

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIES

FILIERE : GENIE CIVIL

OPTION : Mrétiaux



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

Par:

KOUIDRI CHAIMA

YAICHE CHEMS ELASSIL

Intitulé :

**Effets des milieux agressifs sur les
comportements de béton à base d'agréats
recyclés**

Encadré par :

Dr. ABDERRACHID AMRIOU

Année universitaire : 2024/2023

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

إهداء

الحمد لله الذي بنعمته تتم الصالحات.. وبفضله تنزل
الخيرات والبركات وبتوفيقه تتحقق المقاصد
والغايات.

أهدي تخرجي هذا إلى من علمني العطاء وإلى من أحمل
اسمه بكل افتخار وأرجو من هلا أن يمد في عمرك لترى
ثمارة قد حان قطافها بعد طول انتظار وإلى صاحب
السيرة العطرة والفكر المستنير ومن كان له الفضل
في بلوغي هذه المراتب.....

إلى أبي

إلى من وضع المولى- عز وجل- تحت قدميها الجنة
ووقرها في كتابه الكريم إلى معني الحب والحنان
والتفاني وإلى بسمه الحياة وسر الوجود وكان دعائها
سر نجاحي.....

إلى أمي

إلى إخوتي وأخواتي السند الذي ال يميل

إلى صديقاتي الوفيات شيماء قويدري شيماء شعبني

شاهيناز خرخاش سحنون اميرة
إلى كل أحبتي..

Yaiche Chems Elassil



إهداء

الحمد لله الذي بنعمته تتم الصالحات اما بعد
اهدي تخرجي وتحياتي إلى أولئك الذين كرسوا وضحووا دائماً من أجلي أولئك الذين
شجعوني دعموا لمحاربة تقلبات الحياة أعط أفضل ما عندي
إلى
أمي التي أحاطت بي بحنانها، وأعطتني الرغبة في ذلك العيش، وكان هذا نعم الرابط
إلى
والدي الذي كرسه حياته لرؤيتي ناجحة لكن ليته كان للعمر بقية رحمه الله غفر له
، إلى أخواتي، وإخوتي، وجميع أفراد عائلتي
إلى كل شخص الذي أعطاني القوة لمواصلة عملي
إلى مشرفي ومعلمي الاستاذ القدير حفظه الله ورعاه عمرو عبد الرشيد
إلى زملائي في هندسة المواد وزملائي السابقين
إلى كل أستاذ تعلمت منه في مسيرتي الدراسية
إلى أصدقائي رفقائي شعبي شيماء، يعيش شمس الاصيل، خرخاش شاهيناز، شبشب
خولة، يحيوي دعاء، ولكل من
أنا أحب ومن يحبني في نهاية المطاف أشكر كل من لديه ساعد ودعم
قريب أو بعيد حتى تتجح هذه المذكرة المتواضعة



Kouidri chaima

Remerciement

Mon premier remerciement va à Allah Aazza Wa Jalla.

Merci Dr Abderrachid AMRIOU de l'université de M'sila, qui a supervisé ce travail, pour sa présence, son écoute, sa patience, pour son labeur avec nous, pour ses grandes qualités pédagogiques, ainsi que pour sa rigueur scientifique, qu'il a su me communiquer pour mener à bien réaliser au mieux ce travail.

Nous remercions tous le directeur, les membres et l'ingénieur du laboratoire de recherche de Géo matériaux de l'université de M'sila.

Nous remercions tous le directeur, les membres et l'ingénieur du Laboratoire de Recherche sur les Matériaux Géo Matériaux de l'Université de M'sila, ainsi que tous les professeurs et personnels de la Faculté des Sciences et Techniques.

Yaiche Chems Elassil

Kouidri Chaima



Merci

Résumé :

L'attaque du béton par les milieux chimiquement agressifs résulte essentiellement de la réaction des hydrates du ciment avec les éléments agressifs. Les résultats de ces attaques chimiques se résument à une dissolution de l'hydroxyde de calcium, lixiviation de la chaux des C-S-H et/ou la précipitation de nouveaux composés. Les paramètres qui régissent le comportement du béton face aux attaques chimiques sont nombreux : les composants du béton, ces propriétés de transfert et les conditions environnementales. Les milieux agressifs les plus courants sont : eau pure, acides, sulfates, eau de mer et eaux usées.

Le recyclage et la valorisation des différents déchets dans la confection des bétons sont considérés aujourd'hui comme une solution d'avenir pour répondre au déficit entre production et consommation de matériaux et pour protéger l'environnement.

On espère par la présente étude expérimentale que la valorisation de déchet de briques concassées améliore les caractéristiques physico-mécaniques et durabilités des bétons face aux attaques chimiques par des solutions d'acide sulfurique et d'acide chlorhydrique.

Le but de ce travail est de faire une étude expérimentale sur le comportement mécanique de micros bétons sous l'effet d'agression chimiques par des solutions d'acide sulfurique et d'acide chloridrique. Les échantillons de micro béton sont confectionnés par des granulats issus de brique concassée. Les résultats obtenus sont comparés avec ceux obtenus en utilisant des granulats de carrière (sable concassé).

Ainsi, plusieurs échantillons de micro béton ont été préparés en utilisant soit un sable de carrière, concassé ou un sable issu de briques concassés. Ensuite, l'incorporant de fumée de silice et un adjuvant. Les granulats de brique concassée ont été utilisés avec un taux de remplacement du sable de (0%, 25%, 50%, 75% et 100%).

Les résultats obtenus montrent que la valorisation de granulats de briques recyclés concassés, peut remplacer en partie les granulats naturels et donne des résultats encourageants.

ملخص

ينتج هجوم الخرسانة بواسطة البيئات العدوانية كيميائياً بشكل أساسي عن تفاعل هيدرات الأسمنت مع C-S-H العناصر العدوانية. نتائج هذه الهجمات الكيميائية هي انحلال هيدروكسيد الكالسيوم، وترشيح الجير و/أو ترسيب المركبات الجديدة. البارامترات التي تحكم سلوك الخرسانة ضد الهجمات الكيميائية عديدة: مكونات الخرسانة، وخصائص النقل هذه والظروف البيئية. أكثر الأوساط عدوانية هي المياه النقية والأحماض والكبريتات ومياه البحر ومياه الصرف الصحي.

وتعتبر اليوم إعادة تدوير واستعادة مختلف النفايات في صناعة الخرسانة حلاً مستقبلياً لسد العجز بين إنتاج المواد واستهلاكها ولحماية البيئة.

ومن المأمول أن تؤدي هذه الدراسة التجريبية إلى تحسين الخصائص الفيزيائية - الميكانيكية وخصائص المتانة للحمضات في مواجهة الهجمات الكيميائية بواسطة محاليل حمض الكبريتيك وحمض الهيدروكلوريك.

والهدف من هذا العمل هو إجراء دراسة تجريبية عن السلوك الميكانيكي للخرسانة الدقيقة تحت تأثير العدوان الكيميائي بواسطة محاليل حمض الكبريتيك وحمض الكلوريدريك. يتم تصنيع العينات الخرسانية الدقيقة بواسطة مجاميع من الطوب المسحوق. تقارن النتائج التي تم الحصول عليها بتلك التي تم الحصول عليها باستخدام مجاميع المحاجر (الرمال المسحوقة).

وبالتالي، تم تحضير عدة عينات من الخرسانة الدقيقة باستخدام الرمال المحجرة أو المسحوقة أو الرمال من الطوب المسحوق. ثم أدمج دخان السيليكا وعامل مساعد. تم استخدام مجاميع الطوب المسحوق بمعدل استبدال الرمال (0% و 25% و 50% و 75% و 100%)

تظهر النتائج التي تم الحصول عليها أن استعادة مجاميع الطوب المعاد تدويرها المكسورة يمكن أن تحل جزئياً محل.

Abstract:

The attack of concrete by chemically aggressive media essentially results from the reaction of cement hydrates with aggressive elements. The results of these chemical attacks boil down to a dissolution of calcium hydroxide, leaching of lime from C-S-H and/or the precipitation of new compounds. The parameters that govern the behavior of concrete in the face of chemical attacks are numerous: the components of the concrete, its transfer properties and the environmental conditions. The most common aggressive media are: pure water, acids, sulphates, sea water and waste water.

Recycling and recovery of various types of waste in the manufacture of concrete are considered today as a solution for the future to meet the deficit between production and consumption of materials and to protect the environment.

It is hoped by this experimental study that the recovery of crushed brick waste improves the physico-mechanical characteristics and durability of concretes against chemical attacks by solutions of sulfuric acid and hydrochloric acid.

The aim of this work is to make an experimental study on the mechanical behavior of micro concretes under the effect of chemical attack by solutions of sulfuric acid and hydrochloric acid. The samples of micro concrete are made by aggregates from crushed brick. The results obtained are compared with those obtained using quarry aggregates (crushed sand).

Thus, several samples of micro concrete were prepared using either quarry sand, crushed sand or sand from crushed bricks. Next, incorporating it with silica fume and an adjuvant.

Crushed brick aggregates were used with a sand replacement rate of (0%, 25%, 50%, 75% and 100%).

The results obtained show that the recovery of crushed recycled brick aggregates can partly replace natural aggregates and gives encouraging results.

Liste des figures

Chapitre I: Etude bibliographique

<i>Figure I.1 : Echantillon de ciment.....</i>	<i>12</i>
<i>Figure I.2 : Etapes de fabrication du ciment.....</i>	<i>13</i>
<i>Figure I.3 : Extraction des matières premières.....</i>	<i>14</i>
<i>Figure I.4 : Zone de cuisson.....</i>	<i>14</i>
<i>Figure I.5 : Clinker à la sortie de four et après le refroidissement.....</i>	<i>15</i>
<i>Figure I.6 : Broyage la matière première.....</i>	<i>17</i>
<i>Figure I.7 : Les composants ciments.....</i>	<i>17</i>
<i>Figure I -8 : Représentation schématique de la pâte de ciment hydraté.....</i>	<i>20</i>
<i>Figure I.9 : Image en microscopie électronique à balayage de la morphologie du C-S-H..</i>	<i>20</i>
<i>Figure I.10 : Schéma des pores dans un matériau.....</i>	<i>22</i>
<i>Figure I.11 : Illustration des différentes formes de porosité dans la pâte de ciment durcie.....</i>	<i>24</i>
<i>Figure I.12 : Interface pate granulat de ciment.....</i>	<i>25</i>

Chapitre II : MECANISME DE DEGRADATION DU BETON PAR DES AGGRESSION CHIMIQUE

<i>Figure II.1: Des cas pathologiques d'éléments en béton en contact de sulfate.....</i>	<i>29</i>
<i>Figure II.2 : L'origine des sulfates (interne ou externe)</i>	<i>31</i>
<i>Figure II.3: L'attaque par les sulfates.....</i>	<i>32</i>
<i>Figure II.4 : La formation de l'ettringite secondaire.....</i>	<i>33</i>

Figure II.5: La détérioration des silos-tours en béton due à l'attaque des acides d'ensilage.....36

Figure II.6 : Coupe théorique d'un mur en béton.....41

Figure II.7 : Facteurs intervenant sur l'apparition des 3 conditions nécessaires au déclenchement de l'alcali-réaction.....43

Figure II.8 : Exemples bétons dégradés par l'alcali-réaction.....45

Chapitre III : Incorporation des déchets pour la préparation du béton

Figure III.1 : Déchets inertes.....53

Figure III.2 : Compositions des déchets du bâtiment.....54

Figure III.3 : Enfouissement des déchets.....59

Figure III.4 : Incinération en plein air et usine d'incinération.....60

Figure III.5 : Photo d'une décharge contrôlée.....61

Figure III.6 : Compostage de déchets organiques.....61

Figure III.7 : Usine de recyclage des déchets.....62

Figure III.8 : Photo d'un laitier de haut fourneau.....63.

Figure III.9 : Photo d'un laitier d'acier64

Figure III.10 : Fumé de silice forme de poudre.....64.

Figure III.11 : Cendres volantes forme de poudre.....65

Figure III.12 : Déchets de verres.....66

Figure III.13 : Déchets de pneus usagés.....67

<i>Figure III.14 : déchets de brique.....</i>	<i>68</i>
<i>Figure III.15 : Schéma de fabrication des briques.....</i>	<i>70</i>
<i>Figure. III.16 : Fumée de silice.....</i>	<i>73</i>
<i>Figure III.17 : Déchets d'industriel.....</i>	<i>79</i>
<i>Figure III.18 : Déchets de la construction/ démolition.....</i>	<i>80</i>
<i>Figure III.19 : Zone de transition à l'interface granulat/pâte d'un béton conventionnel.....</i>	<i>82</i>

Chapitre IV: Etudes Expérimentales

<i>Figure IV : Ciment CEM II 42,5(GICA).....</i>	<i>86</i>
<i>Figure IV.2: Analyse granulométrique des différents granulats.....</i>	<i>90</i>
<i>Figure IV.3 : Analyse granulométrique.....</i>	<i>91</i>
<i>Figure IV.4. Essais d'équivalent de sable.....</i>	<i>95</i>
<i>Figure IV.5 : Essais d'équivalent de sable.....</i>	<i>96</i>
<i>Figures IV.6 : Abaques permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment à prévoir en fonction du rapport C/E et de l'ouvrabilité désirée (affaissement au cône)</i>	<i>102</i>
<i>Figure IV.7: les lignes de partage.....</i>	<i>108</i>
<i>Figure IV.8 : Fumé de silice forme de poudre.....</i>	<i>112</i>
<i>Figure IV.9 : Evolution découlement au cône de Marsh.....</i>	<i>112.</i>
<i>Figure IV.10 : Le super plastifiant (MEDAPLAST 30)</i>	<i>114</i>
<i>Figure IV.11 : Le malaxeur utilisé (malaxeur de laboratoire Géo-matériaux.....</i>	<i>116</i>
<i>Figure IV.12 : l'affaissement de cône d'Abrams d'un béton.....</i>	<i>118</i>

Figure IV.13 : la table vibrante (vibrant de laboratoire de matériaux)	118
Figure IV.14 : Moule d'éprouvette prismatique (4*4*16)	119
Figure IV.15 : La machine de compression.....	120
Figure IV.16 : Essai de traction par flexion.....	121
Figure IV.17 : Les solutions d'acide sulfurique H₂SO₄ et d'acide chloridrique HCl.....	122
Figure IV.18 : pesée hydrostatique.....	123
Figure IV.19 : les appareilles de porosité.....	124
Figure IV.20: Résistance à la compression (Béton non traité)	126
Figure IV.21 : Résistance à flexion (Béton non traité)	127
Figure IV.22 : Résistance à traction (Béton non traité)	127.
Figure IV.23: la résistance à la compression (béton traité par H₂SO₄)	128
Figure IV.24: la résistance à la flexion (béton traité par H₂SO₄)	129
Figure IV.25: la résistance à la traction (béton traité par H₂SO₄)	130
Figure IV.26 : La résistance à la compression (béton traité par HCL)	131
Figure IV.27 : La résistance à la flexion (béton traité par HCL)	132
Figure IV.28 : La résistance à la traction (béton traité par HCL)	133
Figure IV.29 : La porosité en fonction le pourcentage du sable.....	134
Figure IV.30 : Absorption en fonction le pourcentage du sable.....	134
Figure IV.31: Effet de la conservation dans H₂SO₄ sur la masse de béton (sans adj.)	135
Figure IV.32: Effet de la conservation dans H₂SO₄ sur la masse de béton (avec adj.	136
Figure IV.33: Effet de la conservation dans HCL sur la masse de béton (sans adj.)	137
Figure IV.34 : Effet de la conservation dans HCL sur la masse de béton (avec adj.)	138

Liste des tableaux

Chapitre I

<i>Tableau I-1 : Composition chimique de clinker.....</i>	<i>16</i>
---	-----------

Chapitre II

<i>Tableau II.1 : Composants du béton menacés par la corrosion.....</i>	<i>39</i>
---	-----------

Chapitre III

<i>Tableau.III.1 : Composition chimique des déchets de brique broyés.....</i>	<i>69</i>
---	-----------

<i>Tableau III.2 : Composition chimique type de certaines fumées de silice.....</i>	<i>73</i>
---	-----------

Chapitre IV

<i>Tableau IV.1 : Résultat de l'analyse granulométrique des fractions (3/8) du gravier.....</i>	<i>89</i>
---	-----------

<i>Tableau IV. 2 : Résultat de l'analyse granulométrique des fractions du sable concassé.....</i>	<i>89</i>
---	-----------

<i>Tableau IV.3 : Résultat de l'analyse granulométrique des fractions des déchets de brique concassé.....</i>	<i>90</i>
---	-----------

<i>Tableau IV.4 : Masse volumiques des fractions 3/8 gravier.....</i>	<i>92</i>
---	-----------

<i>Tableau IV.5 : Masse volumiques absolue des fractions (3/8) du gravier.....</i>	<i>93</i>
--	-----------

<i>Tableau IV.6 : Equivalent du sable Concassée 0/5.....</i>	<i>95</i>
--	-----------

<i>Tableau IV.7 : Comparaison des résultats.....</i>	<i>96</i>
--	-----------

<i>Tableau IV.8 : Masses volumiques apparentes de sable Concassée 0.5.....</i>	<i>97</i>
--	-----------

<i>Tableau II .9 : Masses volumiques absolues de sable Concassée 0.5.....</i>	<i>98</i>
---	-----------

Tableau IV.10 : Porosités (%) du sable.....	99
Tableau IV. 11 : Compacité C (%) du sable.....	99
Tableau IV. 12 : Indice de vide des fractions sable Concassée 0.5.....	99
Tableau IV. 13 : Valeurs de G coefficient granulaire.....	102
Tableau IV.14 : Valeurs du terme correcteur K.....	104.
Tableau IV.15: coefficients de compacité.....	105
Tableau IV.16 : valeurs de la correction sur le dosage en eau.....	105
Tableau IV.17 : valeurs du terme correcteur k.....	107
Tableau IV.18 : valeurs du coefficient de compacité γ.....	109
Tableau IV.19 : Caractéristiques physiques de la fumée de silice.....	111
Tableau IV.20 : Evolution des résistances mécaniques à jeune âge et à long terme.....	113
Tableau IV.21: l'ensemble des essais réalisés.....	115
Tableau IV. 22 : Classement des bétons selon la valeur d'affaissement au cône d'Abrams..	117

SOMMAIRE

Dédicace

Remercîment

Résumé

Liste des figures

Liste des tableaux

Sommaire

Nomenclature

Introduction générale

Chapitre I : Etude bibliographies

<i>I.1</i>	<i>Introduction.....</i>	<i>13</i>
<i>I.2</i>	<i>Rappel sur les constituants et l'hydratation du ciment.....</i>	<i>13</i>
<i>I.2.1</i>	<i>Définition de ciment.....</i>	<i>13</i>
<i>I.2.2</i>	<i>Etapes de fabrication de ciments.....</i>	<i>14</i>
<i>I.2.3</i>	<i>L'extraction de matières premières.....</i>	<i>14</i>
<i>I.2.4</i>	<i>Cuisson.....</i>	<i>15</i>
<i>I.2.5</i>	<i>Refroidissement.....</i>	<i>17</i>
<i>I.2.6</i>	<i>Broyage.....</i>	<i>17</i>
<i>I.2.7</i>	<i>Les ajouts.....</i>	<i>18</i>
<i>I.3</i>	<i>Les constituants des ciments</i>	<i>18</i>
<i>I.4</i>	<i>Différent type de la pâte du ciment hydratante.....</i>	<i>19</i>
<i>I.5</i>	<i>Revue sur la structure poreuse du béton.....</i>	<i>20</i>
<i>I.5.1</i>	<i>Description de la structure poreuse du béton.....</i>	<i>22</i>
<i>I.6</i>	<i>Distribution et taille de pore dans le béton</i>	<i>24</i>
<i>I.6.1</i>	<i>Pores relatifs aux capillaires</i>	<i>24</i>
<i>I.6.2</i>	<i>Pores relatifs aux hydrates</i>	<i>24</i>
<i>I.6.3</i>	<i>Autres</i>	<i>25</i>
<i>I.7</i>	<i>Interface pate-granulat du béton.....</i>	<i>25</i>
<i>I.8</i>	<i>Les facteurs d'influence sur la porosité du béton.....</i>	<i>26</i>
<i>I.9</i>	<i>Influence de la formulation du béton.....</i>	<i>27</i>
<i>I.10</i>	<i>Conclusion.....</i>	<i>27</i>

Chapitre II : MECANISME DE DEGRADATION DU BETON PAR DES AGRESSION CHIMIQUE

II.1	Introduction.....	29
II.2	Mécanisme générale des agressions chimiques du béton.....	29
II.3	Attaque du béton par les sulfates.....	30
II.3.1	Définition de l'attaque sulfatique.....	30
II.3.2	Sources des sulfates.....	31
II.3.3	Mécanismes d'attaques.....	33
II.3.4	Processus d'attaque par les sulfates internes.....	34
II.3.4.2	Processus d'attaque par les sulfates externes	35
II.4	Attaque du béton par les acides.....	36
II.4.1	Définition.....	36
II.4.2	Les différents types des acides.....	37
II.4.3	Mécanisme d'attaque des acides.....	39
II.5	Carbonations du béton.....	40
II.5.1	Définition.....	40
II.5.2	Vitesse de carbonations.....	40
II.5.3	Conséquence de la carbonation.....	41
II.6	Réaction alcali-granulats.....	42
II.6.1	Définition.....	42
II.6.2	Conditions d'apparition de l'alcali-granulat.....	43
II.6.3	Source de cette attaque.....	44
II.6.4	Pathologie et manifestations externes.....	44
II.7	Essai de caractérisation des attaques du béton par les agressions chimiques.....	46
II.7.1	Essai d'immersion.....	46
II.7.2	Porosité totale.....	47
II.7.3	Capacité d'absorption.....	47
II.7.4	Mesure de la perte de masse.....	47
II.8	Paramètre déterminant le comportement du béton vis-à-vis des agressions	
	Chimique.....	47
II.8.1	Composition du ciment.....	47
II.8.2	Paramètres liés à l'environnement.....	48

II.8.3 Paramètres liés à la structure.....	49
II.8.4 Paramètres économiques.....	49
II.9 Conclusion.....	50

Chapitre III : Incorporation des déchets pour la préparation du béton

III.1 Introduction.....	52
III.2 Revue générale sur le recyclage des déchets	52
III.2.1 Définition de déchets.....	52
III.2.1.1 D'un point de vue économique.....	52
III.2.1.2 Du point de vue juridique.....	52
III.3.1 Origine de la production de déchets.....	53
III.3.2 Différents types de déchets.....	53
III.4 Recyclage des déchets.....	56
III.4.1 Définition.....	56
III.4.2 Intérêt du recyclage dans le génie civil.....	57
III.5 Technique de recyclage.....	57
III.5.1 Procédés du recyclage.....	57
III.5.2 Etapes du recyclage.....	58
III.5.3 Gestion des déchets.....	58
III.5.3.1 Définition.....	58
III.5.3.2 Principes de gestion des déchets.....	59
III.5.3.3 Méthodes de gestion des déchets.....	60
III.6 Différents déchets utilisés dans l'élaboration des bétons et des mortiers.....	63
III.7 Déchets de briques.....	68
III.7.1 Définition de brique.....	69
III.7.2 Principaux constituants de la brique et ces caractéristiques chimiques.....	69
III.7.3 Mode de fabrication de brique.....	70
III.7.4 Propriétés des bétons des déchets de brique.....	71
III.7.5 Avantages et inconvénients d'utilisation des briques.....	72
III.8 Fumée de silice.....	73
III.8.1 Effets de fumé de silice.....	75
III.9 L'eau de gâchage.....	75
III.10 Les adjuvants.....	76
III.10.1 Classification des adjuvants.....	76

III.10.2 Le super plastifiant.....	77
III.10.3 Les avantages principaux de l'utilisation des super plastifiants.....	77
III.10.4 Facteurs affectant l'action des super plastifiants.....	77
III.10.5 Domaines d'utilisation de super plastifiants.....	78
III.11 Déchets de la construction/démolition.....	78
III.11.1 Effet de déchets sur la caractéristique de béton.....	81
III.12 Conclusion	83

Chapitre IV : Etude Expérimentale

IV.1 Introduction.....	86
IV.1.1 Matériaux utilisez.....	86
IV.2 Caractéristiques des matériaux utilisez.....	87
IV.2.1 Le ciment : Ciment portland NA442/2013.....	87
IV.2.1.2 Domaine d'application.....	87
IV.2.1.2.1 Dosages.....	87
IV.2.1.2.2 Propriétés physiques.....	88
IV.2.1.3 Résistance à la compression.....	88
IV.2.2 Les granulats (naturels et recyclés).....	88
IV.2.3 L'analyse granulométrique.....	88
IV.2.4 Masse volumique apparente du gravier.....	92
IV.2.5 Masse volumique absolues du gravier 3/8.....	93
IV.2.6 Sable concassé (0/5).....	94
IV.2.7 Equivalent de sable : NF P 18-598.....	94
IV.2.8 Masses volumiques apparentes.....	98
IV.2.9 Masses volumiques absolues.....	98
IV.2.10 Module de finess.....	99
IV.2.10.1 Porosités (NF P 18 554 et 18 555).....	99
IV.2.10.2 Compaci.....	100
IV.2.10.3 Indice des vide.....	100
IV.3 La formulations des bétons.....	100
IV.3.1 L'objectif de formulation de béton.....	100
IV.3.2 Quelques méthodes de composition des bétons.....	101
IV.3.3 Méthode de formulation de Dreux-Gorisse.....	102
IV.3.4 Détermination du dosage en ciment.....	102

IV.3.5 Détermination du dosage en eau.....	104
IV.3.6 Détermination du dosage en granulat.....	104
IV.3.7 La ligne de partage.....	109
IV.3.7.1 Dosage en masse de granulats.....	110
IV.3.7.2 Coefficient de compacité.....	110
IV.3.8 Volume absolu de l'ensemble des granulats.....	111
IV.3.8.1 Dosage des granulats en kg dans 1m3.....	111
IV.3.8.2 Les dosages en matériaux secs pour notre micro béton.....	112
IV.4 Constituant ajoutés dans béton.....	112
IV.4.1 Fumée de silice.....	112
IV.4.2 L'adjuvant.....	113
IV.4.3 Programmes expérimentaux.....	115
IV.4.4 Matériels et essais.....	116
IV.4.4.1 L'exécution de malaxage.....	116
IV.4.4.2 Malaxeurs du béton.....	117
IV.4.4.3 Malaxeurs a béton [NA EN 12390-2].....	117
IV.4.4.4 Programme des essais.....	118
IV.4.4.4.1 Mesure de la consistance (Norme NF P 18 415).....	118
IV.4.4.4.2 Vibration [NA EN 12390-2].....	119
IV.4.4.4.3 Résistance à la compressio.....	120
IV.4.4.4.4 Résistance à la traction par flexion.....	121
IV.4.5 Traitement des échantillons de béton par H2SO4 et HCL.....	122
IV.4.6 Perte de masse.....	123
IV.4.7 Evaluation de la porosité.....	123
IV.4.8 Capacité d'absorption.....	125
IV.5 Résultats et discussions.....	125
IV.5.1 Introduction.....	125
IV.5.2 Représentation et analyse des résultats.....	126
IV.5.2.1 Avant traitement avec les acides	126
IV.5.2.1.1 La résistance à la compression 28 jours.....	126
IV.5.2.1.2 La résistance à la flexion 28 jours.....	126
IV.5.2.1.3 La résistance à la traction 28 jours.....	126
IV.5.3 Après traitement.....	129
IV.5.3.1 Béton traité par H2SO4.....	129
IV.5.3.2 La résistance à la compression.....	129
IV.5.3.3 La résistance à la flexion.....	130

IV.5.3.4 La résistance à la traction.....	131
IV.5.4 Béton traité par HCL.....	132
IV.5.4.1 La résistance à la compression.....	132
IV.5.4.2 La résistance à la flexion.....	133
IV.5.4.3 La résistance à la traction.....	134
IV.5.5 Evaluation de la porosité.....	135
IV.5.6 Capacité d'absorption.....	135
IV.5.7 Perte de masse.....	136
IV.5.7.1 Milieux (H ₂ SO ₄).....	136
IV.5.7.2 Perte de masse (béton sans adjuvant).....	136
IV.5.8 Perte de masse (béton avec adjuvant).....	137
IV.5.9 Milieux (HCL).....	138
IV.5.9.1 Perte de masse (béton sans adjuvant).....	138
IV.5.10 Perte de masse (béton avec adjuvant).....	139
Conclusion généra.....	141
Références bibliographiques	

Nomenclature

BO: Béton ordinaire

Rc: Résistance à la compression

Rt: Résistance à la traction

Rf: Résistance à la flexion

S : section de l'éprouvette

S : Sable

SR : Sable Recyclé de Brique Concassée

Dmax : Diamètre maximal du gros granulat

C : Ciment

E : Eau

G : Gravier

E/C : rapport eau sur ciment

γ : masse volumique absolue

V : Volume

MF : module de finesse

e (%) : indice des vides

C(%) : Compacité

Esv : équivalent de sable visuel

Esp : équivalent de sable par piston

ρ : Masse volumique (Kg/m³).

fc28 : Résistance en Compression à 28 jours

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Le matériau béton formé d'un squelette granulaire, solidarisé par des hydrates principalement les C-S-H, l'hydroxyde de calcium et les aluminates. Le béton est fortement basique dont le pH est de l'ordre de 13. Face aux agents agressifs acides le béton se trouve en déséquilibre chimique et des dégradations plus ou moins importantes peuvent être produites. Le mécanisme des attaques chimiques agressives des bétons conduit à une dissolution des hydrates et à une précipitation des nouveaux composés. Les résultats de ces attaques chimiques sont un accroissement de la porosité et de la fissuration, une augmentation de la perméabilité, des pertes de masses et de résistances mécaniques.

Les paramètres de la durabilité chimique des bétons dépendent des paramètres liés au matériau (ciment, formulation et propriétés de transfert), des paramètres liés à l'environnement (nature de l'agent agressif, conditions climatiques générales et locales et des paramètres liés à la structure (charges et fissuration).

La protection de l'environnement est grandement préoccupée depuis plusieurs années par les pays industrialisés comme l'Europe et les États-Unis. Dans le but de prendre soin de l'environnement, plusieurs recherches sont réalisées pour valoriser les déchets de l'industrie ou de la construction comme matériaux de construction.

Les chantiers de construction et de démolition engendrent une diversité de déchets, une grande partie de ces déchets sont éliminés en décharge. L'épuisement de sources naturelles disponibles, les lois relatives à la protection de l'environnement et les problèmes posés par la destruction des déchets sont tous des facteurs qui favorisent le recyclage des déchets de chantier.

Les pays de l'Europe produisent chaque année environ 500 kg de déchets de construction et de démolition par habitant. Les granulats recyclés trouvent essentiellement des débouchés dans le domaine routier. En Algérie, en plus du déficit important (10 à 20%) connu ces dernières années en granulats et ciment, les déchets de construction et de démolition sont importants, et rarement valorisés. La seule tentative de valorisation des déchets de construction a été réalisée à El-ASNAM (CHLEF actuellement) suite au tremblement de terre de 1982 en collaboration avec le Centre scientifique et technique de Construction (C.S.T.C) belge.

