REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA



Faculté de **T**echnologie

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Génie Civil
Spécialité : Matériaux en Génie Civil

EFFET DU COEFFICIENT D'ABSORPTION DU SABLE RECYCLE SUR L'OUVRABILITE ET LA RESISTANCE DU MORTIER

Présenté par

CHIBAUOI Meftah

FATOUMI Mohamed

Proposé et Dirigé par

Dr. SAFIDDINE Salim

Promotion Septembre 2020

Remerciements

Au terme de ce travail, nous remercions ALLAH le Miséricordieux de nous avoir donné la force et la patience à achever ce mémoire.

Nos sincères remerciements vont :

A Mr SAFIDINE Salim qui a bien voulu diriger ce modeste travail et pour son aide et ses conseils très précieux, qui nous ont été très bénéfiques,

Aux personnels du Hall technologique de l'Université YAHIA FERES de Médéa.

Notre gratitude va à tous nos enseignants de l'université de Médéa.

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements aux membres de jury pour l'honneur qu'ils nous faisaient en participant à ce jury et de bien vouloir juger ce travail.

Enfin, nous sentiments vont à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

ملـخـص

يعد فقدان قابلية التشكل الخرساني مهمًا جدًا في ممارسة الإنشاءات وخاصة مع الخرسانة الجاهزة. هذه الظاهرة ناتجة عن تقليل ماء الخلط الناتج عن امتصاصه وتبخره وترطيبه للأسمنت.

الهدف الرئيسي من هذه الدراسة هو تقييم دقة الطريقة القياسية لقياس معدل امتصاص الرمال عند تطبيقها على الرمال المعاد تدويرها .وهكذا ، فإن تحديد تأثير استبدال الرمل الطبيعي بالرمل المعاد تدويره على القوة الميكانيكية وانسيابية الملاط .تظهر النتائج التي تم الحصول عليها على هذا النحو أن الرمال المعاد تدويرها لها معدل امتصاص مرتفع للغاية ، أكثر من عشرة أضعاف معدل امتصاص الرمل الطبيعي.

الكلمات الجوهرية: الرمل المعاد تدويره ، الملاط ، نسبة الامتصاص، قابلية التشكل، المقاومة الميكانيكية.

Résumé

La perte d'ouvrabilité du béton est très importante dans la pratique de la construction et en particulier avec le béton prêt à l'emploi. Ce phénomène est dû à la réduction de l'eau de mélange provoquée par l'absorption, l'évaporation et l'hydratation du ciment.

L'objectif principal de cette étude est d'évaluer la précision de la méthode standard de mesure du taux d'absorption des sables lorsqu'elle est appliquée sur le sable recyclé (SR). Ainsi, la détermination de l'effet de la substitution du sable naturel (SN) par le SR sur la résistance mécanique et la rhéologie du mortier. Les résultats ainsi obtenus, montrent que le SR présente un taux d'absorption très élevé, plus de dix fois que le SN.

Mots clés : sable recyclé ; mortier ; taux d'absorption, ouvrabilité ; résistance mécanique.

Abstract

The loss of workability of concrete is very important in the practice of construction and especially with ready-mix concrete. This phenomenon is due to the reduction of the mixing water caused by the absorption, evaporation and hydration of the cement.

The main objective of this study is to evaluate the accuracy of the standard method of measuring sand absorption rate when applied to recycled sand. Thus, the determination of the effect of substituting natural sand with recycled sand on the mechanical strength and rheology of the mortar. The results thus obtained show that recycled sand has a very high absorption rate, more than ten times that of natural sand.

Key words: recycled sand; mortar; absorption rate; workability; mechanical resistance.

Table Des Matières

Page

Résumé

Remerciements

Dédicaces

Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Notations et symboles

INTRODUCTION GENERALE 01

CHAPITRE I : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LE SABLE DE RECYCLE

I.1.	Introduction	03
I.2.	Contexte Européen	03
I.3.	Besoin de sables alternatifs	05
I.4.	Sables alternatifs	06
I.5.	Situation dans le monde	07
I.6.	Aspect économique	08
I.7.	Législation française concernant les déchets de chantiers	09
I.8.	Situation en Algérie	09
I.9.	Les granulats recyclés	10
I.10.	sable recyclé	11
	1.fines (poussière) de recyclage	12
	2.Propriétés chimiques du SR	12
I.11.	Coefficient d'absorption	13
	1.Etat saturé à surface sèche « SSD »	14
	2. Aperçu sur la normalisation du coefficient d'absorption	14
	3. Ordre de grandeur	17
I.12.	Granulométrie	17
I.13.	Densité	19
I.14.	Présence des matériaux nuisibles	19
I.15.	Analyses thermogravimétrique (ATG) et thermodifférentielle (DTA)	20
I.16.	Forme des particules	20
I.17.	Texture de la surface des particules	22
I.19.	Comparaison de propriétés physiques de différents SA	24
I.20.	L'effet du sable recyclé sur les propriétés du béton	25

1. Propriétés du béton à l'état frais 25
2. Propriétés du béton à l'état durci 27
1. Résistance à la compression 28
2. Résistance à la flexion 29
3. Module d'élasticité 30
4. Fluage et retrait 30
I.21. Durabilité du RAC durci 30
1. Carbonatation
2. Résistance au gel et au dégel 31

CHAPITRE II : PROTOCOLE EXPERIMENTAL

II.1. Introduction 32
II.2. Caractérisation des matériaux utilisés 32
1. Le Sable 32
2. Le Ciment 34
3. L'Eau de gâchage 34
II.3. Préparation des Matériaux 35
1. Le mortier 35
II.4. Description des mélanges et désignation
II.5. Méthodes d'essais 36
1. Essais effectués sur le sable 36
1. Equivalent de sable 36
2. Analyse granulométrique 37
3. Module de finesse 38
4. Masse volumique 38
6. Taux d'absorption des sables 38
2. Essais effectués sur les mortiers frais 39
1. Essai au maniabilimètre 39
a) Equipement nécessaire 40
b) Conduite de l'essai 40
2. Mesure de l'affaissement 41
a) Principe de l'essai 41
b) Equipement nécessaire 41
c) Conduite de l'essai 41
3. Essai l'air occlus 41
a) Principe de l'essai 41
b) Conduite de l'essai 42
4. La masse volumique du mortier à l'état frais 42
3. Essais réalisés sur mortier à l'état durci 43
a) Essais de compression 43
b) Essais de traction par flexion 43

CHAPITRE III : RESULTATS ET INTERPRETATIONS

III.1.	Introduction	45
III. 2	Etude préliminaire sur les sables	45
	1. Propreté de sable	45
	2. Analyse granulométrique	46
	3. Mesure du taux d'absorption	48
III.3	Mesure des propriétés du mortier à l'état frais	49
	1. Mesure d'Affaissement du mortier	49
	2. Mesure du temps d'écoulement	50
	3. Comparaison avec le sable naturel roulé	51
III.4	Mesure des propriétés du mortier à l'état durci	52

CONCLUSION GENERALE 53
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 54
Annexes 55

Liste Des Figures

		Page
Figure I.1:	Les différents sables alternatifs	4
Figure I.2:	Taux de recyclage en fonction de la quantité de déchets de construction et démolition produite [UEPG, 2006].	5
Figure I.3:	Etat « SSD » déterminé par l'essai d'effondrement au cône (Pas assez précis pour les sables) (Selon [Gentilini, 2013], inspiré de : EN 1097-6)	14
Figure I.4	Forme du cône de sable correspondant à l'état SSSEN dans la méthode normalisée EN 1097-6	16
Figure I.5:	Etats de sables	16
Figure I.6:	Granulométrie d'agrégats recyclés produits par concasseur à mâchoires en un seul passage	18
Figure I.7:	Analyse granulométrique de différents sables recyclés	18
Figure I.8:	Les granulats recyclés industriels et de Laboratoire	21
Figure I.9 :	Microstructure du RCA et de ses zones de transition interfaciale (ZTI)	22
Figure I.10 :	Influence de la forme des particules de sables sur la demande en eau	22
Figure I.11 :	R_{C28} pour des bétons formulés à partir de différentes qualités de GR	29
Figure II.1:	Les sables utilisés	33
Figure II.2:	Malaxeur normalisé pour pâte et mortier	34
Figure II.3:	Essai d'équivalent de sable	37
Figure II.4:	Tamiseuse électrique	37
Figure II.5:	Moule tronconique	39
Figure II.6:	Détermination du coefficient d'absorption SR.	39
Figure II.7:	Détermination du coefficient d'absorption SN.	39
Figure II.8:	Principe de fonctionnement du maniabilimètre B.	40
Figure II.9:	Essais sur la consistance du mortier (Maniabilimètre B)	40
Figure II.10:	Développement de l'essai d'affaissement pour le mortier.	41

Figure II.11:	L’aéromètre à mortier.	42
Figure II.12:	Mesure de la masse volumique du mortier.	42
Figure II.13:	Essais an l’état durci.	43
Figure II.14:	Essais de compression	43
Figure III.15:	Essais de traction	44
Figure III.1	Les courbes granulométriques de SR et SN.	47
Figure III.2	Affaissement au cône MBE	49
Figure III.3	Débits d’écoulement des différents mortiers.	50
Figure III.4	Comparaison avec le SR	51

Liste Des Tableaux

		Page
Tableau I.1	Prix comparés des GRet GN dans différents	8
Tableau I.2	Composition chimique de différents sables recyclés	13
Tableau I.3	Valeurs supérieures spécifiées (Vss) précisées par la norme	15
Tableau I.4	Propriétés physiques de sables de concassage	24
Tableau I.5	Propriétés physiques des sous-produits industriels	25
Tableau I.6	Propriétés physiques de sables recyclés	25
Tableau II.1	Nomenclature de différents mortiers formulés	36
Tableau II.2	Prise d'essai des mortiers formulés	36
Tableau III.1	Valeurs d'équivalent de sable du SR et du SN.	46
Tableau III.2	Analyse granulométrique de SR et SN.	46
Tableau III.3	Coefficient d'absorption de SR et SN.	

Notations Et Symboles

Ab	Absorption
ATG	Analyses thermogravimétriques
BN	Béton de ciment à base de sable naturel
BR	Béton de ciment à base de sable recyclé
C	Ciment
D	Plus grande dimension des grains (mm)
DTA	Analyses thermodifférentielle
d	Plus petite dimension des grains (mm)
E	Eau
ES	Equivalent de sable
F	Fines
F_c	Charge de rupture en (N)
F_f	Charge de rupture de l'éprouvette en flexion (N)
GN	Granulats naturelles
GR	Granulats recyclés
L	Liant
M	Mortier
M_f	Module de finesse
MN	Mortier de ciment à base de sable naturel
MR	Mortier de ciment à base de sable recyclé
R_C	Résistance à la compression en (MPa)

R_t	Résistance à la flexion en (MPa)
S	Sable
SR	Sables recyclés
SN	Sables naturelles
SA	Sable alternatif
SPI	Sous-produits industriels
V_{Eau}	Volume d'eau
V_{Sable}	Volume du sable
Vss	Valeurs supérieures spécifiées
ZTI	zones de transition interfaciale

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Tout au long de son évolution, l'homme a cherché à développer et choisir ses matériaux en fonction de ses besoins. De nos jours, le secteur de la construction nécessite la mise en œuvre de grandes quantités de matériaux. Parmi ces matériaux et en mètre cube mis en œuvre par an et par habitant sur la planète, le béton est le plus utilisé au monde. En revanche, on assiste à une accélération de la déconstruction d'anciens ouvrages en béton et ainsi à une accumulation importante de gravats stockés majoritairement dans les centres d'enfouissements techniques. A cet effet, il devient ainsi essentiel de développer de nouvelles approches de construction permettent de limiter ses impacts environnementaux et de prendre en compte le cycle de vie des matériaux mis en œuvre. Parmi les nombreuses pistes explorées actuellement, la valorisation des matériaux issus de la déconstruction afin de préserver les ressources naturelles ainsi que de désengorger les sites de stockage.

En fait, les granulats constituent la matière première principale des bétons en représentant 60 à 70 % de leur volume. Contrairement aux granulats naturels (GNs), les granulats recyclés (GRs) issus de la déconstruction présentent la particularité de contenir du mortier et de la pâte de ciment résiduels influant leurs propriétés, notamment l'aptitude d'absorber d'eau et la présence d'une grande quantité de fines, qui peut se trouver accolés ou non au granulat du béton démoli. A cet effet, les propriétés des bétons réalisés avec ces matériaux recyclés peuvent alors être modifiées. La fabrication de tels bétons nécessite la caractérisation des matériaux recyclés mis en œuvre afin d'en appréhender précisément l'influence sur les propriétés à l'état frais et également durci. Pour cela, une revue bibliographique comparative sur plusieurs propriétés des GRs est proposée dans cette étude. Les propriétés physiques et mécaniques de différents GRs en plateforme industrielle ou en laboratoire ont été étudiées puis comparées à celles de GNs. L'accent a été mis sur plusieurs caractéristiques entre autres : teneur en éléments fins, réactivité potentielle à l'eau, absorption et résistances mécaniques.

Les GRs peuvent présenter des caractéristiques un peu moins bonnes que les GNs en termes de porosité et friabilité. Il semble donc essentiel, pour pouvoir les utiliser, de déterminer avec précision leur masse volumique et leur coefficient d'absorption d'eau,

notamment le sable recyclé (SR). Par ailleurs, l'absorption d'eau n'étant pas instantanée, il est également primordial d'estimer la cinétique d'absorption de ce type de granulats.

Il n'existe à ce jour aucune norme spécifique pour la mesure d'absorption d'eau des granulats recyclés, et la norme EN 1097-6, qui décrit le protocole de mesure de masse volumique des GNs, peut présenter quelques problèmes lorsqu'on cherche à l'appliquer aux GRs. En effet, elle ne tient compte ni de la possible influence des fines, ni de la difficulté de détermination de l'état dit « saturé à surface sèche » (SSD). Non seulement cet état est assez difficile à estimer, mais les GRs étant plutôt friables, l'action mécanique d'un chiffon entraîne la perte de fragments difficilement récupérables. Concernant le sable, la norme EN NF 1097-6 prévoit un protocole expérimental présentant quelques difficultés d'application dans la pratique. Cette étape entraine fréquemment une perte non négligeable de la prise d'essai et compromet la fiabilité des résultats. De plus, la norme considère l'état SSD atteint lorsqu'il y a affaissement du cône de sable par glissement des grains après le soulèvement du moule. Or, la forme anguleuse du sable recyclé (SR) et la présence de fines induisent une cohésion supplémentaire qui s'oppose au glissement du sable même lorsque la surface est sèche. Ceci peut entraîner une sous-estimation du coefficient d'absorption pour les sables riches en fines.

Dans cette étude, nous cherchons à évaluer la précision et les limites de la méthode standard utilisée pour déterminer le taux d'absorption des sables lorsqu'elle est appliquée sur le SR. Bien que cette méthode puisse facilement être appliquée à des granulats grossiers, quelles que soient leur origine et/ou leur forme, elle semble générer des difficultés et devenir fortement dépendante de l'opérateur pour le sable notamment recyclé ou concassé, ainsi que pour tout type de particules poreuses de sable non roulé.

Nous allons étudier spécifiquement les effets inattendus de l'angularité des grains de SR. Autrement dit, l'objectif principal de ce travail de recherche est d'étudier l'effet de l'absorption du SR sur le rapport eau/ciment (E/C) effectif, la résistance et la perte d'affaissement du mortier de ciment .

CHAPITRE I

REVUE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES GRANULATS RECYCLES

CHAPITRE I : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES GRANULATS RECYCLES

I.1 Introduction

Ce chapitre présente une revue de la littérature sur les caractéristiques des granulats recyclés (GRs) et leurs effets sur les propriétés de mortiers et de bétons à l'état frais et durci. Il présente aussi une comparaison entre les propriétés de différents types de sable alternatif (SA).En plus, nous allons tenter d'expliquer la raison pour laquelle ces nouveaux sables sont des matériaux de construction cruciaux à l'avenir.

En fait, de nombreuses études ont été menées dans ce contexte. Les principaux résultats ainsi obtenus sur les propriétés rhéologiques et mécaniques de bétons seront présentés dans cette partie tout en mettant l'accent bien évident sur l'aspect économique de ce type de granulat.

I.2 Contexte général

Le secteur de la construction est principalement responsable de la détérioration des ressources naturelles et des déséquilibres environnementaux dus à ses activités minières non planifiées. L'utilisation massive du béton a conduit à une surexploitation du lit des rivières. Cela a entraîné plusieurs conséquences néfastes de l'écosystème et la non-disponibilité de matières premières de bonne qualité. En revanche, l'élimination des déchets industriels et des déchets de construction et de démolition est désormais un autre problème majeur. Dans ce contexte, l'utilisation de différents SA provenant de différentes sources peut être considérée comme une solution efficace. Les avantages économiques, durables et sociaux augmentent en utilisant du béton à base de SA. La littérature a montré qu'il y a une possibilité de remplacer le sables naturel (SN) par le SA dans la construction. Mais, il reste toujours des études à faire sur ces différents SA dans le béton pour analyser et gagner en confiance dans leur utilisation. La figure I.1 donne les différents types de SA et leurs provenances.

D'après le ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie, la production de granulats en France métropolitaine était estimée à 379 millions de tonnes en 2011. 54,1 % de la production de granulats proviennent de roches massives, d'origine calcaire (100 millions de tonnes) ou éruptive (autrement dit siliceuse ; 105 millions de tonnes). 39,3 % proviennent de

l'exploitation de gisements de roches meubles d'origine alluvionnaire (119 millions de tonnes), de granulats marins (7 millions de tonnes) ou d'autres sables (23 millions de tonnes). Le reste provient de matériaux de recyclage, pour l'essentiel issus de la démolition (19 millions de tonnes), mais également de schistes, de laitiers et de mâchefers (6 millions de tonnes). La masse de granulats recyclés est à peu près constante depuis quelques années.

La présente analyse vise donc à évaluer l'intérêt environnemental du recyclage des déchets de démolition sous forme de nouveaux granulats [Cléo, 2014]. Les facteurs suivants ont le plus d'impact :

- La pénurie de matériaux naturels ;
- La stabilité de l'industrie du bâtiment et travaux publics (BTP) ;
- L'implication des acteurs directement en amont et en aval des filières de recyclage ;
- Le soutien des autorités publiques ;
- Le schéma de taxation, adapté aux conditions locales.

