



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE AMAR TELIDJI- LAGHOUAT



FACULTE DE GENIE CIVIL ET D'ARCHITECTURE
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

MEMOIRE DE MASTER

Présenté par : TEI Meriem

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Génie Civil

Option : Matériaux en Génie Civil

THEME

***ETUDE DE L'INFLUENCE DE LA METHODE DE MESURE DU
COEFFICIENT D'ABSORPTION DU SABLE RECYCLE ET DU SABLE
CONCASSE SUR LES PROPRIETES RHEOLOGIQUES ET
MECANIQUES DES MORTIERS***

Jurys de soutenance

Nom et Prénom	Grade	Qualité
Mr. GUEDDOUDA Mohamed Kamal	Professeur	Président
Mr. FERHAT Ahmida	Maître Assistant A	Examineur
Mr. SOUALHI Hamza	Maîtres de conférences A	Rapporteur
Mr. BELAIDI Akram Salah Eddine	Professeur	Co-Rapporteur

Promotion : Septembre 2024

Résumé

Notre objectif de ce travail est de mesurer l'effet du degré d'absorption du sable recyclé (SR) et du sable concassé (SC) sur les propriétés rhéologiques et mécaniques du mortier de ciment. Nous avons choisi un sable concassé et les déchets de béton et les déchets de briques comme sable recyclé pour tester leurs propriétés et leur utilisation potentielle dans le domaine de la construction et du génie civil, dont le but de contribuer à la préservation des ressources naturelles, à la réduction des déchets renouvelables et à réduire l'impact environnemental résultant de l'élimination irresponsable des déchets de construction. La partie rhéologique consiste à étudier l'influence de la variation du taux d'absorption d'un (SR) et (SC) sur le comportement du mortier et ses propriétés à l'états frais (l'affaissement, le temps d'écoulement, la viscosité plastique et le seuil de cisaillement).

Mot clé : *Recyclage, Sable concassé, Absorption, Fines, Rhéologie, Mortier.*

المخلص

هدفنا من هذا العمل هو قياس تأثير درجة امتصاص الرمل المعاد تدويره والرمل المسحوق على الخواص الريولوجية والميكانيكية لملاط الاسمنت. لقد اخترنا الرمل المسحوق و مخلفات الخرسانة ومخلفات الطوب كرمل معاد تدويره لاختبار خصائصه وإمكانية استخدامها في مجال البناء والهندسة المدنية وذلك بهدف المساهمة في الحفاظ على الموارد الطبيعية وتقليل النفايات المتجددة وتقليل الأثر البيئي الناتج عنها من التخلص غير المسؤول من مخلفات البناء. الجزء الريولوجي يتكون من دراسة تأثير التباين في معدل امتصاص (SR) و (SC) على سلوك الملاط وخواصه في الحالة الطازجة (الترهل، زمن الجريان، اللزوجة اللدنة، وعتبة القص).

الكلمات المفتاحية: *إعادة التدوير، الرمال المجروشة، الامتصاص، الغرامات ، الريولوجيا، الملاط*

Abstract

Our objective of this work is to measure the effect of the degree of absorption of recycled sand (SR) and crushed sand (SC) on the rheological properties and mechanics of cement mortar. We chose waste concrete and waste of bricks as recycled sand to test their properties and potential use in the field of construction and civil engineering, with the aim of contributing to the preservation of natural resources, reduction of renewable waste and reduce the environmental impact resulting from irresponsible waste disposal of construction. The rheological part consists of studying the influence of the variation of absorption rate of a (SR) and (SC) on the behavior of the mortar and its properties at fresh states (slump, flow time, plastic viscosity and threshold of shear).

Keyword: *Recycling, Crushed sand, Absorption, Fines, Rheology, Mortar.*

Remerciements

- Du plus profond de mon souhait je voudrais remercier dieu tout-puissant qui m'a guidé vers le chemin de la lumière et de la connaissance et m'a donné la santé et la volonté d'atteindre cet humble travail.
- Je tiens à exprimer mes sincères et sincères remerciements à mon superviseur, le **Dr. Hamza Soualhi**, pour son soutien constant à mon égard, pour sa patience face à mes erreurs répétées et pour avoir essayé de me diriger sur le bon chemin, ainsi que pour sa présence constante. De temps en temps, je le remercie beaucoup de m'avoir donné cette opportunité de faire ce travail simple.
- J'adresse mes remerciements : **Professeur Akram Salah Eddine Belaidi** pour ses conseils pertinents, son extrême gentillesse et pour ses qualités humanitaires et pédagogiques.

J'ai été très honoré parce qu'ils ont été mes professeurs au cours de mon parcours universitaire et que j'ai eu affaire à eux dans mon projet de fin d'étude.

- Je tiens à exprimer mes sincères remerciements aux membres de jury : **Monsieur Ferhat Ahmida** d'avoir accepté de d'examiner ma soutenance et le **professeur Mohamed Kamel Gueddouda** pour avoir accepté présider mon projet de fin d'étude.
- Je tiens à adresser mes sincères remerciements à l'équipe du LTPS - Ghardaïa -pour ses efforts et ses conseils, sur leur tête **Mr. Cheikh Djekaoua** , qui m'a apporté un coup de main dans tous les aspects, ainsi que pour son soutien et l'encourager continu.
- Au **Dr Dada Al-Hadja**, merci du fond du cœur pour votre aide et pour m'avoir donné les conseils qui m'ont facilité le travail au laboratoire, je vous remercie pour votre attention, votre gentillesse et votre générosité à mon égard.
- À ma chère amie **doctorante Cherifi Ryma**, je tiens à vous remercier sincèrement pour vos efforts avec moi et pour vos conseils et encouragements constants à mon égard et m'apportant de temps en temps une énergie positive. Je vous souhaite bonne chance dans votre vie.
- Pour terminer je remercie tous mes collègues pour leur aide et leur encouragement et sur leur tête mon amis **Bouregaa Nour Salam** qui m'adonné un coup de main au laboratoire de LTPS merci beaucoup pour vos efforts et votre gentillesse et **Azouzi Sami** pour son aide dans les difficultés que j'ai rencontrées.

إهداء

ها أنا يا أبي ارتدي وشاح التخرج حانت تلك اللحظة الغريبة
لحظة الحزن والفرح في أن واحد أتدري ما الذي يبكي أركان قلبي
لحظة حلم بنيناها معا وها قد تحقق لقد فعلتها يا أبي لتتم قرير العين
أهديك تخرجي وثمره جهدي وفرحتي الأولى.. إلى فقيد روعي الذي اثار دربي
والسراج الذي لا ينطفئ نوره بقلبي الذي توسده التراب قبل أن يحقق أمنيتنا
رحمة الله عليك.

إلى السيدة لا تدرف دمعا كأنها قوة بأسرها إلى من لا تشتكي وجعا وكأنها اشراقه
الشمس بعينها إلى الامراة التي سهلت الشدائد بدعائها والتي احتوتني وملئت فراق
أبي بحنانتها وتشجيعها الدائم لي إلى أمي وما نطق اللسان إلا باسمها.

إلى من شد الله بهم عضدي فكانوا لي خير معين إلى الأيادي الطاهرة التي أزالته
أشواك الفشل إلى من ساندوني عند ضعفي وساقوني بالحب إلى من رسموا لي
المستقبل بخطوط من الثقة والحب والحنان إلى من جادوا علي بأوقاتهم وكرمهم
ولطفهم إلى أخوتي.

إلى أمي الثانية وضلعي الثابت الذي لا يميل إلى رقيقة دربي أختي مليكة.

Table des matières

Résumé	I
Remerciements.....	II
Liste des Figures	VI
Liste des Tableaux	VIII
Introduction générale	I
Chapitre 1 .Recherche bibliographique.....	3
Les déchets	3
1.1.1 Classification des déchets.....	3
1.1.2 Recyclage des déchets.....	6
1.1.3 Le recyclage des déchets en Europe	7
1.1.4 Valorisation des déchets en Algérie	8
Sable de concassage	9
1.1.5 Fine (poussière) de concassage	10
1.1.6 Caractéristiques de sable de concassage	10
Ab = (Mssd-Msec)/Msec.....	11
Sable recyclé (déchets de béton)	18
1.1.7 Recyclage des granulats de béton.....	18
1.1.8 Caractéristiques morphologiques	20
1.1.9 Saturation et cinétique d'absorption dans l'eau et dans la pâte des GBR.....	22
1.1.10 Influence du vieux mortier attaché aux granulats recyclés	24
1.2 Déchets de brique	24
1.2.1 Définition.....	24
1.2.2 Type de brique.....	24
1.2.3 Les caractéristiques physico-chimiques de la brique	25
1.2.4 Valorisation des déchets de la brique	25
1.2.5 Réutilisation.....	26
1.2.6 Recyclage.....	26
La rhéologie de mortier	26
1.2.7 Introduction.....	26
1.2.8 Les comportements rhéologiques.....	27
1.2.9 Différents comportements rhéologiques	29
1.2.10 Fluide thixotrope.....	30
Conclusion.....	31
Chapitre 2 Matériaux et méthodes expérimentales.....	36
Introduction	36
Matériaux utilisés	36
2.1.1 Ciment.....	36
2.1.2 Super plastifiants	37
2.1.3 Eau de gâchage	38
2.1.4 Sable.....	38
2.1.5 La préparation des sables.....	38
Caractéristiques des matériaux.....	41

2.1.1	Analyse granulométrique	41
2.1.2	Equivalent de sable	43
	Commentaire :.....	44
2.1.3	La masse volumique.....	44
	Commentaire :.....	46
2.1.4	Coefficient d'absorption.....	46
Composition de mortier		47
2.4.1	Composition du mortier avec le sable concassé et le déchets de béton.....	48
2.4.2	Préparation du mortier	48
2.5	Les essais réalisés	51
2.5.1	Essai physique.....	51
2.5.2	Essais mécaniques.....	52
2.6 La rhéologie.....		54
2.6.1	Essai rhéologique	54
2.6.2	Profile de vitesse.....	55
2.6.3	La composition.....	56
2.6.4	Essai d'ouvrabilité	57
Chapitre 3 . Discussion des résultats expérimentaux		58
Introduction		58
Résultats de la cinétique d'absorption		58
Etude rhéologique.....		59
3.1.1	Paramètres rhéologiques	60
3.1.2	L'affaissement au mini cône	62
Corrélation entre le seuil de cisaillement et l'affaissement.....		63
3.1.1	Déchets de béton (Sb)	63
3.1.2	Sable concassée (Sc).....	64
Corrélation entre la viscosité et le seuil de cisaillement.....		65
3.1.3	Sable concassée	65
3.1.4	Déchet de béton (SB)	65
Caractérisation à l'état durci		66
Conclusion Générale.....		73
References bibliographiques		76

Liste des Figures

Figure I.1 : Composition des déchets du bâtiment [8].....	4
Figure I.2 : Répartition des quantités de déchets de chantiers ou de démolition [8].	4
Figure II.3 : Répartition des déchets par secteurs sources [9].....	5
Figure I.4 : Répartition de différents types de Déchets de construction et de démolition [10].	6
Figure I.6 : Composition moyenne des DMA- 4 saisons Algérie- 2018/2019 [14].....	8
Figure I.7 : Répartition des recycleurs par Wilayas [14].....	9
Figure I.8 : Etat « SSD » déterminé par l’essai d’effondrement au cône (Pas assez précis pour les sables)[18]. .	11
Figure I.9 : Présentation de l’affaissement des sables (en haut : SN et en bas : SC) en passant de l’état sec à l’état sursaturé par l’ajout d’eau. La forme initiale est conique de 15cm de haut, dont les diamètres sont de 10 cm et 5 cm [27].	13
Figure I.10 : Évaluation visuelle de la forme des particules Basé sur des observations morphologiques.	14
Figure I.11: Influence de la forme des particules de sables sur la demande en eau, [30].	14
Figure I.12 : Comparaison des spécifications de granulométrie des sables.	17
Figure I.13 : Production des granulats dans les carrières (hors recyclage direct sur chantier) [43].....	18
Figure I.14 :Taux de recyclage des déchets de construction et démolition en Europe [47].	19
Figure I.15 : Exemple de granulats de béton recyclé (GBR).....	20
Figure I.16 : Interface granulats naturels / pâte de ciment d’un granulats recyclés de béton [54].	21
Figure I.17 : Forme du cône de sable pour les différents états (humide, légèrement humide, saturé surface sèche et sec) [51].	22
Figure I.18 : Méthode hydrostatique pour étudier la cinétique d’absorption d’eau des GBR.	23
Figure I.19 : Cinétique d’absorption des granulats recyclés et naturels [57].	23
Figure I.20 : Les comportements rhéologiques des fluides.	30
Figure I.21 : Exemples des courbes d’écoulement. (a)diminution de la vitesse de rotation; (b) augmentation de la vitesse de rotation;(c)augmentation de la vitesse de rotation après une [66].	31
Figure II.22: Ciments utilisés CEM I 42.5 N SR5.	36
Figure II.23 : Super plastifiant haut réducteur d’eau.....	38
Figure II.24 : Le sable concassé.	39
Figure II.25 :Broyage de déchets de brique.....	39
Figure II.26 : Tamisage de déchets de brique.	40
Figure II.27:Des éprouvettes cylindrique de béton.	40
Figure II.28 : Broyage de déchets de béton.	41
Figure II.29 : Tamisage de déchets de béton.	41
Figure II.30 : Tamis d’analyse granulométrique.....	42
Figure II.31:La courbe d’analyse granulométrique.	43
Figure II.32: Essai d’équivalent de sable.....	44
Figure II.33 : Essai de la masse volumique spécifique.....	45
Figure II.34 : Essai de la masse volumique apparente.....	45

Figure II.35:Les trois sables sont immergés dans l'eau pendant 24h.	46
Figure II.36 : Essai de l'absorption du sable.....	47
Figure II.37 : Le malaxeur à mortier.	50
Figure II.38 : Lubrification les moules.....	50
Figure II.39 : Démoulage des moules.	51
Figure II.40 : Chambre humide.....	51
Figure II.41 : Essai de la masse volumique des éprouvettes.	52
Figure II.42 : Essai de traction par flexion	53
Figure II.43 : Essai de compression.	54
Figure II.44 : Rhéomètre utilisé.....	55
Figure II.45 : Profile de vitesse utilisée.....	55
Figure II.46 : Essai d'affaissement au mini cône.	57
Figure III.47 : La cinétique d'absorption du sable de béton.	58
Figure III.48 : La cinétique d'absorption du sable concassé.....	59
Figure III.49 : Variation de la viscosité plastique pour les deux types de sables (SB) et (SC).	61
Figure III.50 : Variation de seuil de cisaillement pour les deux types de sables (SB) et (SC).	62
Figure III.51 : Variation d'affaissement en fonction de deux types de sables.	63
Figure III.52 : Relation entre l'affaissement et le seuil de cisaillement pour le (Sb).....	64
Figure III.53 : Relation entre l'affaissement et le seuil de cisaillement pour le (Sc).....	64
Figure III.54 : Corrélation entre la viscosité plastique et le seuil de cisaillement pour les mortiers (SC).	65
Figure III.55 :Corrélation entre la viscosité plastique et le seuil de cisaillement pour les mortiers (Sb).....	66
Figure III.56 : Résistance à la flexion à 3jours.	67
Figure III.57 : Résistance à la flexion à 7jours.	68
Figure III.58 :Résistance à la flexion à 28jours.	69
Figure III.59 : Resistance à la compression à 3jours.....	70
Figure III.60 : Resistance à la compression à 7jours.....	71
Figure III.61 : Resistance à la compression à 28 jours.	72

Liste des Tableaux

Tableau I.1 : Répartition de la Production des déchets de Chantier au Pays-Bas (en Milliers de Tonnes) [10].....	6
Tableau I.2 : Taux de recyclage en Europe [12]......	7
Tableau I.3 : Quantités de débris issus des catastrophes naturelles en Algérie [15].....	9
Tableau II.4 : Propriétés chimique du ciment.....	37
Tableau II.5 : Propriété physiques et mécaniques du ciment.....	37
Tableau II.6: Résultats de l'essai ES.....	44
Tableau II.7 : Résultats de l'essai de la masse volumique.....	46
Tableau II.8 : Résultats de l'essai absorption	47
Tableau II.9 : Composition du mortier à base de sable concassé.....	48
Tableau II.10 : Composition du mortier a base déchets de béton.....	48
Tableau II.11 : Opérations du malaxage du mortier.....	49
Tableau II.12 : Composition du déchet de béton pour 1.2 litre.....	56
Tableau II.13 : Composition de sable concassée pour 1.2 litre.....	56
Tableau III.14 : Résultats des paramètres rhéologiques des mortiers à base de sable concassée (SC).....	60
Tableau III.15 : Résultats des paramètres rhéologiques des mortiers à base de déchets de béton (SB).....	60

Introduction générale

La mise en valeur et le recyclage des déchets constituent une solution efficace pour préserver l'environnement et pallier le manque de production et de consommation. Le recyclage a deux effets positifs sur l'environnement : la diminution de la quantité de déchets et la préservation des ressources naturelles.

Les granulats recyclés (GR) se forment en combinant des granulats naturels avec une pâte de ciment durcie. En général, cette dernière présente une porosité bien supérieure à celle des granulats naturels : la quantité et les caractéristiques de la pâte de ciment durcie ont donc un impact important sur les caractéristiques des granulats recyclés [1]. Différents chercheurs ont déjà démontré que les sables recyclés ont des niveaux de pâte de ciment bien supérieurs à ceux des gravillons recyclés [2]. Les niveaux élevés de pâte de ciment présents dans les sables recyclés ont un impact considérable sur leurs caractéristiques d'utilisation par rapport aux gravillons recyclés.

Le coefficient d'absorption d'eau des sables recyclés est particulièrement élevé, ce qui nécessite une mesure précise afin de déterminer la quantité d'eau efficace dans les mortiers ou les bétons contenant ces sables [3]. Cependant, il est difficile de mesurer le coefficient d'absorption d'eau des sables concassés, surtout lorsqu'ils renferment des quantités significatives de fines [4]. Il est donc essentiel d'améliorer les techniques de mesure du coefficient d'absorption d'eau pour favoriser la mise en valeur des sables recyclés dans les mortiers ou les bétons [5].

Les pierres de carrière sont concassées et classées afin d'obtenir un sable de concassage (SC) avec une distribution granulométrique contrôlée et des formes de particules variées, allant du cubique à l'angulaire. SC a été commercialisé pour la première fois au début des années 1930. La consommation de SC est aujourd'hui 100 fois plus élevée que dans les années 1930 et représente environ 20 % des besoins globaux en sables de béton.

De nos jours, le recyclage des déchets représente une option appropriée qui peut offrir de nouvelles ressources renouvelables et durables qui favorisent la construction et la préservation de l'environnement. Les déchets de briques offrent une option attrayante. Puisque ces déchets sont facilement accessibles et sont principalement laissés de côté sur les chantiers.

Ce travail consiste en deux études : étude du comportement mécanique et du comportement rhéologique lié à l'utilisation des déchets de construction et démolition comme des sables (sable de béton et sable de brique et sable concassée). L'influence de la variation du taux d'absorption d'un (SR) et (SC) sur le comportement du mortier ont été étudié à partir d'un plan de recherche qui vise à quantifier les modifications apportée par l'ajout des deux sables : sable recyclé de béton et le sable concassé qui a traité à partir l'granulométrie sous l'intervalle (9-11) % sur les paramètres rhéologiques le seuil de cisaillement et la viscosité plastique), la maniabilité (Affaissement et l'étalement) ainsi que les performances mécaniques (résistance à la compression).

Le premier chapitre présente une recherche bibliographique sur le recyclage des déchets de construction et de démolition et une généralité pour ces déchets utilisée dans cette recherche. Il comprend également des informations détaillées sur le sable concassé (SC) et le sable de brique et de béton et leur caractéristique, et une petite partie sur la rhéologie du mortier et les essais qu'on a faits dans ce travail uniquement.

Le deuxième chapitre offre une description approfondie des matériaux et leurs préparations pour le sable et du matériel employés ainsi que La préparation des mélanges et les variables à étudier sont également incluses en donnant un aperçu sur les essai physique et mécanique aussi les essais rhéologiques réalisée dans cette travail.

Et pour le dernier chapitre il comprend une analyse et une discussion sur les résultats obtenus dans ce travail. Et finalement une conclusion générale.

Chapitre 1 .Recherche bibliographique

Ce chapitre présente une recherche bibliographique. Il comprend une recherche approfondie sur tout ce qui concerne les déchets de démolition et de construction et leur recyclage. Ensuite, nous avons abordé les points les plus importants, à savoir les informations précises sur les sables utilisés dans ce travail, et nous l'avons conclu par une étude archéologique et nous sommes concertés sur les points qui ont été utilisés dans ce travail uniquement.

1.1 Les déchets

On définit le déchet comme « tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau, produit ou, plus généralement, tout bien meuble abandonné ou que son propriétaire destine à l'abandon »[6].

Il y a des limites aux possibilités d'élimination et l'accent est mis sur la réutilisation et le recyclage. Il est parfois utilisé le terme « recyclât » lorsqu'il s'agit de réutiliser ces « matières premières secondaires ».

1.1.1 Classification des déchets

1.1.1.1 Déchets inerte

Ces déchets sont principalement générés par les chantiers de bâtiment, les travaux publics ou l'industrie de transformation des matériaux de construction [7]. Ce sont des déchets qui ne sont pas affectés par des changements physiques, chimiques ou biologiques importants et ne provoquent pas des réactions physiques ou chimiques susceptibles de contaminer ou de nuire à la santé humaine [7].

