



**Ministère de l'enseignement supérieure
et de la recherche scientifique**

Université Mohamed Boudiaf - M'sila



Faculté de technologie

Département de GENIE CIVIL

FILIERE : Génie Civil

SPECIALITE : Matériaux.

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de **MASTER**

Par : chaab kamel

THEME

***Elaboration d'un béton résistant aux attaques des chlorures
et sulfates par la méthodologie de plan d'expérience***

Nom et prénom

Enseignant

Pr. Baali laid

Pr. BENCHEIKH Mohamed

Dr. NasrAbdlghanei

Université M'sila

Université M'sila

Université M'sila

Président

Rapporteur

Examineur

Promotion : 2021/2022



REMERCIEMENT

D'abord je remercie Allah de m'avoir donné le courage et la détermination nécessaires pour finaliser ce travail.

Il ne m'aurait été possible, à moi seul, d'achever le présent travail sans l'assistance, l'appui et le suivi minutieux de mon encadreur le professeur **BENCHEIKH MOHAMED.**

Je tiens aussi à remercier l'ingénieur de laboratoire de développement Géomatériaux Université de M'sila **CHOUKEIR SAWSEN** pour leur conseil, leur soutien et leur aide précieuse pendant la durée de mes travaux.

Mes sincères remerciements vont au chef de département de génie civil **Mr. BAALI LAÏD**, mes remerciements vont aussi au président et aux membres du jury de soutenance qui m'ont fait l'honneur d'examiner ce travail.



Chaab kamel





DEDICACE

Je dédie ce modeste travail en premier lieu à la personne la plus chère pour moi dans ce monde, ma mère qui est la fleur de ma vie, le symbole de l'amour et la tendresse qui s'est sacrifié pour mon bonheur et ma réussite.

Mon père pour leurs sacrifices.

Mes chères sœurs et mes chers

frères

Je tiens également à remercier tous ceux qui m'ont aidé et soutenu de près ou de loin. Loin, surtout ma femme, mes filles Tasneem et Aisha, mes frères et sœurs, toute ma famille, mes amis et tous ceux qui me soutiennent dans la réalisation de mes études..



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

بِسْمِ اللَّهِ

الخلاصة

تأثير أحماض الكبريتات والهيدروكلوريك على متانة الهياكل الخرسانية وتأثيرها على الخواص تؤدي ه متانة الخرسانة. الميكانيكية والكيميائية للخرسانة الطازجة والمتصلبة.

ه التجارب إلى إيجاد أفضل جرعة من الأسمنت والجرعات المختلفة للإضافات الم

كورة على وجه الخصوص من أجل حل المشاكل التي تواجه داخل الهياكل

أخيرًا ، أظهرت النتائج أن أفضل الحلول المقدرة لتجنب أي نوع من التدهور في الهياكل المعرضة

لببئات عدوانية يتلخص في الإعداد الجيد للخرسانة من خلال مراعاة الحد الأدنى من إضافة التربة

لتقليل المسامية والنفا

ية. من الخرسانة المعمرة

وبالتالي فإن المتانة تتأثر به

ه العوامل العدوانية ، حيث تؤدي زيادة تركيز حامض الكبريتيك إلى انخفاض في قوة الخرسانة ،

وبالتالي تتأثر المتانة بشكل سلبي

الكلمة الأساسية: متانة الخرسانة المعرضة لأنواع مختلفة من التربة القاسية ؛ تأثير إضافات التربة

القوية مثل الطين على مسامية ومتانة الخرسانة

Résumé :

l'influence des acides sulfatiques et chloridriques sur la durabilité des ouvrages en béton ;leurs impacts sur les propriétés mécaniques et chimiques du béton frais et durci .Cette étude expérimentale expose dans un milieu agressif avec différents ajouts (adjuvants et sols) à dosage variés influençant sur la durabilité du béton .Ces expériences mènent à trouver le meilleur dosage en ciment et en dosages variés des ajouts notamment cités afin de résoudre les problématiques rencontrées au sein des ouvrages .

Enfin les résultats ont montré que la meilleure solution estimée pour éviter toute sorte de détérioration des ouvrages soumis à des milieux agressifs se résume dans la bonne confection du béton en respectant un seuil minimale d'ajout de sol afin de minimiser la porosité et la perméabilité du béton durable.

la durabilité donc est affectée par ces agents agressifs L'augmentation de la concentration de l'acide sulfurique engendre une diminution de la résistance du béton ainsi la durabilité est affectée négativement.

Mot clé : Durabilité du béton soumis aux différents types de sols agressifs ; L'impact des ajouts de sols agressifs tel que l'argile sur la porosité et la durabilité du béton.

Abstract:

Developed steadily since the late nineteenth century, concrete has become the most prevalent building material in the world. Knowing that concrete has the ability to withstand chemical attacks, it is still necessary to know under what conditions? And How? because there are situations in which concrete structures deteriorate quickly or severely more than expected because of several factors we presented in this thesis. Diagnostic methods via several techniques can be used to determine the state of degradation due to chemical attack. According to the state of damage, preventive procedures and rehabilitation will be used to ensure the safety of the structure.

The strength and durability of concrete under difficult conditions has become a common topic of great interest, and thus a common area of research.

In this study, we learn about the behavior of soil type in concrete against chemical attack, as this study is classified in the same major specialization.

The aim of this thesis is to state, define, study and explain the type of concrete soil. Because it will also determine the strength and durability of concrete. This study focuses on the chemical attack on concrete. identifying resources,

Keywords: , porosity, chemical attack, aggressive environments and durability.

Introduction générale

La durabilité est une propriété de génie du béton, qui détermine la durée de service des structures en béton de manière significative.

Traditionnellement l'aptitude d'un béton à résister à la dégradation – c'est-à-dire sa stabilité - était d'apprécier par sa résistance à la compression.

liée étroitement à la structure poreuse, à la perméabilité e

L'attaque chimique constitue un sujet d'importance croissante, en raison de la propagation des dommages des structures en béton

Les agents chimiquement agressifs peuvent être classés en quatre catégories.

- Les gaz, d'origine naturelle où résultent de pollutions atmosphérique ;
- Les liquides inorganiques ou organiques qui, indépendamment de leurs éventuels effets purement physiques, agissent surtout par leur caractère acide ou basique, et par les ions agressifs qu'ils peuvent contenir l'attaque par les sulfates ; •

L'attaque par les acides ;

- l'alcali-réaction

L'Algérie a connu, ces dernières années des problèmes de dégradation qu'ont touchée des constructions de différentes natures équipement habitation ouvrage d'art.

Le choix de ce thème s'accroît sur la préservation du patrimoine d'Algérie, afin de limiter les détériorations qui se manifestent au niveau de ce dernier le but principal, d'étudier le béton avec différents sites.

Afin d'aboutir et de résoudre les problématiques recentrées, de rendre le patrimoine algérien plus ou moins durable.

Bâtir a toujours été l'un des premiers soucis de l'homme et l'une de ses occupations majeures.

A ce jour, la construction connaît un grand essor dans la plupart des pays, et très nombreux sont les professionnelles qui se livrent à cette activité. Cependant, si le

métier de construire a une grande importance pour l'homme, la durabilité des ouvrages constitue l'une de ces préoccupations essentielles dans la conception,

La durabilité est une propriété de génie du béton, qui détermine la durée de service des structures en béton de manière significative.

Traditionnellement l'aptitude d'un béton à résister à la dégradation – c'est-à-dire sa stabilité - était d'apprécier par sa résistance à la compression. Liée étroitement à la structure poreuse, à la perméabilité.

Note travaille consiste à développer les idées en cinq chapitre avec un objectif et conclusion dont nous clôturons ce mémoire qui rappelle les perspectives de notre travail, ainsi que les principales résultats acquis.

Sommaire

Chapitre 016

Chapitre 01 : Etude bibliographique.....	1
I -1-Introduction :.....	1
I-2-le ciment :.....	1
I -2-1- Définition du ciment :.....	1
I -2-2- Etapes de fabrication du ciment Portland :.....	1
I -2-3- Les constituants du ciment :.....	4
I -2-3-1- Le clinker :.....	5
I -2-3-2- Le gypse (CaSO_4) :.....	6
I -3-Les constituants du béton (l'granulats) :.....	6
I.4-2-. Composition du béton :.....	8
I.4-3- Le durcissement du béton :.....	9
I.4-3-1- La réaction d'hydratation :.....	9
I.4-3-2- Description de la microstructure :.....	9
I.4-4- Propriétés des bétons :.....	9
I.4.4-1- Propriétés du béton frais :.....	10
I.4-4-2- Propriétés du béton durci :.....	10
I.4-4-3-Résistance à la compression (NF EN-12390-3) [13] :.....	10
I.4-5- Différents types de bétons :.....	11
I.4-5-1- Béton autoplaçant (BAP):.....	11
I.4-5-2- Béton de haute performance (BHP) :.....	11
I.4-5-3- Béton de fibre Béton :.....	11
I.4-5-4- Béton a durcissement :.....	11
I.4-5-5- Béton léger :.....	11
I.4-5-6- Béton lourd :.....	11
I.4-5-7- Béton ordinaire :.....	12
I-7- Les attaques chimiques du béton :.....	12
I -7.1) Les attaques sulfatiques:.....	12
I -7-1-1) Définition de l'attaque sulfatique :.....	12
I.5.Formulation du béton :.....	12
I -7-1-2) Sources des sulfates :.....	13
I -7-1-3) Mécanismes d'attaques:.....	15
I-7-1-4) Processus d'attaque par les sulfates internes :.....	16
I-7-1-5)Processus d'attaque par les sulfates externes :.....	18
I-7-2) Attaque par les acides :.....	20
I-7-2-1) Définition :.....	20

I-7-2-2) Les différents types des acides :	21
I-7-2-3) Mécanisme d'attaque des acides :	23
I.7.3-Attaque par les ions chlorures :	24
I.7.3.1:Introduction :	24
I.7.3.2: Définition de l'attaque par les ions chlorures :	24
I.7.3.3: Source de l'attaque des ions chlorures :	25
I -7-4-2) Les différents types d'alcali-réaction :	25
I -7-4-3) Conditions d'apparition de l'alcali-granulat :	26
I -7-4-4) Source de cette attaque :	26
I-8-Conclusion :	28
Références et bibliographiques :	29
<i>Chapitre 02</i>	31
<i>chapitre 02 Méthode des plans expérience</i>	32
<i>II.1 : Introduction :</i>	32
<u>II.1.1</u> : Choix de la méthode d'expérimentation :.....	32
<i>II.2 : Les différents types de facteurs:</i> 32	
<u>II.3</u> .facteurs continus :	32
<u>II.4</u> : Notion d'espace expérimental.....	33
II.5.1 : Présentation de logiciel « Minitab » :.....	37
<i>Chapitre 03</i>	38
<i>Chapitre 03 : Matériaux et essais</i>	39
III.1.Introduction:	39
III.2.SABLE D'OUED (BOUSSAADA):	39
III.2.1.Origine du sable :.....	39
III.2.2.Caractéristiques physiques des sables utilisés:	39
III. 2.2.1. Masse volumique (absolue) : NF P 18-555	39
III.2.2.2.Masse volumique apparente : NF P 18-554.....	40
III.2.2.2.1. Masse volumique apparente à l'état lâche:	40
III.2.2.2.2. Masse volumique apparente à l'état compact :	41
III .2.2.3. Porosité : (NF P 18-554).....	42
III. 2.2.4. Compacité	42
III.2.2.5.L'indice des vides :.....	42
III.2.2.6.Equivalent de sable : NF P 18-598	43
III.2.2.7.Degré d'absorption d'eau : NF P 18-555	44
III.2.2.8.Analyse granulométrique : (NF P 18-560)	45
III.2.2.9.Module de finesse :.....	47
III.2.2.10.Les Caractéristiques chimiques du sable de Boussaâda :	48
III .3. Gravier :	48
III. 3.1.Gravier concassé :.....	48
III.3.1.1.Origine de gravier:.....	48
III.3.1.1.1.Classes granulaires:	48
III.3.1.1.2.Résistance à la compression de la roche d'origine:	48
III.3.1.2.Caractéristiques physiques du gravi utilisé:	48
III.3.1.2.1. Masse volumique apparente:	48
III.3.1.2.2. Masse volumique absolue :.....	49
III.3.1.2.3. Porosité, compacité et indice des vides : NF P 18-554	50

III.3.1.2.4.Degré d'absorption d'eau : NF P 18-554.....	51
III.3.1.2.5.Analyse granulométrique :.....	51
III.3.1.3.Les caractéristiques mécaniques des graviers utilisés:.....	52
III.3.1.3.1.Essai de résistance au choc (Essai Los Angeles) : NF P18-573.....	53
III.3.1.3.2.Caractéristiques chimiques des graviers utilisés :.....	54
III.3.2.Gravier roulée :.....	54
III.3.2.1. Origine de gravier:.....	54
III.3.2.1.1.Classes granulaires:.....	54
III.3.2.2. Caractéristiques physiques du gravier utilisé:.....	55
III.3.2.2.1.Masse volumique apparente:.....	55
III.3.2.2.2.Masse volumique absolue :.....	56
III.3.2.2.3.La densité absolue :.....	56
III.3.2.2.4. Porosité, compacité et indice des vides : NF P 18-554.....	56
III.3.2.2.5.Degré d'absorption d'eau : NF P 18-554.....	57
III.3.2.2.6.Analyse granulométrique :.....	57
III.3.2.3.Les caractéristiques mécaniques des graviers utilisés:.....	58
III.3.2.3.1.Essai de résistance au choc (Essai Los Angeles) : NF P18-573.....	59
III.4. Type de mélange :.....	59
III.4.1. Mélange1 : gravier concassé (60% 8/15, 40% 3/8) :.....	59
III.4.2. Mélange 2 : (roulée 20%3/8 et 30 % 8/15 ; concassée 20%3/8 et 30 % 8/15).....	61
III.4.3.mélange 03 (gravier roulée) (60% 8/15, 40% 3/8) :.....	64
III.5.Ciment :.....	66
III.5.1.Caractéristiques du ciment CEMI 42,5:.....	66
III.5.1.1.Description :.....	66
III.5.1.2.Caractéristiques mécaniques et physiques du ciment utilisé :.....	66
III.5.1.3. Les caractéristiques chimiques du ciment utilisé:.....	66
III.6.Calcul de la proportion des constituants :.....	66
III.6.1.Formulation du béton Méthodes de Dreux_Gorisse :.....	67
III.8. composition des mélanges.....	73
III.8.1.Préparation des mélanges :.....	75
III.8.1.1Etapes de préparation :.....	75
III.8.2. La cure des éprouvettes.....	76
III.8.2.1 Humidité.....	77
III.8.2.2 Sulfate :.....	78
III.8.2.3 Chlorure :.....	78
III.8.2.4 Eau :.....	79
III.8.3. Essai de compression (la norme P 18-406).....	80
III.8.4. La porosité accessible à l'eau :.....	80
III.8.5. Méthode expérimentale :.....	81
Conclusion :.....	85

CHAPITRE 0486

Chapitrer 04 Résultats et interprétation.....	87
IV.1- Introduction :.....	87
IV.2- Résultats des essais :.....	87
IV-2.1- Les diagrammes et les graphes donnez par logiciel Minitab :.....	87
IV- 2.2- graphique des effets principaux pour résistance.....	88
IV-2.3- Diagramme des interaction pour résistance.....	90

IV-2.4- Graphique des effet principaux pour porosité.....	93
IV-2.5- Diagramme des interactions pour porosité	95

Chapitre 05	100
-------------------	-----

Chapitre 05 Conclusion générale :.....	101
--	-----

Liste des figure

Chapiter01

<i>Figure I -1: Etapes de fabrication du ciment.</i>	<i>2</i>
<i>Figure I -2 : Grains polycristallins d'un ciment Portland anhydre (image obtenue par microscopie optique en lumière réfléchie sur section polie légèrement attaquée par HNO₃) :.....</i>	<i>4</i>
<i>Figure I -3 : Les constituants du ciment.....</i>	<i>4</i>
<i>Les Figure I -4 : Microphotographie d'un clinker. [1]</i>	<i>5</i>
<i>fig. I -5- Type de gravier[4].....</i>	<i>7</i>
<i>Figure I -6: Des cas pathologiques d'éléments en béton en contact de sulfate. [16]</i>	<i>13</i>
<i>Figure I-7- L'origine des sulfates (interne ou externe). [17]</i>	<i>14</i>
<i>Figure I-8:L'attaque par les sulfates. [18]</i>	<i>15</i>
<i>Figure I-9-: La formation de l'ettringite secondaire. [19]</i>	<i>16</i>
<i>Figure I-10-: Eprouvette de béton dégradée après 5ans de contact avec des sols riches en sulfates. [19]</i>	<i>18</i>
<i>Figure I-11: La détérioration des silos-tours en béton due à l'attaque des acides d'ensilage. (Photo offerte par : Thomas P. Rylett Ltd., ingénieur-conseil en structures). [19].....</i>	<i>20</i>
<i>Figure I.12: Agression du béton par activité des chlorures. [21]</i>	<i>24</i>
<i>Figure I -13-: facteurs intervenant sur l'apparition des 3 conditions nécessaires au déclenchement de l'alcali-réaction. [1]</i>	<i>26</i>
<i>Figure I -14: Exemples bétons dégradés par l'alcali-réaction. [22]</i>	<i>27</i>

chapitre02

<i>Figure II. 1 : le niveau bas, le niveau haut, et le domaine d'un facteur.....</i>	<i>34</i>
<i>Figure II. 2: l'espace expérimental d'un facteur.</i>	<i>34</i>
<i>Figure II. 3: les points expérimentaux dans un espace expérimental.</i>	<i>35</i>
<i>Figure II. 4: les points expérimentaux dans un domaine d'étud.....</i>	<i>36</i>

chapitre03

<i>Figure III.2 : La courbe granulométrique du sable (0/5).....</i>	<i>47</i>
<i>Figure III.3 : La courbe granulométrique des graviers concassés (3/8-8/15)</i>	<i>52</i>
<i>Figure III.4 : Appareil de l'essai Los Angeles.</i>	<i>53</i>
<i>Figure III.5 : La courbe granulométrique des graviers roulée (3/8-8/15-)......</i>	<i>58</i>
<i>Figure III.06 : La courbe granulométrique des graviers concassés (3/8-8/15) mélange n 01.</i>	<i>61</i>
<i>Figure III.7 : La courbe granulométrique des graviers (roulée 20%3/8 et 30 % 8/15 ; concassée 20%3/8 et 30 % 8/16) mélange 02.....</i>	<i>63</i>

Figure III.8 : La courbe granulométrique des graviers roulés (3/8-8/16-) mélange 03.	65
Appellation des mélanges :	67
Figure II.9.dosage de ciment.....	68
Figure III.12: Courbe Granulométrique.	69
figure III.13. type de sol.....	71
Figure III.14 Machine broyeur (du laboratoire de développement Géomatériaux université de M'sila ,prof : ben cheikh mouhamed	72
figure III.15.type de sol après broyage.....	72
Figure III.16 le malaxeur utilisé et Eprouvettes cubique et cylindrique	76
Figure III.17. Humidificateur	77
Figure III.18. Bassin d'eau et solution de sulfate de sodium.....	78
Figure III.19. Bassine d'eau et solution de chlore	78
Figure III.20.balance et four étuve.....	79
Figure III. 21: Presse hydraulique pour l'essai de compression (avec une..... pression de 300KN).	80

chapitre04

Figure IV.1 . graphique des effets principaux pour resistance	88
Figure IV.2. Diagramme des interaction pour resistance.....	90
Figure IV.3. Graphique des effet principaux pour porosité.....	94
Figure IV4 Diagramme des interaction pour porosité.....	95

Liste des tableaux

Tableau 1.composants du béton menacés par la corrosion	23
Tableau III.1 : Masse volumique absolue du sable de Boussaâda.....	40
Tableau III .2 : Masse volumique apparente du sable de Boussaâda à l'état lâche.	40
Tableau III.3 : Masse volumique apparente du sable de Boussaâda à l'état compact	41
Tableau III.4: la porosité, la compacité et l'indice de vide Pour le sable de Boussaâda.....	42
Tableau III.5 : Equivalent du sable de Boussaâda.....	44
Tableau III.6 : Comparaison des résultats.	44
Tableau III.7 : Degré d'absorption du sable de Boussaâda	45
Tableau III.8 : analyse granulométrique du sable d'oued (O	46
Tableau III.9 : Analyse chimique du sable de BOUSAADA.....	48
Tableau III.10 : Masse volumique apparente du gravier concassé 8/16 a l'état lâche	49
Tableau III.11: Masse volumique apparente du gravier concassé 8/16 a l'état compact.....	49
Tableau III.12: Masse volumique apparente du gravier concassé 3/8 a l'état lâche . Erreur ! Signet non défini.	
Tableau III.13: Masse volumique apparente du gravier concassé 3/8 a l'état compact.....	49
Tableau III.14 : Masse volumique absolue du gravier concassé.	50
Tableau III.15 : Porosité, Compacité Et Indice Des Vides.	50
Tableau III.16 : Degré d'absorption d'eau du gravier concassé.	51
Tableau III.17 : Analyse granulométrique du gravier concassé 3/8	51
Tableau III.18 : analyse granulométrique du gravier concassé 8/15.....	52
Tableau III.19. : Caractéristiques mécaniques du gravier utilisé.....	53

Tableau III.20 : Classification des roches en fonction du coefficient LA.....	54
Tableau III.21. : Analyse chimique de la pierre concassée.....	54
Tableau III.22: Masse volumique apparente du gravier roulée 8/16 à l'état lâche	55
A l'état compact.....	55
Tableau III.23: Masse volumique apparente du gravier roulée 8/16 à l'état compact.....	55
Tableau III.24: Masse volumique apparente du gravier roulée 3/8 à l'état lâche	55
A l'état compact.....	55
Tableau III.25: Masse volumique apparente du gravier roulée 3/8 à l'état compact.....	55
Tableau III.26 : Masse volumique absolue du gravier roulée.	56
Tableau III.27 : la densité du gravier roulée.	56
Tableau III.28 : Porosité, Compacité Et Indice Des Vides.	56
Tableau III.29 : Degré d'absorption d'eau du gravier roulée.....	57
Tableau III.30 : Analyse granulométrique du gravier roulée 3/8.	57
Tableau III.31 : analyse granulométrique du gravier roulée 8/16.....	58
Tableau III.32. : Caractéristiques mécaniques du gravier utilisé.	59
Tableau III.33 : Classification des roches en fonction du coefficient LA. Erreur ! Signet non défini.	
TABLE III.34 : Masse volumiques absolues des mélanges 02 3/8 et 8/16 du gravier concassé...59	59
TABLE III.35 : Masse volumiques apparentes des fractions 3/8 et 8/15 du gravier concassé.....59	59
Tableau III.37 : Porosité, Compacité Et Indice Des Vides.	60
Tableau III.38 : Degré d'absorption d'eau du mélange 01.	60
TABLE III.39 – Résultat de l'analyse granulométrique de gravillon concassé ((40%3/8)/(60%8/15))..... mélange n 01.....	61
TABLE III.40 : Masse volumiques apparentes de gravier de Mélange 2.....	61
TABLE III.41 : Masse volumiques apparentes de gravier de Mélange 2.....	62
TABLE III.42 : Masse volumiques apparentes de gravier de Mélange 2.....	62
TABLE III.43 : Masse volumiques absolues de gravier de Mélange 2.....	62
Tableau III.44 : Degré d'absorption d'eau de gravier du mélange 02.....	62
Tableau III.45 : Résultat de l'analyse granulométrique de gravillon (roulée 20%3/8 et 30 % 8/15 ; concassée 20%3/8 et 30 % 8/15) mélange n 03.....	63
TABLE III.46 : Masse volumiques apparentes des fractions 3/8 et 8/16 du gravier roulé.....	64
TABLE III.47 : Masse volumiques apparentes des fractions 3/8 et 8/15 du gravier roulé.....	64
TABLE III.48 : Masse volumiques apparentes des fractions 3/8 et 8/15 du gravier roulé.....	64
Tableau III.49 : Porosité, Compacité Et Indice Des Vides.	64
Tableau III.50 : Degré d'absorption d'eau du mélange 02.	65
Tableau III.51 : Résultat de l'analyse granulométrique de gravillon roulé ((40%3/8)/(60%8/15)) mélange n 03	65
Tableau III.54 : Composition de béton pour 0.0071 m ³	67
Tableau III.55. Valeurs de G coefficient granulaire	68
Table III.56 mélange 01 : dosage ciment 400kg/m ³ , ajout 20%	73
Table III.57 mélange 02 : dosage ciment 600kg/m ³ , ajout 20%.....	73
Table III.58 mélange 03 : dosage ciment 400kg/m ³ , ajout 40%.....	74
Table III.59 mélange 04 : dosage ciment 600kg/m ³ , ajout 40%.....	74
Table III.60 mélange 01 niveau des facteurs	81
Tableau III.61. de combinaison.....	84

Chapitre 01

Etude bibliographique

Chapitre 01 : Etude bibliographique

❖ connaissance générale :

I -1-Introduction :

Les matériaux cimentaires sont les matériaux les plus utilisés au monde. Ce sont essentiellement eux qui façonnent notre environnement. Voies de circulation, ouvrages d'art et d'assainissement, bâtiments de toute nature, édifices historiques, rien n'échappe à leur omniprésence.