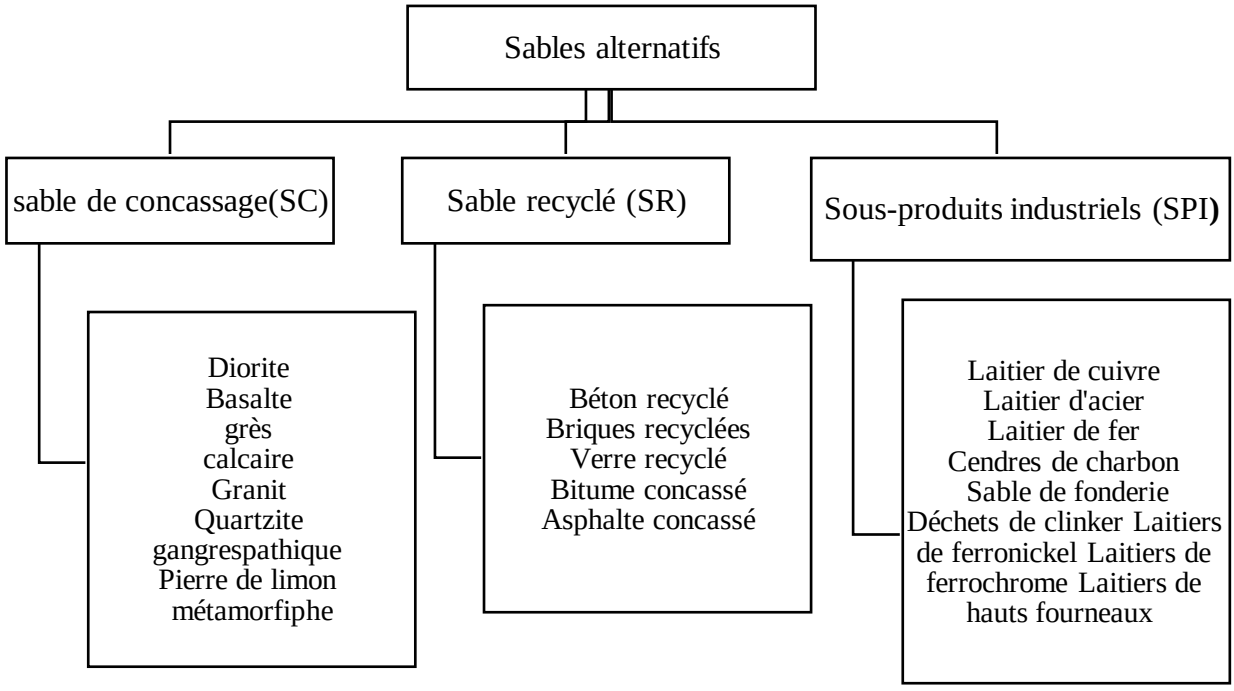


Figure I.1 : Les différents sables alternatifs [Kirt et al. 2020]

La Figure I-2 donne le taux de recyclage en fonction de la quantité de déchets de construction et de démolition produite à certains pays européens [UEPG, 2006]. Mais actuellement, les choses se mettent en place dans pratiquement tous les pays européens. Par exemple, en France via le Projet National Recybéton, lancé en 2011.

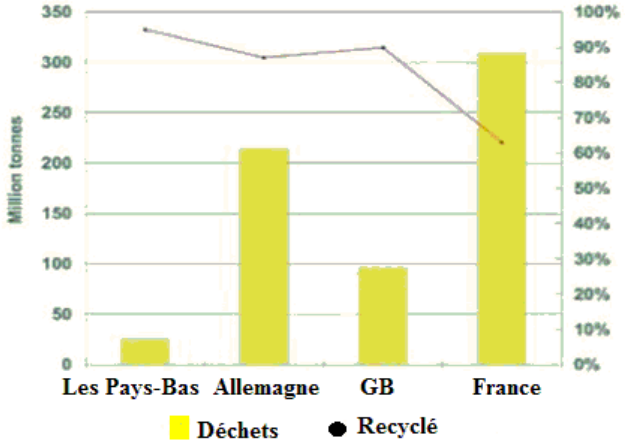


Figure I.2 : Taux de recyclage en fonction de la quantité de déchets de construction et démolition produite [UEPG, 2006].

I.3 Besoin de sables alternatifs

Le sable de rivière, le sable marin, le sable de concassage de carrière et le sable des dunes sont les principales sources de sable naturel [Gnan et Raj, 2013]. Le sable de rivière est le plus largement utilisé dans la construction en raison de ses propriétés favorables. Des défauts tels que la présence d'un pourcentage élevé de sel dans le sable marin, une grande quantité de poussière dans le sable concassé et des particules mal graduées et très fines dans le sable des dunes les rendent impropres à la production du béton. Par conséquent, le sable de rivière est encore largement utilisé dans la construction conduisant à son épuisement massif, au changement de cours d'eau, à la disparition des plages, à la contamination des eaux souterraines et aussi à la destruction de la richesse animale et végétale. Ce qui a conduit à une restriction de l'exploitation de ces ressources naturelles [Zegh et al. 2012 ; Bouz, 2013]. Il existe plusieurs restrictions à l'extraction illégale de sable de rivière qui ont obligé les chercheurs à utiliser des matériaux alternatifs comme sables dans la construction malgré sa mauvaise qualité. Par ailleurs, l'élimination des déchets un autre problème majeur auquel le monde entier est confronté. En 2018, le groupe de la Banque mondiale prévoyait la production de 2,59 milliards de tonnes de déchets mondiaux d'ici 2030 et 3,40 milliards de tonnes d'ici 2050 [Sing et al. 2018]. Le scénario est encore pire pour les systèmes d'élimination des déchets mal gérés et entraîne une destruction du sol et de l'environnement voisin [Kirt et al. 2019]. Ces déchets peuvent être toxiques ou non et peuvent contaminer les terres et les ressources en eau provoquant des problèmes de santé [Sing et al. 2018]. Le coût économique et social de la gestion des décharges est très élevé. Les déchets mis en décharge mettent des millions d'années à se décomposer. Par conséquent, la conception de stratégies et

d'installations efficaces pour leur traitement nécessite des investissements en capital élevés concernant les initiatives de gestion et de recyclage. Alors, une pensée de matériaux durables en luttant l'effet de serre, le réchauffement climatique et la pollution de la terre est à l'heure de besoin. A cet effet, l'utilisation efficace de SA est la meilleure solution pour le monde entier [Sing et al.2017].

I.4 Sables alternatifs

Le sable concassé (SC), les sous-produits industriels (SPI) et les sables recyclés (SR) présentent actuellement les différents types de SA. Les SC sont fabriqués par concassage de roches de carrières ou dépôts fluviaux. Il est principalement angulaire et a une texture de surface plus rugueuse que le sable de rivière naturellement altéré. Par conséquent, les propriétés du SC dépendent en grande partie de leur caractère lithologique, de leur composition et de leur processus de concassage [Safi, 2017 ; Raj, 2014]. La présence de fines (<75 μm) est très nocive car elle entraîne un retrait dans le béton.

En revanche, l'utilisation de SPI en remplacement des sables favorise la durabilité du béton, ainsi que la conservation des ressources naturelles et la diminution de l'émission de dioxyde de carbone (CO_2). Pour cette raison, l'utilisation de divers SPI dans le béton a fait l'objet d'un intérêt croissant ce dernier temps [Agg, 2014]. Il est important de comprendre la caractérisation, les propriétés physico-mécaniques et la durabilité du béton.

Cependant, le recyclage des déchets de construction et de démolition ouvre la voie non seulement à l'élimination des déchets, mais contribue également à préserver le sable naturel de l'épuisement [Han, 1986]. Toutefois, le fait d'être un mélange hétérogène de déchets de construction et de démolition génère une incohérence de certaines caractéristiques des granulats recyclés, tels qu'une texture plus rugueuse, une forme irrégulière, un taux d'absorption d'eau plus élevé, une densité plus faible qui influencent de manière significative la qualité du béton fabriqué [Kirt et al. 2019 ; Evan et Brito 2014]. Ces derniers chercheurs ont trouvé que le comportement médiocre du SR, tel que l'effet de frottement des grains, réduit la maniabilité du béton. Le SR peut être rentablement utilisé dans la construction de produits pour les chaussées [Khati, 2005;Soly, 2005]. La littérature a signalé que les propriétés mécaniques du mortier et du béton à base de SR diminuent en raison de la présence de vieux mortier collé et d'une médiocre zone de transition interfaciale. Cependant, peu d'autres littératures ont également trouvé des solutions pour améliorer les propriétés du béton

SR comme l'ajout d'additifs, l'utilisation des sables binaires ou ternaire et l'élimination des vieux mortiers collés, etc. [Kirt et al. 2020].

I.5 Situation dans le monde

En effet, si aujourd'hui le recyclage des chantiers routiers est très efficace, la réutilisation des déchets de démolition de chantiers du bâtiment s'avère autrement plus complexe. Cependant, les ouvrages d'art sont faciles à recycler, puisque ils sont constitués presque uniquement de béton. Par contre, dans un bâtiment, le béton cohabite avec d'autres matériaux très divers (bois, plastiques, métaux, verres, briques…). Le recyclage du béton n'est alors possible qu'à la suite d'un tri des matériaux, on parle ici de « déconstruction ». Cette opération est onéreuse, et jusqu'à présent n'était pas nécessairement demandée dans les appels d'offres et non prévue dans le financement [Cléo, 2014].

Dans le secteur des travaux publics, les bétons sont aujourd'hui essentiellement réutilisés dans des remblaiements ou concassés afin d'être utilisés, et plus particulièrement dans les sous couches de fondation des routes. Une alternative judicieuse et économique serait pourtant de réutiliser ces bétons existants directement dans le domaine du bâtiment, puisque cela permettrait à la fois une économie des ressources naturelles et une limitation de la mise en décharge, mais également une mise en œuvre rapide et une diminution des transports. En effet, dans l'idéal, les matériaux de démolition seraient concassés in-situ et réutilisés pour la formulation de nouveaux bétons sur le même chantier.

Le dispositif normatif est le même pour les granulats naturels et recyclés, bien que certaines caractéristiques spécifiques à ces derniers induisent une réflexion autour de son applicabilité. Selon la norme EN 206-1, l'utilisation des granulats recyclés a été autorisée, mis à part dans les bétons précontraints, mais dans des proportions limitées qui dépendent de leur qualité et de la classe de résistance souhaitée pour le béton. Trois types de GR sont définis :

• Type 1 : Au moins 95 % de béton ou granulats non liés

• Type 2 : Au moins 90 % de béton ou granulats non liés

• Type 3 : Au moins 70 % de béton ou granulats non liés

Le taux de substitution maximal autorisé de GRs en pourcentage par rapport à la masse totale de gravillon ou de sable varie de 30% pour les gravillons de type 1, à 15% pour les gravillons de type 2 et 5% pour les gravillons de type 3. De plus, les gravillons recyclés de Type 2 et 3

ainsi que les SRs ne peuvent être utilisés que pour des bétons de résistances inférieures ou égales à C25/30.

I.6 Aspect économique

D'après les chiffres publiés dans plusieurs sites internet, en 2018 l'utilisation totale de granulats en France a atteint 400 millions de tonnes, soit 7 tonnes par personne et par an, dont 80% ont été utilisées pour les travaux publics, et 20% dans le bâtiment. Le prix de la tonne s'élève en moyenne à 7€. Valeur fortement liée au transport, puisque plus de 90% transitent par camions. Quelques régions parviennent à équilibrer leur bilan production/consommation, tandis que beaucoup d'autres dépendent de sites d'approvisionnement parfois relativement éloignés. La région Ile-de-France, par exemple, affiche un fort déficit, puisqu'elle n'a produit que 60% de 30 millions de tonnes consommées.

Tam [Tam, 2008] a réalisé une étude économique complète en comparant les coûts et bénéfices engendrés par la méthode de production de granulats avec ceux engendrés par la méthode de recyclage. Il a été démontré que sur le long terme les granulats recyclés sont économiquement bien plus intéressants, mais que le facteur « disponibilité » affecte quelque peu la viabilité de cette méthode. En effet, la quantité de matériaux disponibles est limitée par le nombre de chantiers de démolition locaux, et quand les producteurs de granulats recyclés échouent à fournir la quantité souhaitée, alors les granulats naturels redeviennent la première source d'approvisionnement.

De plus, on constate une grande disparité entre la France et les autres pays de la communauté européenne. Prenons en exemple la consommation de granulats recyclés qui s'élevait en 2007 à 5% en France contre 25% au Royaume-Uni. Cette différence provient essentiellement du fait que les sources d'approvisionnement en granulats naturels sont plus importantes en France que dans le reste de l'Europe, et que par conséquent, les granulats recyclés sont, d'une façon générale, plus compétitifs partout en Europe, excepté en France. La tendance est récapitulée dans le Tableau I-1 :

Tableau I-1. Comparaison des prix des GR et GN dans différents pays (UEPG, 2005)

Pays	Prix moyen des GR (1)€/t	Prix moyen des GN (2)€/t	Rapport(1)/(2)
France	4.4-9.0	3.6-6.5	1.2-1.4
Espagne	3.0	6.0-14.4	0.2-0.5
Belgique	2.4-7.2	2.4-9.8	0.7-11
Royaume-Uni	3.3-8.4	4.4-15.2	0.5-0.6
Allemagne	4.8-8.4	6.5-8.8	0.7-0.95
Pays-Bas	8.4	11.4	0.76

I.7 Législation française concernant les déchets de chantiers

La France présente une production importante des granulats recyclés issus de matériaux de démolition (15 millions de tonnes données relatives à 2009 statistiques réalisée par l'Union nationale des industries de carrières et matériaux de construction (UNICEM) sur délégation du ministère de l'Industrie)

En 2014 [Cléo, 2014], il a été signalé qu'environ 90% des déchets de chantier BTP sont éliminés dans une décharge. Or depuis juillet 2002, l'article L. 541-24 du code de l'environnement impose que seuls les déchets ultimes soient désormais acceptés en installation de stockage. Le caractère « ultime » dépend du contexte local, puisqu'il désigne les déchets qui ne sont pas susceptibles d'être traités dans les conditions techniques et économiques du moment, notamment par extraction de leur part valorisable ou par réduction de leur caractère polluant ou dangereux.

Par ailleurs, l'article 11 de la directive-cadre du 19 novembre 2008 fixe l'objectif de 70% de valorisation de matière des déchets du BTP d'ici 2020.La loi Grenelle 1 a introduit le principe d'élaboration de plans de prévention et de gestion des déchets issus des chantiers du BTP de manière obligatoire. (Art. 46 de la loi n° 2009-967 du 3 août 2009 de programmation relative à la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement). Le Décret № 2011-828 du 11 juillet 2011, portant sur diverses dispositions relatives à la prévention et à la gestion des déchets, détaille le contenu attendu des plans (Art. 541-41, sous-section 3 du Code de l'Environnement).

I.8 Situation en Algérie

En Algérie, des bâtiments publics, des immeubles et des ponts sont démolis après des sinistres naturels comme le séisme ou par le vieillissement des ouvrages. Les matériaux de démolition sont, pour l'instant rarement recyclés. L'industrie de construction génère aussi une quantité importante de déchets (briques et bétons) qui sont rarement valorisés. Les quantités générées par la démolition et les déchets de chantier restent inconnues. Cependant, l'Algérie connaît un déficit important en matériaux de construction et en particulier les granulats. Au cours de la deuxième moitie de ce siècle et en 1980, la ville algérienne d'El Asnam (actuellement Chlef), a été secouée par deux tremblements de terre intenses qui l'on quasiment réduit en un énorme tas de gravats. L'expérience acquise par la Belgique en matière de recyclage des déchets de construction et de démolition, a permis au CSTC (Centre scientifique et technique de la construction) de proposer aux autorités algériennes d'effectuer une étude sur les possibilités

de recyclage des décombres de la ville. Alors, face à quels milliers de bâtiments (38 % des bâtiments) qui devaient êtres démolis et par la suite l'évacuation de plusieurs centaines de milliers de tonnes de débris, l'opération pilote de recyclage menée par la recherche du CSTC, à démontré qu'il est possible de recycler les débris en blocs de construction de qualité convenables. Il faut aussi noter le manque de politique de gestion des déchets en général et les déchets non ultimes en particulier et de leur valorisation.

I.9 Les granulats recyclés

Les granulats (sable et gravier) occupent généralement entre 70 et 80% du volume de bétons et ont une influence importante sur ses propriétés fraîches et durcies. En effet, la caractérisation des sables pour le béton est de plus en plus importante en raison des nouvelles exigences de performance issues aux nouvelles techniques de mise en place (pompage, injection…). A cet effet, les granulats de recyclage doivent répondre aux mêmes spécifications d'utilisation que les granulats naturels. La démarche vertueuse sera de parfaitement les caractériser via des actions, des essais et des tests physico-chimiques, largement explicités dans les normes et les guides techniques. Ils demeurent parfaitement utilisables dans de nombreuses techniques comme les remblais, les graves traitées, les graves non traitées en couche de formes de fondation ou les assises de chaussées, éprouvées depuis des dizaines d'années, donnant pleinement satisfaction et montrant une très bonne durabilité.

Les matériaux de démolition présentent souvent une grande diversité et nécessitent une sélection afin d'être réutilisés. On peut les classer en quatre grandes catégories [Cléo, 2014] :

1. Les matériaux de déconstruction de bâtiments et ouvrages d'art : béton (armé ou non), sans enduit, ni plâtre, ni amiante ou autre déchets industriels spéciaux
2. Les matériaux de déconstruction de chaussées : traités ou non aux liants hydrauliques ou hydrocarbonés, bordures en béton, pierre naturelle… (NB : les granulats enrobés de liants hydrocarbonés sont impropres à la formulation de nouveaux bétons, surtout si ceux-ci sont susceptibles de subir des incendies).
3. Les mélanges de matériaux composites : ossatures en béton, maçonnerie, relativement pauvres en plâtre, verre, bois, plastique… etc.
4. Les mélanges hétérogènes du même type mais avec des teneurs en matériaux indésirables supérieures à 10%.

Il faut noter que plus de 90% des approvisionnements ont pour origine les catégories (1) et (2).Les différentes étapes visent à obtenir un produit de recyclage répondant aux caractéristiques souhaitées sont :

- Si besoin, réduction des plus gros éléments à l'aide d'une brise de roche hydraulique (B.R.H.)

- Concassage primaire à l'aide d'un concasseur à percussion ou à mâchoires, suivi d'un déferraillage électromagnétique

- Criblage, visant à éliminer les matériaux ne répondant pas aux caractéristiques souhaitées

- Si nécessaire, concassage secondaire sur la fraction supérieure du concassage primaire.

Les installations de recyclages peuvent être fixes ou mobiles, et dites « primaires » ou « secondaires » selon qu'elles proposent un ou plusieurs niveaux de concassage. Les produits résultant de ces installations sont de natures variées, allant du matériau de pré-criblage, aux graves non calibrées, graves 0/D, sables et gravillons. Ils sont aujourd'hui généralement utilisés pour réaliser des terrassements (remblayages divers, couches de forme…) et des chaussées (assises).

Les granulats de béton recyclés peuvent être obtenus (a) à partir d'éléments en béton récupérés après avoir subi des tests, lors de travaux scientifiques par exemple ou (b) du béton déconstruit. Dans le premier cas, les granulats obtenus sont relativement propres, mais dans le second ils peuvent être contaminés par de la brique, du sable, de la poussière, du verre, du plastique… Il a cependant été prouvé que ces granulats recyclés, même légèrement contaminés, pouvaient être utilisés dans la formulation des bétons en remplaçant les granulats naturels [Rao, 2007]. Cependant, de la même manière que pour les granulats naturels, la qualité des granulats recyclés, en termes de distribution de taille, absorption, abrasion…etc. doit être évaluée avant utilisation.

On obtient généralement la meilleure distribution de taille et de forme en procédant à un premier concassage, suivi d'un second. Cependant, pour des raisons économiques, un seul concassage est généralement effectué et il en résulte des graves de 50mm de diamètre en moyenne. Un second broyage permettrait de descendre à un diamètre de 14-20mm environ.

I.10 Sable recyclé

Le sable recyclé (SR) est issu du recyclage de blocs de béton et de gravats collectés sur chantiers de démolition. 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. Il en résulte deux produits : du sable et du gravier bruts. Ses matériaux sont transférés vers l'unité de transformation. Le processus débute par un lavage du sable et du gravier. Vient ensuite une étape qui sépare le sable du gravier. Le sable est de nouveau criblé puis lavé pour être ensuite stocké.

Il est utilisé dans différents secteurs :

- Bordures, voirie, réseaux, drainage...
- Gros œuvre (Fondations, poteaux, poutres, dalles béton...)
- Second œuvre (Mortier, enduit dégrossi, chapes...)
- Espaces verts (Maçonnerie paysagère, pavés et dallage...)