1.1.1.2 Déchets industriels banals (DIB)

Ils comprennent tous les déchets banals du commerce, de l'artisanat, des services et de la gestion, de la métallurgie, des peintures, des fabricants et entreprises de la chimie et de la pétrochimie. Il s'agit de déchets d'emballages, de déchets d'entretien, de vieux matériels. Certains déchets Inactifs sont broyés, triés, et réutilisés dans les travaux publics.

1.1.1.3 Déchets industriels spéciaux (DIS) ou déchets dangereux (DD)

Contrairement aux DIB, ces déchets sont traités selon un procédé différent et contiennent des substances nocives pour l'homme et l'environnement, et leur stockage et leur traitement sont soumis à une réglementation stricte [7].

Les déchets de démolition de bâtiments ou de routes peuvent donc être constitués de l'ensemble de ces types de déchets. La figure 1.1 et 1.2 montrent la composition des déchets (C&D).

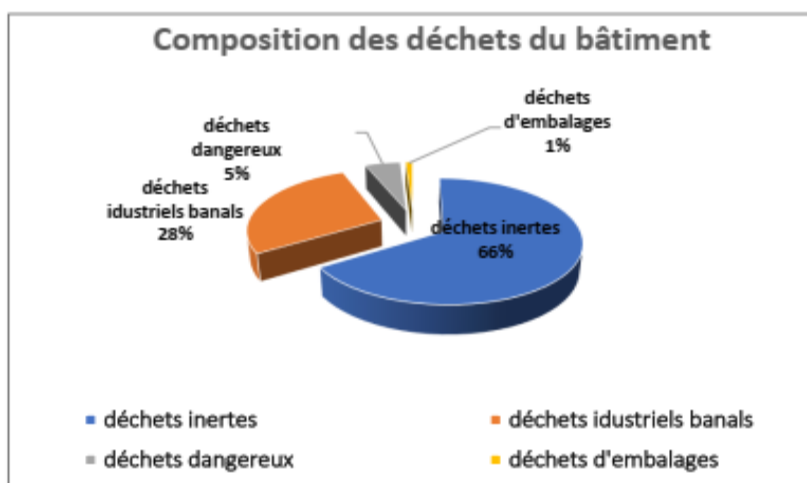


Figure I.1 : Composition des déchets du bâtiment [8].

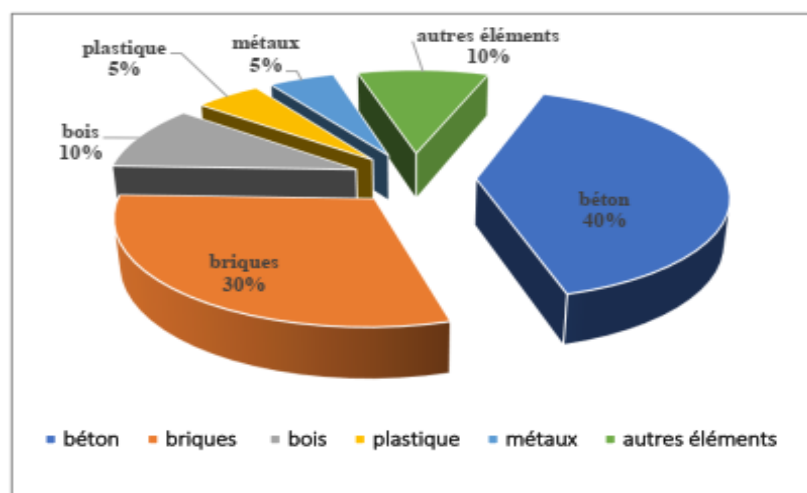


Figure I.2 : Répartition des quantités de déchets de chantiers ou de démolition [8].

1.1.1.4 Les déchets de construction et de démolition

Les principales sources de déchets utilisés dans le génie civil sont les déchets de construction et de démolition (C&D) ainsi que les sous-produits industriels [9].

Les déchets de construction et de démolition (C&D), sont tous les deux lourds, encombrant et se produisent en grande quantité dans le monde.

- Aux Etats-Unis, 31,5 millions de tonnes de déchets de construction sont produites chaque année. Ce qui représente près du quart des déchets municipaux solides.

- En Europe, 259 millions de tonnes de déchets de construction sont produites chaque année comme le montre la figure 1.3.
- Au Royaume-Uni, 24 millions de tonnes de matériaux de démolition et de débris de construction sont produites chaque année.
- En Allemagne, en 1992, 43 millions de tonnes de matériaux de démolition ont été obtenus.
- Au pays bas, en 1993, plus de 12 millions de tonnes de déchets de chantier sont produites comme la montre le tableau 1.1[9].
- En Algérie la valeur du volume des déchets de démolition et de construction en Algérie a été estimée environ 12 à 14 millions de tonnes chaque année , cependant le taux de recyclage reste encore faible avec environ 5 à 10 % de ces déchets recyclés soit environ 6000000 à 1.4 million de tonnes par année.

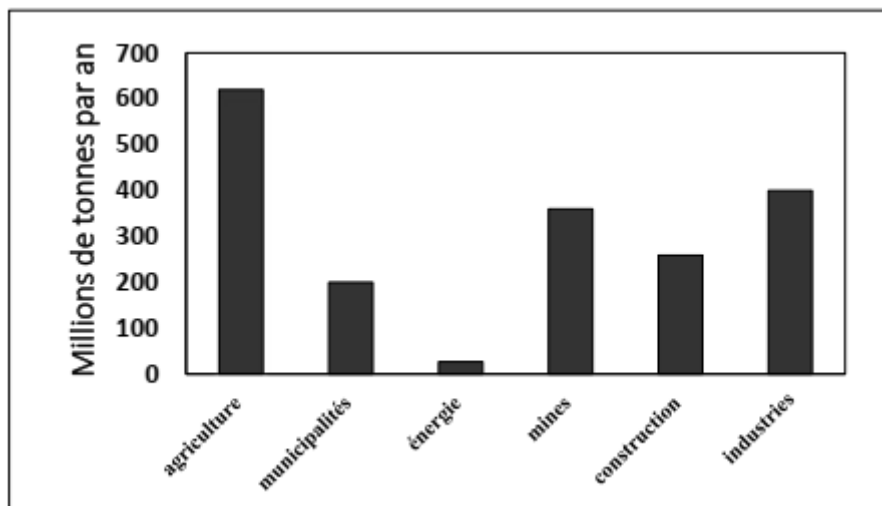


Figure II.3 : Répartition des déchets par secteurs sources [9].

Tableau I.1 : Répartition de la Production des déchets de Chantier au Pays-Bas (en Milliers de Tonnes) [10].

Origines	Bâtiments		Travaux routiers et hydrauliques	Total déchets de chantier	Sol
	Résidentiels	Non résidentiels			
Construction	848	766	NC	-	-
Rénovation	1354	524	NC		-
Démolition	552	4163	NC		-
Total	2754	5453	4170	12377	3100

Les travaux de construction, de rénovation et de démolition génèrent des grandes quantités de matériaux tels que : béton, béton armé, briques, pierre de taille, plâtre, bois, métaux, verre, matières plastiques, céramiques, papiers, etc. Ce sont plus ou moins composites suivant la nature des ouvrages et l'âge de leur construction [9]. La Figure 1.4 montre la répartition de ces différents types de déchets.

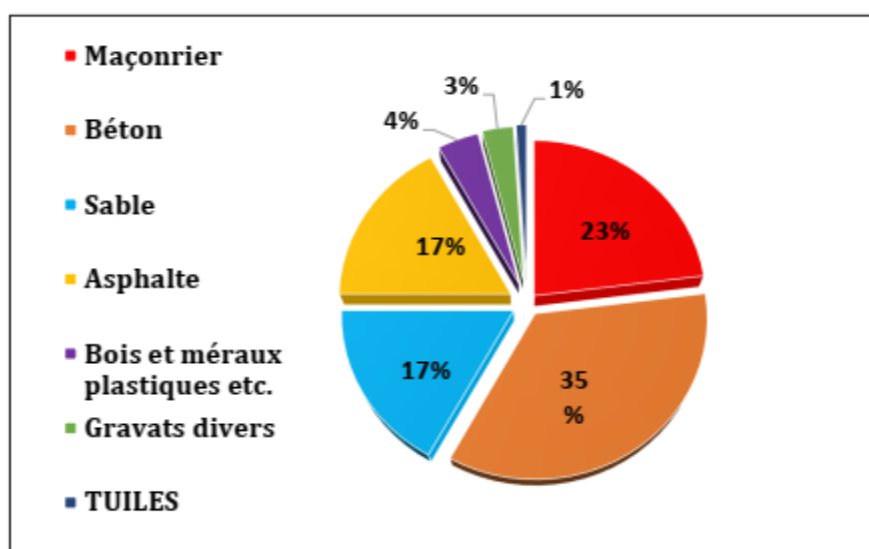


Figure I.4 : Répartition de différents types de Déchets de construction et de démolition [10].

1.1.2 Recyclage des déchets

Le recyclage est le processus de traitement des déchets industriels et ménagers, et les matériaux qui les composent peuvent être réintroduits dans le cycle de production des nouveaux objets. Le recyclage a deux conséquences écologiques majeures :

La réduction des quantités de déchets et la préservation des ressources naturelles. Ce sont des activités économiques de la société de consommation. Certains processus sont simples et bon marché, tandis que d'autres sont complexes, coûteux et non rentables. Dans ce domaine, les objectifs écologiques et de consommation sont alignés, mais ils peuvent aussi diverger lorsque les législateurs interviennent. Par conséquent, le recyclage est devenu une activité importante dans les économies et les conditions de vie des pays développés à partir des années 1970 [8].

1.1.3 Le recyclage des déchets en Europe

En 2018, l'entreprise des travaux publics Euro via a conforté sa position « leader dans la production » des granulats avec un réseau de 350 carrières, produisant environ 82 millions de tonnes en 2018 et construisant 150 usines de recyclage et de valorisation des déchets. Ses réserves sont de 3,1 milliards de tonnes, soit l'équivalent de plus de 50 ans de production.

En France, les déchets du BTP sont estimés à 227 millions de tonnes dont 93 % d'inertes. Sur les 211 millions de tonnes de déchets inertes, 148 millions de tonnes sont recyclées ou valorisées. Ils peuvent être réutilisés directement, recyclés ou récupérés via des remblais de carrière.

Un taux de 70% de déchets de BTP est recyclé par l'Union européenne en 2020. Qui couvre 28 % de l'ensemble des besoins de construction en France. On propose aujourd'hui d'aller plus loin vers un taux de recyclage de 90% d'ici 2025 [11]. Le tableau 1.2 montre le taux de recyclage en Europe.

Tableau 1.2 : Taux de recyclage en Europe [12].

Pays	Déchets de démolition en millions de tonnes par an	Matériaux recyclés en millions de tonnes par an	Pourcentage de recyclage par rapport à la production de déchets	Pourcentage de recyclage par rapport à la production des granulats naturels
Pays-Bas	12.2	8.5	73	2.6
Royaume-Uni	24	11	45.8	3.8
Allemagne	58	14.9	34.6	3.6
Belgique	7.5	2.2	29	5.8
Danemark	0.5	1.25	25	4.25
France	25	03	13	0.75
Espagne	13.5	0.5	3.7	0.2
Total	145	42	Moyenne = 31	21

1.1.4 Valorisation des déchets en Algérie

Le recyclage des déchets en Algérie est une opportunité importante pour la protection de l'environnement. Les déchets ménagers représentent environ 13,5 millions de tonnes par an. Environ 45 % de ces déchets, soit 6,1 millions de tonnes, sont recyclables. Parmi ces 6,1 millions de tonnes figurent 1,8 million de tonnes de papier, 1,2 million de tonnes de plastique, 1,6 million de tonnes de fibres et 300 000 tonnes de métal. Correspondant à une valeur d'environ 23 milliards de DA. Cependant, il n'y a que 247 micro-entreprises activement engagées dans le recyclage des déchets.

L'état est fortement dépendant du développement de l'industrie de la collecte et du recyclage. Il est au cœur du programme national de gestion des déchets urbains, premier cadre de référence dans une perspective de gestion et de valorisation des déchets ménagers [13]. La Figure 1.5 montre la composition des déchets ménagers en Algérie (DMA) et la figure 1.6 élucide la répartition des recycleurs par Wilaya.

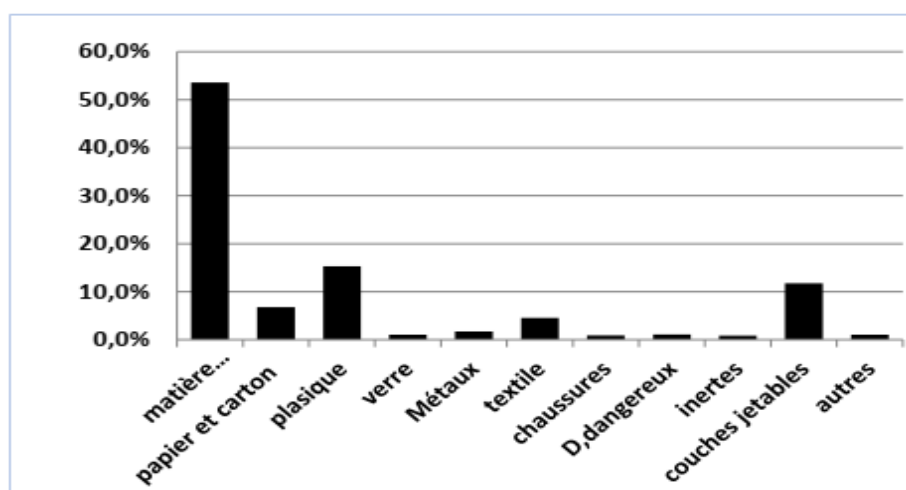


Figure 1.5 : Composition moyenne des DMA- 4 saisons Algérie- 2018/2019 [14].

1.2.1 Fine (poussière) de concassage

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 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 concassage (appelées souvent poussière) sont produites par la fracturation volontaire de la roche pour la production des granulats. Lorsque la forme du SC devient plus sphérique, les coins des agrégats sont éliminés, ce qui crée la poussière, qui passe généralement au tamis (75 ou selon la norme adoptée). La teneur en fines dans le SC due au processus de broyage devrait dépasser 10% sans avoir d'effet néfaste sur la plupart des bétons [16]. En l'absence de matériaux nocifs tels que l'argile, le schiste, le charbon, le lignite ou d'autres impuretés, les fines doivent être considérées comme propres et acceptables pour une utilisation dans le béton [17].

1.2.2 Caractéristiques de sable de concassage

En général, les granulats (sable et gravier) représentent entre 70 et 80 % du volume du béton et ont un impact significatif sur ses caractéristiques fraîches et durcies. Effectivement, il est de plus en plus crucial de caractériser les sables pour le béton en raison des nouvelles exigences de performance découlant des nouvelles méthodes de mise en œuvre (Pompage injection ...).

1.2.2.1 Etat saturé a surface sèche

Avant de commencer cette section, il est essentiel de définir l'état saturé à surface sèche (le terme « SSD » provient de l'appellation en anglais : Saturated surface dry). L'état SSD d'un agrégat est défini comme étant où les surfaces des particules sont "sèches" (c'est-à-dire que l'adsorption en surface n'est plus possible), mais où les grains des granulats sont saturés. Dans ce cas, les granulats ne seront pas néfastes pour la quantité d'eau libre dans un matériau composite (Figure 1.7).

Le coefficient d'absorption d'eau (A_b) 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 :

$$Ab = (M_{ssd} - M_{sec}) / M_{sec}$$





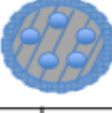
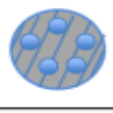
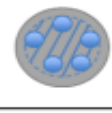
			
Forme conique conservée	Affaissement faible	Affaissement avec pic visible+surface angulaire	Affaissement pas de pic et surface courbe
Eau libre présente		Eau adsorbée (pas d'eau libre)	
			
Saturé	Partiellement saturé	SSD	Partiellement sec

Figure I.7 : Etat « SSD » déterminé par l'essai d'affaissement au cône (Pas assez précis pour les sables)[18].

1.2.2.2 Taux 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 dû 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 Tattersall [19] que ce dernier dépend principalement des caractéristiques du ciment, de sa teneur, du rapport E/C, de la température ambiante et celle du béton, de l'affaissement initial et de la présence d'adjuvant.

La plupart des granulats naturels (sables et graviers) ont des capacités d'absorption comprises entre 1 et 2% en poids des agrégats [20]. Par contre, le taux d'absorption pour les SCs peut atteindre ou dépasser 5%, notamment ceux d'origine calcaire. Cependant, l'absorption d'eau des granulats calcaire est élevée lors du premier mouillage des granulats, mais diminue rapidement avec le temps [21]. Il est naturel d'avoir une perte d'affaissement plus importante lorsqu'on utilise des granulats secs qu'humides. En fait, l'utilisation de granulats à l'état sec est courante dans les régions désertes et en période caniculaire. Le guide de la construction en béton armé dans la péninsule arabe indique que les granulats secs peuvent absorber de 10 à 20% de l'eau totale ajoutée, ce qui réduit considérablement l'ouvrabilité pendant le malaxage et jusqu'à la mise en place. La littérature relative à l'influence de l'absorption des granulats sur l'affaissement du béton est limitée [22]. Neville affirme que l'absorption d'eau par les granulats secs entraîne une perte de maniabilité avec le temps, mais qu'au-delà de 15 minutes environ, la perte devient faible [23]. Il a attribué ce phénomène au fait que les agrégats secs se recouvraient rapidement de pâte de ciment, en particulier dans les mélanges riches, empêchant

ainsi toute nouvelle entrée d'eau nécessaire à la saturation. En conséquence, il a recommandé d'ajouter une quantité réduite d'eau à absorber dans les 10 à 30 minutes initiales au lieu de la quantité totale d'eau basée sur une période d'absorption de 24 heures. Shetty[24]s'est également opposé à l'utilisation de l'absorption sur 24 h en faisant valoir que la quantité d'absorption d'agrégats devrait être basée sur un intervalle de temps égal au temps de fin de prise du ciment. La norme ASTM C 192[25] indique que la quantité d'eau absorbée par les agrégats avant la mise en place du béton correspond à 80% de la différence entre l'absorption pendant 24 h, déterminée par les méthodes d'essai C 128, et la teneur en eau dans les pores des agrégats à l'état sec, déterminée par la méthode d'essai C 566. Cependant, selon ASTM C192cette norme est limitée au cas des granulats à faible absorption ($< 1,0\%$)[25].

Il est à rappeler que selon la méthode standard ASTM C128[26]ou EN 1097-6, relative à la détermination du taux d'absorption des sables, l'échantillon est immergé dans de l'eau pendant 24 heures, puis séché progressivement pour atteindre l'état SSD. En effet, pour les particules centimétriques grossières avec surface spécifique relativement basse, le changement de couleur de la surface est un bon indicateur de l'état d'humidité de la surface de la particule. Toutefois, pour les particules plus fines, cet indicateur devient insuffisant pour permettre une évaluation fiable de l'état SSD. Pour les sables, il est donc soutenu par une mesure d'affaissement. Les échantillons de particules naturelles roulées sèches devraient atteindre une forme conique avec une pente de cône comprise entre 15 et 30°. Cependant, dès que de l'eau en excès est ajoutée à un sable saturé en surface, des ménisques capillaires apparaissent entre les grains de sable. Ils diminuent l'affaissement de l'échantillon et augmentent la pente du dépôt de sable (voir Figure 1.7). Ce changement de comportement est évident et permet à l'opérateur de mesurer avec précision la quantité d'eau nécessaire pour saturer les grains. Cependant, dans le cas de particules concassées, l'affaissement de l'échantillon séché est assez faible. La rugosité des particules, leurs formes irrégulières et les contacts de frottement directs associés entre particules augmentent tous la capacité du dépôt de sable à résister aux forces cisaillement dues à la gravité. Ainsi, l'angle de la forme conique obtenue par des échantillons secs peut atteindre des valeurs supérieures à 45°. La formation de ménisques d'eau entre les grains de sable n'affecte guère cette forme d'équilibre (voir Figure 1.8) et la forme de l'échantillon reste la même sur une large gamme de quantités d'eau ajoutées. L'évaluation de l'état SSD est donc laissée à l'opérateur, ce qui diminue la fiabilité et la reproductibilité de la mesure [27].

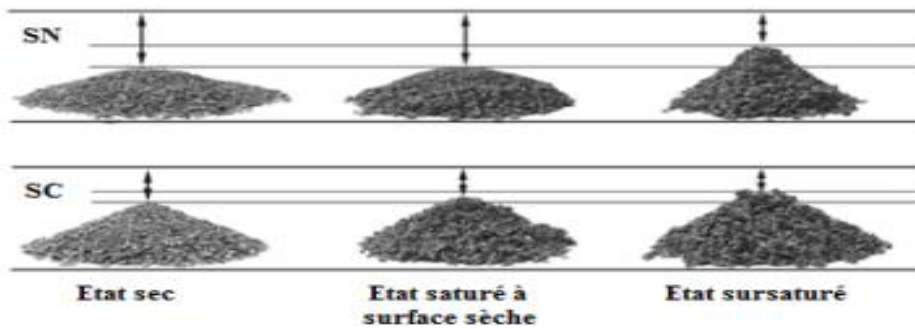


Figure 1.8: Présentation de l'affaissement des sables (en haut : SN et en bas : SC) en passant de l'état sec à l'état sursaturé par l'ajout d'eau. La forme initiale est conique de 15cm de haut, dont les diamètres sont de 10 cm et 5 cm [27].

