particulier la résistance à l'attrition. Une étude a été faite en laboratoire pour quantifier ces effets avec des ajouts de gravillons 6/10 de trois natures différentes. Les quantités de gravillons 6/10 ajoutés ont volontairement été limitées à des taux faibles, le rapport G/S (gravillons/sables) variant entre 0 et 0,7 % dans cet intervalle, la charge en gravillons est suffisamment faible pour ne constituer qu'un ajout de composition, sans réellement avoir un effet structurant. La formulation et le comportement de tels bétons de sable chargés restent ceux d'un béton de sable et non ceux d'un béton traditionnel (pour lequel G/S est en général supérieur à 1,5 sans descendre en-deçà de 1,2).

II.6.3.7 La résistance aux chocs :

La particularité des bétons de sable de mieux résister aux chocs, constaté empiriquement, a été attribuée à une structure plus fine et plus homogène, permettant de mieux répartir les impacts et d'éviter les éclatements que l'on observe sur les bétons classiques, facilités par le déchaussement des gros granulats sous l'effet du choc. Cette propriété a été étudiée à l'aide de l'essai Los Angeles sur des cubes obtenus par sciage : l'influence de l'ajout de gravillons n'est favorable que jusqu'à $G/S = 0,25$; au-delà le gain est peu sensible et l'influence est même négative à partir de $G/S = 0,75$ où la teneur en gravillons commence à avoir le même effet que sur un béton traditionnel.

II.6.3.8 La résistance à Attrition :

Quantifiée à l'aide de l'essai Deval, on peut constater que, comme il était prévisible, l'ajout de gravillons, quelle qu'en soit la nature, améliore sensiblement (jusqu'à 50 %) cette caractéristique. Au-delà de $G/S = 0,5$, il n'y a plus d'amélioration.

II.6.3.9 La résistance à la compression :

Un ajout de gravillons avec $G/S = 0,25$ se révèle très valorisant ; au-delà de 0,25 l'influence est beaucoup moins significative.

II.6.3.10 Le module d'élasticité :

Les bétons de sable ont des modules d'élasticité plus faibles que ceux des bétons classiques : c'est une donnée générale des matériaux granulaires 0/D pour lesquels le module diminue lorsque le D_{max} diminue.

L'ajout de gravillons fait varier le module de la même façon que la résistance en compression, le gain étant encore plus net quand G/S passe de 0 à 0,25 et l'absence d'influence encore plus grande au-delà.

II.6.3.11 Comportement thermique

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

Pour dimensionner une structure, la prévision et la prise en compte du champ des températures à l'intérieur d'un béton font l'objet de logiciels de modélisation et de calcul qui nécessitent de connaître un certain nombre de caractères thermiques du béton, et notamment:

II.6.3.12 L'exothermie

Traduction des températures atteintes et de leur cinétique dans un béton (mesures effectuées sur éprouvettes à l'intérieur d'un calorimètre); Le coefficient global de chaleur : il traduit la densité du flux thermique d'une pièce en béton soumise à des sources de chaleur dans diverses conditions;

II.6.3.13 La chaleur massique

La chaleur massique ou quantité de chaleur nécessaire pour élever 1g de matériau de 1 °C, qui traduit l'inertie thermique;

- **La conductivité thermique**, qui caractérise la capacité d'un matériau à conduire la chaleur;
- Le coefficient de dilatation thermique

Le coefficient de dilatation thermique, qui traduit les allongements en fonction de la température et qui est très utile au dimensionnement des ouvrages, notamment pour l'espacement des joints de dilatation ;

II.6.4 Propriétés de béton de sable recyclé

Les sables recyclés sont des matériaux hétérogènes en raison de leur origine diverse, il serait donc important pour les usines de recyclage d'avoir à leur disposition des méthodes rapides pour détecter et rejeter les lots de mauvaise qualité tout au long du processus de production.

L'absorption est un indice de qualité pour les sables recyclés, car elle est liée à d'autres propriétés importantes (densité, teneur en fines, comportement au gel et au dégel, etc.). De plus, l'absorption des sables recyclés atteint généralement des valeurs plus élevées que les sables naturels, conduisant à une influence néfaste sur la consistance du béton et du mortier.

II.7 Formulation de béton de sable

La formulation d'un béton consiste à choisir des constituants et à les proportionner en vue d'obtenir des propriétés spécifiques répondant à des critères techniques et économiques puis à combler la porosité de cet empilement avec la pâte de ciment. Cette pâte elle-même étant caractérisée par le rapport E/C pour viser une maniabilité à court terme et une résistance et durabilité à long terme. Le problème de la formulation d'un béton se pose principalement en termes d'optimisation de la compacité du squelette granulaire. Cette compacité définie comme le rapport du volume solide sur le volume total, correspond au complément à l'unité de la porosité. Les méthodes classiquement utilisées sont celles des bétons ordinaires avec des adaptations compte tenu de la grande quantité de fines utilisée

II.7.1 Estimation du dosage en fines d'un béton de sable

On considère que les constituants solides sont séparés en deux fractions :

Les fines regroupant l'ensemble de grains de taille inférieure à $80\mu\text{m}$.

Le sable de dimension $80\mu\text{m}$ jusqu'à D (D : diamètre maximal du sable)

Les fines sont constituées du ciment, de fine d'addition et de la fraction du sable inférieure à $80\mu\text{m}$. Considérons que :

$$P_s = 0.75 \left(\frac{0.08}{D} \right)^{1/5} \text{ (En \% volumique).} \quad \text{Eq-II.1}$$

P_s = la porosité de l'étendue granulaire du sable.

D'après l'hypothèse de Caquot [fines] = [V], le dosage volumique optimal des fines s'écrit

:

$$[\text{Fines}] = 0.38 \left(\frac{0.08}{D} \right)^{1/5} \text{ (En \% volumique).} \quad \text{Eq-II.2}$$

II.7.2 Porosité et dosage en eau dans le béton sable

$$(E+V)_{\text{min}} = 0.8 \left(\frac{d}{D} \right)^{0.2} . \quad \text{Eq-II.3}$$

-“d” est calculé de la formule suivante :

$$d = \frac{60}{f * \rho}$$

Avec:

f : surface spécifique en cm²/g

- ρ : densité en g/cm³.

[vide] = K [eau] (l/m³) ;

K compris entre 0.2 et 0.25 Eq-II.4

II.7.3 Estimation du dosage en sable

$$[\text{Sable}] = 1000 - [\text{fines}] - [\text{eau}] - [\text{vides}] \text{ en (l/m}^3\text{)} \quad \text{Eq-II.5}$$

II.7.4 Estimation de la résistance en compression

$$R_b = \frac{(K_f * R_c)}{\left[1 + \frac{3.1(e+v)}{c(1+K_1+K_2)}\right]^2} \quad \text{Eq-II.6}$$

K_f: Coefficient granulaire (varie de 4.5 à 5)

R_c: Classe de résistance du ciment (Mpa). (e+v)

(e+v): volume d'eau + vide en litres

C : dosage en ciment.

R_b : résistance en compression de béton à 28 jours (MPa).

$$K_1: k_1 = k_{cv} \frac{cv}{c} + k_{fs} \frac{fs}{c}$$

$$0.2 < k_{cv} < 0.4 \quad 2 < k_{fs} < 3.3 \quad \text{et} \quad K_1 \leq 0.5$$

$$K_f = K_{fil} \frac{fil}{c} \quad 0 < k_{fil} < 0.5 \quad \text{et} \quad K_2 \leq 0.2$$

K₁ : Coefficient pouzzolanique.

K₂: Coefficient d'activité du filler calcaire.

K_{cv}; K_{fs} et K_{fil} : Coefficient d'équivalence en ciment des différentes additions en fines.