Le ciment est un composant essentiel des matériaux cimentaires comme le béton. Il assure une fonction mécanique, car il lie le squelette granulaire, mais il est aussi en grande partie responsable de la tenue à long terme du matériau béton. La conception d'un béton est extrêmement liée à l'environnement dans lequel va être exposé durant sa durée de vie. [1]

I-2-le ciment :

I -2-1- Définition du ciment :

Bien que déjà utilisé par les Romains, le béton a eu le développement qu'on lui connaît grâce à la découverte du ciment Portland au XIXe siècle. Celui-ci a été breveté par « Aspdin » sur la base des travaux de Louis Vicat sur les chaux hydrauliques. [2]

Le ciment est un liant hydraulique, matériau inorganique finement broyé, lorsqu'il est mélangé avec de l'eau, il forme une pâte qui fait prise, durcit et conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau.

Le ciment ordinaire anhydre est constitué de clinker Portland, de gypse et éventuellement d'additions telles que les cendres volantes, le laitier granulé de haut fourneau, la fumée de silice, pouzzolanes naturelles..., etc.

Une notation cimentière a été établie pour simplifier l'écriture des phases solides.

Les équivalences sont les suivantes :



I -2-2- Etapes de fabrication du ciment Portland :

Le ciment est produit à partir de roches facilement accessibles : calcaire, craie, marbre et argile. De façon générale, un mélange renfermant environ 80% de

calcaire et 20% d'argile.

Le mélange, finement broyé, est porté à 1450°C dans un four rotatif pour produire le clinker. Le ciment résulte d'un broyage très fin du clinker. Lors de la phase de broyage, du gypse (5%) est ajouté pour mieux maîtriser le temps de prise. A ce niveau, éventuellement d'autres constituants minéraux associés, parmi ces substances figurent la pouzzolane naturelle, les cendres volantes, les laitiers de hauts fourneaux, le calcaire....etc.

Le processus de fabrication de ciment Portland est schématisé dans la figure I -1:

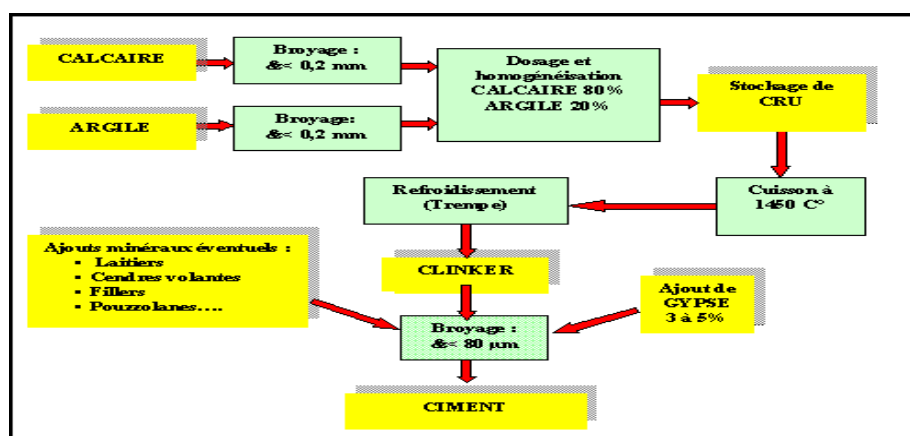


Figure I -1: Etapes de fabrication du ciment.

A- Extraction et préparation des matières premières:

Les matières premières sont extraites de carrières. Dans la plupart des cas, l'usine est implantée près de la carrière essentielle de calcaire plus au moins marneux, vu l'importance de ce dernier dans la production du ciment.

Pour l'extraction de calcaire dur on utilise des explosifs, et pour le calcaire tendre on utilise des engins comme le bulldozer, scrapeur.....etc. Et pour l'argile on utilise l'excavateur ou pelle mécanique.

Le transport de ces matières à l'usine est assuré le plus souvent par des grands camions où à l'aide de convoyeurs à bandes. L'ensemble des matières premières après leurs concassages, sont stockées dans des réserves. Pour la préparation de cru, les matières premières repris de stock, dosées et éventuellement pré homogénéisées, sont envoyées dans des broyeurs qui les réduisent en poudre à grains. Ce broyage peut se faire à sec (procédé

sec), ou en présence d'eau (procédé humide) qui est pratiquement abandonné pour sa forte consommation d'énergie lors de la cuisson.

B- Cuisson:

Une fois le cru préparé, il sera acheminé directement à l'entrée du four, qui est souvent constitué d'un grand cylindre d'environ 3 à 6 mètre de diamètre et de 50 à 150 mètre de longueur, incliné par rapport à l'horizontale de 3 à 5° de façon à permettre une descente progressive des matières en rotation autour de son axe. La partie inférieure du four est équipée d'une flamme entretenant une température de l'ordre de 1450 C° ; en s'approchant de cette zone, le cru subi des transformations successives qui le conduisent au produit fini qui est le « **clinker** ». Les réactions chimiques de transformation de cru dans le four, sont comme suit :

- jusqu'à 100°C : évaporation de l'eau libre.
- $T > 100^{\circ}\text{C}$: Evaporation de l'eau constitutive à l'intérieur des minéraux.
- $T > 600^{\circ}\text{C}$: Décomposition des matières argileuses. (Silice SiO_2 , Alumine Al_2O_3 , Ferrite Fe_2O_3).
- $\xrightarrow{\hspace{10em}}$ $T > 850^{\circ}\text{C}$:
Décarbonatation du calcaire. CaCO_3 $\text{CaO} + \text{CO}_2$
- $T > 900^{\circ}\text{C}$: Commencement des processus d'interaction et de combinaisons chimiques entre la chaux (CaO) et les oxydes d'argile (Silice SiO_2 , Alumine Al_2O_3 , Ferrite Fe_2O_3).
- $T = 1450^{\circ}\text{C}$: Clinkérisation.

A la sortie du four, le clinker tombe sur une grille de refroidissement rapide à travers laquelle est soufflé par l'air froid (la trempé). Le refroidissement après cuisson joue un rôle important sur la forme et la réactivité des constituants du clinker.

C- Broyage :

Pour obtenir un ciment aux propriétés hydrauliques actives, le clinker à son tour broyé très finement. C'est également lors du broyage qu'une quantité de gypse (3 à 5%) est ajouté au clinker ; le gypse est indispensable à la régulation de prise du ciment. Le mélange passe dans des broyeurs, il est réduit en poudre fine $< 80 \mu\text{m}$; On obtient alors le ciment "Portland". Le produit final (ciment) est stocké dans des silos, en attente de livraison.

Le clinker finement broyé, se présente sous la forme de grains polycristallins de quelques dizaines de microns (comme l'indique la figure I -2)

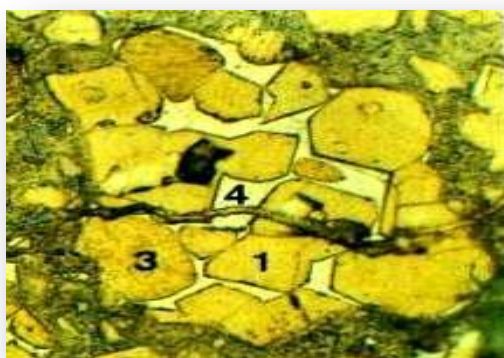
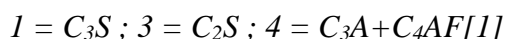


Figure I -2 : Grains polycristallins d'un ciment Portland anhydre (image obtenue par microscopie optique en lumière réfléchie sur section polie légèrement attaquée par HNO_3) :



Les ciments avec ajouts (ciments composés) sont obtenus par l'addition, lors de broyage du clinker, du gypse et d'éléments minéraux comme les laitiers de hauts fourneaux, les cendres de centrales thermiques, les fillers calcaires, les pouzzolanes naturelles ou artificielles. Ainsi sont obtenues les différentes catégories de ciments qui permettront la réalisation d'ouvrages allant du plus courant au plus exigeant. [1]

I -2-3- Les constituants du ciment :

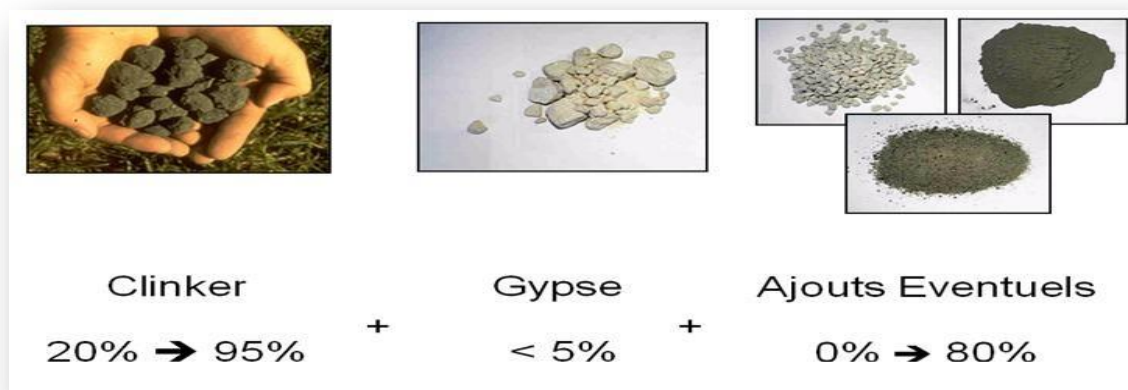


Figure I -3 : Les constituants du ciment.

Le ciment résulte du broyage d'un certain nombre de constituants : Le clinker, le gypse et les ajouts minéraux actifs :

I-2-3-1- Le clinker :

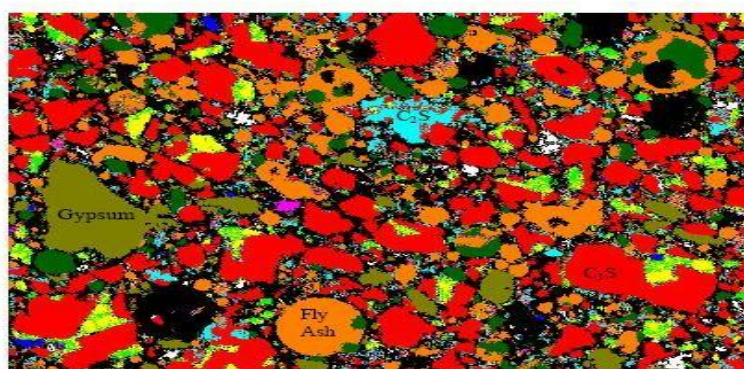
C'est un mélange fritté de calcaire et d'argile .Ce mélange après cuisson forme des grains dont les dimensions vont jusqu'à 40mm et s'appelle : Clinker.

Le calcaire est composé principalement de CaO et CO₂ ; et l'argile de diverses matières contenant surtout trois oxydes : SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃. La matière première destinée à laproduction doit contenir 75 à78% de CaCO₃ et de 22 à 25% de matière argileuse.

Les roches qui satisfont aux conditions indiquées ci dessus ne se rencontrent que très rarement. C'est ainsi que pour la production du ciment Portland sans ou avec ajout pouzzolanique, il faut employer à coté des calcaires et des argiles, des additions que l'on appelle adjuvants qui contiennent une grande quantité de celui des oxydes qui manque dans le mélange des matières premières. Parmi ces adjuvants corrigeant, on cite le minerai de fer, argile très alumineux, ...etc.

Les oxydes indiqués plus haut (CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃) ne se trouvent pas à l'état libre dans le clinker mais au cours de la cuisson du cru (calcaire + argile) quatre minéraux se forment (figure I-4) :

- ❖ C₃S (3CaO. SiO₂) Alite
- ❖ C₂S (2CaO. SiO₂) Belite
- ❖ C₃A (2CaO. Al₂O₃) Aluminate tricalcique
- ❖ C₄AF..... (4CaO.Al₂O₃.Fe₂O₃) Célite.



Les Figure I -4 : Microphotographie d'un clinker. [1]

couleurs sont les suivantes : noir = porosité, rouge = C₃S, bleu clair = C₂S, vert = C₃A, orange = C₄AF, vert = sulfates de calcium, jaune =K₂SO₄ et blanc = CaO .

I-2-3-2- Le gypse (CaSO_4) :

Le clinker « pur » très fin est caractérisé par de courts délais de prise (3 à 5 min), ce qui le rend pratiquement inutilisable. Ce fait est surtout dû à la célite (C_3A) qui s'hydrate rapidement tandis que ses hydrates deviennent rapidement compacts et se cristallisent.

Il s'ensuit que pour ralentir la prise du ciment, il faut lier les hydroaluminates de calcium en d'autres composés. Ce rôle peut bien être joué par le gypse qui réagit énergiquement avec l'hydroaluminat tricalcique et produit un sel insoluble l'hydrosulfoaluminat de calcium ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$). La quantité à introduire doit correspondre à la teneur en C_3A dans le liant. Lorsque cette teneur en gypse est respectée, l'action des hydroaluminates de calcium se trouve paralysée au moment initial.

I-3-Les constituants du béton (l'granulats) :

A- Les granulats :

Le granulat est constitué d'un ensemble de grains minéraux qui selon sa dimension (comprise entre 0 et 125 mm) se situe dans l'une des 7 familles suivantes
Fillers ; sables ; graviers ; gravillons ; ballast ; enrochements.

Les granulats sont obtenus en exploitant des gisements de sables et de graviers d'origine alluvionnaire terrestre ou marine, en concassant des roches massives (calcaires ou éruptives) ou encore par le recyclage de produits tels que les matériaux de démolition. Leur nature, leur forme et leurs caractéristiques varient en fonction des gisements et des techniques de production.

Différents types de granulats :

Un granulat, en fonction de sa nature et de son origine, peut être :

- **Naturel** : d'origine minérale, issus de roches meubles (alluvions) ou de roches massives, n'ayant subi aucune transformation autre que mécanique (tels que concassage, broyage, criblage, lavage).
- **Artificiel** : d'origine minérale résultant d'un procédé industriel comprenant des transformations thermiques ou autres.

Recyclé : obtenu par traitement d'une matière inorganique utilisée précédemment dans la construction, tels que des bétons

Un sable ou un gravier utilisé en génie civil se caractérise notamment par sa courbe granulométrique. Elle donne la distribution de la taille des granulats en pourcents de la masse totale du tamisât. Elle est utile pour la composition de mélanges et permet de définir certains paramètres caractéristiques de distribution : diamètre du plus petit grain (D_{min}), du plus gros (D_{max}), etc. Le sable par exemple ne doit pas excéder 6 mm.



fig. 1-5- Type de gravier[4].

B- Le Sable :

Le sable est le constituant du squelette granulaire qui a le plus d'impact sur les bétons et du mortier. Il joue un rôle primordial en réduisant les variations volumiques, les chaleurs dégagées et le prix de revient des bétons. Il doit être propre et ne pas contenir d'éléments nocifs.

Il convient de se méfier de la présence de sables granitiques, de micas en paillettes, d'argiles, de sulfates...et dans le cas de sable concassé: des poussières, des plaquettes, des aiguilles.

En vue de son utilisation dans la confection du mortier, le sable doit être soumis à des essais de laboratoire, à savoir l'analyse granulométrique, l'essai de l'équivalent de sable, l'essai au bleu de méthylène et l'analyse chimique. [3]

C- L'eau :

Le rôle de l'eau est d'abord d'hydrater le ciment pour donner un matériau cohésif. Elle sert aussi de lubrifiant lors de gâchage des constituants. Ainsi ajuste-t-on sa quantité afin d'obtenir une pâte homogène et facilement « ouvrable ». De par ce rôle de lubrifiant, l'eau se trouve généralement en excès vis-à-vis de la réaction d'hydratation : On utilise

couramment des quantités d'eau de l'ordre de 0.5 en rapport massique (E/C),

alors que l'hydratation complète ne nécessiterait qu'un E/C d'environ 0.35 [4]. Ce rapport prend en compte : les proportions stoechiométriques des réactions d'hydratations, qui indiquent que la proportion massique d'eau liées aux hydrates correspond environ à 20% de la masse initial de ciment, et la quantité d'eau nécessaire pour remplir l'espace interfeuillet des hydrates, soit environ 15% d'eau libre, sans laquelle la réaction d'hydratation est incomplète.

Au cours du durcissement et à des degrés divers suivant les conditions environnementales, l'espace occupé par cette eau non consommée fait place à de la porosité qui pénalise la résistance mécanique. Pour améliorer cette dernière, il est donc nécessaire de réduire la quantité d'eau introduite initialement dans la gâchée. C'est en suivant cette idée qu'ont été développés les bétons à « hautes performances ». Mais il reste à assurer une ouvrabilité suffisante, Pour cela, on fait recours à des adjuvants.

I-4- Les compositions des bétons :

I.4-1- Béton :

Le béton est un mélange précisément dosé de ciment, de granulats, d'eau et d'adjuvants. Vers 2600 avant JC, les Assyriens et les Babyloniens [5] ont employé l'argile comme un matériau liant, c'est-à-dire comme le ciment. Les Égyptiens [6] ont utilisé un ciment à base de chaux et de gypse. En 1756, un ingénieur Anglais, John Seaton [7] a fait le premier béton moderne (ciment hydraulique) en utilisant l'addition de gravillons naturels ressemblants aux graviers et d'un mélange de briques pulvérisées comme ciment. En 1824, un inventeur Anglais, Joseph Aspdin [8] crée un ciment portland qui est la méthode la plus utilisée à ce jour pour la production de béton. En 1849, un jardinier Parisien, Joseph Monier

[9] a inventé le béton armé à partir de l'idée de renforcer les bacs à fleurs qu'il construisait en béton en y incorporant des barres en fer.

I.4-2- Composition du béton :

Le béton est un matériau hétérogène dont les caractéristiques physico-chimiques et mécaniques des divers constituants sont différentes. Composé essentiellement de granulats, et de la pâte de ciment (ciment, d'eau de gâchage et adjuvants) pour améliorer ou acquérir certaines propriétés pour faire

face à des situations bien définies. Chacun de ses composants joue un rôle important dans le mélange.

I.4-3- Le durcissement du béton :

I.4-3-1- La réaction d'hydratation :

Dès le contact de l'eau avec le ciment et l'adjuvant, plusieurs réactions chimiques ont lieu et ont pour conséquence la solidification progressive de la pâte de ciment [10],

l'ensemble de ces réactions que l'on définit comme l'hydratation. Les produits de ces réactions sont les C-S-H (hydrates de silicate de calcium) principalement à l'origine de la rigidification de la pâte de ciment, et la chaux appelée portlandite. Les réactions d'hydratation des constituants du ciment sont exothermiques, avec des vitesses d'hydratation différentes pour chaque constituant au cours du temps, les produits d'hydratation se forment en diminuant la porosité initiale. Cependant, la présence de gypse dans le ciment a pour conséquence de remplacer cette réaction par une autre plus lente. Les constituants mineurs du ciment ne contribuent que très peu à la solidification de la pâte mais possèdent d'autres propriétés utiles à une bonne hydratation du ciment

I.4-3-2- Description de la microstructure :

Une fois durci, le béton peut être vu comme un solide hétérogène composé :

Interface pâte/granat :

Lors de l'hydratation du ciment, une liaison s'établit entre la pâte de ciment et les granulats. Elle dépend de la nature des deux phases en présence, de la teneur en ciment de la pâte des conditions de conservation. Autour des granulats se forme une zone de pâte hydratée particulière, appelée (Interfacial Transition Zone), notée ITZ, présente un rapport (E/C) plus élevé que le reste de la pâte, ce qui rend sa porosité plus élevée. Du point de vue mécanique, l'ITZ présente une résistance plus faible que la pâte de ciment elle-même. Les pores, plus grossiers dans cette zone, forment une faiblesse structurelle. L'épaisseur de l'ITZ augmente avec le diamètre du granulat et avec la quantité d'eau d'hydratation (c'est-à-dire avec le rapport E/C) [11].

I.4-4- Propriétés des bétons :

Le béton doit être considéré sous deux aspects :

► **Le béton frais** : Mélange de matériaux solides en suspension dans l'eau, se trouve en état foisonné à la sortie des appareils de malaxage et en état compacté après sa mise en œuvre dans son coffrage.

► **Le béton durci** : Solide dont les propriétés de résistance mécanique et de durabilité s'acquièrent au cours du déroulement de réactions physico-chimiques

entre ses constituants d'une durée de quelques jours à quelques semaines.

I.4.4-1- Propriétés du béton frais :

La propriété essentielle du béton frais est son ouvrabilité qui est la facilité offerte à la mise en œuvre du béton pour le remplissage parfait du coffrage et l'enrobage complet du ferrailage, L'ouvrabilité doit être telle que le béton soit maniable et qu'il conserve son homogénéité, elle est

caractérisée par une grandeur représentative de la consistance du béton frais ,

Dans le cas de béton ordinaire [11] elle est principalement influencée par :

- La nature et le dosage du liant.
- La forme des granulats.
- La granularité et la granulométrie.
- Le dosage en eau..

Lorsque le cône est soulevé verticalement, l'affaissement du béton permet de mesurer sa consistance [12]

a. La masse volumique du béton frais :

on mesure la masse volumique du béton frais à l'aide d'un récipient étanche à l'eau et suffisamment rigide. Le béton est mis en place dans le récipient et vibré à l'aide d'une aiguille, une table vibrante ou un serrage manuel en utilisant une barre ou tige de piquage après un arasement approprié.

I.4.4-2- Propriétés du béton durci :

Lorsque le béton a durci, sa forme ne peut plus être modifiée mais ses caractéristiques continuent d'évoluer pendant de nombreux mois. La compacité d'un béton (ou sa faible porosité) est un avantage déterminant pour sa durabilité. Une bonne résistance à la compression est la performance souvent recherchée pour le béton durci.

I.4.4-3- Résistance à la compression (NF EN-12390-3) [13] :

Parmi toutes les sollicitations mécaniques, la résistance du béton en compression unie axiale a été la plus étudiée, vraisemblablement parce qu'elle projette généralement une image globale de la qualité d'un béton, elle est directement liée à la structure de la pâte de ciment hydraté.

I.4-5- Différents types de bétons :

I.4-5-1- Béton autoplaçant (BAP):

Développé dans les années 80 par des chercheurs de l'université de Tokyo au Japon, le béton autoplaçant est un béton fluide, très déformable, homogène et stable qui se met en place par gravitation et sans l'utilisation d'un moyen de vibration. I [15].

I.4-5-2- Béton de haute performance (BHP) :

Bétons aux résistances mécaniques élevées au jeune âge et à 28 jours (Supérieure à 50 MPa), et un rapport pondéral (E/C) inférieur à 0,40. Leur propriété essentielle est leur grande résistance en compression qui dépasse largement le cas des bétons ordinaires.

[15]

I.4-5-3- Béton de fibre Béton :

dans lequel sont incorporées des fibres, ce qui permet suivant l'ouvrage de supprimer le treillis soudé traditionnel [15]

I.4-5-4- Béton a durcissement :

rapide Bétons dont le développement des résistances mécaniques est accéléré, ces bétons permettent la réalisation des travaux sur des éléments d'ouvrages demandant une remise en service rapide, ainsi que le décoffrage prématuré ou la mise en précontrainte le plus rapidement en préfabrication [15]

I.4-5-5- Béton léger :

Les bétons légers comme ayant une masse volumique après séchage 2100 kg/m³. Parmi ces bétons on peut citer les bétons de granulats légers. Ils sont utilisés dans le domaine du confort thermique [15]

I.4-5-6- Béton lourd :

C'est un béton dont la masse volumique est supérieure à 2600 kg/m³, les résistances mécaniques du béton lourd sont comparables à celles des bétons classiques et même plus élevées compte tenu des faibles dosages en eau [15]

I.4-5-7- Béton ordinaire :

Mélange homogène composé exclusivement des constituants de base ciment, granulats, eau, avec un rapport (E/C) qui varie en fonction de la plasticité ainsi que de la résistance désirée. Le béton ordinaire est caractérisé par sa résistance à la *compression*

I.5. Formulation du béton :

L'étude de la composition d'un béton consiste à définir le mélange optimal des différents composants (granulats, eau, ciment) afin de réaliser un béton dont les qualités soient recherchées (résistance, consistence). Il existe deux méthodes pour déterminer une f_{c28} qui se situe entre $20 \text{ Mpa} \leq f_{c28} \leq 50 \text{ Mpa}$ [15].

*

I-7- Les attaques chimiques du béton :

La durabilité est tout aussi importante que les caractéristiques mécaniques pour le matériau béton. Cette propriété est définie (dans un cadre très général) par la capacité du matériau à maintenir ses caractéristiques physiques et performances mécaniques dans des conditions de sécurité satisfaisantes pendant la durée de vie prévue pour l'ouvrage compte tenu des conditions de services existantes et de l'environnement dans lequel il évolue. Le paramètre régissant la durabilité est bien entendu la perméabilité. Plus cette dernière est réduite et mieux sa durabilité en sera augmentée.

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 vis-à-vis de ces dégradations. [3]

Les principaux processus chimiques à la base des dégradations du béton, pour la majorité des attaques chimiques, sont généralement regroupés en trois catégories :

- A- L'hydrolyse ou la lixiviation (dissolution) des hydrates.
- B- Les échanges ioniques entre les hydrates et le milieu agressif.
- C- La formation de produits expansifs à l'intérieur du béton.