1.2.2.3 Forme des particules

Pour les SNs, les caractéristiques de la forme des particules ne sont pas généralement déterminées. Par contre, plusieurs travaux de recherche ont été consacrés pour étudier l'effet de la forme des particules du SC sur les performances du béton. La forme des grains du SC est influencée par les propriétés physiques de la roche mère et par la méthode de production [28]. 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 [17]. Les SCs contiennent généralement plus de particules angulaires avec des textures de surface plus rugueuses et des faces plus plates que les SNs roulés 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 a étudié les effets des sables et graviers sur la demande en eau dans le béton. Il a été constaté que sable avait un impact plus significatif sur la demande en eau que l'agrégat grossier. 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[29]. La figure 1.8 fournit un graphique de comparaison pour l'évaluation visuelle de la forme des particules.

Nichols a rapporté que plus l'angularité des particules augmente, la teneur en vides augmentait et les rapports E/C est supérieurs par rapport à de mélanges comparables avec un sable moins anguleux[30]. Comme le montre la figure 1.9, 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 53 est attribuée aux particules rugueuses dans l'ensemble qui nécessitent plus d'eau pour obtenir le même affaissement.

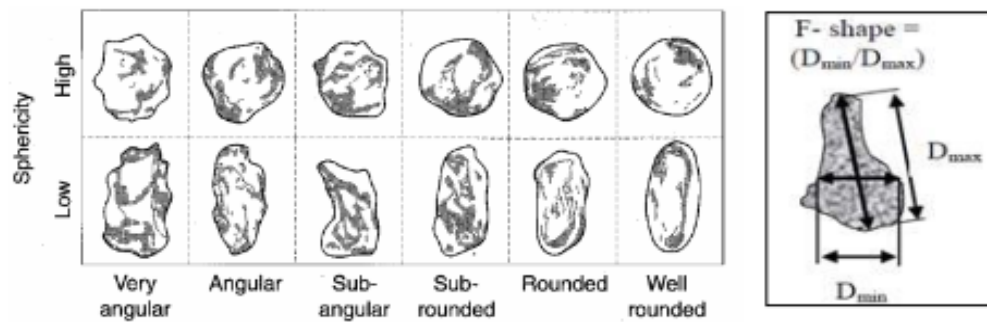


Figure I.9 : Évaluation visuelle de la forme des particules Basé sur des observations morphologiques.

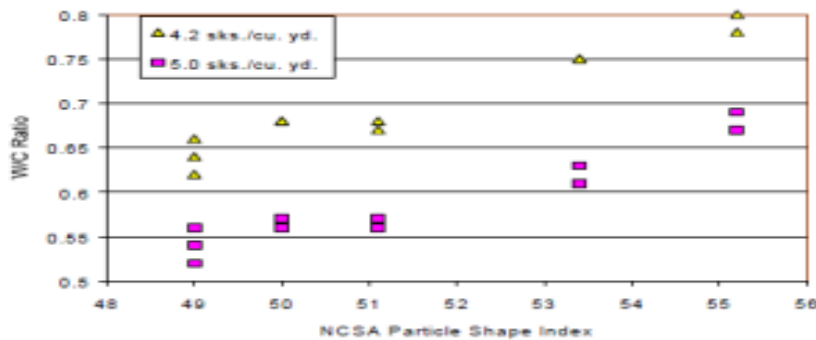


Figure I.10: Influence de la forme des particules de sables sur la demande en eau, [30].

Le degré d'impact résultant de la modification de la granulométrie du SC dépend du dosage du béton. Nichols a rapporté que le changement de granulométrie d'un SC donné avait « peu ou pas d'effet » sur la demande en eau. Cependant, à mesure que la teneur en micro-fines augmentait, le béton plastique présente un ressuage « nettement moins » que le béton conforme à la norme ASTM C33. L'effet sur les propriétés de résistance variait avec la teneur en ciment et non avec les changements de granulométrie. Le même auteur a suggéré que l'augmentation du nombre de fines a abaissé le module de finesse (FM) et la quantité totale de sable nécessaire pour produire un mélange exploitable. La réduction en sables devrait compenser l'augmentation de la demande en eau résultant de la présence de fines. En conclusion, la granulométrie des sables n'affecte pas la résistance à la compression, la résistance à la flexion et la résistance au gel-dégel autant que la composition du mélange.

1.2.2.4 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 de la roche mère. 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 Mather 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], Rhoades et Mielenzont 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 : « Bien que la rugosité augmente la liaison avec la pâte de ciment, les aspects les plus importants de la texture de la surface sont la porosité, l'absorption et la perméabilité de la zone située immédiatement sous la surface. 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 »[31]. 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, les caractéristiques d'absorption seules des agrégats ne peuvent pas être considérées comme une indication 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 [32]. 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. Cependant, il n'existe actuellement aucune méthode d'essai efficace pour évaluer efficacement la texture du SC.

1.2.2.5 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 [33]. 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 [34]. 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.

Dans une étude réalisée par la British Standards Institution, Pike concluait que : « Une teneur contrôlée en fines minérales autre que les minéraux argileux peut être tolérable et parfois utile, mais il convient d'éviter l'argile, comme les smectites qui sont particulièrement nocifs et leur contenu doit être sévèrement limité ». Pike a suggéré que les limites de fines puissent éventuellement être modérées si l'essai d'absorption au bleu de méthylène est disponible pour les fines d'argile nocives. [35]. Ramirez et al ont proposé de la même manière des contrôles pour les sables calcaires fondés à la fois sur la teneur en fines et sur l'absorption de bleu de méthylène[36]. Cependant, les effets de résistance sur les performances de résistance pour une valeur de bleu de méthylène particulière dépendent du type d'argile, et le test n'est donc pas définitif Pike [37].

Marek a étudié l'effet de la forme et de la granulométrie des sables sur les propriétés du béton. Il a déclaré qu'une classification des sables spécifiée par la Portland Cement Association (PCA) convient aux particules relativement sphériques mais ne convient pas à la classification contenant des particules hautement non sphériques. Les résultats des tests ont indiqué que l'utilisation de micro-fines réduit le vide de l'agrégat, lubrifiant ainsi le système d'agrégats sans augmenter les besoins en eau du mélange. Il a recommandé de prendre en compte une teneur en fines supérieure à 5%, voire supérieure à 10%, lorsque les fines sont des poussières de fracture sans argile ni limon[38].

La norme ASTM C33 comprend des spécifications de sables pour le béton et constitue la base de nombreuses spécifications actuellement utilisées[39]. Clelland de New Zealand Standards Bulletin, a souligné que certains sables conformes aux spécifications des sables ne permettent pas de réaliser un bon béton en raison de mauvaises caractéristiques physiques. Dans le même temps, les sables qui ne rentrent pas dans l'enveloppe de nivellement ont été utilisés avec succès dans le béton [40].

La figure 1.11 présente une comparaison de la granulométrie des sables pour les normes : ASTM C33, Georgia DOT et North Carolina. Cette figure montre que, pour la granulométrie la plus fine permise, la norme ASTM C33 autorise moins de fraction en dessous du tamis N° 8 (2,36 mm) par rapport aux autres spécifications, ce qui donne un mélange plus grossier de granulats. La spécification Georgia permet le mélange le plus fin en demandant davantage de fractions de taille plus petite que les autres spécifications.

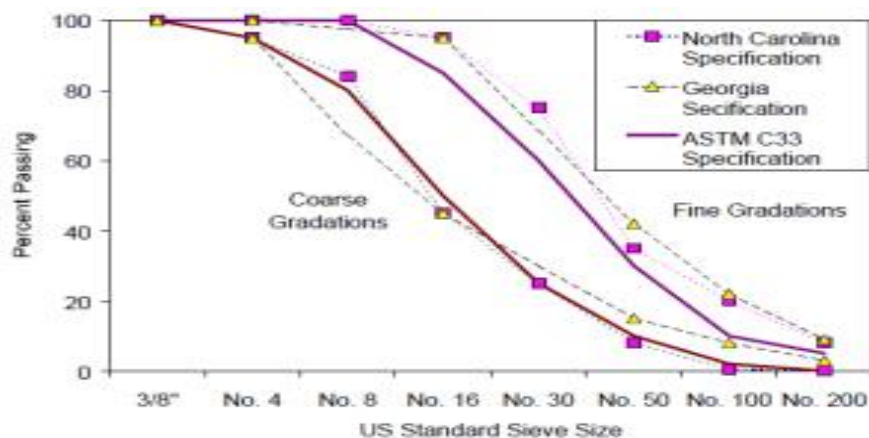


Figure 1.11 : Comparaison des spécifications de granulométrie des sables.

Le degré d'impact résultant de la modification de la granulométrie du SC dépend du dosage du béton. Nichols a rapporté que le changement de granulométrie d'un SC donné avait « peu ou pas d'effet » sur la demande en eau. Cependant, à mesure que la teneur en micro-fines augmentait, le béton plastique présente un ressuage « nettement moins » que le béton conforme à la norme ASTM C33. L'effet sur les propriétés de résistance variait avec la teneur en ciment et non avec les changements de granulométrie. Le même auteur a suggéré que l'augmentation du nombre de fines a abaissé le module de finesse (FM) et la quantité totale de sable nécessaire pour produire un mélange exploitable. La réduction en sables devrait compenser l'augmentation de la demande en eau résultant de la présence de fines. En conclusion, la granulométrie des sables n'affecte pas la résistance à la compression, la résistance à la flexion et la résistance au gel-dégel autant que la composition du mélange.

1.2.2.6 Teneur en argile et composants nocifs

Les particules inférieures à 80 μm (75 μm d'après l'ancienne norme) peuvent être sous trois formes : argile, limon ou poussière. L'argile est un minéral naturel qui présente des caractéristiques plastiques et est constitué de particules très fines. En général, on définit la fraction minérale argileuse d'un sol comme la fraction composée de particules plus fines que 2 μm . Les argiles minérales sont principalement composées de silicates d'aluminium hydratés ou parfois de silicates de magnésium hydratés [41].

1.3 Sable recyclé (déchets de béton)

1.3.1 Recyclage des granulats de béton

Les granulats représentent un constituant majeur pour la fabrication du béton. Ils sont généralement définis comme étant des fragments de roches. Leurs natures et leurs formes diffèrent selon leur provenance et leur mode de fabrication. Les granulats représentent un des matériaux le plus utilisé par l'homme avec une consommation moyenne d'environ 6,8 tonnes par habitant et par an. Cette consommation se classe de loin devant celle du pétrole (1,5t/hab./an), le bois (0,8t/hab./an) ou encore le charbon (0,7t/hab./an) [42].

Selon une étude de l'UNICEM [43], la production annuelle de granulats en France a connu une croissance constante jusqu'à l'année 2007, avant de chuter de 26% pour atteindre une production de 330 millions de tonnes par an en 2016 (figure 1.11). Cette chute de production des granulats naturels est due en partie à la législation environnementale qui est de plus en plus contraignante pour limiter l'impact de cette production sur l'environnement.



Figure I.12 : Production des granulats dans les carrières (hors recyclage direct sur chantier) [43].

Les déchets de démolition peuvent être considérés comme une ressource supplémentaire pour diminuer l'utilisation des ressources naturelles. En 2016, 204 millions de tonnes de granulats recyclés ont été produits en Europe [44]. L'Allemagne, la France, la Belgique, les Pays Bas et le Royaume Uni produisent à eux seuls 90% de la totalité des granulats recyclés en Europe. L'intérêt de la réutilisation des granulats recyclés est double. En premier lieu, elle permet d'éviter le stockage des déchets d'une manière sauvage, mais surtout de sauvegarder les ressources en granulats naturels.

Pour augmenter le taux de recyclage des déchets de démolition, la directive Européenne 2008/98/EC a fixé comme objectif le recyclage au minimum de 70% des déchets de construction et de démolition à l'année 2020 [45]. En Europe, il n'y a que 50% de ces déchets qui sont valorisés [46]. L'Allemagne, le Danemark et les Pays Bas présentent le taux de recyclage le plus élevé (près de 90%). En Belgique, le taux de recyclage est de 80%, alors qu'en France il est de 60% [47]. (Figure 1.12).



Figure I.13 :Taux de recyclage des déchets de construction et démolition en Europe [47].

En Asie, le Japon est le pays qui recycle le plus avec un taux de recyclage de 96% des déchets de C&D [48], contrairement à la Chine où la notion de recyclage en général est très peu présente [49].

En Amérique, le recyclage, d'une manière générale est très peu présent. Au Brésil, par exemple, on observe une augmentation croissante dans la demande en granulat qui met en péril les ressources naturelles. En 2002, aux Etats-Unis, seulement 20 à 30% de déchets de C&D sont recyclés sur la totalité des 250 à 300 millions tonnes de déchets de construction et de démolition produits [50].

1.3.2 Caractéristiques morphologiques

Les déchets de construction et de démolition (béton) constituent les GBR. Ils sont différents en fonction de la nature du béton utilisé et surtout en fonction de la qualité du processus de déconstruction/démolition. Les granulats naturels et la pâte de ciment durcie adhérente forment principalement les GBR (voir figure 1.). Cette pâte adhérente est la principale distinction entre un GBR et un granulats naturels (figure1.13).

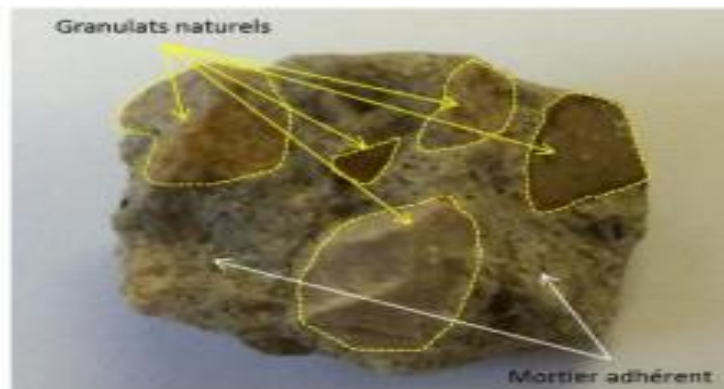


Figure 1.14 : Exemple de granulats de béton recyclé (GBR).

1.3.2.1 Masse volumique et porosité

Les caractéristiques de masse volumique et de porosité jouent un rôle crucial dans la fabrication des bétons. La masse volumique absolue et la porosité sont utilisées pour déterminer la réelle proportion volumique du GBR dans une formulation de béton. De plus, la valeur d'absorption d'eau permet de contrôler l'efficacité de l'eau, ce qui joue un rôle crucial dans l'étude du comportement du béton ou du mortier à l'état frais et à l'état durci.

On définit la masse volumique absolue (ρ_{abs}) d'un matériau comme une propriété physique inhérente au matériau. Cette valeur correspond à la quantité de matière par unité de volume dans le granulats, sans prendre en compte les éventuels vides présents dans les grains ; cette valeur est calculée en se basant sur la norme européenne NF EN 1097-6 [51].

Zhang et al. [52] distinguent deux types de pores dans les matériaux poreux. Les pores ouverts et les pores fermés. Les pores ouverts forment entre eux un système connecté. Les pores fermés sont des pores isolés et ne sont pas connectés entre eux. Seuls les pores connectés sont capables de transporter de la matière. La proportion de pores connectés diffère suivant la nature et la source des granulats. Dans le cas des GBR, cette porosité est beaucoup plus importante comparée à un matériau naturel à cause de la pâte de ciment adhérente qui est très poreuse et donc absorbante [53].

1.3.2.2 L'absorption d'eau

La capacité d'absorption des granulats recyclés est plus élevée que celle des granulats naturels en raison de leur faible masse volumique et de leur porosité élevée. Cela entraîne une réduction de la capacité d'ouverture du béton et la création de réseaux poreux. Dans le béton, cela entraînera une diminution des caractéristiques mécaniques et de la durabilité du béton durci.

Le concassage peut avoir une influence sur la capacité d'absorption de granulats recyclés. En effet les fissures de concassage contribuent à l'augmentation d'eau et les fissures dans la partie hydratée du vieux mortier conduit à la forte absorption d'eau [54].

La figure 1.14 montre une photo MEB des fissures de l'interface pâte, granulats recyclés dans le béton.

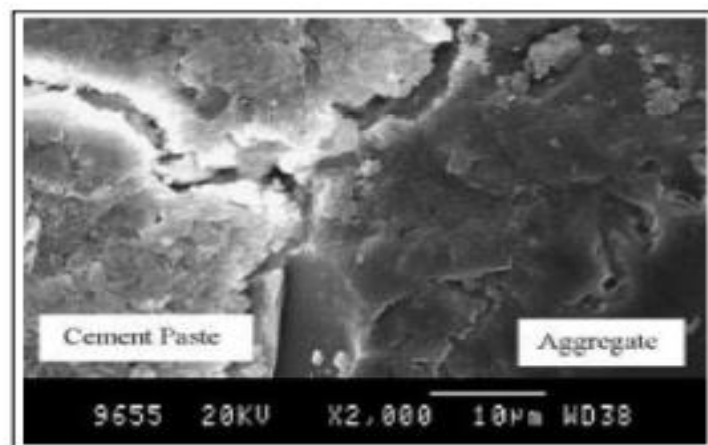


Figure I.15 : Interface granulat naturel / pâte de ciment d'un granulat recyclé de béton [54].

Pour obtenir l'état SSS, il faut individualiser les grains lors de la procédure du séchage. Cette opération est beaucoup plus compliquée pour les particules fines que pour les particules grossières. Pour les particules inférieures à 4mm, la norme EN 1097-6 [51]. Propose une méthode pour évaluer le taux d'absorption d'eau. L'objectif de ce protocole est de neutraliser les forces capillaires entre les grains. Afin de définir l'état de SSS. En premier lieu, il est nécessaire de pré saturer le matériau pendant 24 heures en le plongeant complètement dans l'eau, puis de le sécher avec un courant d'air chaud jusqu'à ce qu'il atteigne l'état SSS. On peut identifier l'état SSS en effectuant un test d'effondrement à l'aide d'un moule tronconique. Selon cette approche, on obtient l'état SSS lorsque la forme du tas après le test d'effondrement est régulière (voir figure 1.15).

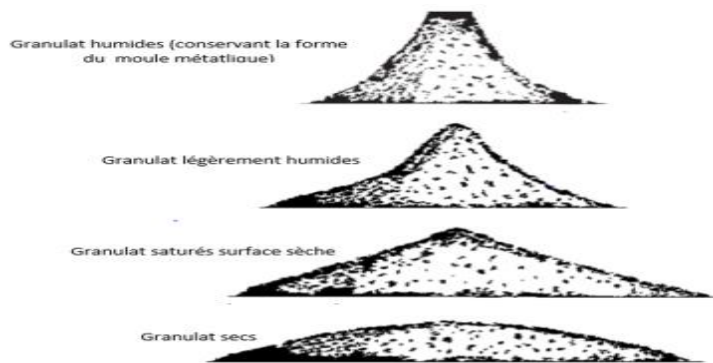


Figure I.16 : Forme du cône de sable pour les différents états (humide, légèrement humide, saturé surface sèche et sec) [51].

1.3.3 Saturation et cinétique d'absorption dans l'eau et dans la pâte des GBR

Tam et al. [55] ont développé une méthode qui permet de suivre l'évolution de l'absorption d'eau dans le temps. Cette méthode est basée sur l'immersion des GBR dans un pycnomètre, la cinétique d'absorption d'eau est obtenue en quantifiant la baisse du niveau d'eau dans le pycnomètre dans un intervalle de temps régulier. Tam et al. ont montré que l'absorption d'eau est très rapide les premières minutes. L'inconvénient de cette méthode réside dans l'impossibilité de quantifier l'eau absorbée au cours des premières minutes, lors de la mise en place du matériau dans le pycnomètre.[55]

Tegger[56] a développé une méthode basée sur une pesée hydrostatique pour suivre l'absorption d'eau au cours du temps d'un GBR (Figure I.16). Cette méthode consiste à placer les granulats dans un bain thermostaté, et de suivre la variation de la masse correspondant à la cinétique d'absorption d'eau. Comme pour la méthode de Tam et al. [55] les premières minutes d'absorption d'eau sont très difficiles à obtenir. Cette méthode montre aussi que dès les 5 premières minutes le degré de saturation est très élevé. Les méthodes proposées par Tam et al. [55] et Tegger et al. [56] sont plus applicables pour les GBR de taille supérieure à 4mm qu'aux GBR de plus petites dimensions.

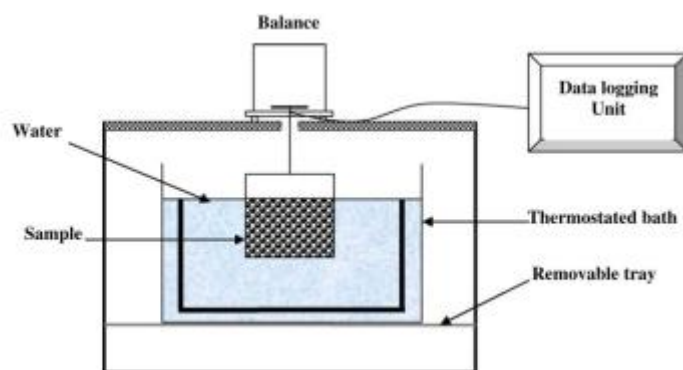


Figure I.17 : Méthode hydrostatique pour étudier la cinétique d'absorption d'eau des GBR.