CV; FS et FIL: Dosage en cendre volante, fumée de silice et de fillers (Kg/m³)

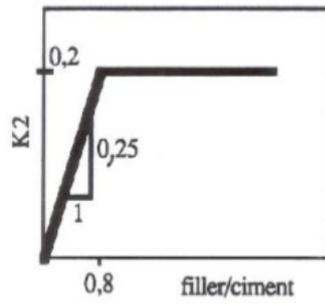


Figure II-12 Coefficient d'activité du filler calcaire [Sablocrete, 1994]

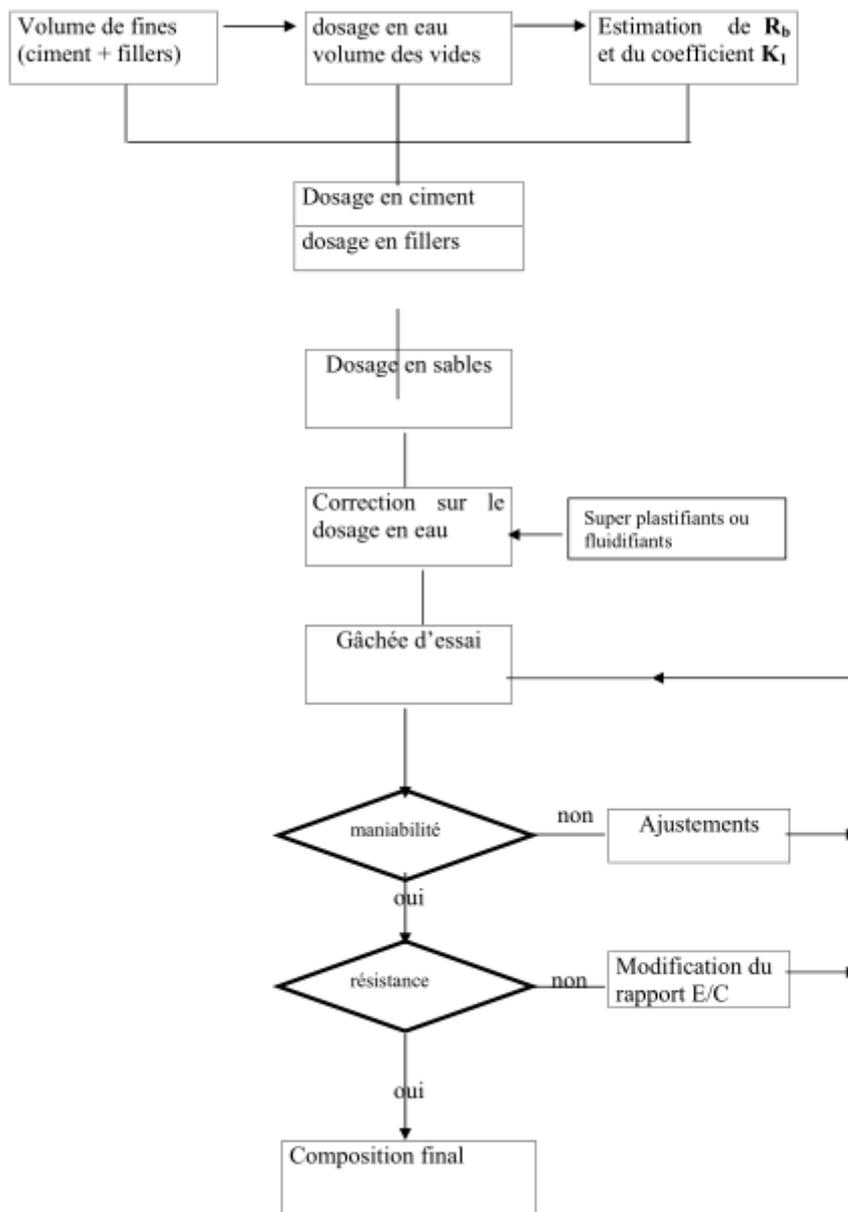


Figure II-13 Organigramme de formulation du béton de sable

Chapitre III :

Caractérisation des matériaux et formulation du béton de sable

Chapitre III :

Caractérisation des matériaux et formulation du béton de sable

III.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à la présentation des différents types de matériaux utilisés dans notre travail, leurs caractéristiques chimiques et physiques.

III.2 Matériaux utilisés

III.2.1 Ciment

Le ciment utilisé pour la formulation des bétons est un ciment portland CPA de classe CEM I 42,5, fabriqué par la Cimenterie de SPA BISKRIA CIMENT, Algérie. La composition chimique et les caractéristiques physiques sont représentées aux tableaux III.1 et III.2.

Tableau III-1 Analyse chimique du ciment utilisé

Oxydes	Massique (%)
CaO	64,67
Al ₂ O ₃	4,41
Fe ₂ O ₃	3,62
SiO ₂	21,00
MgO	2,37
Na ₂ O	0,19
K ₂ O	0,67
Cl	0,019
SO ₃	2,70

Tableau III-2 Caractéristiques physiques du ciment

Désignation	Unité	Valeurs
Masse volumique absolue	g/cm ³	3,10
Masse volumique apparente	g/cm ³	0,98
Refus au tamis 40 µm	%	12,00
Refus au tamis 80 µm	%	1,05
Consistance normale	%	25
Début de prise	h/min	
Fin de prise	h/min	

Surface Spécifique de Blaine	cm^2/g	3728
------------------------------	------------------------	------

III.2.2 Fillers

On a utilisé dans cette étude, deux types fillers : filler de calcaire et filler recyclé. Ils sont obtenus par broyage au niveau de laboratoire (figure III.2).

Les échantillons, que ce soit de sable naturel calcaire ou de sable recyclé, sont introduits dans le broyeur du labo, suivie par des boules sphériques de différents diamètres de telle façon dont leur poids soit trois fois à celle de l'échantillon broyé.

On a utilisé des échantillons de 10 kg dont on a besoin de 30 kg boules de broyage. Et la durée de l'opération du broyage a duré 8 heures.



Figure III-1 Préparation des Filler recyclé

Les caractéristiques des fillers comme les densités et la surface spécifique de Blaine sont déterminé au niveau du laboratoire de la cimenterie de Hadjar Essoud, Skikda. Elles sont données par le tableau III-3.

Tableau III-3 Caractéristique de filler de calcaire

	Densité	S.S.B
Filler de carrière	2,89 g/cm ³	7729 cm ² /g
Filler recyclé	3,00 g/cm ³	8064 cm ² /g

A partir du tableau III-3, On remarque que les densités des deux fillers de carrière ou recyclé sont pratiquement identiques à celle du ciment, cependant leurs surfaces spécifiques de Blaine sont très élevées par rapport à notre ciment cela est dû probablement au temps écoulé dans le broyage.

III.2.3 Sables

Deux types de sables sont utilisés dans cette étude : un sable naturel de carrière et un sable recyclé.

III.2.3.1 Sable de carrière

C'est un sable naturel de calcaire concassé (0-4 mm) est obtenu par réduction de gravillon ou plus simplement de concassage des roches pour l'obtention du gravier.

III.2.3.2 Sable recyclé :

Le sable recyclé de fraction 0-4 mm issu de blocs de béton de démolition collectés sur les chantiers et préparé au niveau de laboratoire.



Figure III-2 Photo de sable de carrière utilisé



Figure III-3 Photo du Sable recyclé utilisé

III.2.3.2.1 Elaboration des granulats recyclés

Une fois arrivés au laboratoire, les blocs de béton et gravats subissent plusieurs étapes de transformation. Un premier broyage grossier suivi d'un criblage ; un premier tri par granulométrie est opéré.

- ✓ **Concassage primaire** : pour réduire la taille des blocs de béton à l'aide d'un marteau.
- ✓ **Concassage secondaire** : Un concassage dans un concasseur à mâchoire de laboratoire de génie civil de l'université Badji Mokhtar- Annaba, pour obtenir les dimensions des grains voulues.
- ✓ **Criblage** : pour éliminer les impuretés et pour obtenir les fractions granulaires du sable (0/4).



