

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA**

**FACULTE : THECNOLOGIE
SPECIALITE : MATERIAUX
N° :.....**



**FILIERE : Génie civil
DEPARTEMENT : Génie Civil**

**Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de
Master Académique**

Par: Mostafaoui hadda & Lahmidi khadidja

**Effet de la dégradation chimique sur un béton ordinaire avec
granulats recyclés de type céramique sanitaire**

Soutenu devant le jury composé de:

Pr. NACERI Abdelghani	Université de M'sila	Président
Dr. CHIKOUHCE Mohamed Aziz	Université de M'sila	Encadreur
Dr. BELOUADEH Messaouda	Université de M'sila	Examineur

Année universitaire : 2023/2024

REMERCIEMENTS

Nous remercions du fond du cœur Allah, le tout puissant, qui nous a accordé la force, la volonté et le courage afin de mener à bout ce travail.

Ce mémoire de master est le résultat de l'engagement de plusieurs personnes qui ont décidé de m'accompagner résolument dans cet exaltant parcours. Je voudrais profiter de cet espace pour leur exprimer toute ma gratitude et ma reconnaissance

Nous remercions vivement notre encadreur Dr. Chikouche. Med Aziz pour nous avoir confié ce travail et pour son aide sa patience et sa sympathie, ses encouragements et ses conseils précieux.

Nous rendons hommage à tous nos professeurs de la faculté des sciences et de la technologie et du département de génie civile à qui nous devons notre formation scientifique

Nous témoignons également toute nos reconnaissances à tous nos collègues pour leur soutien et leur encouragement permanent à nos plus fidèles amies et amis.

Nos remerciements vont aux membres de jury qui ont accepté d'évaluer ce travail, Enfin à tous ceux et celles qui nous ont soutenues ou encouragés qu'ils y trouvent ici l'expression de nos profonde gratitude

Dédicace

Mon parcours universitaire a pris fin après la fatigue et les épreuves, et me voici en train de conclure mes recherches de fin d'études avec tout l'enthousiasme et l'énergie. Je suis reconnaissante à tous ceux qui ont mis la main sur mon chemin, à celui qui a eu une biographie parfumée, et une pensée éclairée, car il a été le premier à m'aider à faire des études supérieures (mon père bien-aimé) Que Dieu prolonge sa vie. A Celle qui m'a mis sur le chemin de la vie et n'a ménagé aucun effort pour me rendre toujours heureuse (ma mère bien-aimée). À mes frères, qui ont eu un impact énorme sur ma vie.

A mes amis, à qui je témoigne qu'ils sont les meilleurs compagnons, et à mon amie et compagne dans la vie et dans mon parcours académique, à celle qui a été la raison de ma fermeté jusqu'à ce moment,

Khadidja Lahmidi.

Mostafaoui hadda

Dédicace

Nous parcourons les chemins de la vie, et celui qui contrôle notre esprit dans chaque chemin que nous empruntons reste celui qui a un bon visage et de bonnes actions et qui n'a pas été avare tout au long de sa vie. (Mon cher père) .

Qui est-ce que je préfère à moi-même ? pourquoi pas? Elle s'est sacrifiée pour moi et n'a ménagé aucun effort pour me rendre (ma mère bien-aimée) toujours heureuse. Je remercie chaleureusement mes frères qui étaient à mes côtés ainsi que mes camarades de classe et je témoigne qu'ils sont les meilleurs des camarades. À mon amie et compagnon qui a été la raison de ma détermination à atteindre ce moment : Mostafaoui Hadda

Khadidja Lahmidi

Sommaire

Table des matières

<u>Introduction générale.....</u>	<u>2</u>
<u>CHAPITRE I : L'utilité des sables dans le béton.....</u>	<u>5</u>
I.1.Définition	5
I.2.Différents types de sables	5
I.2.1. Sable marin	5
I.2.2. Sable du désert	6
I.2.3. Sable de plage	7
I.2.3. Sable de rivière	9
I-3-Caractéristiques de sables.....	9
I-3-1-Caractéristique géométrique	9
I-3-2-Caractéristique physico-chimique.....	11
I-3-2-1-La masse volumique	11
I-3-2-2-Porosité et compacité.....	11
I-3-2-3- L'absorption.....	11
I-3-2-4-La propreté.....	11
I-3-2-5-Teneur en ions chlorures.....	12
I-3-2-6-Réactivités aux alcalis	12
I-3-2-7-Teneur en soufre et en sulfates	13
<u>I-4-Influence des caractéristiques sur le comportement des bétons.....</u>	<u>13</u>
<u>CHAPITRE II : Valorisation des sables recyclés dans le béton</u>	<u>20</u>
II.1. Les déchets	20
II.1.1. Définition.....	20
II.2. Les différents types des déchets et leurs gisements.....	20
II.2.1. Les déchets municipaux :	20
II.2.2. Les déchets industriels :	21
II.2.2.1. Les déchets industriels spéciaux (D.I.S) :.....	21
II.2.2.2. Les déchets industriels banals (D.I.B) :.....	21
II.2.2.3. Les déchets industriels inertes :	21
II.2.3. Les déchets nucléaires :	22
II.2.4. Les déchets du BTP :	22

II.3. La gestion des déchets	22
II.3.1. Principales opérations de gestion des déchets	22
II.4. Les déchets en Algérie.....	24
II.4. Les déchets en génie civil	26
II.4.1. Les laitiers des hauts fourneaux.....	26
II.4.2. La cendre volante.....	27
II.4.3. Le verre broyé.....	28
II.4.4. Les pneus usagés	29
II.4.5. La boue de papeterie.....	30
II.4.6. Les déchets céramiques	31
CHAPITRE III : Essai et résultats.....	36
III.1. Caractéristiques des matériaux	36
III.1.1. Introduction	36
III.2. Le sable	37
III.2.1. Masse volumique absolue (NF P18-555)	37
III.2.4. Teneur en eau (NF P 18-555).....	38
III.2.5. Degré d'absorption d'eau (NF P 18-555).....	38
III.2.6. Analyse granulométrique (NF P 18-560).....	39
III.2.7. Equivalent de sable.....	41
III.3. Les graviers	42
III.3.1. Masse volumique absolue	42
III.3.2. Masse volumique apparente (NF P 18-555).....	42
III.3.3. Analyse granulométrique (NF P 18-560).....	43
III.4. Caractéristiques du ciment utilisé (CEMI MOUKAWIM).....	44
III.5. Formulation du béton	44
III.6. Elaboration des bétons	45
III.6.1. Confection des éprouvettes	45
III.6.2. Moulage et démoulage	46
III.7. Essai sur béton frais.....	46
III.7.1. Affaissement au cône d'Abrams NF EN 12350-2.....	47
III.8. Essais sur béton durci	48
III.8.1. La perte de masse	48
III.8.2. La perte de volume	51
III.8.2. La perte de résistance	52
Conclusion générale	55
References	57

Liste des figures

CHAPITRE I : L'utilité des sables dans le béton

<u>Figure I.4. Exploitation des sables de plage.....</u>	<u>8</u>
<u>Figure I.5. Un sac de sable de rivière.....</u>	<u>9</u>
<u>Figure I.6. Granulométrie des sables.....</u>	<u>10</u>
<u>Figure I.7. Fuseau des sables admissibles.</u>	<u>11</u>
<u>Figure I.8. Mesure de la propreté du sable.....</u>	<u>12</u>
<u>Figure I.9. Eclatement du béton à cause d'une réaction alcali-granat.</u>	<u>12</u>
<u>Figure I.10. Résistance à la compression des Bétons dans l'étude de Vijaya & Selvan.....</u>	<u>13</u>
<u>Figure I.11. Analyse de la forme des sables dans l'étude de Shen et coll.....</u>	<u>15</u>
<u>Figure I.12. Effet du sable concassé sur la perméabilité aux ions chlorure dans l'étude de Shanmugapriya et coll.....</u>	<u>15</u>
<u>Figure I.13. Rapport de résistance à la compression des bétons de l'étude de Limeira et coll.....</u>	<u>16</u>
<u>Figure I.14. Sorptivité des bétons de l'étude de Limeira et coll.</u>	<u>16</u>

CHAPITRE II : Valorisation des sables recyclés dans le béton

<u>Figure II.1. Pile de déchets municipaux.....</u>	<u>21</u>
<u>Figure II.2. Les déchets inertes</u>	<u>21</u>
<u>Figure II.4. Incinération des déchets.....</u>	<u>23</u>
<u>Figure II.5. Traitement des déchets en 2004.</u>	<u>25</u>
<u>Figure II.6. Traitement des déchets en 2014.....</u>	<u>25</u>
<u>Figure II.7. Le haut fourneau et ses annexes.....</u>	<u>26</u>
<u>Figure II.8. Comportement du laitier selon la température dans l'étude de Bougara et coll. ..</u>	<u>27</u>
<u>Figure II.9. Schéma de fonctionnement d'une centrale électrique.....</u>	<u>27</u>
<u>Figure II.10. Perte de poids des mortiers dans divers environnements chimiques dans l'étude de Roy et coll.....</u>	<u>28</u>
<u>Figure II.11. Processus de fabrication du verre.....</u>	<u>29</u>
<u>Figure II.12. La perméabilité au chlorure des béton étudiés par Schwarz et coll.</u>	<u>29</u>
<u>Figure II.13. Les composants principaux d'un pneu.....</u>	<u>30</u>
<u>Figure II.14. Profondeur de pénétration du chlorure dans l'étude de Thomas et coll.....</u>	<u>30</u>
<u>Figure II.15. Epanchage des boues de papeterie.....</u>	<u>31</u>
<u>Figure II.16. Diagramme simplifié de la production des céramiques.....</u>	<u>32</u>
<u>Figure II.17. Pourcentage de production des objets céramiques européen.....</u>	<u>32</u>
<u>Figure II.18. Influence des déchets de céramique sanitaire sur la résistance à la compression dans l'étude de Rashid et coll.....</u>	<u>34</u>

CHAPITRE III : Essai et résultats

Figure III.1. Les différents matériaux utilisés.....	36
Figure III.2. Masse volumique absolue du sable.....	37
Figure III.3. Analyse granulométrique du sable.	39
Figure III.4. Agitateur pour équivalent de sable céramique.....	41
Figure III.5. Courbe de référence du béton de référence.	45
Figure III.6. Malaxage du béton.....	45
Figure III.7. Confection des bétons étudiés.....	46
Figure III.8. Etiquetage des différents bétons	46
Figure III.9. Essai de cône d'Abrams.....	47
Figure III.10. Affaissement des différents bétons.....	48
Figure III.11. Dégradation chimique par acide sulfurique des égouts.	48
Figure III.12. Perte de masse des éprouvettes en béton après immersion dans les solutions acides.....	49
Figure III.13. Eprouvettes en bétons B10 et B20 après 43 jours d'exposition aux différentes solutions.	50
Figure III.14. Perte de volume des éprouvettes en béton après immersion dans les solutions acides.....	51
Figure III.15. Dégradation des bords des éprouvettes en béton B10 et B30.....	52
Figure III.16. Machine d'essai de résistance à la compression.....	52
Fig.III.17. Résistance à la compression des différents bétons	53

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE I : L'utilité des sables dans le béton

Tableau I.1. Perte de poids et résistance à la compression des bétons de l'étude de Vijaya & Selvan.....	14
Tableau I.2. La sorptivité des bétons de l'étude de Shanmugapriya et coll.....	14
Tableau I.3. Formulation des bétons dans l'étude de Shen et coll.	15
Tableau I.4. Résistances à la compression des bétons étudiés par Ganesan et coll.	17
Tableau I.5. Résultats de l'attaque acide des bétons étudiés par Ganesan et coll.....	17
Tableau I.6. Relation entre la rugosité et les résistances mécaniques des bétons étudiés par Li et coll.	18

CHAPITRE II : Valorisation des sables recyclés dans le béton

Tableau II.1. Evolution de la population et des DMA [23].....	24
Tableau II.2. Evolution de la composition des déchets ménagers dans la ville de Batna.	25
Tableau II.3. Absorption d'eau des bétons étudiés par Ahmadi & Al-Khaja	31
Tableau II.4. Opération d'exportation mondiale de céramiques sanitaires en tonnes (2010-2022).....	33
Tableau II.5. Masse volumique et résistance à la compression des béton étudiés par Pitarch et coll.	34
Tableau II.6. Résistance à la compression des béton étudiés par Kumar & Reddy.....	34

CHAPITRE III : Essai et résultats

Tableau III. 1. Masse volumique absolue de sable naturel.	37
Tableau III.2. Masse volumique absolue de sable céramique.	37
Tableau III.3. Masse volumique apparente à l'état lâche du sable naturel	38
Tableau III.4. Masse volumique apparente à l'état lâche du sable céramique.	38
Tableau III.5. Teneur en eau de sable naturel.	38
Tableau III.6. Teneur en eau du sable céramique.	38
Tableau III.7. Absorption d'eau du sable naturel	39
Tableau III.8. Absorption d'eau du sable céramique	39
Tableau III.9. Analyse granulométrique du sable naturel.	40
Tableau III.10. Analyse granulométrique de sable céramique.	40
Tableau III.11. Classification des modules de finesse des sables.	40
Tableau III.12. Résultats obtenus pour l'équivalent de sable céramique	42
Tableau III.13. Résultats obtenus pour l'équivalent de sable naturel.	42
Tableau III. 14. Masse volumique absolue de gravier 3/8.	42
Tableau III.15. Masse volumique absolue de gravier 8/16.	42
Tableau III.16. Masse volumique absolue de gravier 16/25.	42
Tableau III.17. Masse volumique apparente du gravier 3/8.	43
Tableau III.18. Masse volumique apparente gravier 8/15.	43
Tableau III.19. Masse volumique apparente gravier 16/25.	43
Tableau III.20. Analyse granulométrique du gravier 3/8.	43
Tableau III.21. Analyse granulométrique gravier 8/16.	43
Tableau III.22. Analyse granulométrique du gravier 16/25.	44
Tableau III.23. Quelque élément chimique du ciment utilisé.	44
Tableau. III.24. Formulation du béton B0 pour 1m ³	44
Tableau. III.25. Désignation des bétons utilisés.	46

ملخص

لأجل التطور والتنمية، عرفت البشرية كيفية التعامل مع المواد الطبيعية المختلفة لتحويلها إلى مواد أكثر ملاءمة. حولت الطين والكلس إلى أسمنت، وأصبحت الجبال العملاقة حصى صغيرة من الركام أو الرمال. هذه المواد الطبيعية هي المكونات الرئيسية لجميع أنواع الخرسانة.

من أجل البناء والتعمير، فصلت البشرية نفسها عن الطبيعة. شهد العصر الصناعي، وخاصة القرن الماضي، تدهوراً بيئياً غير مسبوق. لا يمكن لأحد أن ينكر أهمية الأنواع المختلفة من الخرسانة في حياتنا، لكن نظامنا البيئي يتدهور باستمرار بسبب المضايقات الطبيعية.

من جهة أخرى، المفرغات الخاضعة للرقابة أو غير الخاضعة للرقابة آخذ في الكثرة والازدياد. النفايات، وخاصة الخاملة وغير القابلة للتحلل منها، تشغل مساحات متزايدة.

ملخص هذا العمل هو إعادة تدوير المواد الخاملة واستعمالها في الخرسانة. استعملنا الخزف الصحي كمعوض للرمل الطبيعي صناعة الخرسانة العادية. تمت دراسة سلوك الخرسانة باستبدال رمل الكثبان الرملية (10-20 - 30 % وزناً) برمل ناتج من نفايات الخزف الصحي، ودراستها تحت تأثير محاليل حمضية H_2SO_4 و HCl .

تحت تأثير هذه المحاليل انخفضت الخصائص المدروسة (الكتلة، الحجم ومقاومة الضغط) بسبب تفاعل الأحماض مع مركبات الكالسيوم للخرسانة لتكوين ملح الكالسيوم للحمض المتآكل. هذا الهجوم سيتجدد إلى أجل غير مسمى إذا كان الحمض موجود بشكل كافٍ للقضاء على رواسب الملح.

الكلمات المفتاحية: الخرسانة، تعويض، رمل الكثبان الرملية، رمل نفايات الخزف الصحي، التحلل الكيميائي.

Résumé

L'humanité a su comment manipuler les différents matériaux naturels pour les convertir en matériaux plus adéquats à son développement. L'argile et le calcaire sont devenus du ciment, des montagnes gigantesques sont devenues des petites pépites de granulats et mêmes de sable. Ces matériaux naturels sont les constituants principaux de tous types de bétons.

Pour construire, l'humanité s'est détachée de la nature. L'ère industrielle et surtout le dernier siècle, a connue une dégradation environnementale sans précédent. Nulle personne ne peut nier l'importance des différents types de béton dans notre vie, mais notre écosystème est en constante détérioration à cause du harcèlement de la nature.

D'un autre côté, les décharges contrôlées ou hors circuit de contrôle se multiplient. Les déchets surtout inerte et non biodégradable prennent de plus en plus de places.

Notre travail s'inscrit dans le cadre du recyclage des matériaux inerte dans le béton. Il s'agit de la valorisation des déchets de céramiques sanitaires comme sable dans la confection d'un béton ordinaire. Le comportement des bétons avec 10, 20 et 30% de substitution en poids de sable de dune avec du sable céramique sanitaire, sous l'action d'une dégradation chimique par des solutions acide en H_2SO_4 et HCl a été étudié.

Sous l'effet de ces solutions, les caractéristiques étudiées (masse, volume, résistance à la compression), ont diminués car les acides réagissent avec les composés calciques du béton pour former le sel de calcium de l'acide corrodant. L'attaque se renouvelle indéfiniment si l'acide circule suffisamment pour éliminer ce dépôt de sel.

Mots clés : Béton, substitution, sable de dune, sable de céramique sanitaire, dégradation chimique.

Abstract

Humanity has known how to manipulate different natural materials to convert them into more suitable materials for development. Clay and limestone have become cement, gigantic mountains have become small pieces of aggregates and even sand. These natural materials are the main constituents of all types of concrete.

To build, humanity detached itself from nature. The industrial era, especially the last century, has seen unequalled environmental degradation. No one can deny the importance of different types of concrete in our lives, but our ecosystem is constantly deteriorating due to harassment from nature.

On the other hand, controlled or non-control circuit discharges are increasing. Waste, especially inert and non-biodegradable, takes up more and more space.

Our work is part of the inert materials recycling in concrete. It consists of the recovery of sanitary ceramics waste as sand in the manufacturing of ordinary concrete. The behaviour of concretes with 10, 20 and 30% substitution by weight of dune sand with sanitary ceramic waste sand, under chemical degradation action by acid solutions of H_2SO_4 and HCl was studied.

Under the effect of these solutions, the studied characteristics (mass, volume, compressive strength) decreased because the acids reacted with the calcium concrete compounds to form the calcium salt of the corroding acid. The attack is renewed indefinitely if the acid circulates sufficiently to eliminate this salt deposit.

Keywords: Concrete, substitution, dune sand, sanitary ceramic waste sand, chemical degradation.

Introduction générale

Introduction générale

La définition la plus simple du béton est « un mélange de liant et de granulats ». Si on ne tient compte que cette définition, le béton est donc connu depuis la haute antiquité. On en retrouve les traces en Egypte antique et en Mésopotamie avec des mélanges à base d'argile. Les Romains vont affiner ce matériau en mélangeant au ciment du béton, des déchets de fabrication de tuiles, de briques, ou encore des cendres volcaniques. Cette connaissance de la chimie des matériaux leur a permis de construire des ports protégés par des jetées en béton dont la prise pouvait se faire sous l'eau.

Le béton est devenu la base du développement moderne des pays. Des constructions contre les catastrophes naturelles, des bâtiments pour offrir des structures pour l'habitation, la santé, l'éducation, les transports, l'énergie et l'industrie, sont continuellement construites.

Les granulats et le ciment, sont les composants les plus utilisés dans la production de béton. Ils sont nécessaires pour l'industrie de la construction. Le béton est le matériau artificiel le plus utilisé au monde, jusqu'à ce jour il ne peut être remplacé dans la construction d'infrastructures, en raison de ces qualités (solidité et longévité) et sa capacité de prendre de multiples formes.

Mais avec l'augmentation des quantités produites, la consommation de ressources naturelles telles que le sable et les granulats calcaires augmentent rapidement elles aussi. Un grand nombre de montagnes et de paysages sont détruites à jamais, ainsi que les rivières qui ont changé de forme et de position.