I.10.1 Fines (Poussière) de recyclage

Selon la norme NF P 18-540, le vocabulaire de « fines » désigne l'ensemble des grains passant au tamis de 80 µm, alors que dans la les précédentes normes, la teneur en fines était définie par le passant à 63 µm. Par contre, aux Etats-Unis, la norme ASTM ce sont les passants à 75 µm. Cependant, les fines de recyclage sont des matériaux fins formés durant le processus du recyclage de blocs de béton et de gravats, ou plus rarement, de graviers en granulats fins. Lors d'un processus correct de traitement des granulats, ces fines devraient être ôtées par lavage.

I.10.2 Propriétés chimiques du SR

Les compositions chimiques de SR sont présentées dans le tableau I.2 L'analyse XRD de SR a montré de nombreux petits pics de β-C_2S qui dénotent la présence de particules de ciment non hydratées entourant les grains du SR [Kumar et al 2017 ; Kou et Poon, 2013]. Par conséquent, ce ciment non hydraté réagit avec l'eau pour former des produits d'hydratation supplémentaires dans le SR. Les chercheurs ont également signalé que la calcite, le quartz, le gypse, le feldspath potassique et le feldspath sodium ont également été identifiés dans des proportions, ainsi que l'ettringite et la portlandite. De plus, des quantités résiduelles de mono-carboaluminates de taille 4 µm ont également été observées [Evan et al. 2014].

Tableau I.2 : Composition chimique de différents sables recyclés (Extrait de [Kirtet al. 2020])

Auteurs		SiO_2	AL_2O_3	K_2O	TiO_2	MgO	Na_2O	CaO	Fe_2O_3	P_2O_5	SO_3	Matière volatile en suspension
Lee (2009)		66.3	4.5	0.9	0.3	1.8	1.3	15.7	2.0	0.1	-	7.1
Mart et al 2013	Céramique	47.43	13.29	0.83	0.17	3.82	2.21	26.1	4.93	-	-	0.86
	Mortier + céramique	31.16	7.82	0.68	0.24	5.77	1.10	46.8	4.03	-	-	2.27
	Béton	13.16	3.42	0.37	0.17	5.77	0.20	0.4	1.71	-	-	9.64
Stefanidu, (2014)		38.1	6.27	0.8	-	2.19	0.92	29.7	3.66	-	-	18.42
Mart et al. (2016)		45.5	10.10	2.31	0.32	1.81	0.95	15.7	2.44	0.12	3.12	16.50
Bui et al. (2017)		62.56	12.52	1.30	0.62	1.83	2.69	12.0	5.82	-	-	-
Katz (2017)		67.20	1.68	0.36	0.14	1.89	0.27	13.4	0.73	0.02	-	12.94
Kumar et al. (2018)		68.15	0.16	-	-	0.80	-	14.4	3.08	-	-	13.30

I.11 Coefficient d'absorption

La perte de maniabilité du béton avec le temps, souvent appelée perte d'affaissement, est très importante dans la pratique de la construction, en particulier avec le béton prêt à l'emploi où les temps de transport longs et les retards sur chantier sont courants. Ce phénomène est du aux effets de l'hydratation du ciment, de l'évaporation et du taux d'absorption d'eau dans le cas des granulats secs. Il est rapporté par [Alho, 2009] que ce dernier dépend principalement des caractéristiques du ciment, de sa teneur, du rapport eau/ciment E/C, de la température ambiante et celle du béton, de l'affaissement initial et de la présence d'adjuvant**.** L'absorption d'eau des granulats recyclés est comprise entre 3 et 12% [Jose, 2002 et Katz, 2003], la valeur précise dépendant du béton à partir duquel ont été produits les granulats, dit béton « parent ». Il est important de noter que cette valeur est bien plus élevée que celle des granulats naturels, qui ont une absorption d'eau comprise entre 1 et 2% en poids des agrégats [Mind, 2003]. Cette différence est principalement due aux résidus de mortier adhérant au granulat naturel de départ, qui est plus poreux que la pierre en elle-même, ce qui augmente globalement l'absorption d'eau du nouveau granulat et influence les propriétés des bétons et mortiers à base des recyclés à l'état frais et durci. De nombreux auteurs ont conclu que la substitution des granulats naturels par les recyclés, engendre une augmentation de la quantité d'eau de gâchage

nécessaire, menant à des difficultés de contrôle de la rhéologie à l'état frais et par conséquent provoque des pertes de résistances à la compression, à la flexion ainsi que le module d'élasticité [PED et NEN,2014]. Plusieurs autres paramètres régissent l'absorption d'eau des granulats recyclés [Padm, 2009] :

- Le type et la taille maximale des granulats du béton recyclé ;
- Les performances mécaniques du béton recyclé.

I.11.1 Etat saturé à surface sèche « SSD »

Avant d'entamer cette partie, il est utile de définir l'état saturé à surface sèche (noté « SSD » vienne d'appellation en anglais : Saturated surface dry). SSD est défini comme l'état d'un granulat dans laquelle las surface des particules est "sèche" (c'est-à-dire que l'adsorption en surface n'aurait plus lieu), mais que les grains des granulats sont saturés. Dans cette condition, les granulats n'affecteront pas la teneur en eau libre d'un matériau composite (Figure I.3).

Le coefficient d'absorption d'eau (Ab) est défini en fonction de la masse de l'échantillon saturé à surface sèche (M_{ssd}) et de la masse de l'échantillon d'essai séché à l'étuve (M_{sec}) par l'équation 1 :

$$Ab = (M_{ssd}-M_{sec}) /M_{sec}\text{.....(Eq 01)}$$

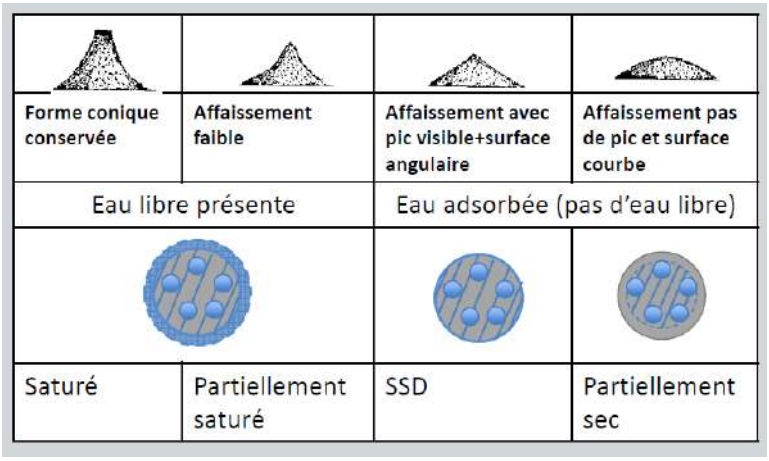


Figure I.3 : Etat « SSD » déterminé par l'essai d'effondrement au cône (Pas assez précis pour les sables) (Selon [Gent2013], inspiré de : EN 1097-6)

I.11.2 Aperçu sur la normalisation du coefficient d'absorption

Selon [Dreux, 1998], plutôt que d'imposer des valeurs limites de porosité, les différents textes réglementaires considèrent, pour définir la qualité des granulats, leur coefficient d'absorption qui est le rapport de l'augmentation de leur masse provoquée au bout de 24

heures par une imbibition par rapport à leur masse sèche. Ce coefficient mesure le volume des pores accessibles à l'eau, ce qui signifie que plus sa valeur est élevée, moins la durabilité du béton est assurée dans un milieu agressif. En particulier, la pénétration de l'eau dans les pores des granulats, donc du béton, fragilise la structure en cas de gel. Par ailleurs, dans un milieu à faible hygrométrie de l'ordre de 60 à 70%, la vitesse de pénétration de la carbonatation est plus rapide. Enfin, lors du malaxage du béton, l'emploi de granulats à fort coefficient d'absorption peut provoquer une mauvaise ouvrabilité s'ils n'ont pas été pré-mouillés avant leur introduction dans le malaxeur [Dreux, 1998]. Le tableau I.3 présente les valeurs supérieures spécifiées (Vss) précisées par la norme.

Tableau I.3 : Valeurs supérieures spécifiées (Vss) précisées par la norme [Dreux, 1998]

Catégorie des granulats	Vss en (%)
A : Granulats destinés aux bétons de qualité	2,5
B : Granulats destinés aux bons bétons	5
C : Granulats destinés aux bétons courants	6
D : Granulats destinés aux bétons courants	Pas de spécif.

Rappelons que l'ancienne norme fixait une valeur maximale de 5%, qui était peu sévère pour certains bétons. De même le fascicule 65 A stipule pour les marchés publics de travaux, un coefficient d'absorption d'eau (Ab) ≤ 2% pour les bétons de $f_{C28} \geq 30$ MPa, ainsi que pour les BA de $f_{C28} < 30$ MPa, mais qui sont placés en atmosphère agressive sévère [Dreux,1998].

Selon la littérature, on peut distinguer deux méthodes pour déterminer le coefficient d'absorption : dans la première méthode on part d'un matériau saturé qu'on sèche « selon les normes EN 1097-6 (2001) et ASTM C 128-07a 2007 » et dans la seconde méthode, on part d'un matériau sec qu'on sature [Tam et al. (2008) ; Teg (2012)].

Dans la méthode normalisée EN 1097-6, l'échantillon est d'abord saturé dans l'eau pendant 24h. Le coefficient d'absorption d'eau est ensuite déterminé en mesurant la teneur en eau à l'état SSD. Pour atteindre l'état SSD, on utilise un courant d'air chaud pour sécher progressivement l'échantillon. Cet état est identifié en utilisant un essai d'affaissement au cône. Ce dernier permet de détecter la présence de forces de cohésion dues à l'humidité de surface des particules. Ce test est réalisé plusieurs fois au cours du séchage. Le cône métallique est rempli en une fois et compacté avec 25 coups de pilon pour tasser l'échantillon.

L'état SSD est déterminé à partir de la forme du tas de sable après soulèvement du cône métallique (Figure I.4). La masse de l'échantillon à l'état SSD est enregistré. L'échantillon est ensuite séché à l'étuve à 105°C afin d'obtenir la masse à l'état sec.



Figure I.4 : Forme du cône de sable correspondant à l'état SSD selon la méthode normalisée EN 1097-6

La cinétique d'absorption des granulats recyclés n'a été que très rarement évaluée, cependant Tam et al. [TAM, 2008] ainsi que Djerbi et al. [DJE, 2012] ont proposé un protocole expérimental plus adapté aux gravillons recyclés mais aucune procédure n'a été validée sur les sables recyclés. Il n'y a pas non plus dans la littérature de résultats concernant les cinq premières minutes de l'absorption. Cependant, [Padm, 2009] a montré que le pourcentage d'absorption d'eau du GR augmente avec la performance mécanique du béton recyclé, à cause de la plus grande quantité de mortier lié dans ce cas-là. Son étude a également prouvé que la taille des granulats utilisés dans le béton recyclé influence l'absorption d'eau des granulats produits à partir de ce béton: en effet, plus le granulat naturel initial est petit, plus la surface spécifique totale disponible est grande, et donc plus les GRs sont riches en ancien mortier, autrement dit, plus ils sont poreux [Zhao, 2014].



Figure I.5: Etats de sables

I.11.3 Ordre de grandeur

L'absorption d'eau du SR a été observée à près de 7% -10% en raison de la structure poreuse et de la présence d'un pourcentage élevé de poussière dans le SR [Pereira et al. 2012 ; Kou et Poon, 2013; Boud et al. 2016]. [Ext et al. 2014] ont constaté que l'absorption d'eau de SR

céramiques après 24 heures était de 1,68%. [Pan, 2017] ont observé que lors du prétraitement des SR, l'absorption d'eau est considérablement réduite en raison de l'effet de la micro-compacité. Selon [Li et al. 2017], l'absorption d'eau dans le SR peut être réduite à 5-7% en les centrifugeant à 2000 tr/min pendant 10 min.

I.12 Granulométrie

L'importance de la granulométrie réside dans le fait qu'elle influence directement de nombreuses propriétés importantes du béton frais, telles que la consistance et la ségrégation, et dans une certaine mesure, les propriétés du béton durci [Baker 1973]. En règle générale, dans les limites autorisées, la granulométrie des sables a une influence plus grande sur les propriétés du béton que celle des graviers [Hew 1998]. À une extrémité de la plage autorisée, un sable exceptionnellement grossier a tendance à produire un mélange ferme de maniabilité réduite et de risque plus élevé de ressuage, de ségrégation lors du mélange et de la mise en place du béton. D'autre part, un sable exceptionnellement fin peut augmenter considérablement la demande en eau d'un mélange de béton, en raison de sa surface de particules beaucoup plus grande, mais il peut améliorer la cohésion.

Cependant, la granularité des GRs dépend du système de concassage utilisé ainsi que de la qualité des matériaux de démolition. Avec un bon ajustement des ouvertures du concasseur, il est facile de produire raisonnablement une bonne granulométrie de GRs [Han,1992].

D'après des études danoises et japonaises [Han, 1992], des granulats recyclés ont été obtenus en passant une seule fois dans le concasseur à mâchoire, avec une granulométrie des gros granulats (5/25) très proche des limites admissibles préconisées par la norme ASTM C-33. Par contre, la partie fine des GRs (< 4 mm), présentait une granulométrie assez différente de celle des limites admissibles tolérées par la même norme comme le montre la figure I.6.

Les GRs se caractérisent par un fuseau granulaire homogène et continu, mais les SRs sont sensiblement plus grossiers que les sables naturels utilisés dans les bétons ordinaires [Hadj, 1998 ; Queb, 1996 ; Han, 1992 ; Deb 1999 ;Katz 2003 ;Topc et Seng, 2004]. La substitution de ces derniers dans le béton à réaliser risque de produire un phénomène de ségrégation [Deb 1999]. Le sable recyclé (grossier) est en effet constitué en majorité de petits gravillons et d'une faible proportion de sable moyen. On retrouve dans ces fines une quantité importante de ciment.

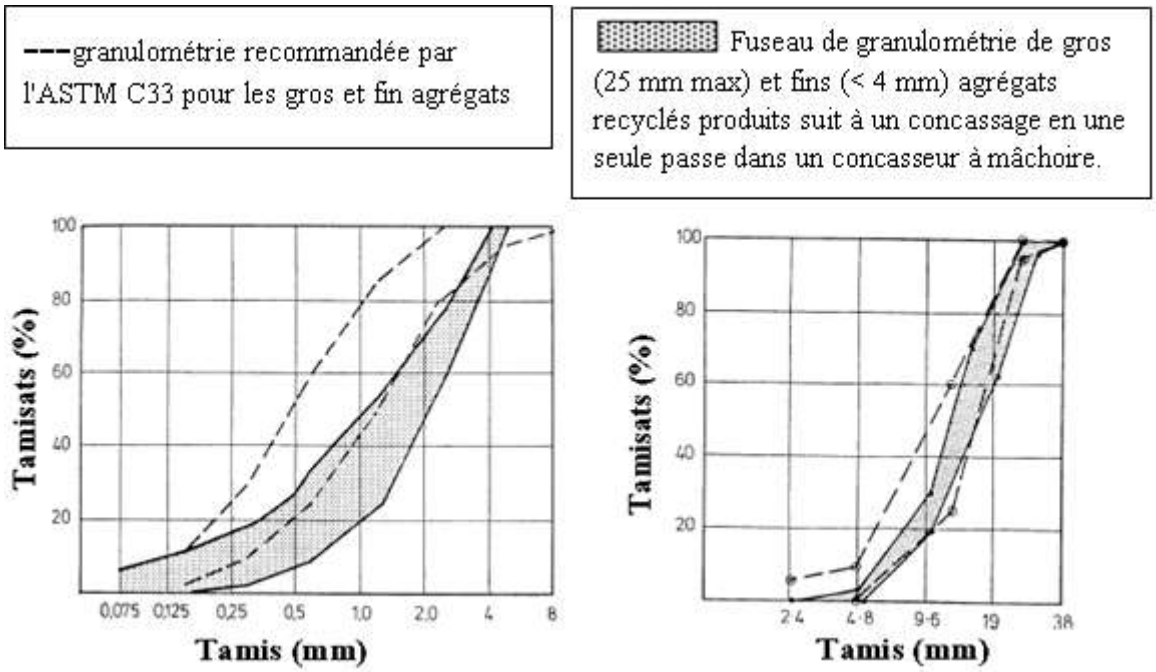


Figure I.6 : Granulométrie d'agrégats recyclés produits par concasseur à mâchoires en un seul passage [Han, 1992]

Les granulométries des particules de SR obtenues par différents chercheurs sont illustrées sur la figure I.7. On constate que les sables de mortier de brique concassée (SBC) contiennent plus de poussière et de particules fines inférieures à 75 µm que les granulats de béton concassé [Mart et al. 2013 ; Aggaet Sid, 2014]. Le module de finesse du SBC est d'environ 3,60-3,91, alors que pour le béton concassé est d'environ 3,10-3,65 [Mart et al.2013; Katz et Kul, 2017; Sant et Mino, 2018]. Le tableau I.6 montre les propriétés physiques du SR obtenues auprès de différents chercheurs.

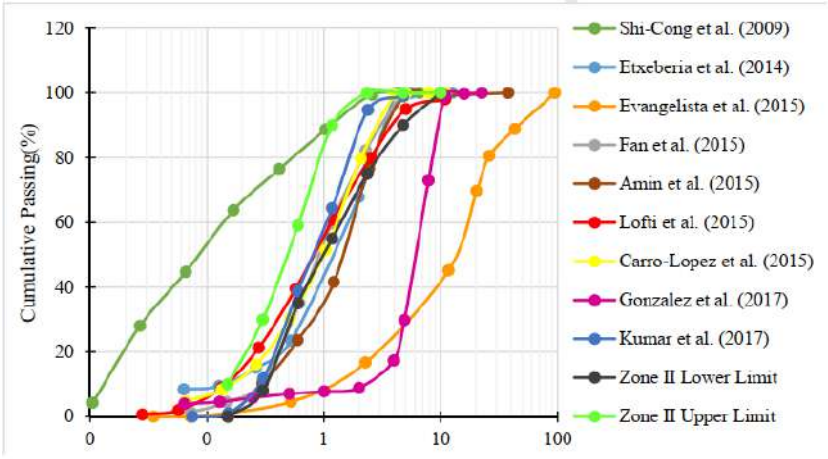


Figure I.7 : Analyse granulométrique de différents sables recyclés [Kirt et al. 2020]

I.13 Densité

Bien évident, la densité de SR est inférieure à celle des sables naturels conduit à une faible densité du béton [Lee, 2009 ; Kou et Poon, 2013 ; Mart et al. 2016]. Cela est dû à l'existence de vieux mortier collé [Boud et al.2016]. Les chercheurs ont observé que la densité du SR varie entre 2,29 et 2,51.

I.14 Présence des matériaux nuisibles

Les particules d'une taille inférieure à 80 µm (75 mm selon l'ancienne norme) peuvent se présenter sous trois formes différentes : argile, limon ou poussière. L'argile est un matériau minéral naturel ayant des propriétés plastiques et composé de très fines particules. La fraction minérale argileuse d'un sol est généralement considérée comme la fraction constituée de particules plus fines que 2 µm. Les minéraux argileux sont essentiellement des silicates d'aluminium hydratés ou parfois des silicates de magnésium hydratés [ACI,1985].Le pourcentage d'impuretés dans les SR de béton démoli plus grand d'environ 10% par rapport à celui de sable naturel [Deb, 1999].