Concassage primaire

Concassage secondaire

Criblage

Figure III-4 Etapes de préparation du sable recyclé

III.2.4 Adjuvants

L'adjuvant utilisé est un super plastifiant hautement réducteur d'eau ViscoCrete 522 commercialisé par la société 'Sika'. Ces propriétés sont données regroupés dans le tableau III-4.

Tableau III-4 Caractéristiques de l'adjuvant utilisé

Caractéristiques	
Aspect / Couleur	Liquide Brun
Durée de Conservation	12 mois dans son emballage d'origine intact.
Densité	$1,085 \pm 0,01$
Valeur pH	$5 \pm 1,0$
Extrait Sec	$29,0 \pm 1,0\%$
Teneur Totale en Ions Chlorure	$\leq 0,1\%$

III.2.5 Eau

Le rôle de l'eau est à l'hydratation du ciment et facilite aussi la fluidification du béton et sa mise en œuvre. L'eau de gâchage utilisée est une eau courante de robinet. Elle est conforme à la norme NF EN 1008 (1).

III.3 Essais de caractérisation

III.3.1 Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs. Pour les sables, on utilisera en général les tamis de modules (0.08 – 0.125 – 0.16 – 0.2 – 0.315 – 0.5 – 0.63 – 0.8 – 1 – 1.25 – 1.6 – 2 – 2.5 – 3.15 – 4). L'essai a été réalisé conformément à la norme NF P 18-560 (2).



Figure III-5 Photos des tamis utilisés

III.3.2 Module de finesse

Les sables doivent présenter une granulométrie telle que les éléments fins ne soient ni en excès, ni en trop faible proportion, S'il y a trop de grains fins, il sera nécessaire d'augmenter le dosage en eau tandis que si le sable est trop gros, la plasticité du mélange sera insuffisante et rendra la mise en place difficile. Le caractère plus ou moins fin d'un sable peut-être quantifié par le calcul du module de finesse (Mf), selon la norme NF P18 304.

Le Mf caractérise la granularité du sable, il est défini comme le (1/100) de la somme des refus, exprimés en pourcentage, sur les différents tamis de la série suivante : 0.125 – 0.25 – 0.5 – 1 – 2 – 4 mm.

III.3.3 Mesure de la propreté (l'essai d'équivalent de sable)

Cet essai a pour but de mesurer la propreté des sables entrant dans la composition des bétons. L'essai consiste à séparer les floccules fins contenues dans le sable. Une procédure normalisée permet de déterminer un coefficient d'équivalent de sable qui quantifie la propreté de celui-ci selon la norme P 18-597 (3).



Sable de carrière



Sable recyclé

Figure III-6 Essai d'équivalent de sable des sables utilisés

III.3.4 Masse volumique apparente

La masse volumique apparente est la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat, y compris les vides et des pores entre des grains. Cet essai est réalisé selon la norme NF EN 1097-3 (4)

L'essai consiste à remplir un récipient vide de volume connu de matériau sec sans le tasser et à peser ensuite cette quantité de matériau. On calcule la valeur de la masse volumique par le rapport :

$$\rho = M/V \text{ (g/cm}^3\text{)}$$

*Figure III-7 Essai de mesure de la masse volumique apparente.*

III.3.5 Masse volumique absolue

La masse volumique absolue est la masse d'un corps par unité de volume sans vides entre les grains. Cet essai est réalisé selon la norme NF EN 1097-3 (5).

Il s'agit de mesurer la masse, par unité de volume de matière pleine sans aucun vide entre les grains en versant une quantité connue de la poudre dans un liquide inerte, si la matière est hydraulique, sinon, dans de l'eau.

*Sable de carrière**Sable recyclé**Figure III-8 Mesure de la masse volumique apparente absolue au pycnomètre*

III.3.6 Teneur en eau

La teneur en eau la quantité d'eau liquide contenue dans un échantillon de matière, par exemple un échantillon de sol, de roche, de céramique ou de bois, la quantité étant évaluée par un rapport pondéral ou volumétrique. Cette propriété intervient dans un large éventail de disciplines scientifiques et techniques, et s'exprime comme un rapport ou quotient, dont la valeur peut varier entre 0 (échantillon complètement sec) et (pour la teneur «volumétrique») la «porosité à saturation» du matériau.

III.3.7 Résultat

Les caractéristiques physiques des sables utilisés sont regroupées dans le tableau 4 :

Tableau III-5 Caractéristique physiques des sables utilisés

Caractéristiques	Unité	Sablerecyclé	Sable de carrière
Masse volumique apparente	g/cm ³	1,467	1,659
Masse volumique absolue	g/cm ³	2,28	2,69
Module de finesse	-	3,16	2,39
Équivalent de sable	%	90,28	92,95
Teneur en eau	%	2,17	1,39

Les résultats de l'analyse granulométrique des sables recyclé et de carrière sont regroupés dans le tableau III-6 et III-7 respectivement :

Tableau III-6 Analyse granulométrique du sable recyclé

Tamis	Mi(g)	ai (%)	Ai(%)	Transat (%)
5	0	0,00	0,00	100,00
4	19	2,375	2,38	97,62
3,15	132,9	16,61	18,99	81,01
2,5	93,2	11,65	30,64	69,36
2	46	5,75	36,39	63,61
1,6	55,6	6,95	43,34	56,66
1,25	55,6	6,95	50,29	49,71
1	24,9	3,1125	53,4	46,6
0,8	46,8	5,85	59,25	40,75
0,63	29,9	3,7375	62,99	37,01
0,5	41,75	5,218	68,24	31,76
0,315	67,25	5,91	74,12	25,88
0,25	39,7	4,96	79,08	20,92
0,2	36,35	4,54	83,62	16,38
0,16	19,2	2,4	86,02	13,98
0,125	22,4	2,8	88,82	11,18
0,08	39,7	4,963	93,78	6,22
Fond	23,05	2,88	96,86	3,14

Tableau III-7 Analyse granulométrique du sable de carrière

Tamis	Mi(g)	ai (%)	Ai(%)	Transat (%)
5	0	0,00	0,00	100,00
4	0,75	0,07	0,07	99,93
3,15	10,5	1,31	1,38	98,62
2,5	47,26	5,91	7,29	92,71
2	54,87	6,86	14,15	85,85
1,6	51,9	6,49	20,64	79,36
1,25	65,5	8,18	28,83	71,17
1	38,7	4,84	33,67	65,33
0,8	73,73	9,23	42,9	57,1
0,63	38,17	4,77	47,67	52,33
0,5	47,03	5,88	53,55	46,45
0,315	70,43	8,80	62,35	37,65
0,25	40,13	5,02	67,37	32,63
0,2	56,9	7,11	74,48	25,52
0,16	32,87	4,11	78,59	21,41
0,125	43,99	5,50	84,09	15,91
0,08	99	12,38	96,47	3,53
Fond	28	3,5	99,97	0,03

III.3.7.1 Courbes granulométriques

Les résultats de ces mesures sont donnés sous formes graphiques, en représentant des courbes cumulatives de tamisat (% de grains inférieurs à la taille donnée).

