



جامعة محمد بوضياف - المسيلة
Université Mohamed Boudiaf - M'sila

Ministère de l'enseignement supérieure
et de la recherche scientifique

Université Mohamed Boudiaf - M'sila

Faculté de technologie



جامعة محمد بوضياف - المسيلة
Université Mohamed Boudiaf - M'sila

Département de GENIE CIVIL

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de
MASTER

FILIERE : Génie Civil

SPECIALITE : Matériaux

THEME

**durabilité d'un béton exposé à un
milieu agressive(acide sulfurique),
influence de la forme des granulats
(concassé-roulées)**

Dirigé par :

- Pr. Naceri.A.GH
- Mr.Zitouni.S

Présenté par :

- Debih abdelmohcene

Promotion : 2015/2016.



Dédicace :

Je dédie ce modeste travail à :

Mes très chers parents

Mes frères

Ma grand-mère qui serait tant fière de moi si elle était là,

*Ma famille grands et petits, mes camarades, mes amies houari et adhem et
yakoub et surtout tous mes enseignants,*

Et tous ceux qui portent l'Algérie dans leurs cœurs.

abdelmohcene





Remerciement :

Merci !C'est un petit mot tout simple mais qui pèse lourd . Un grand merci, un petit merci , peu importe sa taille,il n'a pas de dimension .C'est un signe de reconnaissance qui ne connaît pas d'indifférence .

Merci ,M^r S.zitouni et M^r A.Gh.nacéri , qui a encadré ce travail, pour sa disponibilité, pour son écoute, pour ses grandes qualités pédagogiques, ainsi que pour sa rigueur scientifique, qu'il a su me communiquer pour mener au mieux ce travail .

Merci, chers parents, vous, source de mon énergie dans la vie, base de ma réussite et mon appui dans tous les temps.

Merci et encore merci mes professeurs qui ont contribué à mon apprentissage et à mon savoir depuis l'école primaire jusqu'à l'université

Merci, à ma famille, mes frères et mes sœurs de m'avoir encouragé et soutenu.

Merci, mes chères amies et mes chers camarades pour m'avoir permis de passer cinq belles années à l'université.

Merci, à toutes les personnes ayant contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.



Sommaire :

Introduction générale	
Chapitre 01 : Etude bibliographique	
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'eau et les granulats).....	6
I-4) Les compositions des bétons :.....	8
I-4-1) Béton	8
I-4-2) Composition du béton	8
I-4-3) Le durcissement du béton :.....	8
I-4-3-1) La réaction d'hydratation :.....	8
I-4-3-2)Description de la microstructure.....	9
I-4-4) Propriétés des bétons	9
I-4-5) Différents types de bétons	11
I-5-) Formulation du béton :.....	11
I -6)La durabilité de béton.....	17

I-7) Les attaques chimiques du béton	18
I-7.1) Les attaques sulfatiques	18
I-7-2) Attaque par les acides :	25
I-7-3) La carbonatation	28
I-7-4) L'alcali-réaction	29
I-8) Conclusion.....	32
Références bibliographiques.....	33

Chapitre 02 : Matériaux et essais

II.1. Introduction	35
II.2. SABLE D'OUED (BOUSAADA).....	35
II.2.1. Origine du sable	35
II.2.2. Caractéristiques physiques des sable.....	35
II.2.3. Les Caractéristiques chimiques des sable.....	44
II .3. Graviers	44
II. 3.1.Gravier concassé	44
II.3.2. Gravier roulée.....	50
II . 4. Type de mélange	55
II.5. Ciment	62
II.6 l'eau de gâchage	63
II.7 Calcul de la proportion des constituants	63
II.8. Performances des bétons à l'état frais et à l'état durci	70
II.9 Conclusion	74

Chapitre 03 : résultat discussion

III.1. Introduction	75
III.2. Représentation et analyse des résultats	76
III. 2.1 masse volumique et porosité des différent mélanges de granulat	76
III.2.2 Les résultats des essais effectués sur béton.....	77
III.2.2.1 Essais sur béton frais.....	77
III .2.2.2 Essais sur bétons durcis.....	79
Chapitre 04 : Conclusion générale	
Conclusion générale.....	89

Liste des tableaux

Chapitre I :

Tableau I.1 : valeur de coefficient du A	12
Tableau I.2 Valeurs de G coefficient granulaire.	14
Tableau I-3-valeur du terme correcteur K.....	15
Tableau I-4- coefficient de compacité.....	16
Tableau I.5 - Composants du béton menacés par la corrosion	28