La norme américaine ASTM C33 tolère 1,5 % de poussière de concassage dans les gros granulats et 5 à 7 % dans les granulats fins. Par conséquent, les granulats recyclés peuvent êtres utilisés sans être lavés pour la production de béton [Han 1992]. Dans le projet de norme européenne, le seuil des fines (< 63 µm) est fixé à 2% pour les graviers à base de béton démoli [RILEM, 1994] alors que dans les recommandations belges d'utilisation des granulats recyclés dans les bétons, la teneur en fines (< 80 µm) est limitée à 3% [Vyn et Rouss, 1994]. Généralement, il est conseillé de n'utiliser que la fraction de GRs à base de béton démoli qui dépasse 2 mm(Φ>2mm)pour la production de nouveau béton [Han, 1992].

En revanche, autres exemples de matériaux nuisibles sont l'asphalte, la brique et les copeaux de bois qui peuvent se présenter dans les SR [McG et al.2017]. Ces matériaux affecteront négativement les propriétés du SR. Différents types de contaminants ont des impacts plus forts sur la résistance et la rigidité des SR, les copeaux de bois et l'asphalte ayant généralement des impacts négatifs particulièrement forts. [Ana et al.2014], ont rapporté que le SR provenant des déchets de construction et de démolition a des résultats comparables au test équivalent de sable par rapport au calcaire concassé, ce qui indique un pourcentage inférieur de matériaux nocifs dans le SR. [Carro et al.2015] ont indiqué que lors de la production de SR, l'élimination des particules fines, de la poussière et d'une certaine quantité de mortier collé peut permettre un lavage en profondeur. La norme européenne EN 12620 (2013) a fourni la valeur limite maximale des sels de chlorure hydrosolubles, des sulfates

hydrosolubles, du sulfate soluble dans l'acide, de la teneur en soufre et des contaminants légers pour les SR respectivement à 0,01%, 0,2%, 0,8%, 1,0% et 0,5%. De même, la limite maximale de solubilité dans l'eau des SR est de 10% selon la norme EN 1744 partie 5 (2015).

I.15 Analyses thermogravimétrique (ATG) et thermodifférentielle (DTA)

L'analyse thermogravimétrique (ATG), en anglais : thermo gravimetric analysis (TGA), est une technique d'analyse thermique qui consiste en la mesure de la variation de masse d'un échantillon en fonction du temps, pour une température ou un profil de température donné.

L'analyse thermique différentielle (ATD), en anglais Differential Thermal Analysis (DTA), est une technique d'analyse thermique qui consiste à suivre l'évolution de la différence de température entre l'échantillon étudié et un corps témoin inerte, c'est-à-dire dépourvu d'effets thermiques dans le domaine de température étudié [Site Wikipédia].

Des pics endothermiques dus à la perte de masse ont été obtenus par TGA de SR avec un pic à une masse constante autour de 569 °C [Park et al. 2012]. Il est également rapporté que la SR montre des changements allotropiques α─β [Park et al. 2012 ; Kumar et al. 2017]. Cependant, [Evan et al. 2013 ; Park et al. 2012] ont observé quatre régions différentes de perte de masse pour le SR à savoir :

- Jusqu'à 200 °C, perte due à l'eau adsorbée et libre des pores de surface du SR.
- Entre 200 et 400 °C, la perte de masse était due à l'eau de réseau dans le C-S-H, l'ettringite et le monosulfate.
- À 400-500°C, en raison de la déshydroxylation de l'hydroxyde de calcium.
- Enfin, vers 820-880°C, décarbonatation du $CaCO_3$. Autres chercheurs ont observé une perte de masse importante de SR autour de 26-236 °C et 650-800 °C et une petite perte de masse autour de 430-470 °C.

I.16 Forme des particules

Les SR sont généralement anguleux, ayant une texture de surface rugueuse que le sable naturellement. La forme des particules peut être évaluée à trois échelles principales: sphéricité (S), circularité (C) et rugosité (R) sous une forme sans dimension, déterminée par un analyseur d'images [Yam et Lih, 2017].

Plusieurs travaux de recherche ont été consacrés pour étudier l'effet de la forme des particules du SR sur les performances du béton. La forme des particules est semblable à celle de la pierre concassée. Le béton fabriqué avec des GR, présente généralement de bonnes qualités de

maniabilité, durabilité et résistance à l'action du gel-dégel. La résistance en compression varie selon la résistance du béton recyclé et le rapport eau/liants du nouveau béton [Bour, 2004]. La maniabilité, l'écoulement, le seuil de cisaillement, la viscosité, la teneur en air, les besoins en eau, le ressuage et la qualité de finition du béton sont tous influencés par la forme des particules des sables [NCSA,1976]. Les SR contiennent généralement plus de particules angulaires avec des textures de surface plus rugueuses et des faces plus plates que les SN qui sont plus roulés du fait de l'érosion au fil du temps.

Les chercheurs se sont intéressés à la quantification de la forme des particules afin d'expliquer les variations des besoins en eau de mélange et de la résistance à la compression pour des mélanges de proportions identiques. Dans les années 1960, Wills [Wills, 1967] a étudié les effets des sables et graviers sur la demande en eau dans le béton. Il a été constaté que le sable avait un impact plus significatif sur la demande en eau que le gravier. Ainsi, les résultats ont montré que le sable ayant une forme de particules plus feuilletée et allongée, provoque une diminution de la résistance à la compression. La figure I.9 fournit un graphique de comparaison pour l'évaluation visuelle de la forme des particules. [Nich,1982] a rapporté que plus l'angularité des particules augmente, la teneur en vides augmentait et les rapports E/C est plus grands par rapport à des mélanges comparables à base d'un sable moins anguleux. Comme le montre la figure I.4, la demande en eau du béton avec un affaissement donné augmente à mesure que l'indice de forme des particules augmente. La demande en eau augmente considérablement lorsque l'indice de forme est supérieur à 53 pour les deux teneurs en ciment. L'augmentation de la demande en eau au-dessus de l'indice de forme de 53 est attribuée aux particules rugueuses dans l'ensemble qui nécessitent plus d'eau pour obtenir le même affaissement



Figure I.8 : Les granulats recyclés industriels (GRI) et de laboratoire (GRL)

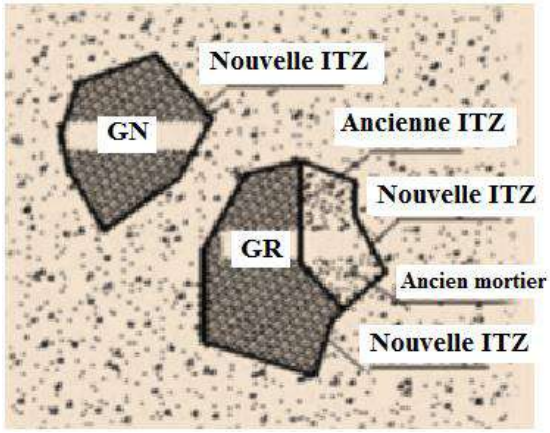


Figure I.9: Microstructure du béton recyclé et de ses zones de transition interfaciale (ITZ) [Pell, 2016] (Extrait de [Derki, 2019])

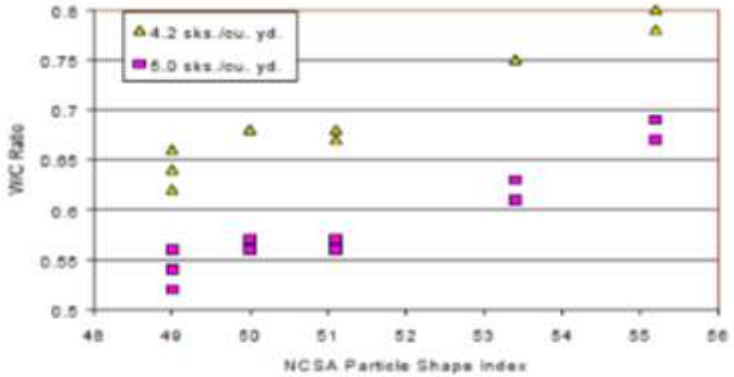


Figure I.10 : Influence de la forme des particules de sables sur la demande en eau, [Nich, 1982]

I.17 Texture de la surface des particules

La texture de surface, appelée aussi rugosité de surface, est une propriété spécifique qui dépend de la texture, de la structure et du degré d'altération du béton recyclé. La texture de la surface influe sur l'ouvrabilité, la quantité de ciment nécessaire pour produire des mélanges de mortier satisfaisants, ainsi que la liaison entre les particules et la pâte de ciment dans un mortier durci. Dans la plupart des cas, on obtient une certaine amélioration de l'adhérence lorsque la rugosité de la surface augmente. Il a été rapporté par [Mat, 1966] que la surface de contact des particules du sable avec la pâte de ciment diminue avec l'amélioration de l'état de surface des particules. Par conséquent, une particule hautement lisse aura moins de surface de liaison avec la matrice qu'une particule rugueuse du même volume. Cependant, une particule lisse nécessitera une couche de pâte plus fine pour lubrifier son mouvement par rapport aux autres particules d'agrégat. Il permettra donc une compacité plus serrée pour une ouvrabilité

égale et nécessitera donc une teneur en pâte inférieure à celle d'une particule rugueuse de forme similaire. Selon [ICAR,2001], Rhoades et Mielenz (en 1946) ont expliqué l'interrelation complexe entre les principales caractéristiques texturales qui influent sur la qualité de la liaison de l'agrégat à la pâte de ciment. La pénétration de l'agrégat par la pâte de ciment favorise une bonne adhérence, mais la porosité impliquée par une très grande pénétrabilité peut impliquer une faible résistance à la traction et au cisaillement de l'agrégat, entraînant une perte de résistance du béton.

D'autres chercheurs ont écrit que les sables à très faible absorption développent généralement des liaisons moins résistantes et produisent des mortiers moins durables que ceux à absorption légèrement supérieure. L'interrelation entre l'adhérence et l'absorption peut expliquer en partie la faible corrélation entre la durabilité du béton et l'absorption, car la résistance de l'adhérence augmente à mesure que l'absorption augmente, tandis que la durabilité du béton tend à diminuer lorsque l'absorption augmente. Ainsi, l'absorption des agrégats ne peut pas être considérée seule comme un indicateur fiable des caractéristiques de liaison, car les capillaires de très petite taille peuvent ne pas permettre la pénétration de la boue dans les agrégats mais peuvent permettre une pénétration considérable de l'eau. Du point de vue de la durabilité et de la liaison, les vides pénétrables de très petite taille sont les moins souhaitables [Dola, 1983]. La force et la permanence du lien entre le ciment et l'agrégat sont fonction non seulement de la texture de la surface, mais également des caractéristiques chimiques de l'agrégat. L'intégrité de la liaison sera perdue si des réactions chimiques, telles que celle entre le ciment fortement alcalin et les agrégats réactifs, se produisent par la suite. D'autre part, certains types d'interactions chimiques superficielles entre l'agrégat et la pâte de ciment peuvent être bénéfiques pour réaliser une union plus intime et plus forte. Les granulats recyclés sont fortement fissurés en surface [Hadj, 1998]. Cependant, il n'existe actuellement aucune méthode d'essai efficace pour évaluer efficacement la texture du SR.

Shen et al. (2016) ont constaté que la circularité et le rapport longueur / largeur du sable de rivière varient entre 1,0-1,2 tandis que le SC varie de 1,2-1,4. De plus, le quartzite feldspathique a une rugosité de surface plus élevée (20,40 μm) que les autres SC. Le SC a une rugosité de surface plus faible que le sable de rivière car le SC est principalement composé de nouveaux cristaux brisés qui sont très lisses. Les SC sont généralement 10,0% -11,5% moins feuilletés, 0,3% -1,3% plus de rapport de convexité et 14,0% -16,2% moins de sphéricité que le sable de rivière [Celik et Marar, 1996]. Cortes et al. (2008) ont constaté que la sphéricité du granit concassé et du calcaire concassé étaient respectivement de 0,62 et 0,64 et leur

circularité de 0,27 et 0,33 respectivement. La forte angularité des particules de SC augmenterait le frottement entre les particules d'agrégats, ce qui affecte l'ouvrabilité du béton [Cortes et al. 2008].

I.19 Comparaison de propriétés physiques de différents sables alternatifs

Les propriétés physiques de SC, SPI et SR sont présentées respectivement dans les tableaux I.4, I.5 et I.6. Le tableau I.4 illustre les propriétés physiques du SC fabriqué à partir de différentes roches mères. Il a été noté de façon visible que, selon les caractéristiques de la roche mère, les propriétés du SC varient. La diorite a été observée comme ayant une plus grande absorption d'eau (%) que les autres SC en raison de la présence de fines excessives. Cependant, la teneur en vides pour tous les SC s'est avérée être d'environ 40%, sauf pour le granit. La valeur de l'équivalent du sable pour la dolomite s'est avérée être plus élevée que les autres SC, ce qui était également indiqué par un pourcentage moins élevé d'argile. Les recherches ont rapporté que les déchets de SPI tels que les laitiers de cuivre, les laitiers de fer, les laitiers d'acier, etc. ont une densité plus élevée que les déchets non métalliques, comme indiqué dans le tableau I.5. Il est également noté que l'absorption d'eau des cendres de fond était plus élevée par rapport aux autres SPI. Les propriétés physiques des SR observées par différentes travaux de recherche ont des valeurs presque similaires.

Tableau I.4: Propriétés physiques de sables de concassage [Kirt et al. 2020]

Propriétés	Sable naturel de roche concassée SC						
	Granit	Basalte	Dolomie	Diorite	Grès	Calcaire	Quartzite
Densité	2.6-2.8	2.8-3.0	2.8-2.9	2.7-3.0	2.2-2.8	2.3-2.7	2.6-2.7
Masse volumique apparente (kg/m^3)	1.5-1.8	1.5-1.6	1.5-1.7	1.5-1.7	1.5-1.6	1.6-1.7	1.5-1.6
Module de finesse	2.5-3.0	2.5-2.6	3.8-4.2	2.7-2.8	2.8-3.0	2.8-3.0	2.9-3.1
Teneur en fines(%)	4.5-5.0	7.4-10.0	4.9-6.0	15.0-16.0	2.9-11.0	3.5-30.0	13.8-15.0
Porosité(%)	29.0-43.5	45.0-49.0	46.5-49.0	42.0-43.0	44.0-46.0	39.0-49.0	44.1-47.0
Absorption de l'eau (%)	0.9-1.0	1.6-1.9	0.9-1.0	3.0-4.5	0.9-3.6	0.6-4.6	0.9-1.1
Contenu d'argile (%)	0.4-0.5	5.2-5.2	0.2-2.7	3.7-3.9	0.9-1.0	0.4-0.5	2.5-2.7
Valeur de BM(g/kg)	0.2-0.5	0.6-4.0	0.6-1.0	0.5-0.8	0.2-1.6	0.2-0.5	1.7-1.9
Équivalent de sable (%)	50.0-80.0	45.0-60.0	70.0-80.0	50.0-60.0	25.0-70.0	30.0-65.0	35.0-55.0

Tableau 5: Propriétés physiques des sous-produits industriels [Kirt et al. 2020]

Propriétés	Sous-produits industriels							
	WFS	Laitiers d'acier	Laitiers de cuivre	Laitier ISF	Cendres de fond	Laitiers de ferrochrome	POC	Laitiers deferronickel
Densité	2.1-2.6	3.0-3.2	3.4-3.9	3.7-3.9	1.4-1.9	2.7	2.0	2.5-3.0
Masse volumique apparente (kg/m^3)	1160	2395	-	-	620	-	1122	-
Module de finesse	1.6-1.9	2.0-3.0	1.7-3.7	-	1.3-1.8	4.80	2.2-3.3	4.07
Porosité(%)	1.1-24	-	-	-	-	-	-	-
Absorption de l'eau (%)	0.2-7.7	0.8-1.3	0.3-0.4	0.2-0.5	5.4-32.2	-	14.2-26.5	0.1-0.5
Densité (kg/m^3)	-	-	3600	3900	2190	-	-	2850

Tableau 6 : Propriétés physiques de sables recyclés (Extrait de [Kirthi et al. 2020] légèrement modifié)

Auteures	Densité	Absorption de l'eau (%)	Module de finesse	Fine (%)	Masse volumique apparente (kg/m^3)
Debieb et al. (2009)	2.50	14.01	3.91	-	1010
Lee(2009) Evangelista et al. (2010)	2.28	10.35	3.42	-	-
Evangelista et al. (2010)	2.16	13.10	2.38	-	1234
Pereira et al. (2012)	2.23	10.90	3.13	-	1280
Martinez et al. (2013)	2.13	4.71	2.78	13.0	1250
Martinez et al. (2016)	2.06	9.03	3.40	7.6	1310
Bui et al. (2017)	2.35	8.01		-	1375
Katz (2017)	2.52	8.70	1.15	18.3	-
Chu (2020)	2.54	6.13	2.45	-	-
Ariyachandra (2020)	2.41	6.73	-	-	-

I.20Effet du SR sur les propriétés du béton à l'état frais

Les propriétés du mortier et du béton frais sont considérablement influencées par les granulats. De plus, la densité, la granulométrie, la forme et la texture de la surface affectent également les propriétés à l'état frais. La consistance est appréciée par la stabilité, la mobilité, la compatibilité, la qualité de finition et de mise en place du mortier et du béton [Gon et al. 2007 ; Cord et al. 2016].

Plusieurs recherches ont montré que pour une teneur en eau identique, l'ouvrabilité d'un béton recyclé sera inférieure à celle d'un béton standard, et ceci plus particulièrement quand le pourcentage de remplacement de granulats excède 50% [Topç, 2004]. Cette différence est très certainement due à la plus grande porosité des granulats recyclés par rapport aux granulats naturels. Afin de pallier ce problème, différentes études ont été réalisées en faisant varier les conditions de préparation des granulats, et il en est ressorti qu'un ajout d'eau correspondant à l'absorption d'eau des granulats testés améliore significativement l'ouvrabilité du béton frais [Rao, 2005]. L'eau peut être ajoutée de différentes manières, soit en pré-saturant les granulats préalablement au malaxage, soit en compensant en ajoutant directement l'eau d'absorption dans l'eau de gâchage.

De la même manière, la quantité d'air occlus est légèrement supérieure (de 4 à 5%) dans le cas des bétons recyclés avec un taux de remplacement de 100% [Cléo,2014].

La masse volumique du béton frais naturel est connue pour être aux alentours de 2400 kg/m^3. Dans le cas des bétons formulés à partir de granulats recyclés, la valeur est clairement inferieure (aux alentours de 2150 kg/m^3) et ce quel que soit le type de ciment utilisé [Katz 2003].