I -7.1) Les attaques sulfatiques:

I -7-1-1) Définition de l'attaque sulfatique :

La résistance du béton aux attaques des sulfates est l'un des facteurs les plus importants pour sa durabilité. Le problème est aussi ancien que le béton et on a commencé à l'étudier il y a déjà près de 100 ans.

L'attaque sulfatique est accompagnée d'une précipitation de produits sulfatés

dits «secondaires» dont la formation est postérieure à l'hydratation du ciment, d'une expansion importante et de détériorations chimico-mécaniques (modification des propriétés de transport et de la porosité, fissures, pertes de résistance et de cohésion). Ceci conduit à la ruine du matériau cimentaire, à plus ou moins long terme en fonction de l'attaque (nature, teneur et concentration des sulfates au contact) et du ciment utilisé. [1]



Figure I-6: Des cas pathologiques d'éléments en béton en contact de sulfate.

[16]

I-7-1-2) Sources des sulfates :

On distingue deux types d'attaques : les attaques par les sulfates externes présents dans l'environnement du béton et les attaques sulfatiques internes pour lesquelles les sulfates proviennent des composants du béton lui-même. [1]

-Lorsqu'il s'agit d'une attaque par les sulfates provenant de l'extérieur, il y a formation de couches de gypse et d'ettringite secondaire ainsi que la thaumasite à partir de la surface exposée aux sulfates. L'attaque par les sulfates externes est souvent combinée avec l'attaque par le cation correspondant, selon la provenance des sulfates, qui peuvent réagir avec certains granulats ou fillers, ou avec les C-S-H ou la portlandite, et contribuer davantage à la dégradation du béton. De plus, l'attaque par les sulfates externes peut être combinée à une attaque par l'acide ce qui accélère également la destruction de la pâte hydratée.

-Lorsqu'il s'agit d'une attaque interne par les sulfates, ces derniers proviennent presque uniquement des sulfates de calcium qui se trouvent dans le béton dès sa

confection. Par conséquent, ces sulfates sont uniformément répartis dans la pâte hydratée et le seul produit expansif de la réaction est l'ettringite. L'ettringite secondaire qui est le résultat d'une attaque par les sulfates externes, n'est pas seule à endommager le béton, c'est plutôt la formation du gypse qui contribue à la fissuration, la lixiviation et le délaminage des couches superficielles.[17]

Comme le montre La figure I-9, l'origine des sulfates peut être : externe (environnement) ou interne (composants du béton).

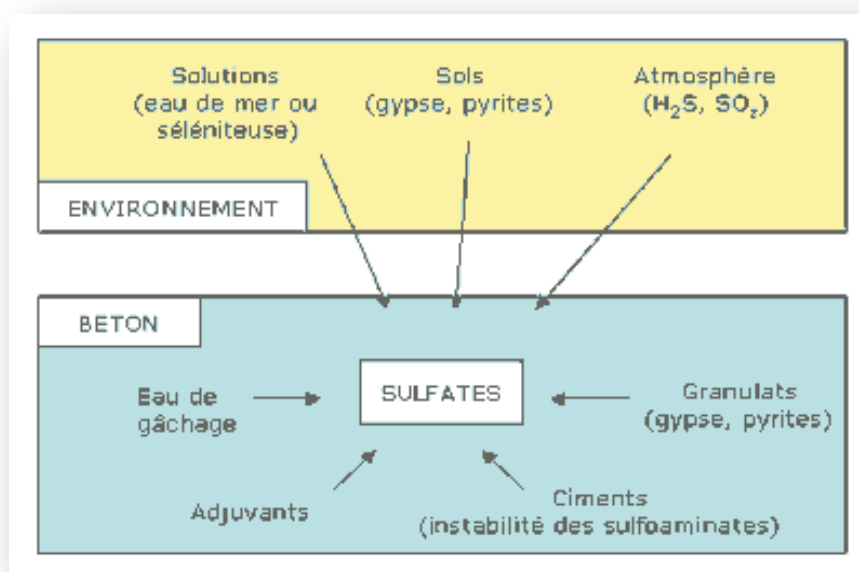


Figure I-7- L'origine des sulfates (interne ou externe). [17]

Les sulfates peuvent avoir différentes origines:

- Ils peuvent d'abord provenir du régulateur de prise ajouté au ciment (gypse, héli- hydrate, anhydrite) auquel s'ajoutent, en proportions variables, les sulfates contenus dans le clinker lui-même : sulfates alcalins (arcanite K_2SO_4 , aphtitalite $K_3Na(SO_4)_2$, langbeinite $Ca_2K_2(SO_4)_3$) et solutions solides dans les silicates de calcium.
- Ils peuvent également provenir de l'utilisation de granulats pollués par des sulfates d'origine naturelle ou artificielle (gypse, plâtre, anhydrite ou encore pyrites).
- Ils peuvent venir du milieu extérieur où ils se trouvent sous forme solide (sols gypseux), liquide (eaux naturelles percolant à travers les sols et solutions plus ou moins concentrées d'origine diverses), ou gazeuse (pollution atmosphérique par le SO_2):

- Dans les sols où ils constituent un élément nutritif des plantes, leur concentration moyenne est comprise entre 0,01 % et 0,05 % en masse de sol sec.

Des concentrations beaucoup plus importantes (> 5 %) peuvent se rencontrer dans les sols contenant du gypse $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ou de l'anhydrite CaSO_4 . La décomposition biologique aérobie des matières organiques et l'utilisation d'engrais sont également une source possible de sulfates. Le sulfate d'ammonium $\text{SO}_4(\text{NH}_4)_2$, provenant des engrais, est particulièrement agressif. Les sols peuvent parfois contenir des sulfures de fer (pyrites) qui, par oxydation, peuvent donner naissance à l'acide sulfurique H_2SO_4 , puis au gypse s'ils sont en contact de carbonate de calcium ou de chaux.

- Les eaux d'infiltration peuvent se charger en ions SO_4^{2-} au contact des sols ou des remblais contenant des sulfates.

- Dans les environnements industriels et urbains, l'atmosphère peut contenir de l'anhydride sulfureux SO_2 provenant des gaz de combustion (charbon, carburants divers). En présence d'humidité ces gaz sont susceptibles de s'oxyder pour donner de l'acide sulfurique très agressif.

- Les fermentations anaérobies qui se produisent dans les ouvrages d'assainissement conduisent également à la formation d'acide sulfurique à partir de l'hydrogène sulfuré dégagé. [2]

- L'eau de mer contient des sulfates en solution.

I-7-1-3) Mécanismes d'attaques:

Le schéma suivant résume les différentes étapes de l'attaque sulfatique.

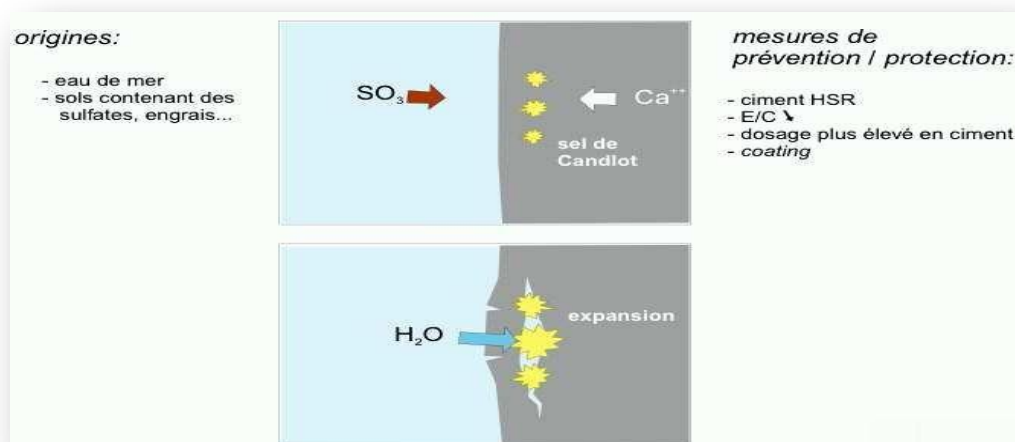


Figure I-8: L'attaque par les sulfates. [18]

Les sulfates peuvent détériorer le béton selon deux mécanismes physico-chimiques :

- Expansion ;
- Perte des propriétés liantes des C-S-H par les sulfates.

I-7-1-4) Processus d'attaque par les sulfates internes :

La dégradation des bétons par les sulfates est due principalement à des phénomènes d'expansion en relation avec la cristallisation d'ettringite, dite ettringite secondaire. La formation de cette ettringite expansive est à distinguer de l'ettringite primaire, obtenue au premier stade de l'hydratation des ciments portland par réaction du gypse, car cette ettringite primaire n'est jamais expansive. Schématiquement, la formation de l'ettringite est résumée ci-après :

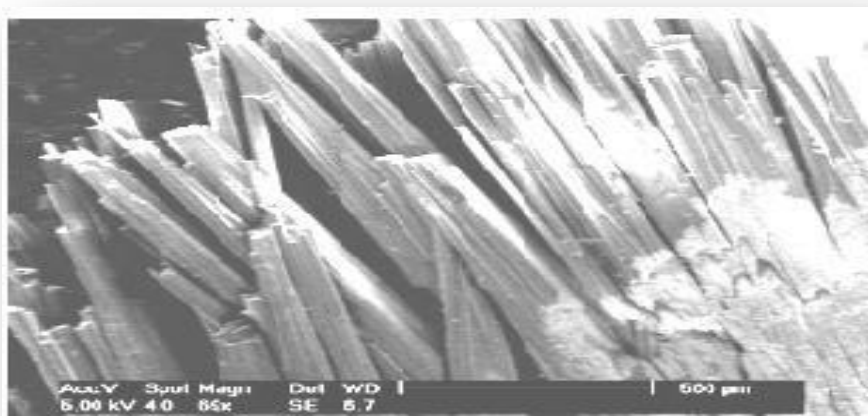


Figure I-9-: La formation de l'ettringite secondaire. [19]

A- Formation de gypse dit secondaire par opposition au gypse primaire ajouté au ciment comme régulateur de prise, la formation du gypse secondaire résulte d'une réaction de substitution entre la portlandite et le sulfate de sodium.

B- Réaction entre le gypse secondaire et les aluminates de calcium du ciment forment l'ettringite, plusieurs scénarios sont envisageables :

- Soit à partir de reliquats de C₃A anhydre :
- $C_3A + 3CaSO_4 \cdot 2H_2O + 24-26H_2O \rightarrow C_3A \cdot CaSO_4 \cdot H_{30-32}$.

Soit à partir de l'aluminate tetracalcique hydraté C_3AH_13 ou du monosulfoaluminate de calcium $C_3ASO_4H_{12}$

L'action des sulfates peut aussi engendrer une perte de résistance et une perte de masse du béton de surface. Ces effets sont dus à l'altération des propriétés liantes de certains

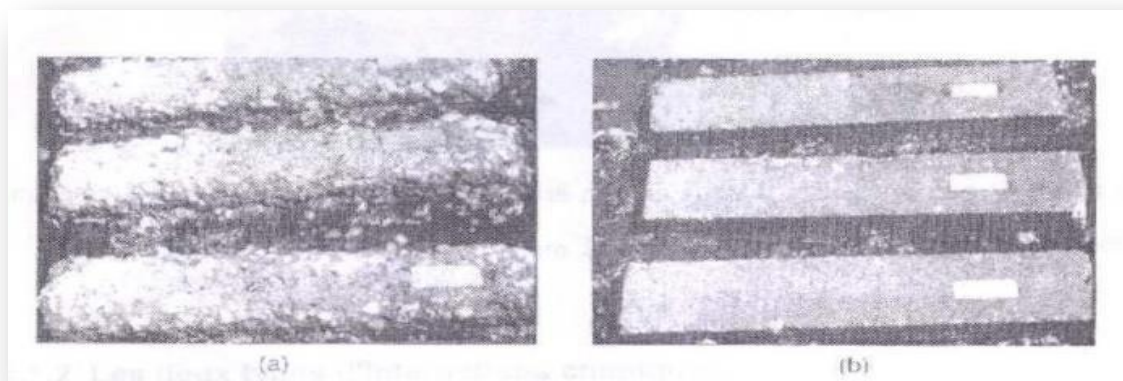


Figure I-10-: Epreuve de béton dégradée après 5ans de contact avec des sols riches en sulfates. [19]

a) E/C=0.5

b) E/C=0.39

I-7-1-5) Processus d'attaque par les sulfates externes :

Au travers du développement qui suit, ce type de dégradation sera abordée autant par son aspect phénoménologique que par les conséquences et les moyens de s'en prémunir en agissant sur des paramètres de formulation.

Les études en laboratoire ont conduit à mieux définir les différentes étapes du processus qui entraîne la dégradation du béton :

- Mise en contact de la surface du béton avec la solution agressive.
- Pénétration des anions SO_4 , par diffusion limitée à une zone superficielle.
- Pénétration du cation associé et réaction de substitution : cation (Mg^{+2} , Na^{+2} , $\text{NH}_4\dots$), Ca^{+2} et formation de gypse en solution ou cristallisé, suivant les concentrations en SO_4 et en $\text{Ca}(\text{OH})_2$.
- Réaction ponctuelle des ions sulfates avec les aluminates anhydres (C_3A) ou hydraté (C_4AH_x et $\text{C}_3\text{ACASO}_4\text{H}_{12}$).
- Fissuration par effet de coin due aux pressions de cristallisation de l'ettringite.

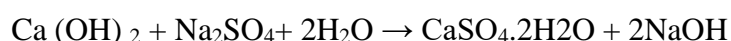
Accentuation de la pénétration des sulfates à la faveur des fissures.

- Progression de l'attaque suivant un front de dégradation, dont l'épaisseur a tendance à s'élargir au cours du temps.
- Destruction plus au moins complète du béton. [19]

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

$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$: 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 :

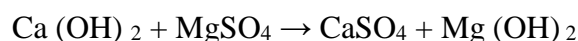
- à partir du C_3A anhydre résiduel



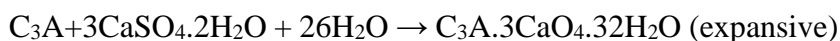
- à partir des aluminates hydratés (monosulfoaluminate)



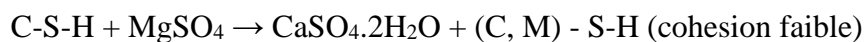
Le cas de sulfate de magnésium MgSO_4 (double action) :



$\text{Mg}(\text{OH})_2$: brucite caractérisée par une faible solubilité et un faible pH.



Substitution des ions Ca^{2+} par les ions Mg^{2+} dans les C-S-H :



Etant donné la très faible solubilité du $\text{Mg}(\text{OH})_2$, cette réaction se poursuit jusqu'à ce qu'elle soit terminée de sorte que, dans certaines conditions, l'attaque par le sulfate de magnésium est plus sévère que celle des autres sulfates.

Une réaction ultérieure entre le $\text{Mg}(\text{OH})_2$ et le gel de silice est possible et peut aussi provoquer une détérioration des C-S-H.

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 SO_4^{2-} 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.

Lors d'une attaque du béton par des sulfates externes, sa dégradation se produit par la formation d'ettringite ou de gypse et par la pression et la fissuration conséquentes. [20]

I-7-2) Attaque par les acides :

I-7-2-1) Définition :

Les attaques acides se font principalement suivant un mécanisme de dissolution.

Suivant le cas, le phénomène de dissolution peut être accompagné de la précipitation du sel formé lors de la réaction base + acide si le sel est peu soluble. Ce sel peut avoir un effet colmatant et ralentir les réactions de dissolution.

Le produit final de dégradation par un acide peut-être un gel de silice résultant de la décalcification totale des C-S-H qui, selon Grube et al [20], peut avoir un rôle protecteur à 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.

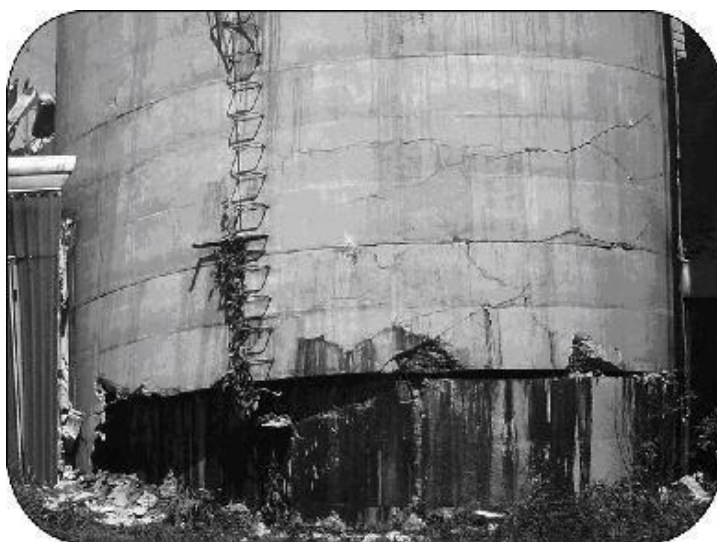


Figure I-11: La détérioration des silos-tours en béton due à l'attaque des acides d'ensilage. (Photo offerte par : Thomas P. Rylett Ltd., ingénieur-conseil en structures). [19]

I-7-2-2) Les différents types des acides :

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

Les pluies dites « propres » ont généralement un pH compris entre 5,6 et 7. Elles n'ont pas d'effets nocifs sur le béton réalisé suivant les règles de l'art. Par contre, les pluies dites

« acides », dont le pH peut descendre jusqu'à 4 et parfois moins, sont agressives. L'occurrence de ce type de pluies est en relation principalement avec la pollution par les oxydes de soufre SO_x d'origine industrielle ou domestique (combustion des charbons, fiouls, carburants) qui représentent environ un tiers de tous les oxydes de soufre de l'atmosphère. Le résultat est la formation d'acide sulfurique très hygroscopique qui se condense rapidement en gouttelettes susceptibles de contenir des métaux lourds (mercure, plomb, argent, cadmium) et des sulfates (d'ammonium, de sodium). Les oxydes d'azote NO_x également présents se transforment en acide nitrique. La composition et le pH des pluies peuvent varier en fonction de la saison et des conditions locales.

Les pluies acides peuvent provoquer des dégradations superficielles suivant des processus plus ou moins complexes faisant entrer en jeu des phénomènes de dissolution dus aux acides (sulfurique, nitrique, carbonique) et d'expansion dus à la cristallisation de sels, tels que le gypse (salissures des façades) ou l'ettringite.

- **les acides minéraux :**

Les acides chlorhydrique et nitrique, acides minéraux forts qui par réaction avec la chaux du ciment donnent naissance respectivement, au chlorure de calcium CaCl₂ et au nitrate de calcium (NO₃)₂Ca, sels très solubles, sont très agressifs vis à vis des ciments Portland.

L'acide sulfurique H₂SO₄, formé, par exemple, lors de l'oxydation de l'hydrogène sulfuré produit dans les réseaux d'assainissement ou par condensation à partir du SO₂ atmosphérique, est doublement agressif par son acidité et par l'anion SO₄²⁻ qui peut conduire à la formation de sels expansifs tels que le gypse et l'ettringite.

L'acide phosphorique H₃PO₄, qui entraîne la précipitation de phosphates de calcium très peu solubles, est modérément agressif, mais provoque une désintégration 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 (vinaigreries, laiteries, fromageries, distilleries, conserveries, élevages...).

Ils sont généralement moins agressifs que les acides minéraux. Ils peuvent dans certains cas avoir un effet colmatant 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 les acides acétique, lactique, butyrique, formique, contenus dans certaines eaux usées, attaquent les constituants calciques du ciment.

Ces acides faibles, peu dissociés, sont généralement modérément agressifs et provoquent des dégradations lentes. Toutefois leur neutralisation par les ions alcalins (Na^+ , K^+) et alcalino-terreux (Ca^{2+}) entraîne la permanence de la dissociation de l'acide et corrélativement une augmentation de son agressivité par production cumulée d'ions H^+ . Des dégradations importantes du béton ont pu être observées en milieu agricole dans des silos ou cuves destinés à contenir les fourrages, fumiers, purins et sur des dallages d'étables (érosion, déchaussement des granulats, pertes de masses, mise à nu des aciers...). [2]

De façon générale, l'attaque chimique du béton prend la forme d'une décomposition des produits de l'hydratation et de la formation de nouveaux composés qui, s'ils sont solubles peuvent être lessivés et qui, s'ils sont insolubles, peuvent être préjudiciables in situ.

Le $\text{Ca}(\text{OH})_2$ est l'hydrate le plus vulnérable, mais les C-S-H peuvent aussi être attaqués. Les granulats calcaires sont également vulnérables.

Le béton est aussi attaqué par l'eau contenant de CO_2 libre, telles les eaux minérales, qui peuvent aussi contenir du sulfure d'hydrogène. Tout le CO_2 n'est pas agressif parce qu'une partie de ce CO_2 est nécessaire pour former et stabiliser le bicarbonate de calcium dans la solution.

Quoique les eaux usées domestiques elles-mêmes soient alcalines et n'attaquent pas le béton, on a observé dans plusieurs cas, d'importants désordres dans des égouts, en particulier à des températures assez élevées, lorsque des composés contenant du soufre sont transformés en H_2S par des bactéries anaérobies. Ce composé n'est pas en lui-même un agent destructeur, mais il est dissout par le mince film

d'humidité recouvrant la surface du béton et subit une oxydation par les bactéries anaérobies, ce qui produit finalement de l'acide sulfurique. L'attaque apparaît donc au dessus de l'eau à l'intérieur de la canalisation. La pâte de ciment durci .

Une forme d'attaque assez similaire peut survenir sur les réservoirs de stockage pétroliers en haute mer. [20]

I-7-2-3) Mécanisme d'attaque des acides :

Le béton est très alcalin en nature, il est extrêmement susceptible à l'attaque de l'acide. Le mécanisme pour ce processus est très simple. De façon générale, les réactions chimiques et/ou l'élimination physique n'endommage qu'un ou deux composants de la pâte de ciment. Le tableau I.1 mentionne les composants du béton menacés par la corrosion.

Tableau 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 hydraté	$3\text{CaO}\cdot \text{Al}_2\text{O}_3\cdot 6\text{H}_2\text{O}$
	Aluminate de calcium ferriquehydraté	$6\text{CaO}\cdot \text{Al}_2\text{O}_3\cdot \text{Fe}_2\text{O}_3\cdot 12\text{H}_2\text{O}$
Granulats	Calcaire (Carbonate decalcium)	CaCO_3
	Dolomite	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$
	Grès amorphe	$\text{SiO}_2\cdot x\text{H}_2\text{O}$

On distingue deux types de détérioration:

- L'agression résolvante ;
- Le gonflement.

I.7.3-Attaque par les ions chlorures :

I.7.3.1:Introduction :

Dans les bétons les chlorures proviennent pour l'essentiel du milieu extérieur, mais il est important de limiter les sources internes chlorures. Pour l'acier, le processus de corrosion généralement admis et débute par la dissolution du métal et la formation des ions ferreux.

L'hydrolyse de ces derniers entraîne l'acidification de la matière et la formation d'hydroxyde ferreux insoluble dont l'évolution donne la rouille.



Figure 1.12: Agression du béton par activité des chlorures. [21]

La diffusion d'ions de chlorure dans le béton est le résultat de complexes mécanismes où l'échange d'ions entre la solution agressive et la solution poreuse (interstitiel) dans le béton joue un rôle important.

- La capacité de fixation des ions Cl^- par le ciment dépend de la nature du ciment, utilisé principalement de la quantité d'aluminate C_3A présente dans le clinker.

D'autres La vitesse de pénétration des chlorures dépend de la porosité de la pâte du ciment, elle décroît avec le rapport E/C, de façon exponentielle et dépend de la concentration de la solution environnante en sels. [21]

I.7.3.2: Définition de l'attaque par les ions chlorures :

La corrosion des armatures générée par les ions chlorures est la principale cause de dégradation des structures en béton armé. Les chlorures agissent dans les mécanismes de corrosion en diminuant la résistivité de l'électrolyte et en permettant un amorçage plus rapide de la corrosion en dépassivant la couche superficielle. La corrosion qui en résulte sous forme de piqûres à la surface de l'acier est une corrosion localisée. Les chlorures agissent aux zones

anodiques, de surface bien plus petite que celles des zones cathodiques, et la vitesse de corrosion sur les zones anodiques s'en trouve fortement augmentée. Une fois la corrosion amorcée, il est bien plus difficile d'y remédier que dans le cas de la carbonatation car le processus est autocatalytique. [22]

I.7.3.3: Source de l'attaque des ions chlores :

Les chlorures présents dans le béton peuvent provenir de deux sources différentes. Soit ils sont présents au moment du gâchage : utilisation d'eau contenant des chlorures ou agrégats contaminés. Soit ils proviennent de l'environnement (atmosphère marine, sels de déverglaçage, produits chimiques) et ont diffusés dans le béton.

Les chlorures existent sous deux formes dans le béton :

- Les chlorures libres qui sont dissous dans la solution interstitielle ;
 - Les chlorures piégés ou liés qui sont combinés à des hydrates du ciment et à des agrégats, ou absorbés physiquement sur les parois des pores. [22]

On considère que seuls les chlorures libres peuvent diffuser et jouer un rôle actif dans le processus de dépassivation et de corrosion des armatures.

pH du béton baisse et la corrosion des aciers commence. [22] [22]

I -7-4-2) Les différents types d'alcali-réaction :

Il est admis que les alcali-réactions se présentent sous trois types : réaction alcali-silice (les plus fréquentes), réaction alcali-silicate, réaction alcali-carbonate.