L'emploi des granulats recycle (en particulier les granulats de béton et de briques concassées) dans le béton hydraulique, présente plusieurs obstacles dans les textes de codification technique. De plus, le manque de connaissances sur le comportement et la durabilité de ces bétons engendre la méfiance des usagers. Par conséquent, une meilleure connaissance du comportement des bétons contenant de tels granulats pourrait contribuer au développement de ce type de matériaux.

Dans le présent travail, l'étude du comportement mécanique et la durabilité du béton à base de granulats de brique concassée sont présentées avec des taux de remplacement du sable naturel de (0%, 25%, 50%, 75%, et 100%) et en utilisant par la suite de la fumée de silice et un adjuvant super plastifiant. L'étude expérimentale est réalisée sur des échantillons prismatiques (4x4x16 cm³) de micro béton conservés dans des solutions d'acide, des mesures de résistance et de durabilité ont été prises.

Chapitre I : Etude Bibliographique

Etude bibliographies

I.1 Introduction:

La durabilité d'un ouvrage se caractérise par sa capacité à durer dans le temps sans subir de dégradations, tous en conservent son intégrité et en maintenant son niveau de fiabilité. La notion de durabilité d'un ouvrage se traduit par un ensemble de spécifications techniques basées sur des méthodes d'essais directe ou indirecte, sur l'expérience et sur des préconisations de fabrication, et d'entretien avec des frais aussi réduit que possible. La durabilité des bétons dépend de nombreux paramètres dont la qualité de conception, la qualité Des matériaux et de l'environnement.

I.2 Rappel sur les constituants et l'hydratation du ciment

I.2.1 Définition de ciment : Le ciment est un lien hydraulique fait de calcaire pour les matières premières, marne et gypse nous entendons par lien hydraulique c'est un produit de durcissement dans l'air et l'eau après le mélange avec de l'eau. L'aggloméré de ciment qui en résulte est étanche et a une bonne résistance à la pression. « C'est la principale composante du béton, ce qui lui confère un certain nombre de caractéristiques, y compris sa puissance. Il est considéré comme un matériau de construction économique de haute qualité, utilisé dans la plupart des projets de construction à travers le monde. [1]



Figure I.1 : Echantillon de ciment

Pour fabriquer du ciment, il faut réunir quatre éléments principaux selon des dosages préétablis : la chaux, la silice, l'alumine, l'oxyde de fer. L'élément prépondérant étant le calcaire, La cimenterie est d'ailleurs implantée à proximité d'un important gisement de cette matière. L'ensemble de ces éléments, appelé cru, est ensuite traité par voie sèche.

I.2.2 Etapes de fabrication de ciments :

Le ciment commun est fait d'un mélange d'environ 80 % de calcaire et de 20 % d'argile, un mélange qui est progressivement chauffé à une température d'environ 1450°C, puis brusquement refroidi. Au cours de ces processus, de nombreuses réactions chimiques se succèdent. Le résultat est le clinker, qui est mélangé avec du gypse et éventuellement d'autres produits, puis finement broyé pour produire du ciment. [2]

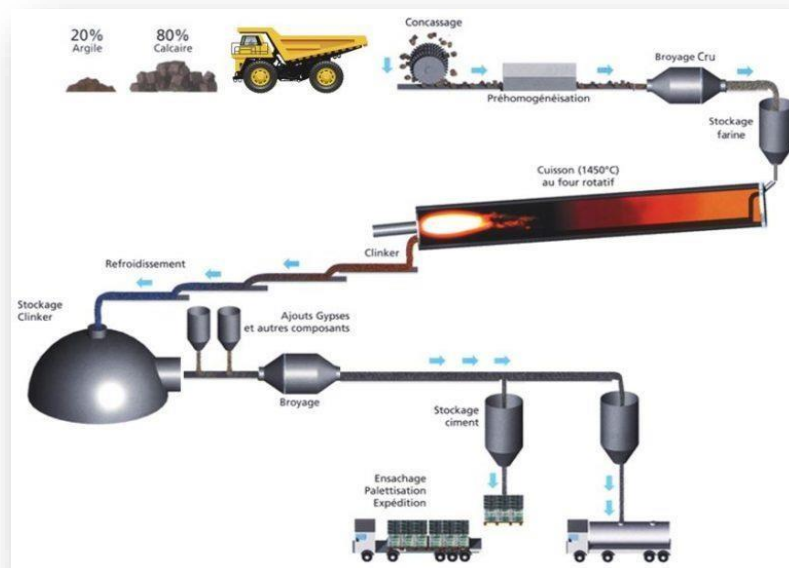


Figure I.2: Etapes de fabrication du ciment.

I.2.3 Extraction de matières premières:

L'extraction consiste pour le calcaire, à abattre la roche à l'explosif, dans des carrières à ciel ouvert, de façon à la fragmenter en blocs qui sont chargés ensuite dans des dumpers pour alimenter des concasseurs. Alors que l'argile, beaucoup plus meuble, est exploitée au moyen d'excavateurs ou de roues pelles avant d'être transportée par camions.

La matière première du ciment, qui est un mélange de calcaire et d'argile, est appelée « cru » ou « farine ». La préparation du cru au cours de laquelle on réalise le mélange homogène du calcaire et de l'argile dans des proportions définies en fonction de leurs compositions chimiques particulières, mais toujours proches du rapport 80 de calcaire pour 20 d'argile, peut être réalisée suivant différents procédés : par voie sèche, par voie humide, par voie demi- sèche ou bien par voie semi-humide.[2]



Figure I.3 : *Extraction des matières premières*

I.2.4 Cuisson:

Le cru est ensuite cuit dans un four rotatif légèrement incliné dont les dimensions sont de l'ordre de 5m de diamètre et de 80 à 100m de longueur.

Le cru est introduit dans un four pour y être cuit à une température comprise entre 1400 et 1500°C. La cuisson, qui génère des émissions de CO₂, permet la transformation du cru en clinker. [3]



Figure I.4: *Zone de cuisson.*

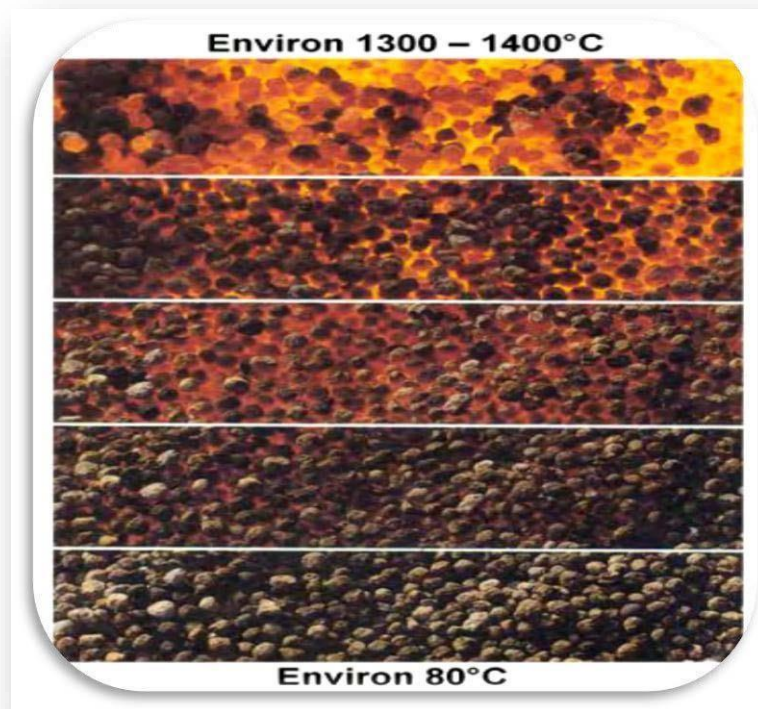
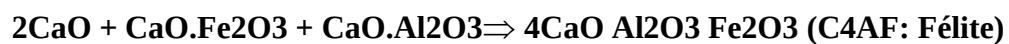


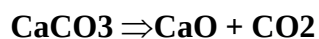
Figure I.5 : Clinker à la sortie de four et après le refroidissement.

Les réactions chimiques de transformation de cru dans le four, sont comme suivies :

- Jusqu'à 100°C : évaporation de l'eau libre.
- Entre 450 et 550°C : Evaporation de l'eau constitutive à l'intérieur des minéraux.
- A partir de 650°C : Formation des aluminates et ferrites de calcium.



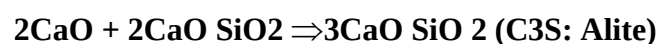
- A partir de 700°C : Décarbonatation du calcaire.



- Vers 900°C : Formation du silicate bi calcique (2CaO , SiO_2)



- A partir de 1250 °C : le silicate tricalcique appelé 'Alite' commence à apparaître
- Partir de la chaux et de la Bélide.



- Entre 1260 et 1450 °C : apparition du premier liquide.
- T = 1450°C: Clinkérisation.

Tableau I-1 : Composition minéralogique de clinker

Composant	Formule	Min
Alite (silicate tricalcique)	Ca_3SiO_5	45.0 %
Bélite (silicate bi calcique)	Ca_2SiO_4	5.7 %
Aluminate tricalcique	$\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$	1.1 %
Aluminoferrite tétra calcique	$\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{Fe}_2\text{O}_{10}$	2.0 %
Chaux libre	CaO	0.6 %

I.2.5 Refroidissement:

Lorsque le clinker est sorti de l'étuve, il doit être soudainement refroidi par un système de refroidissement en réseau : le clinker avance à l'intérieur du refroidisseur grâce aux frappes répétées des réseaux sur lesquels ce dernier est situé, à travers les réseaux, les ventilateurs puissants sous clinker exploseront pour le refroidir, au début ou à la fin du refroidisseur (selon le modèle utilisé), le concasseur contenant un ou plusieurs cylindres de clinker sera grossièrement râpé. Le refroidissement après cuisson joue un rôle important dans la forme et l'interaction des ingrédients du clinker. [4]

I.2.6 Broyage:

Le broyage est réalisé en continu dans des broyeurs alimentés à partir des stocks de clinker et des différents constituants et ajouts.

Le broyage a pour objectif, d'une part de réduire les granules de clinker en poudre, d'autre part de procéder à l'ajout de gypse (dont le rôle est de réguler la prise), ainsi qu'à celui des éventuels autres constituants (filler calcifié, laitier, cendres...), qui permet d'obtenir les différents types de ciments normalisés.



Figure I.6 : Broyage la matière première

I.2.7 Les ajouts:

Cette étape implique le dosage de différents composants de ciment. Ainsi, plusieurs types de ciment peuvent être créés en fonction des produits ajoutés, qui sont appelés "auxiliaires." En général, une petite quantité de plâtre (3-5%) et de plâtre est ajoutée au clinker pour réguler les caractéristiques de la préparation du ciment. Le clinker est généralement la base du produit fini, en particulier pour le ciment Portland, mais peut encore être mélangé et broyé avec d'autres métaux industriels ou naturels - laitier de four de soufflage (pour faire du ciment écologique). Cendres volantes des centrales électriques au charbon. - Charges (souvent des matériaux très précis habituellement faits de calcaire). Ainsi, nous obtenons différentes catégories de ciment qui permettent de réaliser des travaux allant du plus commun au plus exigeant.

I.3 Les constituants des ciments:

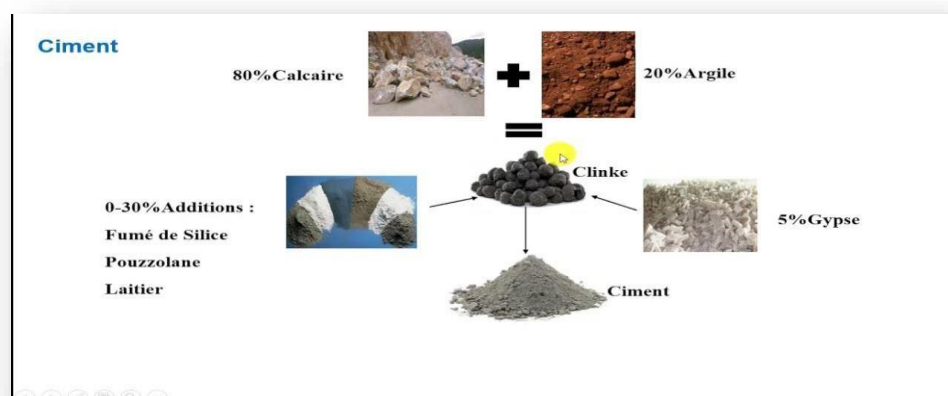


Figure I.7: Le composant ciment.

On obtient du broyage du ciment certains composants : clinker, Plâtre et additifs minéraux actifs :

- **Le clinker** : L'un des principaux composants du ciment est le clinker. Il est composé de silicate de calcium (C3S et C2S) et d'aluminates de calcium (C3A et C4AF).

En plus d'autres ingrédients, nous obtenons différents types de ciment. Il s'agit principalement de laitier de haut fourneau, de cendres volantes, de calcaire, de fumée de silice, de fillers et de sulfate de calcium (gypse). Lorsque leur teneur massique dépasse 5%, ils forment des composants majeurs, sinon ils sont dits composants mineurs.

I.3 L'hydratation du ciment:

L'ajout d'eau au ciment donne un liquide qui se transforme très rapidement en masse solide. Ce changement est réalisé par l'hydratation du ciment. En raison des interactions chimiques entre l'eau et les composés cimentiers, il s'agit d'un processus complexe dans lequel les principaux composés cimentiers C3S, C2S, C3A et C4AF interagissent pour former de nouveaux composés insolubles qui provoquent le contrôle et la solidification graduelle de la substance. L'étude des réactions hydratantes des composants de ciment démantèle artificiellement les mécanismes qui les détectent effectivement simultanément. [5]

1) Hydratation du silicate tricalcique (C3S) :

En présence d'eau, le silicate tricalcique se dissout superficiellement en libérant des ions silicate H_2SiO_4^- hydroxyles et des ions Ca^{2+} calcium dans la solution. [6]

Nous obtenons trois produits distincts :

- Le silicate de calcium hydraté (C-S-H) suivant la réaction :



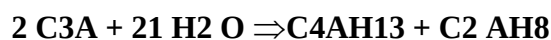
2) Hydratation du silicate bi calcique ($\beta\text{C}_2\text{S}$) :

Le silicate bi calcique se comporte comme le silicate tricalcique en donnant des C-S-H semblables avec une certaine différence dans la microstructure. Cependant, les principales différences résident dans l'absence d'une sursaturation marquée en portlandien et dans un flux de libération de chaleur plus faible. Si le degré de sursaturation est en relation avec la germination de la portlandien, la faible sursaturation autour des grains de $\beta\text{C}_2\text{S}$ peut expliquer sa réactivité moins importante par rapport à celle du C3S au jeune âge. [6]

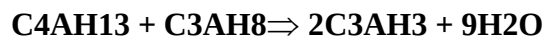
3) Hydratation de l'aluminate tricalcique (C3A) :

Les études portant sur l'hydratation du C3A montrent clairement l'influence de cette réaction sur le comportement rhéologique initial du ciment. Contrairement aux phases silicatées, le sulfate de calcium joue un rôle crucial sur l'hydratation du C3A et les hydrates formés sont différents (morphologie, structure, composition) selon que le processus d'hydratation a lieu en absence ou en présence de « gypse ».

En absence de « gypse », une réaction accélérée se produit et conduit à la formation d'aluminates hydratés hexagonaux suivant la réaction :



Ces hydrates hexagonaux ne sont pas stables et se transforment au cours du temps sous l'action de la chaleur d'hydratation du C3A en hydrate cubique C3AH6, plus stable, suivant la réaction :



Ces réactions sont la cause principale de la prise rapide des ciments Portland lorsque la quantité de « gypse » présente dans le ciment est insuffisante. [6]

4) Hydratation de l'alumino ferrite de calcium (C4AF) :

L'hydratation du C4AF est similaire à celle du C3A. Cependant, le C4AF réagit moins vite que le C3A. Son hydratation n'est toujours pas totalement élucidée et est souvent ignorée dans les publications portant sur l'hydratation des ciments [6]. Les réactions mises en jeu lors de l'hydratation sont les suivantes :

- Sans gypse : $\text{C}_4\text{AF} + \text{H}_2\text{O} \Rightarrow \text{C}_4(\text{AF})\text{H}_{13}$
- Avec gypse : $\text{C}_4\text{AF} + \text{gypse} + \text{H}_2\text{O} \Rightarrow \text{C}_4(\text{AF})\text{SH}_{12}$

I.4 Différent type de la pâte du ciment hydratante :

La pâte de ciment hydratante est le résultat de la réaction chimique entre l'eau et ciment (réaction hydratante). Il se compose de différents métaux formés au cours du processus d'hydratation. Les principaux métaux dans la pâte de ciment hydratante sont :

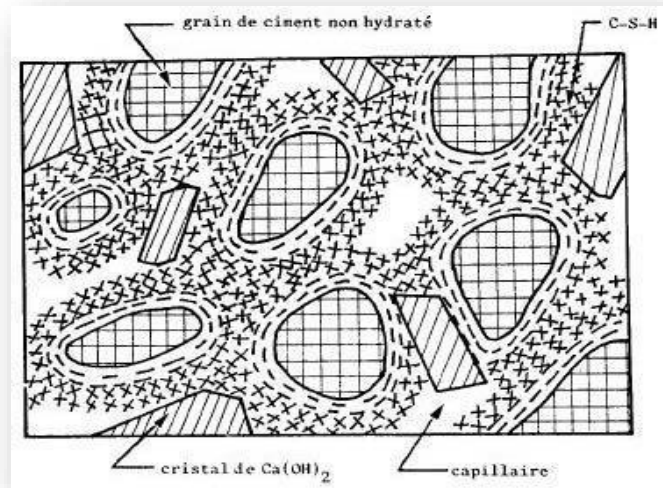


Figure I.8 : Représentation schématique de la pâte de ciment hydraté

Les silicates de calcium hydraté C-S-H :

C'est le principal composant de la pâte de ciment hydraté. Il se forme à partir de la réaction entre les ions silicates et les ions calcium. Le gel C-S-H est responsable de la résistance mécanique et de l'imperméabilité du béton.

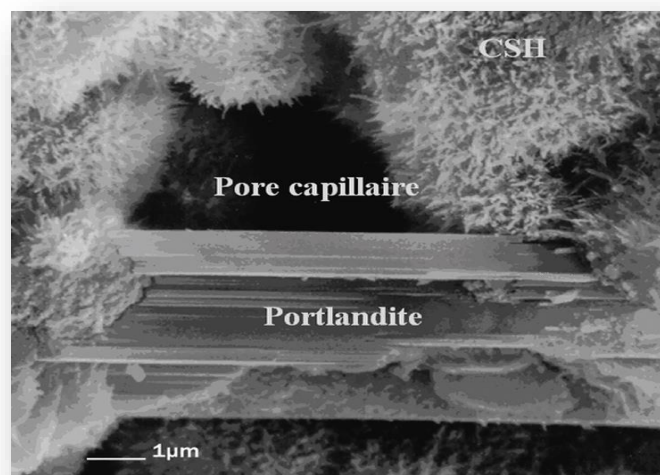


Figure I.9: Image en microscopie électronique à balayage de la morphologie du C-S-H

La chaux hydratée (Ca(OH)_2) :

La chaux hydratée se forme à partir de la réaction entre les ions calcium et les ions hydroxyde. Elle est importante pour la prise du ciment, mais elle peut aussi entraîner des problèmes de fissuration et de durabilité si elle est présente en excès.

Les phases cristallines :

Le clinker de ciment contient différentes phases cristallines telles que le silicate tricalcique (C3S), le silicate di calcique (C2S), l'aluminate tricalcique (C3A) et la ferrite tétra calcique (C4AF). Ces phases cristallines se dissolvent lors du processus d'hydratation pour former des composés hydratés tels que le gel C-S-H et la chaux hydratée. [7]

I.5 Revue sur la structure poreuse du béton :

Il est montré que les agressions chimiques résultent du déséquilibre entre la solution interstitielle contenue dans les vides de la structure poreuse du béton et son environnement. La durabilité du béton est ainsi intimement liée à ses capacités d'échanges avec le milieu l'extérieur qui sont conditionnées par la nature des phases en présence mais aussi par les caractéristiques de sa structure poreuse. La recherche d'une forte compacité sera toujours une condition nécessaire pour une bonne durabilité. Le béton étant un matériau composite associant une phase granulaire et une phase liante, sa structure poreuse dépend de l'arrangement granulaire et de la structuration de la phase liante. Concevoir un béton durable consistera donc à optimiser le squelette granulaire et à rechercher une phase liante dense, ceci en conciliant les autres impératifs de fabrication, notamment des propriétés à l'état frais compatibles avec les moyens de mise en œuvre. [8]

I.5.1 Description de la structure poreuse du béton

La durabilité du béton a la capacité d'échanger avec l'environnement extérieur.

Le béton est un matériau multicolore composé de phase solide, phase liquide et phase gazeuse. La partie solide est constituée d'agréats, d'une partie hydratante et de fèves de ciment non décortiquées ainsi que d'une partie gazeuse (une combinaison d'air et de vapeur d'eau). [8]

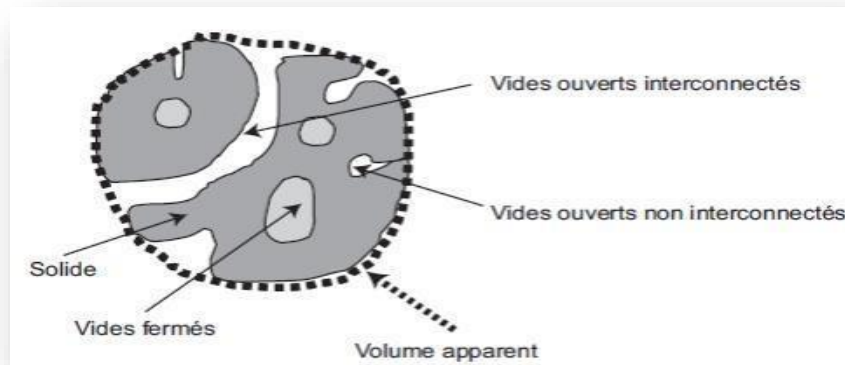


Figure I.10 : Schéma des pores dans un matériau

Ces pores sont décrits comme suit :

- V_a , le volume apparent contenu dans l'enveloppe du matériau
- v_s , le volume de la partie solide du matériau
- v_o , le volume des pores « ouverts », c'est à dire communicant avec l'extérieur,
- $v_{o,i}$, le volume des pores ouverts interconnectés à travers lesquels un fluide peut traverser le matériau,
- $v_{o,ni}$, le volume des pores ouverts non interconnectés,
- v_f , le volume des pores fermés.

Les relations entre ces volumes peuvent être formulées :

$$V = V_o + V_f$$

$$V_o = V_{o,i} + V_{o,ni}$$

Nous connaissons les pores en reliant les tailles d'espace à la taille apparente :

$$\text{Porosité ouverte interconnectée : } P_{o,i} = V_{o,i} / V_a$$

$$\text{Porosité ouverte non interconnectée : } P_{o,ni} = V_{o,ni} / V_a$$

$$\text{Porosité ouverte : } P_o = V_o / V_a = P_{o,i} + P_{o,ni}$$

$$\text{Porosité fermée : } P_f = V_f / V_a$$

$$\text{Porosité totale : } P = V / V_a = P_o + P_f$$

Les différentes caractéristiques d'utilisation des créatures varient sur les pores spécifiés ci-dessus dans lequel

La durabilité est particulièrement associée à la porosité ouverte et plus spécifiquement à porosité ouverte interconnectée qui permet la pénétration de facteurs agressifs externes en béton.

I.6 Distribution et taille de pore dans le béton :

Distribution des pores dans le béton comprend une large gamme de taille des pores : capillaires, intérieur Hydrates, bulles d'air et fissures.

Dans le cas du béton, il faut envisager des couches de deux pores :

 Pores poétiques.

 Pores internes d'hydrates.

Les pores capillaires peuvent être détectés à l'échelle des pores de mercure.

Entre les granulés, il est directement lié au rapport E/C du mélange de pâte de ciment.

Pores internes avec des hydrates, inter crystals et intérieur (ou inters pace) beaucoup plus petit comme précédent, il est inhérent à la formation d'hydrates et indépendant de la relation E/C. Cette porosité peut être observée par adsorption de gaz. [8]

I.6.1 Pores relatifs aux capillaires:

Les pores capillaires sont les vestiges des espaces inter granulaires de la pâte fraîche. Ils peuvent être ou non remplis d'eau et leur volume décroît au cours de l'hydratation pour un rapport eau/ciment donné. Leur volume et leur dimension, à un âge donné, diminuent avec le rapport E/C.

La représentation schématique, permet de visualiser le type de répartition porométrique susceptible d'exister au sein d'une pâte de ciment durcie.

I.6.2 Pores relatifs aux hydrates:

Cette porosité concerne une échelle encore plus petite, celle du gel C-S-H. Les représentations qui en sont faites distinguent, en général, deux types de pores :

- Les pores inter-lamellaires (ou inter-cristallites) qui sont situés entre les particules de gel,

- Les pores inter-feuillets (ou intra-cristallites) qui sont situés à l'intérieur même des particules, il s'agit d'espaces extrêmement petits (quelques angströms).

I.6.3 Autres:

Pour la description de la totalité de l'espace poral du béton, il convient d'ajouter les vides dus aux inclusions d'air (provenant de l'air occlus pendant le malaxage ou de l'air entraînée par un adjuvant). Cette classe de porosité est généralement considérée comme étant une porosité fermée n'ayant que peu d'importance au regard des transferts hydriques. Il sera fait abstraction, des fissures ($> 100 \mu\text{m}$) qui relèvent d'un champ d'investigation relatif le plus souvent à des chargements mécaniques et /ou thermiques. [9]

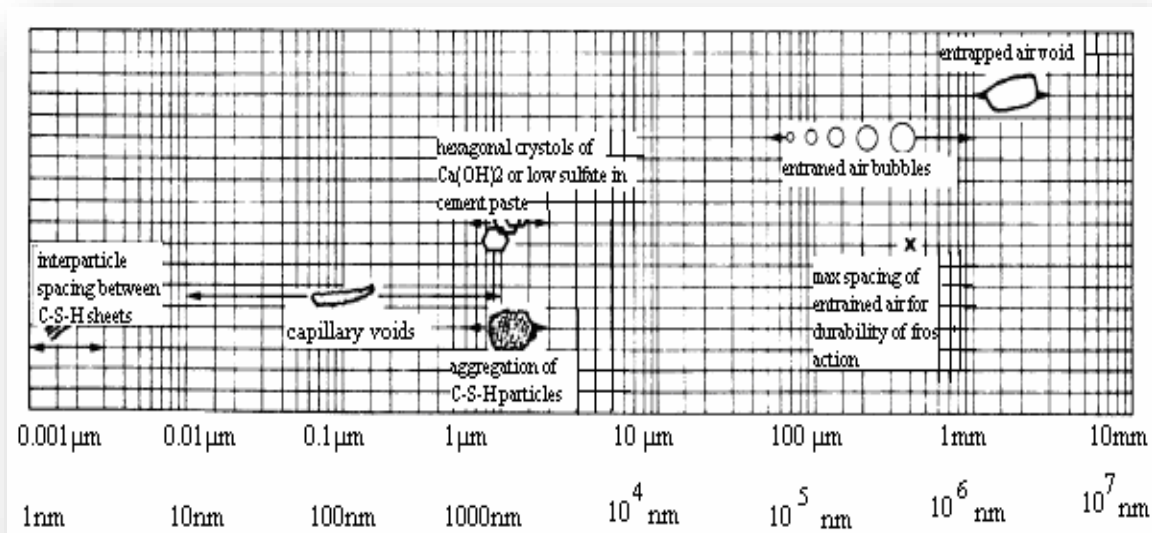


Figure I.11: Illustration des différentes formes de porosité dans la pâte de ciment durcie

I.7 Interface pâte-granulat du béton :

Lors de l'hydratation du ciment, une liaison entre la pâte de ciment et totaux. Dépend de la nature des phases respectives, la teneur en ciment dans les conditions de stockage. À propos de l'agrégat formé une zone de pâte humidité spéciale, appelée (zone de transmission interfaciale), a noté ITZ, soumettre un rapport (E/C) plus élevé que le reste de la pâte, ce qui rend ses pores plus élevés ITZ a moins de résistance que la pâte de ciment elle-même. Les pores, les plus grossiers dans ce domaine, sont structurellement faibles. L'épaisseur augmenter l'ITZ avec le diamètre total et la quantité d'eau hydratante (c.-à-d. rapport E/C). [10]

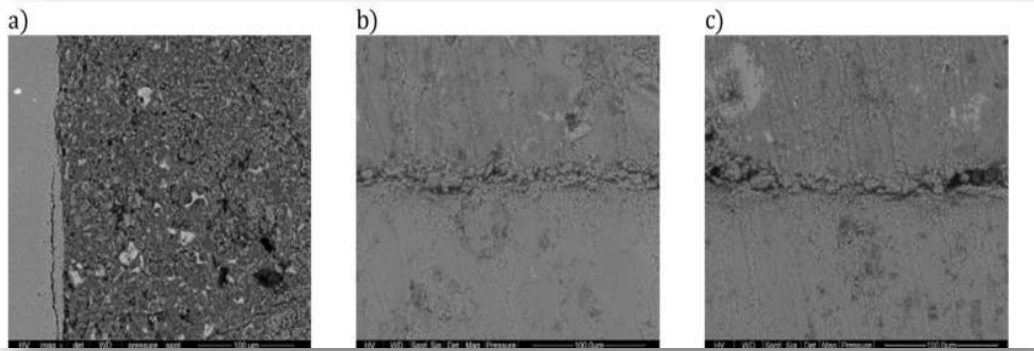


Figure I.12 : Interface pâte granulat de ciment

I.8 Les facteurs d'influence sur la porosité du béton :

Plusieurs facteurs influencent la porosité du béton. Voici quelques-uns des principaux :

✚ Rapport eau-ciment :

Le rapport (E/C) est le rapport entre la quantité d'eau utilisée dans le mélange de béton et la quantité de ciment. Un rapport élevé d'eau par rapport au ciment augmente la porosité du béton, car il laisse plus d'espace pour les vides. En général, un rapport E/C plus bas produit une densité plus élevée et une porosité réduite. [11]

✚ Conditions d'hydratation :

Les conditions d'hydratation, notamment la température, l'humidité relative et la durée d'hydratation, peuvent influencer la porosité du béton. Des températures élevées peuvent accélérer l'hydratation et réduire la porosité, tandis qu'une humidité relative élevée et une hydratation prolongée favorisent une hydratation plus complète et une réduction de la porosité. [12]

✚ Additions minérales :

Les additions minérales, telles que les cendres volantes, le laitier de haut fourneau et les fumées de silice, peuvent être ajoutées au mélange de béton. Ces matériaux réagissent avec les produits de l'hydratation du ciment et peuvent remplir les pores du béton, réduisant ainsi sa porosité. Les additions minérales peuvent également améliorer la compacité et la résistance du béton. [13]

Nous remarquons que la combinaison de ces facteurs et d'autres variables, comme les types de ciment, les techniques de mélange et le placement, influe également sur la porosité du béton.