Chapitre II :

Tableau II.1 : Masse volumique absolue du sable de Boussaâd	36
Tableau II .2 : Masse volumique apparente du sable de Boussaâda à l'état lâche.....	36
Tableau II.3 : Masse volumique apparente du sable de Boussaâda à l'état compact	37
Tableau II.4: la porosité, la compacité et l'indice de vide Pour le sable de Boussaâda.....	38
Tableau II.5 : Equivalent du sable de Boussaâda.....	40
Tableau II.6 : Comparaison des résultats.....	40
Tableau II.7 : Degré d'absorption du sable de Boussaâda.....	41
Tableau II.8 : analyse granulométrique du sable d'oued (Oued Maitre).....	42
Tableau II.9 : Analyse chimique du sable de BOUSAADA.....	44
Tableau II.10 : Masse volumique apparente du gravier concassé 8/16 a l'état lâche	45
Tableau II.11: Masse volumique apparente du gravier concassé 8/16 a l'état compact.	45
Tableau II.12: Masse volumique apparente du gravier concassé 3/8 a l'état lâche	45
Tableau II.13: Masse volumique apparente du gravier concassé 3/8 a l'état compact.....	45
Tableau II.14 : Masse volumique absolue du gravier concassé.....	46
Tableau II.15 : Porosité, Compacité Et Indice Des Vides.....	46
Tableau II.16 : Degré d'absorption d'eau du gravier concassé.....	47
Tableau II.17 : Analyse granulométrique du gravier concassé 3/8.....	47
Tableau II.18 : analyse granulométrique du gravier concassé 8/16.....	48

Tableau II.19. : Caractéristiques mécaniques du gravier utilisé.....	49
Tableau II.20 : Classification des roches en fonction du coefficient LA.....	50
Tableau II.21. : Analyse chimique de la pierre concassée.....	50
Tableau II.22: Masse volumique apparente du gravier roulée 8/16 à l'état lâche	51
Tableau II.23: Masse volumique apparente du gravier roulée 8/16 à l'état compact.....	51
Tableau II.24: Masse volumique apparente du gravier roulée 3/8 à l'état lâche	51
Tableau II.25: Masse volumique apparente du gravier roulée 3/8 à l'état compact.....	51
Tableau II.26 : Masse volumique absolue du gravier roulée.....	52
Tableau II.27 : la densité du gravier roulée.....	52
Tableau II.28 : Porosité, Compacité Et Indice Des Vides.....	52
Tableau II.29 : Degré d'absorption d'eau du gravier roulée.....	52
Tableau II.30 : Analyse granulométrique du gravier roulée 3/8.....	53
Tableau II.31 : analyse granulométrique du gravier roulée 8/16.....	53
Tableau II.32. : Caractéristiques mécaniques du gravier utilisé.....	54
Tableau II.33 : Classification des roches en fonction du coefficient LA.....	54
Tableau II.34 : Masse volumiques absolues des mélanges 02 3/8 et 8/16 du gravier concassé.....	55
Table II.35 : Masse volumiques apparentes des fractions 3/8 et 8/16 du gravier concassé.....	55
Table II.36 : Masse volumiques apparentes des fractions 3/8 et 8/16 du gravier concassé.....	55
Tableau II.37 : Porosité, Compacité Et Indice Des Vides.....	56
Tableau II.38 : Degré d'absorption d'eau du mélange 01.....	56
table II.39 – Résultat de l'analyse granulométrique de gravillon concassé ((40%3/8)/(60%8/16))..... mélange n 01.....	56
table II.40 : Masse volumiques apparentes de gravier de Mélange 2.....	57
table II.41 : Masse volumiques apparentes de gravier de Mélange 2.....	57
table II.42 : Masse volumiques apparentes de gravier de Mélange 2.....	57