- Réaction alcali-silice (RAS) :

Certains granulats siliceux, lorsqu'ils sont constitués de silice amorphe, mal cristallisée ou microcristalline (par exemple des verres, de l'opale, de la calcédoine...) sont attaqués par la solution interstitielle qui occupe les pores du béton. La silice libérée réagit ensuite avec les alcalins Na^+ , K^+ de cette solution interstitielle et l'on observe finalement, l'apparition de gels silico-alcalins s'ils renferment Si, Na (et ou K) ou calco-silico-alcalins s'ils contiennent, en plus, du calcium.

- Réaction alcali-silicate :

La différence essentielle avec la réaction alcali-silice réside dans le fait que les granulats réactifs ne sont pas formés de silice libre mais sont des silicates variés (phyllo-silicates, tecto-silicates, sains ou altérés). En ce qui concerne les produits de

la réaction, on admet qu'ils sont voisins de ceux apparus dans la réaction alcalisilice ; des études plus anciennes signalaient que l'on n'observe pas la production de gels siliceux.

- Réaction alcali-carbonate :

On désigne par cette expression la réaction manifestée par des calcaires dolomitiques qui renferment des impuretés phylliteuses. Sur le plan pratique, on retiendra que les expansions causées par cette réaction sont moins importantes que celles dues aux réactions alcali-silice et alcali-silicate sauf si le béton est soumis à des ambiances hivernales rigoureuses .[2]

I -7-4-3) Conditions d'apparition de l'alcali-granulat :

Trois conditions doivent être simultanément remplies pour que ces.

réactions puissent avoir lieu. Il faut que :

- Le granulat soit potentiellement réactif,
- L'humidité relative excède 80 à 85%
- La concentration en alcalins dépasse un seuil critique. [22]

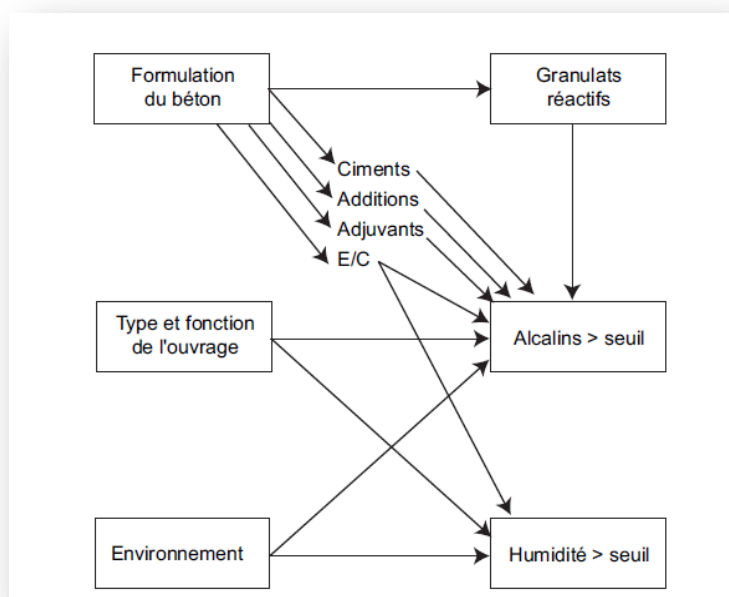


Figure I -13-: facteurs intervenant sur l'apparition des 3 conditions nécessaires au déclenchement de l'alcali-réaction. [1]

I -7-4-4) Source de cette attaque :

Ces alcalins proviennent d'une part du ciment, et d'autre part, des autres constituants du béton (granulats, eau de gâchage, adjuvants,..). 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. [22]

La Pathologie et manifestations externes :

La dégradation du béton des ouvrages résultant du phénomène d'alcali-réaction a été répertorié dans de nombreux pays. En général les désordres apparaissent à des échéances variables de deux à dix ans ou plus.

La pathologie et les manifestations externes se signalent par un ou plusieurs symptômes suivants :

- Une fissuration ;
- Un faïençage à mailles plus ou moins larges ou en étoile ou une fissuration orientée suivant une direction fonction de la distribution des armatures ;
- Des exsudations blanches formées de calcite et parfois de gels translucides ;
- Des pustules ou cratères avec des éclatements localisés en forme de petits cônes résultant de la réaction de gros granulats superficiels qui sont visibles au fond des cratères d'éclatement,
- Des mouvements et déformations,



Figure I -14: Exemples bétons dégradés par l'alcali-réaction. [22]

A) Fissuration sévère d'un massif de fondation

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

I-8-Conclusion :

Les besoins des hommes évoluent eux aussi avec le temps. Des bâtiments ou des équipements construits il y a seulement quelques dizaines d'années peuvent ne plus être adaptés aux besoins actuels et aujourd'hui démolis. Mais certains ponts construits il y a plusieurs siècles sont encore très empruntés. En fonction de l'évolution prévue des besoins, est donc définie pour chaque ouvrage une durée de vie ou « durabilité » souhaitée (50 ou 100 ans par exemple), pendant laquelle le bâtiment, stade ou pont en question devra non seulement être stable, mais en plus offrir un confort d'utilisation constant, moyennant un entretien régulier. Le niveau de risque doit donc être maîtrisé et les matériaux conçus en conséquence, en fonction des sollicitations mécaniques et environnementales.

La durabilité d'un béton n'est pas une de ses caractéristiques, mais plutôt sa réponse aux charges en service et aux conditions environnementales. Ainsi, la durabilité d'un béton dépend d'une multitude de caractéristiques du matériau, mais aussi de l'agressivité de son environnement.

Références et bibliographiques :

- [1] CHIHAOUI Ramdane : Durabilité des matériaux cimentaires vis-à-vis d'un environnement chimiquement agressif (Mémoire de Magister-USTMB d'Oran -2008).
- [2] J. P Olivier : livre de " Durabilité des bétons ." (A.NONAT :chapitre2 ; V. BAROGHEL-BOUNY, B. CAPRA, S. LAURENS : chapitre9 ; A. CARLES-GIBERGUES, H.HORNAIN :chapitre11 ; G. ESCADEILLAS, H. HORNAIN: chapitre 12) .(Edition :Pressede l'école nationales des ponts et chaussées -2008).
- [3] Fiches techniques : Les constituants des bétons et des mortiers (TOME 1) , Ciments et bétons (Centre d'information sur le ciment et ses applications).
- [4] M. Regourd, « L'hydratation de ciment Portland », Dans Le béton hydraulique : connaissance et pratique, chap. 11, Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1982.
- [5] Peter Gössel et Gabriele Leuthäuser : L'architecture du xxe siècle, Taschen, Köln, 1991.
- [6] Françoise Choay, L'urbanisme, utopies et réalités : Une anthologie, Paris, Éditions duSeuil, 1979. 104p.
- [7] Barjot, Dominique et Marie-Pierre : Histoire économique de la France au XIXe siècle.Paris, Nathan, 1995. 352 p.
- [8] Cyrille Simonnet : « Le béton armé : origine, invention, esthétique».Thèse de doctoratParis, EHESS, 1994.
- [9] Dennis Sharp : Histoire visuelle de l'architecture du xxe siècle, Mardaga, Liège, 1972.
- [10] G. H. Tattersall : The rheology of fresh concrete. pitman books limited, 1983.
- [11] Dreux. G : Nouveau guide du béton. Edition Eyrolles, Paris 1979, 201p.
- [12] Groupe Eyrolles : Cône d'Abrams, Edition Eyrolles,2010.
- [13] EN-12390-3 : Résistance à la compression des éprouvettes.
- [14] EN-12390-5 : Résistance à la flexion sur éprouvettes.

- [15] Baron .J et Sauterey . R : Le béton hydraulique Connaissances et Pratique, Presses,1982.
- [16] KERBOUCHE : Influence des ajouts minéraux sur les résistances mécaniques et ladurabilité des mortiers (Mémoire de Magister- l'ENSET d'Oran-2009).
- [17] Dr. Ir. P. Boeraeve : Cours de Béton armé
- [18] 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).
- [19] GRUBE H., RECHENBERG W. – “Durability of concrete structures in acidic water”. Cem. Concr. Res., vol. 19, n° 5, p 183-
- [20] Le LERM : Dossier technique (laboratoire et société d'études et de conseil en matériaux de construction (BTP/génie Civil, Patrimoine Bâti, Environnement).
- [21] 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.
- [22] 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.

Chapitre 02

METHODE DES PLANS D'EXPERIENCES

CHAPITRE 02 METHODE DES PLANS D'EXPERIENCES

II.1 : Introduction :

Les plans d'expérience sont de plus en plus utilisés dans l'industrie et dans les laboratoires de recherche. Ils permettent en effet de modéliser au mieux un phénomène aléatoire, le plus souvent complexe, à l'aide d'un minimum d'essais. Ils s'inscrivent donc dans la démarche constante d'amélioration de la qualité ou de la productivité. (Tinsson, 2010).

II.1.1: Choix de la méthode d'expérimentation :

La méthode d'expérimentation choisie doit faciliter l'interprétation des résultats. Elle doit également minimiser le nombre des essais sans toutefois sacrifier la qualité. La théorie des plans d'expériences assure les conditions pour lesquelles on obtient la meilleure précision possible avec le minimum d'essais. On a donc le maximum d'efficacité avec le minimum d'expériences et par conséquent le coût minimum. (Cours Pr bencheikh).

II.2 : Les différents types de facteurs :

La construction des plans et l'interprétation des résultats dépendent en grande partie des types de facteurs rencontrés dans l'étude. On distingue plusieurs types de facteurs. Nous retiendrons les types de facteurs suivants : les facteurs continus, les facteurs discrets, les facteurs ordonnables, les facteurs booléens. (Cours Pr bencheikh).

facteurs continus :

La pression est un exemple de facteur continu. Dans un intervalle de pression donné, on peut choisir toutes les valeurs possibles. Il en est de même d'une longueur, d'une concentration ou d'une température. Les valeurs prises par les facteurs continus sont donc représentées par des nombres continus.

Facteurs discrets :

a- Au contraire, les facteurs discrets ne peuvent prendre que des valeurs particulières. Ces valeurs ne sont pas forcément numériques : on peut

représenter un facteur discret par un nom, une lettre, une propriété ou même par un nombre qui n'a alors en soi aucune valeur numérique mais qu'une signification de repère. Par exemple, on peut s'intéresser aux couleurs d'un produit : bleu, rouge et jaune sont des facteurs discrets. *Facteurs ordonnables*

Il s'agit de facteurs discrets que l'on peut mettre dans un ordre logique. Par exemple, grand, moyen, petit, ou encore premier, deuxième, troisième et quatrième.

b- Facteurs booléens :

Les facteurs booléens sont des facteurs discrets qui ne peuvent prendre que deux valeurs : haut ou bas, ouvert ou fermé, blanc ou noir, etc

II.3.: Notion d'espace expérimental

Un expérimentateur qui lance une étude s'intéresse à une grandeur qu'il mesure à chaque essai. Cette grandeur s'appelle la *réponse*, c'est la grandeur d'intérêt. La valeur de cette grandeur dépend de plusieurs variables. Au lieu du terme «variable» on utilisera le mot *facteur*. La réponse dépend donc de un ou de plusieurs facteurs. Le premier facteur peut être représenté par un axe gradué et orienté (Figure II.1). La valeur donnée à un facteur pour réaliser un essai est appelée *niveau*. Lorsqu'on étudie l'influence d'un facteur, en général, on limite ses variations entre deux bornes. La borne inférieure est le niveau bas. La borne supérieure est le niveau haut.

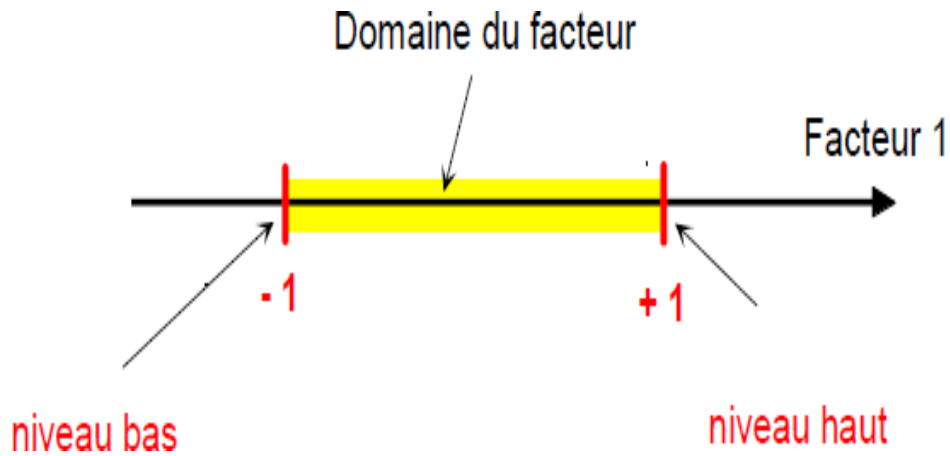


Figure II. 1 : le niveau bas, le niveau haut, et le domaine d'un facteur

Le niveau bas du facteur est noté par - 1 et le niveau haut par +1. Le domaine de variation du facteur est constitué de toutes les valeurs comprises entre le niveau bas et le niveau haut.

L'ensemble de toutes les valeurs que peut prendre le facteur entre le niveau bas et le niveau haut, s'appelle le domaine de variation du facteur ou plus simplement le **domaine** du facteur. On a l'habitude de noter le niveau bas par -1 et le niveau haut par +1.

S'il y a un second facteur, il est représenté, lui aussi, par un axe gradué et orienté. On définit, comme pour le premier facteur, son niveau haut, son niveau bas et son domaine de variation. Ce second axe est disposé orthogonalement au premier. On obtient ainsi un repère cartésien qui définit un espace euclidien à deux dimensions. Cet espace est appelé **l'espace expérimental** (Figure II.2).

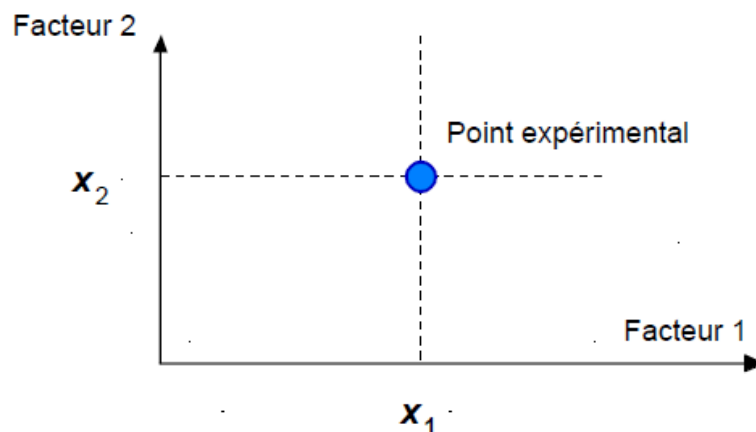


Figure II. 2: l'espace expérimental d'un facteur.

Chaque facteur est représenté par un axe gradué et orienté. Les axes des facteurs sont orthogonaux entre eux. L'espace ainsi défini est l'espace expérimental.

Le niveau x_1 du facteur 1 et le niveau x_2 du facteur 2 peuvent être considérés comme les coordonnées d'un point de l'espace expérimental (Figure II.3). Une expérience donnée est alors représentée par un point dans ce système d'axes. Un plan d'expériences est représenté par un ensemble de points expérimentaux.

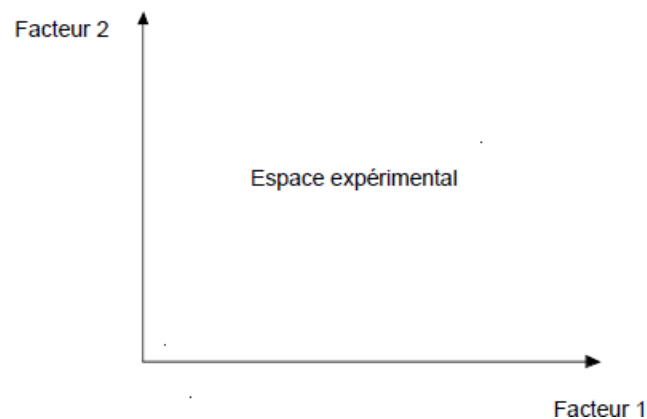


Figure II. 3: les points expérimentaux dans un espace expérimental.

Dans l'espace expérimental, les niveaux des facteurs définissent des points expérimentaux. Le regroupement des domaines des facteurs définit le «*domaine d'étude*». Ce domaine d'étude est la zone de l'espace expérimental choisie par l'expérimentateur pour faire ses essais. Une étude, c'est-à-dire plusieurs expériences bien définies, est représentée par des points répartis dans le domaine d'étude (Figure II.4).

Cette façon de représenter une expérimentation par des points dans un espace cartésien est une représentation géométrique de l'étude.

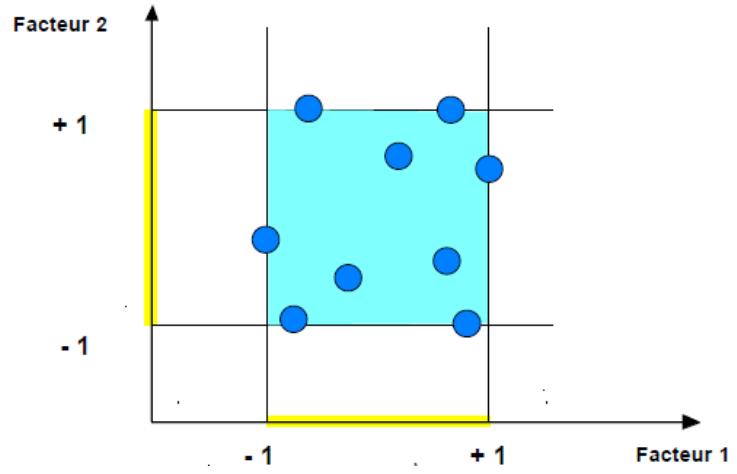


Figure II. 4: les points expérimentaux dans un domaine d'étud

II.5.1 : Présentation de logiciel « Minitab » :

Minitab est un logiciel propriétaire commercial de statistiques. Il est développé par *Minitab, Inc.* pour le système d'exploitation Windows uniquement. Il est largement utilisé par les universités pour enseigner les statistiques, et les développeurs le dirigent particulièrement aux entreprises en affichant leur intention de les rendre plus performantes selon la méthode « Six Sigma ». Logiciel développé depuis 1972 et disponible en 8 langues.

Conclusion

La méthode des plans d'expériences consiste à organiser la démarche expérimentale et l'analyse décisionnelle en appliquant des règles rigoureuses basées sur l'exploitation des propriétés algébriques et statistiques des matrices décrivant les expériences. Elle amène une méthodologie pour résoudre nos problèmes d'optimisation

Chapitre 03

Matériaux et essais

Chapitre 03 : Matériaux et essais

III.1.Introduction:

Nous présenterons dans ce chapitre, les caractéristiques des matériaux utilisés pour la confection du béton.

Les matériaux utilisés sont :

- ◆ Le sable fin de la région de BOUSAADA (OUED MAITAR).
- ◆ Le sable concassé de carrière (COSIDAR).
- ◆ Le gravier de carrière située à 25Km de M'sila, en allant vers B.B.A (COSIDER).
- ◆ Le ciment CRS de la cimenterie ACC de Hammam Dhalàa.
- ◆ L'eau potable du laboratoire.
- ◆ Gravier roulée (BOUSAADA)

III.2.SABLE D'OUED (BOUSAADA):

III.2.1.Origine du sable :

Le sable de base de notre recherche provient: des abords d'Oued maitar (boussada)

III.2.2.Caractéristiques physiques des sables utilisés:

Le sable a été soumis à plusieurs essais au laboratoire de Génie civil de l'université de M'sila, suivant les normes françaises AFNOR.

III. 2.2.1. Masse volumique (absolue) : NF P 18-555

C'est la masse de l'unité de volume de la substance, c'est-à-dire le rapport entre sa masse et son volume absolu.

**Mode opératoire :*

On détermine la masse volumique absolue du sable à l'aide du récipient de capacité 1000 ml.

On prend 03 échantillons de masse 300g.

On place l'échantillon dans le récipient de capacité 1000 ml et on y verse 300 ml d'eau préparé préalablement dans 2^{ème} récipient gradué, puis on malaxe soigneusement le contenu pour chasser l'air qui y existe. Après cette opération, on détermine le volume final occupé par le mélange sable – eau. Soit (V) ce volume.

Sachant que le volume (V_e) d'eau versé est 300 ml, il serait facile de déterminer le volume occupé par le sable seul. $V_1 = V - V_e$ ce volume.

$$\rho = \frac{M}{V_1}$$

Sachant que le volume (V_e) d'eau versé est 300 ml, il serait facile de déterminer le volume occupé par le sable seul.

Volume de sable : $V_1 = V - 300(\text{ml})$ la masse volumique absolue du sable déterminée par la formule

Avec M= 30 Résultats obtenus :

Tableau III.1 : Masse volumique absolue du sable de Boussaâda

N° d'essai	M (g)	$V_e (cm^3)$	$V_1 (cm^3)$	$\rho (g/cm^3)$	$\rho_{moy} (g/cm^3)$
1	300	300	419.5	2.510	2.51
2	300	300	420	2.50	
3	300	300	419	2.521	

III.2.2.2. Masse volumique apparente : NF P 18-554

II.2.2.2.1. Masse volumique apparente à l'état lâche:

C'est la masse du matériau par unité de volume y compris des vides existant entre les grains.

***Mode opératoire :**

- On détermine la masse volumique apparente du sable à l'aide d'un entonnoir standardisé de capacité **2 à 2,5** litres.
- On remplit l'entonnoir avec du sable sec.
- On pèse le récipient vide M_1 .
- On place le récipient sous l'entonnoir à une distance de **10 à 15** cm et on le remplit avec du sable.
- Une fois le récipient est rempli, on nivelle la surface du sable et on pèse le tout. Soit M_2 ce poids.

Tableau III .2 : Masse volumique apparente du sable de Boussaâda à l'état lâche.

N° d'essai	$M_1 (g)$	$M_2 (g)$	$\rho_{app} (g/cm^3)$	$\rho_{moye app} (g/cm^3)$
01	114	1523	1.56	1.563
02	114	1528	1.57	
03	114	1523	1.56	

III.2.2.2.2. Masse volumique apparente à l'état compact :

C'est la masse du matériau par unité de volume après compactage compris les vides restant entre les grains. Généralement elle est supérieure à la masse volumique à l'état lâche.

Mode opératoire :

Même méthode que celle de l'état lâche, après remplissage du récipient « après tassement on soumet ce dernier à 30 secousses manuelles. On complète le remplissage du récipient après le tassement du sable, puis on nivelle ce dernier et on le pèse. Soit M_2 le poids de l'ensemble (sable

+ récipient), la masse volumique à l'état compacte est donnée par la formule suivante :

$$\rho = \frac{(M_2 - M_1)}{V_{\text{réci}}} = \frac{C}{R}$$

Tableau III.3 : Masse volumique apparente du sable de Boussaâda à l'état compact

<i>N° d'essai</i>	<i>M₁ (g)</i>	<i>M₂ (g)</i>	³⁾ <i>ρ_{app} (g/cm)</i>	³⁾ <i>ρ_{app moy} (g/cm)</i>
01	114	1681	1.74	1.733
02	114	1670	1.72	
03	114	1685	1.74	

III .2.2.3. Porosité : (NF P 18-554)

C'est le volume des vides entre les grains du sable. La porosité peut être

$$P (\%)=100-(\text{Masse volumique apparente} / \text{masse volumique absolue}) \times 100$$

III. 2.2.4. 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 :

$$C = (\rho_a / \rho_{ab}) = 100 - P$$

On distingue deux cas :

Pour le sable de Boussaâda :

- Etat lâche : $C_L = 62.27 \%$.
- Etat compacte : $C_c = 69.04\%$.

III.2.2.5.L'indice des vides :

L'indice des vides est le rapport entre le volume du vide et le volume de solide. $e =$

$$V_v/V_s=P/ (100 - P).$$

Avec P en pourcent (%). Pour

le sable de Boussaâda :

- Etat lâche : $e = 0.574\%$
- Etat compacte : $e = 0.448\%$

Les résultats de la porosité, la compacité et l'indice de vide sont regroupés dans les deux tableaux suivants :

Tableau III.4: la porosité, la compacité et l'indice de vide Pour le sable de Boussaâda

<i>Porosité P%</i>		<i>Compacité C%</i>		<i>Indice des vides e</i>	
<i>Lâche</i>	<i>Compact</i>	<i>Lâche</i>	<i>Compact</i>	<i>Lâche</i>	<i>Compact</i>
37.8	30.95	62.27	69.04	0.574	0.448

III.2.2.6. Equivalent de sable : NF P 18-598

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

Mode opératoire :

- Tamiser une quantité de sable (masse supérieure à **500 g**).
- Prendre une pesée de **120 g**.
- Remplir l'éprouvette de solution la vante 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 20cm de cours horizontale en 30 secondes à la main à l'aide d'un agitateur mécanique.
- Retirer ensuite le bouchon, le rincer avec la solution la vanteau 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 vante atteigne le **2^{ème}** 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 supérieure du flocculant jusqu'au fond de l'éprouvette à l'aide d'une réglette.
- Mesurer également avec la règle la hauteur h_2 comprise entre le niveau supérieur de la partie sédimentaire et le fond de l'éprouvette.