I.9 Influence de la formulation du béton :

- ✚ **Compression du béton** : désigne la densité et la distribution du ciment et des particules rassemblées dans le mélange. Le béton bien pressé a moins d'espaces et de bulles, réduisant la porosité. Une pression de béton appropriée peut être obtenue au moyen de techniques appropriées comme la pression de vibration ou la pression.
- ✚ **Type de ciment** : Le type de ciment utilisé dans la composition du béton peut affecter ses pores. Différents types de ciment, comme le ciment Portland ordinaire, le ciment primaire Portland à haute résistance (CPA) ou le ciment thermique à faible humidité, ont des propriétés spécifiques qui peuvent affecter la pression et les pores du béton. Certains types de ciment peuvent réduire la porosité et améliorer la résistance du béton.
- ✚ **Rapport E/C** : Le rapport eau-ciment (E/C) est un paramètre clé dans la formulation du béton. Un rapport E/C élevé signifie une plus grande quantité d'eau par rapport à la quantité de ciment utilisée. Un rapport E/C plus bas peut favoriser une meilleure hydratation du ciment et une compacité accrue, ce qui réduit la porosité du béton. Un contrôle attentif du rapport E/C est donc important pour minimiser la porosité.

Il est à noter que ces facteurs sont interdépendants et doivent être pris en compte lors de la conception et de la formulation du béton afin de minimiser la porosité et d'obtenir les performances souhaitées. De bonnes pratiques de formulation du béton et l'utilisation de techniques de pression appropriées et de contrôle cumulatif/quantitatif contribuent à réduire la porosité et à améliorer la qualité du béton. [14]

I.10 CONCLUSION : La durabilité du béton dépend de la qualité des différents composants. Principalement, la quantité d'eau de gâchage qui affecte le comportement physicochimique de la pâte de ciment solide. En plus le type de ciment et la nature des granulats fins et grossiers, la température lors du malaxage et mode de cure. Les composants de la pâte de ciment sont des cristaux de portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) et le gel appelé silicate de calcium hydraté (C-S-H). En plus des composants secondaires, des grains de ciment non hydratés et des espaces remplis ou vides. Ces espaces sont appelés pores capillaires. La porosité capillaire de la pâte est affectée par le rapport E/C et le degré d'hydratation dû au type de ciment.

**Chapitre II : MECANISME DE DEGRADATION
DU BETON PAR DES AGGRESSION
CHIMIQUE**

MECANISME DE DEGRADATION DU BETON PAR DES AGGRESSION CHIMIQUE

II.1. Introduction:

La durée de vie d'un ouvrage en béton est très souvent liée à la capacité du béton à empêcher les agents agressifs de pénétrer dans sa porosité. L'aptitude des bétons à résister à l'intrusion de ces agents est caractérisée par trois grandeurs physiques : la perméabilité, la diffusivité et l'absorption. Ces trois paramètres sont considérés comme des « indicateurs de la durabilité ».

Les altérations du béton sont variées. Elles atteignent soit la matrice cimentaire soit les armatures, par fois les deux. Leurs origines sont très nombreuses : chaque étape depuis la formulation, jusqu'à la mise en œuvre, mais aussi l'agressivité de l'environnement peuvent être source de dégradation.

II.2. Mécanisme générale des agressions chimiques du béton :

La durabilité est tout aussi importante que les propriétés mécaniques des matériaux en béton. Cette propriété est définie (au sens très général) par la capacité du matériau à maintenir des propriétés physiques et des performances mécaniques dans des conditions de sécurité satisfaisantes pendant la durée de vie dans les conditions des services existants et de l'environnement dans lequel ils évoluent. Le paramètre qui régit la durabilité est bien sûr la transmission. Plus ce dernier est faible, meilleure sera sa durabilité.

Pour évaluer la durabilité « potentielle » d'un béton, il est nécessaire de connaître les mécanismes susceptibles de conduire à sa dégradation, et la résistance du matériau à ces dégradations. [15]

Les principaux processus chimiques à l'origine de la détérioration du béton sont, pour la majorité des agressions chimiques, généralement classés en trois catégories :

- A- Hydrolyse ou lessivage (dissolution) des hydrates.
- B- Echange ionique entre l'hydrate et le milieu agressif.
- C- Formation de produits expansifs dans le béton.

II.3. Attaque du béton par les sulfates :

II.3.1. Définition de l'attaque sulfatique:

La résistance du béton à l'attaque des sulfates est l'un des facteurs les plus importants pour sa durabilité. Le problème est aussi ancien que concret et nous avons commencé à l'étudier il y a près de 100 ans.

L'attaque des sulfates s'accompagne de la précipitation de soi-disant « sous-produits » du sulfate, dont la formation après hydratation du ciment, dilatation importante et dégradation chimio mécanique (modification des propriétés de transport et de porosité, fissures, perte de résistance et de cohésion). Cela endommage le matériau cimentaire, approximativement à long terme en fonction de l'attaque (nature, teneur et concentration des sulfates en contact) et du ciment utilisé.

[16]



Figure II.1: Des cas pathologiques d'éléments en béton en contact de sulfate. [17]

II.3.2. Sources des sulfates:

Il existe deux types d'attaques : les attaques par les sulfates externes présents dans l'environnement du béton et les attaques internes par les sulfates pour lesquels les sulfates proviennent des composants du béton lui-même. [16]

En ce qui concerne l'attaque de sulfate de l'extérieur, il y a formation de couches de gypse et d'ettringite secondaire à partir de la surface exposée au sulfate. L'attaque sulfate externe est souvent associée à l'attaque cationique correspondante, selon l'origine du sulfate, qui peut réagir avec certains granulats ou charges, ou avec C-S-H ou portlandien, et contribuer davantage à la détérioration du béton. De plus, l'attaque par des sulfates externes peut être combinée à une attaque par un acide qui accélère également la destruction de la pâte humide.

En ce qui concerne l'attaque interne par les sulfates, ces derniers proviennent presque exclusivement du sulfate de calcium présent dans le béton une fois fabriqué. Par conséquent, ces sulfates sont uniformément répartis dans une pâte humide et le seul produit de réaction est l'ettringite. L'ettringite secondaire, résultant de l'attaque des sulfates externes, n'est pas la seule cause d'endommagement du béton, mais plutôt de la formation de gypse qui contribue à la fissuration, au lessivage et au délaminage des couches superficielles. [17]

Comme le montre La figure I-2 l'origine des sulfates peut être : externe (environnement) ou interne (composants du béton).

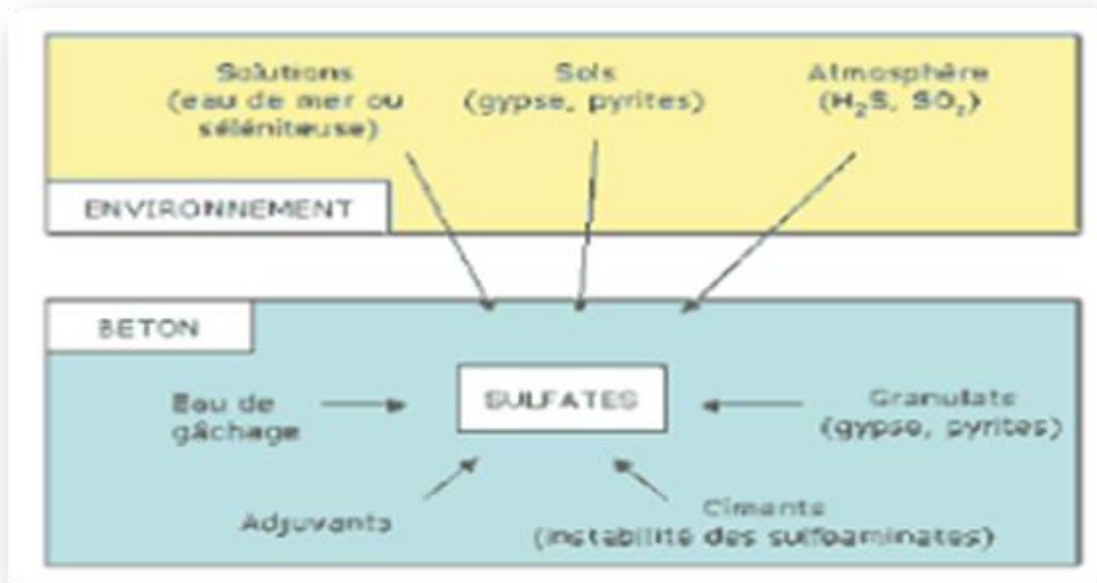


Figure II.2 : L'origine des sulfates (interne ou externe). [18]

Les sulfates peuvent avoir différentes origines :

- Il peut d'abord provenir du régulateur de prise du ciment-additif (gypse, hydrate, anhydrite) auquel s'ajoutent, dans des proportions variables, les sulfates présents dans le clinker lui-même : sulfates alcalins (arkanite K₂SO₄, aphtitalite K₃Na (SO₄)₂, langbenet Ca₂K₂ (SO₄)₃) et des solutions solides dans du silicate de calcium.
- Elle peut également provenir de l'utilisation de granulats contaminés par des sulfates d'origine naturelle ou synthétique (gypse, gypse, anhydrite ou encore pyrite).
- Il peut provenir du milieu extérieur où il se présente sous forme solide (sol de gypse), liquide (eau naturelle s'infiltrant dans le sol et solutions plus ou moins concentrées d'origines diverses), ou gazeuse (pollution atmosphérique par le SO₂) :

Dans le sol où il forme un élément nutritif pour les plantes, sa concentration moyenne varie entre 0,01 % et 0, 05 % de la masse sèche du sol.

Des concentrations beaucoup plus élevées (>5%) peuvent être trouvées dans les sols contenant du gypse $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ou de l'anhydrite CaSO_4 . La biodégradation aérobie de la matière organique et l'utilisation d'engrais sont également une source potentielle de sulfate. Le prochain sulfate d'ammonium $\text{SO}_4(\text{NH}_4)_2$ est un engrais très agressif. Les sols peuvent parfois contenir des sulfures de fer (pyrite) qui, par oxydation, peuvent conduire à l'acide sulfurique H_2SO_4 , puis au gypse au contact du carbonate de calcium ou de la chaux.

- L'eau de fuite peut se charger en ions SO_4^{2-} au contact du sol ou des barrages sulfatés.
- En milieu industriel et urbain, l'atmosphère peut contenir du SO_2 provenant des gaz de combustion (charbon, combustibles divers). En présence d'humidité, ces gaz sont susceptibles de s'oxyder pour produire de l'acide sulfurique très agressif.
- Les processus de fermentation anaérobie qui se produisent dans les stations d'épuration entraînent également la formation d'acide sulfurique à partir du sulfure d'hydrogène libéré. [19]
- L'eau de mer contient des sulfates en solution.

II.3.3. Mécanismes d'attaques:

Le schéma suivant montre les étapes de l'attaque des sulfates

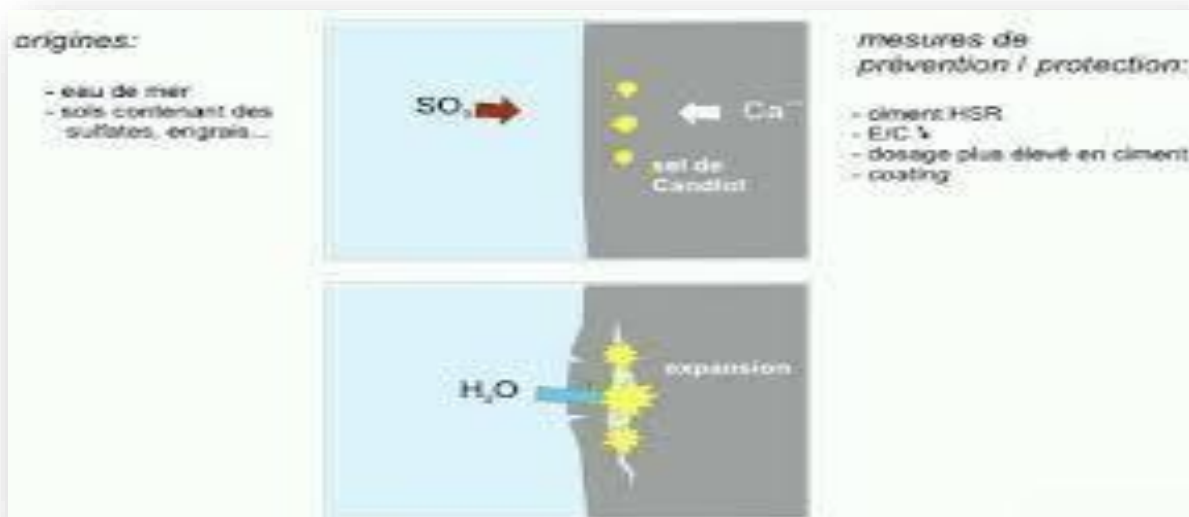


Figure II.3: L'attaque par les sulfates. [20]

Les sulfates peuvent endommager le béton par deux mécanismes physico-chimiques :

- Perte des propriétés de liaison C-S-H.

Les aluminates et les portlandites sont les deux produits les plus sensibles à l'attaque des sulfates

II.3.4. Processus d'attaque par les sulfates internes :

La décomposition du béton par le sulfate est principalement due au phénomène de dilatation par rapport au cristal d'ettringite, que l'on appelle ettringite secondaire. La formation de cette ettringite extensive doit être distinguée de l'ettringite primaire, obtenue dans la première étape d'hydratation du ciment Portland par réaction du gypse, car cette étrangerité primaire n'est jamais étirée. Schématiquement, la formation d'Ethernit est résumée ci-dessous :

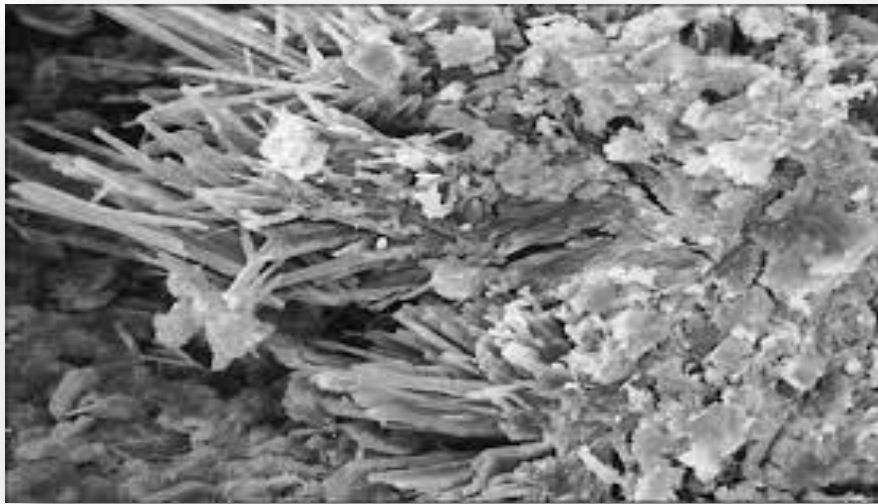


Figure II.4 : La formation de l'étrangerité secondaire. [17]

- A- Formation du gypse dit secondaire à la place du gypse primaire ajouté au ciment comme régulateur de prise La formation du gypse secondaire résulte de la réaction de substitution entre laportlondite et le sulfate de sodium.
- B- L'interaction entre le gypse secondaire et l'aluminate de calcium sous forme de ciment Etrangerité Plusieurs scénarios sont possibles :

Soit du résidu C3A anhydre :



Soit l'aluminate tétra calciue C3AH13 soit le monosulfoaluminate de calcium C3ASO4H12.

L'action des sulfates peut également entraîner une perte de résistance et une perte de masse du béton de surface. Ces effets sont dus à la modification des propriétés de liaison de certains hydrates. [17]

II.3.4. Processus d'attaque par les sulfates externes :

Par le développement qui suit, ce type de dégradation sera traité tant par son aspect phénoménologique que par les conséquences et les moyens de la prévenir en travaillant sur les critères de formulation.

Des études en laboratoire ont permis de mieux identifier les différentes étapes du processus qui conduisent à la détérioration du béton :

- Contact avec la surface du béton de la solution forte.
- Pénétration de l'anion SO_4 , par diffusion confinée à une surface.
- Pénétration de la réaction cationique et la substitution qui l'accompagne : cation (Mg^{+2} , Na^{+2} , NH_4 , etc.), Ca^{+2} et la formation de gypse en solution ou cristallisé, selon les concentrations de SO_4 et $\text{Ca}(\text{OH})_2$.
- Réaction accidentelle des ions sulfate avec des aluminates anhydres (C_3A) ou hydratés (C_4AH_x et $\text{C}_3\text{ACASO}_4\text{H}_{12}$).
- Fissuration du coin due aux contraintes de cristallisation.
- Pénétration accrue des sulfates à travers les fissures.
- L'offensive progresse après un front dégradé dont l'épaisseur tend à s'élargir avec le temps.
- Destruction plus ou moins complète du béton. [17]

Exemples de l'attaque par les sulfates :

Le cas de sulfate de sodium (Na_2SO_4) :

A- Formation de gypse secondaire :



NaOH : alcalinité élevée $\rightarrow$ Stabilisation des C-S-H

CaSO₄.2H₂O : produit expansif mais qui se forme uniquement dans les espaces internes de la pâte de ciment hydraté (pas ou peu d'expansion).

B-Formation d'ettringite secondaire :

- À partir du C3A anhydre résiduel



- À partir des aluminates hydratés (monosulfoaluminate)



Le gypse formé occupe un volume plus grand que la portlandite, sa formation causant ainsi le gonflement et la fissuration de la pâte. Lorsque la concentration en sulfates est assez élevée, le gypse restera stable et de nouveaux cristaux de gypse continueront à se former.

Cependant, lorsque l'apport des sulfates est faible, le gypse sera dissous en libérant des ions SO₄²⁻ qui, en réagissant avec des aluminates, formeront de l'ettringite. Cette dernière occupe plus de place que les composants solides à partir desquels elle se forme, causant ainsi l'expansion.

Lorsque le béton est attaqué par des sulfates externes, sa décomposition se produit par la formation d'ettringite ou de gypse et le compactage et la fissuration qui en résultent. [21]

II.4 Attaque du béton par les acides :

II.4.1. Définition:

Les attaques acides se produisent principalement par le mécanisme de dissolution.

Selon les cas, le phénomène de dissolution peut s'accompagner d'une précipitation du sel formé lors de la réaction acide + base si le sel est peu soluble. Ce sel peut avoir un effet occlusif et des réactions de dissolution lentes.

Le produit final de l'hydrolyse acide peut être du gel de silice issu de la décalcification totale du C-S-H qui, selon Grube et al. [22]

Il peut jouer un rôle protecteur sur la surface du béton et ralentir les réactions. Ces auteurs insistent également sur le fait que les conditions de transport de l'agent agressif sont plus importantes que sa concentration.



Figure II.5: La détérioration des silos-tours en béton due à l'attaque des acides d'ensilage. [17]

II.4.2. Les différents types des acides :

- **Les pluies acides (cas extrême des eaux douces) :**

La précipitation dite "propre" a généralement un pH compris entre 5,6 et 7. Elle n'a pas d'effets néfastes sur les bétons réalisés dans les règles de l'art. En revanche, les pluies dites « acides », dont le pH peut descendre jusqu'à 4 et parfois plus bas, sont considérées comme agressives.

L'apparition de ce type de précipitations est principalement liée à la pollution par les SOx d'origine industrielle ou domestique (combustion de charbon, de fiouls et de carburants), qui représente environ un tiers de tous les SOx dans l'atmosphère. Il en résulte la formation d'acide sulfurique très hygroscopique qui se condense rapidement en gouttelettes susceptibles de contenir des métaux lourds (mercure, plomb, argent et cadmium) et des sulfates (ammonium, sodium).

Les oxydes d'azote présents sont également transformés en acide nitrique. La composition et le pH des précipitations peuvent varier en fonction de la saison et des conditions locales.

Les pluies acides peuvent provoquer une détérioration de surface après des processus assez complexes qui conduisent au phénomène de dissolution due aux acides (sulfurique, nitrique et carbonique) et d'expansion due à la cristallisation de sels, tels que le gypse (interfaces terrestres) ou l'ettringite.

- **Les acides minéraux :**

Les acides nitrique et chlorhydrique, qui sont des acides minéraux forts qui, en réaction avec la chaux contenue dans le ciment, donnent respectivement du CaCl_2 et du nitrate à partir de

Le calcium $(\text{NO}_3)_2\text{Ca}$, un sel très soluble, est très agressif vis-à-vis du ciment Portland.

L'acide sulfurique H_2SO_4 , qui se forme, par exemple, lors de l'oxydation du sulfure d'hydrogène produit dans les systèmes d'égouts ou par condensation du dioxyde de soufre atmosphérique, est doublement agressif avec son acidité et avec l'anion SO_4^{2-} - ce qui peut conduire à la formation de sels tels que le gypse et l'ettringite.

L'acide phosphorique H_3PO_4 , qui précipite le phosphate de calcium très peu soluble, est moyennement agressif, mais provoque une désagrégation lente du béton.

- **Les acides organiques :**

On les rencontre fréquemment dans les effluents rejetés par les industries chimiques (fabriques d'engrais, papeteries, teintureries, tanneries...) et agroalimentaires (vinaigrieres, laiteries, fromageries, distilleries, conserveries, élevages...).

Ils sont généralement moins agressifs que les acides minéraux. Dans certains cas, ils peuvent avoir un effet occlusif sur le béton : c'est le cas par exemple de l'acide tartrique (cuves à vin) ou de l'acide oxalique. Les acides organiques tels que l'acétique, le lactique, le butyrique et le formique, qui sont présents dans certaines eaux usées, attaquent les composants calciques du ciment.

Ces acides faibles peu dissociés sont généralement agressifs et provoquent une dégradation lente. Cependant, sa neutralisation par les ions alcalins (Na^+ , K^+) et les ions alcalins (Ca^{2+}) entraîne une dissociation acide permanente et une augmentation proportionnelle de l'agressivité par la production cumulée d'ions H^+ . Une corrosion importante du béton est observée en milieu agricole dans les silos ou cuves destinés à contenir les fourrages, fumiers et lisiers et sur les sols des étables (érosion, désagrégation des agrégats, perte de masse, cloisons en acier, etc.). [19]

En général, l'attaque chimique du béton se traduit par la décomposition des produits de réhydratation et la formation de nouveaux composés qui, s'ils sont solubles, peuvent lessiver et qui, s'ils sont insolubles, peuvent être nocifs sur le chantier.

Le $\text{Ca}(\text{OH})_2$ est l'hydrate le plus vulnérable, mais peut aussi attaquer le C-S-H. Les agrégats de calcaire sont également à risque.

Le béton est également attaqué par les eaux contenant du dioxyde de carbone libre, comme l'eau minérale, qui peut également contenir du sulfure d'hydrogène.

Une partie de ce dioxyde de carbone est nécessaire pour former et stabiliser le bicarbonate de calcium en solution.

Bien que les eaux usées domestiques elles-mêmes soient alcalines et n'attaquent pas le béton, de graves perturbations des égouts ont été observées dans de nombreux cas.

À des températures relativement élevées, lorsque les composés soufrés sont convertis en H_2S par des bactéries anaérobies. Ce composé n'est pas un agent destructeur en soi, mais est dissous par une fine couche d'humidité recouvrant la surface du béton et subit une oxydation par des bactéries anaérobies, qui produisent éventuellement de l'acide sulfurique.

Ainsi, l'attaque apparaît au-dessus de l'eau à l'intérieur du tube. La pâte de ciment durcissant se dissout progressivement provoquant une détérioration progressive du béton. Un type d'attaque similaire pourrait se produire sur des réservoirs de stockage de pétrole offshore. [21]

II.4.3. Mécanisme d'attaque des acides:

Le béton est de nature très alcaline, il est très sensible aux attaques acides. Le mécanisme de ce processus est très simple. En général, les réactions chimiques et/ou l'élimination physique n'endommagent qu'un ou deux composants de la pâte de ciment. **Le tableau II.1** répertorie les composants du béton sujets à la corrosion.

Tableau II.1: Composants du béton menacés par la corrosion.

Composants du béton	Désignation	Formule chimique
Pâte de ciment	Hydroxyde de calcium (CH)	Ca(OH)_2
	Silicate de calcium hydraté (CSH)	$3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$
	Aluminate de calcium hydrate	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
	Aluminate de calcium ferrique hydraté	$6\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$
Granulats	Calcaire (Carbonate de calcium)	CaCO_3
	Dolomite	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$
	Grès amorphe	$\text{SiO}_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$

II.5. Carbonatation du béton:

II.5.1. Définition:

On suppose toujours que l'air qui compose le milieu environnant est inerte, c'est-à-dire qu'il ne réagit pas avec la pâte de ciment à l'eau. Or, en réalité, l'air contient du dioxyde de carbone CO_2 à un taux moyen de 0,03 en volume qui, en présence d'humidité, réagit avec le ciment hydrater. Ce taux est plus élevé en milieu urbain qu'en milieu rural. La réaction chimique résultant de la perméation du CO_2 transforme les produits d'hydratation, notamment le dioxyde de calcium (portlandite) Ca(OH)_2 et dans une moindre mesure CSH, en carbonate de calcium CaCO_3 .

II.5.2. Vitesse de carbonatation:

Afin d'évaluer le stade de vieillissement d'un béton en vue de sa réparation, il peut être intéressant de savoir dans quelle mesure, à un instant donné, subsistent des limites de protection par rapport au renforcement du site. Étant donné que de nombreux paramètres se chevauchent avec le taux de carbonatation, seule la détermination expérimentale peut donner des informations importantes.

La vitesse de progression du front de carbonisation diminue avec le temps (Fig. 1.5), car le dioxyde de carbone doit diffuser sur la surface déjà carbonisée du béton. Cette vitesse dépend des propriétés du matériau (porosité, nature du ciment, etc.). L'humidité relative du milieu environnant, qui détermine la teneur en eau du béton selon des échelles de température surface,

est également un facteur essentiel.

Pour que la carbonatation soit maximale, l'humidité relative doit être :

- Suffisamment faible pour que le continuum en phase gazeuse permette que la diffusion du dioxyde de carbone soit de l'ordre de l'angström (en phase liquide, la diffusion est 10⁴ fois plus lente),
- Suffisamment grand pour que se produise la bonne réaction de carbonatation, qui ne peut s'effectuer qu'en phase aqueuse.

La carbonatation est donc maximale lorsque l'humidité relative est comprise entre 40 et 70 %. Ce champ correspond en moyenne à quelques couches d'eau adsorbées à la surface du solide. Par conséquent, la carbonisation ne se produit pas dans le béton complètement sec et s'arrête à Un niveau où le béton est complètement saturé d'eau.

La carbonisation suppose une interaction entre le dioxyde de carbone et le réseau poreux. [22]

II.5.3. Conséquence de la carbonatation:

En termes de durabilité, le seul inconvénient de la carbonisation est le faible pH de la solution interstitielle dans la pâte dure du ciment Portland, qui passe d'une valeur de 12,6 à 13,5 à une valeur d'environ 9 (Fig. 1.6). Lorsque tout le $\text{Ca}(\text{OH})_2$ est carbonisé, le pH chute à 8,3. La conséquence de cette diminution du pH peut être décrite comme suit :

La couche d'oxyde passive protège l'acier de toute réaction avec l'oxygène et l'eau, c'est-à-dire contre la formation de rouille ou de corrosion. Cet état de l'acier est appelé passivation.

Le maintien de cette passivation nécessite une solution interstitielle à pH élevé en contact avec la couche passive. Ainsi, si le front de carbonisation atteint la surface du renfort, une corrosion de ce dernier peut se produire. À condition que l'oxygène et l'humidité nécessaires soient présents. Pour cette raison, il est important de connaître la profondeur et le front de carbonisation, d'autant plus que ce dernier n'évolue pas uniformément du fait de l'inhomogénéité du béton.

La carbonisation d'une pâte de ciment durci contenant des chlorures liés au même effet que la libération de chlorures liés et augmente le risque de corrosion.

D'autre part, physiquement, la carbonatation augmente la perméabilité en réduisant la porosité grâce au colmatage de certains pores par les carbonates de CaCO_3 qui occupent un plus grand volume de Ca(OH)_2 qu'ils remplacent. De plus, l'eau libérée par Ca(OH)_2 lors de la carbonisation peut contribuer à l'hydratation du ciment anhydre. Ces changements entraînent une augmentation de la dureté et de la résistivité de la surface [23]. Et une résistance accrue aux formes d'attaque dépendant de la perméabilité.

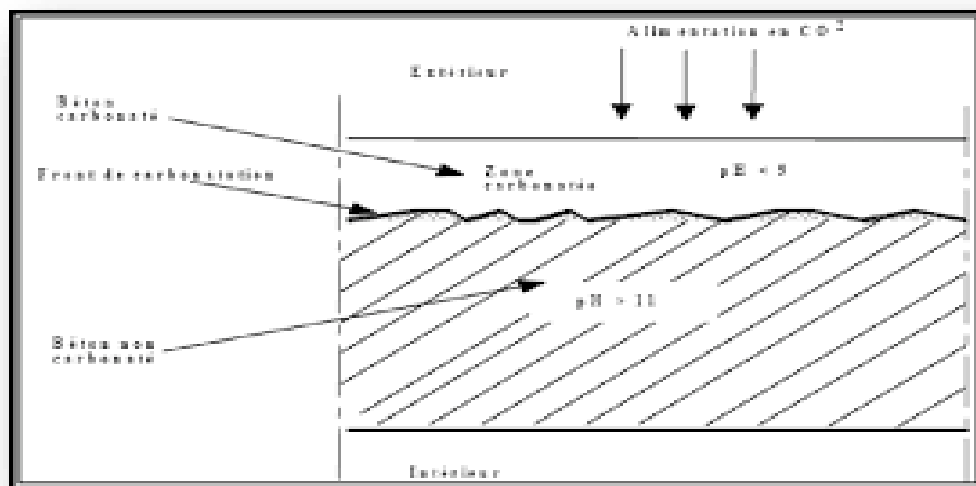


Figure II.6 : Coupe théorique d'un mur en béton.

II.6. Réaction alcali-granulats:

II.6.1. Définition:

On distingue trois types de réactions alcali-granulats (RAG) :

- Les réactions alcali-silice.
- Les réactions alcali-silicate.
- Les réactions alcali-carbonate.

Les réactions de la silice alcaline et les réactions du silicate alcalin sont assez similaires ; Ils se différencient principalement par leurs vitesses : les réactions alcalines silice sont plus rapides. Les trois types de réactions impliquent l'interaction d'une solution interstitielle (phase liquide) de béton avec des granulats (phase solide), générant un gonflement pouvant entraîner des fissures.

Ci-après, par réactions alcalines d'agrégation (RAA), on entend à la fois les réactions alcalines silice et les réactions alcalines silicate.