Tableau II.43 : Porosité, Compacité Et Indice Des Vides de gravier de Mélange 2	58
Tableau II.44 : Degré d'absorption d'eau de gravier du mélange 02	58
Tableau II.45 : Résultat de l'analyse granulométrique de gravillon (roulée 20%3/8 et 30 % 8/16 ; concassée 20%3/8 et 30 % 8/16) mélange n 03	59
TABLE II.46 : Masse volumiques apparentes des fractions 3/8 et 8/16 du gravier roulé	60
TABLE II.47 : Masse volumiques apparentes des fractions 3/8 et 8/16 du gravier roulé	60
TABLE II.48 : Masse volumiques apparentes des fractions 3/8 et 8/16 du gravier roulé	60
Tableau II.49 : Porosité, Compacité Et Indice Des Vides	60
Tableau II.50 : Degré d'absorption d'eau du mélange 02	61
Tableau II.51 : Résultat de l'analyse granulométrique de gravillon roulé((40%3/8)/(60%8/16)) mélange n 03	61
Tableau II. 52 : Caractéristiques du CPJ	62
Tableau II.53 : Caractéristiques chimiques du CPJ	63
Tableau II.54 : Composition de béton pour 1 m ³	64
Tableau II.55. Valeurs de G coefficient granulaire	64

Chapitre III :

Tableau III.1 masse volumique apparent et porosité des différentes mélanges de granulat	76
Tableau III.2 : les résultats des mesures de la masse volumique des bétons à l'état frais	77
Tableau III.3 Affaissement	78
Tableau III.4 rapport E/C de différents béton	78
Tableau III.5 : les résultats des mesures de la masse volumique à l'état durci des bétons (concentration 5 %)	79
Tableau III.6 : les résultats des mesures de la masse volumique à l'état durci des bétons a la concentration 10 %	80
Tableau III.7 : Résistances à la compression a la concentration 5 %	81
Tableau III.8 : Résistances de la traction a la concentration 5 %	82
Tableau III.9 : Résistances à la compression de la concentration 10%	83
Tableau III.10 : Résistances à la traction de la concentration 10 %	84

Liste des figures :

Chapitre I :

Figure I -1: Etapes de fabrication du ciment.....	2
Figure I -2 : Grains polycristallins d'un ciment Portland anhydre	4
Figure I -3 : Les constituants du ciment	4
Figure I -4 : Microphotographie d'un clinker	5
Figure. I-5- Type de gravier.....	7
Figure. I.6 – Dosage en ciment.....	14
Figure. I.7 la courbe granulométrique de référence.....	17
Figure I -8: Des cas pathologiques d'éléments en béton en contact de sulfate.....	19
Figure I-9- L'origine des sulfates (interne ou externe).	20
Figure I-10- L'attaque par les sulfates.	21
Figure I-11- La formation de l'ettringite secondaire	22
Figure I-12-: Eprouvette de béton dégradée après 5ans de contact avec des sols riches en sulfates	23
Figure I-13: La détérioration des silos-tours en béton due à l'attaque des acides d'ensilage.....	25
Figure I -14-: Coupe théorique d'un mur en béton.	29
Figure I -15-: facteurs intervenant sur l'apparition des 3 conditions nécessaires au déclenchement de l'alcali-réaction	31
Figure I -16: Exemples bétons dégradés par l'alcali-réaction	32

Chapitre II :

Figure II.1 :Les Tamis	41
Figure II.2 : La courbe granulométrique du sable (0/5).....	43
Figure II.3 : La courbe granulométrique des graviers concassés (3/8-8/16).	48
Figure II.4 : Appareil de l'essai Los Angeles.....	49

Figure II.05 : La courbe granulométrique des graviers roulée (3/8-8/16-).....	54
Figure II.06 : La courbe granulométrique des graviers concassés (3/8-8/16) mélange n 01.....	57
Figure II.7 : La courbe granulométrique des graviers (roulée 20% 3/8 et 30 % 8/16 ; concassée 20% 3/8 et 30 % 8/16) mélange 02.....	59
Figure II.8 : La courbe granulométrique des graviers roulés (3/8-8/16-) mélange 03.....	61
fig II .9 Dosage en ciment.....	65
fig II .10 Courbe Granulométrique.....	66
fig II .11 .les moules 07*07*28 cm	70
fig II .12 .les moules 10*10*10	70
fig II .13.la machine de compression	73
fig II .14.les essais de la compression.....	73
fig II .15 Essai de traction par flexion	74
fig II .16 Machine d'essai de traction	74

Chapitre III :