En réponse à cette situation, les chercheurs et les intervenants dans le domaine de génie civil, ont commencé à élaborer de nouvelles ressources de granulats avec un certain succès. L'utilisation de granulats recyclés, des sous-produits industriels ou encore des sédiments qui bouchent ports et barrages, sont maintenant largement connues

Dans les constructions récentes, la consommation de matériaux céramiques augmente de jour en jour sous la forme de carrelages, sanitaires, isolateurs électriques etc. Mais une grande quantité de ces variantes se transforme en gaspillage pendant le traitement, le transport et la fixation en raison de sa nature fragile.

L'utilisation de ces déchets dans la production de béton pourrait être une mesure efficace pour maintenir l'environnement.

Objectif de l'étude

L'objectif de ce projet est l'étude de l'effet de l'attaque chimique par les acides sur un béton ordinaire avec granulats recyclés de type céramique sanitaire.

Structure de la thèse

Pour arriver à notre fin, on a divisé la thèse en trois chapitres plus une introduction et une conclusion générale.

Introduction générale : -----

*Le premier chapitre, est dédié aux sables. Leurs origines et caractéristiques sont résumées, ainsi que l'influence de ces caractéristiques sur le comportement des bétons.

*Le deuxième chapitre, est consacré aux déchets. Il récite l'origine des déchets et leurs valorisations dans le secteur de génie civil.

*Le troisième chapitre, à l'explication des différents résultats issue de la substitution partielle du sable de dune par un sable de déchet d'origine céramique.

CHAPITRE I :

L'utilité des sables dans le béton

CHAPITRE I : L'utilité des sables dans le béton

Les granulats constituent le squelette du béton. Ils sont moins déformables que la matrice cimentaire et s'opposent à la propagation des fissures provoquées dans la pâte par le retrait. La nature des liaisons qui se manifestent à l'interface granulat/pâte de ciment, conditionne les résistances mécaniques du béton. Le choix d'un granulat est donc un facteur important de la composition du béton. Les granulats sont des grains minéraux classés en fillers, sablons, sables, gravillons, etc. Le sable est donc primordial pour une composition adéquate des bétons.

I.1.Définition

Le sable est utilisé comme granulats fin dans le mortier et le béton. C'est une forme granulaire de silice. Le sable standard doit s'agir de quartz, gris clair ou blanchâtre et doit être exempt de limon. Il devrait (100%) passer par un tamis de 2 mm.

Le sable peut être classé sur la base de sa source, de la composition minéralogique, de la taille des particules et de la distribution de la taille des particules.

Selon la source, le sable peut être classé comme du sable naturel ou sable de pierre écrasée. Sur la base de la composition minéralogique, le sable est divisé en quartz, feldspar et carbonatés. Selon sa taille, le sable est classé comme sable grossier, moyen et fin.

L'utilisation du sable dans le mortier permet de prévenir le retrait et le développement de fissures, de fournir une force au mortier contre l'écrasement [1].

I.2.Différents types de sables

Il existe plusieurs types de sables en fonction de leur origine, de leur composition minéralogique et de leur granulométrie.

I.2.1. Sable marin

Les dépôts marins de la plate-forme continentale peuvent être anciennes ou modernes. Les anciens dépôts sont formés dans les eaux de mer inférieures, induits par les périodes glaciaires affectant la terre au cours des 2 millions d'années [2]. À cette époque, les rivières s'étendaient largement à travers le plateau continental, transportant et déposant de grandes quantités de sable et de gravier dans leurs vallées et leurs eaux côtières. Ce matériau a été submergé et éventuellement retravaillé, en particulier les dépôts sablonneux mobiles, au cours des périodes interglaciaires plus chaudes, en raison de la retraite et de la fusion de la glace. La concentration des dépôts résulte des nombreuses répétitions de ce cycle chaud-froid. Ces corps sédimentaires sont restés non perturbés depuis leur formation et sont immobiles dans le contexte des conditions hydrodynamiques dominantes. En revanche, des dépôts modernes ont été formés et sont contrôlés par le régime hydrodynamique et sédimentologique actuel. Par conséquent, ils sont liés des sédiments côtiers et à la dynamique des sédiments sur le fond marin. Ces dépôts comprennent, exclusivement, des bancs de sable et des champs de lit de sable.

La composition, la rugosité et la taille des grains des sables marins varient considérablement, selon leur mode de formation, les processus de dépôt et l'histoire du remaniement. Les sables marins ont tendance à avoir une teneur en chlorure très élevée. En tant

que telles, certaines objections sont soulevées sur leur utilisation, en relation avec les réactions potentielles alcalines-silica, qui pourraient affecter le béton.

L'identification des ressources marines est basée à la fois sur les études de bureau et les enquêtes de prospection. Les enquêtes de prospection impliquent l'acquisition géophysique des données et l'échantillonnage des sédiments. L'ensemble de données collecté fournit des informations sur l'épaisseur, la distribution horizontale et le caractère superficiel du dépôt. Des informations verticales et horizontales à travers le sol sont fournies par les échantillons. De grandes navires hydrauliques peuvent être utilisées pour obtenir des échantillons de sédiments superficiels (Figure I.1).

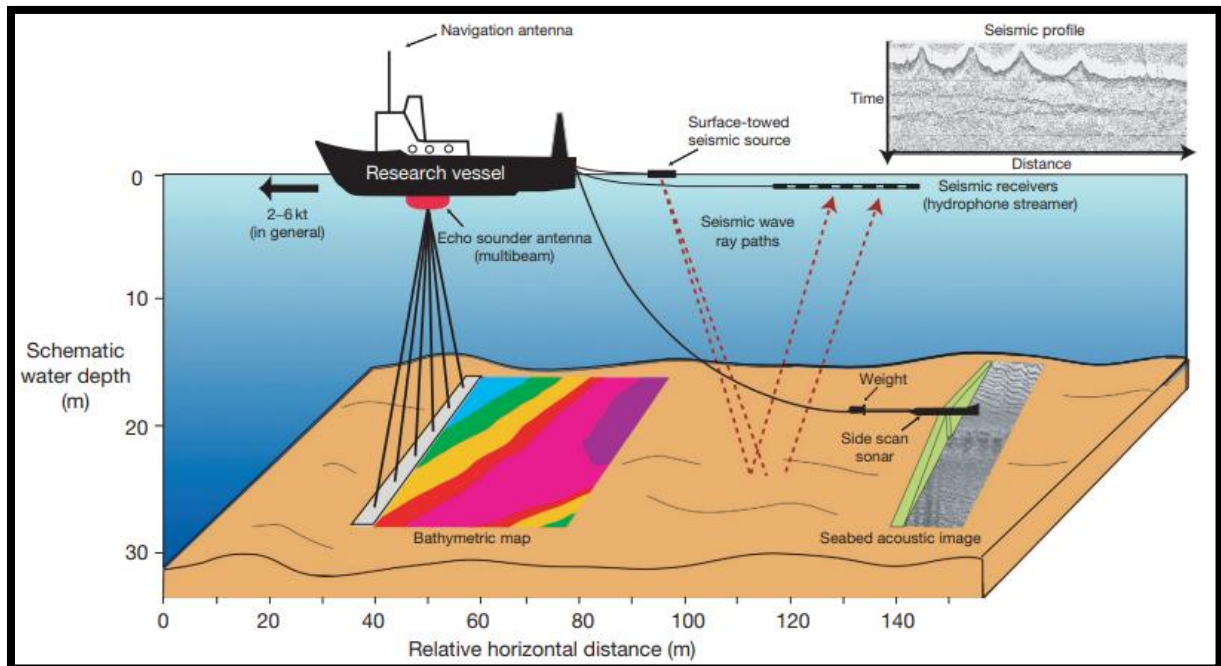


Figure I.1. Représentation d'un navire d'enquête de prospection géophysique.

I.2.2. Sable du désert

La couverture des zones sahariennes est constituée dans sa quasi-totalité de matériaux du quaternaire [3]. L'éventail des matériaux n'est pas très large. On rencontre essentiellement des roches, des éboulis, des sables, des limons et des argiles.

Les sables, que l'on trouve dans les dunes mouvantes, sont composés de particules siliceuses pratiquement de même taille et de petites dimensions. La figure I.2 présente les courbes granulométriques de sables de dunes de différentes origines comparées à celle d'une grave alluvionnaire provenant aussi du Sahara [4].

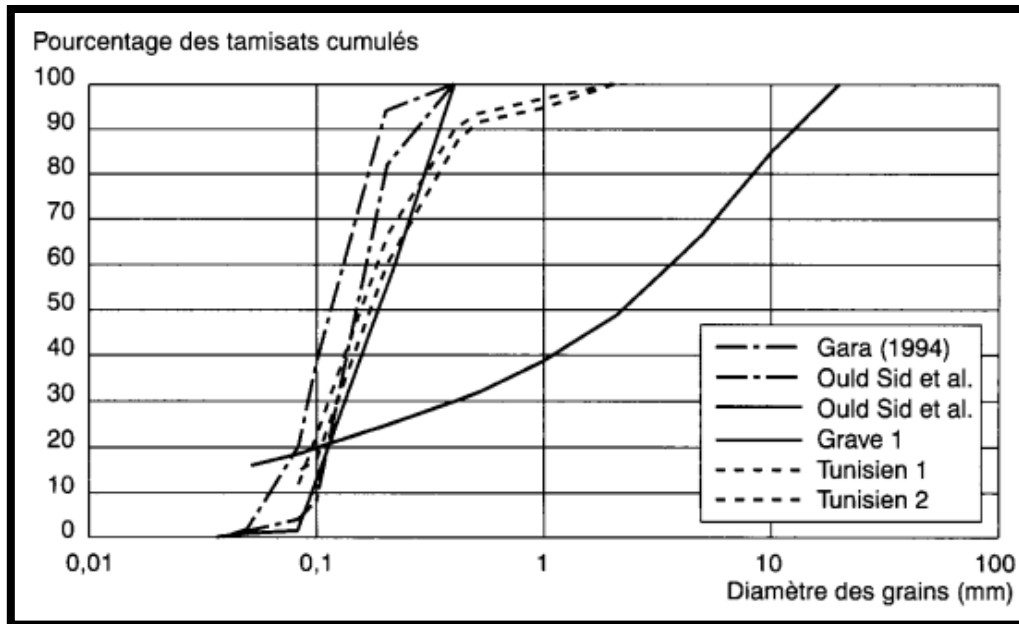


Figure I.2. Courbes granulométriques de sables de dunes de diverses régions du Sahara.

Les grains de sable du désert sont principalement distribués de manière monomodale. Cela signifie que les grains ont un diamètre spécifique dominant. La forme des grains de sable du désert, par rapport aux grains aqueux, est principalement rond. Cette forme est causée par les effets du transport éolien.

La figure I.3 montre des grains de sable du désert bien arrondis de la Libye avec un diamètre entre 0,5 mm et 1,0 mm étudié par microscopie électronique à balayage environnemental (ESEM), et des grains avec le même diamètre d'Algérie avec une forme légèrement bordée et de celui-ci une surface plus élevée.

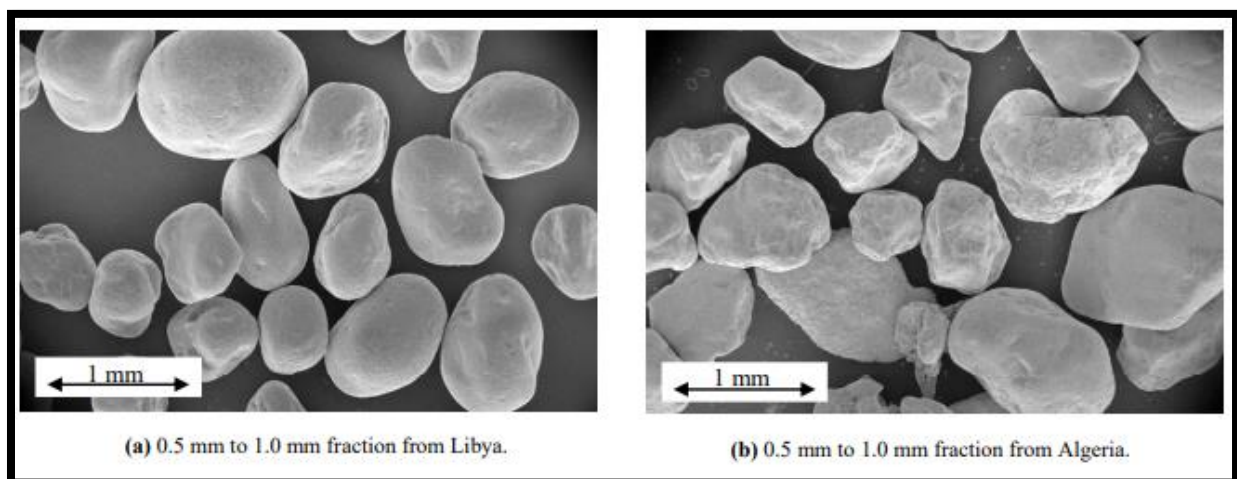


Figure I.3. Analyse en microscopie électronique à balayage des grains de sable du désert.

I.2.3. Sable de plage

Le sable de plage est un type de sédiments poreux à grain fin que l'on trouve le long du littoral des océans. Il est composé d'un mélange de petites roches, de coquilles et de matériaux organiques, et est généralement de couleur bronzée ou pâle.

Il a un certain nombre d'utilisations, à la fois pratiques et récréatives. Il est utilisé dans la construction de bâtiments et de routes, comme matière première dans la fabrication du verre et du béton, et en tant que composante des produits agricoles et industriels.

Le sable de plage est collecté grâce un processus en deux étapes (Figure I.4). En premier, le sable du fond océanique ou l'eau de mer peu profonde est extrait. Ensuite, il est désaffecté et transformé en montagnes (dunes) puis retiré pour constituer un inventaire de sable de plage brut [5] . Ainsi, Le sable extrait est séparé en particules de différentes tailles à l'aide d'un tamis vibrant. Enfin, le sable de plage produit est traité par des machines spécialisées pour éliminer les corps étrangers tels que les cailloux, les coquillages et les fragments de coquillages. Après transformation, il peut être directement utilisé en granulat de construction ou dans la stabilisation des dunes des plages.

L'extraction du sable est une pratique controversée en raison de ses impacts environnementaux potentiels. Elle peut provoquer une érosion et des dommages aux écosystèmes côtiers. La demande de sable a conduit à l'extraction illégale de sable dans certaines régions, ce qui peut avoir des conséquences néfastes. La collecte sur les plages est faite à l'aide de véhicules ou de machines spécialisés. Cela peut inclure des bulldozers, des excavatrices ou des chargeuses frontales. Le processus exact de collecte du sable varie en fonction du type de machinerie utilisé et de l'emplacement de la plage.

Le documentaire réalisé par Denis Delestrac en 2013 « Le Sable : enquête sur une disparition » [6] indiquait que 9 plages sur 10 étaient menacées en Floride, en Indonésie, 24 îles ont disparu, victimes de l'extraction de leur sable protecteur qui est allé alimenter le développement de l'urbanisme à Singapour. Les projets « The Palm » et « The World » à Dubai a coûté 150 millions de tonnes de sable pour le premier et trois fois plus, soit 450 millions de tonnes, pour le second. La ville a récupéré ce sable au large de ses propres côtes avant d'en manquer rapidement au point d'en faire venir d'Australie pour achever «The World ».



Figure I.4. Exploitation des sables de plage.

I.2.3. Sable de rivière

Le sable de rivière (Figure I.5), est riche en grains ronds siliceux, pauvre en fines, dépourvu d'argile. Il contient peu de filler et a une granulométrie continue. C'est avec la drague manuelle qu'il est saisi, lavé et entassé sur une rive. Le sable est tamisé selon différentes fractions. Le sable de rivière est naturellement doux (sans sel). Selon la norme européenne, il existe 3 répartitions granulométriques : 0-1 mm, 0-2 mm et 0-4 mm.

Le sable de rivière est utilisé dans des applications en béton et comme sable de chape. Ajoutons à cela qu'il ne contient pas de chlorures et est de ce fait souvent utilisé dans du béton ne nécessitant pas, voire peu de chlorure.

L'exploitation excessive du sable de rivière destiné à être utilisé comme granulat fin dans le béton est responsable de la dégradation du lit des rivières, qui entraîne un large éventail de problèmes, notamment la perte des couches de sol rétentrices d'eau et le glissement des berges. En outre, les inondations provoquées par les changements de direction du débit des rivières et l'influence sur la diversité biologique constituent des dangers importants posés par l'exploitation minière du sable fluvial.

Par conséquent, plusieurs pays suivent des réglementations strictes en matière d'extraction de sable fluvial. En conséquence, le prix du sable utilisable a considérablement augmenté et devrait encore augmenter [7].



Figure I.5. Un sac de sable de rivière.

I-3- Caractéristiques de sables

I-3-1- Caractéristique géométrique

I-3-1-1- Granulométrie

La granulométrie a pour objet la mesure de la taille des particules élémentaires qui constituent les ensembles de grains de substances diverses, telles que farines, poudres, sables, etc (Figure I.6). Le sable peut soit être fin par exemple "un sable de dune", soit avoir une courbe granulométrique "parfaite" comme "un sable de rivière".

Elle est représentée par une courbe granulométrique représentant les dimensions de tamis en abscisses et en ordonnées les pourcentages de passants cumulés à travers les tamis successifs (en poids de grains). Elle est exprimée par le pourcentage massique de sables passant au travers d'un ensemble spécifié de tamis. La proportion de particules retenues par un tamis s'appelle le refus, son complément le passant.

Un sable est dit fin si les éléments supérieurs à 80µm dépassent 75% des éléments. Ce type de sable doit être corrigés. Dans le sable grossier, les éléments supérieurs à 2mm représentent plus de 20% des éléments. Ces sables ont des propriétés qui se rapprochent des graves.

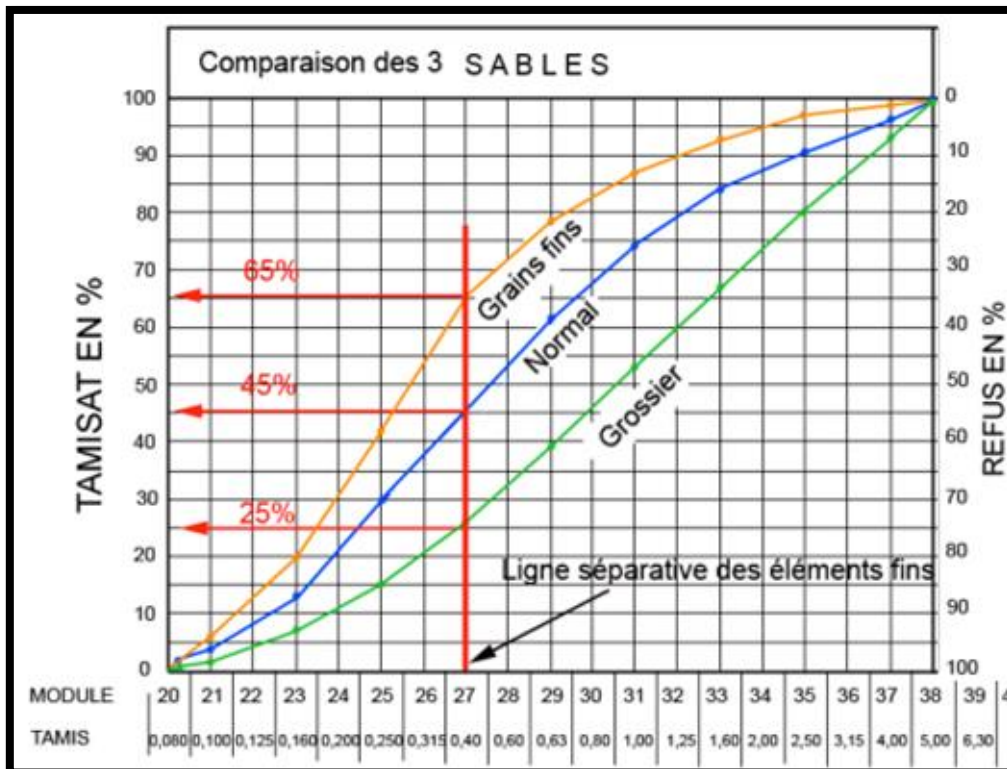


Figure I.6. Granulométrie des sables.

I-3-1-2-Module de finesse

La finesse d'un sable peut être caractérisée par son module de finesse (Mf) qui correspond à la somme des % des refus cumulés, ramenés à l'unité, sur les tamis de maille : 0,160 - 0,315 - 0,63 - 1,25 - 2,5 - 5 mm. Il est possible de modifier le module de finesse d'un sable grossier par adjonction d'un deuxième sable plus fin. Un bon sable à béton doit avoir un module de finesse d'environ 2,2 à 2,8 (Figure I.7).