Les réactions alcali-carbonate sont rarement observées, elles se produisent entre certains calcaires dolomitiques et des alcalis cimentaires. Le volume des produits de cette réaction est plus petit que celui des substances originelles ; Ainsi, les mécanismes de cette réaction diffèrent de ceux observés dans la réaction silice-alcali. [24]

II.6.2. Conditions d'apparition de l'alcali-granat :

Trois conditions doivent être remplies simultanément pour que ces réactions se produisent. Il a défrayé:

- l'agrégation est hautement interactive,
- L'humidité relative est supérieure de 80 à 85%
- La concentration en alcali dépasse un seuil critique. [25]

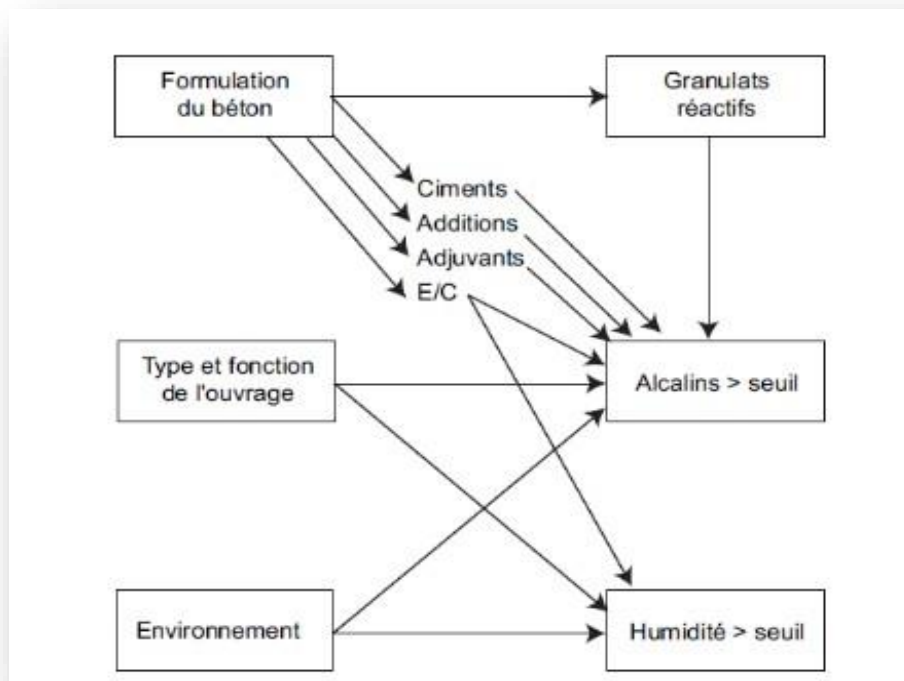


Figure II.7 : Facteurs intervenant sur l'apparition des 3 conditions nécessaires au déclenchement de l'alcali-réaction. [16]

II.6.3. Source de cette attaque:

Ces alcalis proviennent du ciment d'une part, et des autres constituants du béton (granulats, eau de gâchage, adjuvants, etc.) d'autre part. Initialement, ils sont présents à l'état diffus dans les phases anhydres, et ils se dissolvent à l'état basique ($K+OH^-$, $Na+OH^-$) lors de l'hydratation. [26]

II.6.4. Pathologie et manifestations externes:

La détérioration du béton des structures résultant du phénomène de réaction alcaline a été enregistrée dans de nombreux pays.

En général, les troubles apparaissent à des moments variables de deux à dix ans ou plus.

La pathologie et les manifestations externes sont indiquées par un ou plusieurs des symptômes suivants :

- Fissuration.
- Écrasement à larges réseaux, écrasement en étoile ou dirigé dans une direction dépendant de la répartition des armatures ;

- Des sécrétions blanches constituées de calcite et parfois de gels transparents ;
- Pustules ou cratères avec éclats localisés sous forme de petits cônes résultant de l'interaction de gros agrégats de surface visibles au fond des cratères,
- Mouvements et déformations,
- Couleurs ou changements de couleur. [26]



8.a) Fissuration sévère d'un massif de fondation



8.b) Exhaussement des bordures de crête sur le barrage du Chambon.

Figure II.8 : Exemples bétons dégradés par l'alcali-réaction. [26]

II.7. Essai de caractérisation des attaques du béton par les agressions chimiques :

II.7.1. Essai d'immersion ASTM C 342 :

Les éprouvettes en béton sont immergées dans de l'eau dosée à 5 % d'acide sulfurique H_2SO_4 et d'acide chlorhydrique HCl . Le choix d'une concentration de 5 % de H_2SO_4 et HCl est basé sur la bibliographie

L'immersion - séchage à $60^\circ C$ (ASTM C 342) :

Ce protocole a été choisi pour accélérer le vieillissement des bétons causé par l'immersion complète, il est basé sur des cycles de séchage/immersion de 24 heures. Les éprouvettes sont immergées dans de l'eau dosée à 5 % de H_2SO_4 et HCl pendant 4 heures (saturation), puis séchées dans une étuve à $60^\circ C$ pendant 20 heures. Ce protocole s'appuie sur des tests normalisés de vieillissement des pierres [27 ,28,29]

II.7.2. Porosité totale ASTM C642-97:

La porosité caractérise l'importance de vides dans le béton et est définie comme le rapport entre le volume des vides (V_v) sur le volume total (V_t) :

$$\rho = \frac{V_v}{V_t}$$

La porosité d'un spécimen peut être déterminée à l'aide de la norme ASTM C642-97 qui permet de mesurer le volume de pores perméables. Cette porosité varie selon la composition du mélange (rapport eau /liant, teneur en ciment, ajouts cimentaires, etc.) et la qualité de la mise en place et de la cure. [30]

II.7.3. Capacité d'absorption:

La capacité d'absorption comme constituée de trois composantes essentielles : l'aptitude à reconnaître la valeur de la connaissance externe, l'aptitude à l'assimiler, et l'aptitude à l'appliquer à des fins commerciales

C'est la capacité pour une organisation à apprendre et à résoudre les problèmes. [31]

II.7.4. Mesure de la perte de masse :

La résistance due aux agressions chimiques des échantillons immergés dans des différentes solutions est évaluée selon la norme ASTM C 267-96 : les éprouvettes sont nettoyées 3 fois avec de l'eau douce pour éliminer le mortier altéré et puis on les laisse sécher pendant ½ heure. Ensuite on procède à la pesée de ces dernières. Cette opération est effectuée après chaque 24 heures. Le degré de l'attaque est évalué par la perte de masse (PM) donnée par la formule (2.1) :

$$PM (\%) = [(M_1 - M_2 / M_1)] \times 100$$

Avec : M_1 , M_2 les masses des éprouvettes avant et après immersion, respectivement.

II.8. Paramètre déterminant le comportement du béton vis-à-vis des agressions chimiques :

II.8.1. Composition du ciment :

Le teneur des constituants autres que le gypse ajouté ou non au clinker, la norme européenne NF EN 197-1 donne 27 ciments courants, qui sont regroupés en cinq types principaux à savoir :

- . CEM I Ciment Portland Artificiel
- . CEM II Ciment Portland compose
- . CEM III Ciment de haut fourneau
- . CEM IV Ciment pouzzolanique
- . CEM V Ciment aux laitiers et aux cendres.

II.8.2. Paramètres liés à l'environnement :

Les principaux paramètres à considérer sont :

La nature physique de l'agent agressif qui peut être liquide, gazeux ou solide, et le vecteur des composés agressifs pour ces deux derniers composés est toujours de l'eau apportée par le milieu extérieur, sans laquelle aucune dégradation significative n'est possible.

Les milieux liquides sont essentiellement de l'eau plus ou moins pure ou chargée et des solutions d'acides, de bases et de sels d'origine naturelle ou synthétique.

Fluides gazeux d'origine naturelle, industrielle ou domestique. Ceux-ci incluent, par exemple, le dioxyde de carbone, le dioxyde de carbone, le dioxyde de soufre, les oxydes d'azote, le H₂S dans les stations d'épuration ou même le chlore libéré lors d'incendies. Ces gaz sont oxydés en présence d'humidité. Par condensation dans certaines conditions de température et d'humidité,

Des solutions fortes peuvent se former lorsqu'elles descendent sous le point de rosée. Selon le manuel de documentation FD P18-011, l'intensité des gaz est généralement faible dans les environnements avec une humidité relative inférieure à 65 %. D'un autre point de vue, il faut rappeler que la diffusivité des gaz est faible dans le béton imprégné. L'état du gaz carbonique à l'origine de la carbonisation, est faible lorsque l'humidité relative du béton est élevée et maximum lorsque le taux d'humidité est élevé environ 65 %,

Les milieux solides sont des sols ou des barrages qui contiennent des substances nocives.

Là encore c'est la présence d'eau plus ou moins mobile dans le sol qui permet le passage de l'agent agressif dans la solution et son transfert dans le béton ;

- La nature chimique de l'agent agressif, sa concentration et son mode d'action (dissolution/hydrolyse/craquage, dissolution/précipitation des composés néoformés, expansés ou non) ;

Conditions climatiques naturelles ou artificielles, générales et locales :

- Exposition à l'atmosphère, immersion totale ou quasi-immersion, zone intertidale, voire enfouissement ;
- L'humidité relative de l'environnement, les atmosphères « sèches » (humidité relative < 65 % selon le Livret Documentation FD P18-011) sont défavorables au développement des réactions ;
- La température, qui est généralement considérée comme un facteur d'accélération de la réaction

Cycles climatiques. Les cycles de mouillage/séchage accélèrent considérablement la détérioration du béton. Par exemple, la zone de marée en milieu marin, où ces cycles sont très importants, est une zone où les risques de dommages sont les plus grands.

- La mobilité des milieux agressifs (liquides et gaz) qui accélèrent les échanges chimiques et qui peuvent entraîner des chocs mécaniques supplémentaires (érosion et choc), est un facteur aggravant.

II.8.3. Paramètres liés à la structure :

Il faut que les effets des contraintes mécaniques liées au fonctionnement de la structure soient pris en compte : charges, fatigue, dilatation et contraction différentielles, etc.

Ces contraintes peuvent provoquer des fissures qu'il faut bien distinguer de celles provoquées par l'action d'un agent agressif. Ces fissures sont susceptibles d'accélérer et d'exacerber les attaques chimiques potentielles. Cela affaiblirait probablement la structure en soi.

II.8.4. Paramètres économiques :

Les contraintes économiques locales dictent parfois le choix de matériaux (granulats, ciment) dont la durabilité n'est pas optimisée. Si le volume de travail le justifie, il peut être envisagé de mettre en œuvre une démarche de performance basée sur l'équivalence des performances d'une

formulation de béton particulière par rapport à un béton de référence conforme aux exigences de la norme NF EN 206-1 pour le milieu étudié, équivalence doit être démontré.

II.9 Conclusion :

Les besoins des hommes évoluent également avec le temps. Des bâtiments ou des équipements qui ont été construits il y a seulement quelques décennies peuvent ne pas être adaptés aux besoins actuels et peuvent maintenant être démolis. Mais certains des ponts qui ont été construits il y a des siècles sont encore très utilisés. En fonction de l'évolution attendue des besoins, la durée de vie ou la "durabilité" souhaitée est déterminée pour chaque ouvrage (50 ou 100 ans par exemple), dans lequel le bâtiment, stade ou pont en question doit non seulement être stable, mais aussi toujours confortable à utiliser, avec Faites attention à un entretien régulier. Il faut donc maîtriser le niveau de risque et concevoir les matériaux en conséquence, en fonction des sollicitations mécaniques et environnementales.

La durabilité du béton n'est pas une caractéristique de celui-ci, mais plutôt sa réponse aux charges de service et aux conditions environnementales. Ainsi, la durabilité du béton dépend de nombreuses propriétés du matériau, mais aussi de l'agressivité de son environnement.

Chapitre III : Incorporation des déchets pour la préparation du béton

Incorporation des déchets pour la préparation du béton

III.1 Introduction:

Avant d'apprécier le gaspillage, il faut en connaître l'origine, l'analyser, distinguer son état actuel et ses caractéristiques dans le temps. L'approche globale des déchets lui permettra de déterminer son évolution, à savoir le type de valorisation à choisir. Dans cette section, nous utilisons à moitié différents types de gestion des déchets et des techniques de traitement de base dans le monde entier. Évolution de l'industrialisation et du développement urbain jusqu'à récemment, sans égard aux précautions environnementales.

III.2 Revue générale sur le recyclage des déchets :

III.2.1 Définition de déchets:

Les déchets peuvent être traités de différentes manières selon leurs caractéristiques et sont définis comme « tout déchet résultant du développement de la production, de la transformation, de l'utilisation, des matériaux produits, ou d'une manière générale tout bien meuble abandonné susceptible d'avoir des effets néfastes sur les sols, la flore et la faune, détériorer des sites ou des paysages, polluer l'air ou l'eau, générer des bruits ou des odeurs » diversifient ces caractéristiques et les perspectives que l'on peut adopter quand on s'y intéresse. En général, il est nocif pour la santé humaine et l'environnement. [32]

La définition des déchets d'un point de vue économique et juridique est la suivante :

III.2.1.1 D'un point de vue économique : Un déchet est tout ce dont la valeur économique est nulle ou négative pour le porteur. Pour s'en débarrasser, il paie un service ou s'en occupe lui-même. Les déchets sont de plus en plus considérés comme une richesse potentielle à partir de laquelle, grâce à des technologies innovantes, on peut extraire une nouvelle valeur capable de réintégrer le circuit économique.

III.2.1.2 Du point de vue juridique :

La définition du déchet permet de distinguer la notion subjective de la perception objective. Elle lui appartient tant qu'elle reste dans sa place spéciale. Ce bien appartient à la commune lorsqu'il est placé sur la voie publique car, en effet, par cette loi le titulaire manifeste

clairement sa volonté d'y renoncer. Selon le concept objectif, un déchet est tout objet géré

Il doit être contrôlé dans l'intérêt de la protection de la santé publique et de l'environnement, quelles que soient la volonté et la valeur économique du propriétaire. Une autre question vient immédiatement à l'esprit : « Que fait-on des déchets ? ». Car le problème se situe en fait à ce niveau et se pose avec plus d'acuité car la quantité de déchets ne cesse d'augmenter.

Les pays à forte consommation ont été les premiers à rencontrer le problème, car l'accumulation de déchets provoquait des désagréments insupportables : pollutions diverses et problèmes de santé publique. [33]

III.3.1 Origine de la production de déchets :

La génération de déchets est assurée pour les raisons suivantes :

- **Biologique** : Un déchet d'origine biologique se définit par le fait que tout cycle de vie produit des métabolites.
- **Technologique** : quelles que soient la fiabilité et la qualité des outils et des processus de production.
- **Economique** : la pérennité des objets et machines produits dans un flux de vie limité.
- **Environnemental** : Les activités de décontamination (eau, air, déchets) génèrent inévitablement d'autres déchets qui nécessitent également une gestion spécifique.
- **Chimique** : Toute réponse chimique régie par le principe de conservation de la matière sera un sous-produit qui doit être géré s'il n'y a pas d'utilisation apparente pour celui-ci.
- **Accidentelle** : les pannes inévitables des systèmes de production et de consommation sont source de gaspillage.

III.3.2 Différents types de déchets:

➤ Déchets ultimes (DU):

La loi du 13 juillet 1992 introduit la notion de déchet ultime et donne la définition suivante : « Déchet, résultant ou non du traitement des déchets, qui n'est plus susceptible d'être traité dans les conditions technico-économiques de l'époque, notamment par extraction de la partie valorisable ou en réduisant son caractère polluant ou nocif. » Les déchets ultimes des

incinérateurs d'ordures ménagères et déchets assimilés, appelés mâchefers, après traitement, peuvent être réduits en granulats et utilisés pour la pose des fondations routières. [34]

➤ **Déchets ménagers et assimilés:**

Ce terme regroupe l'ensemble des déchets produits dans le cadre de notre vie quotidienne : emballages, restes de repas, électroménagers, vieux meubles, déchets verts, vieux vêtements, etc.

➤ **Déchets inertes (DI):**

Tous les déchets résultant de travaux d'extraction, d'exploitation minière, de démolition, de construction ou de rénovation qui ne sont pas formés ou contaminés par des matières dangereuses ou d'autres éléments nocifs, ne sont pas biodégradables et n'entraînent pas de détérioration d'autres matériaux d'une manière susceptible de causer une pollution ou des dommages à l'environnement Santé humaine.



Figure III.1 : Déchets inertes

Ces déchets sont acceptables dans les installations de stockage et proviennent principalement des chantiers de construction et des travaux publics ou des industries. Il s'agit notamment des déchets suivants :

Béton, tuiles et céramiques, briques, déchets de verre, terre, enrobés bitumineux Déchets mixtes de construction et de démolition ne contenant aucune substance et ne contenant que des déchets minéraux. [35]



Figure III.2: Compositions des déchets du bâtiment.

➤ **Déchets dangereux (DD):**

✚ **Déchets industriels spéciaux (DIS):**

Ces déchets sont répertoriés en raison de leurs caractéristiques dangereuses, par exemple : déchets contenant de l'arsenic, du plomb et des hydrocarbures ; de l'industrie pétrolière, etc.

✚ **Déchets ménagers spéciaux (DMS) :**

Il s'agit des déchets dangereux présents dans les ordures ménagères, tels que les aérosols, les adhésifs, les détergents, les détachants insecticides, les peintures, les piles, les tubes néons et les produits d'entretien. Il peut s'agir de ce qu'on appelle aussi les DTQS : déchets toxiques éparpillés. [36]

✚ **Déchets non dangereux des activités économiques :**

Il s'agit des déchets d'entreprise qui, par leur nature et leur composition, s'apparentent aux déchets du bâtiment et travaux publics et aux déchets des services publics (école, administration...). Il est également considéré par la loi comme un « déchet ménager » et peut donc être collecté et éliminé comme un déchet ménager. [34]

➤ **Les déchets industriels banals (DIB) :**

Il comprend tous les déchets non dangereux produits par les fabricants et les entreprises du commerce, de l'artisanat, des services, de la gestion, de l'exploitation minière, de la peinture, de la chimie et de la pétrochimie. Déchets non dangereux et non inertes, dits industriels ordinaires. Ils :

- Bois non traité ou bois traité avec des produits non dangereux.
- Plastiques en PVC, Polystyrène et Polypropylène.
- Métaux ferreux et non ferreux.
- Revêtements de murs et de sols en textile.
- Polystyrène expansé et polyuréthane.
- Produits mélangés provenant de sites de réhabilitation. [36]

➤ **Les déchets médicaux et pharmaceutiques :**

Tous déchets résultant des activités de diagnostic, de contrôle et de traitement préventif dans les domaines de la médecine humaine ou vétérinaire et tous déchets résultant des activités des hôpitaux publics et des laboratoires d'analyses opérant dans ces domaines et toutes installations similaires.

III.4 Recyclage des déchets :

III.4.1 Définition :

Le recyclage est un mode de traitement des déchets industriels et des ordures ménagères qui permet de réintroduire les matières qui les composent dans le cycle de production des produits. Le recyclage a deux résultats environnementaux principaux : Réduction volume de déchets et préservation des ressources naturelles. Certaines opérations sont simples et bon marché, mais d'autres, au contraire, sont complexes, coûteuses et peu rentables. Le recyclage est une activité importante pour l'économie et les conditions de vie des pays étendus

Le recyclage apporte une contribution importante à la réduction des quantités de déchets qui seront éliminés par mise en décharge et incinération, mais il n'est pas suffisant pour faire face à l'augmentation production de déchets ou à peine suffisante.

Pour lutter contre l'augmentation des déchets, le recyclage est indispensable, mais il doit s'inscrire dans une démarche plus large.

III.4.2 Intérêt du recyclage dans le génie civil :

Or, en Algérie et dans de nombreux pays, la plupart des granulats utilisés sur le marché sont des granulats naturels issus de carrières ou issus de l'extraction des lits de rivières ou des fonds marins.

Ces produits offrent l'avantage d'une qualité relativement constante et d'un approvisionnement continu.

Le recyclage des déchets fournit une ressource pour sélectionner des matières premières pour d'autres sources.

Le recyclage des déchets pour une utilisation en tant que granulat routier ou de construction permet :

- Economie des ressources naturelles.
- Diminution du transport de matériel.
- Mise en œuvre rapide pour réduire les désagréments à la population.
- Réduire les quantités de matières envoyées à l'enfouissement. [37]

III.5 Technique de recyclage :

III.5.1 Procédés du recyclage :

Il existe trois grandes familles de technologies de recyclage : chimique, mécanique et organique.

Le recyclage chimique utilise une réaction chimique pour traiter les déchets, par exemple pour séparer certains composants. Le mécanisme de recyclage est le traitement des chutes de

machines. Recyclage « organique », après compostage ou fermentation, pour produire des engrais et des carburants comme le biogaz. [38]

III.5.2 Etapes du recyclage:

La chaîne de recyclage comporte différentes étapes [38]

- **Étape 1: Collecte de déchets:**

Les méthodes de recyclage des déchets commencent par la collecte des déchets. Dans les pays développés, les déchets ménagers sont généralement incinérés dans des décharges non dangereuses.

Les déchets collectés pour être recyclés ne sont pas destinés à l'enfouissement ou à l'incinération mais à la transformation.

La collecte sélective, aussi appelée "séparation" et souvent improprement appelée "tri sélectif", est la forme la plus répandue de déchets recyclés.

Le principe de la collecte sélective est le suivant : celui qui jette les déchets les trie lui-même.

Les déchets recyclables sont déposés dans des endroits où il n'y a pas de taxe.

Une collecte en continu, des déchets, triés ou non, un tri manuel, par des opérateurs devant un tapis roulant, complète souvent ces processus automatiques.

- **Étape 2: Transformation:**

Une fois triés, les déchets sont pris en charge par des usines de traitement. Ils entrent dans la série en tant que déchets et sortent en tant que matériaux prêts à l'emploi.

- **Étape 3: Commercialisation et conservation:**

Une fois transformées, les matières premières issues du recyclage sont utilisées pour fabriquer de nouveaux produits qui à leur tour seront proposés aux consommateurs.

III.5.3 Gestion des déchets:

III.5.3.1 Définition:

La gestion des déchets est la collecte, le transport, le traitement, la réutilisation ou l'élimination des déchets afin de réduire leurs effets sur la santé humaine ou l'environnement.

La gestion des déchets concerne tous les types de déchets, qu'ils soient solides, liquides ou gazeux, et chacun a sa propre filière. Les méthodes de gestion des déchets diffèrent selon que vous vous trouvez dans un pays développé ou en développement.

La gestion des déchets non toxiques des particuliers ou des collectivités des agglomérations relève généralement de la responsabilité des collectivités locales, tandis que la gestion des déchets commerciaux et industriels relève de leur propre responsabilité. [39]

III.5.3.2 Principes de gestion des déchets :

Il existe plusieurs principes de gestion des déchets dont l'usage varie selon les pays ou les régions.

- La hiérarchie des stratégies (règle des trois R) :
 - ✓ Réduire.
 - ✓ Réutiliser.
 - ✓ Recycler.

La hiérarchie des stratégies a changé plusieurs fois au cours des dernières années, mais le concept de base est resté la pierre angulaire de la plupart des stratégies de gestion des déchets : maximiser les matériaux et générer un minimum de déchets.

Parfois certaines solutions « repensées » ne sont pas très intuitives. On peut prendre par exemple l'as de l'industrie textile : pour réduire la quantité de papier utilisée dans les patrons, il aurait été judicieux de les découper en feuilles plus grandes. Il y a donc une diminution du résiduel total. Ce type de solution n'est bien sûr pas limité à l'industrie textile.

La réduction à la source nécessite des efforts pour réduire les déchets toxiques et autres en modifiant la production industrielle. Les méthodes de réduction à la source incluent des changements dans les procédés de fabrication, et parfois le principe de « prévention de la pollution » fait en fait référence à la mise en œuvre d'une politique de réduction à la source. L'efficacité des politiques de réduction à la source est mesurée par la mesure dans laquelle la production de déchets est réduite.

III.5.3.3 Méthodes de gestion des déchets :

La gestion des déchets consiste à déterminer le type de traitement à accorder à telle ou telle catégorie de déchets. Il est reconnu que pour assurer une bonne gestion des déchets, il est nécessaire de prévoir des moyens financiers et matériels, et c'est ainsi que nous allons successivement examiner les différents modes de gestion des déchets.

Ces procédés sont actuellement au nombre de cinq.

- L'enfouissement:

L'enfouissement est une méthode d'élimination des déchets organiques qui consiste à creuser un trou de 0,5 à 1 mètre de profondeur pour y verser des déchets. Ce procédé utilise du chlore, de la chaux, du mazout et de l'essence comme désinfectants ou déodorants. Cette méthode reste très appropriée dans les établissements de santé.



Figure III.3 : Enfouissement des déchets.

- L'incinération:

Il s'agit d'une méthode urbaine pour l'élimination finale des déchets consistant en la combustion de déchets produits par les hôpitaux par le feu, et peut être considérée comme un

procédé d'excellence dans le traitement des déchets, qui est satisfaisant mais présente certains défauts, notamment :

- ✓ Évacuation des cendres après l'exécution
- ✓ Cause le risque de contamination de l'environnement par sa fumée.
- ✓ Nécessite un investissement et des coûts d'exploitation élevés.



Figure III.4 : *Incinération en plein air et usine d'incinération.*

- **La décharge contrôlée:**

Le site d'enfouissement contrôlé est un dépotoir public planifié pour évacuer les déchets ménagers. Il a l'avantage de fournir des articles pour l'alimentation des jardins ou des plantations d'arbres. Ce processus n'est pas recommandé pour traiter les déchets hospitaliers.



Figure III.5 : Photo d'une décharge contrôlée

- Le compostage:

L'engrais est une méthode d'analyse des substances organiques utilisées pour la récupération sous une autre forme qui permet une utilisation ultérieure comme engrais. La préparation suivante nécessite : la réception des ordures, le tri des déchets, la préparation du compost, la décomposition, l'offre du produit fini.



Figure III.6 : Compostage de déchets organiques.

- Le recyclage:

Puisque tout ce qui est brûlé est irrémédiablement perdu comme matière première, c'est ainsi que le recyclage, qui a l'avantage de réduire la consommation de matières premières pour fabriquer de nouveaux biens, peut minimiser l'impact de l'environnement des déchets. L'objectif principal de ce processus est d'éviter la contamination des déchets recyclables par des déchets non recyclables. En fait, cela peut les rendre impropres au recyclage. D'autre part, cela permet de diriger différents déchets vers la bonne destination. [40]



Figure III.7: Usine de recyclage des déchets.

III.6 Différents déchets utilisés dans l'élaboration des bétons et des mortiers :

✚ Les Laitiers sidérurgiques :

La malice de four élevé est un sous-produit du traitement du minerai de fer. Il est ensuite refroidi lentement dans l'air et donne un cristal et un matériau comprimé. Le laitier refroidi à l'air est utilisé comme agrégat de béton. La résistance à la compression du béton en piles de four élevées et en béton de gravier et de calcaire en poudre indique que les scories de béton sont plus fortes [41].

Les granules de laitier peuvent remplacer les granules de sable. Le laitier expansé est utilisé pour fabriquer du béton léger dont la densité apparente varie de 800 à 950 kg/m³.



Figure III.8 : Photo d'un laitier de haut fourneau.

Laitier d'acier :

Cette malice est produite en éliminant les impuretés trouvées dans le fer brut. Ce produit est riche en phosphate ou en calcium et contient du silicate de calcium. Ce laitier est stocké en tas pendant un an avant d'être utilisé.

L'utilisation de ces mâles n'est pas répandue en raison de problèmes de stabilité dimensionnelle. Des processus de vieillissement ont été développés pour contrôler l'instabilité et les initiatives de rétablissement, en particulier dans le génie civil. Encore une fois, les risques environnementaux associés à l'utilisation de la malveillance dans certains secteurs demeurent inconnus.



Figure III.9 : Photo d'un laitier d'acier.

A. Fumée de silice :

Aujourd'hui, la fumée de silice est probablement le matériau préféré des ingénieurs qui conçoivent le béton pour résister aux réglementations d'exposition agressives. Utilisé comme additif et stabilisateur. La micro silice est un sous-produit de la préparation de silicone et de silicone de fer.

Pendant ce processus, les sables siliceux sont vaporisés avec un arc électrique, puis condensés sous forme de fumée de silice avec une taille de molécule comprise entre 0,05 et 0,5 micromètres, et ont une surface spécifique très grande.



Figure III.10 : Fumé de silice forme de poudre.

Cendres volantes :

Les cendres volatiles peuvent rendre l'agrégat léger très bon. Il provient de la combustion de charbon en poudre qui est poussé dans la chambre de combustion du four par les gaz d'échappement. Ils sont préférés par rapport à beaucoup d'autres granulés légers parce qu'ils véhiculent une combustion plus efficace, car le carbone dans les cendres produit la quantité de chaleur nécessaire pour éliminer l'humidité des granules et apporter les granulés à la température de frittage.

Les cendres volatiles sont classées en fonction de la teneur en CaO et du type de charbon brûlé.



Figure III.11 : Cendres volantes forme de poudre

Déchets de verre :

Le verre est un matériau solide amorphe et homogène résultant du refroidissement progressif de certains matériaux après fusion, et le verre est l'un des matériaux les plus utiles.

Le problème environnemental posé par les déchets non biodégradables tels que les bouteilles non réutilisables est devenu une préoccupation majeure compte tenu des énormes quantités produites dans les grandes villes. Une des rares façons de recycler ces déchets est de les stocker dans des processus de construction. Ainsi, le verre est un matériau riche en silice et en sodium.

Son utilisation dans une matrice de ciment conduit à deux réactions avec des effets indésirables : la réaction alcaline de silice, qui est nuisible au béton en raison des ballonnements qu'elle génère, et la réaction bozzolani, qui est utile.

Des millions de tonnes de verre sont récupérées chaque année, et une façon de recycler le verre est de l'utiliser dans les matériaux de construction. L'agrégat est utilisé pour remplacer le gravier dans le béton et lui donner moins de résistance. Les poudres sont utilisées dans le lisier comme alternative au sable mais aussi dans l'industrie du ciment comme fines.



Figure III.12 : Déchets de verres.

Pneus usagés :

Les matériaux de ciment ont une capacité de déformation très limitée ainsi qu'une faible résistance à la traction, ce qui les rend sujets à la fissuration, en particulier la fissuration due au retrait.

Ainsi, l'intégration de granulats de caoutchouc résultant de la fissuration de pneumatiques usagés dans le béton confère au composé une plus grande capacité de déformation avant que la fissuration de précision ne soit localisée. En conséquence, l'agrégat de caoutchouc ciment composé est intégré à une résistance élevée aux fissures en raison du retrait.

Ensuite, les pneus usagés sont une source de matières premières secondaires. La récupération de ces déchets industriels en est encore à ses balbutiements. Le premier projet pilote a été lancé par le département ministériel concernant l'utilisation de pneus usagés comme support pour une pente de pont dans un projet routier.

Les travaux en cours de développement ont permis d'utiliser les 3500 cadres proposés par le Michelin algérien. [40]



Figure III.13: Déchets de pneus usagés.

III.7 Déchets de briques:

L'objectif de cette section est de fournir des renseignements sur les déchets de brique appelés « briquillons », « chamotte » ou « briques concassées ». Parce qu'ils sont parfois utilisés, il y a peu de données sur ces matériaux et ils sont utilisés comme des groupes de déchets de brique et de béton céramique, malgré la consommation globale de leurs "briques" en grandes quantités, et donc, ils sont produits en grandes quantités.