Fig III.1 Masse volumique des différentes mélanges Sur granulat.....	76
Fig III. 2 Porosité des différentes mélanges Sur granulat.....	77
fig III.3 Masse volumique des bétons frais en fonction du pourcentage de gravier roulé.....	78
fig III.4 rapport E/C en fonction du pourcentage de gravier roulé.	79
fig III.5 Masse volumique des bétons durci en fonction du temps de conservation (concentration 5 %.....	80
fig III.6 Masse volumique des bétons durci a la concentration 10 %.....	81
fig III.7 résistance à la compression en fonction du temps (concentration 5%)	82
fig III.8 Résistances de la traction à la concentration 5 %.....	83
fig III.9 Résistances à la compression de la concentration 10 %.....	84
fig III.10 Résistances à la traction de la concentration 10 %.....	85
fig III.11 résistance à la compression (résistance à 60 jours).....	85
fig III.12 résistance à la compression (résistance à 90 jours).....	86

fig III.13 résistance à la traction (résistance à 60 jours).....	87
fig III.14 résistance à la traction (résistance à 90 jours).....	88

Liste des symboles:

SiO_2	: Silice
Al_2O_3	: Alumine
Fe_2O_3	: Ferrite
MgO	: Magnésie
CO_2	:Dioxyde de carbone
$CaSO_4 \cdot 2H_2O$:Gypse
$Mg(OH)_2$: Brucite
K_2SO_4	:Arcanite
$K_3Na(SO_4)_2$: Aphthalite
$Ca_2K_2(SO_4)_3$:Langbeinite
$(C_4AH_x \text{ et } C_3ACASO_4H_{12})$:Aluminates hydratés
$C-S-H$:Silicates de calcium hydratés.
H_2SO_4	: Acide sulfurique
Na_2SO_4	: Sulfate de sodium
C_3S	: Silicate tricalcique
C_2S	:Silicate bicalcique
C_3A	: Aluminate tricalcique
C_4AF	: Ferroaluminate tricalcique
$Ca(OH)_2, (CH)$: Hydroxyde de calcium (Portlandite)
CaO	: Chaux libre.
$CaCO_3$: Calcite
$CaCl_2$: Chlorure de calcium
$NaCl$: Chlorure de sodium
CH_3COOH	: Acide acétique
$C_3H_6O_3$: Acide lactique

الخلاصة

منذ أواخر القرن التاسع عشر، و الخرسانة تشهد تطوُّراً ملموساً، فهي من مواد البناء الأكثر انتشاراً في العالم. فإذا كانت للخرسانة القدرة على مقاومة الهجوم الكيميائي، إلا أنه يجب أن نعرف في أيّ ظروفٍ وكيف؟ لأنّ هناك حالات حيث بنية الخرسانة المسلحة تتدهور بسرعة أكبر أو بشدة أكثر مما كان متوقعا نتيجة لعوامل مختلفة تمّ ذكرها في هذه المذكرة. كما أنّ طرق التشخيص عن طريق التقنيات المختلفة تسمح بتحديد حالة التدهور الناتجة عن الهجوم الكيميائي. وعلى حسب حالة تقدّم و تفاقم الضرر و التدهور، هناك تدابير وقائية و طرق لإعادة التأهيل، يتم استخدامها لضمان سلامة البنية.

متانة و ديمومة الخرسانة ، في ظروف عدوانية ، أصبح موضوع اهتمام كبير ، وبالتالي مجال واسع للبحوث. وفي هذا السياق تندرج هذه الدراسة. ولذلك سعينا لفهم سلوك حبيبات الخرسانة ضد الهجوم الكيميائي .

والهدف من هذه المذكرة هو تحديد تأثير نوعية حبيبات الحصى على الخرسانة في الوسط العدواني لأنها ستحدد أيضا متانة الخرسانة و ديمومتها . كما أن هذه الدراسة تعتمد على دراسة تدهور الخرسانة في الوسط العدواني بسبب الهجمات الكيميائية.

المفاتيح : الخرسانة، المسامية، الهجمات الكيميائية، الوسط العدواني و الديمومة.

Résumé :

Développé sans cesse depuis la fin du XIXe siècle, le béton est aujourd'hui le matériau de construction le plus répandu dans le monde. Si le béton a la capacité de résister aux attaques chimiques, encore faut-il connaître à quelles conditions et comment car il existe pourtant des situations où les ouvrages en béton se dégradent plus vite ou plus sévèrement que prévu suite à des différents facteurs qu'on a présenté dans ce mémoire. Ainsi, les méthodes de diagnostic des ouvrages permettent de quantifier, par croisement de différentes techniques, l'état de dégradation dû aux attaques chimiques. Selon l'état d'avancement des dommages, des mesures préventives, de réhabilitation, seront utilisées afin de garantir la sécurité de l'ouvrage.