Bendimerad et al.[57] ont combiné les méthodes de Tam et al. [55] et de Tegguer[58] pour suivre la cinétique d'absorption d'eau des GBR. Ils ont étudié deux types de GBR issus d'un béton de démolition (RA 4-10, $W_a = 5,62\%$, RA 10-20, $W_a = 5,31\%$) et des granulats naturels (Na 6.3-20, $W_a = 0,65\%$, NLA 4-20, $W_a = 0,6\%$). Les résultats de cinétique d'absorption sont présentés dans la figure 1.17. Bendimerad et al. [57] montrent que, si les bulles d'air sont correctement évacuées, une absorption d'eau de plus de 80% est obtenue au bout de 15 minutes pour les matériaux recyclés, et de 4 heures pour les matériaux naturels. Cette différence peut être attribuée à la taille des pores, largement plus petits pour les matériaux naturels comparés aux matériaux recyclés, qui ralentirait ainsi l'absorption d'eau.

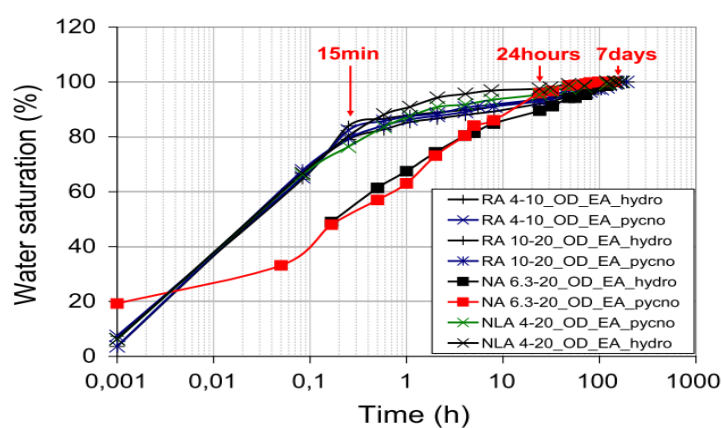


Figure I.18 : Cinétique d'absorption des granulats recyclés et naturels [57].

1.3.4 Influence du vieux mortier attaché aux granulats recyclés

La différence entre les granulats recyclés et les granulats naturels réside dans l'existence du vieux mortier de ciment qui y est fixé. Ce mortier de ciment entraîne une diminution des caractéristiques des granulats recyclés, ce qui entraîne une densité réduite, une absorption d'eau accrue et une augmentation des taux de sulfates et d'alcalins. La quantité de mortier ancien est influencée par le processus de concassage du béton et est directement liée à la granulométrie. D'autres recherches démontrent que les propriétés du mortier ancien étaient influencées par les performances du béton initial [54].

1.4 Déchets de brique

1.4.1 Définition

Les briques sont des produits céramiques fabriqués à partir d'argiles, qu'elles soient avec ou sans ajouts. Les briques ont souvent une forme parallélépipède rectangle. Ces matériaux sont fréquemment employés dans la réalisation de bâtiments et de travaux publics. C'est l'un des matériaux de construction les plus anciens par rapport aux autres. Les dépliants des fournisseurs et des fabricants de cheminées, de barbecues et de fours sont de plus en plus remplis de briques. Il semble que ce terme soit enchanteur et offre la possibilité de réaliser toutes sortes de résultats calorifiques.

La brique est fabriquée afin de faire face à la chaleur. Elle sera constituée de vermiculite, de ciment fondu et de coulis réfractaire dans des proportions variées en fonction de son utilisation.

1.4.2 Type de brique

Il existe différents types de briques pleines avec des aspects de surface variée. On distingue différents types de briques : [59]

- La brique de terre crue, qui peut aussi contenir des fibres (pailles, lin, crin...) ;
- La brique de terre compressée ;
- La brique cuite pleine, matériau traditionnel très ancien, avec une variante appelée ;
- Brique pleine perforée (les perforations sont perpendiculaires au plan de pose) ;
- La brique légère et isolante (qui flotte sur l'eau) utilise une terre silico -magnésienne sans consistance mais qui mélangée à un vingtième environ d'argile plastique produisait des briques aussi résistantes que des briques ordinaires, mais très poreuses,

conduisant mal la chaleur ou le froid et flottant sur l'eau. la brique cuite creuse, plus légère (et donc moins coûteuse à transporter) et plus isolante est devenue la plus utilisée, Ses perforations sont parallèles au plan de pose de manière à ne pas diminuer sa résistance à la pression ;

- La brique de chanvre, ayant de très bonnes propriétés d'isolation thermique ;
- La brique non gélive ;
- La brique réfractaire, pour la construction des fours, chaudières, foyers, cheminées, etc.

Selon le type, elles peuvent connaître différents usages :

- Briques de parement : destinées à rester apparentes et sont purement décoratives ;
- Briques pleines : destinées à la construction de murs extérieurs, porteurs, Briques plâtrières : servent à construire les cloisons intérieures et les murs de refend .

1.4.3 Les caractéristiques physico-chimiques de la brique

Les variétés d'argiles sont présentes dans les briques cuites. Les illitiques sont de couleur marron gris à rouge, tandis que les kaolins et les bravai stiques sont de couleur orange à rose. On retrouve également des composés métalliques dans la pâte argileuse. Les éléments appelés « réfractaires » ont un degré de fusion très élevé par rapport à la température des fours à brique (800° à 1000°) : la silice (SiO_2) et l'aluminium (AL_2O_3).

Les déterminants de la couleur basique de la brique (les colorants) ce sont : [60]

- L'oxyde de fer ;
- L'oxyde de titane ;
- L'oxyde de manganèse.

Les fondants aussi ce sont à deux types :

1. Les oxydes alcalins (oxyde de sodium et potassium)
2. Les oxydes alcalino-terreux (chaux et magnésie)

Selon, la composition minéralogique de déchet de brique rouge a été déterminée par fluorescence X.

1.4.4 Valorisation des déchets de la brique

Peu de données sont disponibles concernant l'avenir des déchets de briques qui représentent la majorité des déchets de démolition et de décombres. D'un point de vue technique, les déchets de briques sont généralement utilisés comme matériau de construction comme la

maçonnerie. Par ailleurs, la quasi-totalité des réglementations régissant la production et l'utilisation des déchets de brique est absent[61].

1.4.5 Réutilisation

Les briques récupérées peuvent être nettoyées et réutilisées sur le même chantier ou ailleurs lors des travaux de démolition. De plus, il existe des briques anciennes qui possèdent une grande valeur architecturale et sont très recherchées pour les rénovations monumentales. [61].

1.4.6 Recyclage

Le recyclage implique de réintroduire le déchet dans le processus de production en remplaçant totalement ou partiellement une matière première naturelle. La différence avec la réutilisation réside dans le fait que la matière doit subir un nouveau traitement. La brique peut être réduite en granulats et utilisée comme matériau de fondation pour les routes, comme matériau de remblai, pour l'aménagement paysager et pour d'autres applications dans le domaine de la construction, conformément aux réglementations en vigueur qui régissent la production et l'utilisation des déchets de brique [61].

1.5 La rhéologie de mortier

1.5.1 Introduction

En réalité, la rhéologie s'étend aux domaines de l'élasticité et de la mécanique des fluides newtoniens, aux matériaux dont le comportement mécanique ne peut être expliqué par ces théories traditionnelles. Elle offre également la possibilité de mesurer les caractéristiques mécaniques macroscopiques en se basant sur une analyse basée sur la structure micro ou nanoscopique du matériau, comme la taille moléculaire et l'architecture d'un polymère en solution, ou encore la répartition de la taille des particules dans une suspension solide.[63][62].

La rhéologie étudie les déformations et le déplacement de la matière, ainsi que les liens entre la viscosité, la plasticité et l'élasticité de la matière et le comportement de celle-ci sous l'influence des pressions.

Autrement dit, le comportement rhéologique des solides repose sur la mécanique des solides ou la physique des solides, qui suit une équation fondamentale qui établit un lien entre les grandeurs dynamiques qui sont à l'origine du mouvement, les contraintes, les

déformations, la dilatation de l'élasticité, la plasticité jusqu'à la rupture et la géométrie des masses.

En outre, en rhéologie des matériaux liquides, la viscosité est l'un des paramètres rhéologiques. Les paramètres essentiels comprennent la forme de la pale, le type de rhéomètre employé et le poids.

1.5.2 Les comportements rhéologiques

1.5.2.1 La viscosité

Un liquide au repos peut être considéré comme un ensemble de couches moléculaires parallèles. Soumis à une contrainte tangentielle, une des couches du liquide se déplace par rapport à celle qui lui est sous-jacente; en raison du frottement permanent sur les molécules de la seconde couche, le mouvement est transmis partiellement à cette dernière en même temps que la vitesse de déplacement de la première couche diminue. Cet effet de retard, provoqué par la friction interne des molécules de la couche sous-jacente sur celle de la couche supérieure, est appelé la viscosité. La viscosité est la résistance à l'écoulement d'un système soumis à une contrainte tangentielle.

On distingue différents types de viscosité :

La viscosité dynamique ou apparente : c'est le rapport entre la contrainte de cisaillement et la vitesse de cisaillement du fluide.

$$\mu = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}$$

La viscosité cinématique : c'est le rapport de la viscosité dynamique à la masse volumique du fluide.

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

Elle correspond au temps qu'il faut à un fluide pour s'écouler dans un tube capillaire par la force de gravité. Son unité est le m^2/s .

1.5.2.2 Seuil de cisaillement

Le seuil de cisaillement τ_0 est défini comme étant la contrainte de cisaillement minimum à atteindre pour que le fluide s'écoule. En dessous de cette valeur, ce dernier se comporte comme un pseudo-solide (pas de déformations permanentes).

Le seuil **statique** correspond à la contrainte à fournir afin d'obtenir le premier signe d'écoulement. Le seuil de cisaillement statique peut être déterminé en imposant une contrainte croissante jusqu'à la valeur provoquant l'écoulement de la suspension.

Le seuil de cisaillement **dynamique** correspond à une valeur théorique qui découle de l'extrapolation de la courbe d'écoulement à un gradient de vitesse de cisaillement nul. Il s'agit alors d'une valeur obtenue après la déstructuration du corps. La valeur du seuil de cisaillement statique est logiquement supérieure à celle du seuil de cisaillement dynamique, en raison de l'état de déstructuration de la matière cisailée.

On pourrait croire que ce coefficient suffit à caractériser les propriétés d'écoulement des échantillons, à une température donnée. C'est vrai dans le cas des **liquides newtoniens** pour lesquels il y a proportionnalité entre contrainte et vitesse de cisaillement, si bien que la viscosité est indépendante du cisaillement. Mais ce n'est plus vrai dans le cas des **liquides non newtoniens**, pour lesquels la relation de proportionnalité n'est plus vérifiée, et qui présentent un comportement en écoulement beaucoup plus riche et complexe.

1.5.2.3 Contrainte de cisaillement

Au cours d'un mouvement laminaire de cisaillement, les « couches » sont animées d'un mouvement relatif les unes par rapport aux autres. Il en résulte l'apparition de contraintes qui s'exercent tangentiellement à la surface de la couche, la contrainte de cisaillement τ [64]. On a l'habitude de rapporter ces forces à l'unité de surface et de définir ainsi ce qu'on appelle la contrainte de cisaillement qu'on notera τ , et qui s'exprime en pascal (Pa).

Ainsi, la contrainte de cisaillement est la force exercée par unité de surface du fluide :

$$\tau = \frac{dF}{dS}$$

Avec :

- ✓ dS : surface élémentaire d'une couche cisailée.
- ✓ dF : projection de la force de frottement tangentielle.

Il est bien évident que les mouvements de cisaillement réels ne possèdent pas toujours une symétrie plane de translation. C'est ainsi que la plupart des viscosimètres et rhéomètres sont rotatifs et présentent des symétries cylindriques coaxiales, ou cône-plateau, ou plateau-plateau. De même, ces mouvements de cisaillement ne sont pas toujours engendrés par le déplacement d'une paroi solide. Dans de nombreuses applications, le cisaillement est provoqué par une différence de pression appliquée aux extrémités de l'échantillon, ou encore par le seul effet de la pesanteur : c'est le cas des écoulements dans les tubes cylindriques, qu'il s'agisse de canalisations industrielles, de vaisseaux sanguins, de tubes capillaires...

1.5.3 Différents comportements rhéologiques

Il existe plusieurs comportements rhéologiques qui se divisent en deux grandes familles : les fluides newtoniens et les fluides non-newtoniens.

1.5.3.1 Les fluides newtoniens

Un fluide est dit newtonien lorsque sa viscosité ne dépend ni de sa vitesse de cisaillement, ni du temps pendant le quelle liquide est cisailé. La plupart des fluides usuels (eau, huile, jus non concentré, lait...) sont des fluides newtoniens. Le fluide newtonien est décrit par la loi suivante [13]:

$$\tau = \mu \dot{\gamma}$$

Avec :

μ : la viscosité [Pa.s]

τ : la contrainte de cisaillement [Pa]

$\dot{\gamma}$: le taux de cisaillement [1/s]

1.5.3.2 Les fluides non-newtoniens

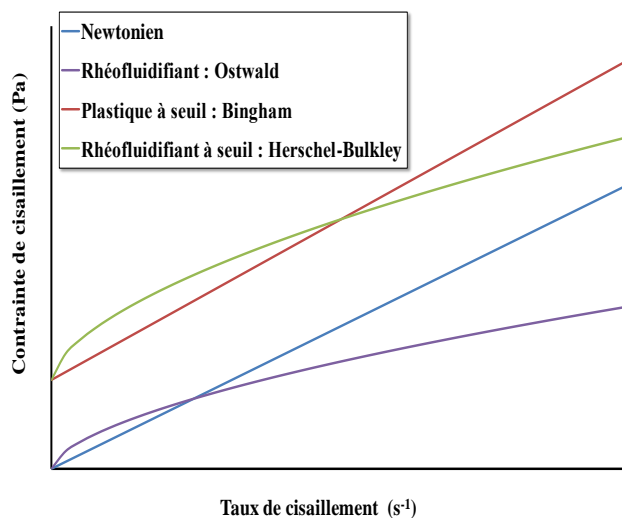
Un fluide est dit non newtonien lorsque le tenseur des contraintes visqueuses n'est pas une fonction linéaire du tenseur des taux de déformation. Il existe de nombreux comportements dans la famille des fluides non-newtoniens : les fluides à seuil, les rhéofluidifiants, les rhéoépaississants, etc.... [64].

Le fluide à seuil, est défini par une rhéogrammes présentant une contrainte critique appelée seuil d'écoulement ou seuil de cisaillement. Le seuil de cisaillement représente la contrainte minimale qu'il faut appliquer sur le fluide pour avoir un écoulement. Au-delà du seuil de cisaillement, le fluide à seuil peut avoir un comportement plastique comme les fluides de Bingham ou un comportement rhéofluidifiants ou rhéoépaississants comme les fluides de [65].

Le rhéofluidifiants, appelé pseudo-plastique est représenté par un rhéogrammes dont la concavité est tournée vers le bas. Pour ces fluides la viscosité décroît lorsque le cisaillement augmente. Ainsi, le liquide devient moins visqueux et donc plus fluide lorsque le cisaillement

Le rhéoépaississants, appelé dilatant, est représenté par une rhéogrammes dont la concavité est tournée vers le haut. Ainsi, le liquide devient plus visqueux et donc plus épais lorsque le cisaillement augmente.

Les rhéogrammes et les lois de comportement de ces fluides sont consignés dans la figure ci-dessous :



Auteurs	Lois de comportement
Newton [1687]	$\tau = \mu\dot{\gamma}$
Bingham [1922]	$\tau = \tau_0 + \mu\dot{\gamma}$
Herschel-Bulkley [1926]	$\tau = \tau_0 + k\dot{\gamma}^n$
Ostwald [1925]	$\tau = A\dot{\gamma}^n$

Figure I.19 : Les comportements rhéologiques des fluides.

1.5.4 Fluide thixotrope

Les fluides à seuil s'écoulent seulement qu'après avoir dépassé le seuil de cisaillement. Si l'effort nécessaire pour maintenir un écoulement constant diminue en fonction du temps (ou si l'écoulement s'accélère en fonction du temps à effort constant), ce matériau est dit thixotrope. La figure 1.19 représente l'évolution du couple au cours d'un essai rhéométrique. Pour un fluide idéal le couple est proportionnel à la vitesse de rotation. Pour un béton un effet de thixotropie est observé suite à un changement de la vitesse de rotation. Cet effet est représenté schématiquement sur la Figure I.19. La différence est du eau comportement thixotrope du béton qui crée un retard dans la réponse du matériau [66].

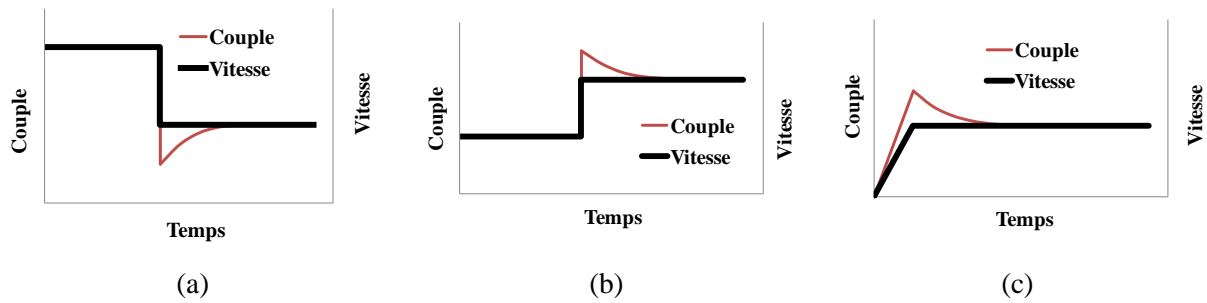


Figure I.20 : Exemples des courbes d'écoulement. (a)diminution de la vitesse de rotation; (b) augmentation de la vitesse de rotation;(c)augmentation de la vitesse de rotation après une [66].

1.6 Conclusion

Grâce à notre étude approfondie du sujet, nous concluons que le sable recyclé a un taux d'absorption très élevé, ainsi que le sable concassé, ce qui entraîne un problème à l'état frais (maniabilité) et à l'état durci ainsi que l'influence les comportements rhéologiques (viscosité).

Chapitre 2 Matériaux et méthodes expérimentales

2.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous abordons deux parties d'études expérimentales qui se concentrent sur la création et la caractérisation des échantillons utilisés pour la formulation du mortier et l'étude rhéologique des mortiers ainsi que sur les essais et les techniques expérimentales à l'état frais et durci. Nous avons d'abord pris en compte la disponibilité des matériaux au niveau locale.

2.2 Matériaux utilisés

2.2.1 Ciment

Un ciment de type AL ESSES CEM I 42.5 N SR5, conçu pour résister aux sulfates, a été utilisé pour la confection de différents mélanges. Il est idéal pour les ouvrages en contact avec des milieux agressifs tels que l'eau, le sol et l'air. Ce ciment provient de l'usine d'Amouda Cement à El – Beidha (cf, figure II.20). les caractéristiques du ciment utilisé sont regroupés dans les tableaux II.5 et II.6.



Figure II.21: Ciments utilisés CEM I 42.5 N SR5.

Tableau II.4 : Propriétés chimique du ciment.

Propriétés chimique	Résultats moyen
SO ₃	1.9653%
SiO ₂	14.6171%
Al ₂ O ₃	6.0583%
Fe ₂ O ₃	5.5208%
CaO	70.6134%
C ₃ A	5%

Tableau II.5 : Propriété physiques et mécaniques du ciment.

Propriétés physique et mécanique	Résultats moyens
Surface spécifique	2657
Masse volumique	3.24/3.22
RC après 2 Jours (MPa)	> 10
RC après 28 Jours (MPa)	42.5 < R < 62.5
Délai de prise (min)	> 60

2.2.2 Super plastifiants

Nous avons opté pour l'utilisation d'un super plastifiant haut réducteur d'eau de troisième génération, produit par la société algérienne Granitex et commercialisé sous le nom de MEDAFLOW 30 (voir Figure II.21). La compatibilité avec le ciment CEMI 42,5R entraîne une amélioration significative des caractéristiques des bétons et des mortiers à l'état frais. Le MEDAFLOW 30 peut être utilisé de 0,5% à 2% du poids de ciment sous forme de liquide jaunâtre. Sa densité, son pH et son extrait sec sont respectivement de 1,07, 6, et 30%, avec une teneur en chlore inférieure à 1 [g/l].



Figure II.22 : Super plastifiant haut réducteur d'eau.

2.2.3 Eau de gâchage

Les mortiers sont fabriqués à partir de l'eau du robinet. Cette eau est apte à la consommation, elle respecte toutes les exigences de la norme NF P18-303.

2.2.4 Sable

Dans cette étude, nous avons choisi 3 sables.

- ✓ Sable concassé ;
- ✓ Déchets de briques ;
- ✓ Déchets de béton de démolition.

2.2.5 La préparation des sables

2.2.5.1 Sable concassée

Dans cette étude, nous avons choisi le sable concassé de dimension 0/3 de carrière ben Brahim région Zelfana Ghardaïa de la nature calcaire . La figure II.22 représente le sable de concassage.



Figure II.23 : Le sable concassée.

2.2.5.2 Déchets de brique

Dans notre étude, nous avons utilisé les déchets de brique. C'est-à-dire des débris de briques creuses trouvés dans le dépôt de matériaux de construction situé à la wilaya de Ghardaïa sidi Abaz.

2.2.5.2.1 Broyage de déchets de brique

La Figure II.23 représente le broyage de déchets brique.