$h_2 \square h_1$ avec : h_1 : sable propre + éléments fins.

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

- Introduire le piston dans l'éprouvette et laisser descendre doucement jusqu'à ce qu'il repose sur le sédiment. A cet instant bloquer le manchon du piston et sortir celui-ci de l'éprouvette.
- Introduire le réglet dans l'encoche du piston jusqu'à ce que le zéro vienne buter contre

la

face intérieure de la tête du piston. Soit h'_2 la hauteur lue et correspondant à la hauteur la partie sédimentée.

$$ESP = \frac{h'_2}{h_1} \times 100 \quad [\%]$$

Où h'_2 : La hauteur du sable ($h'_2 < h_1$).

Tableau III.5 : Equivalent du sable de Boussaâda

N° d'essai	h_1 (cm)	h_2 (cm)	ESV (%)	h'_2 (cm)	ESP (%)
01	8.9	9.8	90.81	8.6	87.75
02	8.9	9.7	91.75	8.7	89.69
03	8.9	9.8	90.81	8.7	88.77

$(ESV)_{moy} = 91.12 \%$

$(ESP)_{moy} = 88.73\%$

Donc: $85\% < ESV < 80 < ESP$

Tableau III.6 : 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.
$75 \leq ES \leq 85$	$70 \leq ES \leq 80$	Sable propre à faible pourcentage de farine argileux convient parfaitement pour des bétons de hautes qualité.
$E.S \geq 85$	$E.S > 80$	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.

Pour le sable de Boussaâda : C'est un 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.

III.2.2.7. Degré d'absorption d'eau : NF P 18-555

Elle est le pouvoir d'un matériau d'absorber et de retenir l'eau, elle est définie en pourcentage d'après la formule suivante.

$$p = \frac{A}{M} * 100$$

Tableau III.7 : Degré d'absorption du sable de Boussaâda

<i>N° d'essai</i>	<i>M₁ (g)</i>	<i>M₂ (g)</i>	<i>A (%)</i>	<i>A_{moy} (%)</i>
1	300	307,98	2,66	2,67
2	300	308,66	2,88	
3	300	308,86	2,95	

Selon le mode opératoire défini dans les normes NF P18- 554 et NF P18- 555, la limite supérieure du coefficient d'absorption d'eau du granulat est fixée à 5%, c'est –à- dire $A_b < 5\%$. Donc, dans notre cas, cette propriété est vérifiée.

La norme NF P 18 541 fixe comme valeur maximale 5%, pour les bétons classiques, ce qui est peut-être insuffisamment sévère, valeur d'ailleurs ramenée à 2,5% pour les bétons de résistance caractéristique supérieure à 36 MPa.

Observation :

Exceptionnellement, pour certaines utilisations, cette valeur est abaissée à 2 %.

III.2.2.8. Analyse granulométrique : (NF P 18-560)

L'analyse granulométrique permet de mesurer la distribution dimensionnelle en poids des éléments d'un matériau, elle comprend deux opérations :

1. Tamisage.
2. Sédimentation.

La granularité est exprimée par une courbe granulométrique qui donne la répartition de la dimension moyenne des grains, exprimée sous forme de pourcentage du poids total du matériau, elle est tracée en diagramme semi-logarithmique avec

- En abscisse, le logarithme de la dimension des ouvertures de en valeurs croissante.
- En ordonnée, le pourcentage, en poids du matériau total de la fraction

du sable dont les grains ont un diamètre moyen inférieur à celui de l'abscisse correspondante (passant) on constate que la courbe granulométrique est un élément fondamental de classification du matériau. Les résultats de cette étude permettent de prévoir certaines propriétés du matériau comme la perméabilité, l'aptitude au compactage et l'utilisation comme filtre.

Mode opératoire :

- Prélever (1,5 kg) de matériau (sable sec).
- Peser chaque tamis à vide à 1 g près, soit m_i la masse du tamis.
- Constituer une colonne de tamis propres et secs dont l'ouverture des mailles est



Figure III.1 : Les Tamis.

respectivement

de haut en bas : 5-2,5-1,25-0,63-0,315-0,125 et éventuellement 0,08mm. La colonne est coiffée par un fond pour recueillir les éléments passant au dernier tamis et un couvercle pour éviter la dispersion des poussières. On commence par peser les tamis ainsi que le fond.

- Verser le matériau (sable sec) sur la colonne et la fixer soigneusement sur la machine

d'agitation mécanique, agité pendant 5 minutes. Arrêter l'agitateur, puis séparer avec soin les différents tamis.

- Peser chaque tamis séparément à 1 g près. Soit M_i la masse du tamis (I) + le sable. La différence entre M_i et m_i (tamis de plus grandes mailles) correspond au refus partiel R_1 du tamis1.
- Reprendre l'opération pour le tamis immédiatement inférieur.
- Ajouter le refus obtenu sur le sixième tamis à R_1 , soit R_2 la masse du refus cumuler du tamis 2($R_2=R_1$ +Refus partiel sur tamis).
- Poursuivre l'opération avec le reste des tamis pour obtenir les masses des différents refus cumulés R_3, R_4, \dots

Le tamisât cumulé est donné par la relation suivante : $T= 100 - R_c$

- T: Tamisât en %
- R_c : Refus cumulés en %

• **Tableau III.8 : analyse granulométrique du sable d'oued**

Tamis (mm)	Refus partiel		Refus cumulés		Tamisât (%)
	(g)	(g)	(g)	(%)	
5	0	0	0	0	100
2.5	102	102	102	6.8	93.2
1.25	56	158	158	10.53	89.47
0.63	61	219	219	14.6	85.4
0.315	404	623	623	41.53	58.47
0.16	720	1343	1343	89.53	10.47
0.08	145	1488	1488	99.2	0.8
Fond	12	1500	1500	100	0.0

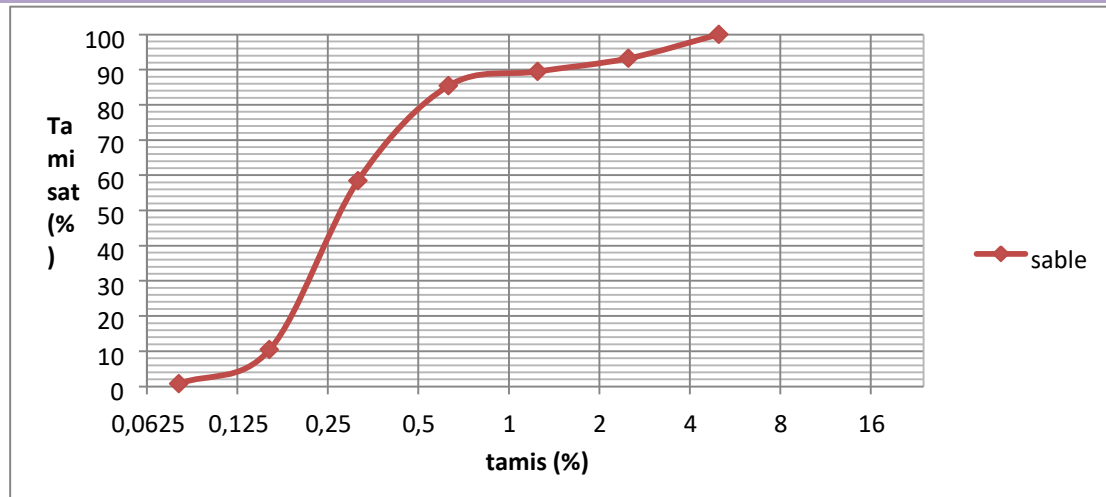


Figure III.2 : La courbe granulométrique du sable (0/5).

Commentaire :

$ES_{may}=89.92\%$ => Le sable de dune (Oued Maitre) très propre.

⇒ Le sable (0/5) est un sable fin.

Donc : le sable qui utilisé propre et gradué (acceptable).

Nous déduisons que c'est un sable fin et il n'est pas de bonne qualité, il n'est donc spécifié pour la fabrication des bétons du point de vue de l'analyse granulométrique.

III.2.2.9. 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 :

$$M_f = \frac{\sum R}{100}$$

O

R_c : Refus cumulé

Pour le sable de Boussaâda : $M_f = 1,59$

Les normes soviétiques spécifient le M_f des sables comme suit :

- Sable gros $M_f > 2.5$
- Sable moyen $2 < M_f < 2.5$
- Sable fin $1.5 < M_f < 2$
- Sable très fin $1 < M_f < 1.5$

On se basant sur cette classification, on trouve le résultat suivant:

✓ Pour le sable de Boussaâda : $1.5 < M_f < 2$: C'est un **sable fin**.

III.2.2.10. Les Caractéristiques chimiques du sable de Boussaâda :

La composition chimique du sable de dune (OUED MAITRE) est établie en mars 2005, à la cimenterie de ACC (M'sila). Elle est donnée au (Tableau III.10.).

Tableau III.9 : Analyse chimique du sable de BOUSAADA.

CONSTITUANTS		
Elément	Symbole	Teneur en (%)
Silice	SiO_2	86.95
Chaux	CaO	6.33
Oxyde de ferrique	Fe_2O_3	0.90
Alumine	AL_2O_3	1.92
Oxyde de magnésium	MgO	0.53
Sulfate	So_3	0.44
Pente au fer	$P.A.F$	2.81

Commentaire :

Le sable de BOUSAADA est un sable à haute teneur en silice.

III .3. Graviers :

III. 3.1.Gravier concassé :

III.3.1.1.Origine de gravier:

Le gravier de base utilisé dans la confection du béton est obtenu, par concassage de la roche d'une carrière située à 25Km de M'sila, en allant vers B.B.A (carrière COSIDER).

III.3.1.1.1.Classes granulaires:

Les fractions du gravier sont :

- Fraction 3/8.
- .Fraction 8/15

III.3.1.1.2.Résistance à la compression de la roche d'origine:

La roche d'origine, est un calcaire compact de résistance à la compression, égale à 610 g /Cm².

III.3.1.2.Caractéristiques physiques du gravi utilisé:

III.3.1.2.1. Masse volumique apparente:

Mode opératoire :

Le mode opératoire est le même que l'on a utilisé pour la masse volumique apparente du gravier concassé.

$$\rho_{app} = (M_2 - M_1) / V$$

A l'état lâche

Tableau III.10 : Masse volumique apparente du gravier concassé 8/16 a l'état

<i>fraction</i>	<i>Essai</i>	M_1 (kg)	M_2 (kg)	ρ_{app} (kg/l)	ρ_{app} moyen(kg/l)
8/15 V=10 L	1	3.49	16.78	1.329	1.321
	2		16.66	1.317	
	3		16.67	1.318	

lâche .

A l'état compact :

Tableau III.11: Masse volumique apparente du gravier concassé 8/16 a l'état compact.

<i>fraction</i>	<i>Essai</i>	M_1 (kg)	M_2 (kg)	ρ_{app} (kg/l)	ρ_{app} moyen(kg/l)
8/15 V=10 L	1	3.49	18.13	1.464	1.442
	2		17.97	1.448	
	3		18.09	1.415	

Gravier concassée de fraction 3/8

A l'état lâche :

Tableau III.12: Masse volumique apparente du gravier concassé 3/8 a l'état lâche

<i>fraction</i>	<i>Essai</i>	M_1 (kg)	M_2 (kg)	ρ_{app} (kg/l)	ρ_{app} moyen(kg/l)
3/8 V=7 L	1	2.92	11.63	1.244	1.246
	2		11.65	1.247	
	3		11.66	1.248	

A l'état compact

Tableau III.13: Masse volumique apparente du gravier concassé 3/8 a l'état compact.

<i>fraction</i>	<i>Essai</i>	M_1 (kg)	M_2 (kg)	ρ_{app} (kg/l)	ρ_{app} moyen (kg/l)
3/8 V=7 L	1	2.92	12.74	1.402	1.389
	2		12.59	1.381	
	3		12.62	1.385	

III.3.1.2.2. Masse volumique absolue :

Mode opératoire : Le mode opératoire est le même que l'on a utilisé pour la masse volumique apparente du gravier

$$\rho_{abs} = M / (v_2 - v_1)$$

Tableau III.14 : Masse volumique absolue du gravier concassé.

Graviers	N° d'essai	M ₁ (g)	V _e (cm ³)	V (cm ³)	ρ _{abs} (g / cm ³)	ρ _{moy} (g / cm ³)
3/8	01	300	300	410	2.72	2.69
	02	300	300	412	2.67	
	03	300	300	411	2.70	
8/15	01	300	300	416	2.58	2.59
	02	300	300	415	2.60	
	03	300	300	415	2.60	

III.3.1.2.3. Porosité, compacité et indice des vides : NF P 18-554

Le mode opératoire est semblée celui effectue pour le sable.

On calcule la porosité selon la formule :

$$P(\%) = \left(1 - \frac{\rho_{app}}{\rho_{abs}} \right) \times 100$$

$$\left[1 - \frac{\rho_{app}}{\rho_{abs}} \right]$$

La compacité donnée par la formule :

$$C = \left(\rho_a / \rho_{ab} \right) = 100 - P$$

L'indice des vides est donné par la

formule suivante :

$$e = \frac{P}{(100 - P)}$$

Tableau III.15 : Porosité, Compacité Et Indice Des Vides

fraction de gravie	Porosité (%)	Compacité (%)	l'indice de vide
3/8	51.64	48.36	0.936
8/15	44.32	55.68	0.795

III.3.1.2.4.Degré d'absorption d'eau : NF P 18-554

Tableau III.16 : Degré d'absorption d'eau du gravier concassé.

Graviers	N°d'essai	M_1 (g)	M_2 (g)	A (%)	A_{moy} (%)
3/8	01	700	709,06	1,29	1.29
	02	700	709,77	1,39	
	03	700	708,53	1,21	
8/15	01	700	712	1,71	1.66
	02	700	711	1,57	
	03	700	712	1,71	

III.3.1.2.5.Analyse granulométrique :

Les résultats obtenus de chaque fraction du gravier, sont regroupés dans les tableaux ci-dessous :

a)- Fraction 3/8 (2Kg)

Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Tamisât (%)
8	32	32	02.13	97.87
6,3	411	443	29.53	70.47
5	420	863	57.53	42.47
4	465	1328	88.53	11.47
3,15	141	1469	97.93	2.07
2,5	25	1494	99.6	0.4
Fond	6	1500	100	0

Tableau III.17 : Analyse granulométrique du gravier concassé 3/8 .

b)- Fraction 8/15 (3Kg)

Tableau III.18 : analyse granulométrique du gravier concassé 8/15.

Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Tamisât (%)
16	43	43	2.86	97.14
12,5	359	402	26.8	73.2
10	715	1117	74.46	25.54
8	326	1443	96.2	3.8
6,3	54	1497	99.8	0.2
5	1	1498	99.86	0,14
Fond	2	1500	100	0

III.3.1.3.Les caractéristiques mécaniques des graviers utilisés:

Ce sont des essais importants pour les granulats routiers. En effet, le passage répété de véhicules conduit à émousser, à polir progressivement les granulats et ainsi à diminuer l'adhérence des pneumatiques sur la chaussée.

Ces caractéristiques permettent également d'estimer la qualité des granulats utilisés dans la confection de bétons.

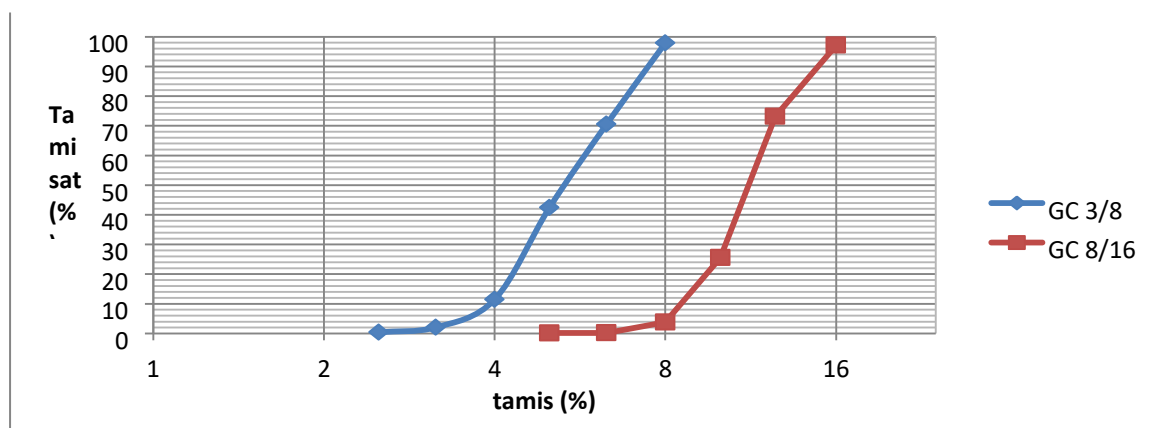


Figure III.3 : La courbe granulométrique des graviers concassés (3/8-8/15).

III.3.1.3.1. Essai de résistance au choc (Essai Los Angeles) : NF P18-573.

Comme l'essai précédent, cet essai renseigne sur la dureté des roches se basant sur un coefficient, appelé coefficient Los Angeles L_A , et sur le principe de l'effritement par abrasion.



Figure III.4 : Appareil de l'essai Los Angeles.

Principe de l'essai:

L'essai consiste à mesurer la masse m d'éléments inférieurs à 1.6 mm, produits par la fragmentation du matériau testé (diamètres compris entre 4 et 50 mm) et que l'on soumet aux chocs de boulets normalisés, dans le cylindre de la machine Los Angeles en 500 rotations.

Formulation:

Si M est la masse du matériau soumis à l'essai et m la masse des éléments inférieurs à 1.6 mm produits au cours de l'essai, la résistance à la fragmentation aux chocs s'exprime par le coefficient Los Angeles (L_A) : $L_A = (m/M) \cdot 100$

Les résultats obtenus sont présentés au tableau suivant :

Tableau III.19. : Caractéristiques mécaniques du gravier utilisé.

Fraction de Gravier	Nombre de boules	M (Kg)	m (Kg)	Coef L_A %
Gravier 3/8	7	5	1.050	21%
Gravier 8/15	11	5	0.942	19%

Classification : Un tableau de classification a été déjà tracé. Il permet de classer les roches en fonction du coefficient Los Angeles.

Tableau III.20 : Classification des roche en fonction du coefficient LA

<i>Coefficient L_A</i>	<i>Nature de la roche</i>
< 20	<i>Très dure</i>
20 à 25	<i>Dure</i>
25 à 30	<i>Assez dure</i>
30 à 40	<i>Mis dure</i>
40 à 50	<i>Tendre</i>
> 50	<i>Très tendre</i>

Commentaire :

- Le gravier (3/8) :c'est un gravier dure (LA=21 %) / (LA entre 20 à 25),
- Le gravier (8/16) :c'est un gravier très dure (LA=19 %) / (LA < 20),

III.3.1.3.2.Caractéristiques chimiques des graviers utilisés :

La composition chimique du gravier de carrière COSIDER est établie en mars 2004, à la cimenterie de ACC (M'sila). Elle est donnée au (Tableau III.29).

Tableau III.21. : Analyse chimique de la pierre concassée

<i>ELEMENT</i>	SiO_2	Al_2O_3	CaO	Fe_2O_3	MgO	SO_3	K_2O	Na_2O
<i>Teneur (%)</i>	40.65	8.87	40.56	3.25	3.65	0.79	0.65	0.01

III.3.2.Gravier roulée :

III .3.2.1. Origine de gravier:

Le gravier roulé de base de notre recherche provient: des abords d'Oued MAITAR (BOUSAADA)

III.3.2.1.1.Classes granulaires:

Les fractions du gravier sont :

- Fraction 3/8.
- Fraction 8/15.

III.3.2. 2. Caractéristiques physiques du gravier utilisé:

III.3.2.2.1.Masse volumique apparente:

Mode opératoire : Le mode opératoire est le même que l'on a utilisé pour la masse volumique apparente du gravier roulée .

$$\rho_{app} = (M_2 - M_1) / V$$

A l'état lâche

Tableau III.22: Masse volumique apparente du gravier roulée 8/16 a l'état lâche .

A l'état compact

Fraction	Essai	M ₁ (kg)	M ₂ (kg)	ρ _{app} (kg/l)	ρ _{app} moyen(kg/l)
8/15 V=10 L	1	3.49	18.611	1.512	1.51
	2		18.630	1.514	
	3		18.593	1.510	

Tableau III.23: Masse volumique apparente du gravier roulée 8/16 a l'état

compact

Fraction	Essai	M ₁ (kg)	M ₂ (kg)	ρ _{app} (kg/l)	ρ _{app} moyen(kg/l)
8/15 V=10 L	1	3.49	19.708	1.622	1.61
	2		19.636	1.615	
	3		19.553	1.601	

Gravier roulé de

fraction 3/8A l'état lâche

Tableau III.24: Masse volumique apparente du gravier roulée 3/8 a l'état lâche .

A l'état compact

Fraction	Essai	M ₁ (kg)	M ₂ (kg)	ρ _{app} (kg/l)	ρ _{app} moyen(kg/l)
3/8 V=7 L	1	2.92	13.301	1.483	1.49
	2		13.326	1.486	
	3		13.349	1.49	

Tableau III.25: Masse volumique apparente du gravier roulée 3/8 a l'état

compact.

Fraction	Essai	M ₁ (kg)	M ₂ (kg)	ρ _{app} (kg/l)	ρ _{app} moyen(kg/l)
3/8 V=7 L	1	2.92	14.376	1.636	1.64
	2		14.399	1.639	
	3		14.369	1.635	

III.3.2.2.2.Masse volumique absolue :

Mode opératoire :

Le mode opératoire est le même que l'on a utilisé pour la masse volumique apparente du gravier concassé.

$$\rho_{abs} = M / (v_2 - v_1)$$

Tableau III.26 : Masse volumique absolue du gravier roulée.

Graviers	N° d'essai	M _i (g)	V _e (cm ³)	V (cm ³)	ρ _{abs} (g / cm ³)	ρ _{moy} (g / cm ³)
3/8	01	300	300	415	2.608	2.55
	02	300	300	418	2.542	
	03	300	300	420	2.5	
8/15	01	300	300	415	2.608	2.56
	02	300	300	417	2.564	
	03	300	300	419	2.521	

III.3.2.2.3.La densité absolue :

La densité est le rapport entre la masse volumique absolue du matériau et la masse volumique de l'eau.

Les résultats sont regroupés dans le tableau suivant :

Tableau III.27 : la densité du gravier roulée.

Les fractions	Gravier 3/8	Gravier 8/15
Densité normale	2.55	2.56

III.3.2.2.4.. Porosité, compacité et indice des vides : NF P 18-554

Le mode opératoire est le même que l'on a utilisé pour la masse volumique apparente du gravier concassé.

Tableau III.28 : Porosité, Compacité Et Indice Des Vides

fraction de gravie	Porosité (%)	Compacité (%)	l'indice de vide
3/8	41.57	58.43	0.71
8/15	41.02	58.98	0.69

III.3.2.2.5.Degré d'absorption d'eau : NF P 18-554

Tableau III.29 : Degré d'absorption d'eau du gravier roulée

Graviers	N° d'essai	M ₁ (g)	M ₂ (g)	A (%)	A _{moy} (%)
3/8	01	100	98.84	1.17	1.1
	02	100	99.03	0.98	
	03	100	98.86	1.15	
8/15	01	100	99.55	0.75	0.81
	02	100	99.29	1.18	
	03	100	99.72	0.51	

III.3.2.2.6.Analyse granulométrique :

Les résultats obtenus de chaque fraction du gravier, sont regroupés dans les tableaux ci-dessous

a)- Fraction 3/8

Tableau III.30 : Analyse granulométrique du gravier roulée 3/8.

Tamis(mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Tamisât (%)
8	33	33	2.2	97.8
6,3	790	823	54.87	45.13
5	483	1306	87.067	12.933
4	171	1477	98.47	1.53
3,15	19	1496	99.73	0.27
2,5	2	1498	99.87	0.13
Fond	2	1500	100	0.0

Tableau III.31 : analyse granulométrique du gravier roulée 8/16

Tamis(mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Tamisât (%)
16	25	25	1.67	98.33
12,5	149	174	11.6	88.4
10	512	686	45.73	54.27
8	723	1409	93.93	6.07
6,3	84	1493	99.53	0.47
5	4	1497	99.8	0.2
Fond	3	1500	100	0.0

III.3.2.3.Les caractéristiques mécaniques des graviers utilisés:

Ce sont des essais importants pour les granulats routiers. En effet, le passage répété de véhicules conduit à émousser, à polir progressivement les granulats et ainsi à diminuer l'adhérence des pneumatiques sur la chaussée.

Ces caractéristiques permettent également d'estimer la qualité des granulats utilisés dans la confection de bétons.