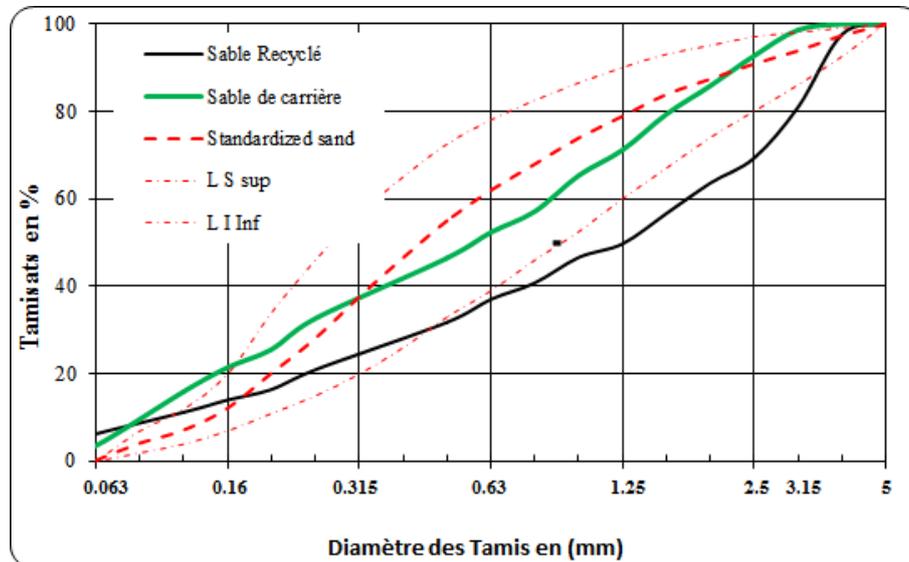


Figure III-9: Courbes granulométrique des sables utilisés

III.4 Formulation de béton de sable

Dans cette étude nous avons utilisé la formulation de SABLOCRETE qui est basé sur la réalisation des gâchées successives.

Estimation du dosage en fines d'un béton de sable :

On considère que les constituants solides sont séparés en deux fractions :

- Les fines regroupant l'ensemble de grains de taille inférieure à $80\mu\text{m}$.
- Le sable de dimension $80\mu\text{m}$ jusqu'à D (D : diamètre maximal du sable).

Les fines sont constituées du ciment, de fine d'addition et de la fraction du sable inférieure à $80\mu\text{m}$. Considérons que:

$$P_s = 0.75 \left(\frac{0.08}{5} \right)^{1/5} \text{ (En \% volumique).} \quad \text{Eq-II.1}$$

$$P_s = 0.33 \text{ l/m}^3$$

P_s = la porosité de l'étendue granulaire du sable.

Dosage des fines :

D'après l'hypothèse de Caquot $[\text{fines}] = [V]$, le dosage volumique optimal des fines s'écrit:

$$[\text{Fines}] = 0.38 \left(\frac{0.08}{D} \right)^{1/5} \text{ (En \% volumique).} \quad \text{Eq-II.2}$$

$$[\text{Fines}] = 0.38 \left(\frac{0.08}{5}\right)^{1/5}$$

$$[\text{Fines}] = 166.2 \text{ l/m}^3$$

Dosage en eau et porosité :

$$[\text{E+V}] \text{ min} = 0.8 \left(\frac{d}{D}\right)^{0.2} . \quad \text{Eq-II.3}$$

$$[\text{E+V}] \text{ min} = 0.8 \left(\frac{0.0072}{5}\right)^{0.2}$$

$$[\text{E+V}] \text{ min} = 0.1776 \text{ m}^3$$

$$\Rightarrow \boxed{[\text{E+V}] \text{ min} = 0.1776 \text{ l/m}^3 .}$$

$$d = \frac{60}{\varphi - \text{Fine}}$$

$$d = \frac{60}{2.89 - 7729}$$

$$[\text{vide}] = k \times [\text{Eau}] \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$[\text{vide}] = 0.2 \times [\text{Eau}]$$

$$[\text{E} + 0.2 \times [\text{Eau}]] = 0.1776 \text{ l/m}^3$$

$$E [1 + 0.2] = 0.1776 \text{ l/m}^3$$

$$E (1.2) = 0.1776 \text{ l/m}^3$$

$$E = \left(\frac{0.1776}{1.2}\right) \text{ l/m}^3$$

$$\boxed{E = 148 \text{ l/m}^3}$$

On remplace dans l'équation (1):

$$[\text{vide}] = 0.2 \times [148]$$

$$\boxed{[\text{vide}] = 29.6 \text{ l/m}^3}$$

-“d” calculé de la formule suivante : $d = \frac{60}{f \cdot \rho}$

Avec:

f : surface spécifique en cm^2/g

ρ : densité en g/cm^3 .

$[\text{vide}] = K [\text{eau}] (\text{l}/\text{m}^3)$;

K compris entre 0.2 et 0.25

Dosage de sable de carrière :

$$[\text{Sable}] = 1000 - ([\text{fines}] + [\text{eau}] + [\text{vide}]) + V_{sp} \quad \dots \text{Eq-II.5}$$

$$= 1000 - (166.2 + 148 + 29.8) \quad \dots$$

$$[\text{Sable}] = V_s = (656.2) (\text{l}/\text{m}^3) \text{ (volumique)}$$

$$m_s = 656.2 \times 2.63 \text{ g}/\text{cm}^3$$

$$m_s = 17225.806 \text{ g (massique)}$$

Dosage de filler et ciment :

$$[\text{fine}] = c + f = 166.2 \varphi \dots \dots (1)$$

$$X \frac{F}{C} = 0.6 \Rightarrow F = 0.6 \times C$$

$$V_c + V_f = 166.2$$

$$\frac{C}{\rho_c} + \frac{F}{\rho_f} = 166.2$$

$$\frac{C}{3.1} + \frac{0.6 \times C}{2.89} = 166.2$$

$$C = \frac{166.2}{\frac{1}{3.1} + \frac{0.6}{2.89}} \Rightarrow C = 313.5$$

$$F = 0.6 \times C$$

$$F = 0.6 \times (313.5)$$

$$F = 188.1 \text{ Kg}/\text{m}^3$$

Dosage de super plastifiant :

$$Sp = 1.2 \times (F + C)$$

$$Sp = 1.2 \times (188.1 + 313.5)$$

$$Sp = 6.0192 \text{ Kg}/\text{m}^3$$

$E/C = 0.7$ Mélange témoin (1)

$$D_{max} = 4, \frac{F}{C} = 0.6, d = \left\{ \frac{60}{2.89 \times 772^4} \right\} = 0.027, \rho_C = 3.1, \rho_F = 2.89, \\ \rho_s = 2.63$$

$$[fines] = 0.38 \times \left(\frac{0.08}{4} \right)^{0.2} = 173.78 l$$

$$[E \times V] = 0.08 \times \left(\frac{0.0027}{4} \right)^{0.2} = 185.75 l$$

$$[V] = 0.2[E]$$

$$\{E + 0.2[E]\} = 185.75 \rightarrow E(1 + 0.2) = 185.75$$

$$E = \frac{185.75}{1.2}$$

$$E = 145.79 l$$

$$[V] = 0.2 \times 154.79$$

$$[V] = 30.96 l$$

Ciment + Fillers :

$$C + F = 173.78 l$$

$$\frac{F}{C} = 0.6 \Rightarrow F = 0.6 \times C$$

$$V_C + V_F = 173.78 l$$

$$\frac{C}{\rho_C} + \frac{F}{\rho_F} = 173.78 l$$

$$C = \frac{173.78}{\frac{1}{3.1} + \frac{0.6}{2.89}}$$

$$C = 327.76 \text{ Kg/m}^3$$

$$V_C = \frac{M_{V_C}}{\rho_C} = \frac{327.76}{3.1} = 105.73 l$$

$$F = 0.6 \times 327.76 \Rightarrow F = 196.67 \text{ Kg/m}^3$$

$$V_F = \frac{M_{V_F}}{\rho_F} = \frac{196.67}{2.89} = 68.05 l$$

$$sp = 1.2\% \times L \nearrow (C + F)$$

$$sp = 1.2\% \times (524.43) \Rightarrow sp = 6.29 \text{ Kg/m}^2$$

$$V_{sp} = \frac{6.29}{1.1} = 5.812 \text{ l}$$

$$E/C = 0.7 \Rightarrow E = 0.7 \times C = 0.7(327.76) = 229.43$$

Sable :

$$[sable] = 1000 - [V_E + V_V + V_C + V_F + V_{sp}]$$

$$[sable] = 1000 - [229.43 + 30.96 + 105.73 + 688.05 + 5.91]$$

$$V[S] = 559.92 \text{ l} \quad \text{Volumique}$$

$$M_s = V_s \times \rho_s$$

$$M_s = 559.92 \times 2.63$$

$$M_s = 1472.59 \text{ kg/m}^3 \quad \text{Massique}$$

Tableau III-8 Résultats de la formulation de béton de sable

	Volume (l)	masse (kg/m ³)	Pour 9 l (kg/m ³)
Eau	148	148	1,33
Ciment	101,13	313,5	2,82
Sable	656,2	1725,806	15,53
Fillers de calcaire	65,08	188,1	1,69
Superplastifiant	5,91	6,29	0,57