Le module de finesse permet de caractériser la granularité des sables par une seule valeur. Celle-ci dépend surtout de la teneur en grains fins du sable. Plus le module de finesse est faible, plus le sable est fin. Un module de finesse élevée caractérise un sable grossier.

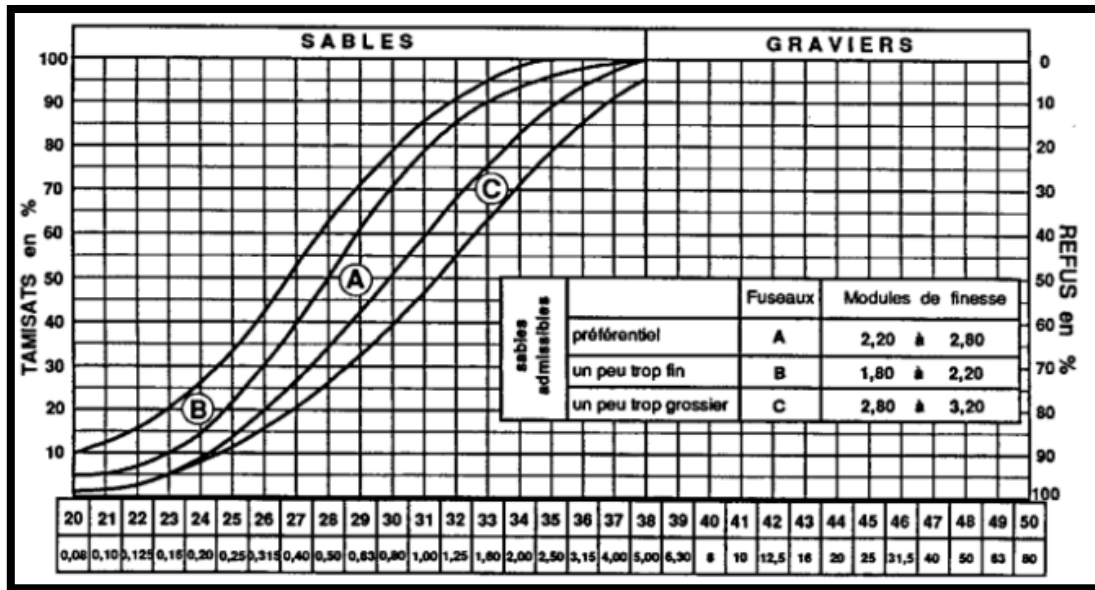


Figure I.7. Fuseau des sables admissibles.

I-3-2-Caractéristique physico-chimique

I-3-2-1-La masse volumique

La masse volumique est absolue lorsque la masse est divisée par unité de volume, elle est généralement exprimée en kg/m^3 . La masse volumique est dite apparente si la masse totale d'un matériau est divisé par le volume qu'il occupe, y compris les vides et les pores, par conséquent, la masse volumique apparente peut être plus faible que la masse volumique absolue pour les matériaux poreux [8].

I-3-2-2-Porosité et compacité

La porosité représente le rapport du volume des vides contenus dans les grains au volume des grains, exprimé en pourcentage. La porosité des granulats courants est en général très faible. Plus ce rapport est grand, plus le matériau contient des vides et des pores.

La compacité, fait référence à la densité d'un matériau ou d'un objet. Plus un matériau est compact, plus il est dense et donc moins il contient d'espace vide ou de pores.

I-3-2-3- L'absorption

Le coefficient A_b mesure la capacité d'absorption d'eau d'un granulat. Plus il est élevé, plus le matériau est absorbant. Elle dépend de plusieurs facteurs comme la porosité ou la compacité par exemple. Le coefficient d'absorption doit être inférieur à 6 % pour les sables destinés aux bétons hydrauliques, et inférieur ou égal à 5 % pour les bétons vibrés [9].

I-3-2-4-La propreté

La propreté du sable est déterminée par l'essai appelé « équivalent de sable ». Il permet de mesurer la fraction argileuse du matériau. Cet essai permet de mesurer la propreté du sable. Il exprime la quantité des éléments fins dans les éléments sableux qui sédimentent et les

éléments fins qui flocculent. Plus la valeur de L'équivalent de sable est grande, plus le sable est propre.

Il faut souligner l'importance de la propreté. Les impuretés perturbent l'hydratation du ciment ou entraîne des défauts d'adhérence entre les grains de sable et la pâte de ciment, ce qui peut avoir une incidence sur la résistance du béton. Les sels tels que les sulfates ou les sulfures, peuvent être à l'origine de phénomènes de gonflement ou de tâches.



Figure I.8. Mesure de la propreté du sable.

I-3-2-5-Teneur en ions chlorures

Les chlorures modifient la cinétique d'hydratation du ciment et provoquent la corrosion des armatures. La teneur en chlorure issu de l'ensemble des constituants du béton est donc limitée. La teneur en chlorures ne doit pas dépasser 0,02 %

I-3-2-6-Réactivités aux alcalis

Dans des conditions défavorables et en présence d'humidité, les phénomènes d'alcali-réaction peuvent provoquer un gonflement du béton (Figure I.9). Les granulats sont désignés comme étant non réactifs (NR), potentiellement réactifs (PR) ou potentiellement réactifs à effet de pessimum (PRP).



Figure I.9. Eclatement du béton à cause d'une réaction alcali-granulat.

I-3-2-7-Teneur en soufre et en sulfates

Les granulats peuvent contenir de faibles quantités de sulfates et de sulfures sous réserve que leur teneur en soufre total S n'exécède pas 0,4 % en masse. La teneur en sulfates (SO₃) doit être inférieure à 0,2 %. On la détermine si S est supérieure à 0,08 %.

Les sulfures présents dans les sables peuvent en s'oxydant se transformer en sulfates qui risquent de générer des phénomènes de gonflement. Il faut donc limiter la teneur en soufre pour se prémunir de ce phénomène. Les sulfates peuvent perturber la prise et les actions des adjuvants d'où la nécessité de limiter leur teneur dans le béton.

I-4-Influence des caractéristiques sur le comportement des bétons

Vijaya & Selvan [10] , ont remplacé partiellement un sable de rivière par un sable concassé nommé « M-sand » à hauteur de 30 %, 40 %, 50 %, 60 %, 70 % et 100 %, dans des bétons M30, M40 et M50.

Ils ont constaté une augmentation de la résistance à la compression du béton lors du remplacement de sable de rivière par « M-sand » jusqu'à 60 %. Au-delà de ce pourcentage une réduction de la résistance est observée. La Figure I.10, montre que pour le béton de qualité M30, la résistance à la compression a augmenté de 30 % pour un remplacement de 60 % par rapport au béton conventionnel, tandis que pour le béton de qualité M40, la résistance à la compression du béton remplacé a augmenté de 19 %. Pour le béton de qualité M50, il n'est augmenté que de 18%.

Ceci est expliqué par le tassement de particules plus dense et de la nature sans limon du béton élaboré par « M-sand ».

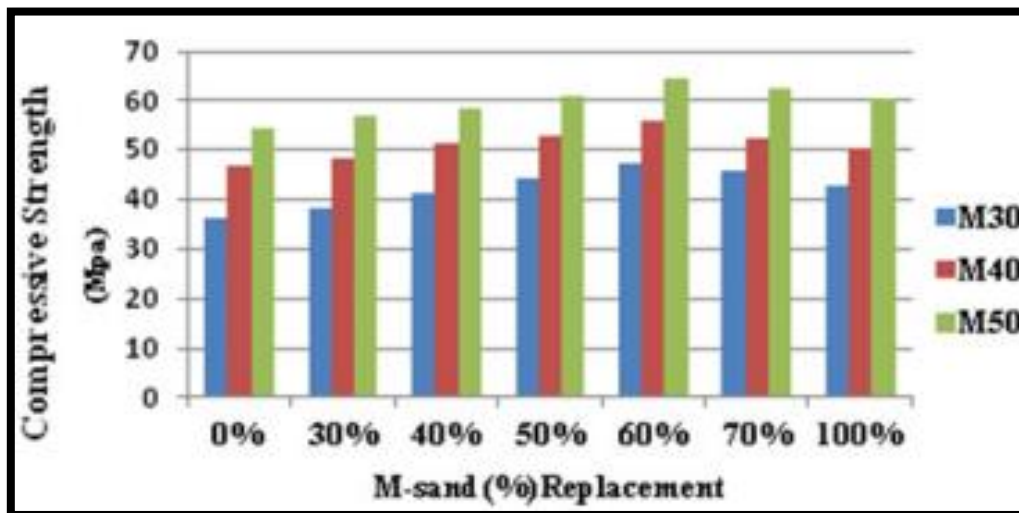


Figure I.10. Résistance à la compression des Bétons dans l'étude de Vijaya & Selvan.

Les bétons à 60 % de remplacement par « M-sand » ont été immergés dans une solution acide sulfurique à 5 % pendant 28 jours. Les bétons contenant 100 % de sable naturel, ont enregistré une perte de poids et une perte de résistance à la compression supérieures à celles des bétons contenant 60 % de « M-sand » comme l'indique le tableau I.1.

Tableau I.1. Perte de poids et résistance à la compression des bétons de l'étude de Vijaya & Selvan.

Mix designation	M-sand (%)	Weight loss (%)	Compressive strength loss(%)
M30	0%	2.65	9.73
M30	60%	2.36	9.54
M40	0%	2.46	8.49
M40	60%	2.25	8.31
M50	0%	2.23	8.08
M50	60%	2.09	7.98

Avec un remplacement de 5% du ciment par la fumée de silice, Shanmugapriya et coll. [11] ont élaboré un béton haute performance avec les mêmes pourcentages que l'étude précédente.

Le tableau I.2 révèle les résultats du test de sorptivité. On constate que le béton à haute performance à base de sable concassé « M-sand » présente des valeurs de sorptivité inférieures à celles du béton à sable naturel de rivière en présence de fumée de silice. La sorptivité diminue avec l'augmentation de la teneur en « M-Sand ». La valeur de sorptivité du béton de sable naturel était.

Tableau I.2. La sorptivité des bétons de l'étude de Shanmugapriya et coll.

Mix	Sorptivity at 10 ⁻⁶ (m/s0.5)	
	28 Days	90 Days
M1	14	10.5
M2	13.32	10.35
M3	12.25	9.28
M4	11.82	8.45
M5	9.55	6.26
M6	6.06	4.86

Dans leur étude Shen et coll. [12] ont concluent que le sable marin MS a une rondeur et un rapport longueur-largeur plus élevés (Figure I.11) , ainsi que des plages de distribution plus larges de ces paramètres par rapport au sable de rivière RS. À l'échelle microscopique, la plupart des MS ont une rugosité de surface inférieure à celle du RS. Pour obtenir une maniabilité similaire, la plupart des bétons MS nécessitent un dosage de réducteur d'eau plus élevé que le béton RS (Tableau I.3), et les MS contenant moins de poudre de pierre et de morceaux d'argile nécessitent un réducteur d'eau encore plus faible. Presque tous les bétons MS ont une résistance supérieure à celle des bétons RS avec la même composition de pâte. La forme des particules et la texture de la surface du MS ont un effet moins significatif sur son comportement dans le béton que la poudre de pierre, la teneur en d'argile et la gradation du MS, de sorte que le MS avec un processus de production approprié peut avoir un meilleur comportement dans le béton que le RS.

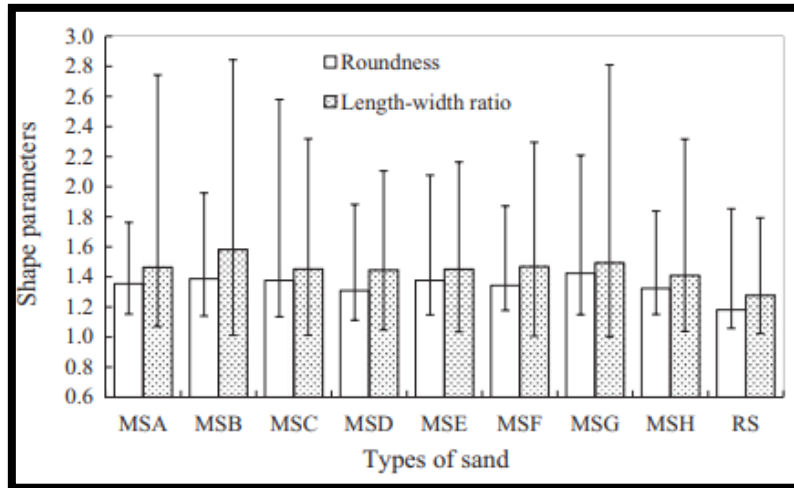


Figure I.11. Analyse de la forme des sables dans l'étude de Shen et coll.

Tableau I.3. Formulation des bétons dans l'étude de Shen et coll.

No	Mix proportion (kg/m ³)					W/B	Sand ratio (%)	Water reducer dosage (%)
	Cement	Fly ash	Crushed stone	Sand	Water			
MSA	425.9	47.3	1134.2	667.3	161.5	0.34	37	1.25
MSB	425.9	47.3	1117.6	683.1	161.5	0.34	38	1.15
MSC	425.9	47.3	1201.0	636.4	161.5	0.34	35	1.40
MSD	425.9	47.3	1134.2	643.5	161.5	0.34	36	0.90
MSE	425.9	47.3	1167.6	670.5	161.5	0.34	36	1.90
MSF	425.9	47.3	1084.2	718.8	161.5	0.34	40	1.90
MSG	425.9	47.3	1100.9	700.7	161.5	0.34	39	0.70
RS	425.9	47.3	1134.2	667.3	161.5	0.34	37	0.95

Le remplacement du sable naturel de rivière par le sable concassé contribue à réduire les pores du béton et le rend plus imperméable (rend le béton moins perméable aux ions chlorure). À l'âge de 28 jours, le remplacement a permis d'obtenir un faible niveau de pénétration des ions chlorure. A 90 jours d'âge (Figure I.12), tous les niveaux de remplacement du sable concassé dans les bétons à haute performance présentent un faible niveau de pénétration des ions chlorure contrairement au faible niveau des bétons témoins correspondants au même âge. Cette diminution de la pénétration des ions chlorure est due au raffinement des pores dans le béton haute performance à sable concassé.

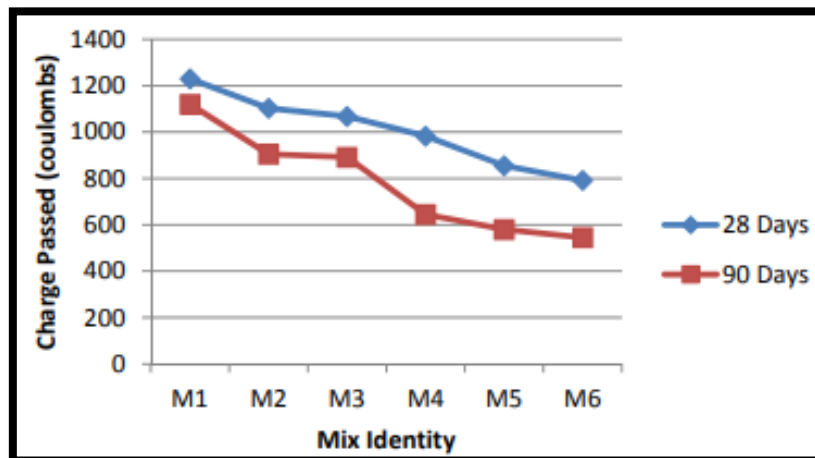


Figure I.12. Effet du sable concassé sur la perméabilité aux ions chlorure dans l'étude de Shanmugapriya et coll.

L'étude menée par Limeira et coll. [13] sur l'effet du sable marin de dragage (DMS) comme correcteur granulaire fin (3 types de DMS), en substitution partielle du sable calcaire broyé (de 15% jusqu'à 50% par masse) destiné aux installations portuaires a révélé que les bétons réalisés avec le pourcentage le plus élevé de DMS ont obtenu des résultats supérieurs au béton de référence RC à 7 jours. La substitution jusqu'à 50 % de DMS ait amélioré le compactage des mélanges car les interstices du squelette granulaire ont été comblés par un matériau plus fin. Après 28 jours de cure, tous les bétons réalisés avec incorporation progressive de DMS (de 25 % jusqu'à 50 %) dépassaient les résultats du RC (Figure I.13). De plus, il se peut que l'eau adsorbé présente à la surface du matériau DMS et la quantité d'additif plus élevée, produisent une réaction plus tardive du ciment.

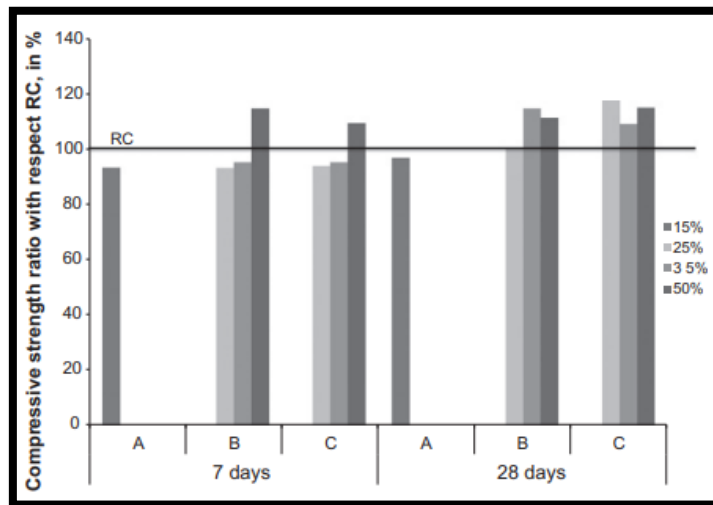


Figure I.13. Rapport de résistance à la compression des bétons de l'étude de Limeira et coll.

Tous les bétons ont présenté une évolution similaire au cours de l'essai de sorptivité (Figure I.14). Les résultats ne montrent pas de différence significative entre les mélanges avec du sable marin et les mélanges témoins réalisés avec du sable naturel.

Cela peut être lié à la fraction granulométrique plus petite du DMS, qui améliore la phase mortier des bétons. Par conséquent, l'accessibilité à l'eau était réduite dans les bétons puisque tous les mélanges sont réalisés avec le même rapport E/C.

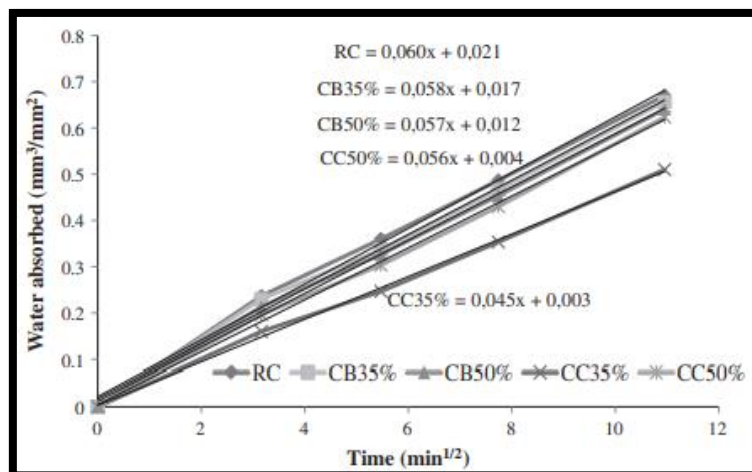


Figure I.14. Sorptivité des bétons de l'étude de Limeira et coll.

Dans l'étude de Ganesan et coll.[14], ils ont remplacé du sable concassé par du sable marin. Les résultats montrent qu'après 60% de remplacement, les valeurs de la résistance à la compression ont commencé à diminuer (Tableau I.4). Ceci est dû au fait que le sable marin ait un pourcentage plus élevé de particules plus fines, ce qui favorise une plus grande résistance en comblant les lacunes du béton.

Tableau I.4. Résistances à la compression des bétons étudiés par Ganesan et coll.

Mix ID	Compressive strength in MPa	
	7 Days	28 Days
M100	15.4	25.5
MS20	16.2	25.7
MS40	16.5	26.5
MS60	17.7	27
MS80	13.6	23
MS100	12	21

Les cubes trempés dans de l'eau contenant 1% d'acide sulfurique indiquent que lorsque le pourcentage de remplacement augmente, la perte de poids augmente également (Tableau I.5). La perte de résistance à la compression a augmenté pour les échantillons MS20, MS40 et MS60, mais a diminué pour les échantillons MS80 et MS100 en raison de la réaction entre la teneur en chlorure et l'acide.