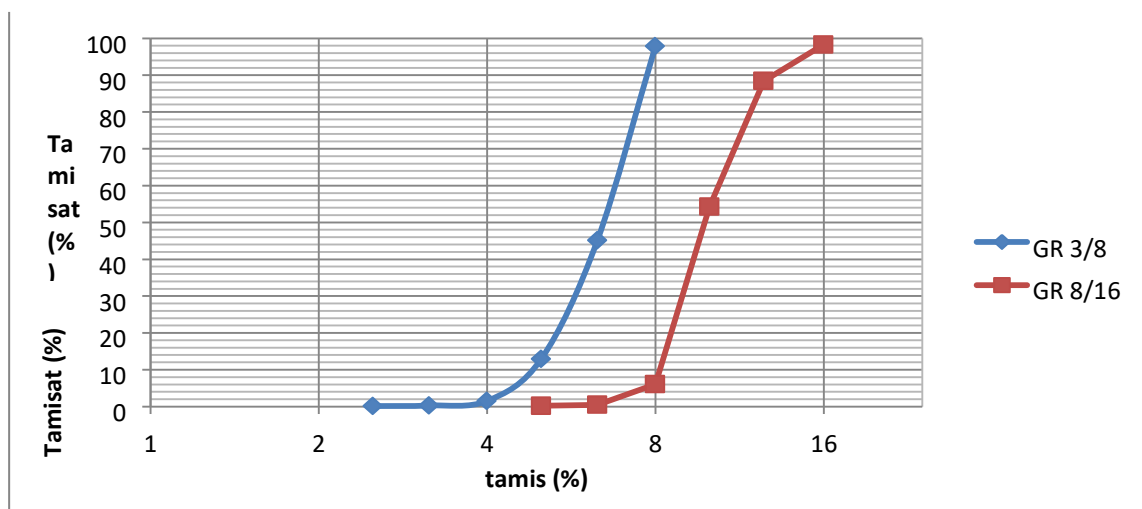


Figure III.5 : La courbe granulométrique des graviers roulée (3/8-8/15-).

III.3.2.3.1. Essai de résistance au choc (Essai Los Angeles) : NF P18-573.

Le même Principe de l'essai de gravier concassé.

Les résultats obtenus sont présentés au tableau suivant :

Tableau III.32. : Caractéristiques mécaniques du gravier utilisé.

Gravier	Masse initiale M (Kg)	Masse m (Kg)	Coef de Los A L_A %
Gravier 3/8	5	1,115	27,875
Gravier 8/15	5	1,118	22,36

Tableau III.33 : Classification des roches en fonction du coefficient LA

Coefficient L_A	Nature de la roche
< 20	Très dure
20 à 25	Dure
25 à 30	Assez dure
30 à 40	Mis dure
40 à 50	Tendre
> 50	Très tendre

Gravier 3/8 : $25 < L_A < 30 \Rightarrow$ Assez dure.

Gravier 8/16 : $20 < L_A < 25 \Rightarrow$ Dure

.III. 4. Type de mélange :

III.4.1. Mélange1 : gravier concassé (60% 8/15, 40% 3/8) :

1. Masses volumiques absolues:

TABLE III.34 : Masse volumiques absolues des mélange 02 3/8 et 8/16 du gravier concassé

Mélange	Essai	M_1 (g)	V_1 (ml)	V_2 (ml)	ρ_{abs} (g/ml)	$\rho_{abs\ moy}$ (g/ml)
M_1	1	300	300	414	2.63	2.636
	2			413	2.65	
	3			414	2.63	

Masse volumique apparente: A l'état lâche

TABLE III.35 : Masse volumiques apparentes des fractions 3/8 et 8/15 du gravier concassé

Mélange	Essai	M_1 (kg)	M_2 (kg)	ρ_{app} (kg/l)	$\rho_{app\ moy}$ (kg/l)
M_1 $v=0.91$	1	0.114	1.510	1.551	1.551
	2		1.505	1.545	
	3		1.516	1.557	

A l'état compacte

TABLE III.36 : Masse volumiques apparentes des fractions 3/8 et 8/15 du gravier concassé

Mélange	Essai	M_1 (kg)	M_2 (kg)	ρ_{app} (kg/l)	$\rho_{app,moy}$ (kg/l)
M_1 $v=0.91$	1	0.114	1.547	1.592	1.577
	2		1.538	1.582	
	3		1.535	1.557	

2-la Porosité et la Compacité Et Indice Des Vides:

III Tableau III.37 : Porosité, Compacité Et Indice Des Vides.

le mélange	l'état	Porosité (%)	Compacité (%)	l'indice de vide
$M1$	<i>l'état lâche</i>	41.16	42.75	0.699
	<i>l'état compacte</i>	40.17	59.83	0.671

6. Degré d'absorption d'eau(A) :

Tableau III.38 : Degré d'absorption d'eau du mélange 01.

Mélange	N° d'essai	M_1 (g)	M_2 (g)	A (%)	A_{moy} (%)
M_1	01	300	304	1.3	1.1
	02	300	303	1	
	03	300	303	1	

7.. Analyse granulométrique :

Les résultats obtenus de chaque fraction du gravier, sont regroupés dans les tableaux ci-dessous

TABLE III.39 – Résultat de l’analyse granulométrique de gravillon concassé ((40%3/8)/(60%8/15))..... mélange n 01

Mélange	Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumule (%)	Tamisât (%)
M 1	16	28.6	28.6	1.90
	12.5	240.72	269.32	17.95
	10	332.12	601.44	40.09
	8	250.12	851.56	56.77
	6.3	93.1	944.66	62.97
	5	186.22	1130.88	75.36
	4	180.62	1311.5	87.43
	3,15	150.12	1461.62	97.44
	2,5	36.4	1498	99.86
	Fond	2	1500	100

III.4.2. Mélange 2 : (roulée 20%3/8 et 30 % 8/15 ; concassée 20%3/8 et 30 % 8/15)

1. Masses volumiques absolues:

2. TABLE III.40 : Masse volumiques apparentes de gravier de Mélange 2

Mélange	Essai	M ₁ (g)	V ₁ (ml)	V ₂ (ml)	ρ _{abs} (g/ml)	ρ _{abs moy} (g/ml)
M ₂	1	300	300	416	2.58	2.573
	2			417	2.56	
	3			416	2.58	

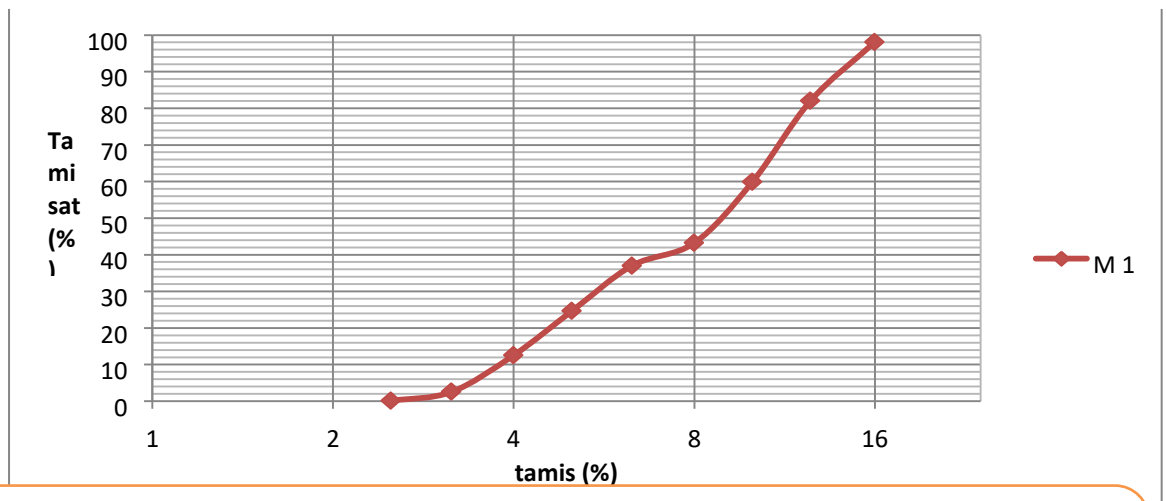


Figure III.06 : La courbe granulométrique des graviers concassés (3/8-8/15) mélange n 01.

3. Masse volumique apparente:

A l'état lâche

TABLE III.41 : Masse volumiques apparentes de gravier de Mélange 2

Mélange	Essai	M_1 (kg)	M_2 (kg)	ρ_{app} (kg/l)	$\rho_{app,moy}$ (kg/l)
M_2 $v=0.91$	1	0.114	1.508	1.548	1.548
	2		1.506	1.546	
	3		1.509	1.55	

A l'état compacte

TABLE III.42 : Masse volumiques apparentes de gravier de Mélange 2

Mélange	Essai	M_1 (kg)	M_2 (kg)	ρ_{app} (kg/l)	$\rho_{app,moy}$ (kg/l)
M_2 $v=0.91$	1	0.114	1.546	1.591	1.588
	2		1.543	1.587	
	3		1.554	1.588	

4.1a Porosité et la Compacité Et Indice Des Vides:

TABLE III.43 : Masse volumiques absolue de gravier de Mélange 2

le mélange	l'état	Porosité (%)	Compacité (%)	l'indice de vide
M_2	l'état lâche	39.83	60.17	0.661
	l'état compacte	38.28	61.72	0.620

6. Degré d'absorption d'eau(A) :

7. Tableau III.44 : Degré d'absorption d'eau de gravier du mélange 02

Mélange	N° d'essai	M_1 (g)	M_2 (g)	A (%)	A_{moy} (%)
M_2	01	300	302	0.6	0.73
	02	300	303	1	
	03	300	302	0.6	

8. Analyse granulométrique :

Les résultats obtenus de chaque fraction du gravier, sont regroupés dans les tableaux ci-dessous

c)- Mélange 2 (roulée 20%3/8 et 30 % 8/15 ; concassée 20%3/8 et 30 % 8/15) (2Kg)

Tableau III.45 : Résultat de l'analyse granulométrique de gravillon (roulée 20%3/8 et 30% 8/15 ; concassée 20%3/8 et 30 % 8/15)

mélange	Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumule(%)	Tamisât (%)	
M 2	16	28.3	28.3	1.88	98.12
	12.5	222.06	250.36	16.69	83.31
	10	384.01	634.37	42.29	57.71
	8	246.31	880.8	58.72	41.28
	6.3	191.30	1071.98	71.46	28.54
	5	182.01	1253.99	83.59	16.41
	4	142.80	1396.79	93.11	6.89
	3,15	83.68	1480.47	98.69	1.31
	2,5	18.5	1498.97	99.93	0.07
	Fond	1.21	1500	100	0.0

mélange n 03

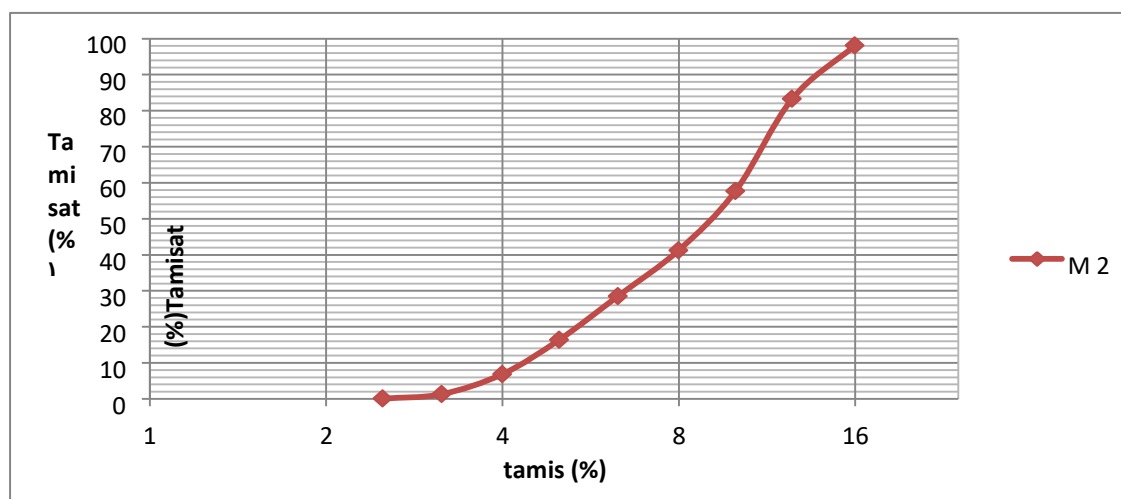


Figure III.7 : La courbe granulométrique des graviers (roulée 20%3/8 et 30 % 8/15 ; concassée 20%3/8 et 30 % 8/16) mélange 02.

III.4.3.mélange 03 (gravier roulée) (60% 8/15, 40% 3/8) :

1. Masses volumiques absolues:

2. TABLE III.46 : Masse volumiques apparentes des fractions 3/8 et 8/16 du gravier roulé

Mélange	Essai	M_1 (g)	V_1 (ml)	V_2 (ml)	ρ_{abs} (g/ml)	$\rho_{abs\ moy}$ (g/ml)
M_3	1	300	300	419	2.52	2.526
	2			418	2.54	
	3			419	2.52	

3. Masse volumique apparente:

A l'état lâche

TABLE III.47 : Masse volumiques apparentes des fractions 3/8 et 8/15 du gravier roulé

Mélange	Essai	M_1 (kg)	M_2 (kg)	ρ_{app} (kg/l)	$\rho_{app\ moy}$ (kg/l)
M_3 $v=0.91$	1	0.114	1.545	1.59	1.56
	2		1.523	1.56	
	3		1.506	1.54	

A l'état compacte

TABLE III.48 : Masse volumiques apparentes des fractions 3/8 et 8/15 du gravier roulé

Mélange	Essai	M_1 (kg)	M_2 (kg)	ρ_{app} (kg/l)	$\rho_{app\ moy}$ (kg/l)
M_3 $v=0.91$	1	0.114	1.568	1.615	1.62
	2		1.585	1.634	
	3		1.577	1.625	

4.1a Porosité et la Compacité Et Indice Des Vides:

5. Tableau III.49 : Porosité, Compacité Et Indice Des Vides.

le mélange	l'état	Porosité (%)	Compacité (%)	l'indice de vide
M_3	l'état lâche	38.2	61.8	0.61
	l'état compacte	35.86	64.14	0.56

6. Degré d'absorption d'eau(A) :

Tableau III.50 : Degré d'absorption d'eau du mélange 02.

Mélange	N° d'essai	M ₁ (g)	M ₂ (g)	A (%)	A _{moy} (%)
M ₃	01	300	301	0.33	0.44
	02	300	302	0.66	
	03	300	301	0.33	

7. Analyse granulométrique :

Les résultats obtenus de chaque fraction du gravier, sont regroupés dans les tableaux ci-dessous

Tableau III.51 : Résultat de l'analyse granulométrique de gravillon roulé ((40%3/8)/(60%8/15))

Mélange	Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumule (%)	Tamisât (%)	
M ₃	16	28	28	1.86	98.14
	12.5	203.4	231.4	15.42	84.58
	10	435.9	667.3	44.48	55.52
	8	242.8	910.1	60.67	39.33
	6.3	289.8	1199.9	79.99	20.01
	5	178.1	1378	91.86	8.14
	4	105.3	1483.3	98.88	1.12
	3,15	16.09	1499.39	99.95	0.05
	2,5	0.6	1499.99	99.99	0.01
	Fond	0.01	1500	100	0.0

mélange n 03

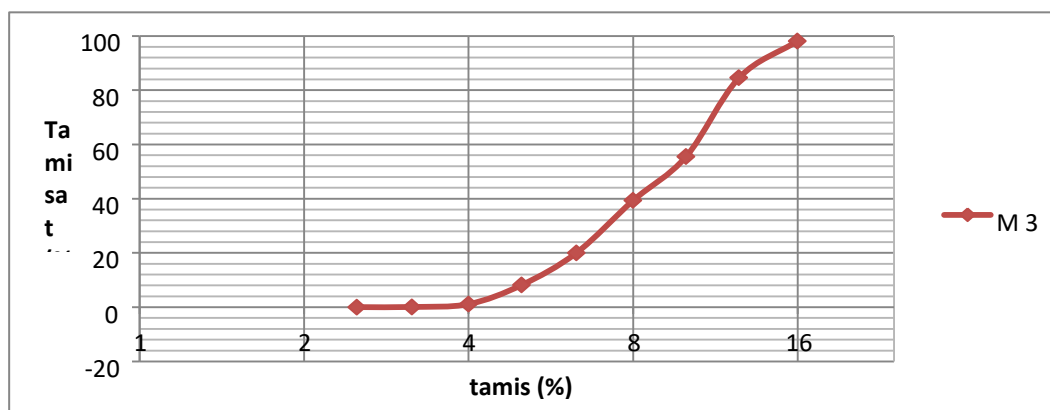


Figure II.8 : La courbe granulométrique des graviers roulés (3/8-8/16-) mélange 03

III.5.Ciment :

Le ciment de base utilisé dans notre recherche, est un ciment portland composé de classe 42.5 provient de la cimenterie de l'ACC de M'sila.

III.5.1.Caractéristiques du ciment CEMI 42,5:

III.5.1.1.Description :

Le Ciment Résistant aux Sulfates :

. CRS 400 selon la norme NA 443/2002. Le ciment CEMI 42,5 est un ciment pour travaux dans les milieux fortement agressifs Du sulfate de calcium est ajouté sous forme de gypse en tant que régulateur de prise. C'est un ciment conforme à la norme NA 443 :2002. FIGII-6: Sac de ciment CRS 400.

Composition:

- Clinker : 95 à100% ;
- Ajouts: 0 à 3% (Laitier, pouzzolane, calcaire).

III.5.1.2.Caractéristiques mécaniques et physiques du ciment utilisé :

Caractéristiques Physiques :

- Temps de début de prise mesuré sur pate pure;
- Retrait à 28 jours d'âge mesuré sur mortier normal s 1000 mm ;
- Stabilité mesurée sur éprouvette de pate pure s 10 mm.

Caractéristiques Physiques :

- Temps de début de prise mesuré sur pate pure;
- Retrait à 28 jours d'âge mesuré sur mortier normal s 1000 mm ;
- Stabilité mesurée sur éprouvette de pate pure s 10 mm.

III.5.1.3. Les caractéristiques chimiques du ciment utilisé:

- Temps de début de prise mesuré sur pate pure;
- Retrait à 28 jours d'âge mesuré sur mortier normal s 1000 mm ;
- Stabilité mesurée sur éprouvette de pate pure s 10 mm.

L'eau de gâchage utilisé est une eau potable du laboratoire de département de génie civil.

III.6.Calcul de la proportion des constituants :

GC : gravier concassé GR : gravier roulé

Appellation des mélanges :

Mélange n 01 : M 1 : $M_{60\% GC 8/15 + 40\% GC 3/8}$

Mélange n 02 : M 2 : $M_{30\% GC 8/15 + 20\% GC 3/8 + 30\% GR 8/15 + 20\% GR 3/8}$

Mélange n 03 : M 3 : $M_{60\% GR 8/15 + 40\% GR 3/8}$

B1 (béton témoin) : béton confectionné à base du mélange M 1 de fraction .

B2: béton confectionné à base du mélange M 2 de fraction .

B3 : béton confectionné à base du mélange M 3 de fraction

Tableau III.54 : Composition de béton pour 0.0071 m³.

Fraction de gravier				
Béton	GC 3/8	GC 8/15	GR 3/8	GR 8/15
B 1	40 %	60 %	0 %	0 %
B 2	20 %	30 %	20 %	30 %
B 3	0 %	0 %	40 %	60 %

III.6.1. Formulation du béton Méthodes de Dreux_Gorisse :

* mélange 01 : M 1

1. Détermination du dosage en ciment par 0.0071 m³ de béton :

$$\frac{C}{R} = GR \left(D - 0.5 \right) \frac{b}{E} \frac{c}{c - 1}$$

G : Coefficient granulaire donné par le (Tableau III.55), en fonction de la qualité et de la dimension maximale (*D max*) du gravier.

Tableau III.55. Valeurs de G coefficient granulaire

valeurs de G coefficient granulaire			
Qualité des granulats	dimension des granulats D (mm)		
	Fins >16	Moyens 25 > 40	Gros D > 63
Excellente	0.55	0.60	0.65
-bonne, courante	0.45	0.50	0.55
Passable	0.35	0.40	0.45

$D = 16mm \rightarrow G = 0.45$

R_c: Classe vraie du ciment à 28 jours (46 MPA)

$$\frac{C}{E} = \frac{R_b}{G * R_c}$$

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 (Figure II .10).

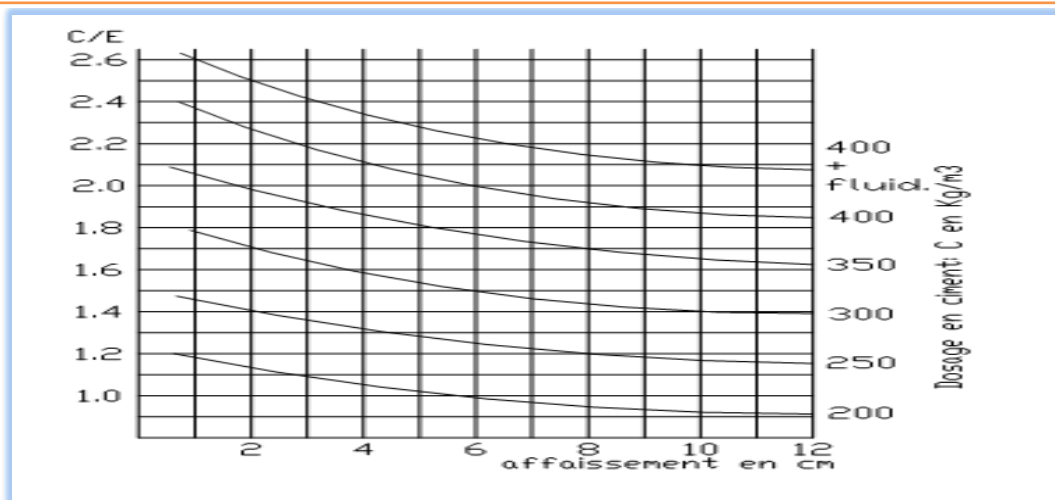


Figure II.9.dosage de ciment

$$A_f = 7\text{ cm}$$

→ l'abaque donne la valeur du dosage en ciment : $C = 600\text{Kg}$ (voir fig.2 .10)

$$\frac{C}{E} = 1.859$$

1. Détermination du dosage en eau:

$$\frac{C}{E} = 1.859$$

→ On en déduit la valeur de E qui est : $E = 322.75\text{Kg}$

$C = 600\text{ Kg}$

3 . Tracé de la courbe granulaire de référence :

Composition granulaire de référence OAB avec :

Le point O est repéré par ses coordonnées [0.08 ; 0]

Le point B est repéré par ses coordonnées [D ; 100] (D : le diamètre du plus gros granula $D = 16$).

Le point de brisure A a les coordonnées suivantes :

$$D = 16 < 20\text{mm} : X_A = D/2 = 8 \quad Y_A = 50 -$$

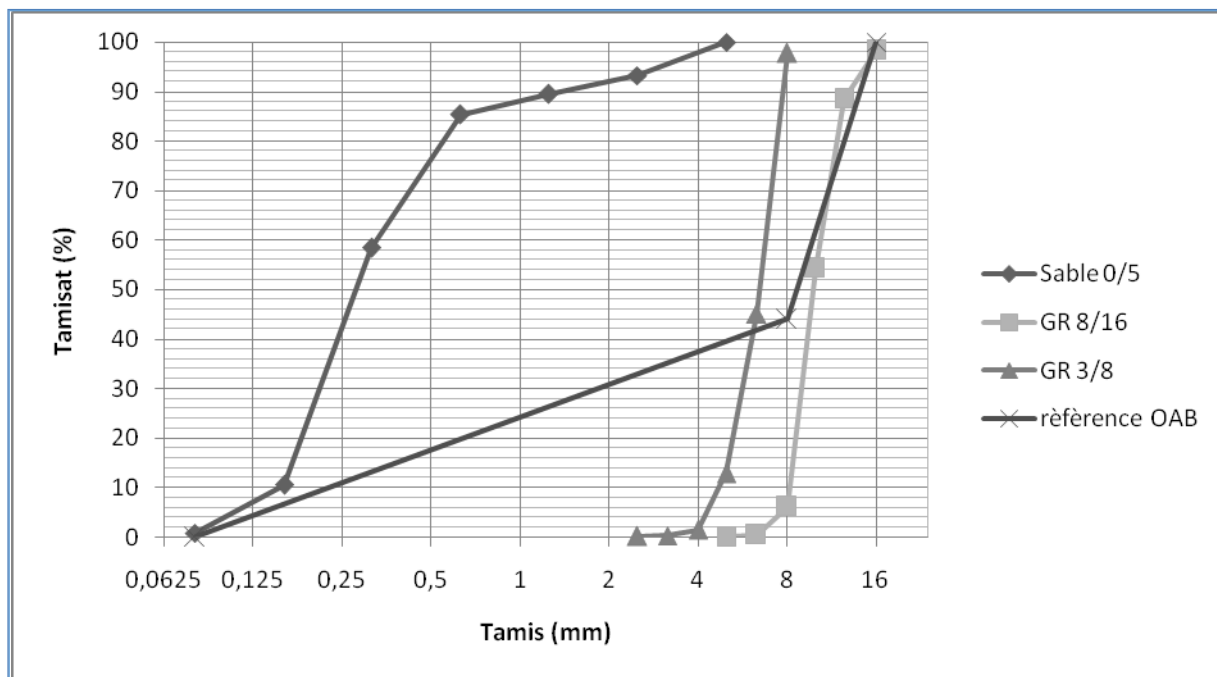


Figure III.12: Courbe Granulométrique.