Estimation de la résistance en compression :

$$Rb = \frac{(Kf * Rc)}{\left[1 + \frac{3.1(e+v)}{c(1+K1+K2)}\right]^2} \quad \text{Eq-II.6}$$

Kf: Coefficient granulaire (varie de 4.5 à 5)

Rc: Classe de résistance du ciment (Mpa). (e+v)

(e+v): volume d'eau + vide en litres

C : dosage en ciment.

Rb : résistance en compression de béton à 28 jours (MPa).

$$K_1: k_1 = k_{cv} \frac{cv}{c} + k_{fs} \frac{fs}{c}$$

$$0.2 < k_{cv} < 0.4 \quad 2 < k_{fs} < 3.3 \quad \text{et} \quad K_1 \leq 0.5$$

$$K_2 = K_{fl} \frac{fl}{c} \quad 0 < k_{fl} < 0.5 \quad \text{et} \quad K_2 \leq 0.2$$

K1 : Coefficient pouzzolanique.

K2: Coefficient d'activité du filler calcaire.

K_{cv}, K_{fs} et K_{fil} : Coefficient d'équivalence en ciment des différentes additions en fines.

CV; FS et FIL: Dosage en cendre volante, fumée de silice et de fillers (Kg/m³).

III.5 Conclusion

Ce chapitre a traité en détail les matériaux utilisés, les procédures de fabrication du sable recyclé et les essais réalisés pour la caractérisation des matériaux.

Nous pouvons donc déduire que :

- Les propriétés chimiques, physiques, et mécaniques de matériaux sont largement suffisantes pour formuler les bétons du sable.
- Les sables de carrière et le sable recyclé sont très différents en fonction de la forme des grains, la composition minéralogique, la masse volumique et l'analyse granulométrique.
- Les essais effectués permettent d'évaluer l'essentiel des propriétés des matériaux.

Chapitre IV :

Comparaison entre deux types de béton de sables

Chapitre IV :

Synthèse sur des bétons de sable à base de différents types de sables

III.6 Introduction

En raison du confinement général, les essais sur nos bétons de sable n'ont pas été réalisés, dont on a recours à faire une étude comparative entre des travaux de recherche sur les bétons de sable à base de différents types de sables. L'influence de ces derniers sur le comportement à l'état frais (maniabilité et masses volumiques) et sur les résistances mécaniques.

L'étude comparative consiste à analyser et à synthétiser les points communs, les différences et les tendances entre deux études partageant un intérêt commun de la valorisation des granulats recyclés dans le béton de sable. Il s'agit des études de [Benmalek & Derabla, 2007] qui ont incorporé le sable de dune, l'étude de [Melais & Achoura, 2014] qui ont exploité quatre sables (sable fin siliceux, deux sables de calcaire concassés, deux sables de laitier granulés et cristallisés).

III.7 Matériaux utilisés

Le béton de sable projeté dans l'étude de Benmalek [Benmalek & Derabla, 2007], est un mélange quaternaire de sable, de ciment portland artificiel dans les mêmes proportions que pour un béton traditionnel, de fillers de calcaire et d'eau courante. Ils ont utilisé deux types de sables : un sable dunaire et un sable issus de sous-produits industriels.

L'étude de Melais [Melais & Achoura 2015] a comporté quatre types de sable de nature minéralogique différente sont utilisés dans cette étude dont deux sables naturels (sable fin siliceux, sable de calcaire concassé) et deux sables artificiels (sable de laitier granulé et sable de laitier cristallisé) issus des sous-produits de l'industrie sidérurgique d'El-Hadjar –Annaba.

La photo IV.1 présente les morphologies des sables utilisés par observation au MEB.

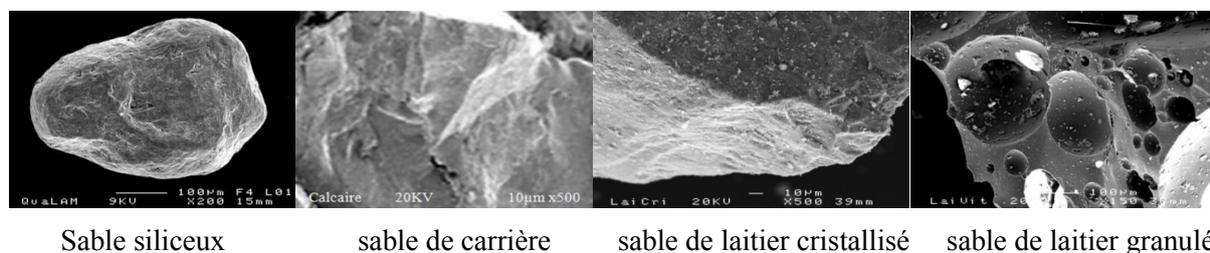


Figure 0IV-1 Morphologie et état de surface des types de sable par le MEB [Melais & al. 2015]

III.8 Propriétés rhéologiques

D'après [Benmalek & Derabla, 2007], Le sable de dune peut être renfermé le squelette granulaire de béton de sable à condition d'insérer un filler calcaire dans sa granulométrie pour le rendre plus étendue.

L'étude de Melais [Melais & al. 2015] a montré que le béton de sable de laitiers est le plus ferme maniable à cause de sa grande porosité. Ainsi, le béton de sable de dune est ferme. Alors que, le béton de sable de carrière et le béton de sable avec un mélange de 50% de dune et 50% de carrière sont très plastiques. Ils ont expliqué la variation de la maniabilité en fonction de la nature des sables à l'état de surface lisse ou rugueuse, à la porosité ouverte, la granulométrie et dimension maximale des sables.

Ils ont montré que la nature des sables influence considérablement la maniabilité des bétons de sable. Pour une maniabilité constante, des corrections sur le dosage en eau sont apportés pour les différents mélanges de la première série. Les quantités d'eau rajoutées au béton de sable à base de laitier cristallisé et sable de laitier granulé sont respectivement de l'ordre de 20 et de 45 litres. L'utilisation d'un superplastifiant, la maniabilité reste très affectée avec l'utilisation de sable de laitier granulé. Ceci est dû au caractère absorbant des sables de laitier qui sont généralement poreux. Pour un dosage constant en eau et en ciment et avec une l'utilisation d'un superplastifiant, les bétons de sable de carrière et avec mélange de deux sables (sable de dune et sable de carrière) présentent les meilleures maniabilités avec des affaissements de l'ordre de 9 et 10 cm. Par contre, le béton de sable siliceux fin donne un affaissement au cône d'Abrams de l'ordre de 4 cm qui correspond un béton ferme, et cela peut être expliqué par la finesse de ce type de sable. D'une manière générale la variation de la maniabilité est en fonction de la nature minéralogique, la morphologie (état de surface, types et formes des pores), la granulométrie et la dimension maximale des sables. Concernant la masse volumique, le béton de sable de laitier granulé ayant de porosité élevée et présentant comme béton léger. Les bétons de sable les plus compacte sont ceux de sable de carrière et de mélange de deux sables (sable et sable de carrière). Ceci est dû essentiellement à la bonne granulométrie de ces sables.