Tableau I.5. Résultats de l'attaque acide des bétons étudiés par Ganesan et coll.

Mix ID	Weight before curing W_1 (g)	Weight after curing W_2 (g)	Loss in weight (%)	Compressive strength		Loss in compressive strength (%)
				Before attack	After attack	
M100	785	780	0.64	28.02	28	0.07
MS20	780	775	0.64	23.46	23.02	1.87
MS40	770	766	0.52	22.75	17.53	22.94
MS60	760	754	0.79	22.14	15.53	29.85
MS80	740	731	1.22	17.04	14.16	16.9
MS100	735	724	1.50	16.98	13.2	21.26

L'étude de treize variantes de sable (10 sables de carrière et 3 sables de rivière avec différentes formes, ronds et lisses), Li et coll.[15] ont constatés une augmentation de la résistance à la compression et la flexion (Tableau I.6). Cette augmentation est due aux quantités importantes de particules inférieures à 75 μm et la rugosité de surface. Ces effets agissent comme des sites de nucléation pour les produits de réaction d'hydratation du ciment à jeune âge. De plus, les micros fines améliorent la compacité et augmentent la densité de la matrice pâteuse.

Tableau I.6. Relation entre la rugosité et les résistances mécaniques des bétons étudiés par Li et coll.

Samples	Roughness (s)	Crushing value (%)	Compressive strength (MPa)	Flexural strength (MPa)	Abrasion loss (kg/m ²)
RS0	14.8	28.0	46.9	7.4	2.281
RS1	13.1	7.2	47.8	7.8	1.804
RS2	13.8	15.2	48.0	7.7	1.822
MLS0	18.3	17.3	49.7	8.0	1.600
MLS1	15.8	7.8	49.4	8.2	1.644
MLS2	16.6	26.5	48.5	7.6	1.911
MLS3	18.1	13.3	50.1	8.1	1.591

Chapitre II : Valorisation des sables recyclés dans le béton

CHAPITRE II : Valorisation des sables recyclés dans le béton

La conservation des ressources naturelles et la protection de l'environnement, sont les priorités de chaque pays. D'un autre côté les déchets qui prennent de plus en plus de place s'amplifie. Le recyclage ou la valorisation des déchets dans les matériaux cimentaires est une opportunité à saisir. Afin de réduire les fractions granulaires à caractère naturel, il est judicieux de les substituer par des déchets.

II.1. Les déchets

II.1.1. Définition

Les déchets sont définis selon leur domaine d'étude de plusieurs manières différentes ainsi que selon leur origine et leur état.

II.1.1.1. Définition européenne

« C'est toute substance ou tout objet dont le détenteur se défait ou dont il a l'intention de se défaire » [16].

II.1.1.2. Définition Algérienne

La loi N° 01-19 du 12 décembre 2001 du Journal Officiel de la République Algérienne (J.O.R.A) N° 77 en 2001, relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets; dans son article trois arrête (officiellement) les définitions des différents types de déchets comme suit : « tout résidu d'un processus de production , de transformation ou d'utilisation et plus généralement toute substance , ou produit et tout bien meuble dont le propriétaire ou le détenteur se défait, projette de se défaire, ou dont il a l'obligation de se défaire ou de l'éliminer».[17]

II.2. Les différents types des déchets et leurs gisements

Notre société produit une multitude de déchets que l'on peut classer en plusieurs catégories :

II.2.1. Les déchets municipaux :

ils regroupent l'ensemble des déchets dont la gestion relève de la compétence de la collectivité. Cette catégorie de déchets comprend ainsi les ordures ménagères (ensemble des déchets produits par l'activité quotidienne des ménages), les déchets ménagers collectés séparément (recyclables), les déchets d'activités économiques assimilés aux déchets ménagers, les déchets collectés en déchetteries et les déchets dangereux des ménages. (Figure II.1)



Figure II.1. Pile de déchets municipaux.

II.2.2. Les déchets industriels :

Ils sont classés, selon leurs caractères plus ou moins polluants en trois grandes catégories [18] :

II.2.2.1. Les déchets industriels spéciaux (D.I.S) :

contiennent des éléments polluants en concentration plus ou moins forte. Ils présentent certains risques pour la santé de l'homme et l'environnement. Ils sont signalés en raison de leurs propriétés dangereuses par un astérisque dans la liste des déchets figurant à l'annexe II décret n° 2002-540 du 18 avril 2002.

II.2.2.2. Les déchets industriels banals (D.I.B) :

appelés aussi déchets industriels assimilés aux déchets ménagers. Ils sont constitués de déchets non dangereux et non inertes. Ils contiennent les mêmes composants que les déchets ménagers mais en proportions différents.

II.2.2.3. Les déchets industriels inertes :

sont des déchets non susceptibles d'évolution physique, chimique ou biologique importante. Ils sont essentiellement constitués de déblais et gravats et ne doivent pas être mélangés avec d'autres déchets (Figure II.2). Les dépôts de déchets inertes sont souvent à l'origine de décharges sauvages [19].



Figure II.2. Les déchets inertes

II.2.3. Les déchets nucléaires :

ils nécessitent des techniques de précautions particulières vis-à-vis de la protection de l'environnement, ainsi que pour le transport et le stockage.

II.2.4. Les déchets du BTP :

ils regroupent l'ensemble des déchets produits par les activités de travaux.

D'autre type de déchets existent (comme le montre la figure II.3) telles que les déchets des activités de soins (chimiques et toxiques), les déchets agricoles, etc.[20]

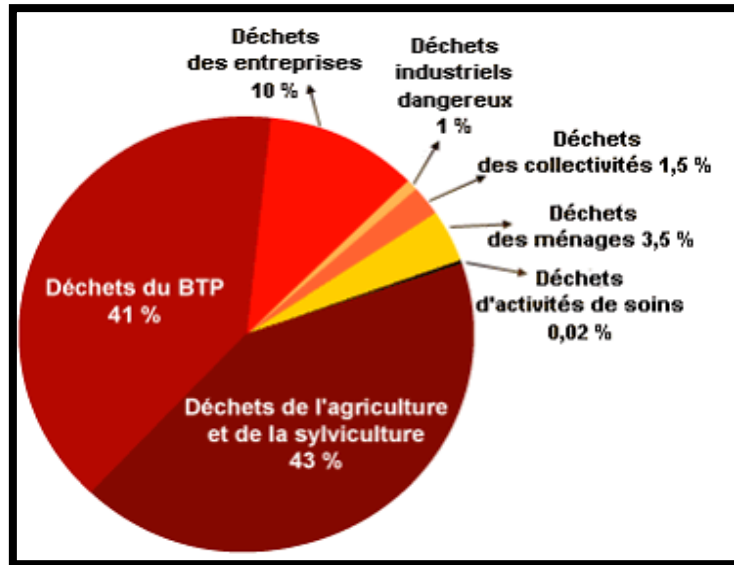


Figure II.3. Évaluation de la production de déchets des habitants et des activités.[21]

II.3. La gestion des déchets

Dans le secteur de la gestion des déchets, la loi 01-19 à été renforcée par plusieurs textes d'application. En compte les principes suivants :

- La prévention, la réduction de la production et de la nocivité des déchets à la source.
- L'organisation du tri, de la collecte, du transport et du traitement des déchets
- La valorisation des déchets par leur réemploi, leur recyclage et toute autre action visant à obtenir.
- Le traitement écologiquement rationnel des déchets.

II.3.1. Principales opérations de gestion des déchets

II.3.1.1. La collecte des déchets

C'est le processus par lequel les déchets sont collectés et transportés jusqu'au lieu de traitement et de tri.

II.3.1.2. Les traitements des déchets

Le traitement des déchets débute après les opérations de collecte, de transport et de prétraitement. Il est réalisé par des opérateurs privés ou publics, dans le cadre du service public ou privé. Il existe plusieurs types et variantes de traitement, souvent adaptés au type de déchet.

II.3.1.3. Réutilisation

L'opération par laquelle des matières ou produits qui sont devenus des déchets sont utilisés de nouveau.

II.3.1.4. La valorisation

Toute opération dont le résultat principal est que des déchets servent à des fins utiles en substitution à d'autres substances.

II.3.1.5. L'élimination

Il s'agit de la dernière étape du processus de gestion des déchets. Le processus consiste à éliminer les déchets non recyclables restants, ce qui comprend deux méthodes : l'incinération et la mise en décharge.

a. L'incinération

Il consiste en la destruction du matériau ou de produits par incinération. Il s'agit d'un moyen approprié d'éliminer les déchets contaminés et qu'il ne convient pas à l'utilisation (figure II.4).



Figure II.4. Incinération des déchets.

b. La mise en décharge

La mise en décharge est le processus le plus simple et le plus économique. Il existe différents types :

***La mise en décharge surveillée :** Il s'agit d'un site d'enfouissement amélioré, où se trouve un ou des superviseurs chargés de guider les engins. De plus, il y a une intervention mécanique pour s'assurer que les déchets sont enfouis et recouverts de terre.

***La mise en décharge sauvage :** C'est une décharge illégale, recevant des déchets de toutes sortes, avec de nombreux défauts et de mauvaises odeurs. Elle présente un risque de pollution des eaux souterraines et des risques d'incendie.

***La mise en décharge contrôlée :** Il s'agit d'une décharge réglementaire, qui répond à de nombreuses exigences telles que les sites d'interface des déchets, l'épaisseur, la capacité, la collecte et la purification de l'eau qui coule [22].

II.4. Les déchets en Algérie

Selon Bouadam [23], dans son étude sur la gestion des déchets, 13 millions de tonnes de déchets on étaient produits en 2018 avec seulement 1% des déchets compostés, environ 7% de déchets recyclés et 82% sont éliminés.

En termes de coûts de la dégradation de l'environnement, dû aux déchets ménagers et assimilés DMA est passé de 0,1% du PIB de 1999, à 0,7% du PIB en 2011, selon, soit une augmentation de 7 fois. Elle est passée de 0.76 Kg/ J /h en 1980 à 0,85 kg/J/ par habitant en 2018.

L'évolution de la population a été accompagnée par une augmentation considérable des déchets. En matière de DMA, au bout de sept ans (de 2011 à 2019) ils sont passés de 3,9 MT à 13 MT avec un taux de croissance d'environ 3 % par an (tableau II.1).

Tableau II.1. Evolution de la population et des DMA [23]

Année	2011	2014	2016	2018
Population Mh	36.3	39.1	39.6	43.22
DMA/MT	3.9	11	11.6	13

Néanmoins les efforts de sensibilisation ont reporté leurs fruits. En 2004, 57% de déchets déposés dans les décharges sauvages, 30% dans des décharges publiques non contrôlée, 10% dans les CET, 2% orienté vers le recyclage et 1% pour le compostage ont étaient enregistrer (Figure II.5). En 2014 un net progrès dans le traitement des déchets a été enregistré avec l'augmentation du taux de recyclage à environ 7% et une baisse dans le déversement en décharge qui est de 46%. L'enfouissement en CET est de l'ordre de 36%, 10% (autres, brulage) et le compostage reste de 1% (Figure II.6).

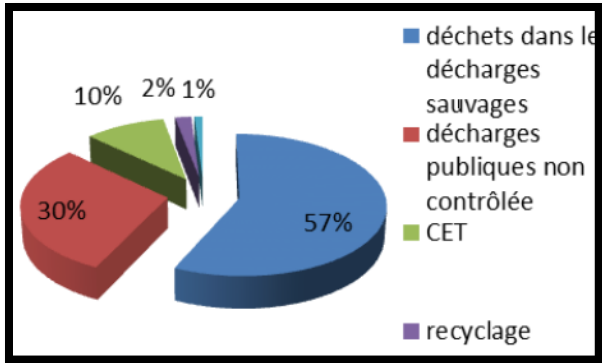


Figure II.5. Traitement des déchets en 2004.

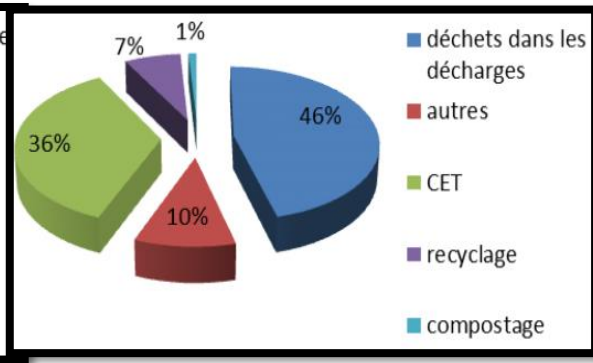


Figure II.6. Traitement des déchets en 2014.

A Batna comme exemple, Sefouhi et coll. [24] estiment la quantité de déchets collectée à 131 tonnes par jour soit 47 715 tonnes par an, soit un rapport de 0,46 kg/habitant/jour. Le tri de ces déchets a permis de déterminer la présence de 57 % de déchets putrescibles, 15 % de papiers et 3 % de cartons, 11 % de plastiques, 8 % de « textiles sanitaires » et de 2,3 % d'autres textiles (Tableau II.2).

Tableau II.2. Evolution de la composition des déchets ménagers dans la ville de Batna.

Type de déchets	Pourcentage (%) 1983	Pourcentage (%) 2003	Pourcentage (%) 2009
Matière organique	77.1	79,17	56.84
Papier carton	7	6,31	17.75
Matière plastique	2.77	6,83	10.9
Métaux ferreux	4.08	2,05	1.22
Verre	1.05	0.89	1.81
Cuir	0.5	1.73	
Textiles	2.75	2.01	10.3
Bois	0.2	0,74	
Autre	3.8	0,23	1.18
Total	100 %	100 %	100 %

La part des « papiers cartons » s'est accrue fortement ainsi que les plastiques. Les sacs en plastique se sont multipliés alors que, dans les années 1980, les habitants utilisaient des paniers. Les boissons gazeuses et l'eau sont conditionnées en bouteilles plastiques alors que, dans les années 1980 il s'agissait les bouteilles étaient en verre. Cet accroissement est la caractéristique d'une société de consommation qui abandonne le lavable et le réutilisable, et adopte le jetable. Ce mode de consommation s'écarte des principes du développement durable, aujourd'hui préconisés.

II.4. Les déchets en génie civil

II.4.1. Les laitiers des hauts fourneaux

C'est un résidu issu de la fabrication de la fonte au haut fourneau à une température proche de 1500°C, où il correspond à la gangue du minerai de fer, isolée de la fonte liquide où il flotte par différence de densité (Figure II.7).

Pour le sidérurgiste, le laitier est un stérile, dont la valorisation, quoique non négligeable, est souvent moins intéressante que celle de la fonte. Les minerais de fer pauvres, comme la minette lorraine, induisent alors une plus grande consommation de coke au haut fourneau, puisque la quantité de matière à chauffer dans le haut fourneau est plus importante.

Le laitier de haut fourneau est souvent valorisé dans la fabrication de ciment et dans les travaux publics (ballast, enrobé bitumé, ...).

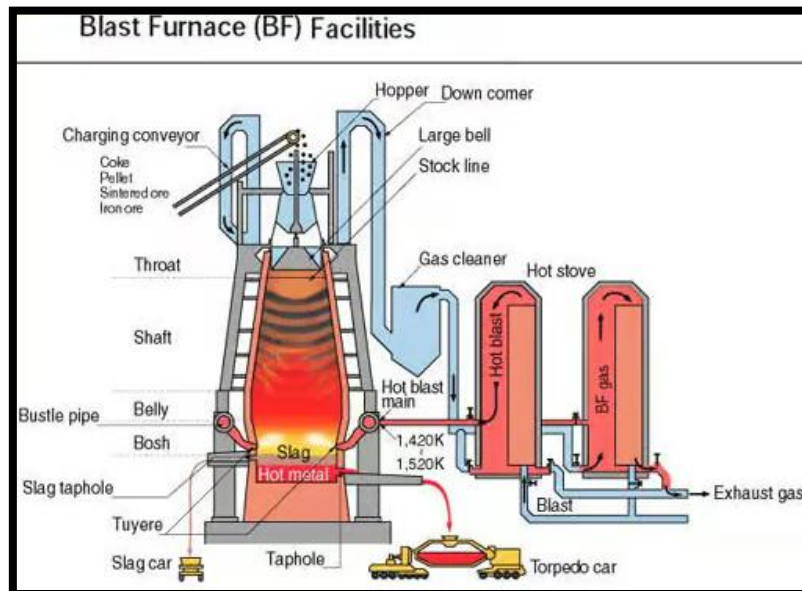


Figure II.7. Le haut fourneau et ses annexes.

Bougara et coll. [25] ont soumis le laitier d'EL-Hadjar à différents types d'activation. Les laitiers ont été activées mécaniquement en broyant le laitier à 250, 360 et 420 m²/kg de surface Blaine, thermiquement en durcissant des échantillons de mortier à 20, 40 et 60 C, et chimiquement en mélangeant les laitiers avec deux alcalis, NaOH et KOH à différentes concentrations.

Les trois méthodes ont amélioré la réactivité du laitier d'EL-Hadjar. Les résultats ont indiqué que qu'ils sont très sensibles à l'augmentation de la température (Figure II.8, exemple d'un mélange à 50% de laitier). L'augmentation de la finesse entraîne un développement accru de la résistance, et la finesse du laitier doit être supérieure à celle du ciment pour obtenir de meilleures performances. L'activation alcaline des scories entraîne un développement accru de la résistance, mais la résistance est inférieure à celle du mortier témoin.

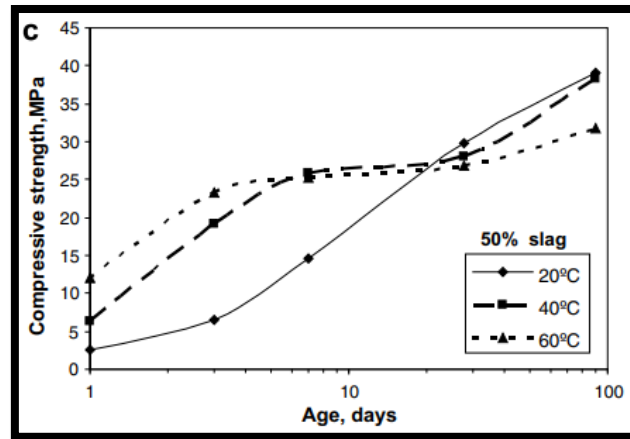


Figure II.8. Comportement du laitier selon la température dans l'étude de Bougara et coll.

II.4.2. La cendre volante

La combustion du charbon pour la production d'électricité (Figure II.9) donne plusieurs sous-produits. Dans les centrales électriques anciennes, les résidus de la combustion de la houille sont appelés « mâchefer ». Dans les centrales modernes, les petites particules sont appelées « cendres volantes ».

Lors de la combustion, les impuretés minérales du charbon (argile, feldspath, quartz et schiste) fusionnent en suspension et flottent hors de la chambre de combustion avec les gaz d'échappement. À mesure que le matériau fondu monte, il refroidit et se solidifie en particules vitreuses sphériques. Elles sont collectées dans les gaz d'échappement par des précipitateurs électrostatiques ou des filtres à manches. La poudre fine ressemble au ciment Portland mais elle est chimiquement différente.

Deux types de cendres volantes sont couramment utilisés dans le béton : la classe C et la classe F. La classe C, est souvent constituée de cendres volantes à haute teneur en calcium avec une teneur en carbone inférieure à 2%. La classe F, comprend généralement des cendres volantes à faible teneur en calcium avec une teneur en carbone inférieure à 5 % mais parfois aussi élevée que 10 %.

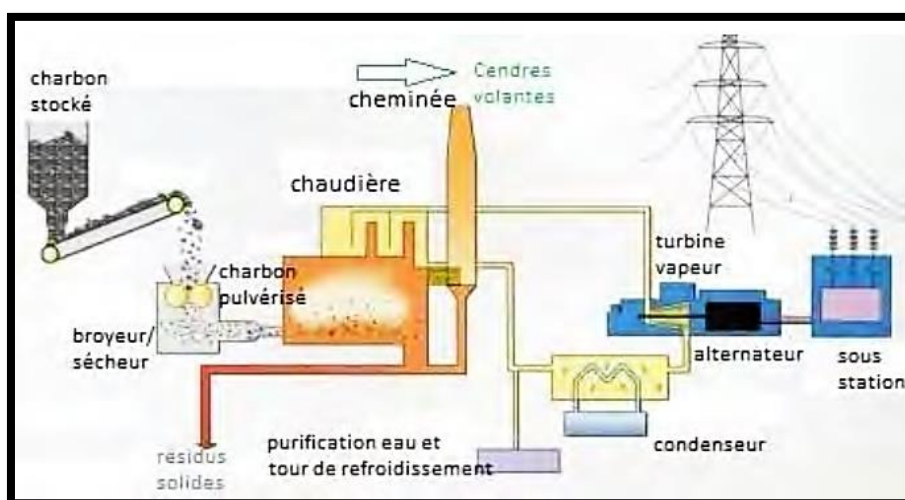


Figure II.9. Schéma de fonctionnement d'une centrale électrique.