En Algérie, selon les informations disponibles, l'étude sur ces substances est pratiquement inexistante.

Nous appelons "briquillons" : briques fragmentées généralement causées par la démolition ou la mauvaise cuisson des briques. Nous appelons "Chamotte": briques grillées ou de la poudre. [41]

III.7.1 Définition de brique:

Les briques sont des produits céramiques dont les matières premières sont l'argile avec ou sans additifs. Ils sont couramment utilisés dans la construction de bâtiments et de travaux publics. Comparé à d'autres matériaux, il est l'un des plus anciens matériaux de construction.

Les briques sont souvent trouvées dans les fournisseurs de brochures, les fabricants de cuisinières, de barbecue et de fours. Selon son utilisation, il se composera de vermiculite, de ciment fondu et de plâtre thermique dans différentes proportions.

En plus de la résistance à la chaleur, les briques ont également la capacité de rayonner la chaleur. Il est appelé convection et est une grande partie du succès de la brique. [42]

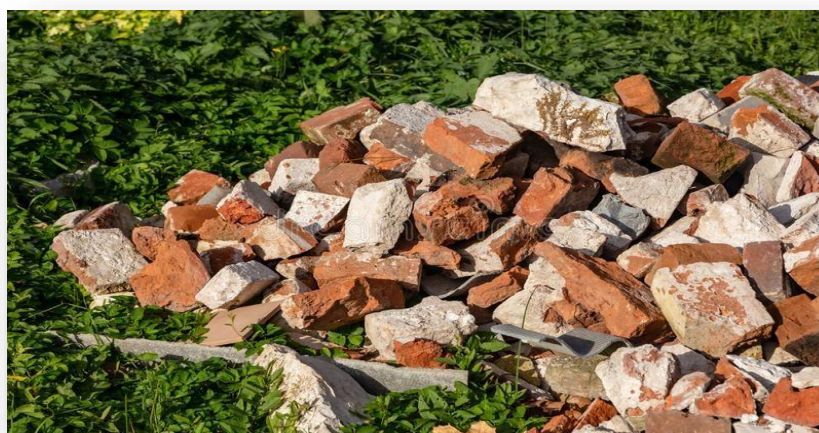


Figure III.14: déchets de brique

III.7.2 Principaux constituants de la brique et ces caractéristiques chimiques :

Ces déchets proviennent de briques liquéfiées. Il a été écrasé à la main au niveau du laboratoire de génie civil de l'Université de M'sila, puis écrasé dans la partie granulaire. [43]

Tableau.III.1: Composition chimique des déchets de brique broyés.

Composant	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	CaO	MgO	SO ₃
Teneur (%)	53.78	16.61	2.22	2.13	0.87	12.88	2.20	0.65

III.7.3 Mode de fabrication de brique :

Les matériaux en terre cuite sont utilisés depuis des siècles et se sont adaptés au développement et aux exigences de la construction, dans le domaine industriel traditionnel. Il est fait d'argile qui devient souvent rouge à la cuisson (sauf la chaux dont la couleur de cuisson varie du rose au jaune et blanc. [44]

a) L'extraction:

L'extraction peut se faire par des dispositifs mécaniques : (grattoir, pelle chargeuse, etc.).

Les matières premières sont extraites et transportées à l'usine par camion, rail et bandes transporteuses.

b) Façonnage:

Les produits (solides, perforés, creux) sont formés par deux processus : la traction et la pression.

c) Séchage:

Les produits sont formés avec une teneur en eau de 15 à 30%. L'énergie consommée varie de 3,5 déchets de briques et de céramiques 106 à 4,10 106 joules/kg d'eau rejetée, le séchage d'une tonne de produit nécessite une consommation électrique de 6 à 13 kWh.

d) Cuisson:

C'est le dernier processus par lequel le bloc d'argile formé et séché doit subir pour ensuite devenir une brique d'argile. Le lot doit être soumis à une augmentation régulière du chauffage jusqu'à la température de combustion (entre 850 ° C et 1200 ° C selon le type de boue utilisée),

puis il doit également être progressivement refroidi. Il existe une gamme très diversifiée de fours, qui peuvent être classés en deux catégories principales :

Fours assemblés et fours en fonctionnement continu. Dans le premier cas, le mode de fonctionnement comprend le chargement, le lancement, la fermeture et le refroidissement du four lorsque la cuisson est terminée. Dans un four de type continu, le feu ne s'éteint jamais, et c'est la grosseesse qui est insérée et extraite du four après un cycle régulier et ininterrompu. La chaleur modifie la densité, la porosité, la ténacité et les dimensions.

Elle provoque également des sécheresses, des dégradations et des formulations qui modifient les propriétés comme suit :

- Jusqu'à 200° C environ, évacuation de l'eau résiduelle courant le séchage.
- De 200 à 450° C, décomposition de matière organique.
- De 450 à 650° C, décomposition des minéraux argileux avec départ de l'eau de constitution.
- De 650 à 750° C, décomposition du carbonate de chaux [44,45,46,47]

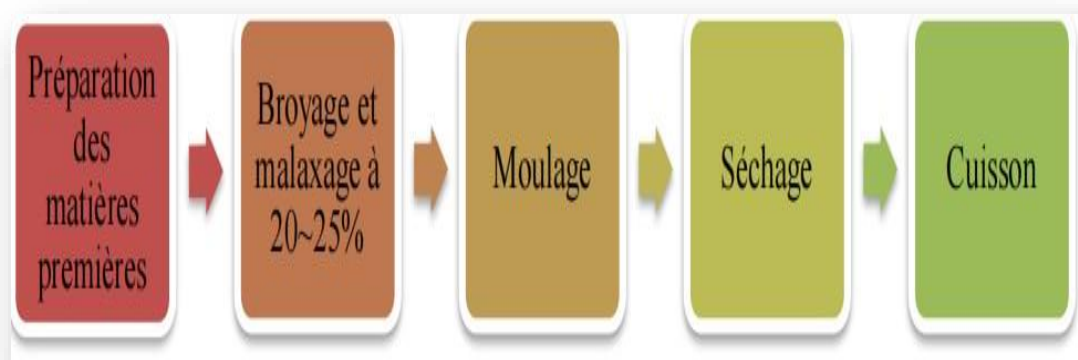


Figure III.15 : Schéma de fabrication des briques.

III.7.4 Propriétés des bétons des déchets de brique :

Les briques brisées sont largement utilisées pour la fabrication du béton et les performances de ce béton étaient tout à fait satisfaisantes.

Bien que largement utilisé, il n'y a pas eu d'études systématiques des différentes caractéristiques du béton assemblé en brique. [45]

Parmi les différentes propriétés de l'agrégat ainsi que du béton à partir de déchets de brique résultant des essais et de la recherche sont :

- L'absorption des briques en poudre est estimée entre 5 et 15% par rapport au poids de la substance à l'état sec.

Il a donc fallu saturer les totaux de briques cassées avant tout mélange pour éviter le durcissement du béton.

- En pratique et en raison des effets économiques, cette exigence peut être atteinte simplement en pulvérisant le stock global avec de l'eau au lieu de l'immersion totale du granulat pendant 30 minutes.
- Le processus normal de reproduction des mélanges de béton peut être utilisé avec succès dans la production de déchets de béton en brique.
- L'utilisation de caoutchouc grossier en brique peut produire une résistance élevée du béton démonté tout en économisant jusqu'à 15 % en poids pour réduire la résistance d'environ 20 % par rapport au béton normal. [49]
- La densité apparente du béton en brique usagé varie de 2000 à 2080kg/m³ et est d'environ 17 % inférieure à la normale.
- La force de pression nominale du béton combiné de la brique brisée varie de 13,8 à 34,5 MPa.
- Pour le même niveau de béton, la résistance à la traction est de 11 % supérieure à celle du béton normal. [48]

III.7.5 Avantages et inconvénients d'utilisation des briques :

i. Avantage:

- Les avantages du point de vue environnement sont :
 - ❖ La terre absorbe et restitue l'humidité.
 - ❖ La terre régule la température par inertie thermique.
 - ❖ La terre est un très bon isolant phonique.
- Les Avantages écologiques sont:

- ❖ La terre utilise peu d'eau en phase de transformation
- ❖ La terre est une ressource locale abondante et renouvelable.
- ❖ La construction en terre crue n'utilise que 3% de l'énergie
- ❖ Employée dans une construction en béton.

ii. Inconvénients:

Le travail requis pour toute construction au sol est souvent grand, même la petite structure représente 15 tonnes de terrain pour le travail.

Vous devez également réaliser que le financement de ce type de maison n'est pas traditionnel, il sera difficile pour vous d'obtenir une hypothèque pour ce type de logement. [50]

III.8 Fumée de silice:

La fumée de silice est un sous-produit de la fabrication du silicium, différents alliages de Ferro silicium ou de zircone. Le silicium et les alliages de silicium sont produits dans des fours électriques à arc où le quartz est réduit en présence de charbon (et de fer pour produire du Ferro silicium). [51]

Lors de la réduction de la silice dans l'arc électrique, un composé envahissant, SiO_2 est formé et s'échappe vers le haut du four, refroidissement, condensation et oxydation sous forme de 6 microparticules de silice SiO_2 . [51]

Tableau III.2 : Composition chimique type de certaines fumées de silice. [51]

Composés	Silicium (grise)	Ferro silicium (grise)	Blanche
SiO₂	93.7	87.3	90.0
Al₂O₃	0.6	1.0	1.0
CaO	0.2	0.4	0.1
Fe₂O₃	0.3	4.4	2.9
MgO	0.2	0.3	0.2
Na₂O	0.2	0.2	0.9
K₂O	0.5	0.6	1.3
Perte au feu	2.9	0.6	1.2

*Figure. III.16 : Fumée de silice*

Ces particules sont récupérées dans le système de dépoussiérage. D'un point de vue chimique, la fumée de silice est principalement composée de silice.

La teneur en SiO_2 de la fumée de silice varie selon le type d'alliage produit. Plus la teneur en silicium de l'alliage est élevée, plus la teneur en SiO_2 de la fumée de silice est élevée.

Les vapeurs de silice produites lors de la fabrication de silicone-métal contiennent généralement plus de 90 % de SiO_2 . La fumée de silice produite lors de la fabrication de 75% Fe - Si alliage contient de la silice typique supérieure à 85%. Structurellement, la fumée de silice se compose principalement de silice de verre. [52]

III.8.1 Effets de fumé de silice :

La fumée de silice est l'additif pouzzolane le plus réactif. Contrairement aux cendres volatiles. Le silicate de calcium défectueux C-S-H se dépose avec l'hydroxyde de calcium CH qui se forme pendant l'hydratation du ciment.

Dans le béton frais, les fumées de silice donnent les résultats suivants :

- Faible tendance à saigner et à se déposer.
- Meilleure cohésion interne, variable légèrement fluide.
- Bonne capacité de rétention d'eau.
- Faible perte d'air pour les câbles d'air en béton.
- Meilleure adhérence au pilier.
- Réduire le rebond et améliorer la résistance du béton mélangé.
- Accroître les besoins en eau
- Plus, grande cohérence.
- Le béton frais devient plus
- L'introduction de pores d'air artificiels est plus difficile.

III.9 L'eau de gâchage:

L'eau joue un rôle important, elle est utilisée pour hydrater le ciment, elle facilite également la mise en œuvre du béton ou du lisier, contribuant ainsi à son opérabilité. L'eau doit être propre et exempte d'impuretés nocives (substances organiques, alcalis).

Les propriétés de l'eau pour la préparation du mortier et du béton sont définies dans la norme NA-442. Les mortiers doivent contenir une quantité maximale d'eau compatible avec une praticabilité optimale. [52]

III.10 Les adjuvants:

Les additifs sont des produits chimiques utilisés dans le cas du béton et du mortier. Ils modifient les propriétés du béton et du mortier ajouté en petites proportions (environ 5% du poids du ciment). Les mortiers peuvent comprendre divers types d'auxiliaires, de super plastifiants (réducteurs à haute teneur en eau), de pare-air, de taux d'installation (inhibiteurs, accélérateurs) et de répulsifs imperméables. [53]

III.10.1 Classification des adjuvants:

Les additifs ont été utilisés pendant très longtemps, mais leur développement réel et leur utilisation généralisée n'ont commencé que dans les années 1960, où leur qualité et leur consistance se sont continuellement améliorées. D'autres substances peuvent être organiques ou inorganiques selon leur composition chimique, mais leur nature chimique, distincte des autres métaux utilisés dans la fabrication des boues, est essentielle. Et donc, dans l'étiquette,

Il est appelé additifs chimiques américains, mais ici cette description est inutile, parce que les produits métalliques incorporés dans le mortier, dont la teneur est souvent supérieure à 5% de la masse de ciment, sont appelés matériaux de liaison ou additifs. Les additives peuvent être classées par fonction et distinction:

- Produits d'étanchéité.
- Réducteurs d'eau.
- Ajuster les inhibiteurs, ajuster les accélérateurs.
- Super plastifiant.
- Différents matériaux auxiliaires (ceux qui améliorent la viscosité, l'adhérence, etc.). [54]

III.10.2 Le Super Plastifiant:

Les superplastiques sont des produits chimiques ajoutés au mortier qui peuvent réduire leur teneur en eau jusqu'à 30 % (ce qui est un super réducteur d'eau), trois ou quatre fois plus qu'un réducteur d'eau normal. [55]

III.10.3 Les avantages principaux de l'utilisation des super plastifiants :

❖ Le super plastifiant:

- Produire du lisier à haute efficacité sans réduire la teneur en ciment et la durabilité.
- Production de lisier contenant moins de ciment, mais ayant une résistance et une opérabilité normales. Grâce à cette découverte, il est maintenant possible de fabriquer une boue liquide contenant seulement la quantité d'eau nécessaire pour hydrater les granulés de ciment. Ceci évite l'eau, qui n'est jamais impliquée dans l'hydratation du ciment et qui affaiblit la structure du lisier durci et augmente sa porosité. [54]

III.10.4 Facteurs affectant l'action des super plastifiants :

La capacité des super plastifiants d'augmenter l'affaissement du mortier dépend de plusieurs facteurs :

- Le type de super plastifiant :

Pour un affaissement initial de 260 mm d'un affaissement initial de 50 mm, il est nécessaire d'ajouter 0,6 de SMF ou de MLS, mais seulement 0,4 % de SNG.

- Le dosage en super plastifiant :

L'augmentation de la stagnation est proportionnelle à la dose de super plastifiant, mais l'efficacité diminue après une dose donnée. De plus, la concentration d'un plastifiant de qualité supérieure influe sur le taux et la vitesse des ingrédients hydratants.

- Le rapport E/C:

Les mesures de viscosité et de stagnation montrent que pour les rapports E/C entre 0,4 et 0,65, l'ajout d'une certaine quantité de super plastifiant augmente la stagnation et réduit la viscosité en augmentant le rapport E/C.

- Le moment de l'addition :

Si le super plastifiant est initialement ajouté avec de l'eau de mélange, la récession augmente considérablement, mais si elle est ajoutée entre 5 et 50 minutes après le début du mélange, la récession est généralement comparée au premier cas moins.

- La température :

Pour des températures allant de 5 à 300 degrés Celsius, il n'y a généralement aucune différence d'affaissement due à l'ajout de matériau ultra-plastifié. Après 300 °C, l'efficacité du super plastifiant est réduite. [54]

III.10.5 Domaines d'utilisation de super plastifiants :

Les super plastifiants sont utilisés dans les cas suivants :

- Bétons à compacité, et donc durabilité.
- Bétons à haute performance.
- Bétons autoplaçants. [55]

I. Aïdée générales sur les principaux déchets recycles :

1) Déchets industriel:

Plan national spécial de gestion des déchets (PNAGS), qui

Les déchets sont décrits par type et niveau de danger. Ce document est important car il permet de surveiller le développement de la production de déchets privés. En fait, les estimations fournies par le MATET sont alarmantes : Les stocks de déchets de 2,8 Mt sont estimés. La production de déchets spéciaux est estimée à 325 000 tonnes par an. Ce stockage massif et la production non contrôlée de ces substances dangereuses ne sont clairement pas minimales en termes de santé publique et d'impact environnemental. Compte tenu de la législation en vigueur et conformément au principe du pollueur-payeur établi par le Fonds national pour l'environnement et la lutte contre la pollution, chaque industrie est responsable de ses propres déchets produits et est tenue de s'y attaquer. Toutefois, le cadre législatif n'est pas suffisamment contraignant parce que les industriels préfèrent encore payer une taxe d'inventaire au lieu de traiter leurs déchets. D'ici la fin de l'année, le MATET envisage de nouvelles mesures

coercitives contre les industriels : une augmentation du montant de l'impôt sur l'élimination des germes et un crédit d'impôt incitatif aux entreprises.

Les déchets spéciaux sont concentrés principalement dans les régions orientales (zone I produisant des déchets spéciaux), les États du centre et de l'ouest d'Alger, Bejaia, Skikda, Annaba, Tlemcen et Oran.

87% des déchets produits proviennent de ces zones, soit 282000 tonnes par an et 95% des déchets sont en stock. À ce jour, les principaux enjeux liés aux déchets sont les suivants :

A. Amiante :

On estime que plus de 82 000 tonnes de déchets d'amiante sont entreposés. Pendant une trentaine d'années d'exploitation de 4 usines de production d'amiante-ciment en Algérie (Key, Bouachrij Tower, Zahana, Constantine), des fibres d'amiante ou leurs restes ont été déposés sur l'équipement, la structure du bâtiment et sur le sol. Un exercice pilote de "traitement et décontamination des déchets d'amiante du site de l'unité d'amiante-ciment de Gué de Constantine (Algérie)", fermé depuis 1997, a fait l'objet d'une invitation à des présentations nationales et internationales début juillet 2007.

B. PCB:

L'Inventaire national des appareils électriques et des déchets contenant des BPC a recensé 6770 appareils électriques.

Une étude de faisabilité a été réalisée sur l'élimination des déchets contenant des BPC. Une étude technique économique a mis en évidence les options de gestion des BPC telles que la construction d'installations de brûlage, de rénovation ou de stockage. En Belgique.

C. Huiles Usagées :

L'inventaire national a recensé plus de 4000 tonnes d'huiles à éliminer. Les huiles usées d'outre-mer (800 tonnes de pétrole) ont également été traitées et la production annuelle d'huiles usées est estimée à 59000 tonnes.

D. Pesticides Périmés :

Une étude de faisabilité sur l'élimination des pesticides a permis de recenser 1 100 tonnes de solides et 615 000 litres.

E. Déchets Mercuriels :

Le site industriel de la jeune fille stocke 1 million de tonnes de scories au mercure. Encore aujourd'hui, les entreprises privées sont consultées avec soin pour gérer l'élimination de ce type de déchets.

F. Déchets Cyanures :

22 tonnes sont produites annuellement et environ 270 tonnes sont stockées au niveau de l'entreprise.

G. Déchets / Boues Hydrocarburées :

Les sociétés pétrolières sont maintenant tenues de traiter les déchets solides ou les boues formées autour des puits de pétrole.



Figure III.17: Déchets d'industriel

III.11 Déchets de la construction/démolition :

Le béton représente environ 75 % de tous les matériaux de construction. Ainsi, la majorité des déchets de démolition se compose de béton, avec des réclamations fournissant des millions de tonnes de débris de béton chaque année.

Actuellement, les producteurs de granulats recyclés ont une politique de sélection des matériaux de démolition. Il existe donc cinq catégories de matériaux de démolition selon leur nature :

- a) Les bétons armés sans enduit ni plâtre.
- b) Les matériaux composés de tuiles, de briques, de pierres de graves, etc.
- c) Les matériaux mélangés avec une faible teneur en plâtre, plastique, bois etc.
- d) Les mauvais matériaux avec une teneur en plâtre, bois, plastique.
- e) Les autres matériaux n'entrant pas dans les classes précédentes.



Figure III.18 : Déchets de la construction/ démolition.

III.11.1 Effet de déchets sur la caractéristique de béton :

A L'état frais :

Certaines études ont montré que pour une teneur en eau identique, c'est particulièrement lorsque le taux de remplacement global dépasse 50 %

Cette différence est certainement due à la plus grande porosité des granulats recyclés par rapport aux granulats naturels. De nombreuses recherches ont également été menées en modifiant les conditions de préparation de l'agrégat. L'eau peut être ajoutée de différentes façons, soit en pré-saturant l'agrégat avant le mélange, soit en compensant en ajoutant de l'eau absorbante directement à l'eau de mélange.

La masse volumique du béton frais naturel est connue pour être aux alentours de 2400 kg.m^3 .

Dans le cas du béton fabriqué à partir de granulats recyclés, la valeur est beaucoup plus faible à environ 2150 kg/m^3 et ceci bien sûr quel que soit le type de ciment

À l'état durci :

Il n'est pas tout à fait correct de considérer le matériau béton comme un composite à deux étages : granulat et matrice cimentaire.

En effet, la pâte de ciment n'est pas complètement homogène et sa microstructure est modifiée à proximité du granulat. Cette région est généralement appelée ITZ (région de transition interstitielle). Ainsi, dans le béton frais, la porosité et le rapport eau/eau de la matrice augmentent vers la surface du granulat.

This disturbance, which is most significant over a few tens of microns around the aggregate surface, causes a certain number of disturbances:

- L'espace vacant restant relativement important près de la surface des agrégats ainsi que le mouvement des ions générés par les composés anhydres conduisent, lors de l'hydratation, à une cristallisation préférentielle des hydrates correspondant aux ions (Ca, Na, S) les plus mobiles.

- Un rapport E/C localement élevé conduit à des sites de nucléation moins nombreux, mieux formés et préférentiellement orientés.
- Enfin, les pores à combler étant plus gros, la porosité, à tout âge, sera supérieure à celle du reste de la matrice. Les ions provenant des granulats peuvent se combiner avec les ions mobiles provenant des granulés de ciment.

Le phénomène de zone de transition et son effet sur l'agilité mécanique du béton, selon diamant.

Dans le cas des bétons fabriqués à partir de granulats recyclés, il a été montré dans différentes études que la présence de béton ancien autour des granulats améliore significativement les performances mécaniques de la zone de transition.

En effet, nous vérifions une bonne réaction entre l'ancien et le nouveau béton ainsi qu'une bonne résistance à l'abrasion.

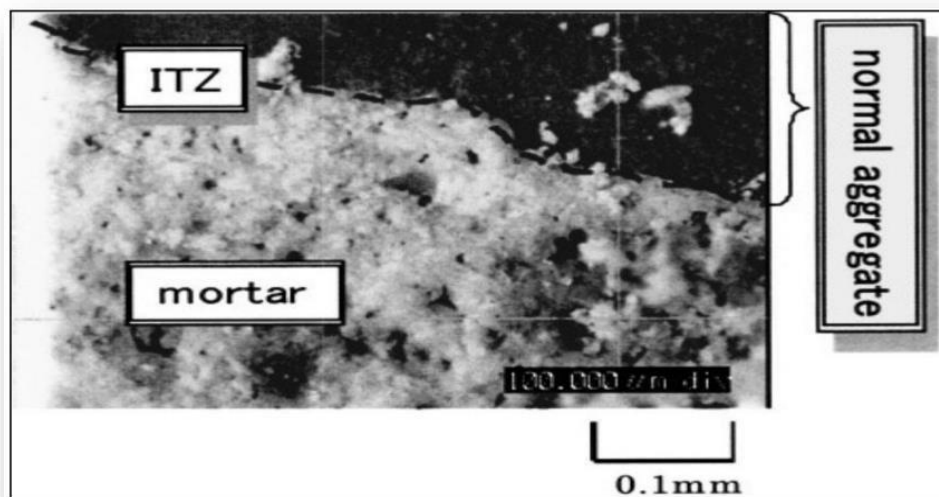


Figure III.19 : Zone de transition à l'interface granulat/pâte d'un béton conventionnel. [56]

III.12 Conclusion:

Les déchets sont un vrai problème, inhérent à toute forme de vie biologique et à toute activité industrielle, agricole ou urbaine, et à ce titre, la recherche de solutions est une nécessité

pour les sociétés. Les déchets sont par définition des « substances » et, en tant que tels, la biochimie physique, la mécanique et la chaleur sont principalement nécessaires pour les traiter.

Les déchets ont la vie, souvent en mutation au cours de leur existence pour finir dans les poubelles et les décharges. Avec une telle diversité moléculaire, il est essentiel de trouver un moyen d'extraire les fractions valorisables ou d'en pallier les capacités délétères. Plusieurs types de déchets et sous-produits peuvent être utilisés comme groupes. Le laitier de haut fourneau et les cendres volantes sont déjà exploités commercialement. L'utilisation des différents déchets dépend de leur rentabilité opérationnelle et de leurs caractéristiques. De nombreux types de déchets peuvent ne pas être largement utilisables en raison de leurs propriétés physiques et chimiques variables. Dans cette étude, nous nous intéressons aux déchets de construction et de démolition et à leur utilisation comme granulats pour le béton.

Chapitre IV : Etude Expérimentale

Etude experimentale

IV. Caractéristique des matériaux

IV.1. Introduction:

L'emploi judicieux des matériaux de construction exige la pré-connaissance de leurs diverses propriétés ; physiques et mécaniques, afin d'obtenir le meilleur choix répondant à leur destination. Les informations concernant les matériaux utilisés doivent être récoltées par des techniques fiables tout en préférant les essais normalisés. En plus, il est nécessaire que les matériaux soient malaxés correctement afin de produire un mélange homogène possédant par conséquent des propriétés uniformes.

Nous avons utilisé des matériaux locaux, leurs caractéristiques sont étudiées expérimentalement au laboratoire de génie civil à L'université de Mohamed Boudiaf -M'sila.

Nous avons analysé les caractéristiques des granulats fins recyclés (Briques 'DBR') et des granulats ordinaires entrant dans la composition des bétons.

En effet, notre recherche a pour objet l'étude de la possibilité d'utiliser les déchets de brique concassée (fin) comme granulats dans le béton en substitution massique de sable, avec des taux de substitution de (0%, 25%, 50%, 75%, 100%).et d'analyser les comportements des bétons obtenus à l'état durci. Ce chapitre présente les caractéristiques des matériaux utilisés dans cette étude, ainsi que les différents essais expérimentaux réalisés pour caractériser nos bétons.

La formulation du béton a été basée sur la méthode de « Dreux-Gorisse »

IV.1.1 Matériaux utilisés:

- ❖ Un sable concassé (0/5).
- ❖ Un gravier (3/8).
- ❖ Le ciment : ciment portland NA 442/2013.GICA
- ❖ Eau de gâchage : L'eau potable du Laboratoire de département de génie civil d'Universitaire Mohamed Boudiaf de M'sila.
- ❖ L'adjuvant : (Super- plastifiant).
- ❖ Fumé de silice (dans le but d'augmenter la compacité des mélanges).

- ❖ Déchets de brique (utilisé comme granulats)

IV.2 Caractéristiques des matériaux utilisés :

IV.2.1 Le ciment : Ciment Portland NA 442/2013

Le ciment utilisé dans notre étude est le CEM II 42.5 (GICA) de la Cimenterie Ain Touta Les propriétés physiques et chimiques ont été étudiées selon la norme algérienne (NA 442) et européenne (EN 197-1). Ces propriétés sont présentées d'après la fiche technique du ciment. [57]



Figure IV.1 : Ciment CEM II 42, 5 (GICA).

IV.2.1.2. DOMAINE D'APPLICATION :

- Béton étanche.
- Le béton résiste au gel en présence de sels de déglacage.
- Béton comprimé.
- Mortier.

IV.2.1.2.1. Dosages :

- Dosage moyen pour béton courant.
- Conditionnement : Sac et Vrac

- Caractéristiques techniques
- **Analyses chimiques:**
 - Teneur en sulfates (SO_3) < 2,5%
 - Teneur en Chlorures (Cl) < 0,1%
 - Teneur en (MgO) < 1%
 - Perte au feu (PAF): 0,5–1,5%
- **Composition minéralogique du clinker (Selon BOGUE) :**

$\text{C}_3\text{S} > 60 \pm 3\%$

$\text{C}_3\text{A}: 3 - 7,5 \%$

IV.2.1.2.2. Propriétés physiques:

Consistance normale : 26 à 28%

Début de prise $\geq 60\text{min}$

Fin de prise : 200 à 350min

Expansion < 5mm

Finesse (SSB): 3200-3800 (Cm^2/g).

IV.2.1.3. Résistance à la compression:

2 jours (EN 196-1) $\geq 10 \text{ Mpa}$

28 Jours (EN 196-1) $\geq 42.5 \text{ Mpa}$

IV.2.2. Les granulats (naturels et recyclés) :

IV.2.3 L'analyse granulométrique:

- But de l'essai:

L'analyse granulométrique a pour but de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différents grains constituant l'échantillon.

- **Principe de l'essai :**

L'essai consiste à fractionner au moyen d'une série de tamis un matériau en plusieurs classes granulaires de tailles décroissantes. Les dimensions de mailles et le nombre des tamis sont choisis en fonction de la nature de l'échantillon et de la précision attendue.

Les masses des différents refus et tamisât sont rapportées à la masse initiale du matériau. Les pourcentages ainsi obtenus sont exploités sous forme de tableau ou graphique.

- **Mode opératoire:**

- Monter la colonne de tamis dans l'ordre décroissant de l'ouverture des mailles en ajoutant le couvercle et le fond.
- Verser le matériau sec dans la colonne de tamis.
- Agiter automatiquement cette colonne.
- Reprendre un à un les tamis en commençant par celui qui a la plus grande ouverture, en adaptant un fond et un couvercle.
- Nous prenons le poids de chaque tamis à l'aide d'une balance électronique.
- Varier la validité de l'analyse granulométrique imposée par la Norme NF EN 933 -1 (différence entre la somme des masses de refus et de tamisât et de la masse initiale).