Les SR absorbent généralement plus d'eau que le sable de la rivière en raison de la présence de vieux mortier collé, ce qui affecte donc considérablement l'ouvrabilité du béton [Tam et al. 2018]. [Han, 1986] a rapporté que la forme du SR (angulaire) affecte directement les propriétés fraîches du béton. De plus, ce béton a une teneur en air élevée et une faible densité que le béton témoin. Le béton à base de SR a une densité plus faible que le béton témoin [Lee 2009 ; Park et al. 2012]. Par contre, son ouvrabilité augmente avec l'augmentation des dosages d'adjuvants en particulier l'ajout de superplastifiant haute performance [Cartuxo et al. 2015]. [Perr et al. 2012] ont noté que la présence de SR a moins d'effet sur le superplastifiant à base de polycarboxylique que sur le lignosulfonate, car il agit principalement sur le phénomène de dispersion en raison d'un obstacle stérique qui augmente le potentiel zêta des particules de ciment. [Carro et al. 2015] ont observé que 1,7% de superplastifiant est nécessaire pour fabriquer un BAP avec un SR. [Cartuxo et al. 2015] ont étudié les conséquences de l'ajout d'un superplastifiant haute performance sur un remplacement à 100% par SR et ont observé que pour le même affaissement, le rapport E/C a diminué jusqu'à 15,7% et la densité apparente fraîche a augmenté jusqu'à 2,3%. Le SR nécessite de 5 à 15% d'eau supplémentaire lorsqu'il est utilisé à l'état sec afin d'obtenir une ouvrabilité similaire du béton témoin [Gonz et al. 2017]. De même, les chercheurs ont constaté que pour obtenir le même

affaissement en maintenant un rapport E/C constant, une augmentation de 20 kg/m^3 de ciment suffirait pour le béton avec SR [Fan et al. 2015]. La SR nécessite une certaine quantité d'eau pour saturer les granulats recyclés, avant ou pendant le mélange, afin d'obtenir la maniabilité souhaitée [Deb et al. 2008 ; Li et al.2017]. Il a été rapporté que les SR contenant moins de C_3A retiennent l'hydratation du ciment, ce qui entraîne une augmentation de l'ouvrabilité du béton [Kadri et al. 2009]. [Yap et al. 2011] ont noté que la SR à l'état sec réduit l'ouvrabilité du béton en raison de l'augmentation de la capacité d'absorption. En-dessous de 10 mm d'affaissement, l'essai au cône d'Abrams peut être remplacé par l'essai Vébé pour le béton avec SR, puisqu'il utilise une méthode dynamique qui réduit la viscosité et le frottement interne du béton.

I.21 Effet du SR sur les propriétés du béton à l'état durci

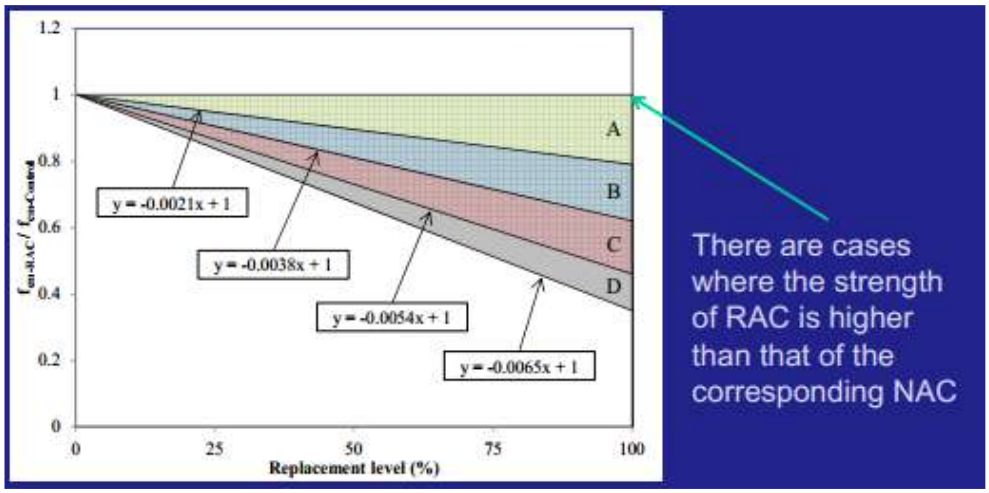
[Deb et al.2008] ont rapporté que la résistance à la compression diminue avec l'augmentation du taux de remplacement de la SR. Des chercheurs ont observé qu'avec une augmentation de l'âge, la différence entre le béton avec SR et le témoin diminue [Han 1986 ; Park et al. 2012]. [Khat, 2005] a étudié et comparé les propriétés du béton contenant du SR fabriqué à partir de béton concassé (CC), de brique concassée (SBC). Il a constaté que, quel que soit le type de SR, la résistance à la compression diminue avec l'augmentation du contenu en SR. La réaction pouzzolanique provoquée par la silice et l'alumine dans le SBC provoque une résistance plus élevée que le sable du CC. [Alves et al. 2014] ont également indiqué que les mortiers avec le SBC ont une résistance plus élevée en raison de son activité pouzzolanique élevée. [Amin et al. 2016] ont déclaré que le béton avec SRB présentait une meilleure résistance que le CC. [Ana et al. 2014] ont observé que l'utilisation de la combinaison SR avec les laitiers d'acier semble donner de meilleurs résultats que les combinaisons SR-calcaire. [Per et al. 2012] ont observé qu'une diminution de la résistance à la compression est insignifiante pour le superplastifiant (SP) libre et SP à base de polycraboxylate. Alors que la diminution est significative pour les SP à base de liganosulfate. [Kou et Poon, 2013] ont constaté que jusqu'à50%, le SR n'a aucun effet sur la performance du BAP. De plus, ils ont constaté que la présence de ces particules a amélioré la prise du béton. [Li et al.2017] ont observé que la compacité du SR est le facteur clé qui influe sur la performance du béton avec SR indépendamment du rapport E/C et de l'âge du béton.

I.21.1 Résistance à la compression

Il a été souvent constaté [Butl, 2013 ; Duan, 2014 ; Paul, 2014] que les bétons formulés à partir de granulats recyclés présentent des résistances à la compression inferieures aux bétons standards. Et cette diminution de performance varie fortement selon un certain nombre de paramètres, tels que le taux de remplacement de granulats, les conditions de préparation des granulats (saturés ou non), la qualité du béton parent, ou encore le rapport E/C. Il est cependant important de noter que l'inverse a aussi été observé, avec des augmentations de performances mécaniques de l'ordre de 10 à 13% pour les bétons recyclés par rapport aux bétons naturels [Etxe, 2007].

Il a été montré par exemple qu'à E/C élevé (entre 0,6 et 0,75), la résistance d'un béton recyclé est comparable à celle d'un béton standard jusqu'à un taux de remplacement aussi important que 75%. [Katz, 2003]. Rao et al. [Rao, 2005] ont également constaté que pourvu que le rapport E/C soit supérieur ou égal à 0,55, les résistances des bétons recyclés étaient comparables à celles des bétons standards même au taux de remplacement de 100%. Cette tendance est liée au fait qu'au rapport E/C élevé, la résistance en compression est liée à la qualité de la pâte et de l'interface pâte-granulats. En revanche, avec un rapport E/C réduit à 0,4, la valeur de la résistance chute de 25%. De manière générale, on peut dire que plus le rapport granulats recyclés/granulats naturels augmente, plus la résistance à la compression diminue, mais qu'en ajustant ce ratio, on parvient toujours à atteindre les résistances requises. [Evan, 2007 ; Gome, 2002 ; Topç, 2004 ; Queb, 1996]. Ils ont également constaté que la qualité du granulat recyclé joue un rôle très important dans la résistance à la compression du béton dans lequel il est incorporé (Figure I-11).

De plus, il est extrêmement important de noter que si, à 28jours, le béton naturel présente clairement une meilleure résistance à la compression, sur le long terme (un an), le béton recyclé présente le meilleur gain de performance, et peut aller jusqu'à dépasser le béton standard sur le très long terme (5 ans) [Evan, 2007].



Classe d'agrégat	A			B			C			D
	I	II	III	I	II	III	I	II	III	
Masse volumique absolue minimale (kg/m ^{3})	2600	2500	2400	2300	2200	2100	2000	1900	1800	Non limité
Coefficient d'absorption maximum (%)	1.5	2.5	3.5	5	6.5	8.5	10.5	13	15	
Coefficient de perte de masse maximum (%)		40			45			50		

Figure I-11 : Résistance à la compression estimée pour des bétons formulés à partir de différentes qualités de granulats recyclés à différents taux de substitution (RAC : béton à granulats recyclés ; NAC : béton à granulats naturels) [Cléo, 2014]

I.21.2 Résistance à la traction par flexion et par fendage

Les études réalisées concernant la résistance à la traction des bétons recyclés présentent des résultats légèrement différents les uns des autres. Si toutes indiquent une perte de résistance pour le béton recyclé par rapport au béton standard, certains ont obtenu une réduction de 15 à 20% à un taux de remplacement de 100% [Rao, 2005] et d'autres une perte de moins de 10% pour un essai réalisé à 28 jours [Ajd et Kil, 2002]. Ces auteurs ont constaté également que l'utilisation de divers adjuvants, tels que la fumée de silice par exemple, permet d'améliorer les performances du béton recyclé.

De la même manière que pour la résistance à la compression, il a été constaté que sur le long terme (5 ans), le gain de performance en traction d'un béton recyclé est clairement meilleur que celui d'un béton naturel [Gome, 2002].

I.21.3 Module d'élasticité

Il a été rapporté que le module d'élasticité du béton de granulats recyclés (BR) se situe entre 50 et 70% du béton normal [Ajd et Klis, 2002 ; Rao, 2005] en fonction du rapport eau-ciment et du remplacement niveau de GR. Cependant, plus de données expérimentales sont nécessaires dans ce domaine, avant de pouvoir tirer des résultats concluants, en particulier dans les applications de BR où le module d'élasticité ou le comportement contrainte-déformation est un paramètre critique.

I.21.4 Fluage et retrait

L'utilisation de GR dans le béton induit un retrait important en raison de la forte absorption de ces granulats. Certaines études montrent qu'en BR à l'âge de 90 jours, le retrait pourrait être d'environ 0,55 à 0,8 mm / m, alors que la valeur comparable pour le béton de granulats naturels (BN) n'est que d'environ 0,30 mm / m [Katz, 2003].

Cependant, les résultats des tests de fluage dans des conditions normales de laboratoire ne sont pas aussi clairs, bien que certaines études aient montré que la tendance à être inversée, c'est-à-dire que le fluage après 1 an est environ 20% inférieur à celui du béton avec GN [Ajd et Klis, 2002]. Bien que des travaux supplémentaires soient nécessaires dans ce domaine, il semble que le comportement global du BR et du BN puisse être comparable lorsque l'on observe l'effet combiné du retrait et du fluage.

I.21.5 Durabilité du RAC durci

Des études de durabilité ont été réalisées pour mieux comprendre l'effet de l'utilisation de différentes qualités de GR sur les propriétés du béton. Bien que certaines études aient montré que le BR est significativement plus perméable que les BN, il convient également à noter que les propriétés de durabilité peuvent être améliorées en utilisant des cendres volantes, de la fumée de silice condensée, etc. [Rao, 2007].

I.21.6 Carbonatation

Sur la base d'un test de carbonatation effectué après 6 mois de durcissement, la profondeur de carbonatation du béton recyclé s'est avérée 1,3 à 2,5 fois supérieure à celle du béton de témoin [Levy et Paulo, 2004]. On voit que pour un même rapport eau-liant, les profondeurs de carbonatation du BR sont légèrement supérieures à celles du BN [Otsuki et al. 2003]. Cette augmentation de la profondeur de carbonatation pourrait être attribuée à une perméabilité

accrue du BR en raison de la présence d'anciens mortiers adhérant à l'agrégat d'origine et de l'ancienne zone de transition interfaciale (ITZ) entre eux.

I.21.7 Résistance au gel et au dégel

Il n'y a pas d'opinion commune dans la littérature en ce qui concerne la résistance au gel du BR. Dans une étude où l'effet de la teneur en mortier adhérant à l'agrégat sur la résistance au gel et au dégel du BR a été étudié, il a été constaté que, à condition que la qualité des gravats de béton soit bonne, le mortier adhérant ne peut pas nuire à la performance du BR [Gokce et al.2004]. Dans une autre étude, il a été constaté que la résistance au gel et au dégel du BR utilisant du GR fabriqué à partir de béton sans entraineur d'air était assez faible, bien que le BR satisfasse aux exigences de l'air occlus. En revanche, les bétons fabriqués avec les granulats grossiers recyclés issus de bétons avec entraineur d'air étaient très résistants au gel [Sal et Bur,1998 ; Zah et al. 2004]. Les lacunes probables de la performance du BR à la congélation et à la décongélation peuvent être attribuées à la structure des pores de la pâte de ciment préalablement durcie qui adhère à la surface de l'agrégat recyclé. Cette matrice poreuse absorbe l'eau lors du mélange, augmentant le rapport E/C de la pâte.

CHAPITRE II

PROTOCOLE EXPERIMENTAL

CHAPITRE II : PROTOCOLE EXPERIMENTAL

II.1 Introduction

On présente dans ce chapitre le protocole des essais et les descriptions des matériaux utilisés (sables, ciment et eau). Le programme expérimental adopté consiste à étudier un mortier de ciment à base de sable recyclé (MR). Bien évident, en comparant avec un mortier à base de sable naturel (MN).

Le protocole d'essais mis en œuvre vise trois objectifs :

- Le premier objectif consiste à savoir la fiabilité de la méthode normalisée de calcul du coefficient d'absorption de sables lorsqu'elle est appliquée au SR ;
- Le deuxième objectif porte à estimer le taux d'absorption réel du SR ;
- Le troisième objectif consiste à déterminer l'influence de la substitution du SN par le SR sur les propriétés rhéologiques et mécaniques du mortier de ciment.

Pour ce faire, le protocole d'essais comprend les séquences suivantes :

- ✓ Concassage des éprouvettes du béton pour avoir un SR ;
- ✓ Séchage de sable de recyclés ;
- ✓ Procéder aux essais physiques sur les sable utilisés ;
- ✓ Pour atteindre le premier objectif : Préparation de mortiers à base de SR en prenant en considération le taux d'absorption par deux manières, citées ci-dessous ;
- ✓ Pour atteindre le deuxième objectif : Estimation du taux d'absorption réel à partir de l'évolution de la résistance à la compression en fonction du pourcentage d'absorption considéré (0 ; 25 ; 50 ; 75 et 100% de Ab) ;
- ✓ Pour atteindre le troisième objectif : Préparation des échantillons du SR avec différents pourcentages massique du SR par rapport au SN : 0 ; 25 ; 50 ; 75 et 100 % ;
- ✓ Préparation du mortier à base de SN ;
- ✓ Mesures de la résistance mécanique des mortiers confectionnés ;
- ✓ Comparaison des résultats obtenus en fonction du sable utilisé et de la manière dont on a pris le taux d'absorption en considération.

En ce qui concerne la manière dont on a ajouté l'eau prévue pour l'absorption du SR, on a procédé comme suit :

- ✓ Utiliser un SR sec et on ajoute la quantité d'eau équivalente à son absorption à l'eau de gâchage selon la méthode couramment utilisée.
- ✓ Utiliser un SR imbibé pendant 24 heures dans une quantité d'eau équivalente à son absorption. Autrement dit, utiliser un SR en état saturé à surface sèche (SSD) défini au chapitre I, paragraphe I.11.1.

Cependant, la composition adoptée pour avoir une maniabilité permettant d'avoir une lecture interprétable des résultats à l'état frais, est : une partie de ciment et une partie de sable avec une demi-partie d'eau.

II.2 Caractérisation des matériaux utilisés

Dans notre recherche, nous avons utilisé les matériaux locaux, qui sont disponibles dans le hall de technologie de l'université de Médéa.

II.2.1 Le sable

Deux types de sables ont été utilisés :

- Un sable recyclé (SR) de fraction 0/0,5, concassé au laboratoire à partir d'anciens éprouvettes du béton disponibles dans le hall de technologie de l'université de Médéa. Ces éprouvettes, dont l'âge presque une année, de composition et de résistance variables (en moyenne 25 MPa). Elles sont concassées d'abord manuellement, puis à l'aide d'un concasseur à mâchoires du laboratoire selon les normes : ASTM C289/UNE 83 120 comparable à EN 933-3, EN 933-6 (Figure II.1) ;
- Et un sable naturel (SN) de fraction 0/0,125, de provenance de Hassi Bahbah de la wilaya de Djelfa, à titre comparatif.



Figure II.1 : Concassage des éprouvettes en béton pour fabriquer un SR

Caractéristiques physiques du SR:

1. Masse volumique absolue : 2.50 t/m^3
2. Masse volumique apparente : 1.30 t/m^3
3. Forme : Irrégulière



Figure II.2 : Le sable recyclé utilisé

II.2.2 Le ciment

Le ciment utilisé dans notre étude est un ciment portland artificiel nommé CEM II/B- 42,5 N, provenant de la compagnie Lafarge, présente des performances mécaniques et des caractéristiques physico-chimiques conforment à la norme NA 442, EN 197-1 et à la norme NF P 15-301/94. Il s'agit d'un ciment gris de hautes résistantes mécaniques initiales et finales dues à la mouture du clinker obtenu par cuisson jusqu'à la fusion partielle (clinkérisation) d'un mélange convenablement dosé et homogénéisé de calcaire d'argile.

Ce ciment est constitué d'oxydes minéraux dont les principaux sont la chaux (CaO) à fonction basique et la silice (SiO_2) à caractère acide. On trouve également l'alumine (Al_2O_3) et le fer (Fe_2O_3). Ils sont rendus aptes à réagir entre eux et avec l'eau par traitement thermique à des températures comprises entre 1300 et 1500°C. En présence d'eau a lieu la réaction d'hydratation consistant en la formation d'un réseau résistant (propriété hydraulique) constitué principalement de microcristaux de silicates de calcium hydratés.

II.2.3 L'eau de gâchage

L'eau de gâchage utilisée pour la confection du mortier est une eau potable de robinet, exempte d'impuretés conformément à la norme NFP 18-303 et EN 1008.

II.3 Préparation des matériaux

Tous les mélanges sont préparés dans les mêmes conditions dans une salle maintenue à une température de 20°C ± 2C° et à une humidité relative supérieure ou égale à 50%. Le mélange doit être effectué par malaxage pendant 4 minutes conformément aux prescriptions de la norme EN 196-1, au moyen du malaxeur spécifié par la norme NF P 15-411, selon la procédure suivante :

- La pale du malaxeur doit être réglée à 4.5 mm du bol.
- Pour les premiers mélanges, il est conseillé de mouiller le récipient du malaxeur puis de l'essuyer afin qu'il présente la même humidité que les gâchées courantes.
- Introduire l'eau en premier dans la cuve du malaxeur ; y verser ensuite le ciment; aussitôt après, mettre le malaxeur en marche à vitesse lente.
- Après 30 s de malaxage introduire régulièrement le sable déjà préparé (dans le cas de mortier) pendant les 30 s suivantes. Mettre alors le malaxeur à sa vitesse rapide et continuer le malaxage pendant 30ssupplémentaires.
- Arrêter le malaxeur pendant 1 min 30 s. Pendant les 15 premières secondes, racler les bords du récipient.
- Rependre ensuite le malaxage à grande vitesse pendant 60 s.

II.4 Description des mélanges et désignation

II.4.1 Le mortier

La formulation des mortiers de ciment est réalisée sur la base de :

- ✓ Un rapport "Eau/Ciment = 0,5" et un rapport "Sable/Ciment = 1,0".
- ✓ Un dosage en ciment constant pour tous les mélanges, ave une prise d'essai de 1500 g ;
- ✓ Ajout de différents pourcentages d'eau absorbée : 0, 25, 50, 75 et 100 %.
- ✓ Substitutions du sable naturel par le sable recyclé avec différents pourcentages volumiques de : 0, 25, 50, 75 et 100 %.

Les différentes formulations du mortier de ciment envisagées dans notre travail sont données par le tableau II.1 et la prise d'essai par le tableau II.2.