Figure II.24 :Broyage de déchets de brique.

2.2.5.2.2 Tamisage de déchets de brique

En utilisant un tamis de 0.5 mm.



Figure II.25 : Tamisage de déchets de brique.

2.2.5.3 Sable recyclé (sable de béton)

Nous avons utilisé des déchets de béton. C'est-à-dire de collecter les déchets des éprouvettes cylindriques de béton situées dans LTPS Ghardaïa (cf. II.25).



Figure II.26: Des éprouvettes cylindrique de béton.

2.2.5.3.1 Broyage de déchets de béton

La figure II.26 représente le broyage de déchets de béton.



Figure II.27 : Broyage de déchets de béton.

2.2.5.3.2 Tamisage de déchets de béton

En utilisant un tamis de 0.5 mm.



Figure II.28 : Tamisage de déchets de béton.

2.3 Caractéristiques des matériaux

2.3.1 Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique a été réalisée selon la norme NF EN 933-1, à l'aide d'une tamiseuse électrique (figure II.28) où le sable passe à travers une série de tamis décroissante des mailles en (mm) 4 ; 2 ; 1 ; 0.500 ; 0.250 ; 0.125 ; 0.080.



Figure II.29 : Tamis d'analyse granulométrique.

A partir de l'analyse granulométrique on peut déterminer les caractéristiques des granulats et en particulier le module de finesse des sables. On a précisé à partir de la granulométrie des trois sables le module de fines : il ne fallait pas dépasser la valeur qui est dans l'intervalle (9-11).

- ✓ $M_f = 10 \%$ pour déchets de brique ;
- ✓ $M_f = 10 \%$ pour déchets de béton ;
- ✓ $M_f = 11 \%$ pour le sable concassée.

La courbe granulométrique présentée dans la figure II.29.

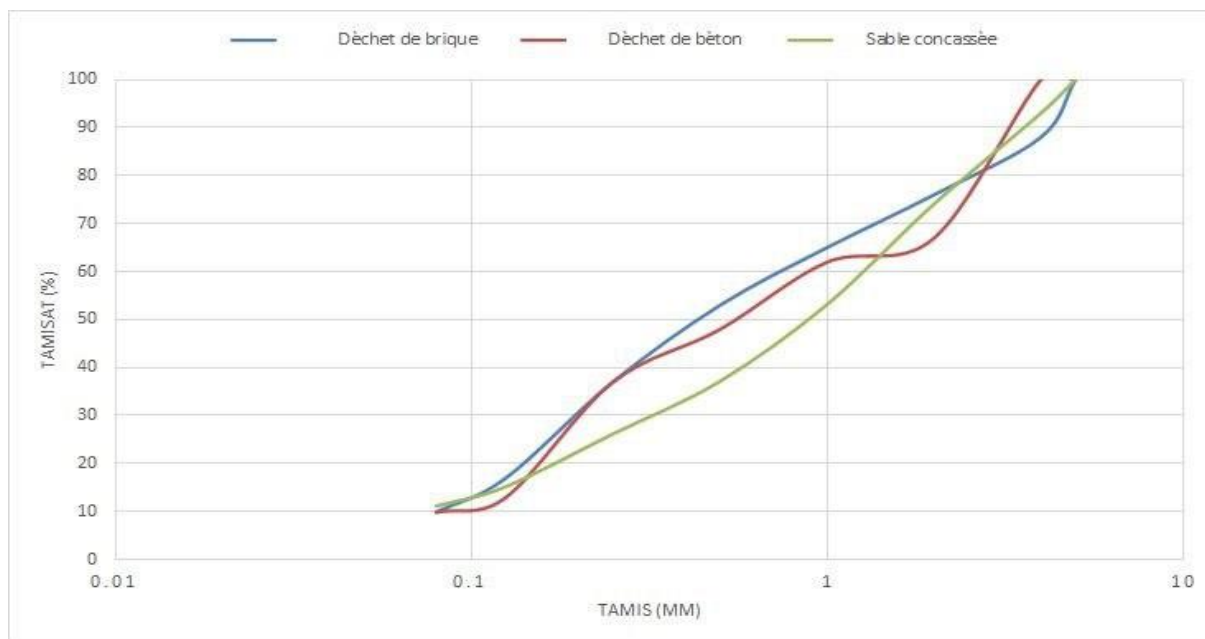


Figure II.30: La courbe d'analyse granulométrique.

2.3.2 Equivalent de sable

L'équivalent de sable (E_s) permet de contrôler la propreté d'un sable et de déterminer le pourcentage des poussières nuisibles. Il a été réalisé conformément à la norme NF P 18-598. Cet essai consiste à plonger une masse de sable dans une éprouvette normalisée remplie par une solution lavante, après agitation, on laisse décanter le mélange pendant 20 minutes, (Figure II.30) ensuite on mesure la hauteur du sédiment (h_1) et du sédiment + flocculant (h_2). L'équivalent de sable est donné par la relation suivante :

$$E_s = 100 \cdot \frac{h_1}{h_2} \quad (3.1)$$



Figure II.31: Essai d'équivalent de sable.

Tableau II.6: Résultats de l'essai ES.

Matériaux	ES		Moyenne
Sable concassée	50.25 %	48%	49.12%
Sable de brique	83.05 %	90.48%	86.76%
Sable de béton	72.46%	72.46%	72.46%

Commentaire :

- Par rapport au sable concassée est un sable légèrement argileux de propriété admissible pour bétons de qualité courante quant on ne craint pas particulièrement le retrait.
- D'après la moyenne de ES on constate que : par rapport au sable de brique est très propre et au sable de béton est propre.

2.3.3 La masse volumique

a) La masse volumique spécifique

On entend par masse spécifique la masse de l'unité de volume absolue d'un corps (volume matière plein). L'essai consiste à introduire dans une éprouvette graduée remplie d'un volume d'eau (V_1), une masse de sable (M_a) et on mesure le volume de l'eau et le sable soit (V_2). La masse volumique spécifique du sable peut être calculée par la formule :

$$\gamma_{abs} = \frac{M_a}{V_1 - V_2} \quad (3.2)$$

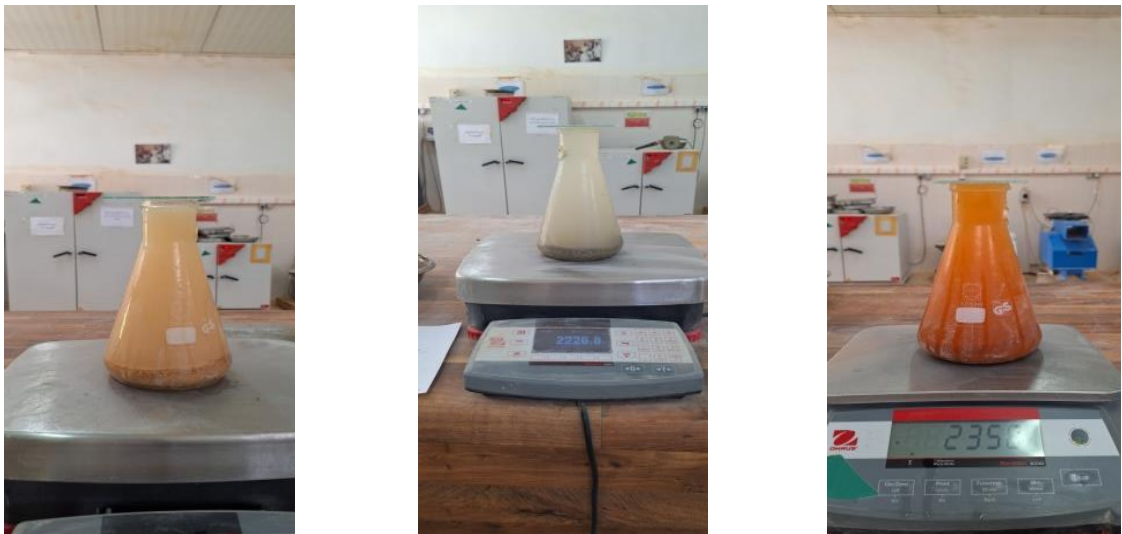


Figure II.32 : Essai de la masse volumique spécifique.

b) La masse volumique apparente

C'est la masse du matériau par unité de volume y compris des vides existant entrées grains. Pour déterminer les masses volumiques apparentes du matériau, c'est - à - dire sa densité à l'état naturel (en présence des pores).

$$\gamma_{app} = \frac{M2 - M1}{V} \quad (3.3)$$



Figure II.33 : Essai de la masse volumique apparente.

Tableau II.7 : Résultats de l'essai de la masse volumique.

Matériaux	Masse volumique apparente	Masse volumique absolue
Sable de béton	1.47 g/cm ³	2.23 g/cm ³
Sable de brique	1.29 g/cm ³	2.25 g/cm ³
Sable concassée	1.55 g/cm ³	2.58 g/cm ³

Commentaire :

On remarque que la valeur trouvée de la masse volumique absolue des sables utilisée est dans l'intervalle théorique qui varie entre 2.5 et 2.65 (g/cm³).

2.3.4 Coefficient d'absorption

Le coefficient d'absorption d'eau est défini comme le rapport de l'augmentation de masse de l'échantillon entraînée par imbibition partielle en eau, à la masse sèche de l'échantillon dans l'eau pendant 24 heures à 20 °C à la pression atmosphérique.

On procède à un pré-séchage avec un séchoir pour éliminer l'eau entre les grains, pour le sable il faut utiliser le cône et le piston jusqu'à ce que le sable ne sera pas cohérent et par la suite le mettre à l'étuve au point où la masse reste constante et ne change pas. Donc le coefficient d'absorption du sable A_{bs} est déterminé par la formule suivante :

$$A_{bs} = \frac{Mh - Ms}{Ms} \quad (3.4)$$



Figure II.34: Les trois sables sont immergés dans l'eau pendant 24h.



Figure II.35 : Essai de l'absorption du sable.

Tableau II.8 : Résultats de l'essai absorption .

Matériaux	Absorption
Sable de béton	8.22 %
Sable de brique	2.86 %
Sable concassée	4.02 %

Commentaire :

On remarque que le taux d'absorption du sable de béton est deux fois supérieur à celui du sable concassé . Quant au sable de brique on obtient un taux d'absorption très faible par rapport aux autres sables et il a également le même taux d'absorption que le sable naturel .

2.4 Composition de mortier

On a choisi une formulation normale pour un mortier. Aussi nous avons préparé plusieurs mélanges de mortier dans des pourcentage (25%,50%,75%,100% et saturé) qui changent en fonction de taux d'absorption par 24 heures. Dans le cas du sable saturé ; on immerge le sable dans l'eau pendant 24 heures avant de commencer le malaxage de ce mélange. On le goutte au niveau d'un chiffon ou de tout ce qui absorbe l'excès d'eau pour que le sable devienne un état saturé à surface sèche.

Concernant le super plastifiant (SP) on a fixé les pourcentages 0.6 % et 0.7% d'après plusieurs essais on a opté un affaissement plus que 5 cm .

2.4.1 Composition du mortier avec le sable concassé et le déchets de béton

Tableau II.9 : Composition du mortier à base de sable concassé.

Degré d'absorption	E/C	Ciment(g)	Sable (g)	E (g)	E _c (g) corrigé	SP (%)	SP(g)
25%	0.55	450	1350	247.5	258.86	0.7	3.15
50%	0.55	450	1350	247.5	272.43	0.7	3.15
75%	0.55	450	1350	247.5	285.99	0.7	3.15
100%	0.55	450	1350	247.5	299.56	0.7	3.15
Saturé	0.55	450	1350	247.5	245.29	0.7	3.15

Tableau II.10 : Composition du mortier a base déchets de béton.

Degré d'absorption	E/C	Ciment (g)	Sable (g)	E (g)	E _c (g) corrigé	SP (%)	SP(g)
25%	0.55	450	1350	247.5	273.35	0.6	2.7
50%	0.55	450	1350	247.5	301.09	0.6	2.7
75%	0.55	450	1350	274.5	311.82	0.6	2.7
100%	0.55	450	1350	247.5	356.58	0.6	2.7
Saturé	0.55	450	1350	247.5	245.61	0.6	2.7

2.4.2 Préparation du mortier

- 1) Comme première étape de la préparation du mortier, nous avons pesé individuellement tous les composants du mortier pour chaque formulation du tableau.
- 2) Deuxièmement pour l'étape de malaxage selon la norme **EN 196-1** ;
 - Introduire l'eau + SP en premier dans la cuve du malaxeur ; y verser ensuite le ciment aussitôt après mettre le malaxeur en marche à vitesse lente pendant 30 secondes ;

- Puis introduire régulièrement le sable pendant les 30 s suivants ; mettre alors le malaxeur à sa vitesse rapide et continuer le malaxage pendant 30 s supplémentaires ;
- Arrêter le malaxeur pendant 15 secondes ; enlever au moyen d'une raclette tout le mortier adhérent aux parois et au fond du récipient en le repoussant vers le milieu de celui-ci ;
- Reprendre ensuite le malaxage à grande vitesse pendant 60 s.
- Cette opération de malaxage sont récapitulées dans le tableau II.12.

Tableau II.11 : Opérations du malaxage du mortier.

Opérations	Introduction de l'eau	Introduction du ciment		Introduction du sable	Raclage de la cuve		
Durée			30 s	30 s	15 s	1 min 15 s	60 s
Etat du malaxeur	Arrêt		Vitesse lente		Arrêt		Vitesse rapide

- 3) Troisièmement, nous avons confectionné 3 séries, chacune d'elles nous l'avons faite de 45 éprouvettes de dimensions (4×4×16) cm.
- 4) Coulage des éprouvettes :
 - Nous avons enduit avec de l'huile fine que le mortier ne se colle pas aux parois de celles-ci.
 - Le mortier est prêt. Nous versons une quantité suffisante dans un moule ; la mise en place est réalisée par vibration (table de choc).
- 5) Démoulage et conservation des éprouvettes : Après une période de 24 heures, les échantillons sont retirés et placés dans un bassin d'eau, puis placés dans la chambre de conservation à une température de 20 ± 5 °C et à une humidité relative de 97 ± 5 % dans une période de 3et 7 et 28 jours.



Figure II.36 : Le malaxeur à mortier.



Figure II.37 : Lubrification les moules.



Figure II.38 : Démoulage des moules.



Figure II.39 : Chambre humide.

2.5 Les essais réalisés

2.5.1 Essai physique

a) La masse volumique apparent

Elle est définie comme le rapport de la masse de l'échantillon à son volume apparent à l'état sec.

La masse volumique est déterminée juste avant l'essai mécanique, et elle est calculée à l'aide de la formule suivante :

$$P = M / V$$

- ✓ **M** = Masse de l'éprouvette ;
- ✓ **V** = Volume de l'éprouvette.



Figure II.40 : Essai de la masse volumique des éprouvettes.

2.5.2 Essais mécaniques

✓ Essai de traction par flexion

La résistance à la traction a été évalué en utilisant des éprouvettes de dimensions (4×4×16) cm. On effectue les mesures sur une presse conforme aux normes actuelle équipé d'un banc de flexion à 3 points cette expérience permet d'évaluer la résistance à la flexion du mortier étudié lors de la traction Il s'agit de l'essai le plus répandu cela implique de briser en flexion une éprouvette.

En utilisant une machine de résistance à la flexion capable d'appliquer des charges jusqu'à 20 KN, on a évalué les résistances à la traction du mortier durci. Cette machine est équipée d'un dispositif de flexion à 3 points (Figure II.40). La mesure de résistance prise en compte représente la contrainte d'écrasement moyenne de trois échantillons.

On calcule la résistance à la flexion en utilisant l'équation suivante :

$$R_t = 1,5F_f \cdot L / b^3$$

R_t: Résistance à la traction en MPa ;

F_f: Charge à la rupture en N ;

L : Distance entre axes des rouleaux d'appuis de l'éprouvette 40x40x160 mm (L= 100 mm) ;**b**: Largeur de la section carrée du prisme en mm (b = 40 mm).



Figure II.41 : Essai de traction par flexion .

✓ Essai de compression

On évalue la résistance à la flexion d'un mortier en le chargeant en trois points jusqu'à ce que les éprouvettes moulées en mortier durci se rompent.

On évalue la résistance à la compression du mortier en examinant les deux parties qui en découlent. L'objectif de l'essai est de déterminer la résistance à la compression La charge de l'éprouvette étudiée augmente progressivement jusqu'à ce qu'elle rupture .

La charge de rupture correspond à la charge maximale observée pendant l'essai on a évalué les résistances en compression en utilisant une machine d'essai en compression hydraulique le dispositif de compression pour les moules de mortiers est présente dans figure II.41.La résistance prise en compte est la moyenne de la contrainte d'écrasement de trois échantillons.

On calcule la résistance à la compression en utilisant l'équation :

$$R_c = F_c / b^2$$

R_c: résistance à la compression en (MPa) ;

F_c: Charge de rupture en (N) ;

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



Figure II.42 : Essai de compression.

2.6 La rhéologie

2.6.1 Essai rhéologique

L'équipe de recherche de l'université de Cergy Pontoise a développé un rhéomètre de type Couette (Figure II.42). On considère généralement ce type comme le plus approprié pour des suspensions concentrées avec un seuil de cisaillement. Il s'agit de tourner, à différentes vitesses, un cylindre ou une pale dans un échantillon cylindrique de mortier frais et de mesurer le couple appliqué. Par rapport à l'insertion d'un cylindre, l'utilisation d'une pale a été privilégiée, car son insertion dans l'échantillon entraîne une perturbation minimale, ce qui est un avantage pour les matériaux thixotropes tels que le mortier. Une fois que l'affaissement a été mesuré, le mortier préparé est versé dans le récipient qui sera fixé afin d'éviter toute perturbation. L'essai rhéologique se déroule selon les étapes suivantes :

- 1^{ère} étape : mesure des couples à vide (M_{vide}). Ils correspondent aux couples à imposer pour maintenir les vitesses en phase de palier lorsque le récipient est vide.
- 2^{ème} étape : positionnement de la pale. Elle est centrée (suivant le diamètre du récipient) puis plongée au milieu la pale jusqu'à l'arase du mortier.
- 3^{ème} étape : mesure des couples totaux (M_{total}). Ils correspondent aux couples à imposer pour maintenir les vitesses en phase de palier lorsque le récipient est rempli.
- 4^{ème} étape : calculs des couples finaux (M). Les couples finaux s'obtiennent par la différence entre les couples totaux et les couples à vides pour chaque palier de vitesse.
- 5^{ème} étape : exploitation des mesures et calculs des paramètres rhéologiques.



Figure II.43 : Rhéomètre utilisé.

2.6.2 Profile de vitesse

Le choix du profil de vitesse est basé sur une série d'essais visant à trouver le profil de vitesse qui permet d'obtenir les mesures les plus stables en réduisant au minimum le phénomène de ségrégation. Le profil utilisé doit posséder une quantité adéquate de points afin de pouvoir évaluer de manière précise le comportement du mortier. Il est nécessaire d'écarter les paliers de vitesse imposés afin de bien différencier les différentes paires (Ω , M). La Figure II.43 représente le profil sélectionné pour la réalisation des essais.

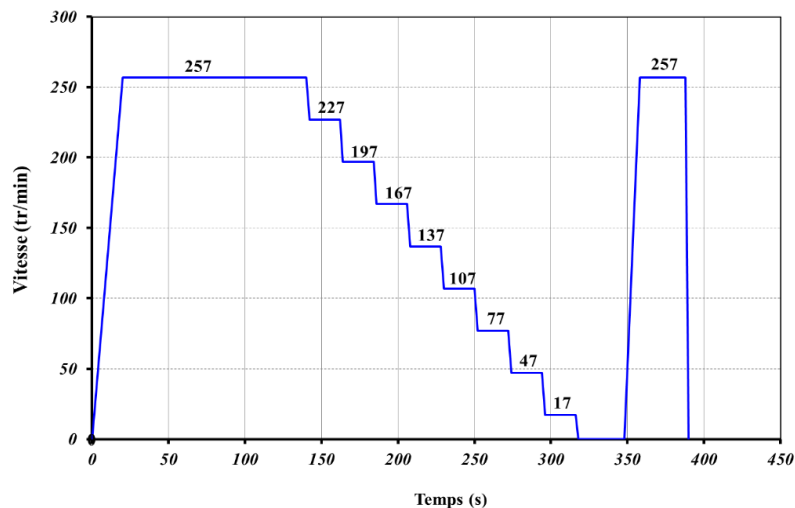


Figure II.44 : Profile de vitesse utilisée.

2.6.3 La composition

Dans cette étude, nous avons choisi la même méthode de malaxage. La seule chose qui diffère par rapport à l'étude mécanique, c'est la **formulation**.

Dans cette étude, nous avons choisi la même méthode de malaxage, la seule différence par rapport aux composants, c'est-à-dire les quantités de composition liées à l'étude de la mécanique multipliant le volume du récipient par 1,2 litre.

Dans le cas de saturé nous avons fait la même préparation du sable sauf que la quantité d'eau corrigée ils sont calculés comme suit :

La quantité de sable pesé (1) \longrightarrow 100%(3)

Résultat de (2) \times (1) / (3) \longrightarrow taux d'absorption (24h) (2)

Puis on somme la quantité de sable pesé avant l'immersion avec la nouvelle quantité correspondent.

Tableau II.12 : Composition du déchet de béton pour 1.2 litre.