La densité la plus faible est obtenue avec le béton de sable de laitier granulé qui est classé comme béton léger. Le béton de sable de dune ayant une densité moyenne et plus faible que celles des bétons de sable de carrière et de sable mélangé (dune et carrière) qui présentent les meilleures densités grâce à leurs densités élevées et leurs bonnes granulométries.

III.9 Comportements mécaniques

Selon Benmalek [Benmalek & Derabla, 2007], le béton de sable obtenu ayant une résistance mécanique comprise entre 15 et 20 MPa et une maniabilité plastique avec un rapport Eau/Liant de 0,4. Concernant l'adhérence acier béton, le béton de sable dunaire adhère très bien les armatures peut donc être armé. Les comportements des poutres constituant de béton

de sable de dune et de béton ordinaire sont analogues. Cependant, la rupture de la poutre de béton de sable de dune est brutale.

Melais et Achoura [Melais & al. 2015] ont trouvé, à l'état durci, que la cinétique des résistances mécaniques en compression et en traction des bétons de sable se diffère en fonction de la nature des sables. Les meilleures résistances sont obtenues avec le sable de carrière le mélange des sables (dune et carrière). Le sable de laitier granulé possède la résistance la plus faible. Ces différences de résistances sont expliquées par la nature morphologique (texture, porosité et forme des grains de sable), granulométrie, l'absorption initiale et la liaison granulat pate de ciment.

Par ailleurs, la résistance mécanique en compression diffère d'un béton à l'autre en fonction de la nature des sables utilisés. Avec des fillers de de laitier cristallisé, le béton à base de sable cristallisé présentent les meilleures résistances en compression avec ceux à base de sable siliceux et du mélange sable de laitier granulé et sable siliceux. Ceci est dû essentiellement à la bonne granulométrie, l'état de surface rugueuse et la nature minéralogique du sable de laitier cristallisé. Dans le cas de l'utilisation des fillers de laitier granulé les meilleures résistances sont obtenues avec le mélange sable de carrière et sable siliceux qui présente le meilleur étendu granulaire. Les résistances les plus faibles sont celles du béton de sable de laitier granulé. Cela peut s'expliquer par l'état morphologique très poreux et par une absorption initiale assez élevée.

Conclusion générale

Conclusion générale

Les granulats qui constituent la matière première indispensable à l'industrie des travaux publics du bâtiment, est produite et utilisée en grande quantité ; toutefois les ressources naturelles ne sont pas inépuisables et les lieux d'extraction ne cessent de s'éloigner des lieux de consommation. En revanche, les sous-produits et les déchets, qui autrefois suscitaient guère d'intérêt ni d'inquiétude ont commencé constituer un problème économique et écologique vers la fin du 20ème siècle.

Les déchets dits inertes peuvent être transformés en granulats recyclés pour être utilisés comme granulats pour le béton. Le recyclage des matériaux de construction, déjà bien engagé dans certains secteurs, est l'une des solutions prometteuses. L'utilisation de ces granulats recyclés à une grande importance du point de vue environnement car d'une part elle permet de récupérer les matériaux résultants de la démolition des constructions due aux catastrophes naturelles ou la démolition du vieux bâtis. D'autre part, leurs réutilisations permettent de protéger la nature de l'exploitation excessive des réserves des granulats naturels.

Cette étude de recherche avait pour but de valoriser ce type de béton «béton de sable à base de granulats recyclés (sable) »

L'étude des caractéristiques et les propriétés des bétons à base de déchet de démolition (sable recyclés). Ces granulats ainsi que l'analyse des résultats de la recherche bibliographique, nous ont permis de tirer les conclusions suivantes :

Le recyclage des déchets inertes pour produire des granulats contribue à limiter :

- ☛ La mise en décharge de ces déchets.
- ☛ Le déficit en granulats de la région.
- ☛ Il est possible de valoriser les déchets de démolition comme granulats pour la Fabrication du béton.
- ☛ La meilleure méthode de démolition est la déconstruction sélective, qui est plus couteuse, mais assure des granulats de bonne qualité
- ☛ L'absorption d'eau très élevée et la résistance mécanique des granulats recyclés ont freiné leur utilisation dans le béton structurel, par le suspecte d'avoir des conséquences néfaste sur la durabilité, l'insuffisance des études et le manque des normes spécifiques.

Nous avons donné un concept général sur les bétons de sable. Et d'après la description des constituants du béton de sable

Formuler un BS à partir d'un mélange ciment –sable présentera une porosité plus élevée que celle d'un BO. C'est pourquoi un constituant de granulométrie voisine de celle du ciment est toujours utilisé dans la formulation des bétons de sable cet ajout filler généralement, permet d'augmenter leur compacité. Donc la formulation des BS relève de l'optimisation de la compacité d'un mélange quaternaire : sable- ciment- filler -microfiller.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- A, CHAREF, "La problématique des granulats au Maroc", Push-Button Publishing, (2007),
- A. AJDUKIEWICZ & A. KLISZCZEWICZ, "Influence of recycled aggregate on mechanical properties of HS/HPC", *Cement & Concrete Composites*, 24(2), pp:269-279, (2002).
- [Achoura, 2005] Achoura. D., «contribution à l'étude de la formulation et de la caractérisation des bétons de sable à base de laitiers de hauts fourneaux d'El-Hadjar», thèse de doctorat, Université Badji-Mokhtar, Annaba, Algérie, (2005) 175p.
- [Alexandre et Sebileau, 1988] Alexandre. J., Sebileau. J.L., «le laitier de haut fourneau», livre, (1988) 341p.
- [Ambroise et Pera, 1992] Ambroise. J., Pera. J., «Relation entre les caractéristiques des fillers et les bétons de sable dans lesquels ils sont employés», INSA de Lyon, France, (1992).
- A. NEALEN & S. SCHENK, "The influence of recycled aggregate core moisture on freshly mixed and hardened concrete properties", In *Darmstadt concrete, Annual Journal 13*, TU Darmstadt, (1998).
- A. RAO, "Experimental Investigation on Use of Recycled Aggregates in Mortar and Concrete", Thèse de Doctorat, Department of Civil Engineering, Indian Institute of Technology, Kanpur - Inde, (2005).
- A. RAO, N. JHAB KUMAR & S. MISRA, "Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete", *Resources, Conservation and Recycling*, 50(1), pp:71-81, (2007).
- [Arab et al., 2011] N. Arabi., L. Berredjem., «Valorisation des déchets de démolition comme granulats pour bétons», *Déchets - Revue Francophone d'Écologie Industrielle*, N°60, (2011), p 25-30.
- [Ben Amara, 2002] Ben Amara. D., «Formulation et comportement d'un béton de sable de la région de Biskra renforcé de fibre métallique», mémoire de magister, Université de Annaba, Algérie, (2002).
- BENMALEK. Mohamed Larbi1 , DERABLA Riadh2 1 Département de Génie civil, Université de Guelma (Algérie), BP 401, Guelma 24000, Algérie 2 Département de Génie civil, Université de Skikda (Algérie), BP 26, Skikda 21000, Algérie , ARTICLE < ELABORATION AND CHARACTERISATION OF A CONCRETE FORMULATED WITH DUNE SAND AND INDUSTRIAL BY PRODUCTS<
- [Berr., 2009] Berredjem. L., Arabi. N., «les matériaux de démolition une source de granulats pour béton : formulation et caractérisation d'un béton à base de ces recycles», *SBEIDCO – 1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries ENSET Oran (Algeria)*, October 12-14, (2009), 255-262.
- [Butl et al., 2011] Butler L., West JS., Tighe SL., «The effect of recycled concrete aggregate properties on the bond strength between RCA concrete and steel reinforcement», *Cement and Concrete research*, Vol 41, N°10, (2011), p 1037-1049.
- [Buyl et al., 2012] Buyle-Bodin F., Blanpain O., Goncalves G., «Complete recycling of concrete – socio- economic and environmental analysis of the different industrial ways of producing natural and recycled aggregates on the territory of North-Pas de Calais region», (LCA) conference, Lille, France, (2012).
- [Chak et al., 2011] Chakradhara Rao. M., Bhattacharyya.S. K., Barai.S. V., «Influence of field recycled coarse aggregate on properties of concrete», *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, Vol 44, N°1, (2011), p 205-220