Tableau II.1 : Nomenclature de différents mortiers formulés

Substitution du SR par le SN (%)	0	25	50	75	100
SR à l'état sec	M0	M25	M50	M75	M1
SR avec 100%Ab	-	-	-	-	M1-A4
SR avec 75%Ab	-	-	-	-	M1-A3
SR avec 50%Ab	-	-	-	-	M1-A2
SR avec 25%Ab	-	-	-	-	M1-A1
SR avec 0%Ab	-	-	-	-	M1-A0

Tableau II.2 : Prise d'essai des mortiers formulés

Mortier	SR (%)	C(g)	SN(g)	SR(g)	E (g)	Eabs (g)	Etot (g)
M0 (Témoin)	0	1500	1500	0	750	10.5	760.5
M25	25		1125	375		38.625	788.625
M50	50		750	750		66.75	816.75
M75	75		375	1125		94.875	844.875
M1-A4	100		0	1500		123	873
M1-A3	100					92.25	842.25
M1-A2	100					61.5	811.5
M1-A1	100					30.75	780.75
M1-A0	100					0	750

II.5 Méthodes d'essai

Les essais réalisés ont été réalisés dans le Hall de technologie de l'Université de Médéa.

II.5.1 Essais effectués sur le sable

II.5.1.1 Equivalent de sable

Le procédé de l'essai consiste à mettre la propreté du sable en évidence, l'essai a été effectué selon la norme NA456 (Figure 2.4).

Cet essai consiste à plonger un poids défini de sable dans une éprouvette normalisée remplie par une solution lavante qui permet de séparer les éléments fins argileux et en provoque la floculation ; après agitation, on laisse décanter le mélange pendant 20 minutes, ensuite on mesure la hauteur du sédiment (H_1) et du sédiment + floculant(H_2).

L'équivalent de sable est donné par la relation suivante:

$$\mathbf{ES} = \frac{\mathbf{H1}}{\mathbf{H2}}\mathbf{x100} \text{..... (1)}$$

L'équivalent de sable est d'autant plus élevé que la teneur en argile est faible.

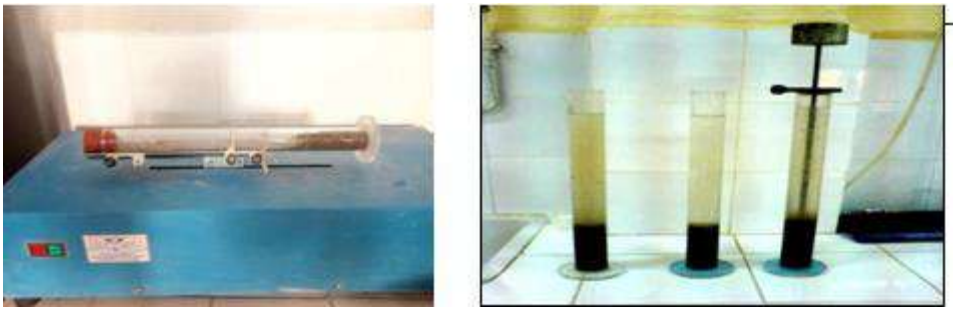


Figure II.3 : Essai d'équivalent de sable.

II.5.1.2 Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série de tamis, emboîtés les uns sur les autres dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. Le matériau étudié est placé à la partie supérieure des tamis et le classement des grains s'obtient par vibration de la colonne de tamis à l'aide d'une tamiseuse électrique (Figure 2.5). L'essai a été réalisé selon la norme actuelle EN 933-2. La présente norme a pour objet de définir les granulats et leur classification d'après les dimensions de leurs grains et de fixer la méthode à suivre pour l'analyse et le tracé de la courbe granulométrique. Cette norme s'applique aux granulats utilisés dans le bâtiment et les travaux publics, destinés notamment aux usages routiers ou à la confection des bétons de construction et dont la granularité est déterminée par tamisage.



Figure II.4 : Tamiseuse électrique

On trace la courbe granulométrique sur un graphique comportant en ordonnée le pourcentage des tamisats sous les tamis dont les mailles D sont indiquées en abscisse selon une graduation logarithmique. La forme de la courbe granulométrique représente la distribution de la dimension de la particule. Cette distribution peut être qualifiée d'uniforme si les dimensions des particules sont voisines. La courbe granulométrique est caractérisée par deux coefficients :

le coefficient d'uniformité: $\boldsymbol{C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}}}$ **……..(2)**

le coefficient de courbure: $\boldsymbol{C_C = \frac{d_{30}}{d_{30}.d_{10}}}$**…….(3)**

Avec:

- ✓ d10 : Diamètre moyen des grains correspondant à 10% passant par poids.
- ✓ d30 : Diamètre moyen des grains correspondant à 30% passant parpoids.
- ✓ d60 : Diamètre moyen des grains correspondant à 60% passant par poids.

La distribution des dimensions des particules est dite :

- ✓ bien graduée si : Cu > 10
- ✓ étalée si : 2 < Cu < 10
- ✓ uniforme ou serrée si : Cu < 2

D'une courbe granulométrique, on peut tirer les renseignements suivants :

- ✓ les limites de d à D du granulat considéré;
- ✓ la proportion d'éléments fins ;
- ✓ la continuité ou la discontinuité de la granularité.

II.5.1.3 Module de finesse

Le module de finesse ***Mf*** d'un granulat étant presque exclusivement vérifié sur les sables. Il est égal au 1/100 de la somme des refus, exprimés en pourcentages selon la norme NF P 18-304 sur les différents tamis de la série suivante: 0.16-0.315-0.63-1.25-2.5 et 5mm.

II.5.1.4 Masse volumique du sable

Il s'agit de mesurer la masse volumique absolue et apparente du sable selon la norme NFP18-545.

II.5.1.5 Taux d'absorption du sable

On détermine un coefficient d'absorption, qui est défini comme le rapport de l'augmentation de la masse de l'échantillon après imbibition par l'eau, à la masse sèche de l'échantillon selon la norme EN196-6. Cette imbibition est obtenue par immersion de l'échantillon dans l'eau pendant 24 heures à 20 °C et on mesure ensuite le taux d'absorption des sables par l'équation 4 en vérifiant son état par le moule tronconique (figure II.5) :

$$\mathbf{Ab}(\%) = \frac{M1-M2}{M2}\boldsymbol{x100} \quad \textbf{.....(4)}$$

Avec : M1 : masse de l'échantillon sec après passage a l'étuve a 105 °C.

M2 **:** masse de l'échantillon imbibé, surface sèche déterminée.



Figure II.5 : Moule tronconique

Après imbibition dans l'eau pendant 24 heures, étaler l'échantillon sur une surface plane non absorbante et le soumettre à un flux d'air chaud, tout en le remuant afin que la surface externe des grains sèche. Ce séchage doit être effectué de manière douce afin de ne pas éliminer l'eau qui pourrait être piégée à l'intérieur du granulat. Veiller également à ne pas perdre de grains de sable au cours de l'opération. Les grains sont alors libres de toutes forces d'attraction capillaire. On peut vérifier que cet état a été atteint en plaçant le matériau dans un moule tronconique, posé sur une surface plane non absorbante, et en le compactant légèrement. On vérifie que celui-ci s'écoule en démoulant (figure II.6 et II.7).



Figure II.6 : Détermination du coefficient d'absorption SR.



Figure II.7 : Détermination du coefficient d'absorption SN.

II.5.2 Essais effectués sur mortier frais

II.5.2.1 Essai au maniabilimètre

C'est une mesure qui est utile pour apprécier l'efficacité, sur la fluidité d'un mortier ou sur la réduction d'eau qu'il permet de réaliser à consistance égale. Il convient

donc de définir un mode opératoire susceptible d'apprécier cette consistance, c'est l'objet des essais définis par les normes NF P 18-452 et NF P15-37.

Dans ces essais, la consistance est caractérisée par le temps que met le mortier pour s'écouler sous l'effet d'une vibration.

a) Equipement nécessaire

L'appareil utilisé s'appelle Maniabilimètre B, il est schématisé sur la figure II.8.

Il consiste en un boîtier parallélépipédique métallique (18 cm x 9 cm x 9 cm), posé sur des supports en caoutchouc, équipe d'un vibrateur et muni d'une cloison amovible.

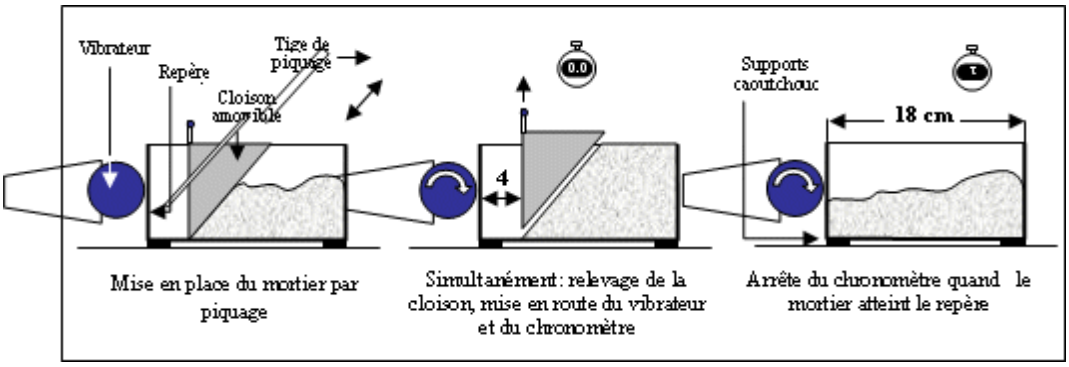


Figure II.8 : Principe de fonctionnement du maniabilimètre B.

b) Conduite de l'essai

Le mortier est introduit dans la partie la plus grande délimitée par la cloison et mis en place par piquage en 3 couches. 4 minutes après la fin du malaxage, la cloison est retirée, provoquant la mise en route du vibrateur et le déclenchement d'un chronomètre par l'opérateur. Sous l'effet de la vibration le mortier s'écoule. Le chronomètre est arrêté quand le mortier atteint un trait repère sur la paroi opposée du boîtier (Figure II.9). Le temps t mis par le mortier pour s'écouler caractérise sa consistance. Ce temps sera d'autant plus court que le mortier sera plus fluide ou plus maniable, d'où le nom de l'appareil.



Figure II.9 : Essais sur la consistance du mortier (Maniabilimètre B)

II.5.2.2 Mesure de l'affaissement

De manière à balayer une large gamme de consistance, deux types de mesures sonteffectués après soulèvement du cône : l'affaissement ou l'étalement dumortier

Il s'agit de constater l'affaissement ou l'étalement de mortier sous l'effet de son propre poids. Plus cet affaissement sera grand et plus le mortier sera réputé fluide.

a) Equipement nécessaire

L'appareillage se compose de 4 éléments : un moule tronconique sans fond, de 70 mm de haut, de 100 mm de diamètre en sa partie inférieure et de 70 mm de diamètre en sa partie supérieure. Avec, une plaque d'appui, une tige de piquage et une règle de mesure.

b) Conduite de l'essai

La plaque d'appui est légèrement humidifiée et le moule légèrement huilé y est fixé. Le mortier est introduit dans le moule en 3 couches d'égales hauteurs qui seront mises en places au moyen de la tige de la tige de piquage actionnée 6 fois par couche (la tige doit pénétrer la couche immédiatement inférieure). Après avoir arasé en roulant la tige de piquage sur le bord supérieur du moule, le démoulage s'opère en soulevant le cône en ±2 secondes et ce, le plus verticalement possible avec précaution. La mesure de l'affaissement doit être effectuée sur le point le plus haut du mortier et dans la minute qui suit le démoulage.



Figure II.10: Développement de l'essai d'affaissement pour le mortier.

II.5.2.3 L'air occlus

Pour la mesure de l'air occlus dans le mortier frais, on a utilisé la méthode dite «par pression».

a) Principe de l'essai

Comme le seul élément compressible dans le mortier frais est l'air occlus, la compression de l'air fait chuter la pression appliquée au mortier frais. Cette diminution est proportionnelle à la quantité d'air présente dans le mortier. Cet essai est effectué à l'aide d'un aéromètre à mortier de capacité de 1litre (Fig II-12**)** selon la norme française NF EN 12350-7.

b) Conduite de l'essai

On commence par remplir la chambre inférieure de l'appareil, sur trois couches égales tout en vibrant à chaque fois. On fixe ensuite la chambre supérieure, on injecte de l'eau l'aide d'un tube dans le premier robinet. Le deuxième est ouvert. Quand l'eau commence à sortir par ce dernier, on ferme les deux robinets et on applique une pression en actionnant la pompe manuelle intégrée jusqu'à ce que l'aiguille du manomètre de l'appareil indique la valeur de référence 0٪. On ouvre la valve qui sépare les volumes des deux chambres (supérieure et inférieure), le mélange est alors comprimé et le pourcentage d'air occlus est directement indiqué par l'aiguille du manomètre.



Figure II-11: L'aéromètre à mortier.

II.5.2.4. La masse volumique du mortier à l'état frais

Le principe de l'essai est de déterminer le rapport de la masse d'une quantité de mortier ramené à son volume, dans le but de déterminer sa masse volumique. La masse volumique du mortier an été mesurée selon la norme NF EN 12350-6, NA436.

Mise en place du mortier frais dans une éprouvette cylindrique de volume V et de masse (M_1) le mortier et vibré à l'aide d'une aiguille vibrante ou tige de piquage, après un arasement approprié, Puis pesé l'ensemble (l'éprouvette et le mortier), soit la masse (M_2),

$$\rho=M_2-M_1/V \text{ .....} \textbf{(6)}$$



Figure II-12 : Mesure de la masse volumique du mortier.

II.5.3 Essais réalisés sur mortier à l'état durci

Les essais de résistance sur mortier durci s'effectuent par une presse hydraulique sur des éprouvettes 4x4x16 cm^3 à la traction par flexion et à la compression conformément à la norme EN 196-1.



Figure II-13 : Essais à l'état durci**.**

a) Essais de compression

La caractérisation du comportement en compression est effectuée sur des demi-prismes d'éprouvettes prismatiques de 4x4x16 cm^3 mûries à l'eau,. Les éprouvettes étudiées sont soumises à une charge croissante jusqu'à la rupture. La résistance à la compression est le rapport entre la charge de ruptures et la section transversale de l'éprouvette obtenue après rupture en flexion seront rompus en compression comme indiqué sur la figure (II-15). Si F_C est la charge de rupture, la contrainte de rupture vaudra :

$$R_c=F_c/b^2 \quad \textbf{(7)}$$

R_c: Résistance à la compression en (MPa) ; **F_c**: Charge de rupture en (N) ; **b** : Côté de l'éprouvette est égale à 40 mm.

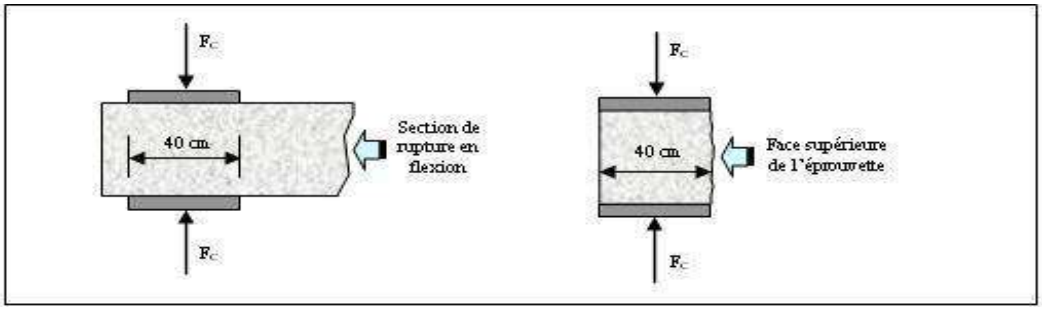


Figure II-14 : Essais de compression sur une éprouvette 4x4x16 cm^3du mortier de ciment

b) Essais de traction par flexion

Cet essai est exécuté par une machine désignée pour les tests de flexion sur les éprouvettes de béton de sable ou de mortier 4x4x16 cm^3 selon la norme EN196-1 en calculant la contrainte par l'équation 8. La valeur de la contrainte sera la moyenne de trois éprouvettes.

$$\mathbf{Rt=\frac{15F_f\ xL}{b^3}} \quad \textbf{.....(8)}$$

R_t: Résistance à la flexion (MPa) ; **F_f:** Charge de rupture de l'éprouvette en flexion (N) ;

L : Longueur qui sépare les deux appuis (mm) ; **b** : Côte de l'éprouvette est égale à 40 mm.

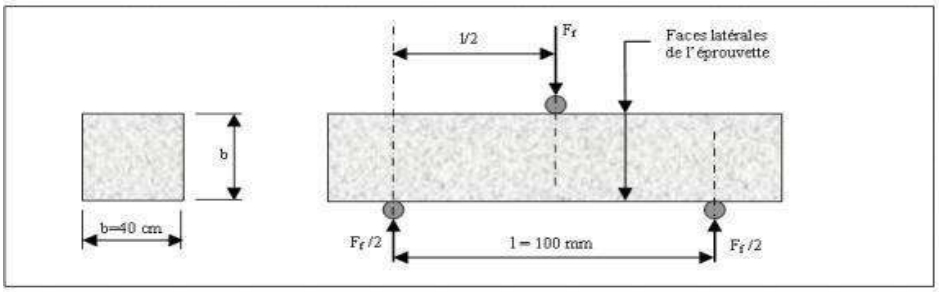


Figure II-15 : Essai de traction sur une éprouvette 4x4x16 cm^3du mortier de ciment

CHAPITRE III

RESULTATS ET INTERPRETATIONS

CHAPITRE III : RESULTATS ET INTERPRETATIONS

III 1. Introduction

Afin de mettre en évidence les caractéristiques du mortier à base de SR, notre étude est divisée en trois parties :

- ✓La première étape porte sur les essais physiques préliminaires sur le SR, à savoir : l'essai de propreté, l'analyse granulométrique, la masse volumique et la détermination du taux d'absorption.
- ✓La deuxième étape est consacrée aux mesures des caractéristiques du mortier à l'état frais (l'affaissement, la maniabilité, air occlus).
- ✓La troisième étape porte sur l'étude de la résistance de mortiers à l'état durci.
- ✓Finalement, la composition des résultats obtenus et la détermination du coefficient d'absorption.

III. 2 Etude préliminaire sur les sables

Avant de procéder aux essais sur le mortier, nous avons effectué des essais physiques sur le sable. Les résultats de ces essais sont donnés dans la partie suivante :

III. 2.1 Propreté de sable

La propreté de sable est déterminée par l'essai d'équivalent de sable conformément à la norme NA46.

Le tableau suivant récapitule les résultats de l'essai d'équivalent de sable.

Tableau III.1 : Valeurs d'équivalent de sable du SR et du SN.

Catégories de sable		SR	SN
Equivalent de sable	à vu	90,72	94,36
	à piston	84,53	89,43

- **Interprétation et discussion**

Le tableau III.1 montre que le sable SR est propre et ne contient que peu de fines, dans ce cas il est préférable de ne l'employer qu'avec des dosages en ciment assez élevés (C ≥ 350 kg/m^3).

III. 2.2 Analyse granulométrique

Le tableau III.2 représente les résultats de l'essai d'analyse granulométrique et le module de finesse de sable de recyclé et de sable roulé effectué conformément à la norme EN 933-2. La figure III.1, illustre les courbes granulométriques de ces derniers.

Tableau III.2 : Analyse granulométrique de SR et SN.

Diamètre des tamis (mm)	SR	SN
	Pourcentage de tamisâts cumulés (%)	Pourcentage de tamisâts cumulés (%)
5	100	
4	95.5	
3,15	79.5	
2	54.7	
1,25	38.1	100,00
0,63	22	99.81
0,315	21.7	92.64
0,2	8.2	79.76
0,16	5.9	20.86
0,1	3.4	11.75
0,063	1.2	4.59
Fond	0.3	1.70
Mf	**3.1**	**1.8**

- **Interprétation et discussion**

Selon les résultats de l'analyse granulométrique et les courbes tracées des sables étudiés, on a constaté que :

✓ Le SR présente un module de finesse compris entre 2,8 et 3,2. Donc, selon [Dreux 1998], il s'agit d'un sable grossier. Nous remarquons aussi que la courbe granulométrique est continue c.-à-d. que cet échantillon contient l'ensemble des grains de fraction 0/5,0 mm.