Roy et coll. [26] ont constatés que l'augmentation du pourcentage de substitution du ciment par la cendre volante réduit la perte de poids des échantillons de mortier (Figure II.10). L'acide chlorhydrique comme exemple présent dans l'environnement aqueux peut réagir avec l'hydroxyde de calcium du chlorure de calcium, qui se dissout facilement dans la solution acide aqueuse, ou l'élimination de l'hydroxyde de calcium du béton peut avoir lieu par pénétration dans l'eau.

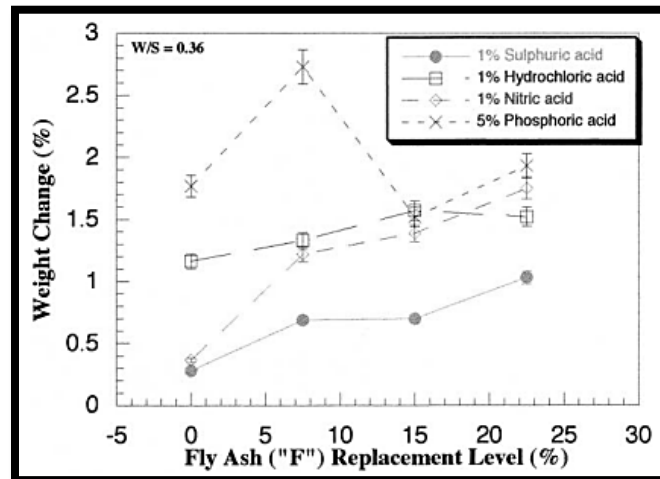


Figure II.10. Perte de poids des mortiers dans divers environnements chimiques dans l'étude de Roy et coll.

II.4.3. Le verre broyé

Le verre est un matériau inorganique produit par fusion, qui a été refroidi dans des conditions qui ont empêché sa cristallisation. Le verre est un solide fragile et généralement transparent préparé par fusion d'un mélange complexe contenant de la silice.

Le composant de base du verre est le sable ou la silice (SiO_2) qu'il contient. La température de fusion de la silice est supérieure à 1700°C , pour faciliter le processus, on lui ajoute des fondants comme la soude, la potasse ou la chaux (Figure II.11). On ajoute également de l'eau et des débris de verre recyclé (calcin). Le tout dans des proportions très précises. A ce stade, les producteurs insèrent quelques additifs qui sont fonction de l'usage du verre. Comme exemple, l'oxyde de magnésium, a pour tâche de rendre le verre plus résistant, l'oxyde de fer donne au verre une teinte verdâtre. Le mélange est ensuite passé au four et porté à une température d'environ 1500°C . C'est la température à laquelle le mélange sableux se transforme en verre liquide.

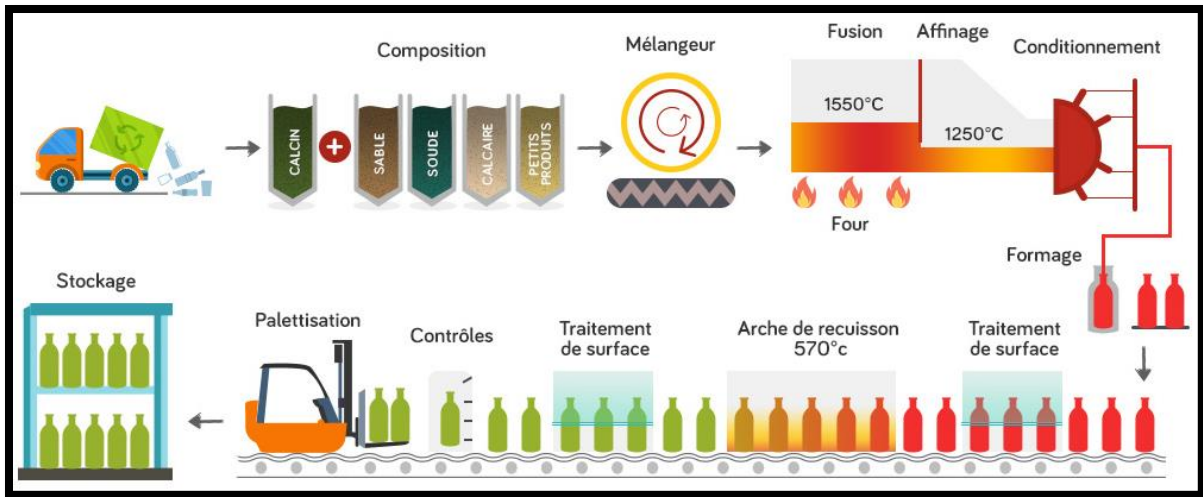


Figure II.11. Processus de fabrication du verre.

Schwarz et coll. [27] ont soumis des échantillons âgés de 28, 56 et 90 jours à un test rapide de perméabilité au chlorure (RCP). Pour les éprouvettes durcies par voie humide pendant 28 jours, les valeurs RCP les plus élevées sont obtenues pour les éprouvettes de béton témoin. Les valeurs RCP pour les mélanges modifiés de poudre de verre (GP) sont plus faibles, ce qui indique un certain degré de raffinement des pores dans ces mélanges à cet âge. Cela est attribué à l'amélioration précoce de l'hydratation du ciment et aux réactions pouzzolaniques. Tous les mélanges présentent des valeurs RCP « modérées » à 56 jours, et des valeurs « modérées » à « faibles » après 90 jours (Figure II.12).

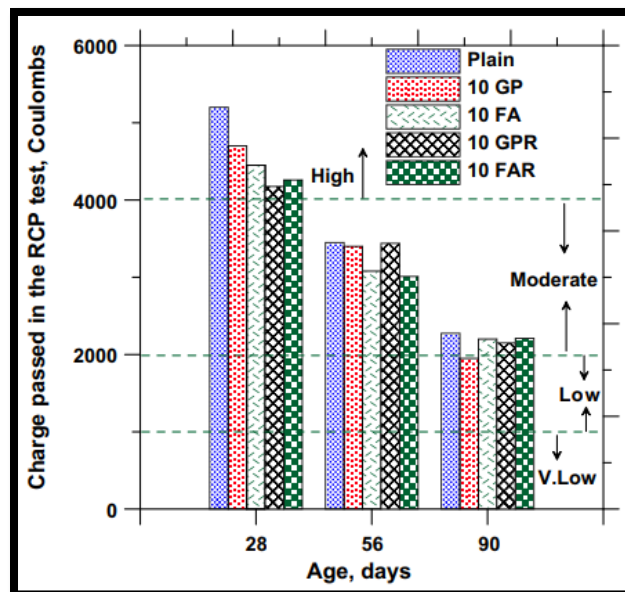


Figure II.12. La perméabilité au chlorure des béton étudiés par Schwarz et coll.

II.4.4. Les pneus usagés

Les principaux matériaux sont l'élastomère (le caoutchouc), le noir de carbone ou encore la silice qui donneront de la résistance au pneu, des huiles ou résines pour permettre un mélange homogène, et enfin des adjuvants chimiques. Selon les proportions et le fabricant, le résultat ne sera pas le même (Figure II.13).

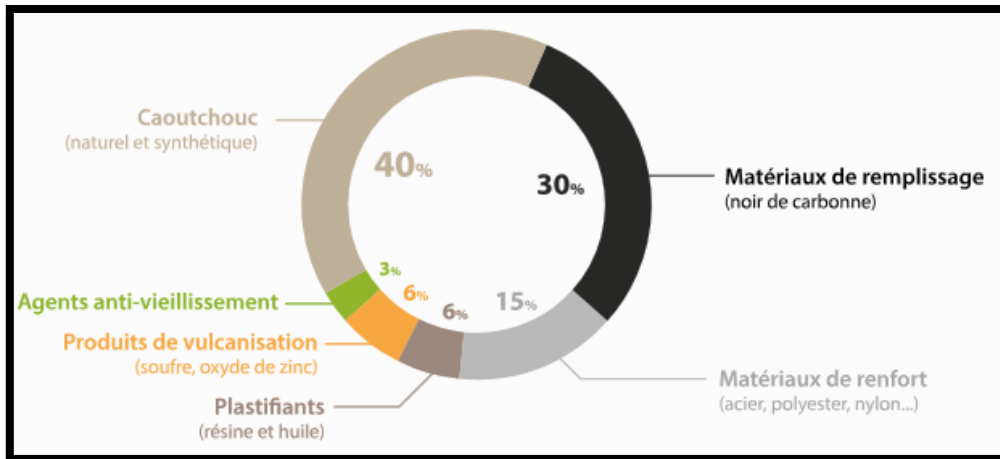


Figure II.13. Les composants principaux d'un pneu.

L'incorporation des déchets de pneus usagés dans la formulation du béton, conduit à une pénétration plus annoncée des chlorures. Thomas et coll. ont observé une augmentation de la profondeur de pénétration des ions chlorure pour des rapports eau-ciment. Lorsque l'on considère les mélanges de béton avec un rapport eau-ciment de 0.4 (Figure II.14), les pénétrations de chlorure de tous les mélanges dans lesquels le caoutchouc granulé a été remplacé jusqu'à 7,5% de granulats fins étaient inférieures ou égales par rapport à la valeur des échantillons de mélange témoin. Au-delà de ce pourcentage la pénétration augmente de plus en plus, car l'adhésion entre les granulats de pneus usagés et la pâte cimentaire commence à se ressentir.

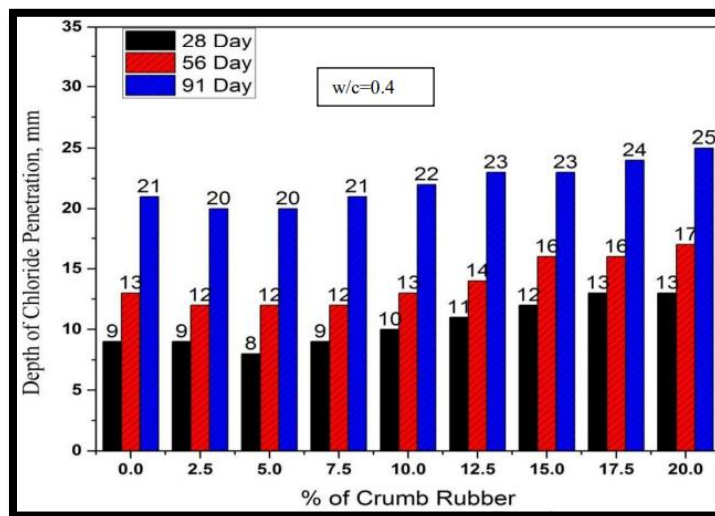


Figure II.14. Profondeur de pénétration du chlorure dans l'étude de Thomas et coll.

II.4.5. La boue de papeterie

Lors de la fabrication du papier, les eaux de presses et les eaux blanches sont extraites de la suspension eau-matières fibreuses dans la machine à papier. En fonction du type de papier à fabriquer et de la composition respective de la suspension eau-matières fibreuses, on obtient des rétentions de différente importance. La rétention indique la proportion relative des matières fibreuses, des matières de remplissage et des matières fines retenues dans le tamis par rapport aux résidus de ces substances dans les eaux usées.

Lors de la fabrication de papiers hygiéniques comme par exemple le papier toilette, les mouchoirs ou le papier à démaquiller, de nombreuses matières fibreuses, de remplissage et matières fines restent dans l'eau extraite de la suspension eau-matières fibreuses lors du criblage et du compactage [28].

Cette eau est traitée dans la station d'épuration de la société. Les matières solides sont alors épaissies avant l'extraction du liquide dans une presse à bandes filtrantes. Ces boues sont recyclées en agriculture comme amendement organique. Elles agissent sur la structure des sols, permettant, notamment, dans certains sols superficiels, de s'affranchir d'un passage d'irrigation, ou dans d'autres sols battants, d'améliorer la structure (Figure II.15).



Figure II.15. Epannage des boues de papeterie.

Ahmadi & Al-Khaja [29] ont travaillé sur une boue de papier. Cinq mélanges de béton contenant différentes teneurs en déchets et un mélange témoin ont été préparés. Les résultats ont révélé qu'à mesure que la teneur de boue augmentait, le rapport eau/ciment du mélange augmentait également, car les déchets ont un degré élevé d'absorption d'eau (tableau II.3). Par conséquent, une quantité supplémentaire d'eau était nécessaire pour l'hydratation du ciment.

Tableau II.3. Absorption d'eau des bétons étudiés par Ahmadi & Al-Khaja

Replacement waste (%)	Water absorption (%)
0	5.6
3	9.1
5	11.9
8	13.7
10	15.7

II.4.6. Les déchets céramiques

La céramique sanitaire est obtenue par porcelaine vitrifiée ou du grès émaillé. Ce dernier à l'avantage d'être plus stable à la cuisson et subissant moins de retrait. Deux types de grès sont utilisés le gros grès et le grès fin. Le premier, subit peu de retrait à la cuisson (inférieur à 3,5 %) et plus économique. Avec le second, on peut réaliser des pièces creuses, par revidage. Une fois la croute est suffisamment épaisse, d'environ 12-13 mm, on aspire la matière encore liquide, et l'on obtient une pièce creuse, donc plus légère.

Lorsque l'argile est façonnée et séché une première fois. Les objets sont recouverts d'un enduit approprié à l'usage final du produit (Figure II.16). On recouvre les objets par l'engobe, la glaçure ou l'émail. Les objets sont ensuite cuits.

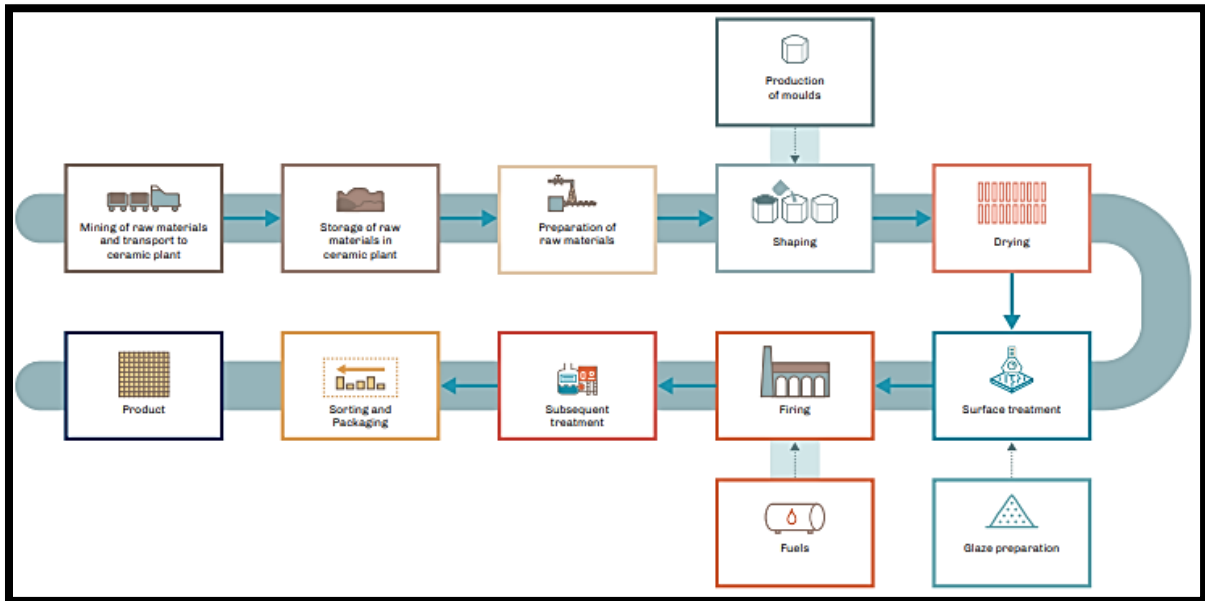


Figure II.16. Diagramme simplifié de la production des céramiques.

En Europe, l'industrie de la céramique réalise un chiffre d'affaires total de 26 milliards d'euros et plus d'un tiers du volume de production est exporté hors de l'UE. L'industrie fournit plus de 200 000 emplois directs et 400 000 indirects dans tous les pays d'Europe. La production du carrelage représente environ 32%, La céramique sanitaire représente quant à elle 5% du marché européen (Figure II.17) [30].

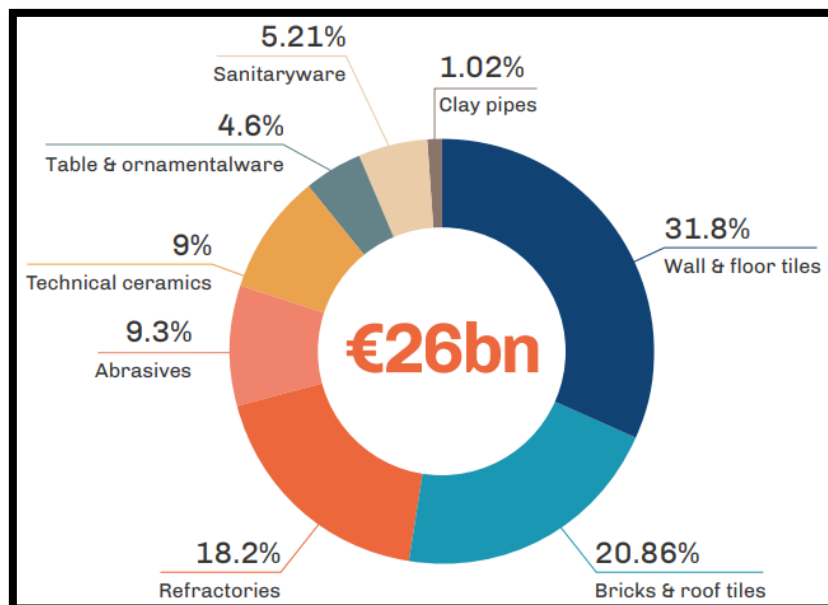


Figure II.17. Pourcentage de production des objets céramiques européens.

L'Asie est restée le plus grand exportateur mondial d'articles sanitaires, augmentant sa part des exportations mondiales à 66% malgré une baisse de 3,5% (Tableau II.4) à 2,44 millions

de tonnes en 2022. La Chine reste en tête du classement avec des exportations de 1,92 million de tonnes (en baisse de 2,6% par rapport à 2021), représentant à elle seule 78% des exportations asiatiques et 52% des exportations mondiales.

L'Union européenne, deuxième exportateur mondial, a également chuté de 3,7% à 520 000 tonnes. Les trois plus grands pays exportateurs représentaient à eux seuls la moitié des exportations de l'UE, mais suivaient des trajectoires différentes, la Pologne et le Portugal conservant leurs niveaux de 2021, tandis que les exportations de l'Allemagne ont diminué de 4,6 %.

Tableau II.4. Opération d'exportation mondiale de céramiques sanitaires en tonnes (2010-2022).

	2010	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	% 22/21	CAGR 22/10	% on 2022 world exports
Asia	1,100,506	1,697,734	1,603,571	1,756,791	1,988,977	2,220,614	2,127,623	2,533,625	2,444,509	-3.5%	6.9%	66.0%
European Union	522,118	569,475	583,409	570,549	585,034	541,584	488,917	539,775	519,756	-3.7%	0.0%	14.0%
Other Europe	132,132	185,960	187,805	203,077	220,127	237,166	235,176	291,352	253,113	-13.1%	5.6%	6.8%
NAFTA	268,401	340,565	368,326	366,973	375,412	365,789	368,372	379,235	327,907	-13.5%	1.7%	8.9%
South America	100,043	72,548	80,315	79,513	89,375	86,782	78,814	99,853	84,479	-15.4%	-1.4%	2.3%
Africa	35,861	84,042	71,958	65,933	66,113	75,238	64,296	79,216	73,571	-7.1%	6.2%	2.0%
Oceania	1,960	902	1,084	411	583	580	315	364	867	138.2%	-6.6%	0.0%
TOTAL WORLD	2,161,021	2,951,226	2,896,468	3,043,247	3,325,621	3,527,753	3,363,513	3,923,420	3,704,202	-5.6%	4.6%	100.0%
% var y-o-y		2.1	-1.9	5.1	9.3	6.1	-4.7	16.6	-5.6			

Rashid et coll. [31] ont remplacé 10, 20 et 30% de granulats naturels de rivière (20mm) par des granulats de céramique sanitaire recyclé. Ils ont observé que la résistance à la compression augmente avec l'âge (Figure II.18). Cette amélioration est obtenue grâce à la forme rugueuse des granulats de déchets céramiques ce qui assure également une liaison adéquate entre les déchets céramiques et la pâte de ciment. L'autre raison est une absorption d'eau plus élevée des déchets céramiques par rapport aux granulats naturels, ce qui fournit un environnement approprié pour une hydratation plus poussée du béton et une augmentation de la résistance mécanique. Parce qu'il s'agit d'un matériau poreux qui agit comme agent de cure humide pour l'hydratation de la pâte de ciment.