Les résultats des analyses granulométriques des différents sables étudiés sont regroupés dans les tableaux suivants :

1) Gravier 3/8

Tableau IV.1 : Résultat de l'analyse granulométrique du gravier (3/8)

Tamis(mm)	Poids des Tamis Vide	Poids des Tamis +gravier	Refus du gravier	Refus cumule	Refus Cumules%	Tamisat Cumules%
8	788.5	791	2.5	2.5	0.1	99.9
6.3	803.5	945.5	142	144.5	7.2	92.8
5	802.5	1532	729.5	874	43.7	56.3
4	780	1512	732	1606	80.3	19.7
2.5	699.5	1078	379	1985	99.25	0.75
Fond	600	615	15	2000	100	0

2) Sable concassé (naturel):

Tableau IV. 2 : Résultat de l'analyse granulométrique du sable concassé

Tamis (mm)	Poids des Tamis vide	Poids des Tamis+ sable	Refus du Sable concassé	Refus cumule	Refus Cumules%	Tamisat Cumules%
5	803	807.5	4	4	0.2	99.8
4	779.5	784	4	8	0.4	99.6
2.5	700	920.8	220.8	228.8	11.44	88.56
1.25	497.3	1041	543.7	772.5	38.625	61.37
0.63	607.3	1589.5	439	1211.5	60.75	39.42
0.315	557.5	975	418	1629.5	81.47	18.53
0.16	533	785.5	252.5	1882	94.1	5.9
Fond	600	718	118	2000	100	0

3) Déchets de brique concassé :

Tableau IV.3 : Résultat de l'analyse granulométrique des déchets de brique concassé

Tamis (mm)	Poids des Tamis Vide	Poids des Tamis brique	Refus du brique	Refus cumule	Refus Cumules%	Tamisat Cumules%
5	803	805	2	2	0.1	99.9
4	779.5	784	5	7	0.35	99.65
2.5	700	914.5	214.5	221.5	10.725	89.275
1.25	497.3	731.6	308	529.5	15.4	84.6
0.63	607	1194.5	280	809.5	14	86
0.315	557.5	921	364	1173.5	18.2	81.2
0.16	533	1193	660	1833.5	33	67
Fond	600	766.5	166.5	2000	8.325	91.675

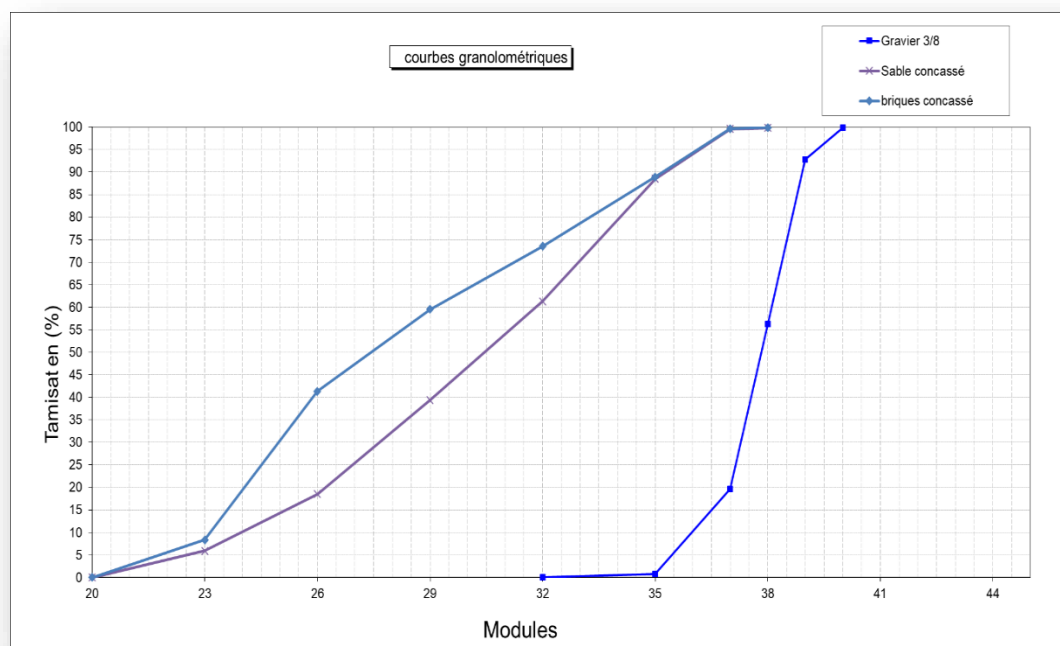


Figure IV.2: Analyse granulométrique des différents granulats



Figure IV.3: Analyse granulométrique

IV.2.4 Masse volumique apparente du gravier :

- **But de l'essai:**

Cet essai a pour but de permettre de connaître la masse d'une fraction granulaire lorsque par exemple on élabore une composition de bétons. Ce paramètre permet, en particulier, de déterminer la masse ou le volume des gravier pour l'obtention d'un béton dont les caractéristiques sont imposées.

- **Mode opératoire de l'essai:**

1. Déterminer le volume du récipient = V .
2. Noter la masse du récipient propre et vide = M_0 .
3. Placer le récipient dans le bac en plastique.

4. Verser les granulats secs, par couches successives et sans tassement : utiliser les mains comme entonnoir naturel.
5. Araser à l'aide de la règle métallique par un mouvement horizontal de va et vient.
6. Noter la masse du récipient rempli= M1.
7. Vider les granulats dans un autre bac en plastique
8. Renouveler l'opération au moins (3) fois avec un autre échantillon du même type.

La masse volumique absolue est donnée par :

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

Tableau IV.4 : Masse volumiques du gravier 3/8

N° d'Essai	M1 (Kg)	M2 (kg)	ρ app (kg/l)	ρ app moyen(kg/l)
1	1020	1453.1	1.42	1.42
2	1020	1485	1.45	
3	1020	1435	1.4	

IV.2.5 Masses volumiques absolues du gravier 3/8 :

Cet essai est régi par la norme NFP 18-301 ; elle est définie comme étant la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat sans tenir compte des vides pouvant exister entre les grains

- But de l'essai:

Cet essai a pour but de permettre de connaître la masse d'une fraction granulaire lorsque par exemple on élabore une composition de bétons. Ce paramètre permet, en particulier, de déterminer la masse ou le volume des différentes classes granulaires malaxées pour l'obtention d'un béton dont les caractéristiques sont imposées.

Dans ce travail nous avons utilisé la méthode de l'éprouvette graduée, elle est Simple, rapide et utilise un matériel courant du laboratoire.

- **Mode opératoire:**

1. Placer l'éprouvette dans le bac en plastique.
2. Verser de l'eau dans l'éprouvette (presque demi hauteur) et noter V1.
3. Préparer un échantillon de granulats secs de masse M (environ 400 g).
4. Verser l'échantillon dans l'éprouvette à l'aide d'un entonnoir et provoquer le départ des vides (air) en remuant le mélange avec la tige agitatrice.
5. Noter le nouveau volume d'eau dans l'éprouvette V2.
6. Vider les granulats dans un bac en plastique et jeter son contenu.
7. Renouveler l'opération au minimum 3 fois. La masse volumique absolue est donnée par :

$$\rho_{abs} = \frac{M}{(V_2 - V_1)}$$

Tableau IV.5. Masse volumiques absolue du gravier (3/8)

N° d'essai	M1 (g)	V1 (ml)	V2(ml)	ρ abs (g/ml)	ρ abs moyen (g/ml)
1	269.3	200	300	2.693	2.61
2	269.3	200	330	2.63	
3	269.3	200	320	2.5	

IV.2.6 Sable concassé (0/5)

IV.2.7 Equivalent de sable : NF P 18-598 :

Nous essayons de mettre en évidence la proportion d'impuretés argileuses ou ultra fines contenues dans le sable et le pourcentage de poussières nuisibles et les éléments argileux qui diminuent la qualité du béton et mortier.

- Mode opératoire:

- Tamiser une quantité de sable (masse supérieure à 500 g).
- Prendre une pesée de 120 g.
- Remplir l'éprouvette de solution la veille jusqu'au premier repère (10cm).
- A l'aide de l'entonnoir verser la prise d'essai (120g) 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 coups horizontaux en 30 secondes à la main à l'aide d'un agitateur mécanique.
- Retirer ensuite le bouchon, le rincer avec la solution la veille au-dessus de l'éprouvette,
- Rincer ensuite les parois de celle-ci.
- Faire descendre le tube laveur dans l'éprouvette, le rouler entre le pouce et l'index en faisant tourner lentement le tube et l'éprouvette et en imprimant en même temps au tube un léger piquage. 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 la veille atteigne le 2ème repère. Laisser ensuite reposer pendant 20 minutes.

a. Equivalent de sable visuel (ESV) :

Après 20 minutes de dépôt de sable, lire la hauteur h_1 du niveau supérieur du floculant jusqu'au fond de l'éprouvette à l'aide d'une règle.

- Mesurer également avec la règle la hauteur h_2 comprise entre le niveau supérieur de la partie sédimentaire et le fond de l'éprouvette

$$ESV = \frac{h_2}{h_1} * 100$$

Où : $h_2 > h_1$ avec : h_1 : sable propre + éléments fins.

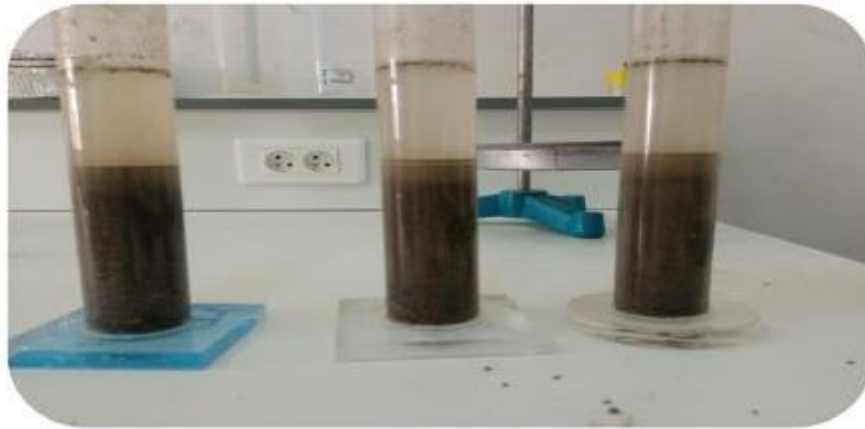


Figure IV.4: Essais d'équivalent de sable.

b. Equivalent de sable au piston (ESP) :

- 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 partie sédimentée.

$$ESV = \frac{h_2}{h_1} * 100$$

Où h'2 : La hauteur du sable (h'2 < h1)

(ESV) moy = 53,28 %

Donc : 54%. < ESV

(ESV) moy = 47.64 %

60% < ESP

Tableau IV. 6. Equivalent du sable Concassée 0/5.

N° d'essais	H1(cm)	H2 (cm)	ESV (%)	H2 (cm)	ESP (%)
1	15.5	8.4	54.19	7.2	46.45
2	15.4	8.4	54.52	7.6	49.35
3	17.4	8.9	51.14	8.2	47.12



Figure IV.5 : Essais d'équivalent de sable.

Tableau IV.7 : Comparaison des résultats.

E.S.V	E.S.P	Nature et qualité du sable
ES<65	ES<60	Sable argileux : Risque de retrait ou de gonflement à rejeter pour des bétons de qualité
65<ES<75	65<ES<70	Sable légèrement argileux de propriété admissible pour des bétons de qualité courante quand on ne craint pas particulièrement le retrait.
75≤ES≤85	70≤ES≤80	Sable propre à faible pourcentage de farine argileux convient parfaitement pour des bétons de hautes qualité.
E. S≥85	E.S>80	Sable très propre : L'absence totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra rattraper par une augmentation du dosage en eau

Résultats : Notre sable est un sable propre à faible pourcentage de fine argileux convient parfaitement pour des bétons de haute qualité.

IV.2.8 Masses volumiques apparentes :

Cet essai a pour but de permettre de connaître la masse d'une fraction granulaire lorsque par exemple on élabore une composition de bétons. Ce paramètre permet, en particulier, de déterminer la masse ou le volume des sables malaxés pour l'obtention d'un béton dont les caractéristiques sont imposées.

- Principe de l'essai :

Le principe de cet essai c'est de remplir un récipient gradué (200ml) et déterminer la masse du contenu. Récipient gradué. - balance. – sable.

- Mode opératoire :

Dans cet essai on va faire les étapes suivantes : On met l'échantillon dans le récipient gradué (d'environ 200 ml), et on pèse le récipient à l'aide d'une balance. Puis on note les masses et les volumes pour calculer la masse volumique. La Masse volumique apparente est donnée par formule suivant :

$$\rho_{app} = \frac{(M2 - M1)}{V_r}$$

Tableau IV.8 : Masses volumiques apparentes de sable Concassée 0.5.

N° d'essais	M1 (g)	M2 (g)	ρ app (g/cm ³)	ρ app moye (g/cm ³)
1	116	1488	1.524	1.508
2	116	1482	1.517	
3	116	1453	1.485	

IV.2.9 Masses volumiques absolues :

C'est la masse de l'unité de volume absolu de corps, c'est-dire de la matière qui constitue le corps sans tenir compte du volume vide. La masse volumique absolue du sable est calculé d'après la

Formule :

$$\rho_{abs} = \frac{M}{(V2 - V1)}$$

Tableau II .9 : Masses volumiques absolues de sable Concassée 0.5

N° d'essai	M (g)	V1 (ml)	V2 (ml)	ρ_{abs} (g/ml)	$\rho_{abs} M$ (g/ml)
1	300	300	440	2.14	2.24
2	300	300	430	2.30	
3	300	300	430	2.30	

IV.2.10 Module de finesse:

C'est un facteur très important, qui nous permet de juger la grosseur du sable, il est exprimé par le rapport de la somme des refus cumulés des tamis de mailles :

[0.16-0.315-0.63-1.25-2.5 et 5 (mm)] sur **100** et calculé par la relation suivante :

$$Mf = \sum_{100}^{RC}$$

Où :

RC : Refus cumulé.

Les normes soviétiques spécifient le Mf des sables comme suit :

- Sable gros $Mf \geq 2.5$
- Sable moyen $2 < Mf < 2.5$
- Sable fin $1.5 < Mf < 2$
- Sable très fin $1 < Mf < 1.5$

$$Mf = \sum_{100}^{RC} = 2.87, \text{ C'est un sable Gros}$$

IV.2.10.1 Porosités (NF P 18 554 et 18 555):

C'est la masse de l'unité de volume absolu de corps c'est-à-dire de la matière qui constitue le corps sans tenir compte du volume vide :

$$P\% = (x = 1 - \frac{\rho_{app}}{\rho_{abs}}) * 100$$

Tableau IV.10. Porosités (%) du sable.

Porosité P(%)
32.67%

IV.2.10.2 Compacité :

La compacité d'un matériau est une proportion de son volume réellement occupé par la matière solide qui le constitue, c'est-à-dire. Le rapport du volume absolu des grains au volume apparent du matériau. La compacité donnée par la formule.

$$C = \frac{\rho_{app}}{\rho_{abs}} = 100 - P$$

Tableau IV. 11 : Compacité C (%) du sable.

Compacité C (%)
67.33

IV.2.10.3 Indice des vides:

$$I = \frac{P}{C}$$

Tableau IV. 12 : Indice de vide des fractions sable Concassée 0.5.

Indice de vide
0.485

IV.3. La formulation des bétons :

IV.3.1 L'objectif de la formulation de béton :

L'Objectifs d'une formulation est trouvé les composants pour avoir les performances requises pour un béton, soit :

- Une consistance adaptée à sa destination, généralement définie par l'affaissement au cône d'Abram, noté h ;

- Les qualités de résistance à différentes échéances, le plus souvent à 28 jours ; notée f_{cm28} (Résistance moyenne) ;
- Des qualités de durabilité qui conduisent à imposer une résistance caractéristique minimum, un dosage minimum en liant équivalent $(C + kA)$ et un rapport maximum $E / (C + kA)$
- La formulation du béton doit permettre de respecter les deux premières exigences au moindre coût, le plus souvent donc à partir d'un dosage en ciment le plus faible possible tout en vérifiant que le dosage minimal est atteint.

Même avec de tels outils, il est indispensable de comprendre comment les différents paramètres influent sur les qualités du béton, car ces paramètres sont trop nombreux et trop variables pour qu'ils puissent être pris en compte dans toute leur complexité (sans compter que des produits comme les adjuvants sont en constante évolution). C'est l'objet des paragraphes qui suivent de présenter ces paramètres de manière à rendre d'autant plus efficaces les outils de calcul (et les essais qui demeurent incontournables) pour et lui qui cherche à résoudre un problème de formulation de béton. [58]

IV.3.2 Quelques Méthodes de composition des bétons :

Le calcul de la composition du béton a pour but de déterminer le dosage en ciment, granulats (fins et gros) et en eau pour 1m^3 de béton frais, afin d'obtenir un mélange homogène et d'une capacité élevée, ainsi qu'une résistance mécanique acceptée.

Il existe plusieurs méthodes de détermination la composition du béton proposé et appliqué dans les différentes pays du monde, permis ces méthodes on peut citer

- Méthode de BOLOMEY (méthode à granularité continue).
- Méthode de JOISEL.
- Méthode de VALETTE.
- Méthode de DREUX GORISSE.
- Méthode des volumes absolus.
- Méthode générale du CES (centre d'essai des structures).

L'objectif de toutes les méthodes de formulation des bétons est de déterminer la combinaison de matériaux à utiliser pour produire le béton qui aura les propriétés désirées et qui sera le plus économique possible. Dans notre travail nous utiliserons la méthode pratique de **DREUX – GORISSE**.

IV.3.3 Méthode de formulation de Dreux- Gorisse :

C'est une méthode pratique qui simplifie et rend la formulation du béton plus pragmatique. Elle consiste à rechercher conjointement la résistance à la compression et l'ouvrabilité désirée à partir des données de base essentielles pour la formulation du béton telles que la dimension des granulats (D). La méthode de formulation de Dreux-Gorisse permet de déterminer les quantités optimales de matériaux (eau E, ciment C, sable S, gravillon g et gravier G) nécessaires à la confection d'un mètre cube de béton conformément au cahier des charges. Plusieurs étapes de calcul successives sont nécessaires à l'obtention de la formulation théorique de béton. Il faut déterminer au préalable le rapport C/E, C et E, le mélange optimal à minimum de vides, la compacité du béton et les masses des granulats. [59]

IV.3.4 Détermination du dosage en ciment :

On évalue d'abord le rapport E/C en fonction de la résistance désirée sur la base de la formule :

$$R_b = G \cdot R_c (E/C - 0.5)$$

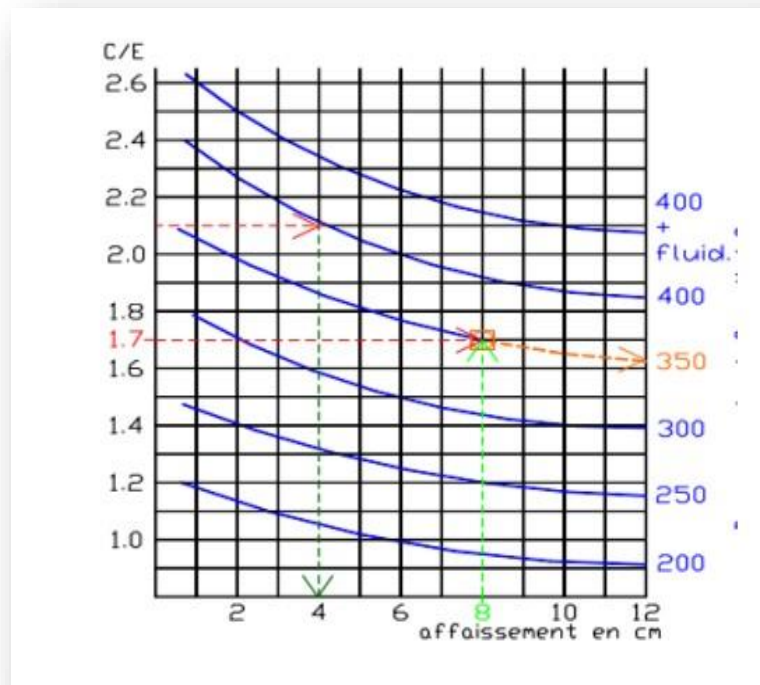
Où :

R_b : Résistance à la compression du béton prévue à 28 jours, en bars.

G : Coefficient granulaire

R_c : Classe vraie du ciment à 28 jours, en bars.

Connaissant le rapport C/E la fluidité désirée, qui est une donnée du problème, on peut déterminer le dosage en ciment d'après l'abaque. [60]



Figures IV.6 : Abaques permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment à prévoir en fonction du rapport C/E et de l'ouvrabilité désirée (affaissement au cône).

Tableau IV. 13. Valeurs de G coefficient granulaire.

Valeurs de G coefficient granulaire			
Qualité des Granulats	Dimension des granulats D (mm)		
	Fins	Moyens	Gros
	$D \leq 12.5$	$20 \leq D \leq 31.5$	$D \leq 40$
Excellente	0.55	0.60	0.65
Bonne, courante	0.45	0.5	0.55
Passable	0.35	0.4	0.45

IV.3.5 Détermination du dosage en eau : Connaissant C/E et le dosage en ciment (C) on déduit le dosage en eau total à prévoir par la formule : $E = C / (E/C)$

IV.3.6 Détermination du dosage en granulat :

C'est le pourcentage de sable et de gravier exprimé à partir de la courbe granulaire de référence construite par l'une des méthodes de composition de béton, ci-dessous courbe OAB.

La courbe OAB, où **B** à l'ordonnée 100% correspond à la dimension **D** du plus gros granulat et le point de brisure A à des coordonnées ainsi définies comme suit :

- **En abscisse :**
Si $D \leq 20\text{mm}$ l'abscisse est $D/2$.
Si $D \geq 20\text{mm}$ l'abscisse est située au milieu du segment, gravier limité par le module 37 (4mm) et le module correspond à (D max).
- **En ordonnée :** Y donnée par la formule suivante :

$$YA = 50 - \sqrt{D + K + K_s + K_p}$$

K_s , ajustement de la granularité du sable.

- Pour $FM > 2.8$ $K_s = 5.4 FM - 15$
- Pour FM est varié de 2 à 3 $K_s = 6 MF - 15$

K : est un terme correcteur qui dépend du dosage en ciment, de l'efficacité du serrage, de la forme des granulats roulés ou concassés (sur tout le sable, dont l'influence est prépondérante) et également du module de finesse du sable qui est donné par le Tableau. [61]

Tableau IV.14. Valeurs du terme correcteur K.

Vibration	Faible		Normale		Puissante	
Forme (t, s, sable)	Roulé	concassé	roulé	concassé	Roulé	Concassé
400+fluidifiants	-2	0	-4	-2	-6	-4
400	0	+2	-2	0	-4	-2
350	+2	+4	0	+2	-2	0
300	+4	+6	+2	+4	0	+2
250	+6	+8	+4	+6	+2	+4
200	+8	+10	+6	+8	+4	+6

La courbe granulaire de référence OAB doit être tracée sur le même graphique que les courbes granulométriques des granulats composants. On trace alors les lignes de partage entre chacun des granulats en joignant le point à 95% de la courbe du granulats suivant, et ainsi de suite. On lira alors sur la courbe de référence au point de croisement avec la ou les droites de partage le pourcentage en volume absolu de chacun des granulats g_1 , g_2 , g_3 par exemple. Si c'est le dosage en ciment, le volume absolu des grains de ciment est :

$$C = C / \rho_c$$

ρ_c : C'est la masse spécifique pour les grains du ciment

Le volume absolu de l'ensemble des granulats est:

$$V = (1000 \times \gamma) - c.$$

Où :

γ : coefficient de compacité qui est donné par le tableau :

Tableau IV.15: coefficients de compacité.

consistance	serrage	Coefficient de compacité γ						
		D=5	D=10	D=12.5	D=20	D=31.5	D=50	D=80
Molle	Piquage	0.750	0.780	0.795	0.805	0.810	0.815	0.820
	Vibration faible	0.755	0.785	0.800	0.810	0.815	0.820	0.825
	Vibration normale	0.760	0.790	0.805	0.815	0.820	0.825	0.830
Plastique	Piquage	0.760	0.790	0.805	0.815	0.820	0.825	0.830
	Vibration faible	0.765	0.795	0.810	0.820	0.825	0.830	0.835
	Vibration normale	0.770	0.800	0.815	0.825	0.830	0.835	0.840
	Vibration puissante	0.775	0.805	0.820	0.830	0.835	0.840	0.845
Ferme	Vibration faible	0.775	0.805	0.820	0.830	0.835	0.840	0.845
		0.780	0.810	0.825	0.835	0.840	0.845	0.850

a. Dosage en ciment:

- $C=350 \text{ kg/m}^3$ valeur prescrite.

b. Dosage en eau:

- On a $C=350 \text{ kg/m}^3$
- Et affaissement = 8 cm (béton plastique)
- Après l'abaque : $C/E = 1.71 \rightarrow E/C = 0.57$
- Alors : $E = 350/1.71 = 198.86 \text{ l/m}^3$

Correction du dosage en eau selon le diamètre maximal D du mélange granulaire

Tableau IV. 16 : valeurs de la correction sur le dosage en eau.

Diamètre(mm)	10	12.5	16	20	25	31.5	40	50
Correction en %	9	6	4	2	0	-2	-4	-6

On a un **D max= 8 mm** qui correspond à une correction de **9%** en plus de la quantité d'eau calculée donc on obtient :

$$E = F_{\text{calculée}} + 0.04 \times F_{\text{calculée}} = 198.86 + 0.09 (198.86) = 216.7 \text{ l Litre E après correction.}$$

Dosage des granulats :

La granularité du mélange obtenu peut être représentée et approchée par deux segments de droite. Cette courbe simplifiée est une modélisation de la courbe réelle.

Cette modélisation est intéressante car cette courbe théorique est suffisamment proche de la courbe réelle pour être significative et elle peut être entièrement déterminée à partir de seulement trois points appelés respectivement O origine, A point de brisure, B extrémité.

Pour les granulats à béton, il apparaît que les points O, A et B, sont invariables quel que soit les proportions du mélange.

Le point d'origine, O est fixé à 0% de tamisât sur le plus petit tamis (0.08 mm). Ce point est

Repéré par ses coordonnées : O [0.08 ; 0] de même, le d'extrémité, B se situe le tamis, D du gravier, avec 100% de tamisât. Ce point est repéré par ses coordonnées : B [D ; 100].

Pour le point de brisure A, il apparaît que le tamis sur lequel il se situe est invariable quel que soit les proportions du mélange. En observant de plus près, il apparaît que ce tamis se situe à

$D/2$, si $D \leq 20\text{mm}$, et au milieu de l'intervalle [5 ; D] si $D > 20$ il reste à déterminer le pourcentage de tamisât du point de brisure. Cette position dépend des proportions du mélange.

Or, les proportions du mélange influent sur la compacité du béton et par conséquent sur sa résistance. La meilleure compacité au béton. Cette position est optimisée par la méthode dite DREUX-GORISSE.

L'ordonnée optimisée du point de brisure, YA est déterminée par la relation suivante :

$$YA = 50 - \sqrt{D + K + K_s + K_p}$$

Cette relation prend en compte l'influence de la forme des granulats, du dosage en ciment, de la vibration, de la finesse du sable et de la mise en œuvre du béton par une pompe à béton sur la compacité du béton et sa facilité de mise en œuvre. K, optimisation de la compacité en fonction du type de vibration, de la forme des granulats, et du dosage en ciment. Voir tableau ci-contre :

Tableau IV.17 : valeurs du terme correcteur k.

Vibration	Faible		Normale		Puissante	
Forme (t, s, sable)	Roulé	concassé	Roulé	concassé	Roulé	Concassé
400+fluidifiants	-2	0	-4	-2	-6	-4
400	0	+2	-2	0	-4	-2
350	+2	+4	0	+2	-2	0
300	+4	+6	+2	+4	0	+2
250	+6	+8	+4	+6	+2	+4
200	+8	+10	+6	+8	+4	+6

- La valeur trouvée est **K= +2**

On a $MF= 2.87 \rightarrow K_s= 0$

K_p , ajustement du dosage en sable pour faciliter le transfert par pompes à béton

$K_p = 0$ si le béton est non pompable

$5 \leq K_p \leq 10$ si le béton est pompable

On a un béton non pompable. Donc : $K_p= 0$

Pour un béton non pompable réalisé avec des granulats roulés dont le gravier a un diamètre,

$D= 8 \text{ mm}$, le sable a un module de finesse $MF= 2.87$, un dosage en ciment de 350 kg

. $K=0$, $K_p= 0$, $Y_A= 50 - \sqrt{8} + 2 + 0 = 49.18\%$

$X_A=8/2= 4\text{mm}$ le point A à pour coordonnées : **A [4 ; 49.18]**

IV.3.7 La ligne de partage :

La ligne de partage joint le point d'ordonnée 95% de la courbe des plus petits granulats au point d'ordonnée 5% de la courbe granulaire des plus gros granulats. Le point d'intersection entre cette ligne et la courbe théorique du mélange optimum indique les proportions en pourcentage de volume absolu de sable et de gravier. Ces proportions sont lues sur le pourcentage de tamisât correspondant à ce point d'intersection.

Ce pourcentage indique la proportion de sable, le complément donne la proportion de gravier

- Le mélange optimal est obtenu avec un volume absolu de 46 % de sable et 54% de gravier 3/8

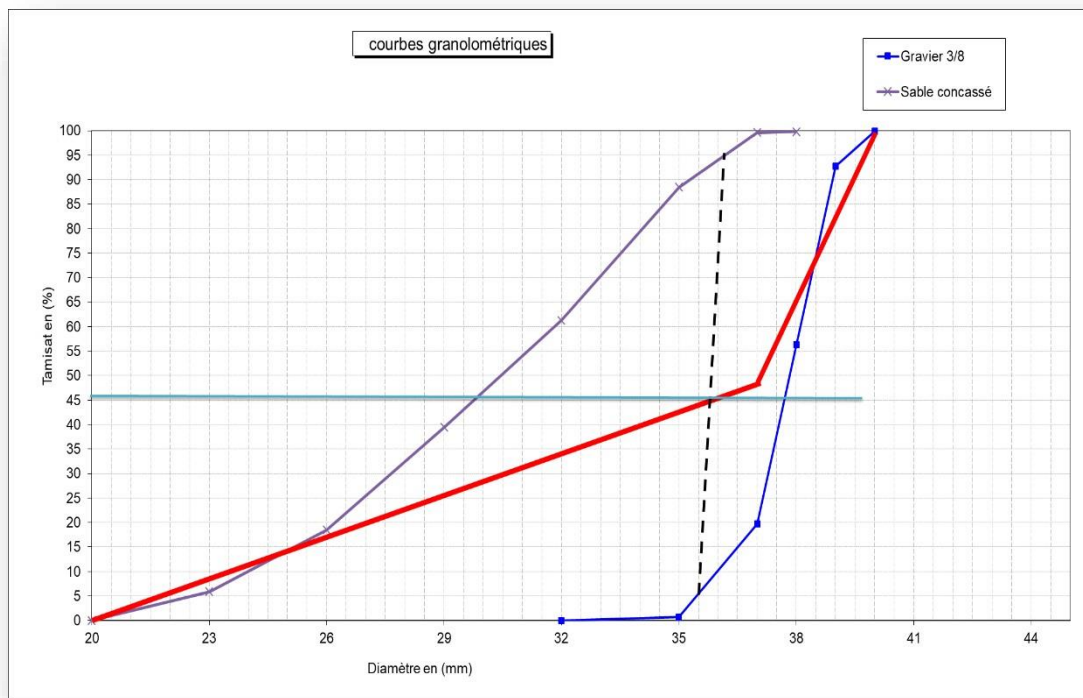


Figure IV.7: les lignes de partage.

IV.3.7.1 Dosage en masse des granulats :

La connaissance de la compacité du béton et des masses volumiques absolues des matériaux. La meilleure compacité est obtenue en vérifiant les proportions du mélange granulaire. Mais Indépendamment de cela, elle dépend également du diamètre D des granulats, des conditions de vibration du béton et de sa plasticité. L'expérience permet de prévoir approximativement la compacité du béton selon les valeurs du tableau suivant.