Degré d'absorption	Ciment (g)	Sable (g)	Eau (g)	SP (%)	SP (g)
25%	540	1620	328.77	0.6	3.24
50%	540	1620	361.30	0.6	3.24
75%	540	1620	374.19	0.6	3.24
100%	540	1620	427.89	0.6	3.24
Saturé	540	1620	294.73	0.6	3.24

Tableau II.13 : Composition de sable concassée pour 1.2 litre.

Degré d'absorption	Ciment (g)	Sable (g)	Eau (g)	SP (%)	SP (g)
25%	540	1620	310.63	0.7	3.78
50%	540	1620	326.91	0.7	3.78
75%	540	1620	343.19	0.7	3.78
100%	540	1620	359.47	0.7	3.78
Saturé	540	1620	294.35	0.7	3.78

2.6.4 Essai d'ouvrabilité

L'état frais de tous les mortiers est analysé, l'affaissement est mesuré à l'aide d'un mini cône. L'essai d'affaissement est l'essai normalisé le plus utilisé pour la mesure de l'ouvrabilité [67]. Il implique de remplir le mini-cône avec trois couches de volumes similaires et de les piquer 15 fois chacune. Ensuite, on arase la surface du mini-cône et on le soumet en ± 2 secondes, en le soulevant de manière verticale. Après avoir soulevé le mini-cône, évaluer l'affaissement au niveau du point le plus élevé. Le mini-cône, illustré dans la Figure II.44, a des dimensions réduites par rapport au cône d'Abrams [68] (rapport d'homothétie de deux).



Figure II.45 : Essai d'affaissement au mini cône.

Chapitre 3 . Discussion des résultats expérimentaux

3.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats du travail expérimental réalisé au niveau de laboratoire du LTPS wilaya de Ghardaïa et du laboratoire du génie civil de l'université de Laghouat.

Notre étude consiste à examiner l'effet du degré d'absorption du sable recyclé (sable de béton) et du sable concasse sur les propriétés mécaniques et rhéologiques du mortier de ciment puis Nous examinerons et interpréterons les résultats des essais sur mortiers à étude mécanique et rhéologique.

3.2 Résultats de la cinétique d'absorption

La figure III.45 représente la cinétique d'absorption du sable de béton en fonction du temps. On remarque une augmentation significative de l'absorption avec le temps, il atteint plus de 80% de saturation à 50 minutes. Après ce point, la courbe devient stable jusqu'à 24 heures ; ce qui indique le sable a atteint presque le degré de saturation après 100 minute.

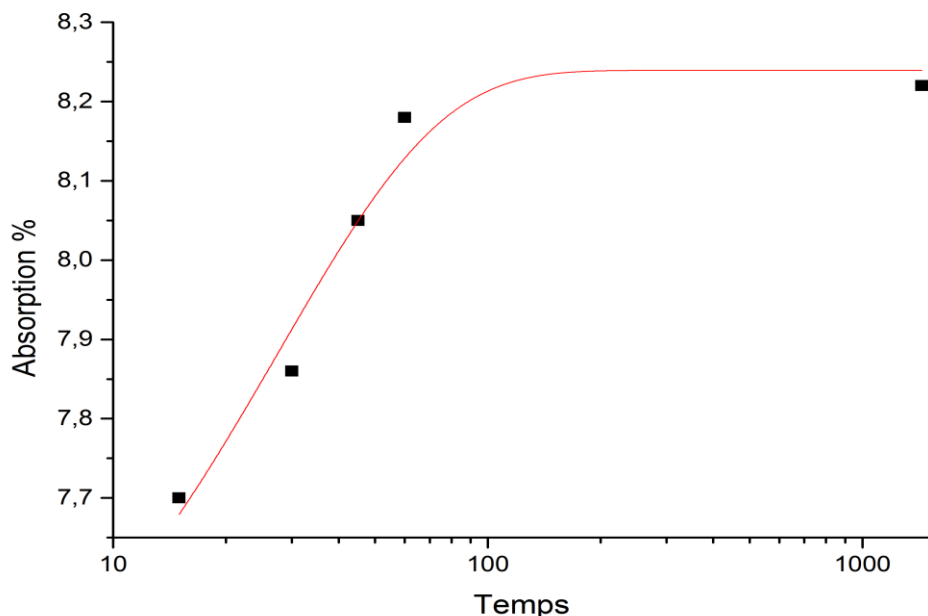


Figure III.46 : La cinétique d'absorption du sable de béton.

La figure III.46 représente la cinétique d'absorption du sable concassé en fonction du temps. On observe une augmentation notable de l'absorption de 15min ; 30min, 1h et 1h30. Après cet intervalle, la courbe reste constante jusqu'à 24 heures, témoignant d'une augmentation graduelle et continue jusqu'à ce que l'absorption atteigne 90% de là l'absorption totale du sable concassé.

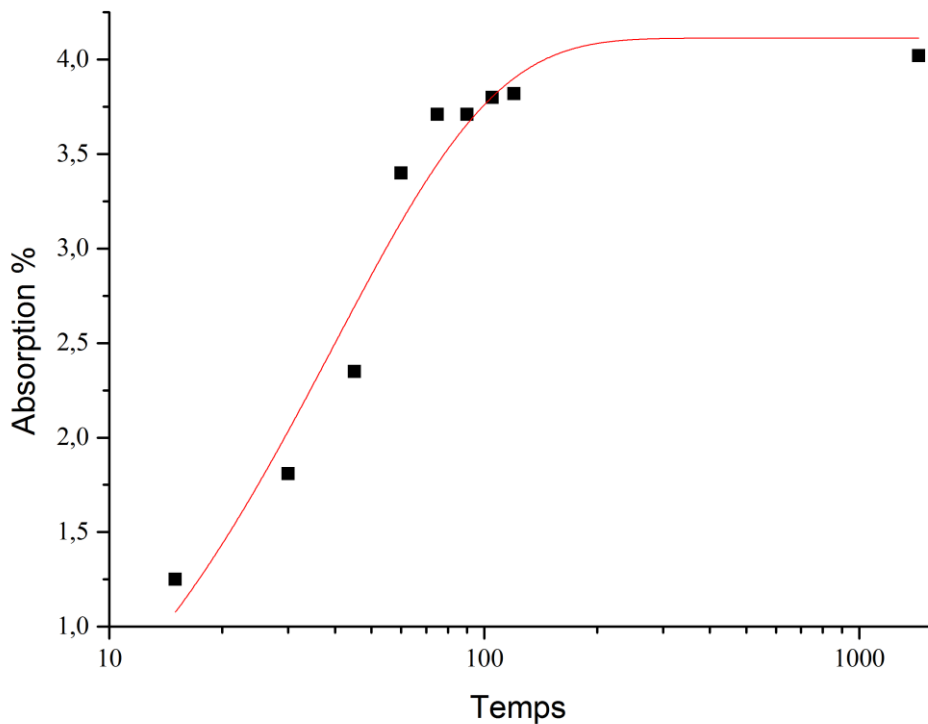


Figure III.47 : La cinétique d'absorption du sable concassé.

3.3 Etude rhéologique

Les sables employés dans ce travail, sont des sables recyclés comme déchets de béton et sable de concassage sont des matériaux proviennent de deux sources différentes. On collecte les déchets des éprouvettes cylindriques de béton situées dans LTPS Ghardaïa et l'autre un sable concassé de dimension 0/3 de carrière ben Brahim région Zelfana Ghardaïa. Ce sont des matériaux alternatifs pour la construction, fabriqués par concassage et broyage des déchets.

Chapitre III. Discussion des résultats expérimentaux

La mise en place d'un programme expérimental vise à analyser le comportement rhéologique de deux types de sables : les déchets de béton (SB) et le sable de concassé (SC). Dans un premier temps, nous avons effectué des essais d'ouvrabilité afin d'étudier l'impact des degrés de saturation sur le l'écoulement du mortier (essai d'affaissement et/ou d'étalement). Ensuite, nous avons effectué un essai avec un rhéomètre adapté développé au laboratoire L2MGC à Cergy. L'élaboration des éprouvettes prismatiques de mortiers de béton équivalent est la conclusion de ce travail. Ces éprouvettes ont été démoulées et stockées dans de l'eau saturée en chaux à une température de 20 °C jusqu'à 3, 7, et 28 jours après l'écrasement.

Tableau III.14 : Résultats des paramètres rhéologiques des mortiers à base de sable concassé (SC).

Degré d'absorption	25%	50%	75%	100%	Saturé
Aff (cm)	5	5	12.5	13	12
μ (Pa.s)	7,802	10,824	2,798	2,014	4,784
τ_0 (Pa)	24,510	34,005	8,789	7,219	15,031

Tableau III.15 : Résultats des paramètres rhéologiques des mortiers à base de déchets de béton (SB).

Degré de d'absorption	25%	50%	75%	100%	Saturé
Aff (cm)	7	11,5	13	13,5	12,2
μ (Pa.s)	11,657	4,108	10,415	2,007	1,954
τ_0 (Pa)	36,622	12,906	32,720	6,304	6,139

3.1.1 Paramètres rhéologiques

Le comportement rhéologique est défini par leur paramètres (viscosité plastique et seuil de cisaillement).

La figure III.47 représente une comparaison des viscosités plastiques pour les deux sables. Pour le sable concassé (SC), on remarque une augmentation de la viscosité plastique de 25% à 50% de taux d'absorption. Au-delà de 50%, une chute de la viscosité plastique est observée avec l'augmentation de degré de saturation jusqu'à 100%. Pour le SC saturé pendant 24h, on constate une augmentation de la viscosité.

Pour le sable de béton (SB), la viscosité plastique diminue avec l'augmentation du degré d'absorption de 25% à 50%. Une augmentation de la viscosité est ensuite observée à 75% de saturation pour chuter au-delà de cette valeur.

Ces changements de viscosité plastique sont du probablement à la variation de quantité d'eau qui joue un rôle important dans la variation de la viscosité de la pâte de ciment qui représente la couche lubrifiante de l'écoulement.

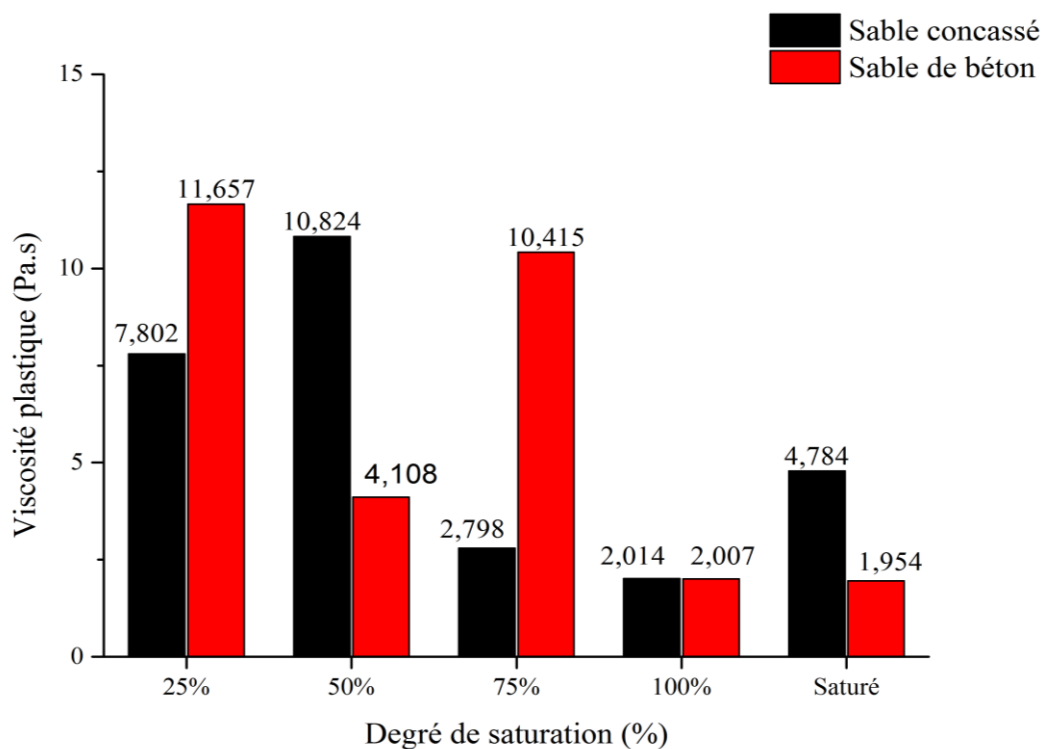


Figure III.48 : Variation de la viscosité plastique pour les deux types de sables (SB) et (SC).

La figure III.48 représente une comparaison des seuils de cisaillements pour les deux sables (SB) et (SC). Au cas de sable concassée on remarque une chute libre au niveau de degré de saturation de 50% à 75% sa valeur estimée 8,78 Pa puis une diminution légère à 100% ce qui entraîné une augmentation au niveau de saturation (saturé). Par rapport au (SB) une chute

brutale de 12,90 Pa de 25% à 50% suivi une légère augmentation avec l'augmentation de degré de saturation puis une chute libre de seuil de cisaillement avec l'augmentation de degré de saturation de 100% à saturé.

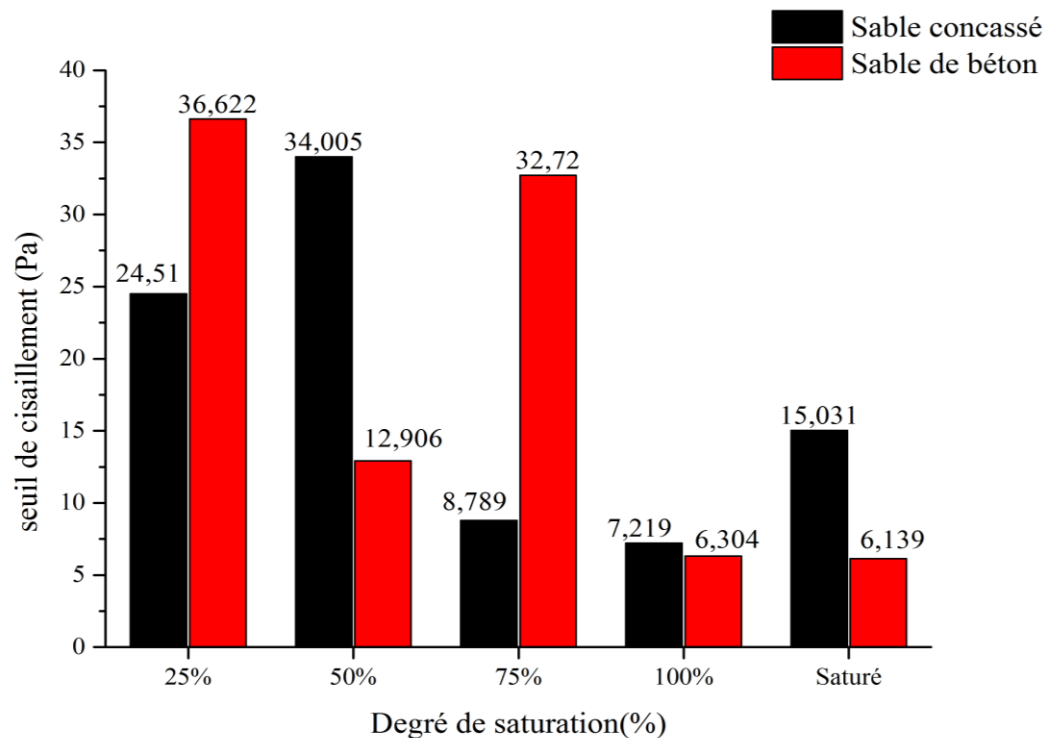


Figure III.49 : Variation de seuil de cisaillement pour les deux types de sables (SB) et (SC).

3.1.2 L'affaissement au mini cône

La figure III.49 représente les résultats de l'essai d'affaissement en fonction des degrés de saturations. D'après les résultats on constate une augmentation de la fluidité des mortiers avec tous les degrés de saturations testé par rapport au mortier de base ; on remarque aussi que l'affaissement plus élève est obtenu à un degré de saturation 100% Pour les deux sables SC et SB avec une valeur de 13 ; 13,5 cm de l'ordre de 8,3% et 10,47% pour les deux sables respectivement. On observe qu'au-delà du niveau de saturation une légère baisse d'affaissement pour les deux sables.

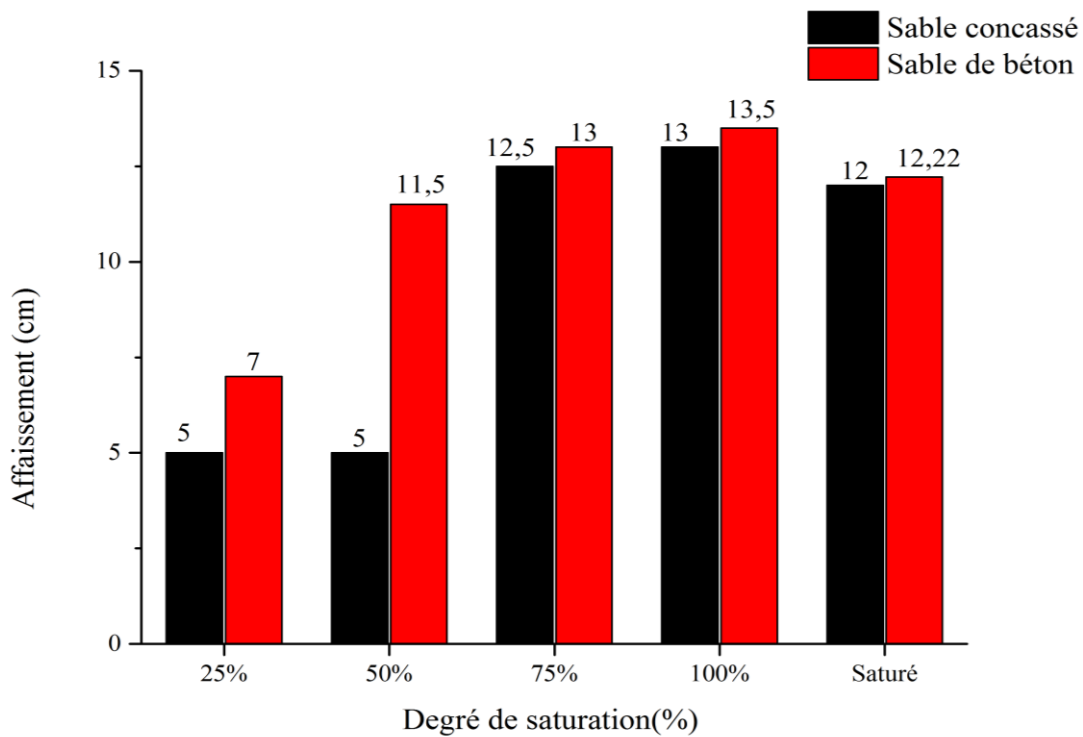


Figure III.50 : Variation d'affaissement en fonction de deux types de sables.

3.4 Corrélation entre le seuil de cisaillement et l'affaissement

3.4.1 Déchets de béton (Sb)

La figure III.50 représente l'évolution de seuil de cisaillement en fonction de l'affaissement pour les mortiers de déchets de béton (Sb). Selon la figure lorsque l'affaissement augmente le seuil de cisaillement diminue de manière significative. Il semblerait que le seuil de cisaillement soit influencé par l'affaissement on peut expliquer cela par le fait que l'interaction intergranulaire influence le seuil de cisaillement de la même manière que l'affaissement. Cette évolution montre qu'il y a une corrélation entre l'affaissement et le seuil de cisaillement d'écoulement ; une simple corrélation peut être suggérée pour évaluer le seuil de cisaillement en utilisant une équation de 1^{er} degré suivante :

$$y = a x + b$$

$$y = 70,90748x - 5,01491$$

$$R^2 = 0,94423$$

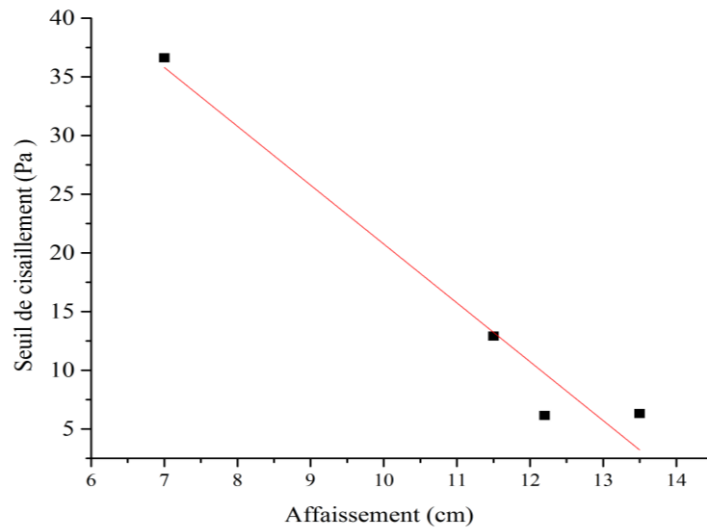


Figure III.51 : Relation entre l'affaissement et le seuil de cisaillement pour le (Sb).