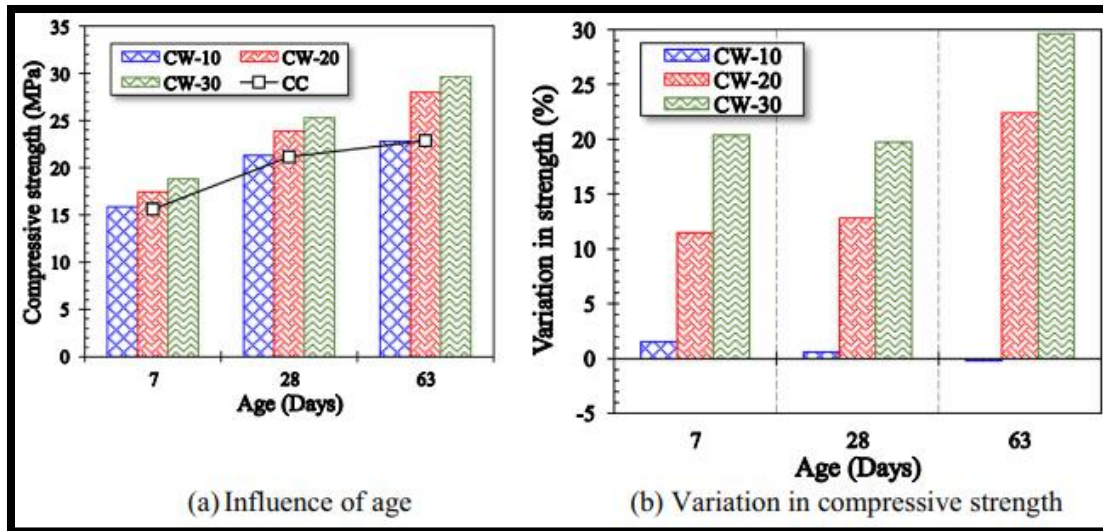


Figure II.18. Influence des déchets de céramique sanitaire sur la résistance à la compression dans l'étude de Rashid et coll.

Pitarch et coll. [32] ont comparé un béton témoin à granulats calcaires (4/16) et des bétons avec la substitution de cette fraction (14, 20 et 30% en poids) par des granulats de céramiques sanitaires. Ils ont constaté que la résistance à la compression diminue (Tableau II.5). Cette diminution est due au coefficient d'aplatissement élevé, à la forme angulaire, la surface lisse et à l'absorption d'eau réduite de ces granulats de céramique. Alors que les deux premiers paramètres rendent difficile le compactage des sables, les deux derniers réduisent l'adhérence mécanique entre les particules de CSW et la pâte liante.

Tableau II.5. Masse volumique et résistance à la compression des bétons étudiés par Pitarch et coll.

Concrete mix	Density (kg/m ³)	Compressive strength (MPa)	
		7 days	28 days
RC	2510 ± 2.85	31.51 ± 0.99	37.80 ± 1.79
CSW14	2450 ± 2.91	31.37 ± 1.13	36.58 ± 0.59
CSW20	2445 ± 4.73	30.40 ± 0.04	35.72 ± 0.37
CSW30	2428 ± 5.18	31.02 ± 0.39	35.62 ± 1.07

Dans la catégorie des poudres, Kumar & Reddy [33] ont remplacé du ciment par 10, 20, 30% de poudre céramique. Ils ont remarqué une légère diminution de la résistance à la compression à 28 jours (Tableau II.6). A court terme et sous l'effet d'une teneur élevée en silice les résistances des bétons modifiés ont dépassé la résistance du béton témoin.

Tableau II.6. Résistance à la compression des bétons étudiés par Kumar & Reddy.

	7days	14 days	28days
Conventional mix	11.52	26.74	31.71
10% Replacement	11.89	26.79	31.12
20% Replacement	13.23	25.63	29.83
30% Replacement	13.68	23.77	27.55

CHAPITRE III :

Essai et résultats

CHAPITRE III : Essai et résultats

III.1. Caractéristiques des matériaux

III.1.1. Introduction

Le béton ordinaire est un mélange de ciment, d'eau, de sable et de gravier en proportions spécifiques.

Dans ce chapitre, nous allons présenter les caractéristiques des matériaux utilisés (Figure III.1) pour la confection des bétons étudiés.

*Ciment de type CEMI 42.5 N fournie par le groupe Lafarge-Holcim établie à M'sila.

*Un sable concassé au laboratoire, à base de déchets céramique sanitaire.

*Un sable de la région de BOUSAADA (OUED MAITAR).

*Des graviers concassés de fraction granulaire (3/8, 8/16, 16/25) d'origine calcaire.

*L'eau potable du laboratoire (laboratoire de génie civil de M'sila).



Figure III.1. Les différents matériaux utilisés.

III.2. Le sable

III.2.1. Masse volumique absolue (NF P18-555)

C'est la masse d'un corps par unité de volume absolu de matière pleine (volume de matière seule, pores à l'intérieur des grains exclus), notée et exprimée en (g/cm^3 , kg/m^3 , T/m^3) comme indiqué aux tableaux III.1 et III.2. On détermine la masse volumique absolue du sable à l'aide d'un récipient de capacité 1000 ml (Figure III.2).

*On prend 03 échantillons de masse $M = 300$ g.

*On place l'échantillon dans le récipient à 1000 ml et on y verse $V_e = 150$ ml d'eau.

*On malaxe soigneusement le contenu pour chasser l'air qui y existe.

On détermine le volume final occupé par le mélange sable-eau. Soit (V_m) ce volume. Le volume de sable est : $V_s = V_m - V_e$

La masse volumique absolue du sable est déterminée par la formule : $\rho = \frac{M}{V_s}$

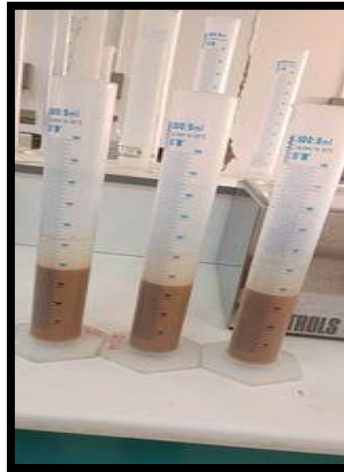


Figure III.2. Masse volumique absolue du sable

Tableau III. 1. Masse volumique absolue de sable naturel.

N° d'essai	M (g)	V_e [g]	V_m [g]	ρ [g/cm^3]	ρ_{moy} [g/cm^3]
1	300	150	266	2,59	2,60
2	300	150	270	2,50	
3	300	150	260	2,73	

Tableau III.2. Masse volumique absolue de sable céramique.

N° d'essai	M (g)	V_e [g]	V_m [g]	ρ [g/cm^3]	ρ_{moy} [g/cm^3]
1	300	150	280	2.30	2.26
2	300	150	285	2.22	
3	300	150	282	2.27	

III.2.2. Masse volumique apparente (NF P 18-555)

A l'état lâche, la masse volumique apparente, est la masse du matériau par unité de volume compris des vides existants entre les grains (Tableaux III.3 et III.4). On détermine la masse volumique apparente du sable à l'aide d'un entonnoir standardisé de capacité 2 à 2.5 litres.

*On remplit l'entonnoir avec du sable sec.

*On pèse le récipient vide M_1 .

*Une fois le récipient est rempli, on nivelle la surface du sable et on pèse le tout. Soit M_2 ce poids.

Avec un volume de $V_r = 900 \text{ cm}^3$, du récipient, la masse volumique apparente du sable est donnée par la formule suivante :

$$\rho_{app} = \frac{M_2 - M_1}{V_r}$$

Tableau III.3. Masse volumique apparente à l'état lâche du sable naturel

N° d'essai	M ₁ [g]	M ₂ [g]	ρ [g/cm ³]	ρ _{moy} [g/cm ³]
1	117	1433	1.46	1.46
2		1420	1.45	
3		1431	1.46	

Tableau III.4. Masse volumique apparente à l'état lâche du sable céramique

N° d'essai	M ₁ [g]	M ₂ [g]	ρ [g/cm ³]	ρ _{moy} [g/cm ³]
1	117	1335	1.35	1.36
2		1336	1.35	
3		1343	1.36	

III.2.4. Teneur en eau (NF P 18-555)

Le sable à la capacité de retenir une quantité d'eau très grande, si son humidité est comprise entre la limite de 0 à 3%, on l'appelle sec. Pour avoir cette teneur (Tableaux III.5 et III. 6) il faut :

*Peser un échantillon de sable humide, soit M_h son poids (500 g).

*Laisser l'échantillon dans une étuve à une température de 105°C à 110°C pendant 24 heures.

*Peser l'échantillon de nouveau, soit M_s son poids.

La teneur en eau du sable est :

$$W = \left(\frac{M_h - M_s}{M_h} \right) \times 100 [\%]$$

Tableau III.5. Teneur en eau de sable naturel.

N° d'essai	M _h [g]	M _s [g]	W (%)	Moyenne
1	500	449	0.10	0.11
2	500	447	0.11	
3	500	446	0.11	

Tableau III.6. Teneur en eau du sable céramique.

N° d'essai	M _h [g]	M _s [g]	W (%)	Moyenne
1	500	499.1	0.18	0.17
2	500	499.2	0.16	
3	500	499.1	0.18	

III.2.5. Degré d'absorption d'eau (NF P 18-555)

Elle est le pouvoir d'un matériau d'absorber et de retenir l'eau comme indiqué aux tableaux III.7 et III.8. Elle est définie en pourcentage d'après la formule suivant :

$$A\% = \frac{M_2 - M_1}{M_1} \times 100$$

M₁ : la masse du matériau sec en (g).

M₂ : la masse du matériau imbibée d'eau en (g).

Tableau III.7.Absorption d'eau du sable naturel

N° d'essai	M ₁ [g]	M ₂ [g]	W (%)	Moyenne
1	700	691,5	1,21	1.41
2	700	689,3	1.53	
3	700	689,5	1.50	

Tableau III.8.Absorption d'eau du sable céramique

N° d'essai	M ₁ [g]	M ₂ [g]	W (%)	Moyenne
1	700	689,1	1.56	1.60
2	700	688,8	1.60	
3	700	688,5	1.64	

III.2.6. Analyse granulométrique (NF P 18-560)

L'analyse granulométrique a pour but de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles des grains constituant l'échantillon, la distribution en poids des particules d'un granulat suivant leur dimension permet de déterminer sa continuité.



Figure III.3. Analyse granulométrique du sable.

Après avoir prélevé 1000g du matériau sable sec et peser chaque tamis à vide (m_i), on constitue une colonne de tamis (Figure III.3) propres et secs dont l'ouverture de la maille est respectivement de haut en bas : (5 - 2,5 - 1,25 - 0,63 - 0,315 - 0,16 - 0,08 – fond).

*On verse le matériau sur la colonne et on la fixe soigneusement sur la machine d'agitation.

*Après 10 minutes d'agitation, on pèse chaque tamis séparément Soit (M_i) la masse su tamis plus les granulats. La différents entre M_i et m_i correspond au refus partiel des de tamis.

Le tamisât cumuler est donné par la relation suivant : $T = 100 - R_c$

Où T : Tamisât en (%) et R_c : Refus cumulés en (%)

Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau suivant III.9 et III.10:

Tableau III.9. Analyse granulométrique du sable naturel.

Tamis	Refus partielle	Refus cumulé (g)	Refus cumulé %	Tamisât %
5	0	0	0	100
2,5	51	51	5.10	94.90
1,25	40	91	9.10	90.90
0,63	52	143	14.30	85.70
0,315	194	337	33.70	66.30
0,16	478	815	81.50	18.50
0,08	179	994	99,40	0,60
Fond	6	1000	100	0

Tableau III.10. Analyse granulométrique de sable céramique.

Tamis	Refus partielle	Refus cumule (g)	Refus cumule %	Tamisât %
5	55	0	0	100
2.5	220	220	22	78
1.25	92	312	31.20	68.80
0.63	190	502	50.20	49.80
0.315	260	762	76.20	23.80
0.16	126	888	88.80	11.20
0.08	47	935	93.50	6.50
Fond	10	945	94.50	5.50

Le module de finesse qui nous permet de juger la grosseur du sable (Tableau III.11), est exprimée par le rapport de la somme des refus cumulés des tamis de mailles

Tableau III.11. Classification des modules de finesse des sables.

Quantité du sable	Module de finesse
Gros	> 2.5
Moyen	2 à 5
Fin	1.5 à 2
Très fin	1 à 1.5

Pour le sable naturel, son module de finesse est de 2.24, ce qui est l'équivalent d'un un sable moyen. Pour le sable céramique, le module de finesse indique aussi un sable moyen, il est de 2.86

III.2.7. Equivalent de sable

Cet essai permet de mettre en évidence la proportion d'impuretés argileuses ou ultrafines contenues dans le sable et le pourcentage de poussières nuisibles et les éléments argileux qui diminuent la qualité du béton et mortier. Le déroulement de l'essai s'effectue comme suit :

- *Prendre une pesée de 150 g.
- *Remplir l'éprouvette de solution lavante jusqu'au premier repère (10cm).
- *Verser la prise d'essai (150 g) dans l'éprouvette et taper fortement à plusieurs reprises avec la paume de la main afin de chasser toutes les bulles d'air et favoriser le mouillage de l'échantillon.
- *Laisser reposer pendant 10 minutes.
- *Fermer l'éprouvette à l'aide du bouchon en caoutchouc et lui imprimer 90 cycles de 20 cm de course horizontale en 30 secondes à l'aide d'un agitateur mécanique (Figure III.4) .
- *Rincer avec la solution lavante au-dessus de l'éprouvette ainsi que les parois.
- *Faire descendre le tube laveur dans l'éprouvette en le faisant tourner lentement. Cette opération a pour but de laver le sable et de faire monter les éléments fins et argileux.
- *Effectuer cette opération jusqu'à ce que la solution lavante atteigne le 2^{ème} repère. Laisser ensuite reposer pendant 20 minutes.

Lisez la hauteur h1 du niveau supérieur de flocculant jusqu'au fond de l'éprouvette l'aide d'une réglette. Mesurer avec la règle la hauteur h2 comprise entre le niveau supérieur de la partie sédimentaire et le fond de l'éprouvette.

$$ESV = \frac{h_2}{h_1} \times 100 \%$$

- *Introduire le piston dans l'éprouvette et laisser descendre doucement jusqu'à ce qu'il repose sur le sédiment. A cet instant bloquer le manchon du piston et sortir celui-ci de l'éprouvette.
- *Introduire le réglet dans l'encoche du piston jusqu'à ce que le zéro vienne buter contre la face intérieure de la tête du piston, soit h'2 la hauteur lue et correspondant à la hauteur de la partie sédimentée.

$$ESP = \frac{h'2}{h'1} \times 100$$

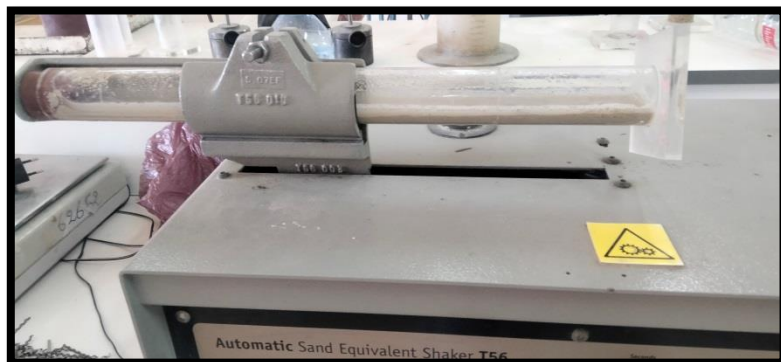


Figure III.4. Agitateur pour équivalent de sable céramique

Les résultats des différentes hauteurs ainsi que l'équivalent de sable visuel et mesuré au piston sont reportés au tableau III.12 et III.13.

Tableau III.12. Résultats obtenus pour l'équivalent de sable céramique

N° D'essai	h ₁ (cm)	h ₂ (cm)	ESV (%)	Moyenne	h' ₂ (cm)	ESP (%)	Moyenne
1	7,2	7	97,22	97,72	7	97,22	97,25
2	7,3	7,2	98,63	97,72	7	95,89	97,25
3	7,4	7,2	97,30	97,72	7,3	98,65	97,25

Tableau III.13. Résultats obtenus pour l'équivalent de sable naturel.

N° D'essai	h ₁ (cm)	h ₂ (cm)	ESV (%)	Moyenne	h' ₂ (cm)	ESP (%)	Moyenne
1	7	5.8	82.86	81,23	5.4	77.14	71,57
2	7.6	6.1	80.26		5.6	73.68	
3	7.2	5.8	80.56		4.6	63.89	

Selon la norme NF P 18-598, les sables sont très propre avec l'absence totale de fines argileuses.

III.3. Les graviers

III.3.1. Masse volumique absolue

Les mêmes opérations effectuées pour le sable, le seront effectuées pour les différents graviers. Les masses volumiques absolues des fractions granulaires utilisés pour la fabrication du béton sont reportées aux tableaux III.14, III.15 et III.16

Tableau III. 14. Masse volumique absolue de gravier 3/8.

N° d'essai	M ₁ [g]	V _e [cm ³]	V ₁ [g]	ρ [g/cm ³]	ρ _{moy} [g/cm ³]
1	300	300	410	2,73	2,65
2	300	300	415	2,61	
3	300	300	415	2,61	

Tableau III.15. Masse volumique absolue de gravier 8/16.

N° d'essai	M ₁ [g]	V _e [cm ³]	V ₁ [g]	ρ [g/cm ³]	ρ _{moy} [g/cm ³]
1	300	300	410	2.73	2,62
2	300	300	415	2.61	
3	300	300	419	2.52	

Tableau III.16. Masse volumique absolue de gravier 16/25.

N° d'essai	M ₁ [g]	V _e [cm ³]	V ₁ [g]	ρ [g/cm ³]	ρ _{moy} [g/cm ³]
1	300	300	415	2,61	2,61
2	300	300	415	2,61	
3	300	300	415	2,61	

III.3.2. Masse volumique apparente (NF P 18-555)

Dans cette mesure, il y a que le volume du récipient qui change entre 7l pour le gravier 3/8, 10l pour le gravier 8/16 et un récipient de 20l pour les graviers 16/25. Les valeurs de cette caractéristique sont données aux tableaux III.17, III.18 et III.19.

Tableau III.17. Masse volumique apparente du gravier 3/8.

N° d'essai	M ₁ [kg]	M ₂	ρ [g/cm ³]	ρ _{moy} [g/cm ³]
1	2.92	12.61	1,38	1,39
2		12.7	1,40	
3		12.66	1,39	

Tableau III.18. Masse volumique apparente gravier 8/15.

N° d'essai	M ₁ [kg]	M ₂ [kg]	ρ [g/cm ³]	ρ _{moy} [g/cm ³]
1	3.46	17.5	1,40	1,40
2		17.49	1,40	
3		17.47	1,40	

Tableau III.19 Masse volumique apparente gravier 16/25.

N° d'essai	M ₁ [kg]	M ₂ [kg]	ρ [g/cm ³]	ρ _{moy} [g/cm ³]
1	7.29	36.26	1,45	1,45
2		36.31	1,45	
3		36.49	1,46	

III.3.3. Analyse granulométrique (NF P 18-560)

Les résultats obtenus de chaque fraction du gravier, sont regroupés dans les tableaux III.20, III.21 et III.22.

Tableau III.20. Analyse granulométrique du gravier 3/8.