✓ En revanche, le SN présente un module de finesse vaut 1,8. Donc, selon [Dreux 1998], il s'agit d'un sable à majorité de grains fins. Ainsi, la courbe granulométrique (Figure III.1), montre que le SN contient un pourcentage très important des grains de dimensions 0,20 et 0,32 mm.

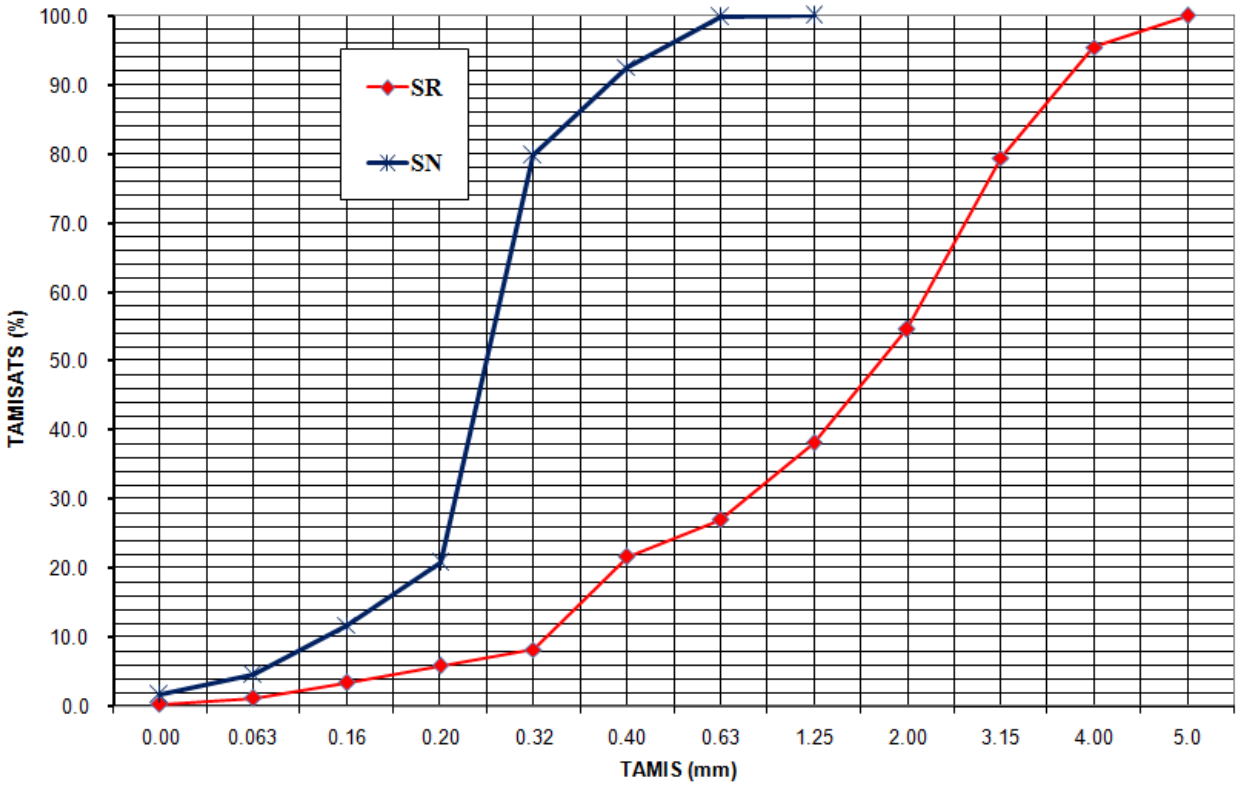


Figure III.1 : Les courbes granulométriques de SR et SN.

III. 2.3 Mesure du taux d'absorption

Après imbibition dans l'eau pendant 24 heures, étaler l'échantillon sur une surface plane non absorbante et le soumettre à un flux d'air chaud, tout en le remuant afin que la surface externe des grains sèche. Ce séchage doit être effectué de manière douce afin de ne pas éliminer l'eau qui pourrait être piégée à l'intérieur du granulat. On Veille également à ne pas perdre de grains de sable au cours de cette opération jusqu'on obtient l'état SSD.

Les grains sont alors libres de toutes forces d'attraction capillaire. On peut vérifier que cet état a été atteint en pla1ant le matériau dans un moule tronconique, posé sur une surface plane non absorbante, et en le compactant légèrement. On vérifie que celui-ci s'écoule en démoulant.

Le tableau III.3 présente les résultats de l'essai de mesure du coefficient d'absorption de SR et SN conformément à la norme EN 1097-6.

Tableau III.3 : Coefficient d'absorption de SR et SN.

Catégories de sable	SR	SN
Masse saturée (g)	1000	1000
Masse sèche (g)	1082	1003
Coefficient d'absorption (%)	**8.2**	**0.7**

- **Interprétation et discussion**

Le tableau III.3 montre une grande différence entre les deux sables : recyclé et naturel roulé. Ce résultat est en accord avec la littérature où le sable recyclé présente toujours un coefficient d'absorption très important, entre 6 et 14 % et même plus [Debieb et al. 2009 ; Martinez et al. 2016 ; Katz 2017 ; Chu et al, 2020 ; Erandi et al, 2020 ; Kirthika et al, 2020 ; Cuenca et al, 2020]. En effet, c'est l'objectif principal de notre étude : c'est de savoir pourquoi ce taux est assez élevé ? Et est-ce que elle est réellement absorbée cette quantité d'eau lors de malaxage du béton et du mortier de ciment ? Et à quel point la méthode de

calcul selon la norme actuelle est applicable au SR ? Afin qu'on puisse répondre à ces questions, on a effectué les essais sur le mortier à l'état frais et durci qui seront présentés dans la partie suivante.

III. 3 Mesure des propriétés du mortier à l'état frais

L'ouvrabilité ou la maniabilité du mortier peut s'apprécier de diverses façons et en particulier par la mesure de son affaissement ou son temps d'écoulement. En ce qui concerne le premier test, l'ouvrabilité est caractérisée par la mesure de l'affaissement ou bien de l'étalement du mortier sous l'effet de seulement de son poids propre. En ce qui concerne le temps d'écoulement, l'ouvrabilité est caractérisée par le temps que met le mortier à s'écouler sous l'effet de son poids propre pour le cône d'écoulement ou sous l'effet d'une vibration pour la maniabilimètre.

III.3 .1 Mesure de l'affaissement

La mesure de l'affaissement au mini-cône du mortier est un moyen d'appréciation et de contrôle de la capacité à se mettre en place sous seulement son poids propre. Généralement, le diamètre de la galette de mortier formée sur la plaque après soulèvement du moule conique est mesuré : c'est ce qu'on appelle l'étalement. S'il s'agit d'un mortier ferme, on mesure alors l'affaissement au niveau du point le plus haut. Les résultats obtenus sont représentés sur la figure III.2.

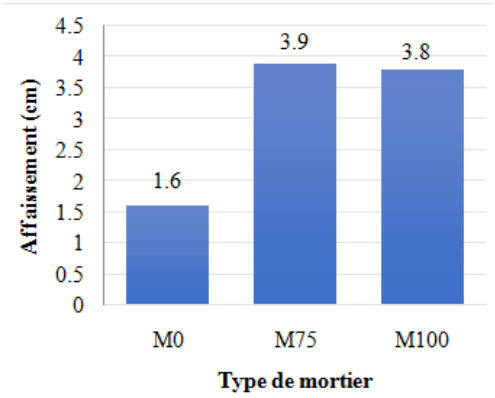


Figure III.2 : Affaissement du mortier au mini-cône

- **Interprétation et discussion**

D'après la figure III.2, montre que l'affaissement au mini-cône augmente avec l'accroissement du taux de substitution de SR dans le mortier. L'allure de la variation confirme que les propriétés du mortier frais sont considérablement influencées par les granulats. Autrement dit, la densité, la granulométrie, la forme et la texture de la surface affectent également l'ouvrabilité de mortiers. Cependant, ce résultat semble contradictoire avec la littérature où Plusieurs chercheurs ont montré que, pour une teneur en eau identique, un béton recyclé plus ferme qu'un béton avec SN, et ceci plus particulièrement quand le pourcentage de remplacement de granulats excède 50% [Topç 2004]. Cette différence est très certainement due à la plus grande porosité des granulats recyclés par rapport aux granulats naturels. En parallèle et afin de pallier ce problème, différentes études ont été réalisées en faisant varier les conditions de préparation des granulats, et il en est ressorti qu'un ajout d'eau correspondant à l'absorption d'eau des granulats testés améliore significativement l'ouvrabilité du béton frais [Rao 2005]. Donc, dans notre cas, l'eau ajoutée qui est équivalente à l'eau absorbée par le SR améliore l'ouvrabilité et provoque un affaissement plus important qu'avec le SN. Ce qui peut expliquer le résultat obtenu. Bien évident, les SR absorbent généralement plus d'eau que le SN en raison de la présence de vieux mortier collé, ce qui affecte considérablement l'ouvrabilité du béton [Tam et al. 2018].

III.3.2 Mesure du temps d'écoulement

Les résultats obtenus de la mesure du temps d'écoulement au maniabilimètre B sont illustrés sur la figure III.3 :

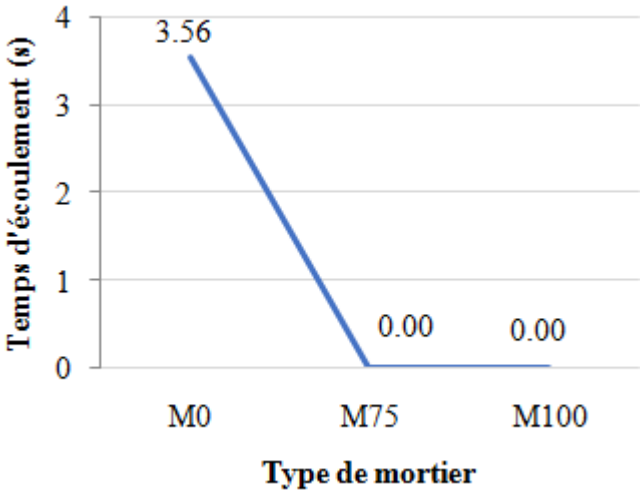


Figure III.3 : Temps d'écoulement de différents mortiers en fonction du pourcentage du SR.

- **Interprétation et discussion**

Les résultats du temps d'écoulement au maniabilimètre confirment les résultats ainsi obtenus pour l'affaissement. Donc, il est clair que l'ajout de SR améliore l'ouvrabilité tout en ajoutant une quantité d'eau correspondant à l'absorption du sable.

III. 3.3 Mesure d l'air occlus

Dans cette partie, on va procéder à une comparaison entre deux types de mortier malaxés de même manière et dans les mêmes conditions avec E/C = 0.5 et S/C = 1. L'un avec le SR et l'autre avec SN. Il est à noter qu'on a pris en considération l'absorption des sables utilisés. La figure III.4 illustre les résultats obtenus :

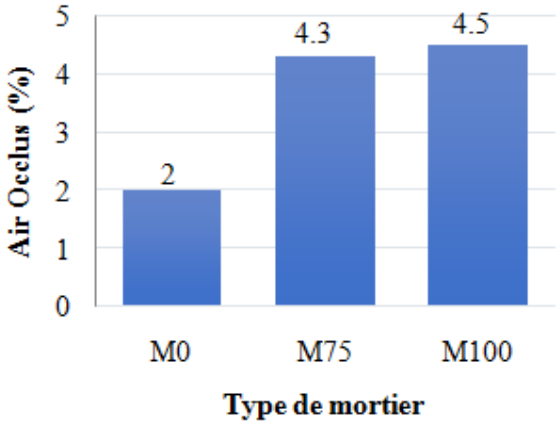


Figure III.4 : Comparaison de l'ouvrabilité du mortier avec SR à celle du mortier avec SN.

- **Interprétation et discussion**

D'après les résultats obtenus dans la figure III.4, on remarque que le volume d'air occlus de mortier avec SR est nettement supérieur qu'avec SN. Ce résultat est en accord avec la littérature où [Cléo 2014] a trouvé que l'air occlus est supérieure (entre 4 à 5%) dans le cas des bétons recyclés avec un taux de remplacement de 100%. Ceci est dû aux caractéristiques physiques du SR qui présente, selon [Kirt et al, 2020], une porosité plus grande.

IV. 4 Mesure des propriétés du mortier à l'état durci

Malheureusement, cette partie qui consiste à mesurer la résistance à la traction et à la compression du mortier à base du SR n'a été pas faite à cause de fermeture du laboratoire du fait du risque épidémique Covid-19. A cet effet, on n'a pas pu atteindre notre objectif principal qui consiste à déterminer le taux d'absorption réel du SR.

CONCLUSION GENERALE

Ce travail présente une continuité des travaux de recherche la valorisation des granulats recyclés et leur utilisation dans le domaine du génie civil.

Les résultats d'essai montrent que le sable recyclé présente un taux d'absorption très élevé, qui vaut 8.2%. Il est dix fois plus grandes que de sable naturel, qui vaut 0.7%.

Sur la base des conditions expérimentales et des résultats obtenus à partir de cette étude, on peut tirer les conclusions suivantes :

- le SR absorbe plus d'eau que le SN en raison de la présence de vieux mortier collé, ce qui affecte considérablement l'ouvrabilité du béton.

- l'affaissement du mortier au mini-cône augmente avec l'accroissement du taux de substitution de SR dans le mortier. L'allure de la variation confirme que les propriétés du mortier frais sont considérablement influencées par les granulats.

- Cependant, l'eau ajoutée qui est équivalente à l'eau absorbée par le SR améliore l'ouvrabilité et provoque un affaissement plus important qu'avec le SN.

En effet, à cause de l'interruption des laboratoires du fait du risque pandémique Covid-19, on n'a pas pu répondre à la question posée au début de notre travail, concernant l'efficacité de l'utilisation de la méthode normalisée pour mesurer le coefficient d'absorption du sable recyclé. Ainsi, la détermination de la valeur exacte du taux d'absorption en utilisant une méthode adéquate à ce type du sable.

Cependant, une étude complémentaire sur le béton est vivement recommandée, qui sera d'un grand intérêt pour la valorisation de granulats recyclés et le développement du béton en tant que matériau essentiel et important dans la réalisation des ouvrages d'art et de construction.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[Cléo, 2014] LANEYRIE, Cléo. Valorisation des déchets de chantiers du BTP: comportement à haute température des bétons des granulats recyclés. 2014. PhD Thesis.

[Kirt et al. 2020] KIRTHIKA, S. K.; SINGH, S. K. Durability studies on recycled fine aggregate concrete. Construction and Building Materials, 2020, 250: 118850.

[UEPG, 2006] Rapport annuel de l'Union Européenne des Producteurs de Granulats UEPG, 2006.

[Gnan et Raj, 2013] GNANASARAVANAN, S.; RAJKUMAR, P. Characterization of minerals in natural and manufactured sand in Cauvery River belt, Tamilnadu, India. Infrared Physics & Technology, 2013, 58: 21-31.

[Zegh et al.2012] ZEGHICHI, Leila; BENGHAZI, Zeid; BAALI, Laid. Comparative study of self-compacting concrete with manufactured and dune sand. Journal of Civil Engineering and Architecture, 2012, 6.10: 1429.

[Bouz, 2013] BOUZIANI, Tayeb. Assessment of fresh properties and compressive strength of self-compacting concrete made with different sand types by mixture design modelling approach. Construction and Building Materials, 2013, 49: 308-314.

[Sing et al.2018] KIRTHIKA, S. K.; SINGH, S. K.; SURYA, M. Durability studies on basalt fiber reinforced concrete. Indian Concr. J.(ICJ), 2018, 92.4: 45-55.

[Kirt et al.2019] KIRTHIKA, S. K.; SURYA, M.; SINGH, S. K. Effect of clay in alternative fine aggregates on performance of concrete. Construction and Building Materials, 2019, 228: 116811.

[Sing et al. 2017] SINGH, Sarbjeet, et al. Experimental investigation of sustainable concrete made with granite industry by-product. Journal of Materials in Civil Engineering, 2017, 29.6: 04017017.

[Safi, 2017] SAFIDDINE, Salim, DEBIEB, Farid, KADRI, El-Hadj, et al. Effect of crushed sand and limestone crushed sand dust on the rheology of cement mortar. Applied Rheology, 2017, vol. 27, no 1, p. 12-20.

[Raj,2014] KUMAR, R. Senthil; RAJKUMAR, P. Characterization of minerals in air dust particles in the state of Tamilnadu, India through FTIR, XRD and SEM analyses. Infrared Physics & Technology, 2014, 67: 30-41.

[Agga et Sid, 2014] AGGARWAL, Yogesh; SIDDIQUE, Rafat. Microstructure and properties of concrete using bottom ash and waste foundry sand as partial replacement of fine aggregates. Construction and Building Materials, 2014, 54: 210-223.

[Han, 1986] HANSEN, Torben C. Recycled aggregates and recycled aggregate concrete second state-of-the-art report developments 1945–1985. Materials and structures, 1986, 19.3: 201-246.

[Evan et Brito, 2014] EVANGELISTA, Luis; DE BRITO, J. M. C. L. Concrete with fine recycled aggregates: a review. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2014, 18.2: 129-172.

[Khatib, 2005] KHATIB, Jamal M. Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate. Cement and concrete research, 2005, 35.4: 763-769.

[Soly, 2005] SOLYMAN, Mahmoud. Classification of recycled sands and their applications as fine aggregates for concrete and bituminous mixtures. 2005. PhD Thesis.

[Tam, 2008] TAM, Vivian WY. Economic comparison of concrete recycling: A case study approach. Resources, conservation and recycling, 2008, 52.5: 821-828.

[UNICEM, 2009] statistiques réalisée par l'Union nationale des industries de carrières et matériaux de construction.

[Rao,2007] RAO, Akash; JHA, Kumar N.; MISRA, Sudhir. Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete. Resources, conservation and Recycling, 2007, 50.1: 71-81.

[Kumar et al. 2017] KUMAR, Ravi; GURRAM, Subash Chandra Bose; MINOCHA, Ashwani Kumar. Influence of recycled fine aggregate on microstructure and hardened properties of concrete. Magazine of Concrete Research, 2017, 69.24: 1288-1295.

[Kou et Poon, 2013] SERIFOU, Mamery. Béton à base de recyclats: influence du type de recyclats et rôle de la formulation. 2013. PhD Thesis.

[Alho, 2009] A M. Alhozaimy, Effect Of Absorption Of Limestone Aggregates On Strength And Slump Loss Of Concrete » Cement & Concrete Composites 31 (2009) 470–473.

[Jose, 2002] GÓMEZ SOBERÓN, José Manuel Vicente. Shrinkage of concrete with replacement of aggregate with recycled concrete aggregate. In: SP-209: ACI Fifth Int Conf on Innovation in Design with Emphasis on Seismic, Wind and Environmental Loading, Quality Control, and Innovation in Materials/Hot Weather Concreting. VM Malhotra, 2002.

[Katz, 2003] KATZ, Amnon. Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete. Cement and concrete research, 2003, 33.5: 703-711.

[Mind, 2003] Mindess S, Young J, Darwin D. Concrete. New Jersey: Prentice-Hall Inc 2003. 644 Pp.