- [Cherfa et Ait Mokhtar, 2011] Cherfa. H., Ait Mokhtar. K., «Utilisation de granulats de laitier cristallisé comme matériau de construction en technique routière», 29èmes rencontre de l'AUGC, Tlemcen, Algérie, (2011), p 128-137.
- [Choquet, 1947] Choquet. F., «Etude en laboratoire des possibilités de la valorisation des scories d'aciéries et des laitiers de haut fourneau en construction routière», Edité par le centre de recherches routières, Bruxelles, (1947).
- [Cori et al., 2009] Corinaldesi V., Moriconi G., «Influence of mineral additions on the performance of 100% recycled aggregate concrete», *Construction and Building Materials*, Vol 23, N°8, (2009), p 2869-2876.
- C. S. POON & C. S. LAM, "The effect of aggregates-to-cement (A/C) ratio and types of aggregates on the properties of pre-cast concrete blocks", *Cement & Concrete Composites*, 30(4), pp:283-289, (2008).
- C. S. POON, Z. H. SHUI, L. LAM & S. C. KOU, "Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of hardened concrete", *Cement & Concrete Research*, 34(1), pp:31-36, (2004).
- DEGUSSACONSTRUCTION CHEMICALS FRANCE, "La Technologie du Béton", GufFormation\Béton\Technobeton V05_01U, 140 p,
- [De Ju et al., 2009] De Juan M.S., Gutiérrez P.A., «Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate», *Construction and Building Materials*, Vol 23, N° 2, (2009), p 872-877
- [Djel et al., 2008] Djelal H., Nouvel V., «Gestion des déchets de démolition et environnement», XXVIe Rencontres Universitaires de Génie Civil, Nancy, France, (2008), 8p.
- [Dreu et al., 1998] Dreux. G., Jean Festa., «Nouveau guide du béton et de ses constituants», huitième édition, Editions Eyrolles, (1998), 416p.
- E. WIRQUIN, R. HADJIEVA-ZAHARIEVA & F. BUYLE-BODIN, "Utilisation de l'absorption d'eau des bétons comme critères de leur durabilité - Application aux bétons de granulats recyclés", *Materials and Structures*, 33(6), pp:403-408, (2000).
- [Etxe et al., 2007] Etxeberria. M., Vázquez. E., Mari. A., et Barra. M., «Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete», *Cement and Concrete Research*, Vol 37, N°5, (2007), p 735-742.
- [Fath et al., 2009] Fathifazl. G., Abbas. A., Razaqpur. A. G., Isgor. O. B., Fournier. B., Foo. S., «New mixture proportioning method for concrete made with coarse recycled concrete aggregate», *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol 21, N°10, (2009), p 601- 611.
- [Ferr et al., 2011] Ferreira. L., de Brito. J., Barra. M., «Influence of the pre-saturation of recycled coarse concrete aggregates on concrete properties», *Magazine of Concrete Research*, Vol 63, N°8, (2011), p 617 - 627.
- F. GABRYSIK, "Matériaux - Les Bétons - Chapitre 4", Académie de Nancy-Metz, http://www.ac-nancy-metz.fr/enseign/Batiment_Pro/
- F. LORANGER, "Caractérisation de matériaux recyclés (bétons, enrobes et fondations granulaires) et évaluation de leur performance dans les bétons conventionnels et compacts au rouleau", Mémoire de Maître ES Sciences, Université Laval, 198 p., (2001).
- F.Z. Melais, D. Achoura, R. Jauberthie Valorisation des sous-produits de hauts fourneaux dans la fabrication d'une nouvelle gamme de béton de sable
- Fatma Zohra MELAIS1, Djamel ACHOURA Formulation et propriétés des bétons de sable renforcé de fibres de polypropylène.
- FICHES TECHNIQUES, Les bétons : formulation, fabrication et mise en oeuvre, Page 96-110-120-129, Réédition janvier 2013,

- FT OLORUNSOGO & N. PADAYACHEE, "Performance of recycled aggregate concrete monitored by durability indexes", *Cement & Concrete Research*, 32(2), pp:179-185, (2002).
- I. B. TOPÇU & S. SENDEL, "Properties of concretes produced with concrete aggregate", Civil Engineering Department, Université d'Osmangazi, Turkey, (2004).
- [Gómez, 2002] Gómez-Soberón J.M.V., «Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate: An experimental study», *Cement and concrete research*, Vol 32N°8, (2002), p 1301-1311.
- [Gonz et al., 2011] Gonzalez-Fonteboa B., Martinez-Abella F., Eiras-Lopez J., Seara-Paz S., «Effect of recycled coarse aggregate on damage of recycled concrete», *Mater Struct*, Vol 44, N°10, (2011), p 1759-1770.
- [Hans et al., 1983] Hansen. T.C., Narud. H., «Strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate», *Concrete International*, Vol 5, N°1, (1983), p 79-83.
- J. BARON et J. P. OLIVIER, "Les bétons, bases et données pour leur formulation", Association technique de l'industrie des liants hydrauliques, K. KHAYAT et J. P. OLIVIER, "Viser une consistance adaptée aux moyens de mise en œuvre - indice de la mise en œuvre sur la formulation des bétons", 2eme tirage, Edition Eyrolles, 522 p., (1997).
- J.P. GONÇALVES & ALL., "Comparison of natural and manufactured fine aggregates in cement mortars", *Cement & Concrete Research*, 37(6), pp:924-932, (2007).
- [Katz., 2003] Katz A., «Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete», *Cement and Concrete Research*, Vol 33, N° 5, (2003), p 703-711.
- [Keba et al., 2015] Kebaïli, O., Michel M., N. Arabi., and Franck C., «Adverse Effect of the Mass Substitution of Natural Aggregates by Air-Dried Recycled Concrete Aggregates on the Self-Compacting Ability of Concrete: Evidence and Analysis through an Example», *Journal of Cleaner Production*, Vol 8, January (2015), p 752761.
- [Kou et al., 2008] Kou S., Poon C., «Mechanical properties of 5-year-old concrete prepared with recycled aggregates obtained from three different sources», *Mag Concr Res*, Vol 60, N°1, (2008), p 57-64.
- K. KOKUBU, TSHIMIZU & A. UENO, "Effects of recycled aggregate qualities on the mechanical properties of concrete, International Workshop on Recycled Concrete", Tokyo, JSPS 76 Committee on Construction Materials, Japan Society for the Promotion of Science, pp:107-115, (2000).
- [Lacroix et al, 1982] Lacroix. R., Fuentes. A., Thonier. H., «Traité de béton armé». Livre edition Eyrolles, (1982).
- [Levy et al., 2004] Levy. S. M., Helene. P., «Durability of recycled aggregate concrete: A safe way to sustainable development», *Cement and Concrete Research*, Vol 34, N°11, (2004), p 1975-1980.
- [Li., 2008] Li. X., «Recycling and reuse of waste concrete in China, Part I. Material behaviour of recycled aggregate concrete. Resources», *Conservation and Recycling*, Vol 53, N° 1-2, (2008), p 36-44.
- [Limb et al., 2000] Limbachiya. M.C., Dhir. R. K., Leelawat. T., «Use of recycled concrete aggregate in high-strength concrete», *Materials and Structures*, Vol 33, Issue 9, (November 2000), p 574-580.
- [Lopez et al., 2009] Lopez-Gayarre. F., Serna. P., Domingo-Cabo. A., Serrano-Lopez. M. et Lopez-Colina. C., «Influence of recycled aggregate quality and proportioning criteria on recycled concrete properties», *Waste Management*, vol 29, N°12, (2009), p 3022-3028.