3.4.2 Sable concassée (Sc)

La figure III.51 représente l'évolution de seuil de cisaillement en fonction de l'affaissement pour les mortiers de sable concassée(Sc). A partir ces résultat son montre que l'augmentation d'affaissement s'accompagne par la diminution du seuil de cisaillement. Il est clair que l'amélioration de la maniabilité des mélanges facilite l'écoulement et réduit le seuil d'écoulement ce qui rend le mortier plus maniable. Les conclusions de l'étude sur la corrélation entre l'affaissement et le seuil de cisaillement garantissent la fiabilité de l'étude rhéologique sur le mortier et confirmer la corrélation entre les tests d'ouvrabilité effectués et les tests au rhéomètre. Cette corrélation se manifeste à travers une équation de premier degré suivante :

$$y = ax+b \qquad y= 42,2345x - 2,56039 \qquad R^2 = 0.8358$$

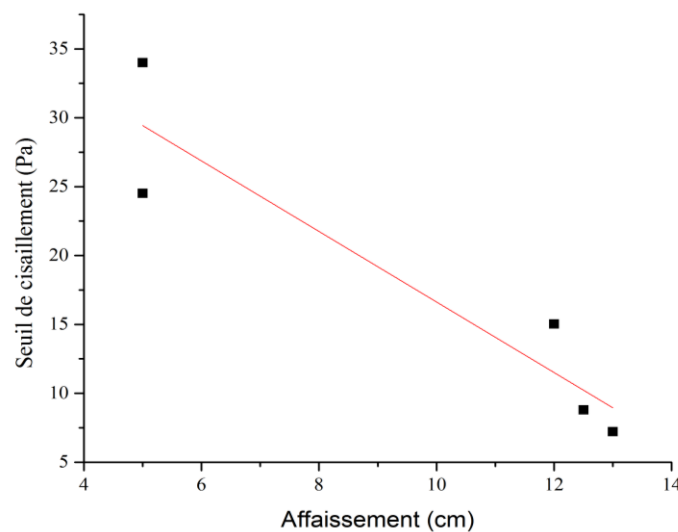


Figure III.52 : Relation entre l'affaissement et le seuil de cisaillement pour le (Sc).

3.5 Corrélation entre la viscosité et le seuil de cisaillement

3.5.1 Sable concassé

La figure III.52, illustre la relation entre le seuil de cisaillement et la viscosité plastique des mortiers avec sable concassé (SC). La figure montre que le seuil de cisaillement augmente linéairement avec la viscosité plastique. On peut suggérer une corrélation linéaire solide pour évaluer la viscosité en se basant sur le seuil de cisaillement, qui peut être estimé à partir des corrélations mentionnées précédemment. Cette relation illustre clairement l'impact que la viscosité plastique peut avoir sur le seuil de cisaillement. Cette corrélation est présentée sous la forme de l'équation linéaire suivante :

$$y = ax+by = 0,51968 x + 3,08113 \quad R^2= 0,99884$$

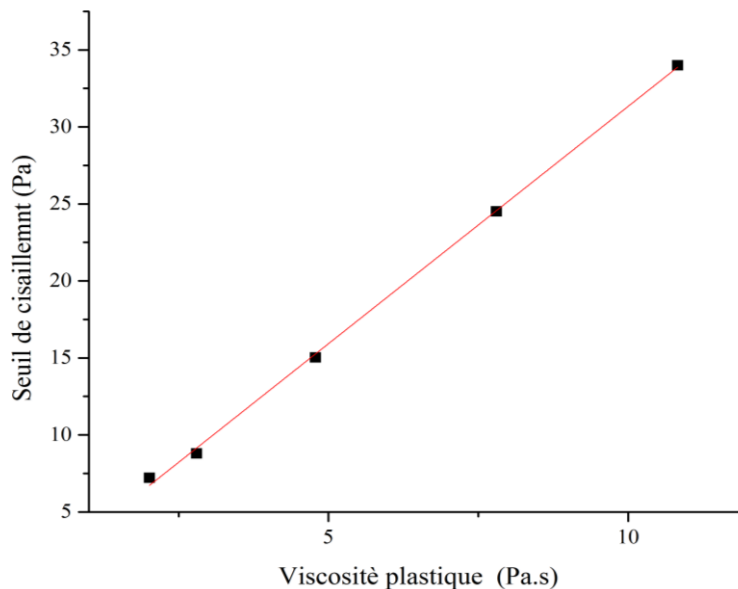


Figure III.53 : Corrélation entre la viscosité plastique et le seuil de cisaillement pour les mortiers (SC).

3.5.2 Déchet de béton (SB)

La figure III.53, représente la relation entre le seuil de cisaillement et la viscosité plastique et des mortiers avec sable de béton (SB). De même que pour le sable concassé, il existe une corrélation entre les deux paramètres rhéologiques, ce qui valide le choix de l'essai effectué et l'appareil utilisé. De plus ça nous permet d'estimer les paramètres rhéologiques dans l'avenir en utilisant ce type de sable avec un essai d'affaissement.

$$y = ax + b$$

$$y = 3,14167x - 0,0004$$

$$R^2 = 1$$

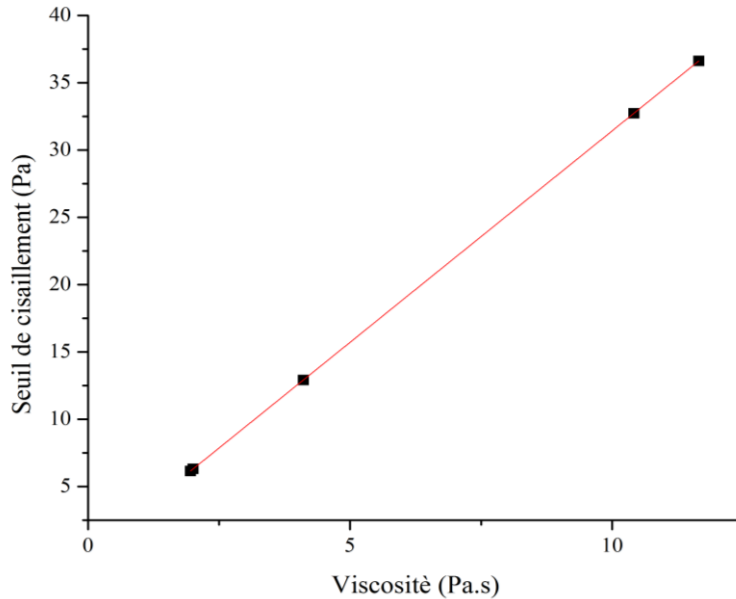


Figure III.54 : Corrélation entre la viscosité plastique et le seuil de cisaillement pour les mortiers (Sb).

Ces corrélations vont participer à la réduction des essais à effectuer. Ce qui facilite la compréhension du comportement rhéologique de ces types de mortier.

3.6 Caractérisation à l'état durci

Dans la suite de notre étude il est nécessaire de faire une étude sur le comportement mécanique à l'état durci des mortiers. L'essai consiste à étudier la résistance à la flexion et à la compression des éprouvettes de mortier avec des degrés de saturation 25% ; 50% ; 75% ; 100% ; saturé de déchets de brique de démolition et de déchets de brique pure. Dans cette étude la seule variable est (L'eau) la résistance du mortier est alors considérée comme significative du liant utilisé.

La figure III.54 représente la résistance à la flexion à 3 jours pour les deux sables : le sable concassé et le sable de béton en fonction du degré de saturation. Une diminution progressive de la résistance à la flexion à 3 jours est remarquée avec l'augmentation du degré de saturation du sable de béton de 5.62 MPa pour 25% de saturation jusqu'à 1.91 MPa pour un sable saturé. Dans le cas du sable concassé, on remarque une stabilisation de la résistance à la flexion à 3 jours avec la hausse de son degré de saturation, puis une diminution au niveau de 75 %, puis une amélioration de la résistance à la flexion au degré de saturation de 100 %. Ensuite, nous avons observé une chute de résistance surprenante après avoir atteint la saturation, dont la valeur a été estimée à 3.32 MPa.

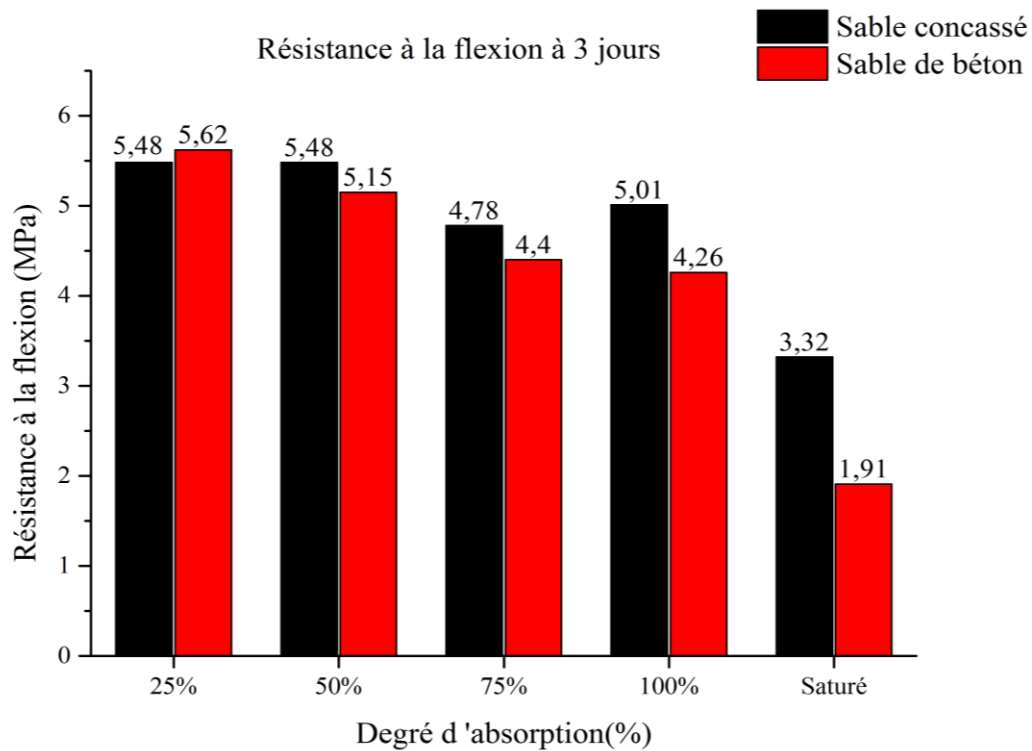


Figure III.55 : Résistance à la flexion à 3 jours.

La figure III.55 représente la résistance à la flexion à 7 jours pour les deux types de sable : le sable concassé et le sable de béton, en fonction du degré de saturation. On observe une diminution de la résistance à la flexion avec l'augmentation du degré de saturation de 25% à 100% avec 22% et 26% pour les deux sable Sc et Sb respectivement et de 25% à l'état saturé de sable avec 54% 61% pour les deux sables respectivement.

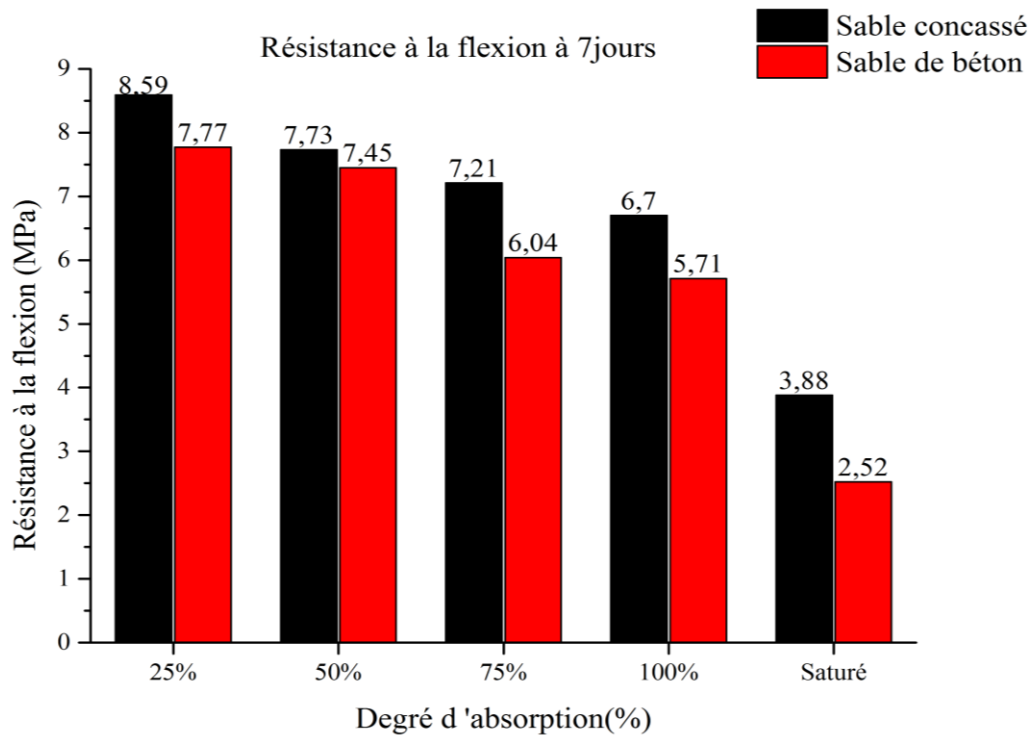


Figure III.56 : Résistance à la flexion à 7 jours.

La figure III.56 représente la résistance à la flexion à 28 jours pour les deux sables : le sable concassé et le sable de béton en fonction du degré de saturation. Pour le sable de béton on remarque une diminution progressive avec l'augmentation de degré de saturation jusqu'à 75% puis une légère augmentation vers le 100% de degré de saturation après une diminution. Pour le sable concassé on remarque une augmentation de la résistance de 25% à 50% puis une diminution à 75% de saturation ensuite on remarque une amélioration de la résistance pour de degré de saturation 100%. Une chute de la résistance a été remarqué dans le cas de sable saturé.

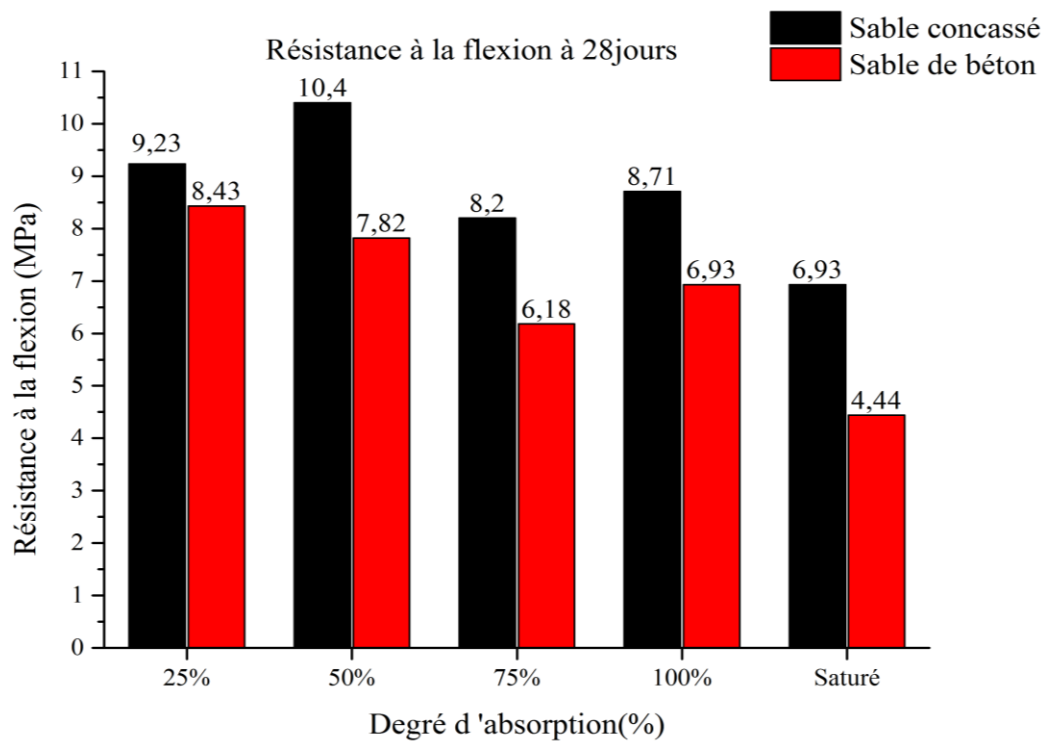


Figure III.57 : Résistance à la flexion à 28 jours.

La figure III.57 représente la résistance à la flexion à 28 jours en fonction du degré de saturation. Une légère amélioration de résistance pour Sc par rapport au Sb de 75% jusqu'à l'état saturé des deux sables a été remarquée. Les résultats montrent une diminution progressive de la résistance à la flexion avec l'augmentation du degré de saturation.

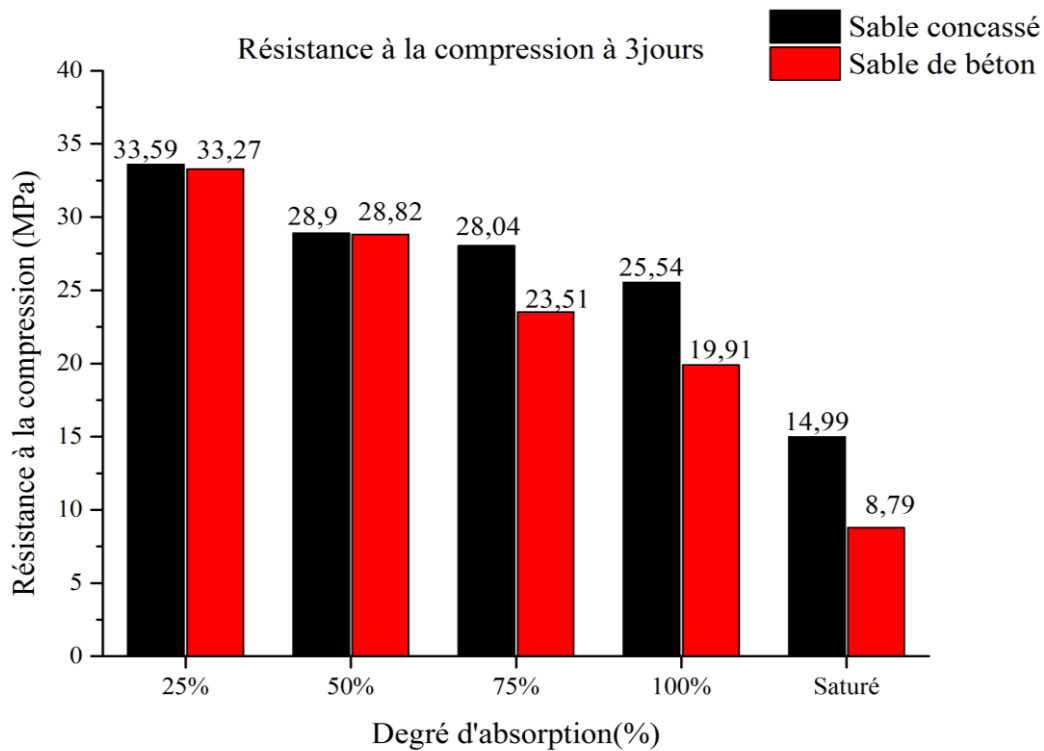


Figure III.58 : Résistance à la compression à 3 jours.

La figure III.58 représente la résistance à la compression à 7 jours pour les deux sables : le sable concassée et le sable de béton en fonction du degré de saturation. On remarque qu'il y'a une diminution progressive de la résistance à la compression à 7 jours avec l'augmentation de degré de saturation pour les deux sables jusqu'à 100% puis une chute de la résistance lorsque le degré de saturation est saturé avec 65% et 77% pour le Sc et Sb respectivement.

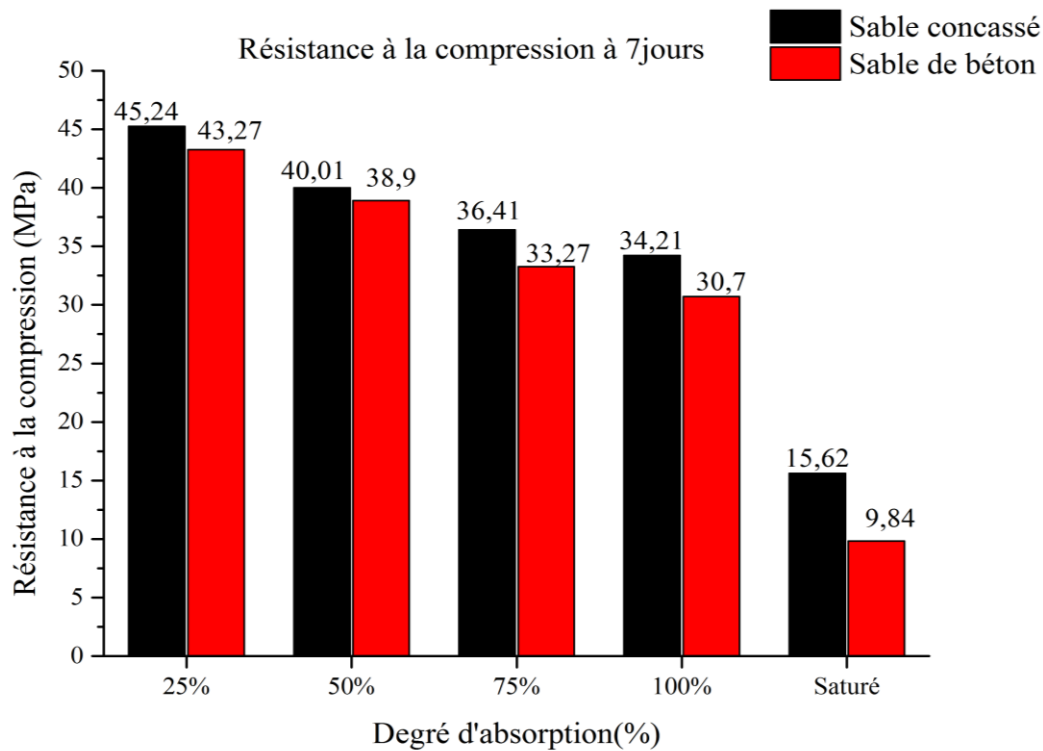


Figure III.59 : Resistance à la compression à 7jours.

la Figure III.59 illustre l'évolution de la résistance à la compression à 28 jours pour deux types de sable, le sable concassé et le sable de béton, en fonction du degré de saturation. Il est observé que la résistance à la compression à 28 jours diminue avec l'augmentation du degré de saturation dans le sable de béton. En ce qui concerne le sable concassé, on observe une diminution de la résistance jusqu'à 75 % de saturation, suivie d'une légère augmentation au niveau de saturation de 100 %. Ensuite, on constate une diminution de la résistance une fois le degré de saturation maximal atteint avec 47% et 73% pour les deux sable Sc et Sb respectivement.