[Ped,2014] PEDRO, D.; DE BRITO, J.; EVANGELISTA, Luis. Influence of the use of recycled concrete aggregates from different sources on structural concrete. Construction and Building Materials, 2014, 71: 141-151.

[Nen, 14] NENO, Catarina; BRITO, Jorge de; VEIGA, Rosário. Using fine recycled concrete aggregate for mortar production. Materials research, 2014, 17.1: 168-177.

[Padm, 2009] A.KPADMINI, A. K.; RAMAMURTHY, K.; MATHEWS, M. S. Influence of parent concrete on the properties of recycled aggregate concrete. Construction and Building Materials, 2009, 23.2: 829-836.

[Gent, 2013] P. Gentilini, V. Delmotte, O. Marzouk, Y. Descantes. Mesure de l'absorptiond'eau de sables de béton concassé avec fines. Clôture de l'opération AGREGA Ifsttar (centre de Nantes) - Mardi 10 décembre 2013.

[Dreux, 1998] DREUX, Georges; FESTA, Jean. Nouveau guide du béton et de ses constituants. Eyrolles, 1998.

[Teg, 2012] TEGGUER, A. Djerbi. Determining the water absorption of recycled aggregates utilizing hydrostatic weighing approach. *Construction and Building Materials*, 2012, vol. 27, no 1, p. 112-116.

[DJE,2012] TEGGUER, A. Djerbi. Determining the water absorption of recycled aggregates utilizing hydrostatic weighing approach. Construction and Building Materials, 2012, 27.1: 112-116.

[Zhao, 2014] ZHAO, Zengfeng. Re-use of fine recycled concrete aggregates for the manufacture of mortars. 2014. PhD Thesis. Université Lille 1, Lille, France.

[Per et al. 2012] LOPES-LIMA, Manuel, et al. Ionic regulation and shell mineralization in the bivalve Anodonta cygnea (swan mussel) following heavy-metal exposure. Canadian journal of zoology, 2012, 90.2: 267-283.

[Boud et al. 2016] BOUDALI, S., et al. Performance of self-compacting concrete incorporating recycled concrete fines and aggregate exposed to sulphate attack. Construction and Building Materials, 2016, 124: 705-713.

[Ext et al.2014] ETXEBERRIA, Miren; VEGAS, Iñigo. Effect of fine ceramic recycled aggregate (RA) and mixed fine RA on hardened properties of concrete. Magazine of concrete research, 2015, 67.12: 645-655.

[Pan, 2017] PAN, Ganghua, ZHAN, Mimi, FU, Minghua, et al. Effect of CO2 curing on demolition recycled fine aggregates enhanced by calcium hydroxide pre-soaking. Construction and Building Materials, 2017, vol. 154, p. 810-818.

[Li et al. 2017] LI, L. G., et al. Effects of packing on compressive behaviour of recycled aggregate concrete. Construction and Building Materials, 2017, 157: 757-777.

[Baker, 1973] BAKER, S. D.; SCHOLER, C. F. Effect of variations in coarse-aggregate gradation on properties of Portland cement concrete. Highway Research Record, 1973, 441.

[Hew, 1998] LEA, F. M. Lea's chemistry of cement and concrete 4th (edn). Hewlett PC. 1998.

[Han, 1992] HANSEN, Torben C. (ed.). Recycling of demolished concrete and masonry. CRC Press, 1992.

[Hadj, 1998] HADJIEVA-ZAHARIEVA, Roumiana. Durabilité des bétons à base de granulats recyclés. 1998. PhD Thesis. Artois.

[Queb, 1996] , Mirian. Caractérisation des granulats recyclés, étude de la composition et du comportement de bétons incluant ces granulats. 1996. PhD Thesis. Artois.

[Deb, 1999] DEBIEB, F. Valorisation des déchets de briques et béton de démolition comme agrégats de béton. Thèse de Magistère de l'Université de Blida, Algérie, 1999.

[Topc et Seng, 2004] TopcuI.B.AndSengel S ' Properties Of Concrete Produced With Waste Concrete Aggregate' Cement And Concrete Research,34,2004,Pp.1307-1312.

[Mart et al, 2013] MARTÍNEZ, Iván, et al. A comparative analysis of the properties of recycled and natural aggregate in masonry mortars. Construction and Building Materials, 2013, 49: 384-392.

[Katz et Kul, 2017] KATZ, Amnon; KULISCH, Daniele. Performance of mortars containing recycled fine aggregate from construction and demolition waste. Materials and Structures, 2017, 50.4: 199.

[Sant et Mino,2018] KUMAR, G. Santha; MINOCHA, A. K. Studies on thermo-chemical treatment of recycled concrete fine aggregates for use in concrete. Journal of Material Cycles and Waste Ma nagement, 2018, 20.1: 469-480.

[Lee, 2009] La densité des idées: un modèle d'analyse du discours pertinent pour le diagnostic précoce de la maladie d'Alzheimer.

[Mart et al. 2016] MARTÍNEZ, Iván, et al. Analysis of the properties of masonry mortars made with recycled fine aggregates for use as a new building material in Cuba. Journal of Construction, 2020, 15.1: 9-21.

[Aci, 1985] AciCommittee 116, “Cement And ConcreteTerminology,” Publication Sp19 (85), Detroit, Michigan, 1985.

[Vyn et Rous, 1994] Vyncke J. and Rousseau EVYNCKE, J. Recycling of Construction and Demolition Waste in Belginum. Demolition and reuse of concrete and masonry, 1994, 57-69.

[RILEM, 1994] Recommandation Pour La Démolition Et Le Recyclage Du Béton Et De Maconeries Specifications For Concrete With Recycled Aggregates 'Materials And Structures,27,1994,Pp557-559.

[McG et al.2017] McGinnis, M.J., Davis, M., de la Rosa, A., Weldon, B.D., Kurama, Y.C., 2017. Strength and stiffness of1444 concrete with recycled concrete aggregates. Constr. Build. Mater. 154, 258–269.

[Ana, 2014] FALEK, Kamel. Etude du comportement mécanique et rhéologique d'un béton à base de granulats recyclés. 2017. PhD Thesis.

[Carro et al.2015] RICA, Hector Cuadrado. Étude du comportement de bétons de coproduits coquilliers pour une utilisation en récifs artificiels. 2016. PhD Thesis.

[Park et al. 2012] PARK, Seonhye, et al. Electrochemical investigation of strontium doping effect on high performance Pr1− xSrxCoO3− δ (x= 0.1, 0.3, 0.5, and 0.7) cathode for intermediate-temperature solid oxide fuel cells. Journal of Power Sources, 2012, 210: 172-177.

[Evan et al. 2013] EVANGELISTA, Brieuc. Études expérimentales et modélisation du phénomène d'auto-échauffement de bois torréfié en présence de dioxygène: application au refroidissement de plaquettes de bois torréfiées. 2017. PhD Thesis.

[Yam et Lih, 2017] YAMEI, Huang; LIHUA, Wang. Effect of particle shape of limestone manufactured sand and natural sand on concrete. Procedia engineering, 2017, 210: 87-92.

[Bour,2004] Granulats Recyclés De Substitution Pour Bétons Hydrauliques, Thèse De Magister, Université De Constantine, 2004.

[Ncsa, 1976] National Crushed Stone Association, "Stone Sand For Portland Cement," Concrete Materials, Pp. 12, February, 1976.

[Wills, 1967] Wills, M. H. Jr., "How Aggregate Particle Shape Influences Concrete Mixing Water Requirement And Strength," Journal Of Materials, Vol 2, N 4, Pp 101-111, 1967.

[Nich, 1982] NICHOLS, Frank P., et al. Manufactured sand and crushed stone in Portland cement concrete. Concrete International, 1982, 4.8: 56-63.

[Derki, 2019] DERKI, Alhamza. Experimental investigations on performance of recycled concrete aggregates-containing concrete exposed to heating-cooling cycles. 2019, A thesis submitted to the graduate school of applied sciences of Near east university

[Mat, 1966] MATHER, Bryant. Shape, surface texture, and coatings. In : Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials. ASTM International, 1966.

[ICAR,2001] AHN Nam-Shik and FOWLER David W.: An experimental study on the guidelines for using higher contents of aggregate micro fines in Portland cement concrete. Research Report ICAR 102-1F/ Research Project Number ICAR 102. 2001.

[Dola, 1983] LUDMILA, DolarMantuani. Handbook of concrete aggregates. 1983.

[Celik et Marar 1996] CELIK, Tahir; MARAR, Khaled. Effects of crushed stone dust on some properties of concrete. Cement and Concrete research, 1996, 26.7: 1121-1130.

[Cortes et al. 2008] CORTES, D. D., et al. Rheological and mechanical properties of mortars prepared with natural and manufactured sands. Cement and Concrete Research, 2008, 38.10: 1142-1147.

[Gon et al. 2007] COATES, C. W., et al. Investigating Applications for the 3D Design Information Verification System at Department of Energy Facilities in the United States. ORNL/TM-2007/20, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, 2007.

[Cord et al.2016] CORDEIRO, Guilherme Chagas; DE ALVARENGA, Laura Monteiro Soares Crespo; ROCHA, Camila Aparecida Abelha. Rheological and mechanical properties of concrete containing crushed granite fine aggregate. Construction and Building Materials, 2016, 111: 766-773.

[Rao, 2005] RAO, Akash. Experimental investigation on use of recycled aggregates in mortar and concrete. Civil Engineering, Department of Engineering, Indian Institute of Technology, Kanpur, India, 2005.

TAM, Vivian WY, SOOMRO, Mahfooz, et EVANGELISTA, Ana Catarina Jorge. A review of recycled aggregate in concrete applications (2000–2017). Construction and Building Materials, 2018, vol. 172, p. 272-292.

[Tam et al. 2018] TAM, Vivian WY, SOOMRO, Mahfooz, et EVANGELISTA, Ana Catarina Jorge. A review of recycled aggregate in concrete applications (2000–2017). Construction and Building Materials, 2018, vol. 172, p. 272-292.

[Cartuxo et al. 2015] CARTUXO, F., DE BRITO, Jorge, EVANGELISTA, Luis, et al. Rheological behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates–Influence of the superplasticizer. Construction and Building Materials, 2015, vol. 89, p. 36-47.

[Gonz et al.2017] GONZÁLEZ-TABOADA, Iris, et al. Tools for the study of self-compacting recycled concrete fresh behaviour: Workability and rheology. Journal of Cleaner Production, 2017, 156: 1-18.

[Fan et al.2015] FAN, Cheng-Chih, et al. The effects of different fine recycled concrete aggregates on the properties of mortar. Materials, 2015, 8.5: 2658-2672.

[Deb et al, 2008] DEBIEB, Farid et KENAI, Said. The use of coarse and fine crushed bricks as aggregate in concrete. Construction and building materials, 2008, vol. 22, no 5, p. 886-893.

[Kadri et al.2009] KADRI, E.-H.; AGGOUN, S.; DE SCHUTTER, Geert. Interaction between C3A, silica fume and naphthalene sulphonatesuperplasticiser in high performance concrete. Construction and Building Materials, 2009, 23.10: 3124-3128.

[Yap et al.2011] YAPRAK, Hasbi, et al. Effects of the fine recycled concrete aggregates on the concrete properties. International Journal of Physical Sciences, 2011, 6.10: 2455-2461.

[Alves, 2014] ALVES, A. V., et al. Mechanical properties of structural concrete with fine recycled ceramic aggregates. Construction and Building Materials, 2014, 64: 103-113.

[Amin, 2016] AMIN, A. F. M. S., et al. Residual cementing property in recycled fines and coarse aggregates: Occurrence and quantification. Journal of Materials in Civil Engineering, 2016, 28.4: 04015174.

[Butl, 2013] BUTLER, Liam; WEST, Jeffrey S.; TIGHE, Susan L. Effect of recycled concrete coarse aggregate from multiple sources on the hardened properties of concrete with equivalent compressive strength. Construction and Building Materials, 2013, 47: 1292-1301.

[Duan, 2014] DUAN, Zhen Hua; POON, Chi Sun. Properties of recycled aggregate concrete made with recycled aggregates with different amounts of old adhered mortars. Materials & Design, 2014, 58: 19-29.

[Paul, 2014] FOLINO, Paula; XARGAY, Hernán. Recycled aggregate concrete–Mechanical behavior under uniaxial and triaxial compression. Construction and Building Materials, 2014, 56: 21-31.

[Etxe,2007] DUAN, Zhen Hua; POON, Chi Sun. Properties of recycled aggregate concrete made with recycled aggregates with different amounts of old adhered mortars. Materials & Design, 2014, 58: 19-29.

[Evan 2007] EVANGELISTA, Luis; DE BRITO, Jorge. Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates. Cement and concrete composites, 2007, 29.5: 397-401.

[Gome, 2002] GÓMEZ-SOBERÓN, José MV. Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate: An experimental study. Cement and concrete research, 2002, 32.8: 1301-1311.

[Topç, 2004] TOPCU, IlkerBekir; ŞENGEL, Selim. Properties of concretes produced with waste concrete aggregate. Cement and concrete research, 2004, 34.8: 1307-1312.

[Ajd et Kli,2002] AJDUKIEWICZ, Andrzej; KLISZCZEWICZ, Alina. Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC. Cement and concrete composites, 2002, 24.2: 269-279.

[Levy et Paulo, 2004] LEVY, Salomon M.; HELENE, Paulo. Durability of recycled aggregates concrete: a safe way to sustainable development. Cement and concrete research, 2004, 34.11: 1975-1980.

[Otsuki et al. 2003] OTSUKI, Nobuaki, MIYAZATO, Shin-ichi, et YODSUDJAI, Wanchai. Influence of recycled aggregate on interfacial transition zone, strength, chloride penetration and carbonation of concrete. Journal of materials in civil engineering, 2003, vol. 15, no 5, p. 443-451.

[Gokce et al. 2004] GOKCE, A., et al. Freezing and thawing resistance of air-entrained concrete incorporating recycled coarse aggregate: The role of air content in demolished concrete. Cement and Concrete Research, 2004, 34.5: 799-806.

[Sal et Bur,1998] SALEM, Rohi M. et BURDETTE, Edwin G. Role of chemical and mineral admixtures on the physical properties and frost-resistance of recycled aggre-gate concrete. Materials Journal, 1998, vol. 95, no 5, p. 558-563.

[Zah et al. 2004] ZAHARIEVA, Roumiana, BUYLE-BODIN, Francois, et WIRQUIN, Eric. Frost resistance of recycled aggregate concrete. Cement and Concrete Research, 2004, vol. 34, no 10, p. 1927-1932.

[Dreux 1998] DREUX, Georges et FESTA, Jean. Nouveau guide du béton et de ses constituants. Eyrolles, 1998.

[Deb et al, 2008] DEBIEB, Farid, COURARD, Luc, KENAI, Said, et al. Roller compacted concrete with contaminated recycled aggregates. Construction and Building Materials, 2009, vol. 23, no 11, p. 3382-3387.

[Chu et al. 2020] CHU, Hongyan, et al. Effect of Graphene Oxide on Mechanical Properties and Durability of Ultra-High-Performance Concrete Prepared from Recycled Sand. Nanomaterials, 2020, 10.9: 1718.

[Cuen et al. 2020] CUENCA-MOYANO, Gloria M., et al. Effects of water to cement ratio, recycled fine aggregate and air entraining/plasticizer admixture on masonry mortar properties. Construction and Building Materials, 2020, 230: 116929.

[Erandi et al. 2020] ARIYACHANDRA, Erandi, et al. Effect of NO2 sequestered recycled concrete aggregate (NRCA) on mechanical and durability performance of concrete. Cement and Concrete Research, 2020, 137: 106210.

[Tam et al. 2018] TAM, Vivian WY, SOOMRO, Mahfooz, et EVANGELISTA, Ana Catarina Jorge. A review of recycled aggregate in concrete applications (2000–2017). Construction and Building Materials, 2018, vol. 172, p. 272-292.

[ASTM C 109-95] Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars, American Society for Testing and Materials, Annual Book, 1998.

[ASTM C 117-95] Standard Test Method for Materials Finer than 75mm (No.200) Sieve in Mineral Aggregates by Washing," American Society for Testing and Materials, Annual Book, 1998.

[ASTM C 117-95] Standard Test Method for Materials Finer than 75μm (No. 200) Sieve in Mineral Aggregates by Washing," American Society for Testing and Materials, Annual Book, 1998.

[ASTM C 127] Standard Test for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate," ASTM International

[ASTM C 128] ASTM C 128-01. "Standard Test for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate," ASTM International.

[ASTM C 128-97] Standard Test Method for Specific Gravity and Absorption of Fine Aggregate," American Society for Testing and Materials, Annual Book, 1998.

[ASTM C192] ASTM C192. Annual book of ASTM standards, vol. 4.02; 1996. p. 111–8.

[EN 1097-6, 2013] Tests for mechanical and physical properties of aggregates. Determination of particle density and water absorption.

[NF P 18-555] Mesures des masses volumiques, de la porosité, du coefficient d'absorption et de la teneur en eau des gravillons et cailloux.

ANNEXES

Annexe A : Fiche technique du ciment



ALGÉRIE

LAFARGE
Construire
des villes meilleures™



Ciment portland au Calcaire

Matine Ciment gris pour bétons de haute-performance destiné à la construction des Ouvrages d'Art, infrastructure et superstructure pour bâtiments

Matine

Matine est certifié, conforme à la norme Algérienne (NA442 – 2013) et Européenne (EN 197-1)

AVANTAGES PRODUIT

- Une résistance initiale élevée pour vos ouvrages nécessitants un décoffrage rapide
- Favorise la maniabilité du béton et le maintien de sa rhéologie
- Une Classe Vraie qui offre une haute performance au béton.
- Meilleure durabilité du béton.

Annexe A : Fiche technique du ciment

APPLICATIONS RECOMMANDÉES

- Construction des Ouvrages d'Art, infrastructure et superstructure pour bâtiments
- Préfabrication légère
- Béton de haute performance



FORMULATION CONSEILLÉE

	Ciment	Sable (sec)	Gravillons (sec)		Eau (litres)
		0/5	8/15mm	15/25mm	
Dosage pour béton C25/30	X 1 (50kg)	+ X7	+ X5	+ X4	+ 25 L

Remaque: un bidon = 10 Litres

CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES

• Analyses chimiques

	Valeur
Perte au feu (%) (NA5042)	.0±2
Teneur en sulfates (SO3) (%)	2.5±0.5
Teneur en oxyde de magnésium MgO (%)	1.7±0.5
Teneur en Chlorures(NA5042) (%)	0.02-0.05

• Temps de prise à 20° (NA 230)

	Valeur
Début de prise (min)	150±30
Fin de prise (min)	230±50

• Composition minéralogique du Clinker (Bogue)

	Valeur
C3S (%)	60±3
C3A (%)	7.5±1

• Résistance à la compression

	Valeur
2 jours (MPa)	≥ 10.0
28 jours (MPa)	≥ 42.5

• Propriétés physiques

	Valeur
Consistance Normale (%)	26.5±2.0
Finesse suivant la méthode de Blaine (cm^2/g) (NA231)	3 700 - 5 200
Retrait à 28 jours (µm/m)	< 1 000
Expansion (mm)	≤ 3.0

Conditionnement: Sac et vrac

CONSIGNES DE SÉCURITÉ

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

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



A member of LafargeHolcim

LAFARGE ALGÉRIE
Bureau n°02, 16ème étage, tour Geneva,
les Pins maritimes, Mohammadia, Alger.
tél: + 213 (0) 21 98 54 54
Fax: + 213 (0) 23 92 42 94
www.lafargealgerie.com
dz.satisfaction-clients@lafargeholcim.com
Tél: 021 98 55 55

LAFARGE لافارج