- L. BERREDJEM & N. ARABI, "Les matériaux de démolition des déchets inertes, une source de granulats pour béton", Séminaire national sur l'environnement et industrie, Sheraton Oran, pp :31-43, (2009).
- [Male et al., 2010] Malesev. M., Radonjanin. V., Marinkovic. S., «Recycled Concrete as Aggregate for Structural Concrete Production», Sustainability, Vol 2, N°5, (2010), p 12041225.
- [Michel, 2009] Michel. M., «Accélération de ciment au laitier par du ciment sulfo-alumineux», thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France, (2009), 280p.
- M. BARRA & ALL., "Properties of concretes with recycled aggregates: influence of properties of the aggregates and their interpretation, use of recycled concrete aggregate", Sustainable Construction. ISBN 0-7277-2726-5. pp:19-30, (1998).
- M. J. ESTEFANO de OLIVEIRA, C. SILVEIRA de ASSIS & A. W. TERNI, "Study on compressed stress, water absorption and modulus of elasticity of produced concrete made by recycled aggregate", Université Estadual Paulista, Brazil.
- M. S. RASHWAN & S. ABOURIZK, "The properties of recycled concrete", Concrete International, 19(7), pp:56-60, (1997).
- M. SANCHEZ de JUAN & P. A. GUTIERREZ, "Influence of recycled aggregate quality on concrete properties", laboratoire Central des Matériaux et Structures, Espagne.
- M. WESTERHOLM, D. LAGERBLAD, J. SILFWERBRAND & E. Forssberg, "Influence of fine aggregate characteristics on the rheological properties of mortars", Cement & Concrete Composites, 30(4), pp:274-282, (2008).
- [Nevl., 1981] Neville, A., M., «Properties of Concrete», Third Edition, Pitman Publishing Limited, London, Great Britain, (1981), 779 p.
- N, BOURMATTE, "Granulats Recyclés de substitution pour Bétons Hydrauliques, Caractérisation, Performances, Durabilité", Thèse de Magister, Université Mentouri de Constantine, 159 p., (2005),
- [NF EN 15167-1, 2006] NF EN 15167-1 «Laitier granulé de haut-fourneau moulu pour utilisation dans le béton, mortier et coulis - Partie 1 : définitions, exigences et critères de conformité», (2006).
- [NF EN 197-1/A1, 2004] NF EN 197-1/A1 «Ciment Partie 1 : Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants», (2004).
- [NF EN 934-2, 2002] NF EN 934-2 «Adjuvants pour béton, mortier et coulis Partie 2 : Adjuvants
- [NF P18- 500, 2005] NF P18- 500, «Béton : Béton de sable», (2005)
- [NF P18- 508, 2005] NF P 18-508. «Additions pour béton hydraulique - Additions calcaires Spécifications e critères de conformité» (2005).
- Projet de recherche, "Baustoffkreislauf im Massivbau (BiM)", hautes écoles et instituts de recherche, République fédérale d'Allemagne, www.b-i-m.de
- [Padm et al., 2009] Padmini A.K., Ramamurthy K., and Mathews M.S., «Influence of parent concrete on the properties of recycled aggregate concrete», Construction and Building Materials, Vol 23, N° 2, (Feb 2009), p 829-836.
- [Poon et al., 2003] Poon CS., Azhar S., Kou SC., «Recycled aggregates for concrete applications», In: Proceeding of the Materials Science and Technology in Engineering Conference-Now, New and Next, Hong Kong, China; 15-17 January (2003), p 16.
- [Queb., 1996] Quebaud M., «Caractérisation des granulats recyclés, étude de la composition et du comportement de bétons incluant ces granulats», Thèse de doctorat, Département de génie civil, Université d'Artois, France, (décembre 1996), 250p.

- [Rao., 2005] Rao A., «Experimental Investigation on Use of Recycled Aggregates in Mortar and Concrete», Department of Civil Engineering, Institut indien de Technologie, Thèse de Doctora, Kanpur - Inde, (2005).
- [Sablocrete, 1994] «Sablocrete, béton de sable : caractéristiques et pratiques d'utilisation», presses de l'école nationale des ponts et chaussées, France, (1994) 230p.
- [Sago et al., 2001] Sagoe-Crentsil. K.k., Brown. T., Taylor. A. H., «Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate», *Cement and Concrete Research*, Vol 31, N° 5, (2001), p 707-712.
- [Sánc et al., 2004] Sánchez de Juan.M., et Alaejos Gutierrez.P., «Influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate», RILEM, Actes du colloque Use of Recycled Materials in Building and Structures, 9-11; 2004, Barcelone, Espagne.
- [Sout et al., 2011] Soutsos M.N., Tang K., Millard S.G., «Use of recycled demolition aggregate in precast products, phase II: concrete paving blocks», *Construction and Building Materials*, Vol 25, N°7, (2011), p 3131-3143.
- S. BETHMONT, "Mécanisme de ségrégation dans les bétons autoplacants", Thèse de Doctorat, ENPC Paris, France, 166 p., (2005).
- S. CHANDRA & L. BERNTSSON, "Lightweight Aggregate concrete", Noyes Publications, 406 p., (2002).
- S. HACHAICHI, "Substitution de Sable roulé par les déchets de carrières et de hauts fourneaux dans le béton", Thèse de Magister, 92 p., (2008).
- S. HASABA, M. KAWAMURA, T. KAZUYUKI & T. KUNIO, "Drying shrinkage and durability of concrete made from recycled concrete aggregates", *Trans. Jap. Concr. Inst.*, 3, pp:55R60, (1981),
- S. S. JANKAR et C. B. K. RAO, "Index of aggregate particle shape and texture of coarse aggregate as a parameter for concrete mix proportioning", *Cement & concrete research*, 34(11), pp:2021-2027, (2004).
- [Tabsh et al., 2009] Tabsh, S. W., Abdelfatah. A. S., «Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete», *Construction and Building Materials*, Vol 23, N°2, (2009), p 1163-1167.
- [Tam et al., 2008] Tam V.W.Y., Wang K., and Tam C.M., «Assessing relationships among properties of demolished concrete, recycled aggregate and recycled aggregate concrete using regression analysis», *Journal of Hazardous Materials*, Vol 152, N°2, (2008), p 703-714.
- T. MUKAI & ALL. "Study on reuse of waste concrete for aggregate of concrete", seminar on "energy and resources conservation in concrete technology", Japan US co-operative science programme, San Francisco, (1979)
- T. MUKAI, M. KIKUCHI & N. ISHIKAWA, "Study on the properties of concrete containing recycle concrete aggregate", *Cement Association of Japan*, 32d review, (1978), (rapporté par [39]).
- T.C. HANSEN & H. NARUD, "Strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate", *Concrete International- design and construction*, 5(1), pp:79-83, (1983).
- [Zhao., 2014] Z. Zhao., «Valorisation de fines de concassage de bétons pour la fabrication de mortiers», Thèse de doctorat, école des Mines de Douai et Université de Lille 1, France, (2014).
- [Zri, 2010] Zri. A., «Mise en place d'une nouvelle approche de formulation d'une matrice cimentaire à base de sable de dragage : application aux bétons de sable et granulats», thèse de doctorat, université de Lille I, France, (2010), 223p.