Tamis (mm)	Refus partiel [g]	Refus cumulés		Tamisât (%)
		[g]	(%)	
8	180	180	10.59	89.41
6,3	720	900	52.94	47.06
5	357	1257	73.94	26.06
2,5	440	1697	99,82	0.18
1,25	2	1699	99.94	0,06
Fond	1	1700	100,00	0,00

Tableau III.21. Analyse granulométrique gravier 8/16.

Tamis	Refus partielle	Refus cumulé [g]	Refus cumulé %	Tamisât %
16	2	2	0.07	99.93
12.5	550	552	18.40	81.60
10	1133.8	1685.8	56.19	43.81
8	1042	2727.8	90.93	9.07
6.3	250	2977.8	99.26	0.74
Fond	15	2992.8	99.76	0.24

Tableau III.22. Analyse granulométrique du gravier 16/25.

Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulés		Tamisât (%)
		(g)	(%)	
25	282.00	282.00	5.64	94.36
20	1403.00	1685.00	33.70	66.30
16	2259.00	3944.00	78.88	21.12
12,5	719.00	4663.00	93.26	6.74
Fond	332.00	4995.,00	99,90	0,10

III.4. Caractéristiques du ciment utilisé (CEMI MOUKAWIM)

Le ciment utilisé dans notre étude est un CEM I 42,5N-SR3, de la cimenterie Lafarge-Holcim Groupe M'sila. C'est un ciment gris résistant aux sulfates, contenant un faible taux d'aluminates de calcium et une proportion de gypse inférieure à celle d'un ciment portland composé. Quelques-unes de ces caractéristiques sont résumées au tableau III.23.

Tableau III.23. Quelque élément chimique du ciment utilisé.

Elément	Perte au feu	SO ₃	MgO	Chlorures
%	0,5 à 3 %	1,8 à 3 %	1,2 à 3 %	0,01 à 0,05%

III.5. Formulation du béton

Avec l'aide de la méthode de Dreux-Gorisse (Tableau III.24, Figure III.5), quatre (04) bétons ont été confectionnés :

-Béton témoin B0 : est un mélange ordinaire formulé à partir de trois classes granulaires : sable, gravillon (3/8) gravillon (8/15) et gravillon (15/25).

-Bétons modifiés B10, B20 et B30 : Sont des bétons ordinaires mais, la fraction sableuse (le sable de dune) est substituée par 10, 20 et 30% par un sable d'origine céramique sanitaire.

Tableau.III.24. Formulation du béton B0 pour 1m³

Eléments	Formulation pour 1m ³
Ciment	350
Sable de dune	608.6
Gravier 3/8	301.9
Gravier 8 /15	391.8
Gravier 15/25	557.6
Eau	175

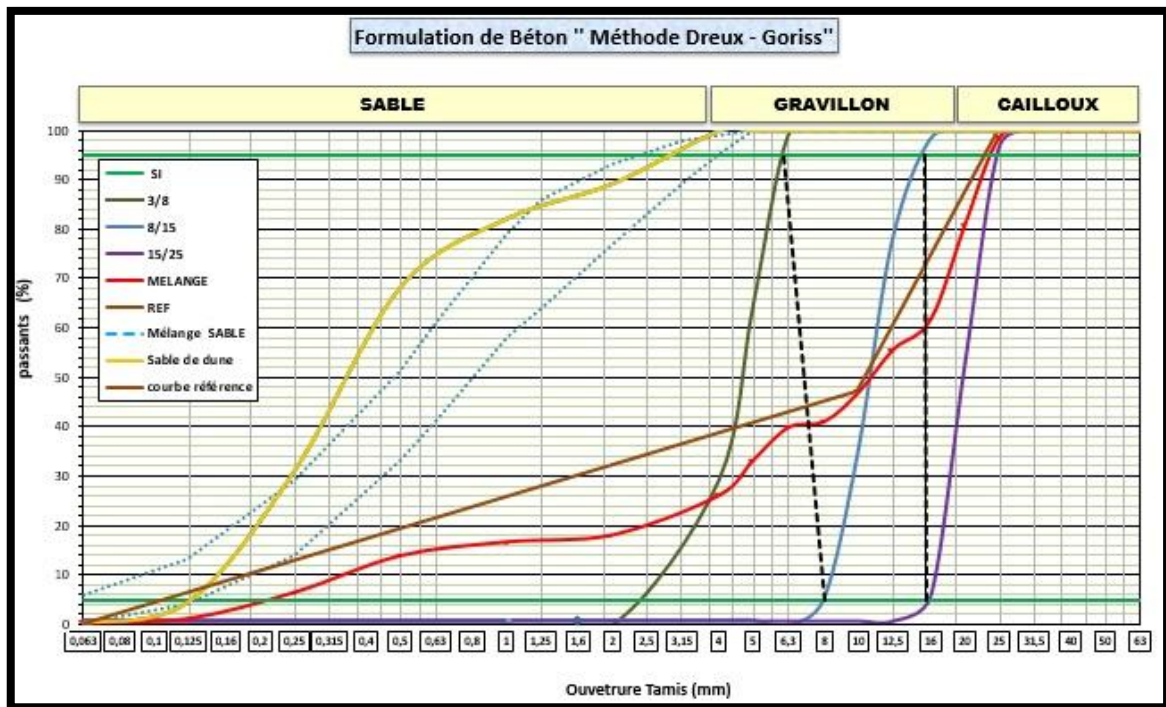


Figure III.5. Courbe de référence du béton de référence.

III.6. Elaboration des bétons

Le fonctionnement de la bétonnière électrique est très simple : les ingrédients du béton : ciment, sable, gravier sont mélangés avec de l'eau. Les lames installées à l'intérieur du cylindre vont alors remuer les ingrédients jusqu'à l'obtention d'un mélange homogène (Figure III.6).



Figure III.6. Malaxage du béton

III.6.1. Confection des éprouvettes

Pour les besoins de notre étude et selon la nature des essais réalisés, on a utilisé des moules cubiques $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$. Le nombre d'échantillons pour chaque essai est de quatre (03) afin d'avoir une moyenne représentative (Figure III.7).



Figure III.7. Confection des bétons étudiés

III.6.2. Moulage et démoulage

Après le malaxage du béton, il est introduit dans les moules. Le démoulage de ces dernières est exécuté après 24 heures de leur coulage et aussitôt mise dans les conditions de cure après étiquetage (Figure III.8).



Figure III.8. Etiquetage des différents bétons

III.7. Essai sur béton frais

Dans ce qui va suivre, on a utilisé la désignation selon le tableau III.25

Tableau. III.25. Désignation des bétons utilisés

Désignation	Sable céramique	Sable de dune
B0	0%	100%
B10	10%	90%
B20	20%	80%
B30	30%	70%

III.7.1. Affaissement au cône d'Abrams NF EN 12350-2

L'Affaissement au cône d'Abrams ou « slump test » est exécuté selon la norme mentionnée (Figure III.9). Lors du malaxage du béton ce test fournit une appréciation sur la consistance du béton.

Dans un cône tronconique, on verse 3 couches de bétons après que chacune d'elle soit piquée 25 fois par une tige d'acier. Après l'arasage de la dernière couche, on soulève le moule avec précaution et on mesure l'affaissement.



Figure III.9. Essai de cône d'Abrams.

Sur la figure III.10, on a reporté les différentes valeurs de l'affaissement des bétons étudiés. Pour le béton témoin B0, l'affaissement est de 5cm. L'affaissement le plus grand est enregistré pour le béton B30 avec 10 cm. On remarque qu'avec chaque augmentation du pourcentage de substitution l'affaissement augmente.

L'affaissement augmente avec l'introduction et l'accroissement du pourcentage de sable d'origine céramique. Ceci est en relation avec la couche de glaçure déposée sur l'une des surfaces du sable en question qui donne l'impression d'une fluidité accrue des bétons avec sable céramique sanitaire.

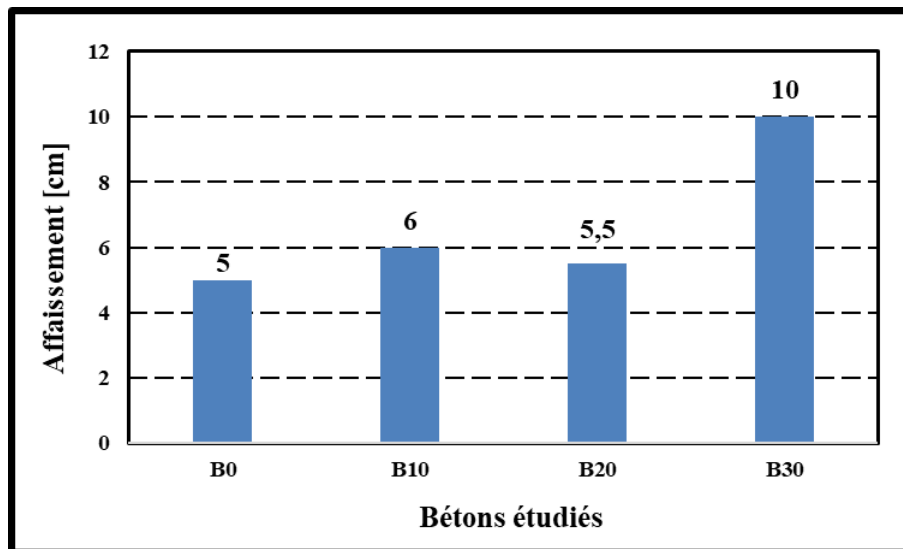


Figure III.10. Affaissement des différents bétons.

III.8. Essais sur béton durci

Les bétons et mortier peuvent être soumis à des conditions environnementales agressives. C'est le cas notamment des constructions agricoles, des installations industrielles, ou des égouts qui peuvent générer des attaques par différents types d'acides (acide sulfurique, nitrique, phosphorique, etc).

Le béton est un matériau basique susceptible d'être attaqué par les acides qui réagissent avec les composés calciques du béton et entraînent une dissolution de la structure du ciment durci.

Les réseaux d'assainissement sont soumis à des conditions d'exposition très agressives pour le béton. La flore bactérienne (Figure III.11) qui s'y développe crée un écosystème pouvant être très agressif pour le béton dans les parties émergées comme le développement de l'acide sulfurique.

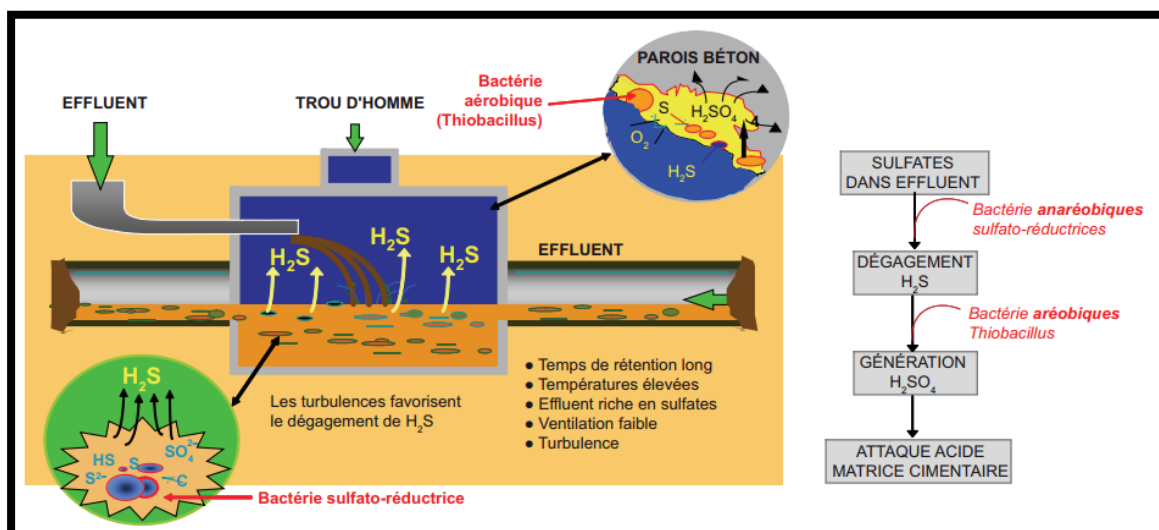


Figure III.11. Dégradation chimique par acide sulfurique des égouts.

III.8.1. La perte de masse

Selon la Figure III.12, qui expose la perte de masse des éprouvettes de béton, on constate que la perte de masse est plus prononcée dans le béton témoin. Avec l'incorporation du sable issu du déchets de la céramique sanitaire, la masse des éprouvettes diminue. Les composants de la pâte de ciment sont détachés de la surface par la solution (Figure III.13). Les granulats et des parties de la pâte de ciment durcie sont alors mis à nu, ils se forment une surface en forme de « béton lavé ».

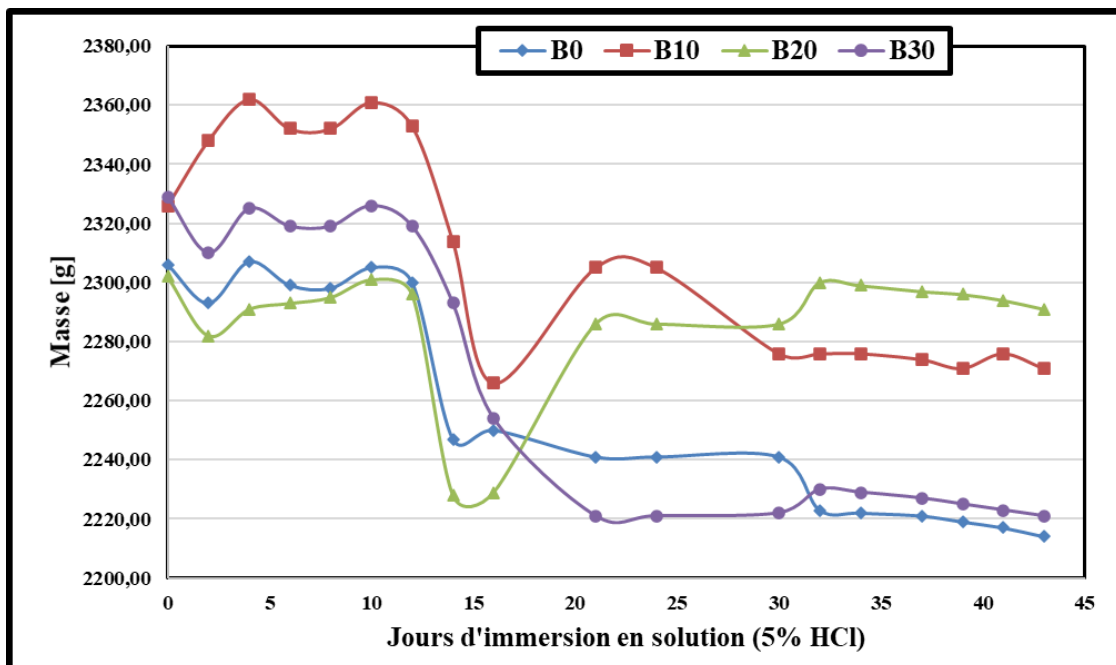
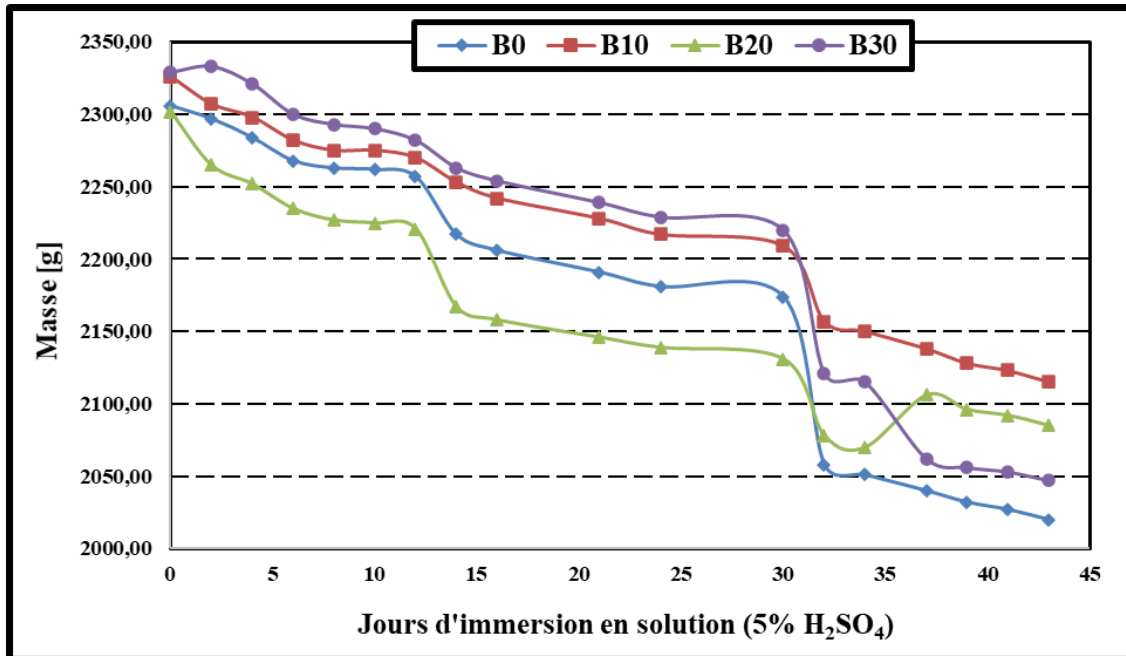


Figure III.12. Perte de masse des éprouvettes en béton après immersion dans les solutions acides.

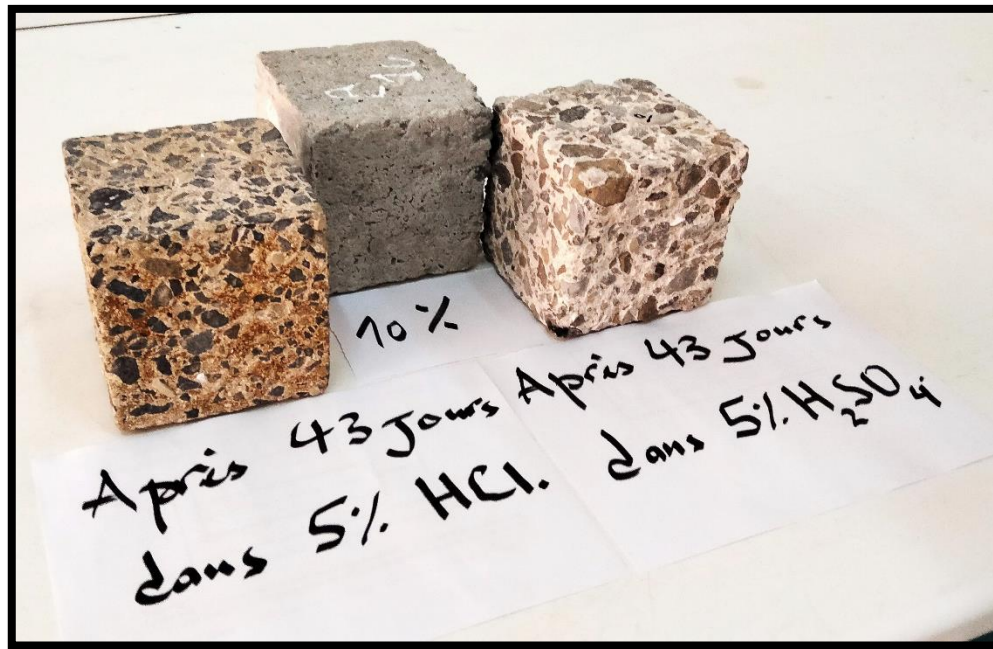
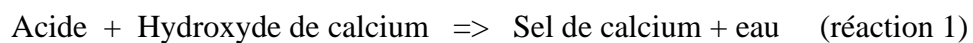


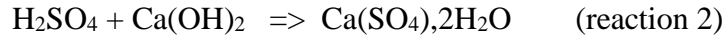
Figure III.13. Eprouvettes en bétons B10 et B20 après 43 jours d'exposition aux différentes solutions.

L'attaque par l'acide est provoquée par la réaction de ce dernier et l'hydroxyde de calcium Ca(OH)_2 de la pâte de ciment. Cette réaction produit le sel de calcium fortement soluble. Ce sel de calcium solubles est facilement détachable, ce qui affaiblie la structure de la pâte (réaction 1).



III.8.2. La perte de volume

Dès la première journée dans les solutions acide (Figure III.14 et III.15), on observe une érosion des arrêtes des éprouvettes. Le sel de calcium produit par la réaction de l'acide sulfurique est un sulfate de calcium qui cause alternativement une dégradation accrue (réaction 2).