Les pourcentages des granulats suivants :

- Sable 0/5 : 25%
- Sable fin ; 15%
- Gravier 3/8 : 25%

- Gravier 8/15 : 35%

4. Coefficient de compacité :

$$V_M = V_s + V_G + V_C$$

$$V = 1000\gamma - c$$

5. Dosage des granulats : Volume absolu du ciment :

$$c = \frac{C}{\rho_c}$$

$$C = 600/3.1 = 193.5 \text{ kg}$$

Volume absolu du granulat (l'ensemble) :

$$V_G = 1000 * 0.805 - 193.5 = 611.5 \text{ kg}$$

- Volume absolu du Sable :

$$V_{S \text{ FIN}} = 91.7 \text{ kg}$$

$$V_{S \text{ FIN}} = 152.9 \text{ kg}$$

- Volume absolu du Gravier 3/8 :

$$V_{3/8} = 152.9 \text{ kg}$$

Volume absolu du Gravier 8/16 :

$$V_{8/15} = 214 \text{ kkg}$$

Les dosages en masse des éléments secs (granulats, sable) pour 1m^3 de béton sont donnés par :Masse de Sable :a

$$MS_{fin} = 238.5\text{KG}$$

$$MS_{3/8} = 397.5\text{KG}$$

Masse de Gravier 3/8 :

$$M_{G3/8} = 397.5\text{kg}$$

Masse de Gravier 8 /16 :

$$M_{G8/15} = 556.4\text{kg}.$$

Pour préparer 1m^3 de béton, il faudra donc les masses suivants :

$$E = 322.75 \text{ l}$$

$$C = 600\text{kg}$$

$$S_{fin} = 238.5\text{kg}$$

$$S_{0/3} = 397.5\text{kg}$$

$$G_{3/8} = 397.5\text{kg}$$

$$G_{8/15} = 556.4\text{kg}$$

III.7. Le Sol

Pour fabriqué notre béton nous utilisons des matériaux locaux sont toujours disponibles se forme de roche à notre wilaya de M'sila et sont des matériaux presque gratuit (prix de livraison).



terre rouge

terre verte

terre blanche

figue III.13. type de sol



Figure III.14 Machine broyeur (du laboratoire de développement Géomatériaux université de M'sila ,prof : ben cheikh mouhamed

Nous avons utilisés trois types d'argile, argile n°1 «terre rouge (R) », terre n°2 « terre blanche (G) » et terre n°3 « terre verte (V) » (après broyage



terre n° 01(R)

terre n°02 (V)

terre n°03 (B)

figure III.15.type de sol après broyage

III.8. composition des mélanges

Pour préparer 0.0071m^3 de béton , il faudra donc les masses suivants :

* **mélange 01** :dosage ciment $400\text{kg}/\text{m}^3$, ajout 20%

Tabule III.56 mélange 01 :dosage ciment $400\text{kg}/\text{m}^3$, ajout 20%

<i>Constituents</i>	<i>Quantity %</i>
<i>Sable fin</i>	<i>11.4</i>
<i>Sable 0/3</i>	<i>18.9</i>
<i>Gravie 3/8</i>	<i>18.9</i>
<i>Gravie 8/15</i>	<i>26.5</i>
<i>Ciment</i>	<i>20.2</i>
<i>Ajout</i>	<i>4.1</i>

* **mélange 02** :dosage ciment $600\text{kg}/\text{m}^3$, ajout 20%

Tabule III.57 mélange 02 :dosage ciment $600\text{kg}/\text{m}^3$, ajout 20%

<i>Constituents</i>	<i>Masse ()</i>
<i>Sable 0/3</i>	<i>15.89</i>
<i>Gravie 3/8</i>	<i>15.89</i>
<i>Gravie 8/15</i>	<i>22.3</i>
<i>Ciment</i>	<i>30.35</i>
<i>ajout</i>	<i>6.07</i>

mélange 03 : dosage ciment 400kg/m³, ajout 40%

Tabule III.58 mélange 03 : dosage ciment 400kg/m³, ajout 40%

<i>Constituants</i>	<i>quntity (%)</i>
<i>Sable fin</i>	<i>10.71</i>
<i>Sable 0/3</i>	<i>18.03</i>
<i>Gravie 3/8</i>	<i>18.03</i>
<i>Gravie 8/15</i>	<i>24.99</i>
<i>Ciment</i>	<i>20.81</i>
<i>ajout</i>	<i>8.07</i>

* *mélange 04* : dosage ciment 600kg/m³, ajout 40%

Tabule III.59 mélange 04 : dosage ciment 600kg/m³, ajout 40%

<i>Constituants</i>	<i>Quantity (%)</i>
<i>Sable fin</i>	<i>8.62</i>
<i>Sable 0/3</i>	<i>14.36</i>
<i>Gravie 3/8</i>	<i>14.36</i>
<i>Gravie 8/15</i>	<i>20.14</i>
<i>Ciment</i>	<i>30.36</i>
<i>ajout</i>	<i>12.21</i>

III.8.1.Préparation des mélanges :

III.8.1.1Etapes de préparation :

Les étapes suivantes :

- 1- On pèse les quantités nécessaires des différents matériaux : gravier, sable, ciment, ajout et eau.
- 2- Préparation des moules : après le nettoyage et graissage à l'aide d'une huile les moules sont prêts pour utilisation.
- 3- le malaxage : L'opération est exécutée comme suit:

On pose ajout sèche avec la quantité du ciment, le sable et gravier dans le malaxeur et on malaxe le mélange à sec durant 40 à 60 secondes

On ajoute une quantité d'eau et l'adjuvant, puis on malaxe pendant 120 à 180 seconde jusqu'à l'obtention d'un mélange homogène et humide.

Le malaxage est la préparation des moules sont des opérations importantes dans la fabrication de la béton . La répartition du stabilisant doit être homogène pour que son effet soit uniforme pour tout le mélange. Cette homogénéité est conditionnée par le malaxage.

- 4- Le moulage des éprouvettes : cette opération est exécutée a l'aide d'une presse manuelle du laboratoire de développement Géo matériaux

Les éprouvettes utilisées sont des éprouvettes cubiques et cylindrique des dimensions $(10*10*10) \text{ cm}^3$ et $(10*20) \text{ cm}^2$



Figure III.16 le malaxeur utilisé et Eprouvettes cubique et cylindrique

III.8.2. La cure des éprouvettes

Après démoulage, les échantillons sont placés dans un milieu agressif (sulfate, chlore).

III.8.2.1 Humidité

les éprouvettes sont introduites dans une étuve climatique à 50 °C avec humidité de 95% pendant 28 jours.



Figure III.17. Humidificateur

III.8.2.2 Sulfate :

Les échantillons cylindriques sont placés dans un bassin d'eau contenant une concentration de 5% de solution de sulfate de sodium ($\text{Na}_2\text{O}_4\text{S}$) pendant 28 jours.



Figure III.18. Bassin d'eau et solution de sulfate de sodium

III.8.2.3 Chlorure :

Les échantillons cylindriques ont été placés dans une bassine d'eau contenant une concentration de 30% de solution chlorée à 12° pendant 28 jours.

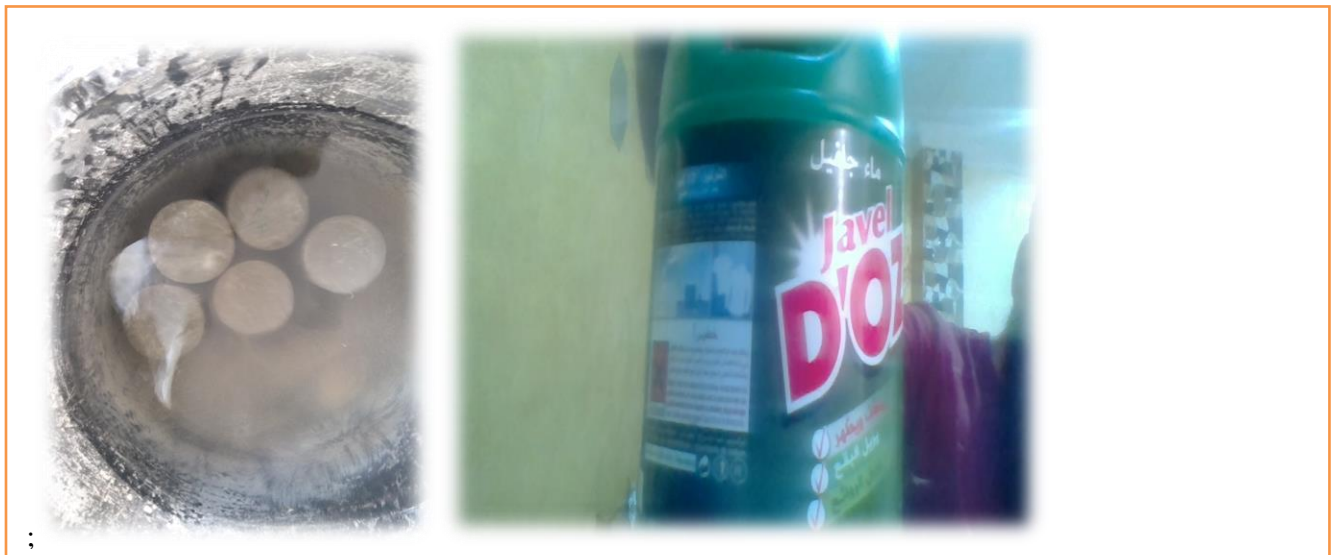


Figure III.19. Bassine d'eau et solution de chlore

III.8.2.4 Eau :

Les échantillons cubiques ont été placés dans un bac d'eau pendant 28 jours, et la masse a été pesée presque chaque jour afin d'atteindre la masse saturée confirmés pour trois valeurs des éprouvettes, ces dernières seront pesées sous l'eau masse d'immersion puis on les place dans séchés dans un four à moins de 100 degrés jusqu'à séchage complet, (La masse sèche).



Figure III.20. balance et four étuve

III.8.3. Essai de compression (la norme P 18-406)

L'essai de compression est réalisé suivant la norme P 18-406. $\sigma_c = F/S$

F : la charge appliquée en KN. **S** : section transversale de l'éprouvette ($S = a * a$).



Figure III. 21: Presse hydraulique pour l'essai de compression (avec une pression de 300KN).

III.8.4. La porosité accessible à l'eau :

Peau Les essais de porosité accessible à l'eau sont réalisés selon la norme (NF EN 18-459). L'objectif de cet essai est la mesure du le pourcentage de vide connecté à la surface du béton. Le principe de l'essai est basé sur une série de pesées à l'air et hydrostatique des échantillons. On obtient alors :

- Pesée hydrostatique (M_{eau})
- Pesée dans l'air de l'éprouvette saturée d'eau (M_{air})
- Pesée dans l'air de l'éprouvette sèche (M_{sec}).

Le séchage des éprouvettes est réalisé dans une étuve à une température de 105°C jusqu'à obtenir une masse constante (la masse ne varie pas de plus de 0,05 % entre deux pesées espacées de 24h). La porosité accessible à l'eau est calculée par la relation suivante :

$$Peau = \frac{M_{air} - M_{sec}}{M_{air} - M_{eau}} * 100$$

III.8.5. Méthode expérimentale :

Les facteurs désignés en cette recherche sont comme suit :

- F_1 = dosage en ciment
- F_2 = dosage d'adjuvant
- F_3 = ajout %
- F_4 = type de terre
- F_5 = la cure

III.8.5.1. Niveau des facteurs : En raison des différents niveaux de facteurs, il n'est pas possible de se baser sur un niveau bas et un niveau haut .

Tabule III.60 niveau des facteur

<i>Des facteurs</i>	<i>niveau</i>
<i>F_1</i>	<i>02</i>
<i>F_2</i>	<i>02</i>
<i>F_3</i>	<i>02</i>
<i>F_4</i>	<i>03</i>
<i>F_5</i>	<i>05</i>

III.8.5.2 Tableau de combinaison :

N°	DOSAGE en ciment	adjuvant	Ajout %	type de terre	la cure	porosité	la compression
1	400	0	20	Verte	eau	9	34
2	400	0	20	Verte	humi	12	37
3	400	0	20	Verte	Air	6	49
4	400	0	20	Verte	Sluf	10	33
5	400	0	20	Verte	chlo	11	42
6	400	0	40	Verte	eau	11	37
7	400	0	40	Verte	humi	11	47
8	400	0	40	Verte	Air	11	30
9	400	0	40	Verte	sof	16	27
10	400	0	40	Verte	chlo	14	47
11	400	0	20	Rouge	eau	10	36
12	400	0	20	Rouge	humi	12	40
13	400	0	20	Rouge	Air	10	52
14	400	0	20	Rouge	sof	11	50
15	400	0	20	Rouge	chlo	7	46
16	400	0	40	Rouge	eau	10	39
17	400	0	40	Rouge	humi	9	54
18	400	0	40	Rouge	Air	10	34
19	400	0	40	Rouge	sof	8	40
20	400	0	40	Rouge	chlo	6	35
21	400	0	20	Blanc	eau	12	32
22	400	0	20	blanc	humi	14	33
23	400	0	20	blanc	Air	12	33
24	400	0	20	blanc	sof	14	24
25	400	0	20	blanc	chlo	13	44
26	400	0	40	blanc	eau	9	41
27	400	0	40	blanc	humi	11	41
28	400	0	40	blanc	Air	9	21
29	400	0	40	blanc	sof	12	34
30	400	0	40	blanc	chlo	10	45
31	600	0	20	verte	eau	9	45
32	600	0	20	verte	humi	9	44
33	600	0	20	verte	Air	9	49
34	600	0	20	verte	sof	8	45
35	600	0	20	verte	chlo	7	48
36	600	0	40	verte	eau	10	44
37	600	0	40	verte	humi	10	45
38	600	0	40	verte	Air	10	30
39	600	0	40	verte	sof	16	27
40	600	0	40	verte	chlo	14	71

41	600	0	20	rouge	eau	5	75
42	600	0	20	rouge	humi	11	78
43	600	0	20	rouge	Air	5	52
44	600	0	20	rouge	sof	5	42
45	600	0	20	rouge	chlo	7	50
46	600	0	40	rouge	eau	7	77
47	600	0	40	rouge	humi	6	60
48	600	0	40	rouge	Air	7	54
49	600	0	40	rouge	sof	8	20
50	600	0	40	rouge	chlo	7	24
51	600	0	20	blanc	eau	11	33
52	600	0	20	blanc	humi	13	38
53	600	0	20	blanc	Air	11	38
54	600	0	20	blanc	sof	14	21
55	600	0	20	blanc	chlo	15	25
56	600	0	40	blanc	eau	6	52
57	600	0	40	blanc	humi	8	51
58	600	0	40	blanc	Air	6	44
59	600	0	40	blanc	sof	10	38
60	600	0	40	blanc	chlo	10	31
61	400	2,5	20	verte	eau	8	62
62	400	2,5	20	verte	humi	8	63
63	400	2,5	20	verte	Air	8	47
64	400	2,5	20	verte	sof	10	26
65	400	2,5	20	verte	chlo	8	30
66	400	2,5	40	verte	eau	11	61
67	400	2,5	40	verte	humi	9	49
68	400	2,5	40	verte	Air	11	48
69	400	2,5	40	verte	sof	7	41
70	400	2,5	40	verte	chlo	6	35
71	400	2,5	20	rouge	eau	9	48
72	400	2,5	20	rouge	humi	10	40
73	400	2,5	20	rouge	Air	9	42
74	400	2,5	20	rouge	sof	11	17
75	400	2,5	20	rouge	chlo	12	37
76	400	2,5	40	rouge	eau	8	66
77	400	2,5	40	rouge	humi	6	62
78	400	2,5	40	rouge	Air	8	60
79	400	2,5	40	rouge	sof	8	43
80	400	2,5	40	rouge	chlo	9	32
81	400	2,5	20	blanc	eau	10	40
82	400	2,5	20	blanc	humi	11	43
83	400	2,5	20	blanc	Air	10	64
84	400	2,5	20	blanc	sof	13	18
85	400	2,5	20	blanc	chlo	12	16

86	400	2,5	40	blanc	eau	7	38
87	400	2,5	40	blanc	humi	11	45
88	400	2,5	40	blanc	Air	7	40
89	400	2,5	40	blanc	sof	14	15
90	400	2,5	40	blanc	chlo	11	32
91	600	2,5	20	verte	eau	6	70
92	600	2,5	20	verte	humi	6	63
93	600	2,5	20	verte	Air	6	67
94	600	2,5	20	verte	sof	10	40
95	600	2,5	20	verte	chlo	6	52
96	600	2,5	40	verte	eau	8	69
97	600	2,5	40	verte	humi	5	62
98	600	2,5	40	verte	Air	8	57
99	600	2,5	40	verte	sof	8	38
100	600	2,5	40	verte	chlo	10	40
101	600	2,5	20	rouge	eau	7	51
102	600	2,5	20	rouge	humi	6	51
103	600	2,5	20	rouge	Air	7	78
104	600	2,5	20	rouge	sof	8	52
105	600	2,5	20	rouge	chlo	9	40
106	600	2,5	40	rouge	eau	8	55
107	600	2,5	40	rouge	humi	12	40
108	600	2,5	40	rouge	Air	8	46
109	600	2,5	40	rouge	sof	12	37
110	600	2,5	40	rouge	chlo	10	25
111	600	2,5	20	blanc	eau	8	46
112	600	2,5	20	blanc	humi	6	47
113	600	2,5	20	blanc	Air	8	46
114	600	2,5	20	blanc	sof	14	28
115	600	2,5	20	blanc	chlo	10	41
116	600	2,5	40	blanc	eau	6	38
117	600	2,5	40	blanc	humi	7	60
118	600	2,5	40	blanc	Air	6	51
119	600	2,5	40	blanc	sof	11	34
120	600	2,5	40	blanc	chlo	10	27

TableauIII.61. de combinaison

Conclusion :

le travail de cette recherche nous impose de réaliser ces expériences afin de faciliter l'analyse des résultats obtenues par la méthode d'expérience.

La méthode expérimentale nous facilite l'analyse des résultats obtenus après incorporations des combinaisons avec l'outil Min tab.

CHAPITRE 04

Résultats et interprétation

Chapitrer 04 : Résultats et interprétation

IV.1- Introduction :

Dans ce chapitre, après avoir réalisé toutes les combinaisons nécessaires de tous les mélanges des éprouvettes. On va présenter les résultats et donner les interprétations convenables pour les valeurs obtenues par les différents essais.

IV.2- Résultats des essais :

IV-2.1- Les diagrammes et les graphes donnez par logiciel Minitab :

IV- 2 2- graphique des effets principaux pour résistance

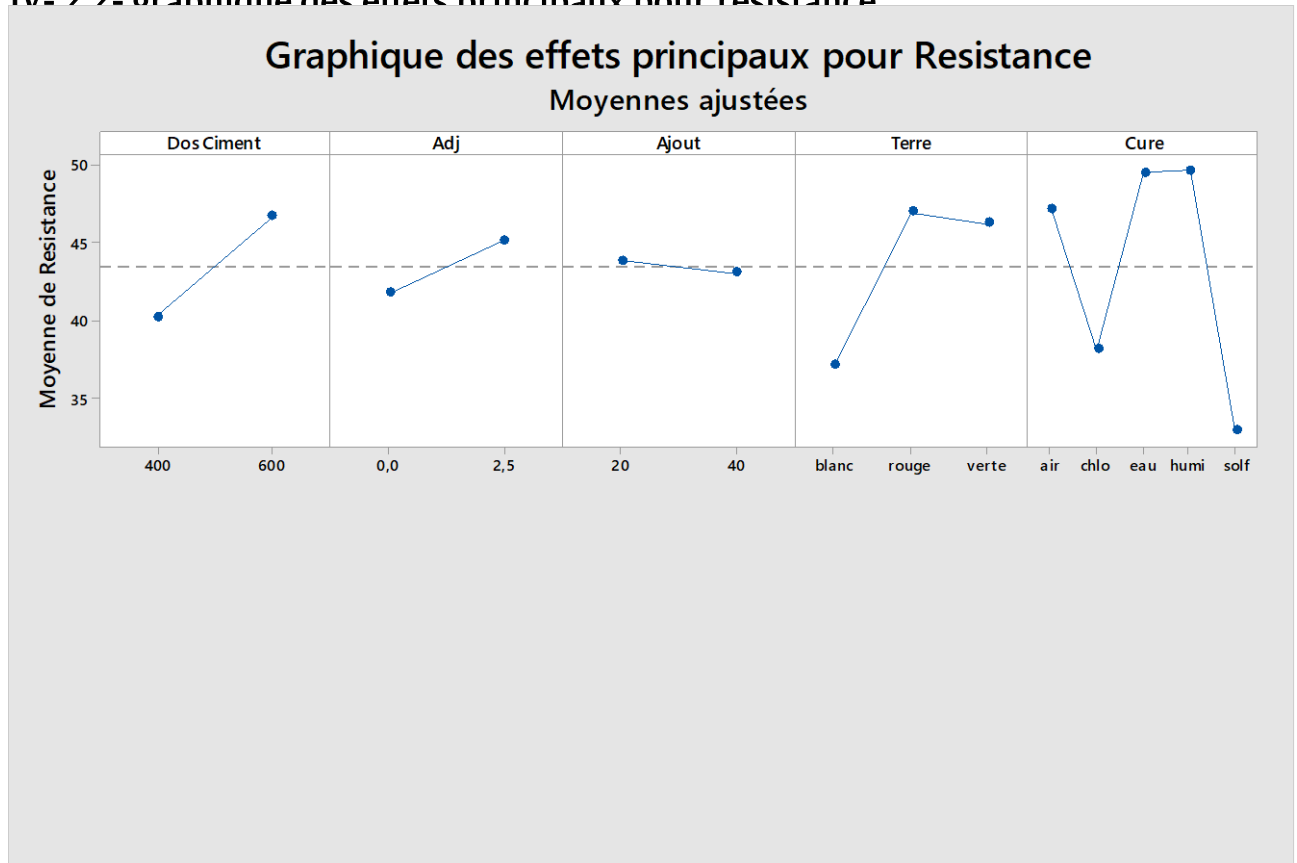


Figure IV.1 . graphique des effets principaux pour résistance

: 1- dosage en ciment : très forte résistance du béton en dosage de ciment 600Kg /m³.

La résistance de béton augmente relativement avec le dosage du ciment.

2- **Adjuvant :** le pourcentage 2.5 d'adjuvant fait augmenter la résistance du béton.

3- **Ajout :** La résistance n'a pas été affecté par le pourcentage d'ajout quelle que soit sa valeur de pourcentage 20 ou 40%.

4- **terre :** la terre blanche n'a pas d'effet sur la résistance du béton.

La terre rouge a un effet considérable sur la résistance du béton.

La terre verte a un effet acceptable sur le béton en comparaison avec la terre rouge.

5- **la cure** :la cure du béton en eau et en humidité donne de meilleurs résultats sur la résistance du béton en compression.

La cure en air du béton affecte la résistance du béton.

La cure du béton au milieu des sulfates ou de chlore n'affecte pas sur la résistance du béton.

IV-2.3- Diagramme des interaction pour résistance

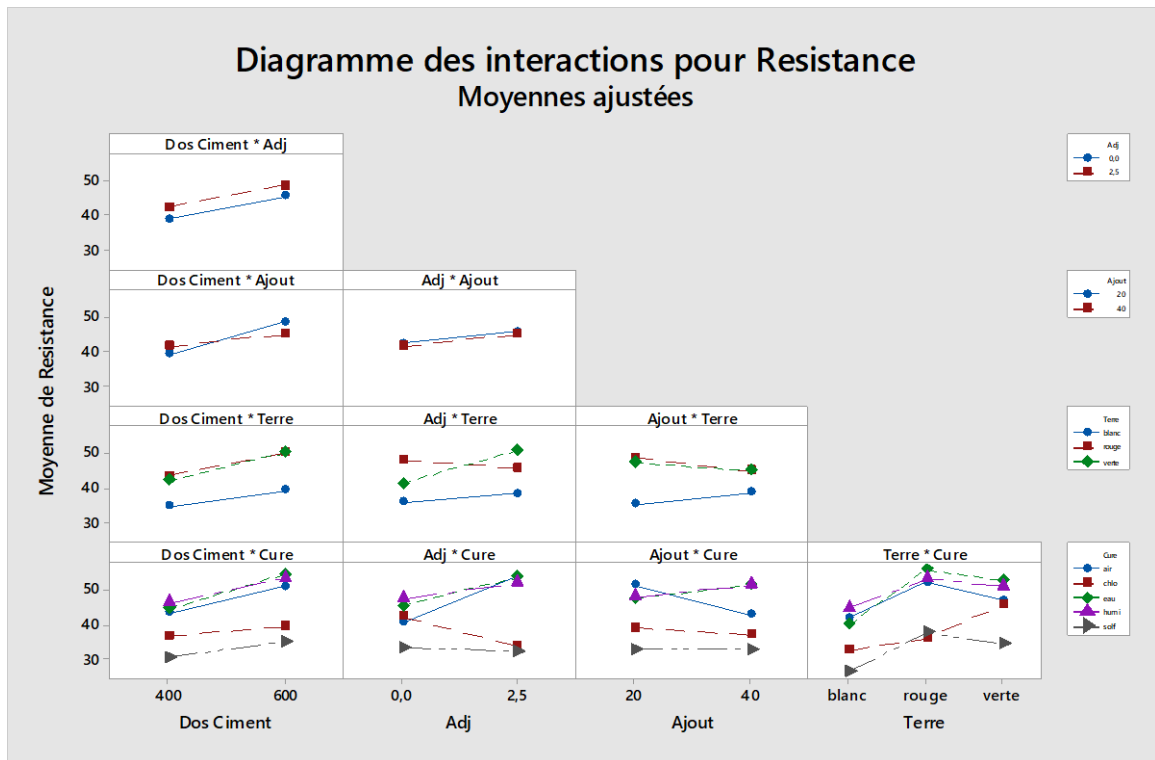


Figure IV.2. Diagramme des interactions pour résistance

1-**Ciment+cure** : la cure en air, humidité et en eau à dosage de béton 600kg/m³ a un grand effet sur sa résistance. Les facteurs principaux de cure les plus influents à la résistance compression du béton sont eau, l'air, humidité.