IV.3.7.2 Coefficient de compacité :

Tableau IV. 18 : valeurs du coefficient de compacité γ .

consistance	Serrage	Coefficient de compacité γ						
		D=5	D=10	D=12.5	D=20	D=31.5	D=50	D=80
Molle	Piquage	0.750	0.780	0.795	0.805	0.810	0.815	0.820
	Vibration faible	0.755	0.785	0.800	0.810	0.815	0.820	0.825
	Vibration normale	0.760	0.790	0.805	0.815	0.820	0.825	0.830
Plastique	Piquage							
	Vibration faible	0.760	0.790	0.805	0.815	0.820	0.825	0.830
	Vibration normale	0.765	0.795	0.810	0.820	0.825	0.830	0.835
		0.770	0.800	0.815	0.825	0.830	0.835	0.840
	Vibration puissante	0.775	0.805	0.820	0.830	0.835	0.840	0.845
Ferme	Vibration faible	0.775	0.805	0.820	0.830	0.835	0.840	0.845
		0.780	0.810	0.825	0.835	0.840	0.845	0.850

• La correction effectuée, on trouve $\gamma = 0.755$. Ces valeurs sont convenables pour des granulats roulés sinon il conviendra d'apporter la correction suivante :

Sable roulé et gravier concassé = **-0.01**

Sable et gravier concassé = **-0.03**

Alors : $\gamma = 0.755 - 0.01 = 0.745$

Toutes les masses des constituants du béton ont été déterminé pour obtenir un béton conforme aux attentes. Il est maintenant nécessaire de réaliser des éprouvettes, pour vérifier et ajuster les dosages expérimentalement afin de garantir la qualité du béton.

Quantité des agrégats en pourcentage :

Sable concassée (%) = 46%. (%) S/100 = **0.46**

Gravier 3/8 (%) = 54%. (%) Gravier (3/8) /100 = **0.54**

IV.3.8 Volume absolu de l'ensemble des granulats :

On a : $V = (1000 \times \gamma) - c$.

$$c = C/3.10 = 112.90$$

Volume absolu de l'ensemble des granulats $V = (1000 \times \gamma) - c$

$$= (1000 \times 0.755) - 112.90$$

$$= 642.1 \text{ L}$$

IV.3.8.1 Dosage des granulats en kg dans 1 m³ :

Sable concassée [kg] = $0.46 \times 692.1 = 295.36$ litres

Gravies 3/8 [kg] = $0.54 \times 692.1 = 346.73$ litres

Les masses spécifiques sont :

* Sable = **2.63 g/cm³**

* Gravier (3/8) = **2.63 g/cm³**

IV.3.8.2 Les dosages en matériaux secs pour notre micro béton seront donc :

Ciment	350 kg/m³.
Sable	2.63× 295.36 = 776.79 kg/m³
Gravier (3/8)	2.63× 346.73 = 911.89 kg/m³
eau total	216.76/m³

IV.4 Constituants ajoutés dans béton :

IV.4.1 Fumée de silice :

Elle est à base de micro silice provenant de la société « GRANITEX » sous forme de poudre grise. Cette Fumée de silice est désignée par le nom « MEDAPLAST HP ». Ces caractéristiques physiques sont présentées au **tableau IV.18**.

Dans notre étude, on a utilisé 10 % de fumé de silice (du poids de ciment).

Tableau IV.19 : Caractéristiques physiques de la fumée de silice.

Caractéristiques physiques	Valeurs
Densité apparente (g/cm ³)	0.5
Densité absolue (g/cm)	1.87
Finesse (cm ² /g)	20470



Figure IV.8 : Fumé de silice forme de poudre

IV.4.2 L'adjuvant:

Dans notre travail, l'adjuvant qui nous avons utilisé s'appeler : Le super plastifiant (MEDAPLAST 30).

- Description:

D'après la fiche technique (Annexe), le MEDAPLAST 30 est un super plastifiant haut réducteur d'eau permettant d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité, en plus de sa fonction principale de super plastifiant, il permet de diminuer considérablement la teneur en eau du béton.

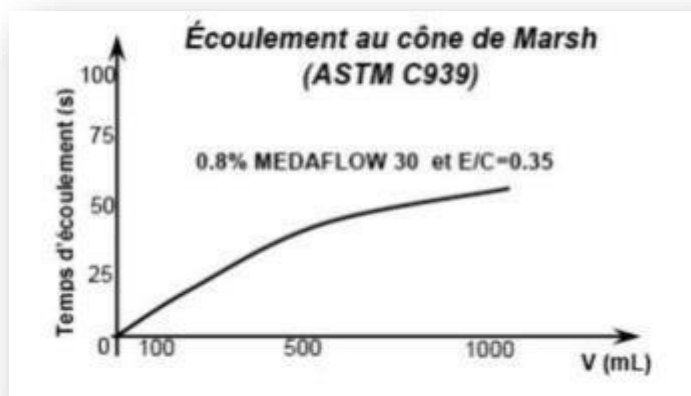


Figure IV.9 : Evolution découlement au cône de Marsh.

- **Propriétés :**

Grâce à ses propriétés le MEDAFLOW 30 permet :

Sur béton frais :

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

Sur béton durci :

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

Tableau IV.20. Evolution des résistances mécaniques à jeune âge et à long terme.

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

- **Dosage:**

Plage de dosage recommandée : 0,5 à 2,0 % du poids de ciment soit 0,46 à 1,85 litre pour 100 Kgde ciment.

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

Dans notre étude, on a utilisé 2% d'adjuvant (du poids de ciment).



Figure IV.10 : Le super plastifiant (MEDAPLAST 30).

- Caractéristique:

- Aspect Liquide
- Couleur Brun clair
- pH 6 – 6,5
- Densité..... $1,07 \pm 0,01$
- Teneur en chlore $< 0,1 \text{ g/l}$
- Extrait sec 30%

IV.4.3 Programmes expérimentaux :

Le tableau suivant récapitule l'ensemble des mélanges réalisés dans la présente étude.

Tableau IV.21: l'ensemble des essais réalisés

N	Sable %		Fumée de silice %	Adjuvant %	Solutions agressives de traitement 5%	Essais
	Sable concassé	Brique concassé				
1	100	0	0	0	H2SO4 Et HCl	- Compression
2	75	25	0	0		- Flexion
3	50	50	0	0		- Traction
4	25	75	0	0		- Porosité
5	0	100	0	0		- Absorption Perte de masse
6	100	0	10	2	H2SO4 Et HCl	- Compression
7	75	25	10	2		- Flexion
8	50	50	10	2		- Traction
9	25	75	10	2		- Porosité
10	0	100	10	2		- Absorption Perte de masse

IV.4.4 Matériels Et Essais :

IV.4.4.1 L'exécution de malaxage :

L'objectif du malaxage est de répartir dans l'espace de façon homogène, par l'action des outils des brassages, les éléments des constituants mis en présence dans le malaxeur. La maîtrise de dosage des différents constituants est nécessaire pour maintenir la constance et l'homogénéité du béton fabriqué.

La préparation de béton est faite par l'appareil dit le malaxeur, les étapes de préparation de béton sont :

On verse la quantité de gravier, et en suit par la quantité de sable, on allumer le malaxeur pour le malaxage granulaire et on verse en suit par la quantité de ciment, et finalement la quantité de l'eau, on prend 35 s pour le malaxage, après cette durée, on arrête le malaxage et on réalise l'essai au cône d'Abrams pour déterminer l'affaissement des bétons préparé

IV.4.4.2 Malaxage du béton:

Il est essentiel que les constituants de base (C ; S ; G et E) soient mélangés correctement afin de produire un béton frais dont la surface de tous les granulats sera enrobée de pâte de ciment et qui sera alors homogène à grande échelle et possédera par conséquent des propriétés uniformes.

Le malaxage est effectué dans des malaxeurs ou à la main. Dans notre cas on a utilisé le malaxeur.

IV.4.4.3 Malaxeurs à béton : [NA EN 12390-2]

Les malaxeurs à béton doivent, non seulement assurer un malaxage uniforme des constituants du béton, mais ils doivent également décharger le béton sans modifier cette homogénéité.



Figure IV.11 : Le malaxeur utilisé (malaxeur de laboratoire Géo-matériaux).

IV.4.4.4 Programme des essais :

IV.4.4.4.1 Mesure de la consistance (Norme NF P 18 415) :

Le contrôle de l'ouvrabilité est effectué grâce à l'essai d'affaissement au cône d'Abrams qui consiste à :

- Remplir le cône en trois couches, tassées avec une tige d'acier pointue de 16 mm de diamètre à raison de 25 coups par couche ;
- Soulever le moule avec précaution et mesurer l'affaissement en cm.

Tableau IV. 21 : Classement des bétons selon la valeur d'affaissement au cône d'Abrams.

Classe de consistance	Définition	Affaissement (mm)
S1	Ferme	10 à 40
S2	Plastique	50 à 90
S3	Très plastique	100 à 150
S4	Fluide	160 à 210
S5	Très fluide	≥220

Notre béton est dans la classe S2 : 5 à 9 (cm) alors c'est béton plastique.



Figure IV. 12 : *l'affaissement de cône d'Abrams d'un béton.*

IV.4.4.2 Vibration: [NA EN 12390-2]

La vibration est la méthode de compactage la plus répandue, le degré de compactage d'un béton frais par vibration dépend de la fréquence et de l'amplitude des oscillations, ainsi que de la durée de vibration

- La vibration est réalisée sur la table vibrante pendant 20s.
- Les éprouvettes sont maintenues à l'air libre dans le laboratoire pendant 24h puis décoffrées et marquées par peinture et conservées dans l'eau pendant 28 jours.



Figure IV.13: *la table vibrante (vibrant de laboratoire de matériaux).*

IV.4.4.3 Résistance à la compression:

L'essai de compression à la compression est mené sur des éprouvettes de forme prismatique normalisée (4*4*16) cm³. La vitesse de chargement est constante. La machine d'essai est une presse de force de classe « B » et d'une capacité maximale de 1500 kN conforme à la norme NF P 18-412 (NA 2832).



*Figure IV.14 : Moule d'éprouvette prismatique (4*4*16).*

Les éprouvettes sont conservées sans être déplacées pendant 24 heures. Après démoulage, Des éprouvettes 4x4x16 cm³ sont conservées dans l'eau à une température de $20 \pm 2^\circ\text{C}$ jusqu'à 28 jours. Des essais d'écrasement ont été réalisés aux âges (28) jours La résistance est calculée selon la formule :

$$f_c = \frac{F}{AC}$$

f c: résistance en compression, exprimée en méga pascal (Newton par millimètres carrés)

F : charge maximale, exprimée en Newtons

AC : l'aire de la section de l'éprouvette sur laquelle la force de compression est appliquée, calculée à partir de la dimension nominale de l'éprouvette.

La résistance à la compression doit être exprimée à MPa (N/mm²) près.



Figure IV. 15 : La machine de compression

IV.4.4.4 Résistance à la traction par flexion :

Des éprouvettes prismatiques de dimensions (4 x 4x 16) cm sont soumises à un moment de flexion par application d'une charge au moyen de rouleaux supérieurs et inférieurs. La charge maximale enregistrée au cours de l'essai est notée et la résistance à la flexion est calculée.

Pour une charge totale P, le moment de flexion constant entre les deux points d'application de la charge est :

$$M = \frac{P * A}{2}$$

Et la contrainte de traction correspondante sur la fibre inférieure est = $6M / a^3$

La relation suivante permet de calculer la résistance :

$$F_{t f j} = 1.8 \frac{P}{a^2}$$



Figure IV.16 : Essai de traction par flexion

IV.4.5 Traitement des échantillons de béton par H₂SO₄ et HCl :

L'objectif de cette étude est de détecter la dégradation des éprouvettes de micro béton confectionnées à base de ciment CPJ, sous l'effet de solutions d'acide sulfurique H₂SO₄ et d'acide chloridrique HCl.

Après une durée de cure des échantillons dans l'eau pendant 28 jours. Ces échantillons sont conservés dans des solutions d'acide sulfurique H₂SO₄ et d'acide chloridrique HCl avec des concentrations de 5%. Le choix d'une concentration de 5 % de H₂SO₄ et HCl est basé sur la bibliographie. [27,28,29]

Pour accélérer le phénomène de dégradation des échantillons, les échantillons ont subi une série d'immersion et de séchage à 60°C selon la norme **ASTM C 342** : Ce protocole a été choisi pour accélérer le vieillissement des bétons causé par l'immersion complète, il est basé sur des cycles de séchage/immersion de 24 heures. Les éprouvettes sont immergées dans de l'eau dosée à 5 % de H₂SO₄ et HCl pendant 4 heures (saturation), puis séchées dans une étuve à 60°C pendant 20 heures. Ce protocole s'appuie sur des tests normalisés de vieillissement des pierres. [30]



Figure IV.17 : Les solutions d'acide sulfurique H_2SO_4 et d'acide chloridrique HCl .

IV.4.6 Perte de masse:

La résistance due aux agressions chimiques des échantillons immergés dans des différentes solutions est évaluée selon la norme ASTM C 267-96 : les éprouvettes sont nettoyées 3 fois avec de l'eau douce pour éliminer le mortier altéré et puis on les laisse sécher pendant $\frac{1}{2}$ heure. Ensuite on procède à la pesée de ces dernières. Cette opération est effectuée après chaque 24 heures (cycle de séchage à $60^\circ C$ / immersion dans l'acide).

Le degré de l'attaque est évalué par la perte de masse (PM) donnée par la formule (2.1) :

$$PM (\%) = [(M1-M2/M1)] \times 100$$

Avec : **M1**, **M2** les masses des éprouvettes avant et après immersion, respectivement.

IV.4.7 Évaluation de La porosité :

Procédure d'essai : [ASTM C642-97]

➤ Etape de l'essai :

- 1- Sécher les éprouvettes dans une étuve de 100 à $110^\circ C$ pendant 24 heures jusqu' à obtention d'une masse constante.

- 2- Immersion des éprouvettes dans l'eau pendant 24 heures.
- 3- Chouffer l'échantillon jusqu'à l'ébullition pendant 5 heures.
- 4- Les éprouvettes sont retirées pour être pesées à l'air et pesée hydrostatique (dans l'eau).

On aura:

A : poids de l'échantillon après l'étuvage.

C : poids de l'échantillon après ébullition (pesée à l'air).

D : poids de l'échantillon après ébullition (pesée à l'eau : hydrostatique)

Alors :

$$V_p (\%) = [(C-A) / (C-D)] * 100$$

Où ; **V_p** : volume des pores en %.



Figure IV.18: Pesée hydrostatique.



Figure IV.19 : *l'appareille pour chauffer (ébullition) du béton.*

IV.4.8 Capacité absorption:

La capacité d'absorption d'un mortier donne une idée générale sur la présence et l'importance des vides (pores). C'est une manière comme une autre de mettre en évidence la compacité du mortier durci. Plus le mortier est compact plus sa capacité d'absorption est faible et donc plus il est étanche. La capacité d'absorption est déterminée par une méthode simple. Les éprouvettes de mortiers sont pesées après étuvage (à 105°C) jusqu'à stabilisation de leurs poids soit (P_s). Ensuite elles sont entièrement trempées dans l'eau pendant 24 heures puis retirées et pesées, soit (P_h)leur poids. La capacité d'absorption est donnée par la relation suivante [62]

$$A (\%) = (P_h - P_s / P_s) \times 100$$

IV.5 Résultats et Discussions:

IV.5.1 Introduction:

Ce travail avait pour but d'étudier le comportement de micros bétons confectionnés de granulats recyclés issus du concassage de brique de maçonnerie. Les travaux ont donc contribué à l'amélioration des connaissances sur les propriétés physiques et mécaniques de ces matériaux et leur influence sur le comportement du béton.

Dans ce chapitre nous allons passer en revue les résultats obtenus après une série de mesures des propriétés des micros bétons confectionnés. Ces mesures sont réalisées sur des

échantillons conservés dans des solutions agressives préparées à base d'acide sulfurique et d'acide chloridrique avec une concentration de 5%. Les tests réalisés sont :

- Résistance à la compression à 28j.
- Résistance à la traction à 28j.
- Résistance à flexion à 28j.
- Porosité
- Absorption.
- Perte de masse.

IV.5.2 Représentation et analyse des résultats :

IV.5.2.1 Avant traitement avec les acides :

IV.5.2.1.1 La résistance à la compression 28 jours :

Pour la détermination de la résistance à la compression, des éprouvettes prismatique 4×4×16 ont été confectionnés. Les essais ont été effectuées sous une presse hydraulique en respectant les prescriptions des règles suivantes :

L'éprouvette est centrée sur le plateau de la presse.

Aucune matière n'est interposée entre l'éprouvette et les plateaux de la presse. La charge est appliquée d'une manière continue jusqu'à la rupture de l'éprouvette.

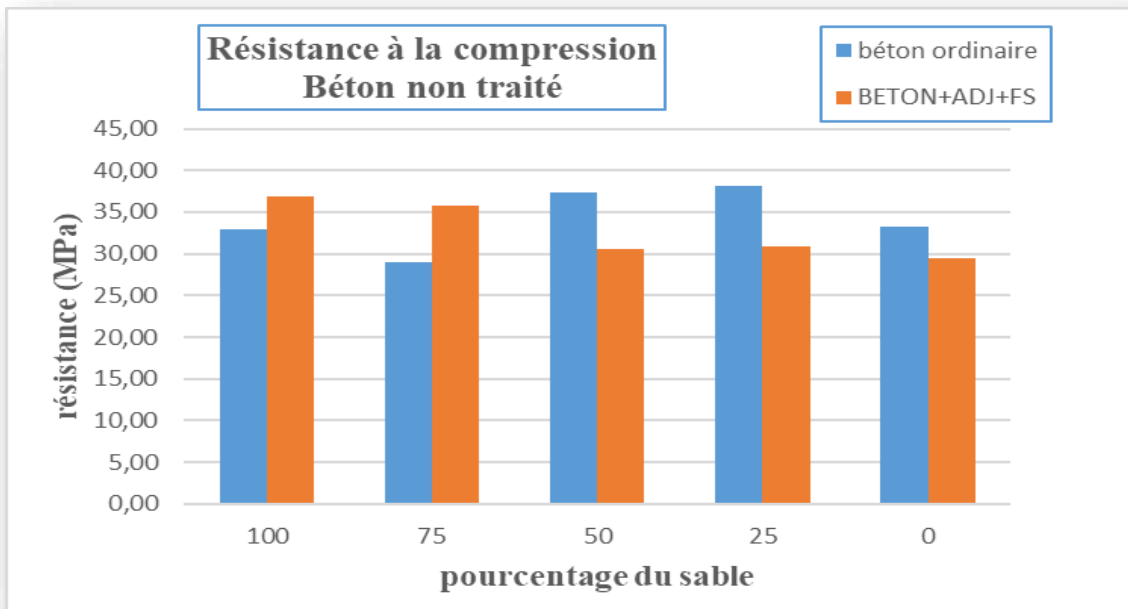


Figure IV.20 : Résistance à la compression (Béton non traité)

D'après la figure IV20., on peut dire :

- La résistance maximale est obtenue pour un béton ordinaire avec 25 % de sable naturel.
- Dans le cas du béton avec fumé de silice adjuvant, la résistance diminue en augmentant la teneur de granulats de brique concassée. Les résistances élevées sont obtenues avec 100% et 75% de sable naturel.

IV.5.2.1.2 La résistance à la flexion 28j :

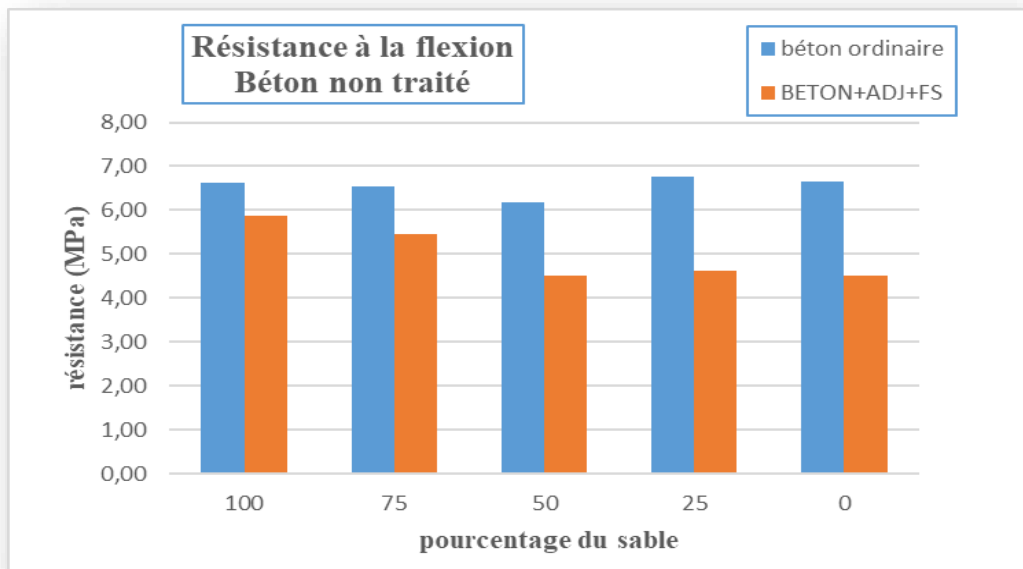


Figure IV.21 : Résistance à flexion (Béton non traité)

IV.5.2.1.3 La résistance à la traction 28j :

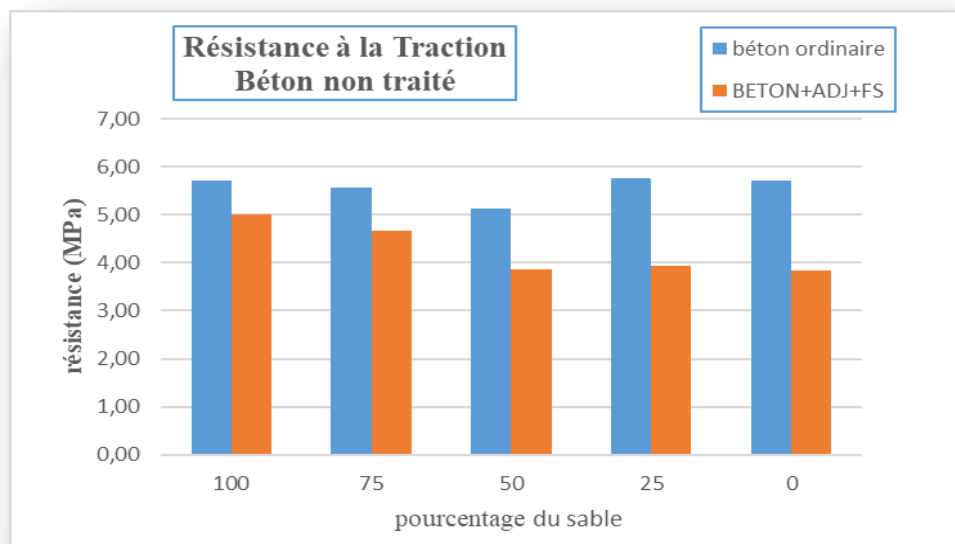


Figure IV.22 : Résistance à traction (Béton non traité)

Commentaire :

Les figures 21 et 22 représentent respectivement les résistances à la flexion et à la traction, d'après ces figures on :

- Les résistances obtenues pour un béton ordinaire sont supérieures à ceux d'un béton contenant la fumée de silice et d'adjuvant.
- Dans le cas d'un béton adjuvant, la résistance diminue lorsque le taux de sable naturel diminue.

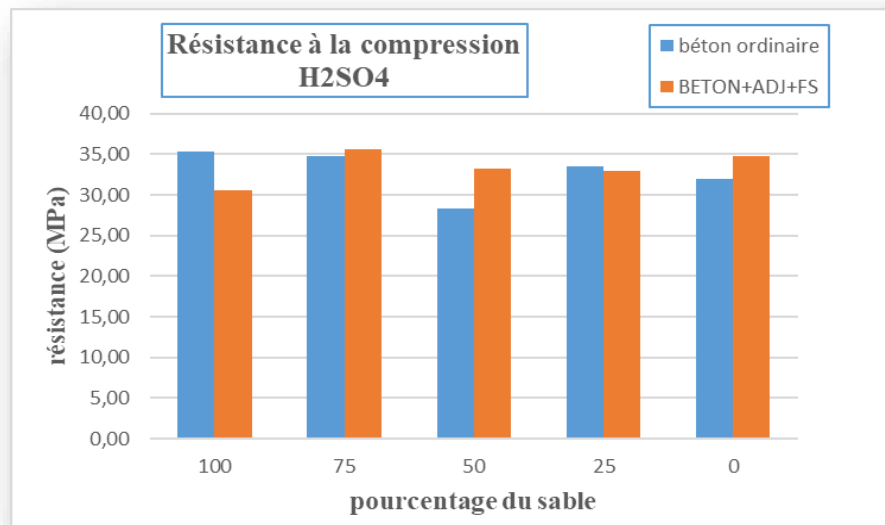
IV.5.3 Après traitement:**IV.5.3.1 Béton traité par H₂SO₄:****IV.5.3.2 La résistance à la compression :**

Figure IV.23: la résistance à la compression (béton traité par H₂SO₄).

Commentaire :

Dans la figure IV.23 qui représente la résistance à la compression pour les bétons conservés

dans H_2SO_4 , dans cette figure, on a :

- Les résistances maximales sont obtenues avec 75% et 100% de sable naturel.
- L'utilisation de fumée de silice et de l'adjuvant a conduit à des résultats meilleures et parfois supérieures à ceux d'un béton ordinaire par exemple dans le cas d'un taux de sable moins de 75%.

IV.5.3.3 La résistance à la flexion :

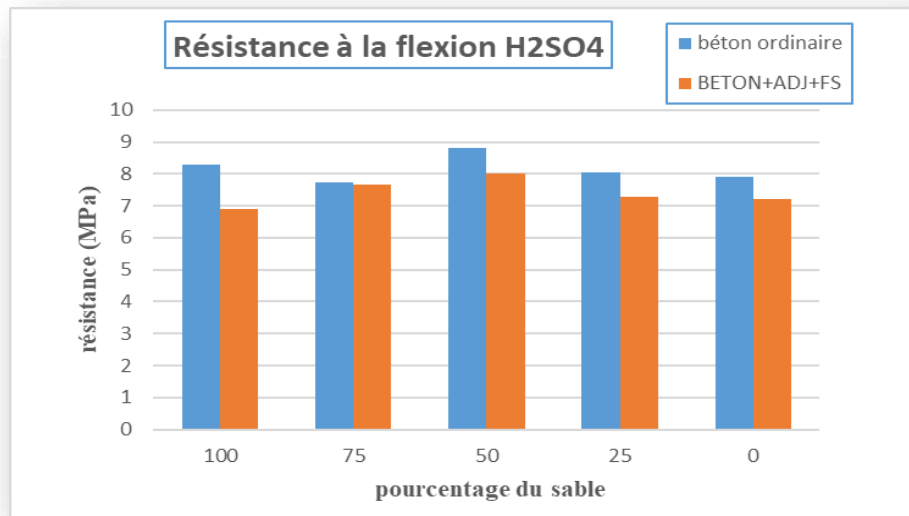


Figure IV.24: la résistance à la flexion (béton traité par H_2SO_4).

IV.5.3.4. La résistance à la traction :

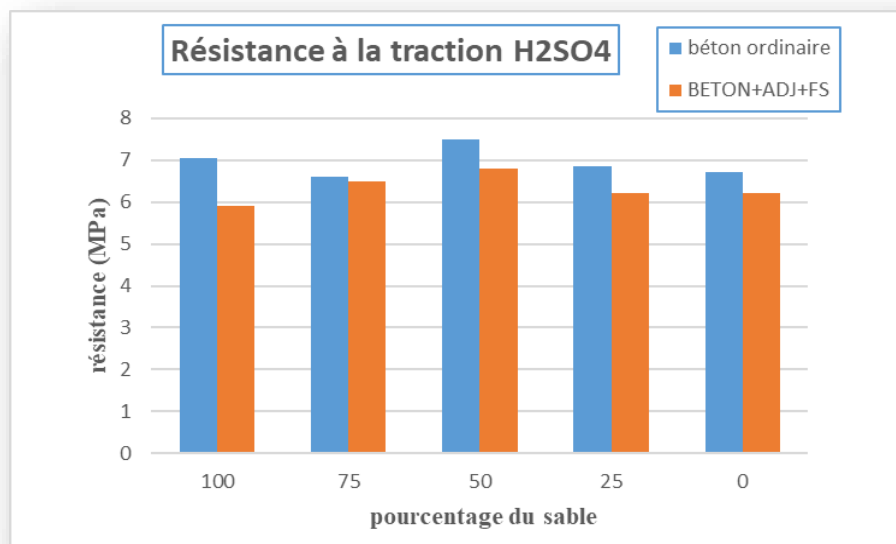


Figure IV.25: la résistance à la traction (béton traité par H₂SO₄).

Commentaire :

D'après les figures IV.24/25 qui représente les résistances à la flexion et à la traction des bétons conservés dans H₂SO₄, on peut conclure que :

- Les résistances élevées sont obtenues pour un taux de sable de carrière de 50%.
- Les meilleurs résultats de résistance sont obtenus pour le béton ordinaire en comparaison avec les bétons contenant la fumée de silice et adjuvant.
- Les résistances à la flexion et à la traction augmentent jusqu'à 50% de sable de carrière ensuite, on remarque une réduction de résistance.

IV.5.4. Béton traité par HCL :

IV.5.4.1. La résistance à la compression :

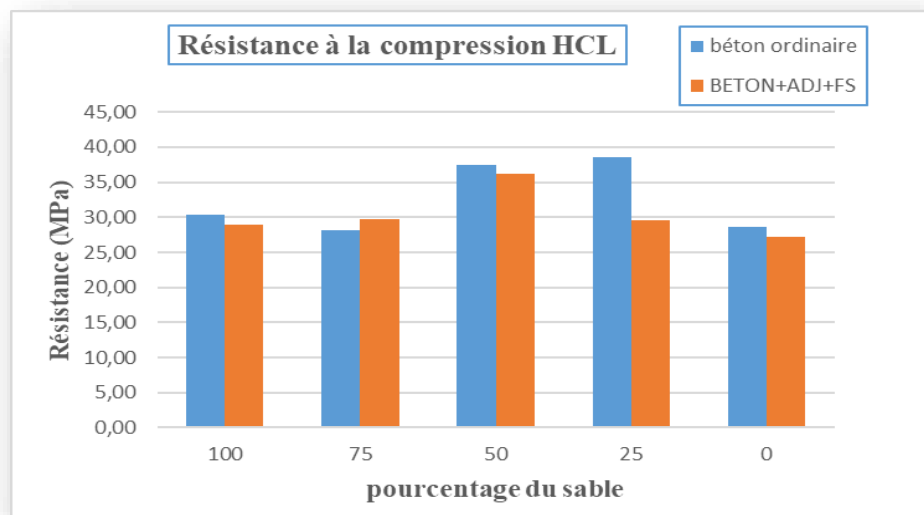


Figure IV.26 : La résistance à la compression (béton traité par HCL).

Commentaire :

La figure IV.26 représente la résistance à la compression des bétons conservés dans le HCL, dans cette figure on a :

- La résistance d'un béton ordinaire est supérieure à celle d'un béton avec fumée de silice et adjuvant.
- Les meilleures résistances sont obtenues dans le cas de béton avec 50% et 25% de sable naturel concassé en comparaison avec les bétons contenant la fumée de silice et adjuvant.