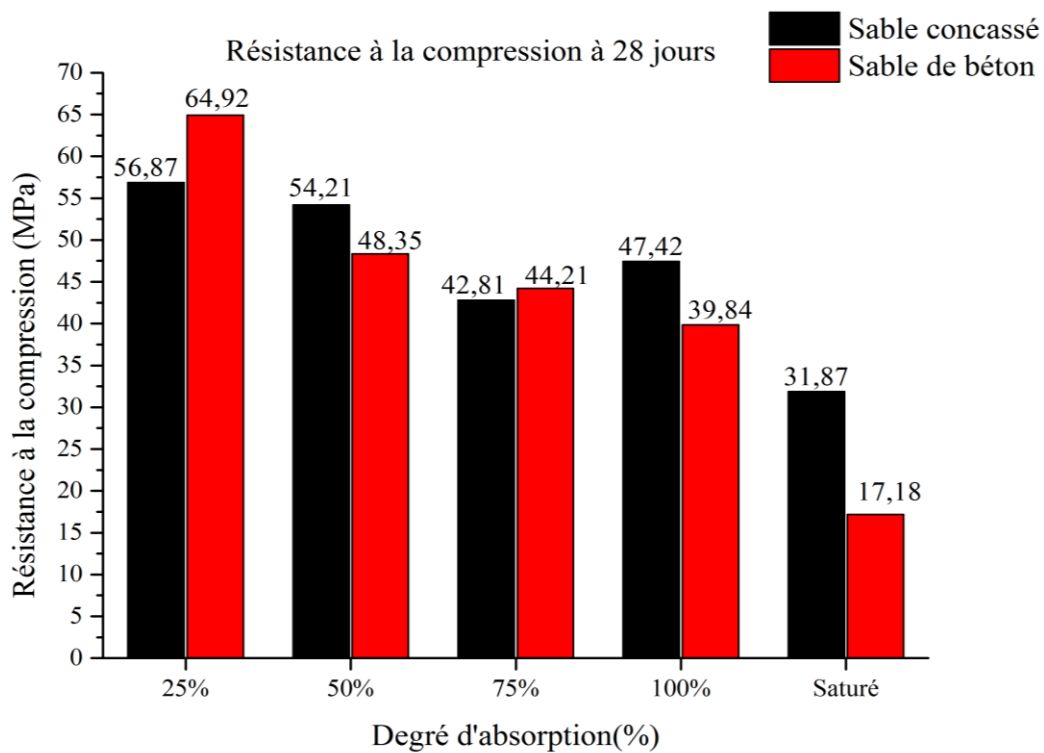


Figure III.60 : Résistance à la compression à 28 jours.

D'après nos résultats mécanique (résistance à la flexion et résistance à la compression), on constate que les résistances optimales sont obtenue à 25% et à 50% de saturation.

Conclusion Générale

Cette recherche a été menée dans le but d'étudier l'influence du coefficient d'absorption des sables, en utilisant un sable de déchets de béton et un sable concassé, sur l'ouvrabilité (affaissement et/ou étalement) et le comportement rhéologique (seuil de cisaillement et viscosité plastique) ainsi que le comportement mécanique (la résistance à la flexion et à la compression des mortier).

Le sable nature a été remplacé par deux types de sables un sable recyclé dans le but de réduire l'exploitation des ressources naturelles et l'exploitation des déchets de construction en créant des nouvelles études. La seule variable dans cette étude est l'eau par différents taux d'absorption allant de 25% jusqu'à saturation. En se basant sur les résultats obtenus on peut tirer les conclusions suivantes :

La cinétique d'absorption : le sable de béton atteint 80% de saturation à 50 minutes d'immersion dans l'eau. Le sable concassé atteint 95% de saturation à 100 minutes.

La variation du taux d'absorption (taux de saturation) influence significativement la viscosité plastique et le seuil de cisaillement du mortier pour les deux sables utilisés.

La variation du taux d'absorption (taux de saturation) influence le comportement mécanique des mortiers.

Pour le sable de béton recyclé, la résistance à la compression optimale est obtenue à un taux de saturation de 25%.


Pour le sable concassé, la résistance à la compression optimale est obtenue à des taux de saturation de 25% et 50%.

Une corrélation satisfaisante a été établie en utilisant les résultats expérimentaux des deux sables (concassé et recyclé) pour évaluer le seuil de cisaillement en utilisant la valeur d'affaissement.

On a pu établir une bonne corrélation entre la viscosité plastique et le seuil de cisaillement.

Les corrélations établies vont nous permettre d'estimer les paramètres rhéologiques à partir de l'affaissement du mortier

Annexe fiche technique du ciment

**AMOUDA
CIMENT**



AL ESSES

CIMENT RÉSISTANT AUX SULFATES
NA 442-CEM I 42.5 N-LH/SR 5

CONFORMITE PRODUIT

CLASSE SR5

NA 442 : 2013 – EN 197-1 : 2012

DESIGNATION NORMALISEE

NA 442-CEM I 42.5 N-LH/SR 5

OUVRAGES EN MILIEUX AGRESSIFS

Eau, Sol, Air.

OUVRAGES MASSIFS

FABRICATION

- PRODUIT 100% ALGERIEN

- Fabrication exclusive à l'usine Amouda Ciment sise à El Beidha, Laghouat.

CARACTERISTIQUES TECHNIQUES

PROPRIETES CHIMIQUES

Bogue : C3A ≤ 5%.

NA 5042 (EN 196-2) : SO₃ ≤ 3%.

NA 5042 (EN 196-2) : Chlorure ≤ 0.1%

PROPRIETES PHYSICO-MECANIQUES

NA 230 (EN 196-3) : DP > 60 mn


NA 234 (EN 196-1) :

- Résistance à la compression (2 jours) > 10 MPa


- Résistance à la compression (28 jours) > 42.5 MPa

EMPLOIS ET USAGES CONFORMES A VOS PROJETS

- Tunnels et travaux souterrains.
- Terrains gypseux, eaux pures, eaux usées et industrielles.
- Milieux sulfatés.
- Fondations et structures à réaliser dans des milieux agressifs.
- Injections.
- Ouvrages massifs.
- Travaux à la mer.




NOS PRODUITS AUSSI



AL IMRAN

NA 442-CEM II / B-L 32.5 R.

Ciment pour les professionnels de la construction.



AWTED

NA 442-CEM I/II-A-L 42.5 N

Ciment aux performances élevées. (super structure).

POUR PLUS D'INFORMATIONS VEUILLEZ CONSULTER NOTRE SITE WEB :

www.amoudaciment.com

e-mail : service.clients@amoudaciment.com

Direction commerciale


Lotissement 202, Section 4, Zone d'activité Amara,
Chéraga, Alger.

Tel : 023 305 515

Fax : 023 305 514

Région Nord : 0655 521 235

Région Sud : 0658 363 463



Coordonnées usine

Commune El Beidha, Guetlet Sidi Saad,
wilaya de LAGHOUAT

Tel : 029 173 490

Fax : 029 173 481

Spécialiste Qualité : 0656 403 772



Annexe fiche technique du superplastifiant

NOTICE TECHNIQUE

2 1 1 9

MEDAFLOW 30

Conforme à la norme EN 934-2: TAB 1, TAB 3.1
ET TAB 3.2 NA 774.

**Super plastifiant
Haut réducteur d'eau**

DESCRIPTION

Le **MEDAFLOW 30** est un super plastifiant haut réducteur d'eau de la troisième génération. Il est conçu à base de polycarboxylates d'Ether qui améliorent considérablement les propriétés des bétons.

Le **MEDAFLOW 30** permet d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité.

En plus de sa fonction principale de superplastifiant, il permet de diminuer la teneur en eau du béton d'une façon remarquable.

Le **MEDAFLOW 30** ne présente pas d'effet retardateur.

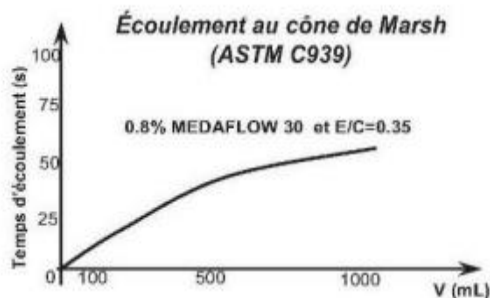
DOMAINES D'APPLICATION

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

PROPRIÉTÉS

Grâce à ses propriétés le **MEDAFLOW 30** permet :
Sur béton frais :

- Obtention d'un rapport E/C très faible
- Amélioration considérable de la fluidité
- Une très bonne maniabilité
- Éviter la ségrégation
- Faciliter la mise en œuvre du béton



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

Sur béton durci :

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

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

CARACTÉRISTIQUES

- Aspect Liquide
- Couleur Brun clair
- pH 6 – 6,5
- Densité 1,07 ± 0,01
- Teneur en chlore < 0,1 g/l
- Extrait sec 30%

MODE D'EMPLOI

Le **MEDAFLOW 30** est introduit dans l'eau de gâchage.

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

DOSAGE

Plage de dosage recommandée :

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

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

CONDITIONNEMENT ET STOCKAGE

References bibliographiques

- [1] Juan M.S., Gutiérrez P.A. (2009) Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials*, 23:872-877.
- [2] Topcu I.B., Sengel S. (2004) Properties of concretes produced with waste concrete aggregate. *Cement and Concrete Research*, 34(8):1307-12. / Etxeberria M., Vázquez E., Mari A., Barra M. (2007) Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Research*, 37(5):735-742.
- [3] Tam V.W., Gao X., Tam C., Chan C. (2008) New approach in measuring water absorption of recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, 22(3): 364-369.
- [4] Djerbi Tegguer A. (2012) Determining the water absorption of recycled aggregates utilizing hydrostatic weighing approach. *Construction and Building Materials*, 27(1): 112-116.
- [5] Zhao Z., Remond S, Damidot D., Xu W. (2014) Teneur en pâte de ciment et coefficient d'absorption d'eau des sables recyclés. Quinzième édition des Journées Scientifiques du Regroupement Francophone pour la Recherche et la Formation sur le Béton (RF)2B, Douai, France, 03-04 Juillet 2014, pp101-111.
- [6] Boussaoui.W : « Valorisation des sous-produits Caractérisation de bétons à base des granulats issus de recyclage des matériaux de construction ». Master en génie civil Option :Structures et Matériaux .Constantine :Université Mentouri,2010-2011
- [7] M.Oumaza and I. Temar, “Comportement d’un mortier autoplacant à base de fines de déchet de brique , Mémoire de Master,” Université Saad Dahleb Blida, 2020.
- [8] N.Bourmatte, “Granulats recyclés de substitution pour bétons hydrauliques , Thèse de Doctorat,” Université Des Frères Mentouri Constantine, 2017.
- [9] A. Barkat, “Valorisation des déchets de brique dans la réalisation des ouvrages en béton , Mémoire de Magister,” Université KasdiMerbah Ouargla, 2006.
- [10] F. Debieb, “valorisation des déchets de briques de démolition comme agrégats de béton , Mémoire de Magister,” Université Saad Dahleb Blida, 2000.

- [11] N. Perkins, A. Ajir, and L. El ouazzani, “ Rapport sur la gestion des déchets solides au Maroc,” réseau régional d’échange d’informations d’expertise dans le sect. Des déchets dans les pays du mashreq du maghreb. Dtsch. Gesellschaft fürint. Zusammenarbeit gmbh, 57p, 2014.
- [12] K. Bouali, “Elaboration et caractérisation thermomécanique des mortiers à base d’ajouts de déchets de briques réfractaires , Mémoire de Master,” Université de Boumerdès, 2015.
- [13] H. Fouzia and K. Imane, “L’utilisation de la brique recyclée et de la céramique dans la formulation des mortiers, Mémoire de Master,” Université Mohamed Boudiaf M’sila, 2019.
- [14] National wasteagency, "Caractérisation des déchets ménagers et assimilés", vol. 213, no. 1, pp 11-28. 2019.
- [15] E. Broughton, “Catastrophes naturelles. Les capacités de gestion des états en question,” in les états submergés, paris: institut français des relations internationales, 2011, pp. 92–95. Doi: 10.3917/ifri.demon.2011.01.0092.
- [16] Hudson, B.P., “Manufactured Sand for Concrete,” 5th ICAR Symposium, E2-2-1, Austin, Texas, 1997.
- [17] National Crushed Stone Association, “Stone Sand for Portland Cement,” Concrete Materials, pp. 12, February, 1976.
- [18] Tests for mechanical and physical properties of aggregates. Determination of particle density and water absorption, EN 1097-6, 2013.
- [19] Tattersall GH. Workability and quality control of concrete. London: E&FN SPON; 1991. 262 pp.
- [20] Mindess S, Young J, Darwin D. Concrete. New Jersey: Prentice-Hall Inc.; 2003. 644 pp.
- [21] Portland Cement Association. Principles of quality concrete; 1975. 312 pp.
- [22] Alhozaimy AM., Effect of absorption of limestone aggregates on strength and slump loss of concrete. Cement and Concrete Composite, 31, 470-3, 2009.
- [23] Neville AM. Properties of concrete. 4th ed. London: Longman Publishing Ltd;1995
844 pp.

- [24] Shetty MS. Concrete technology – theory and practice. New Delhi, India: S.Chand& Company Ltd; 1982. 525 pp.
- [25] ASTM C192. Annual book of ASTM standards, vol. 4.02; 1996. p. 111–8. Benachour, Y., Davy, C. A., Skoczylas, F., & Houari, H. (2008). Effect of a high calcite filler addition upon micro structural, mechanical, shrinkage and transport properties of a mortar. *Cement and Concrete Research*, 38(6), 727-736.
- [26] ASTM C 128-01. “Standard Test for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate,” ASTM International.
- [27] NAËL-REDOLFI, Jennifer, KEITA, Emmanuel, et ROUSSEL, Nicolas. Water absorption measurement of fine porous aggregates using an evaporative method: Experimental results and physical analysis. *Cement and Concrete Research*, 2018, vol. 104, p. 61-67.
- [28] Mckeagney, R.B., “Trend To Use More Stone Sand,” Conference on Crushed Stone for Road and Street Construction and Reconstruction, National Crushed Stone Association, June 14-15, 1984.
- [29] 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.
- [30] Nichols, F. P., Jr., “Manufactured Sand and Crushed Stone in Portland Cement Concrete,” *Concrete International*, August 1982.
- [31] Rhoades Rogerand MielenzR. C., “Petrography of Concrete Aggregate,” *Proceedings, Am. Concrete Inst.*, Vol. 42, p. 581 (1946).
- [32] Dolar-Mantuani, Ludmila, “Handbook of Concrete Aggregates,” Noyes Publications, New Jersey, 1983.
- [33] Baker, S. D., and C. F. Scholer, “Effect of Variations in Coarse-Aggregate Gradation on Properties of Portland Cement Concrete,” *Highway Research Record*, No.441, Grading of Concrete Aggregates, Highway Research Board, Washington, D. C., 1973.

- [34] Hewlett, P. C., “Lea’s Chemistry of Cement and Concrete,” 4th edition, John Wiley and Sons, Inc., New York, 1998.
- [35] Pike, D. C., “Report to CAB/2 on a project to examine the regulation of fines in sands for concrete and mortar,” British Standards Institution, London, 1989.
- [36] Ramirez, J. L., J. M. Barcena, and J. I. Urreta, “Proposal for Limitation and Control of Fines in Calcareous Sands Based upon Their Influence in Some Concrete Properties,” Materials and Structures, Vol.23, 1990.
- [37] Pike, D. C., “Methodologies for assessing the variability of fines in sands used for concrete and mortars,” PhD thesis, Postgraduate research institute for Sedimentology, University of Reading, UK, 1992.
- [38] Marek, C. R. “Importance of fine aggregate shape and grading on properties of concrete”, ICAR 3rd annual symposium, 1995.
- [39] ASTM C33 (2016), Standard Specification for Concrete Aggregates, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016.
- [40] CLELLAND, D. et T. CARTER. « The New Myth of Class and Crime », Criminology, vol. 18 (novembre), p. 319-336.
- [41] ACI Committee 116, “Cement and Concrete Terminology,” Publication SP-19 (85), Detroit, Michigan, 1985.
- [42] UNICEM, Carrières de roches massives potentialités écologiques, 2008.
- [43] UNICEM, L’industrie Française des granulats, 2018(2018)3–4.
- [44] UEPG, EUROPEAN AGGREGATES ASSOCIATION, 2017.
- [45] Direction générale de la recherche et de l’innovation, HORIZON 2020 en bref, 2013. doi:10.2777/80602.
- [46] P. Villoria Saez, European Legislation and Implementation Measures in the Management of Construction and Demolition Waste, Open Constr. Build. Technol. J. 5 (2011) 156–161. doi:10.2174/1874836801105010156.

- [47] P. Villoria Saez, European Legislation and Implementation Measures in the Management of Construction and Demolition Waste, *Open Constr. Build. Technol. J.* 5 (2011) 156–161. doi:10.2174/1874836801105010156.
- [48] R. Sato, I. Maruyama, T. Sogabe, M. Sogo, Flexural Behavior of Reinforced Recycled Concrete Beams, *J. Adv. Concr. Technol.* 5 (2007) 43–61. doi:10.3151/jact.5.43.
- [49] Z. Zhao, Re-use of fine recycled concrete aggregates for the manufacture of mortars, 072 (2013) 188.
- [50] T. LE, Influence de l’humidité des granulats de béton recyclé sur le comportement à l’état frais et durcissant des mortiers, 2015.
- [51] E. 1097-6, Tests for mechanical and physical properties of aggregates – Part 6: Determination of particle density and water absorption ., 2013.
- [52] M.-H. Zhang, O.E. Gjørsv, PENETRATION OF CEMENT PASTE LIGHTWEIGHT AGGREGATE, 22 (1992) 47–55.
- [53] F. Rodrigues, M.T. Carvalho, L. Evangelista, J. De Brito, Physical-chemical and mineralogical characterization of fine aggregates from construction and demolition waste recycling plants, *J. Clean. Prod.* 52 (2013) 438–445. doi:10.1016/j.jclepro.2013.02.023.
- [54] N. Bourmatte, “Granulats recyclés de substitution pour bétons hydrauliques , Thèse de Doctorat,” Université Des Frères Mentouri Constantine, 2017.
- [55] V.W.Y. Tam, X.F. Gao, C.M. Tam, C.H. Chan, New approach in measuring water absorption of recycled aggregates, *Constr. Build. Mater.* 22 (2008) 364–369. doi:10.1016/j.conbuildmat.2006.08.009.
- [56] A.D. Tegguer, Determining the water absorption of recycled aggregates utilizing hydrostatic weighing approach, *Constr. Build. Mater.* 27 (2012) 112–116. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.08.018.
- [57] A.Z. Bendimerad, E. Roziere, A. Loukili, Combined experimental methods to assess absorption rate of natural and recycled aggregates, *Mater. Struct. Constr.* 48 (2015) 3557–3569. doi:10.1617/s11527-014-0421-5.

- [58] A.D. Tegguer, Determining the water absorption of recycled aggregates utilizing hydrostatic weighing approach, *Constr. Build. Mater.* 27 (2012) 112–116. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.08.018 .
- [59] Disponible sur :http://fr.wikipedia.org/wiki/Brique_%28mat%C3%A9riau%29.
- [60] .manuel de sensibilisation à la restauration de la maçonnerie, juin 2006 .
- [61] BOUREMA MOUFIDA Intitulé : Etude des caractéristiques d'un BHP à base de déchet de brique rouge à l'état frais et durci .
- [62] G. Van Rompaey, A. Bernard, and M.-P. Delplancke, “Etude de la réactivité des ciments riches en laitier, à basse température et à temps court, sans ajout chloruré,” 2006.
- [63] S. Safiddine, H. Soualhi, K. Amokrane, F. Debieb, A. S. E. Belaidi, and E. H. Kadri, “The double effect of limestone fillers on the rheological behavior of cement mortar.,” *Alger. J. Eng. Archit. Urban.*, vol. 5, no. 6, 2021.
- [64] P. Coussot and J. Grossiard, «Comprendre la rhéologie, de la circulation du sang à la prise du béton» EDPS cience, 2002.
- [65] W.H.HerschelandR.Bulkley, «Measurement of consistency as applied to rubber-benzene solutions» *Am. Soc. Testing Materials*, vol.26, pp. 621-633, 1926.
- [66] N. Roussel, « Athixotropy model for fresh fluid concretes : Theory, validation and applications » *Cement and Concrete Research*, 39, pp.1797-1806, 2006.
- [67] B. M. Aïssoun, “Influence Des Caractéristiques Rhéologiques Des Bétons Auto plaçant Sur Leur Durabilité,” Thèse de doctorat , Université de Sherbrooke Canada, 2015.
- [68] Dada. El hadja , “ Etude de l'influence de la température sur le comportement rhéologique des éco-mortiers , ” Thèse de doctorat , université de Laghouat Algérie , 2021