2-**Dosage ciment*Terre** : la terre rouge et la terre verte à dosage 600kg/m³ affecte une très forte résistance du béton. La terre rouge la terre verte sont les facteurs les plus influents à la résistance du béton à 600kg/m³.

3-**Dosage de ciment *Ajout** : les ajouts de 20 ou 40 % influent sur la résistance du béton au dosage de 600kg/m³.

4-**Dosage de ciment*adjuvant** : les dosages d'adjuvant n'affectent pas assez sur la résistance du béton dosé à 600kg/m³.

5-**Adjuvant+cure** : la cure du béton dans un milieu agressif (sulfate) avec des

pourcentages (0 ou 2.5%) adjuvant n'affecte absolument pas à la résistance du béton.

Adjuvant + terre : l'adjuvant améliore la résistance lorsqu' on utilise la terre verte comme ajout 41.55 à 51 Mpa.

L'adjuvant n'a aucun effet sur la résistance lorsqu' on utilise la terre

6-Adjuvant +ajout : L'utilisation d'adjuvant et la quantité de 20% à 40% de l'ajout ont peu d'effet sur l'augmentation de la résistance.

7-Ajout + terre : L'utilisation d'un pourcentage de 20 de la terre blanche a effet sur l'augmentation, au contraire pour la terre verte et rouge, l'ajout d'un pourcentage de 40 a un petit effet sur la diminution de la résistance.

Eviter à conservation a l'air diminuer de 48.85 à 45.5 Mpa.

8-Ajout +cure : de référence utilise 20% d'ajout en cure à l'eau l'utilisant de 40% fait diminuer la résistance de 51 à 42.9 mpa.

9-Terre + cure : meilleure de facteur le terre rouge + conservation eau ou l'humidité en deuxième position terre verte + conservation à l'eau humidité .

La perte de résistance lorsque je conserve le béton dans les sulfates diminué de 55.87 à 37.62 Mpa.

Equation de régression

$$\begin{aligned}
 \text{Resistance} = & 43,49 - 3,208 \text{ Dos Ciment}_{400} + 3,208 \text{ Dos Ciment}_{600} - 1,692 \text{ Adj}_{0,0} \\
 & + 1,692 \text{ Adj}_{2,5} + 0,3917 \text{ Ajout}_{20} - 0,3917 \text{ Ajout}_{40} - 6,292 \text{ Terre}_{\text{blanc}} \\
 & + 3,508 \text{ Terre}_{\text{rouge}} + 2,783 \text{ Terre}_{\text{verte}} + 3,675 \text{ Cure}_{\text{air}} - 5,367 \text{ Cure}_{\text{chlo}} \\
 & + 6,050 \text{ Cure}_{\text{eau}} + 6,217 \text{ Cure}_{\text{humi}} - 10,57 \text{ Cure}_{\text{solf}} \\
 & - 0,02500 \text{ Dos Ciment} * \text{Adj}_{400} 0,0 + 0,02500 \text{ Dos Ciment} * \text{Adj}_{400} 2,5 \\
 & + 0,02500 \text{ Dos Ciment} * \text{Adj}_{600} 0,0 - 0,02500 \text{ Dos Ciment} * \text{Adj}_{600} 2,5 \\
 & - 1,408 \text{ Dos Ciment} * \text{Ajout}_{400} 20 + 1,408 \text{ Dos Ciment} * \text{Ajout}_{400} 40 \\
 & + 1,408 \text{ Dos Ciment} * \text{Ajout}_{600} 20 - 1,408 \text{ Dos Ciment} * \text{Ajout}_{600} 40 \\
 & + 0,9583 \text{ Dos Ciment} * \text{Terre}_{400} \text{ blanc} - 0,1417 \text{ Dos Ciment} * \text{Terre}_{400} \text{ rouge}
 \end{aligned}$$

- 0,8167 Dos Ciment*Terre_400 verte - 0,9583 Dos Ciment*Terre_600 blanc
 + 0,1417 Dos Ciment*Terre_600 rouge + 0,8167 Dos Ciment*Terre_600 verte
 - 0,6250 Dos Ciment*Cure_400 air + 1,833 Dos Ciment*Cure_400 chlo
 - 1,833 Dos Ciment*Cure_400 eau - 0,3333 Dos Ciment*Cure_400 humi
 + 0,9583 Dos Ciment*Cure_400 solf + 0,6250 Dos Ciment*Cure_600 air
 - 1,833 Dos Ciment*Cure_600 chlo + 1,833 Dos Ciment*Cure_600 eau
 + 0,3333 Dos Ciment*Cure_600 humi - 0,9583 Dos Ciment*Cure_600 solf
 + 0,07500 Adj*Ajout_0,0 20 - 0,07500 Adj*Ajout_0,0 40 - 0,07500 Adj*Ajout_2,5

20

+ 0,07500 Adj*Ajout_2,5 40 + 0,4417 Adj*Terre_0,0 blanc + 2,592 Adj*Terre_0,0
 rouge - 3,033 Adj*Terre_0,0 verte - 0,4417 Adj*Terre_2,5 blanc
 - 2,592 Adj*Terre_2,5 rouge + 3,033 Adj*Terre_2,5 verte - 4,975 Adj*Cure_0,0 air
 + 5,900 Adj*Cure_0,0 chlo - 2,433 Adj*Cure_0,0 eau - 0,6833 Adj*Cure_0,0 humi
 + 2,192 Adj*Cure_0,0 solf + 4,975 Adj*Cure_2,5 air - 5,900 Adj*Cure_2,5 chlo
 + 2,433 Adj*Cure_2,5 eau + 0,6833 Adj*Cure_2,5 humi - 2,192 Adj*Cure_2,5 solf
 - 2,092 Ajout*Terre_20 blanc + 1,458 Ajout*Terre_20 rouge
 + 0,6333 Ajout*Terre_20 verte + 2,092 Ajout*Terre_40 blanc
 - 1,458 Ajout*Terre_40 rouge - 0,6333 Ajout*Terre_40 verte + 3,858 Ajout*Cure_20
 air + 0,7333 Ajout*Cure_20 chlo - 2,267 Ajout*Cure_20 eau - 2,017 Ajout*Cure_20
 humi - 0,3083 Ajout*Cure_20 solf - 3,858 Ajout*Cure_40 air
 - 0,7333 Ajout*Cure_40 chlo + 2,267 Ajout*Cure_40 eau + 2,017 Ajout*Cure_40

humi

+ 0,3083 Ajout*Cure_40 solf + 1,250 Terre*Cure_blanc air
 + 0,7917 Terre*Cure_blanc chlo - 3,250 Terre*Cure_blanc eau
 + 1,333 Terre*Cure_blanc humi - 0,1250 Terre*Cure_blanc solf

+ 1,575 Terre*Cure_rouge air - 5,508 Terre*Cure_rouge chlo
 + 2,825 Terre*Cure_rouge eau - 0,09167 Terre*Cure_rouge humi
 + 1,200 Terre*Cure_rouge solf - 2,825 Terre*Cure_verte air
 + 4,717 Terre*Cure_verte chlo + 0,4250 Terre*Cure_verte eau
 - 1,242 Terre*Cure_verte humi - 1,075 Terre*Cure_verte solf
 + 1,375 Dos Ciment*Adj*Ajout_400 0,0 20 - 1,375 Dos Ciment*Adj*Ajout_400 0,0
 40
 - 1,375 Dos Ciment*Adj*Ajout_400 2,5 20 + 1,375 Dos Ciment*Adj*Ajout_400 2,5
 40
 - 1,375 Dos Ciment*Adj*Ajout_600 0,0 20 + 1,375 Dos Ciment*Adj*Ajout_600 0,0
 40
 + 1,375 Dos Ciment*Adj*Ajout_600 2,5 20 - 1,375 Dos Ciment*Adj*Ajout_600 2,5
 40
 + 1,125 Dos Ciment*Adj*Terre_400 0,0 blanc - 1,925 Dos Ciment*Adj*Terre_400
 0,0
 rouge + 0,8000 Dos Ciment*Adj*Terre_400 0,0 verte
 - 1,125 Dos Ciment*Adj*Terre_400 2,5 blanc + 1,925 Dos Ciment*Adj*Terre_400
 2,5
 rouge - 0,8000 Dos Ciment*Adj*Terre_400 2,5 verte

IV-2.4- Graphique des effet principaux pour porosité

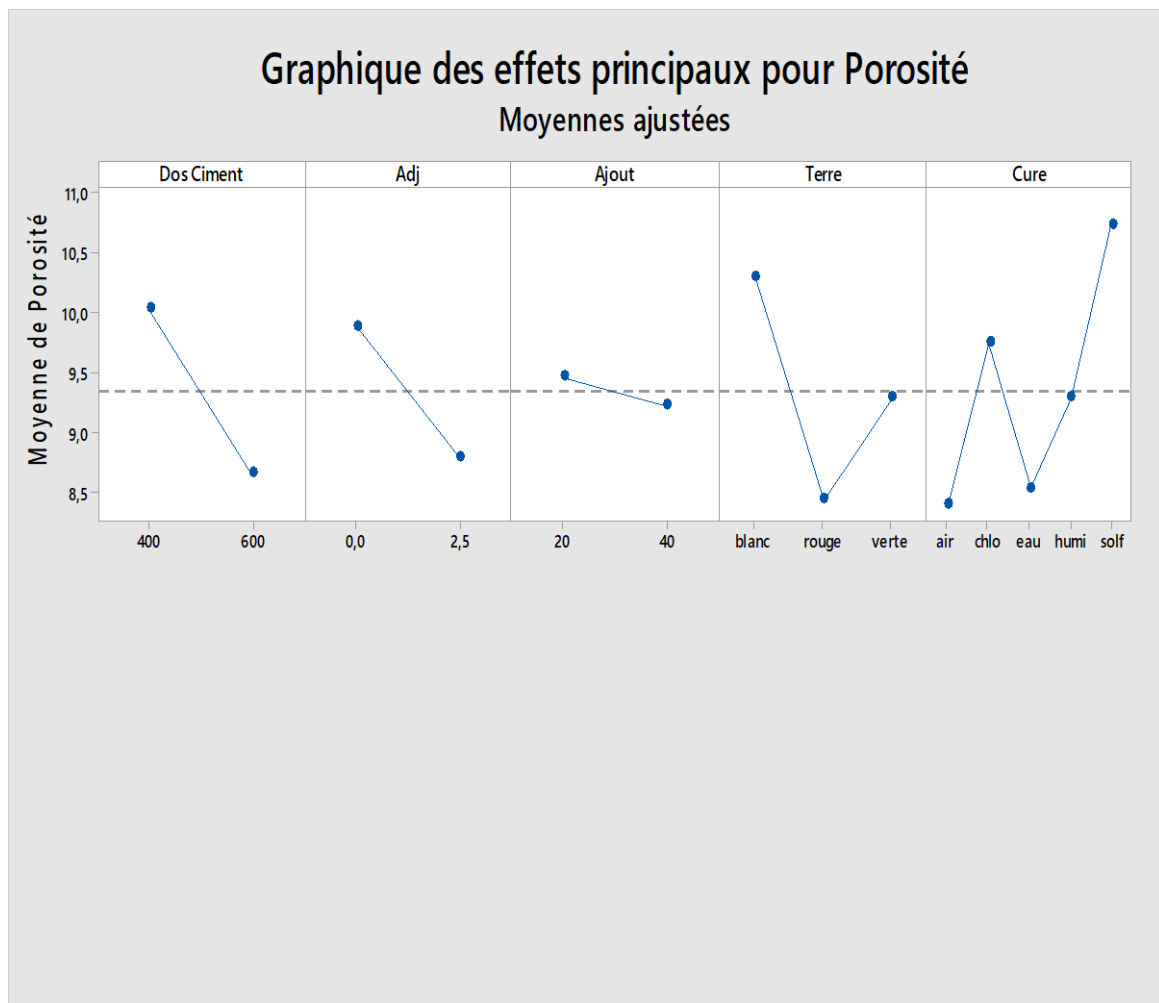


Figure IV.3. Graphique des effet principaux pour porosité

1-**Dosage en ciment** : le fort dosage en ciment (600kg/m³) représente un facteur influent sur la faible porosité du béton.

2-**Adjuvant** : Un fort pourcentage d adjuvant affecte une très faible porosité du béton.

3-**Ajout** : Le pourcentage de 20ou40 % n'affecte pas considérablement la porosité du béton.

4-**Terre** : la terre rouge est considérée le facteur principal affectant la meilleure porosité du béton vis-à-vis des autres terres blanche ou verte.

5-**Curre** : les facteurs les plus influents à la porosité du béton sont à l'air l'eau.

IV-2.5- Diagramme des interactions pour porosité

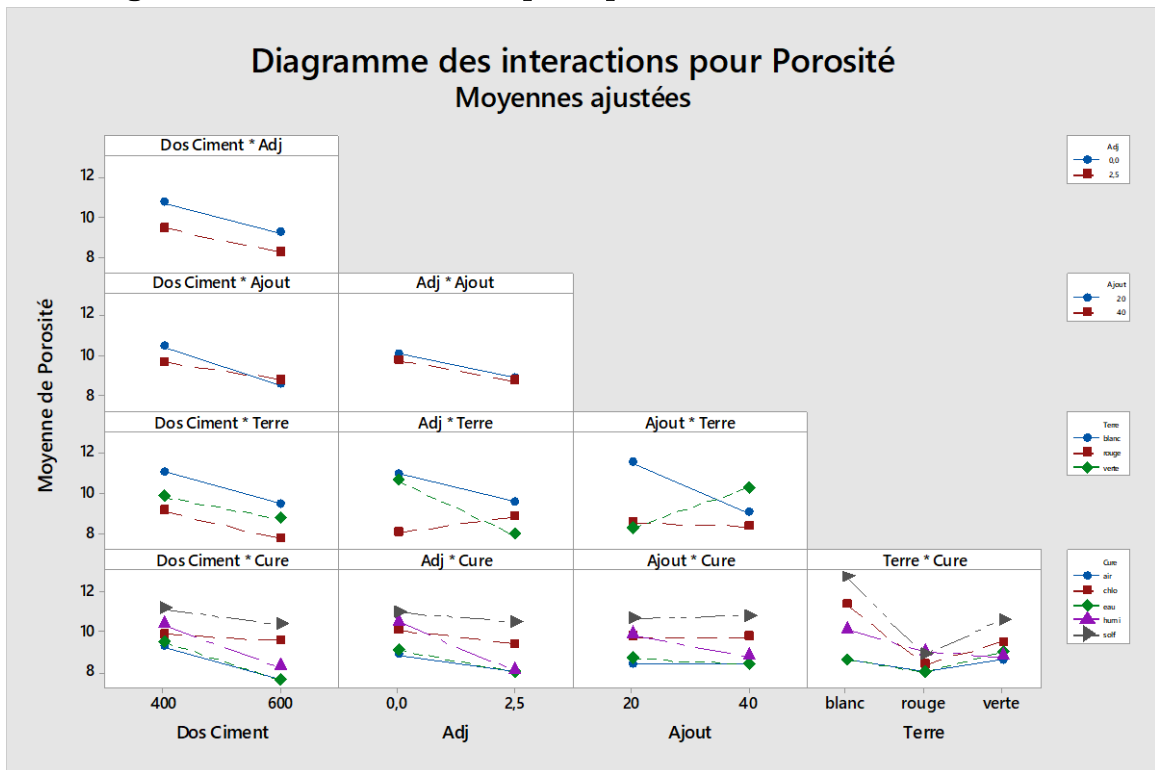


Figure IV4 Diagramme des interaction pour porosité

1-Dosage du ciment :

le dosage de 600kg/m³ affecte considérablement une faible porosité du béton en mode de cure.

Le dosage de 600kg/m³ est un facteur principal influant sur la faible porosité du béton en mode de cure.

La cure dans un milieu humide d'un béton dosé à 600kg/m³ affecte une faible porosité. la cure dans un milieu humide d'un béton dosé à 600kg/m³ est considéré un facteur influent sur la faible porosité du béton.

Le béton dosé à 600kg/m³ en milieu agressif chlore ou sulfate n'affecte pas assez sur la faible porosité du béton.

- 1 adjuvant à un dosage de 2.5% dans un béton dosé 600kg/m³ affecte une faible porosité voisine à celle d'un pourcentage de 0%.

- la terre rouge peut être considérée le facteur le plus affectant à la porosité du béton à un

dosage de 600kg/m³ en comparaisant avec les autres terres blanche ou verte.

- les ajouts de 20 ou 40 % à un dosage de 600kg/m³ affectant une faible porosité du béton d'une façon très rapprochée.

2- adjuvant :

- le béton est non poreux par élévation du pourcentage de l'adjuvant en mode de cure en air en eau et à l'humidité Pour une faible porosité,
- nous utilisons de la terre rouge et 0 % d'adjuvant , quant aux terres vertes, notamment blanches, il est recommandé d'en utiliser 2,5 % pour réduire la porosité. .
- Si ne pas utiliser ajouter 20 ou 40% plus un dosage de 0,0 à 2,5 adjuvants n'a aucun effet sur la diminution de la porosité .

3-Ajout :

- La porosité n'a pas été affectée par l'ajout de 20 à 40 % au béton, dans un milieu agressif tel que les sulfates et les chlorures, et dans l'eau et en le laissant à l'air. En milieu humide, la porosité est diminuée à utilisation de 40% de l'ajout.
- La porosité n'a pas été affectée par l'ajout de 20 à 40 % au béton, dans un milieu agressif tel que les sulfates et les chlorures, et dans l'eau et en le laissant à l'air. En milieu humide, la porosité est diminuée à utilisation de 40% de l'ajout.

humide et sec, ou dans l'eau, il donne de faibles pourcentages aussi que 8 % de porosité du béton.

4-Terre :

La terre rouge en différents mode de cure (humidité, eau ,sulfate ,air,chlore) présente une très faible porosité en comparaison des autres terres blanche ou verte.

Equation de régression

$$\text{Porosité} = 9,350 + 0,6833 \text{ Dos Ciment}_{400} - 0,6833 \text{ Dos Ciment}_{600}$$

+ 0,5500 Adj_0,0
 - 0,5500 Adj_2,5 + 0,1167 Ajout_20 -
 0,1167 Ajout_40 + 0,9500 Terre_blanc
 - 0,9000 Terre_rouge - 0,05000 Terre_verte -
 0,9333 Cure_air + 0,4000 Cure_chlo
 - 0,8083 Cure_eau - 0,05833 Cure_humi
 + 1,400 Cure_solf
 + 0,08333 Dos Ciment*Adj_400 0,0 -
 0,08333 Dos Ciment*Adj_400 2,5
 - 0,08333 Dos Ciment*Adj_600 0,0
 + 0,08333 Dos Ciment*Adj_600 2,5
 + 0,2500 Dos Ciment*Ajout_400 20 -
 0,2500 Dos Ciment*Ajout_400 40
 - 0,2500 Dos Ciment*Ajout_600 20
 + 0,2500 Dos Ciment*Ajout_600 40
 + 0,1167 Dos Ciment*Terre_400 blanc
 + 0,01667 Dos Ciment*Terre_400 rouge
 - 0,1333 Dos Ciment*Terre_400 verte -
 0,1167 Dos Ciment*Terre_600 blanc
 - 0,01667 Dos Ciment*Terre_600 rouge
 + 0,1333 Dos Ciment*Terre_600 verte
 + 0,1500 Dos Ciment*Cure_400 air -
 0,5167 Dos Ciment*Cure_400 chlo
 + 0,2750 Dos Ciment*Cure_400 eau
 + 0,3583 Dos Ciment*Cure_400 humi
 - 0,2667 Dos Ciment*Cure_400 solf -

0,1500 Dos Ciment*Cure_600 air
 + 0,5167 Dos Ciment*Cure_600 chlo -
 0,2750 Dos Ciment*Cure_600 eau
 - 0,3583 Dos Ciment*Cure_600 humi
 + 0,2667 Dos Ciment*Cure_600 solf
 + 0,05000 Adj*Ajout_0,0 20 - 0,05000 Adj*Ajout_0,0
 40 - 0,05000 Adj*Ajout_2,5 20
 + 0,05000 Adj*Ajout_2,5 40 + 0,1500 Adj*Terre_0,0
 blanc - 0,9500 Adj*Terre_0,0
 rouge + 0,8000 Adj*Terre_0,0 verte -
 0,1500 Adj*Terre_2,5

Conclusion :

A travers les résultats précédents, nous constatons que le sol rouge est le meilleur choix comme ajout au béton, car ce dernier fait le béton avec une faible porosité et une résistance à un meilleur agressif de chlorures et de sulfates.

Chapitre 05

Conclusion générale

Chapitre 05 Conclusion générale :

La durabilité du béton est en grande partie fonction de la difficulté qu'ont les agents agressifs à pénétrer dans le réseau poreux du béton. La recherche d'une forte compacité sera toujours une condition nécessaire pour une bonne durabilité.

Le principal but de cette étude est d'améliorer la durabilité du béton tout en additionnant des terres d'origine différents, adjuvants tels que le **médaplaste, et medaflow** conditionné dans des milieux agressifs divers . La méthode de plan d'expérience est la méthode de base de notre étude car la théorie des plans d'expérience assure les conditions pour lesquelles on obtient la meilleure précision possible avec le minimum d'essais. On a donc le maximum d'efficacité avec le minimum d'expériences et par conséquent le cout minimum.

Les différents types de facteurs choisis selon l'étude ont été au nombre de cinq dont les réponses seront établies, sous forme de différents graphes, afin de déterminés les facteurs influent et principaux dans cette étude.

Les facteurs désignés en cette recherche sont comme suit :

- F_1 = dosage en ciment , F_2 = dosage d'adjuvant , F_3 = ajout % , F_4 = type de terre , F_5 = la cure

Les factures Le plus L'influents sur la résistance du béton

- **dosage en ciment** : très forte résistance du béton en dosage de ciment 600Kg /m³.

La résistance de béton augmente relativement avec le dosage du ciment.

Adjuvant : le pourcentage 2.5 d'adjuvant fait augmenter la résistance du béton.

La terre rouge a un effet considérable sur la résistance du béton.

La terre verte a un effet acceptable sur le béton en comparaison avec la terre rouge.

La cure : la cure du béton en eau et en humidité donne de meilleurs résultats sur la résistance du béton en compression.

- **Les facteurs les moins influents sur la résistance de béton**

Ajout : La résistance n'a pas été affecté par le pourcentage d'ajout (quelle que soit sa valeur de pourcentage 20 ou 40%).

terre : la terre blanche n'a pas d'effet sur la résistance du béton.

la cure La cure en air du béton affecte une faible résistance du béton.

La cure du béton au milieu des sulfate ou de chlore n'affecte pas sur la résistance du béton.

- Les facteurs Le plus L'influent sur la porosité de béton

Dosage en ciment : le fort dosage en ciment (600kg/m³) représente un facteur influent sur la faible porosité du béton.

Adjuvant : Un fort pourcentage d'adjuvant affecte une très faible porosité du béton.

Terre : la terre rouge est considérée le facteur principal affectant la meilleure porosité du béton vis-à-vis des autres terres blanche ou verte.

Cure : les facteurs les plus influents à la porosité du béton sont à l'air l'eau.

- Les facteurs Les moins influents sur la porosité de béton

-Ajout : Le pourcentage de 20 ou 40 % n'affecte pas considérablement la porosité du béton

-Cure : les facteurs les moins influents à la porosité du béton sont au sulfate et au chlore

Grâce aux résultats de cette étude pilote, nous avons identifié les principales conclusions suivantes :

-Un fort dosage en béton (600kg/m³) affecte une très forte résistance et porosité au béton.

-Un fort pourcentage d'adjuvant influe sur la résistance et la porosité en même temps.

-La terre rouge est considérée est le meilleur ajout en présentant une forte porosité et une faible porosité au béton étudié.

-Le mode de cure a différé, l'eau et l'humidité influent sur la forte résistance, par contre l'air et l'eau influe sur une faible porosité du béton.

-Quelque soit les pourcentages choisis d'ajouts de terre n'influent ni sur la résistance ni sur la porosité.

-Les milieux de cure optés (sulfate ou chlore) sont considérés des milieux agressifs influant négativement à la résistance et porosité du béton.

L'étude a pour but de trouver un béton avec différents ajouts de terre ayant des caractéristiques physico-chimiques durable aux milieux agressifs.

La perspective de cette recherche consiste à continuer sur cet axe mais de prendre en considération d'autres paramètres comme l'âge du béton ou autres qui représente le facteur significatif de durabilité du béton.