L'acide attaque la pâte de ciment est forme des chlorures de calcium et des sulfates de calcium, qui rendent la pâte moins cohésive. Lorsque on observe l'aspect extérieur des éprouvettes, on voit qu'il existe un dommage considérable et une déformation de tous les échantillons. Cette dégradation est plus visible dans les solutions à 5% H_2SO_4 que dans les solutions à 5% HCl .

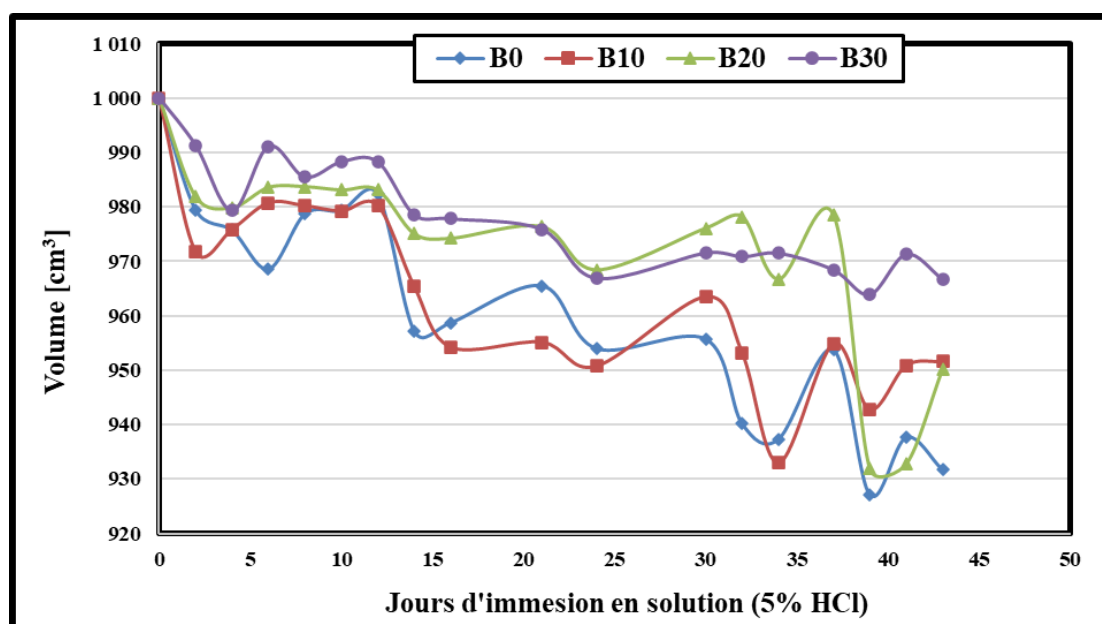
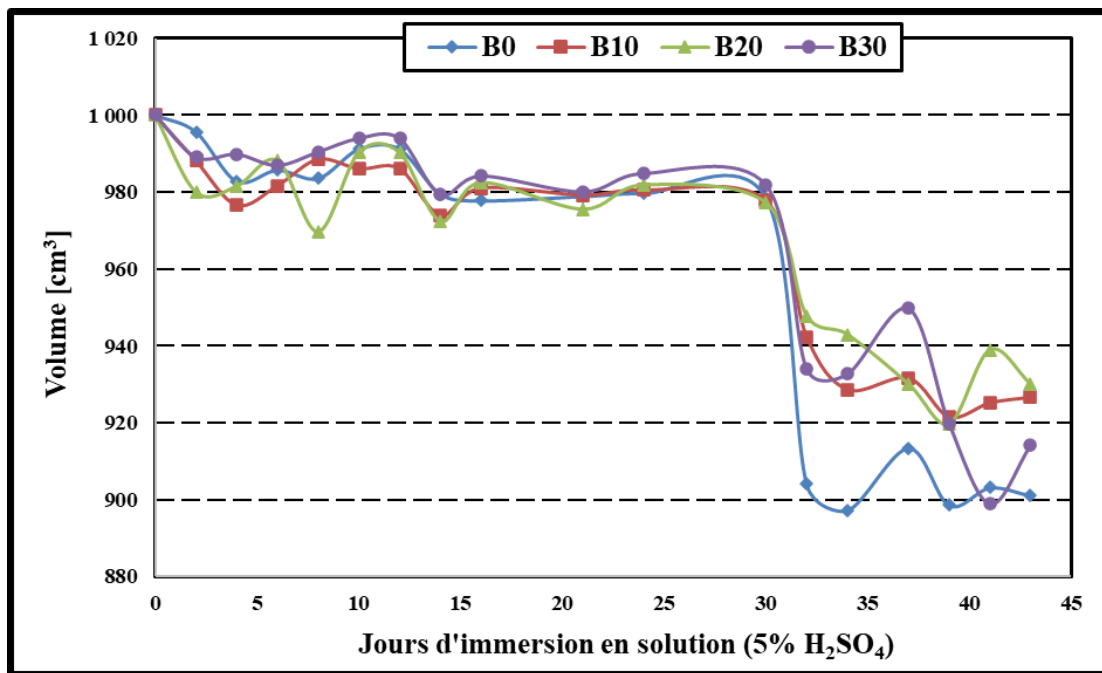


Figure III.14. Perte de volume des éprouvettes en béton après immersion dans les solutions acides.

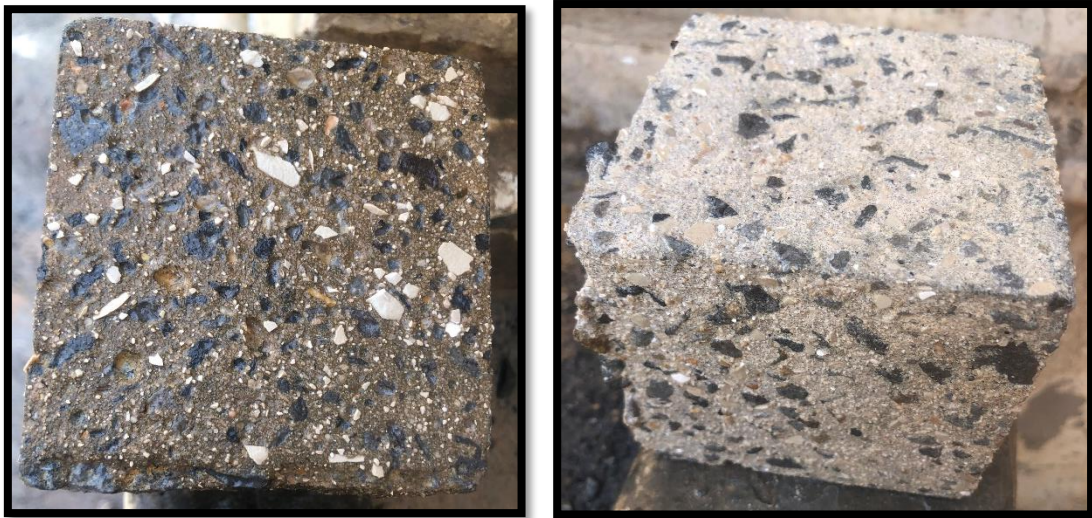


Figure III.15. Dégradation des bords des éprouvettes en béton B10 et B30.

III.8.2. La perte de résistance

Chaque 15 jours les éprouvettes immergées dans les solutions acidiqes ont été écrasées à l'aide de la machine de compression (Figure III.16).



Figure III.16. Machine d'essai de résistance à la compression

Suite à la diminution de la masse et le volume, la dégradation de la résistance à la compression des différents bétons est prévisible.

Tout comme les granulats calcaires, le béton est un matériau basique (son pH est supérieur à 12,5) susceptible d'être attaqué par les acides. Suite à la réaction 1, l'attaque se renouvelle indéfiniment. La réaction des acides avec les corps composés à base de calcium entraîne une dissolution de la structure du ciment durci.

Les résultats de cet essai sont illustrés sur la Figure III.17.

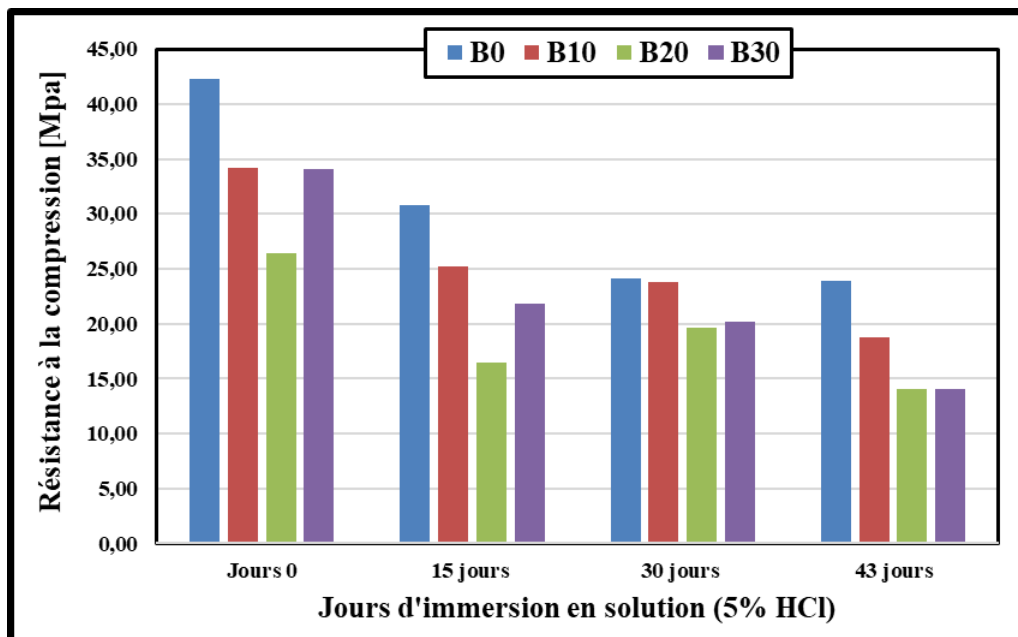
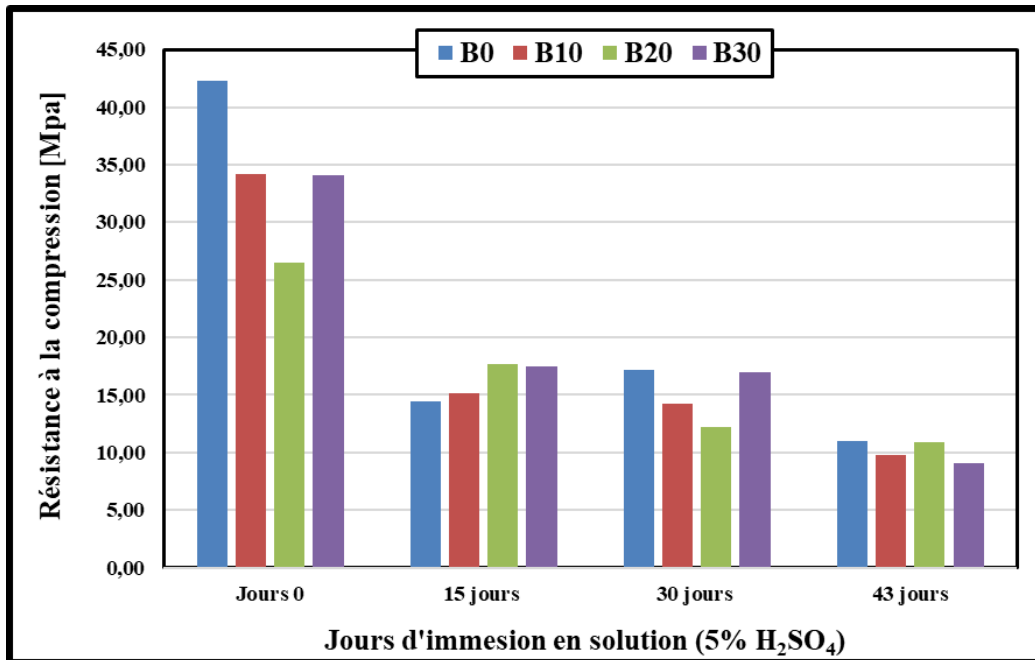


Fig.III.17. Résistance à la compression des différents bétons

Conclusion générale

Conclusion générale

Le béton est un élément crucial dans le développement des infrastructures, des bâtiments résidentiels et des projets commerciaux. Cependant, l'industrie du béton est depuis longtemps associée à d'importantes préoccupations environnementales, notamment des émissions élevées de carbone, l'épuisement des ressources et la production de déchets.

Le béton peut emmener notre civilisation vers le haut, jusqu'à 163 étages dans le cas du gratte-ciel Burj Khalifa à Dubaï, mais elle repousse et s'étend sur la couche arable fertile. La crise de la biodiversité – que de nombreux scientifiques considèrent comme une menace aussi grave que le chaos climatique – est principalement provoquée par la conversion des zones sauvages et agricoles, en zones industrielles et en quartiers résidentiels.

Alors que nous continuons de compter sur le béton pour nos infrastructures et notre développement, il est crucial que nous investissions également dans le béton environnemental. Afin d'atténuer les impacts environnementaux du béton, il est essentiel que l'industrie adopte des pratiques plus durables. L'une des solutions potentielles respectueuses de l'environnement est le recyclage des déchets. Il est important que les dirigeants de l'industrie et les gouvernements investissent dans les installations de recyclage.

La gestion des déchets industriels constitue l'un des problèmes mondiaux majeurs de notre époque. Le recyclage des déchets non biodégradables est particulièrement difficile. Les déchets céramiques ont été classés dans ce groupe. Étant donné que la période de biodégradation de la céramique est très longue (jusqu'à 4 000 ans) et que les déchets de l'industrie céramique constituent une part importante de la production totale, le recyclage des déchets céramiques devient une priorité, en raison d'une demande toujours croissante.

Suite à la substitution de pourcentages divers de sable naturel en poids par du sable de type céramique sanitaire et la soumission des différents bétons à des dégradations chimiques par des solutions en H_2SO_4 et HCl . On a constaté les points suivants :

* La diminution de la masse des éprouvettes car les acides réagissent avec les composés calciques du béton pour former le sel de calcium de l'acide corrodant. Si l'acide circule suffisamment pour éliminer ce dépôt de sel, l'attaque se renouvelle indéfiniment.

*La diminution du volume des éprouvettes, suite à la désintégration de la pâte de ciment durci et la dislocation des granulats de la matrice.

*La diminution de la résistance à la compression à cause de la dégradation des caractéristiques géométriques des éprouvettes, et la dissolution des hydrates, engendrant une augmentation de la porosité. Ceux-ci provoquent la diminution de la résistance à la compression.

Dans une prochaine étape, il sera intéressant d'étudier l'effet de la dégradation chimique par les sulfates sur les mêmes bétons.

References

References

- [1] Duggal, S. K. (2008). *Building materials*. 3rd Ed, New age publisher.
- [2] Garel, E., Bonne, W., Collins, M. B., & Pepper, C. (2019). Offshore sand and gravel mining. In, Cochran, J. Kirk, Bokuniewicz, Henry J. and Yager, Patricia L. (eds.) *Encyclopedia of Ocean Sciences*. Elsevier, pp. 655-662.
- [3] Neumann, F., & Curbach, M. (2018). Thermal treatment of desert sand to produce construction material. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 149, p. 01030). EDP Sciences.
- [4] Dhia, M. B. (1997). Quelques particularités de l'utilisation du sable de dune en construction routière en milieu saharien. *bulletin-laboratoires des ponts et chaussées*, 33-42.
- [5] <https://www.sikesconcrete.com/beach-sand> , consulté le 10/03/2024.
- [6] https://www.youtube.com/watch?v=Lw62m1hHhU0&ab_channel=NotreMonde visioné le 11/03/2024.
- [7] Dinh, H. L., Liu, J., Ong, D. E., & Doh, J. H. (2022). A sustainable solution to excessive river sand mining by utilizing by-products in concrete manufacturing: A state-of-the-art review. *Cleaner Materials*, 6, 100140.
- [8] <https://www.infociments.fr/sites/default/files/articles/pdf/CTB-E80-1.11-24.pdf> consulté le 22/03/2024
- [9] Collection CIMBETON, (2005). Les constituants des bétons et des mortiers. *Fiches techniques*.
- [10] Vijaya, B., & Selvan, S. S. (2015). Comparative study on the strength and durability properties of concrete with manufactured sand. *Indian Journal of Science and Technology*.
- [11] Shanmugapriya, T., Raja, K. S., & Balaji, C. (2016). Strength and durability properties of High Performance Concrete with manufactured sand. *ARPN J. Eng. Appl. Sci*, 11(9), 6036-6045.
- [12] Shen, W., Yang, Z., Cao, L., Cao, L., Liu, Y., Yang, H., Lu, Z., & Bai, J. (2016). Characterization of manufactured sand: Particle shape, surface texture and behavior in concrete. *Construction and Building materials*, 114, 595-601
- [13] Limeira, J., Etxeberria, M., Agulló, L., & Molina, D. (2011). Mechanical and durability properties of concrete made with dredged marine sand. *Construction and building materials*, 25(11), 4165-4174.
- [14] Ganesan, K., Kanagarajan, V., & Dominic, J. R. J. (2022). Influence of marine sand as fine aggregate on mechanical and durability properties of cement mortar and concrete. *Materials Research Express*, 9(3), 035504.
- [15] Li, B., Ke, G., & Zhou, M. (2011). Influence of manufactured sand characteristics on strength and abrasion resistance of pavement cement concrete. *Construction and Building Materials*, 25(10), 3849-3853.
- [16] (PNUD- MATE, 2008) programme des nations unives pour le développement, Guide des techniciens communaux pour la gestion des déchets ménagers et assimilés, 51p
- [17] (J.O.R.A, 2001) Journal Officiel de la République Algérienne

References: -----

- [18] Annexe II : La nomenclature des déchets, Cette décision a été transposée par le décret n° 2002-540 du 18 avril 2002, relatif à la classification des déchets.
- [19] Gestion des déchets, Guide pour les établissements supérieur ou de recherche.
- [20] Les déchets (Collecte, traitement, tri, Recyclage) /Tristan Turlan
- [21] <https://tpecoquartier.wordpress.com> consulté le 28/03/2024.
- [22] BERTHOLON J, 2002 ; Les déchets solides et l'incinération des ordures ménagères, Mémoire de fin de cycle Université de Cergy-Pontoise. P 20.
- [23] BOUADAM R, (2022), L'algerie face à ses dechets: outils et entraves de gestion vers quelles perspectives? *Architecture et environnement de l'enfant*, Vol.7, N°1, p 65-79.
- [24] Sefouhi, L., Kalla, M., Aouragh, L. (2010). Etude pour une gestion durable des déchets ménagers de la ville de Batna (Algérie). *Environnement, Ingénierie & Développement*.
- [25] Bougara, A., Lynsdale, C., & Ezziane, K. (2009). Activation of Algerian slag in mortars. *Construction and Building Materials*, 23(1), 542-547.
- [26] Roy, D. M., Arjunan, P., & Silsbee, M. R. (2001). Effect of silica fume, metakaolin, and low-calcium fly ash on chemical resistance of concrete. *Cement and Concrete Research*, 31(12), 1809-1813.
- [27] Schwarz, N., Cam, H., & Neithalath, N. (2008). Influence of a fine glass powder on the durability characteristics of concrete and its comparison to fly ash. *Cement and Concrete Composites*, 30(6), 486-496.
- [28] https://www.boerger.com/fr_FR/secteur-dactivite/utilisation-industrielle/industrie-papetiere-et-cellulose/boue-de-papier.html consulté le 11/04/2024.
- [29] Ahmadi, B., & Al-Khaja, W. (2001). Utilization of paper waste sludge in the building construction industry. *Resources, conservation and recycling*, 32(2), 105-113.
- [30] https://www.ceramica.info/cerinfo-content/uploads/2021/12/ceramic-roadmap-to-2050-continuing-our-path-towards-climate-neutrality_LOW.pdf consulté e 14/04/2024.
- [31] Rashid, K., Razzaq, A., Ahmad, M., Rashid, T., & Tariq, S. (2017). Experimental and analytical selection of sustainable recycled concrete with ceramic waste aggregate. *Construction and Building Materials*, 154, 829-840.
- [32] Pitarch, A. M., Reig, L., Tomás, A. E., & López, F. J. (2019). Effect of tiles, bricks and ceramic sanitary-ware recycled aggregates on structural concrete properties. *Waste and Biomass Valorization*, 10, 1779-1793.
- [33] Kumar, V. P., & Reddy, K. C. (2017). Durability aspects of concrete by partial replacement of cement by ceramic waste. *Int. J. Civ. Eng*, 8, 22