IV.5.4.2. La résistance à la flexion :

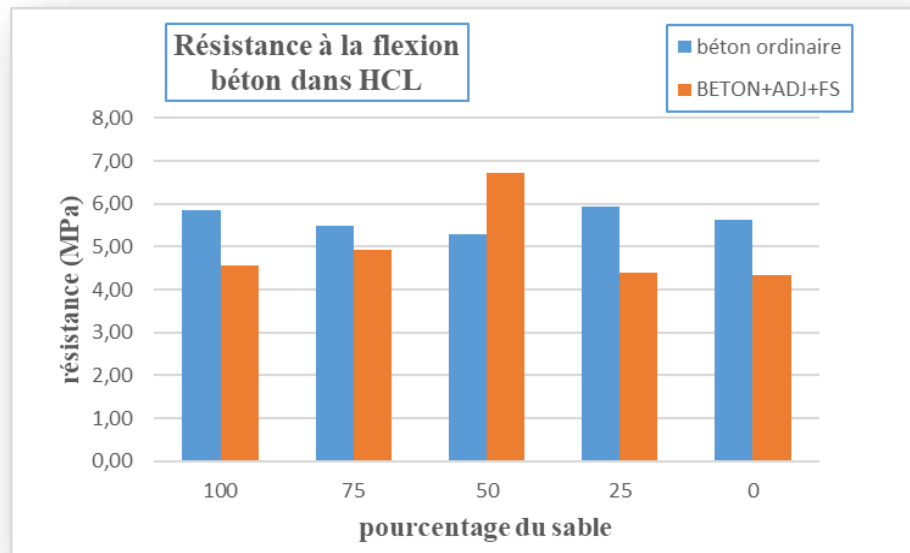


Figure IV.27 : La résistance à la flexion (béton traité par HCL).

Commentaire :

D'après la figure IV.27, on a :

- Les résistances augmentent jusqu'à un taux de sable naturel de 50% ensuite on remarque une réduction de résistance.
- Généralement les résistances élevées sont obtenues dans le cas d'un béton contenant la fumée de silice et adjuvant.

IV.5.4.3. La résistance à la traction :

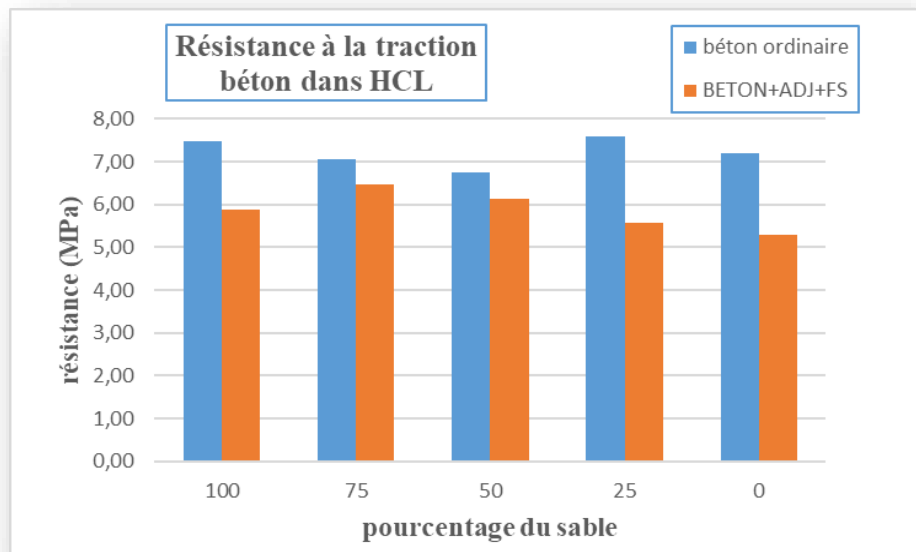


Figure IV.28 : La résistance à la traction (béton traité par HCL).

Commentaire :

La figure IV.28 représente les résistances à la traction des bétons conservés dans HCL. D'après figure on a:

- La résistance à la traction des bétons ordinaire sont supérieures à ceux d'un béton avec fumée de silice et adjuvant.
- Pour les bétons avec fumée de silice et adjuvant, la résistance à la traction augmente pour au toux de sable de 75% ensuite une réduction de résistance dans le cas de 50%, 25% et 0% dz sable naturel.

IV.5.5. Evaluation de La porosité :

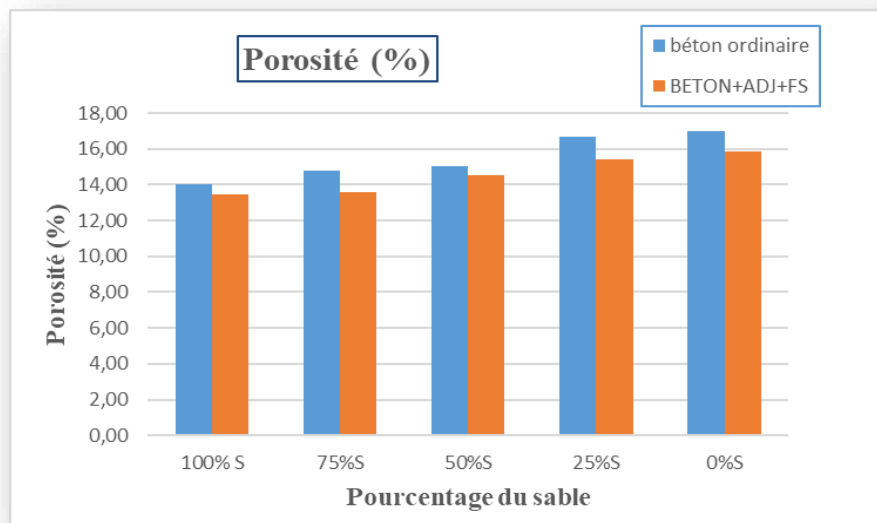


Figure IV.29 : La porosité en fonction le pourcentage du sable concassé.

IV.5.6 Capacité absorption :

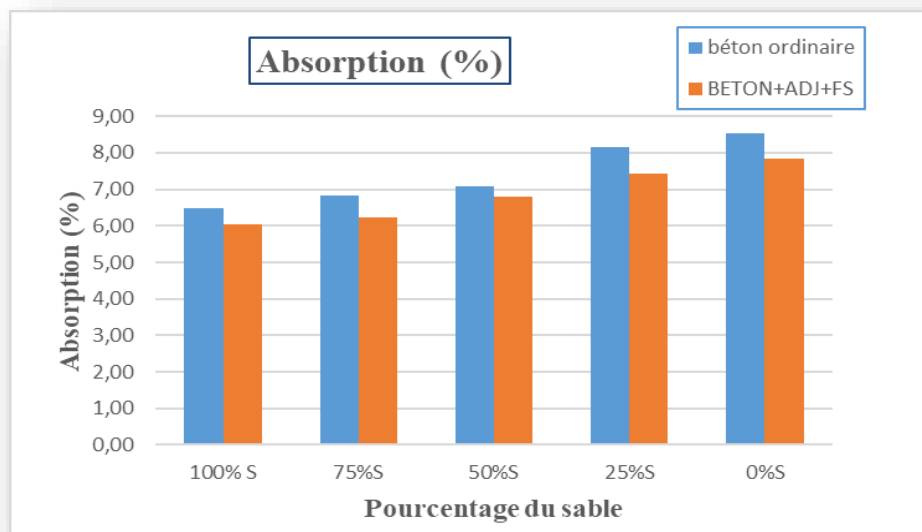


Figure IV.30 : Absorption en fonction le pourcentage du sable.

Commentaire :

La figure IV.29 et IV.30 représente l'absorption et la porosité des échantillons du micro béton confectionné avec l'adjuvant et la fumée de silice, d'après ces figures, on peut voir que :

- La porosité et l'absorption augmentent en réduisant le taux de sable naturel concasse c'est à en augmentant le pourcentage de sable de brique concasse.
- Les échantillons confectionnés avec l'adjuvant et la fumée de silice présentant des porosité et l'absorption faible par rapport à ceux du béton ordinaire.

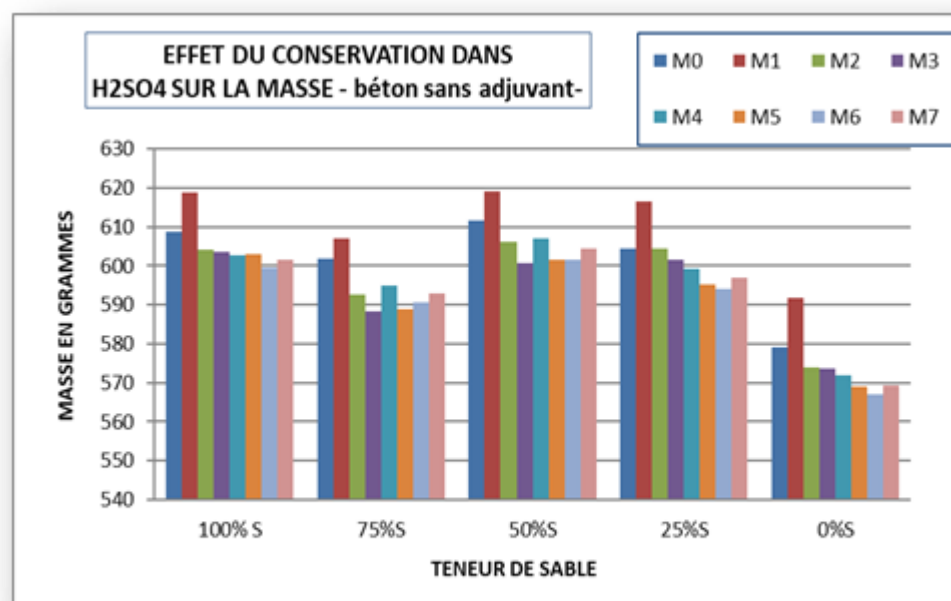
IV.5.7. Perte de masse :**IV.5.7.1. Milieu (H_2SO_4)****IV.5.7.2. Perte de masse (béton sans adjuvant).**

Figure IV.31 : Effet de la conservation dans H_2SO_4 sur la masse de béton (sans adj.)

Commentaire :

D'après la figure IV.31, on peut donner les remarques suivantes :

- La masse la plus faible est remarquée avec 0% de sable naturel c'est-à-dire avec 100% de granulats de brique concassé.
- Pour tous les teneurs en sable, on remarque une réduction de masse de M1 jusqu'à M7 mesurée en fonction de durée de conservation dans H₂SO₄.
- Il y a érosion de la surface des échantillons sous l'effet de H₂SO₄.

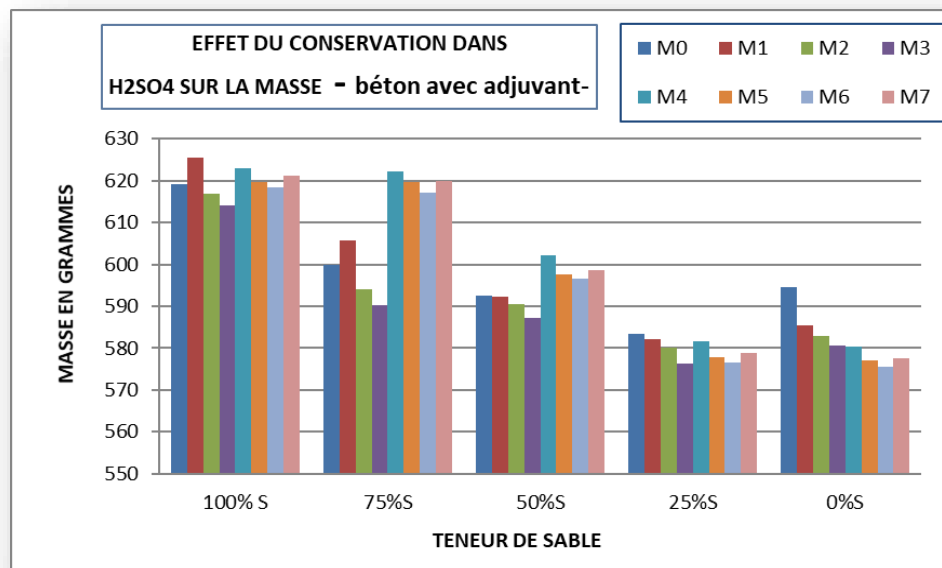
IV.5.8. Perte de masse (béton avec adjuvant) :

Figure IV.32: Effet de la conservation dans H₂SO₄ sur la masse de béton (avec adj.)

Commentaire :

Dans le cas des échantillons de micro béton avec adjuvant et fumée de silice, on peut voir l'influence de la conservation dans H₂SO₄ comme suit :

- Dans le cas de 100% sable concassé, on remarque des pertes de masse très faibles.
- Pour les cas de 75% et 50% de sable naturel, on remarque une légère perte de masse ensuite une augmentation de masse causée par l'augmentation du volume des échantillons.
- Dans ces cas de 25% et 0% de sable concassé, on remarque une légère perte de masse des échantillons.

La fumée de silice et l'adjuvant ont conduit à une compacité meilleure des bétons d'où une réduction de perte de masse expliquée par les masses M1, M2

Qui généralement ont resté constante (absence de l'érosion de la surface des échantillons et parfois une augmentation de masse concassée par le gonflement dû à la présence d'eau dans les pores du béton.

IV.5.9. Milieu (HCL):

IV.5.9.1 Perte de masse (béton sans adjuvant).

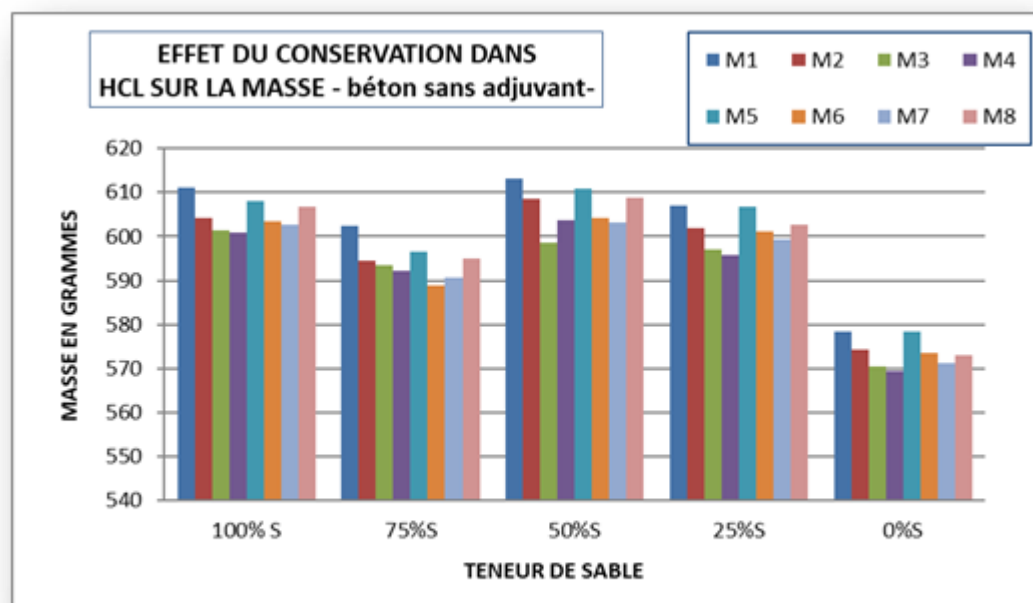


Figure IV.33: Effet de la conservation dans HCL sur la masse de béton (sans adj.)

Commentaire :

La figure IV.33 qui représente la perte de masse des échantillons conservés dans les solutions de HCL, d'après cette figure, on peut voir que :

- Pour tous les teneurs en sable naturel, les pertes de masse sont très faibles et parfois on remarque des masses constantes.

IV.5.10. Perte de masse (béton avec adjuvant) :

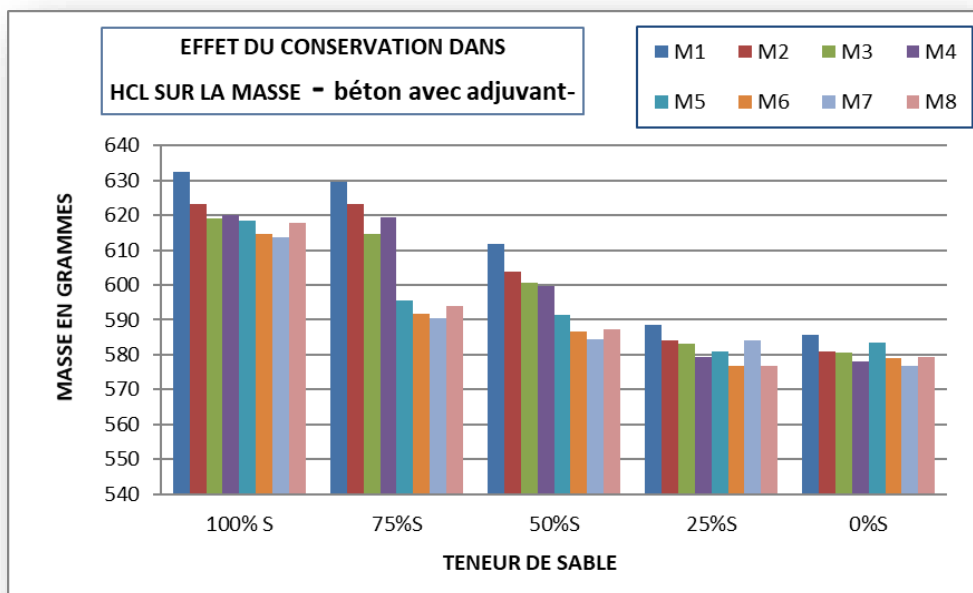


Figure IV.34 : Effet de la conservation dans HCL sur la masse de béton (avec adj.)

Commentaire :

Dans le cas des échantillons de micro béton confectionnés avec adjuvant et fumée de silice et conservés dans HCL, ou peut dire que :

- Pour tous les teneurs en sable naturel, il y a généralement des pertes de masse de M1 à M7.

Dans les figures qui représentent la perte de masse, on remarque certaines perturbations dans quelque masse qui peuvent être dus aux valeurs obtenues pendant la pesée des échantillons.

La conservation des échantillons dans les solutions d'acide H_2SO_4 et HCL, a conduit la réaction des composant du ciment principalement la portlandite et le C-S-H avec ces acides. Cette réaction conduit à la dégradation de la surface exposée aux acide et à son érosion.

Les pertes de masse sont très faibles car l'étude de durabilité sans l'effet des agressions chimique nécessite une longue durée de conservation.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'attaque chimique est la cause principale qui influence la durabilité des matrices cimentaires. L'objectif de notre étude était donc d'analyser le comportement du différent micro bétons après immersion dans des solutions chimiquement agressives.

Ce mémoire avait pour but donc d'étudier le comportement mécanique et durabilité des échantillons de micro béton confectionnés par des granulats recyclés issus du concassage de brique de maçonnerie. Ces échantillons de micro béton ont été conservés dans des solutions d'acide sulfurique (H_2SO_4) et d'acide chloridrique (HCl). Les travaux ont donc contribué à l'amélioration des connaissances sur les propriétés physiques et mécaniques du béton.

On peut alors donner les remarques suivantes :

- La résistance à la compression est maximale est obtenue pour un béton ordinaire avec 25 % de sable naturel (sable de carrière). Dans le cas du béton avec fumé de silice adjuvant, Les résistances à la compression élevées sont obtenues avec 100% et 75% de sable de carrière
- Dans le cas (béton traité par H_2SO_4), Les résistances maximales à la compression sont obtenues avec 75% et 100% de sable de carrière. L'utilisation de fumée de silice et de l'adjuvant a conduit à des résultats meilleures et parfois supérieures à ceux d'un béton ordinaire par exemple dans le cas d'un taux de sable moins de 75%. Les résistances à la traction et flexion est élevées sont obtenues avec un taux de sable de carrière de 50%.
- Dans le cas de micro béton traité par HCL , Les meilleures résistances à la compression sont obtenues dans le cas de béton avec 50% et 25% de sable de carrière en comparaison avec les bétons contenant la fumée de silice et adjuvant. Et pour la résistance à la flexion, généralement les résistances élevées sont obtenues dans le cas d'un béton contenant la fumée de silice et adjuvant.
- L'absorption maximale est obtenue avec 0% de sable de carrière concassé (100% de granulats recyclés). L'absorption des bétons ordinaire et supérieure à cette des bétons avec fumée de silice
- Dans les milieux de H_2SO_4 , La fumée de silice et l'adjuvant ou conduit à une compacité meilleure des bétons d'où une réduction de perte de masse expliquée par les masses M1, M2 (Absence de l'érosion de la surface des

échantillons et parfois une augmentation de masse provoquée par le gonflement dû à la pénétration d'eau dans les pores du béton.

Perspectives

Cette étude nous a permis d'orienter les travaux sur d'autres thèmes :

- Etude de la microstructure suite aux attaques chimiques.
- Modélisation du processus de dégradation chimique.

Références bibliographies

Références bibliographiques

- [1] <https://www.vicat.fr/nos-solutions/nos-expertises/ciment>.
- [2] <https://www.toutsurlebeton.fr/le-ba-ba-du-beton/le-ciment-composition-et-fabrication/>
- [3] CHIHAOUI Ramdane : Durabilité des matériaux cimentaires vis-à-vis d'un Environnement chimiquement agressif (Mémoire de Magister- USTMB d'Oran -2008)
- [4] L. PLISKIN ; La fabrication du ciment ; Edition Eyrolles – p 217- Paris1993
- [5] <http://doc.lerm.fr/lhydratation-du-ciment-portland/>
- [6] Jean P. Mercier, Gérald Zambelli, Wilfried Kurz ; Introduction à la science des matériaux ; PPUR presses polytechniques, P127. 1999 ;
- [7] Université de Sherbrooke GCI 714 - Durabilité et réparations du béton- Chap2
- [8] A.Vichot, J. P. Olivier. La durabilité des bétons, Presses ENPC, 2008. ISBN : 978-2-85978-34-8.
- [9] Concrete structure, properties, and matériels, Prentice-Hall, p. 450, 1986.
- [10] Dreux. G : Nouveau guide du béton. Edition Eyrolles, Paris 1979, 201p.
- [11] Mindess, S., Young, J. F., & Darwin, D. (2003). Concrete. Prentice Hall.
- [12] Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2013). Concrete: Microstructure, Properties, and Materials (4th ed.). McGraw-Hill Education.
- [13] Neville, A. M., & Brooks, J. J. (2010). Concrete Technology (2nd ed.). Pearson Education.
- [14] Neville, A. M., & Brooks, J. J. (2010). Concrete Technology. Pearson Education Limited. [ISBN : 978-0273732198]
- [15] Fiches techniques : Les constituants des bétons et des mortiers (TOME 1), Ciments et bétons (Centre d'information sur le ciment et ses applications).
- [16] CHIHAOUI Ramdane : Durabilité des matériaux cimentaires vis-à-vis d'un environnement chimiquement agressif (Mémoire de Magister- USTMB d'Oran -2008).

- [17] Saida BOUALLEG : Effet des milieux agressifs sur les caractéristiques de durabilité des bétons et des matrices cimentaires (Mémoire de Magister- Université Mohamed Boudiaf de M'sila-2004).
- [18] KERBOUCHE : Influence des ajouts minéraux sur les résistances mécaniques et la durabilité des mortiers (Mémoire de Magister- l'ENSET d'Oran-2009).
- [19] J. P Olivier : livre de " Durabilité des bétons." (A. NONAT : chapitre2 ; V. BAROGHELBOUNY, B. CAPRA, S. LAURENS : chapitre9 ; A. CARLES-GIBERGUES, H. HORNAIN : chapitre11 ; G. ESCADEILLAS, H. HORNAIN : chapitre 12). (Edition : Presse de l'école nationales des ponts et chaussées -2008).
- [20] Dr. Ir. P. Boeraeve : Cours de Béton armé
- [21] GRUBE H., RECHENBERG W. – "Durability of concrete structures in acidic water". Cem. Concr. Res., vol. 19, n° 5, p 183
- [22] H.-J. WIERIG, longtime studies on the carbonatation of concrete under normal outdoor exposure, Hanover, pp. 182-96, march 1984.
- [23] I. LEBER et F.A. BLAKEY, some effects of carbon dioxide on mortars and concrete, ACI J. AMER. Concr. Inst., 53 pp. 295-308 (sept. 1956).
- [24] D.W. HOBBS, deleterious alkali- silica reactivity in the laboratory and under field conditions, Mag. Concr. RES., 45, No. 163, pp. 103-12 (1993).
- [25] Stéphane POYET : Etude de la dégradation des ouvrages en béton atteints par la réaction alcali-silice : Approche expérimentale et modélisation numérique multi-échelles des dégradations dans un environnement hydro-chemo-mécanique variable.
- [26] RECOMMANDATION N°T1-96 aux maîtres d'ouvrage publics relative aux études pour la construction ou la réparation des ouvrages de stockage et de transport de l'eau-NOTE N°3
- [27] Kleinlogel A, « Influence des divers éléments physico - chimique sur les Bétons ». Edition Dunod, Paris, 1960, p. 75 140.
- [28] Ghrici M., Kenai S., Mansour M. S., Kadri E. «Some engineering properties of concrete containing natural pozzolana and silica fume», Journal of Asian Architecture and Building Engineering, November 2006.

- [29] Ghrici M., Kenai S., Meziane E. «Mechanical and durability properties of cement mortar with Algeria, natural pozzolana», Springer Science + Business Media, LLC 2005.
- [30] Cours de Génie Civil « Durabilité et réparation du béton », GCI-714, Université de Sherbrooke, Canada, Internet, 2008.
- [31] <https://www.cairn.info/revue-management-et-avenir-2010>
- [32] KHEMISSI R., « Caractérisation et choix d'une filière de traitement des déchets ménagers et assimilés de la ville d'Oran » thèse de Magister Université d'Oran, 2014.
- [33] Mehdi C. « Les déchets de chantier et le recyclage des matériaux dans le secteur du bâtiment » thèse de fin de formation 2007.
- [34] STAMBOULI M. « Valorisation de débris de verre dans les infrastructures routières : Application au verre industriel, verre ménager et verre mixte », Mémoire de master recherche, 2016.
- [35] CHELABI H, TALEB Z., « Amélioration des propriétés mécaniques du plâtre de construction avec des déchets plastiques et verre ». Mémoire de master, université de Bouira 2017.
- [36] MAEL A, XAVIER GH, CHRISTIAN M, DORIS N. « Lexique à l'usage des acteurs de la gestion des déchets », Collection « Références » du Service de l'Économie, de l'Évaluation et de l'Intégration du Développement Durable (SEEIDD) du Commissariat Général au Développement Durable (CGDD), Mai 2012.
- [37] Mamery Serifou « Béton à base de recyclât : influence du type de recyclât et rôle de la formulation ». Université de Bordeaux département de GENIE CIVIL, Option Géomatériaux-2013.
- [38] <https://www.fr.wikipedia.org/wiki/Recyclage>. Consulté 5-5-2023
- [39] BOURMATTE N. « Granulats recyclés de substitution pour bétons hydrauliques », thèse de doctorat, université des Frères Mentouri Constantine, Mars 2017.
- [40] BONNET S, TURATSINZE A et GRANJU J-L., effets de l'incorporation de granulats en caoutchouc, issus du broyage de pneus usagés sur la résistance à la fissuration d'un mortier de ciment, Annales du bâtiment et des travaux publics, décembre 2004-N° 6
- [41] RAMACHANDRAN V-S., utilisation des déchets et sous-produits comme granulats du béton, CBD-215-F, conseil national de recherches Canada, juin 1981.

- [42] Barakat Abderrezak, « valorisation des déchets de briques dans la réalisation des ouvrages en béton ». Mémoire de magister en génie civil, Université de Ouargla 05/11/2006.
- [43] Naceri Abdelghani and Makhloufi Chikouche Hamina, « Use of waste brick as a partial replacement of cement in mortar ». Waste management 29.8 (2009) : 2378- 2384
- [44] Bourmatte Nadjoua, « Granulats recyclés de substitution pour bétons hydrauliques ». Thèse de Doctorat, Université des frères Metouri Constantine 12 Mars 2017.
- [45] L. Alviset, « Matériaux de Terre Cuite ». Techniques de l'Ingénieur" 1994.
- [46] A. Komar, « Matériaux et Elément de Construction ». Edition MIR 1978.
- [47] E. Oliver, « Technologie des Matériaux de Construction ». Edition ISBN 1976
- [48] R. Del becque, « Éléments de Construction "Bâtiment" ». Edition Delagrave1990.
- [49] Akhtaruzzaman A.A et Hasnat, « Properties of Concrete Using Crushed Brick As aggregate », concrete international, Vol. 5, N°. 2, Feb.1983, p. 58 – 63.
- [50] Devenny A et Khalaf F.M, «The Use of Crushed Brick as Coarse Aggregate in concrete » masonry international, Vol.12, N°. 3, Feb. 1999, p. 81–84.
- [51] MEKHERMECHE Abdeslam. « Contribution à l'étude des propriétés mécaniques et thermiques des briques en terre en vue de leur utilisation dans la restauration des Ksours sahariennes ». Magister en Génie Civil Option : Géo-Matériaux. Ouargla : université kasdi merbah, 2012.
- [52] BELOUADAH MESSAOUDA « Etude de l'influence de la nature des fillers sur les propriétés des bétons à base des matériaux locaux à l'état frais et à l'état durci et soumis aux hautes températures », Thèse de doctorat de l'Université M'sila, Algérie 2018.
- [53] WILLIAM.D, CALLISTER.JR, « Science et génie des matériaux ». Modo lu Editeur, 2001.
- [54] Arezki Tagni Hamou, « Microstructure et physico-chimie des ciments et des bétons ». Thèse de Doctorat, Université de Sherbrooke, 2014.
- [55] Manai K, « Etude de l'effet d'ajouts chimiques et minéraux sur la maniabilité, la stabilité et les performances des bétons autonivelants ». Mémoire de maîtrisées sciences appliquées, Sherbrooke-Canada, 1995

- [56] juin 1970. Regourd M, « Hydratation du ciment Portland, dans le béton hydraulique ». Édité par baron J. Et Saute Rey R., 1982, Presses de l'école nationale des ponts chaussées, ISBN 2-85978-033-5, p.193-221.
- [57] Rao, A., Jha, K. N. ET Misra, S. (2007). Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete. Resources, Conservation and Recycling, volume 50, numéro 1, p.71-81.
- [58] <https://sodismac.dz/wp-content/uploads/2019/05/CEM-AL-42.5-SR5.pdf>
- [69] R.DUPAIN ; J.C.saint-arroman»GRANULATS.SOLS.CIMENTS ET BÉTONS
- [60] Safi B. « les méthodes composition de béton », SL, pp1-5. 2011.
- [61] « J.Festa ; G.Dreux »Eyrols, Nouveau guide du béton et ses constituants, huitième édition, troisième tirage 2007.
- [62] Lane D. S. and Ozyildirim, «Evaluation of the potential for internal sulphate attack through adaptation of ASTM C 342 and the Duggan test», Cement, Concrete and aggregates; Vo. 21, N°1, pp. 43-58, 1999.