La durabilité du béton, armé ou non, dans les conditions agressives, est devenue un sujet d'intérêt majeur et, par conséquent, un domaine de recherche largement exploré. C'est dans ce cadre que s'insère la présente étude.

Nous avons donc cherché à comprendre le comportement des granulats face aux attaques chimiques.

L'objectif de ce mémoire est de rappeler, bien définir, étudier l'influence de la qualité des granulats en milieu agressif parce qu'elles vont également fixer la durabilité du béton. Cette étude est basée sur les bétons en milieu agressif et l'influence des attaques chimiques sur les caractéristiques physiques et mécaniques des bétons,

Mots- clés : béton, porosité, attaques chimiques, milieu agressif, et durabilité.

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 major interest and, therefore, a common area of research.

In this study we go through understanding the behavior of The quality of the granules in concrete against chemical attack since this study is classified in the same major of interest.

The aim of this thesis is to mention, determine, study and explain the quality of concrete granules . because it will also determine the strength and durability of concrete. This study focuses on the chemical attack on concrete; determination of resources,

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

Introduction générale:

Bâtir a toujours été l'un des premiers soucis de l'homme et l'une de ses occupations majeurs. A ce jour, la construction connaît un grand essor dans la plus part 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 réalisation ou l'entretien des ouvrages de génie civil ; car les ouvrages en béton sont conçus et construits pour durer.

La durabilité est une propriété de génie du béton, qui détermine la durée de service des structures en béton de manière significative. En raison de l'interaction du béton avec des influences externes, les propriétés mécaniques et physiques du béton peuvent être menacées.

Parmi les facteurs menaçants l'attaque des produits chimiques tels que les acides qui sont nocifs pour le béton.

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. Bien qu'une forte résistance soit une propriété liée étroitement à la structure poreuse, à la perméabilité et la diffusivité et par conséquent à la durabilité. Ces deux grandeurs physiques permettent de caractériser l'aptitude des bétons à résister à l'intrusion des agents agressifs.

L'attaque chimique constitue un sujet d'importance croissante, en raison de la propagation des dommages des structures en béton dans les zones urbaines et industrielles. Bien que le ciment Portland ordinaire est le plus couramment utilisé dans la construction d'infrastructures, sa résistance aux attaques chimiques, tels que les sulfates est un sujet préoccupant de plus en plus à travers tout le monde.

Les altérations observées sont d'ordre chimique ou physique. 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;

- Les solides essentiellement des sols et déchets d'origines diverses;
- Les milieux biologiques, fermentations bactériennes aérobies ou anaérobies.

Par conséquent, les informations et les données sur le principe, les facteurs et les mesures de protection des granulats contre ces attaques sont utiles. En d'autres termes La durabilité du béton s'explique en grande partie, par la difficulté qu'ont les agents agressifs à pénétrer dans les réseaux poreux des bétons. Il est possible désormais de définir des objectifs de durabilité et de choisir avec précision les caractéristiques du béton en fonction de l'agressivité du milieu dans lequel se trouve l'ouvrage et d'optimiser ses caractéristiques afin de les adapter à la durée d'utilisation souhaitée. Les spécifications concernent la nature et le dosage minimal en ciment, la compacité minimale, la valeur maximale du rapport Eau/Ciment, l'enrobage minimal des armatures et la teneur maximale en chlorures dans le béton.

Après une présentation sommaire des qualité des granulats et de ses composés, la composition chimique du matériau dans un environnement donné.

Puis, on parlera des pathologies dues aux attaques chimiques à savoir:

- l'attaque par les sulfates;
- l'attaque par les acides ;
- la carbonatation;
- l'alcali-réaction;

En donnant une définition précise pour chaque phénomène, sa source, son mécanisme, les préventions et les solutions qui existent. En plus, on démontra la différence entre ces attaques et les caractéristiques de chaque pathologie.

Enfin, nous clôturons ce mémoire par une conclusion, qui rappelle les objectifs de notre travail, ainsi que les principales constatations obtenues .

Chapitre 01

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 :

$\text{CaO} = \mathbf{C}$; $\text{SiO}_2 = \mathbf{S}$; $\text{Al}_2\text{O}_3 = \mathbf{A}$; $\text{Fe}_2\text{O}_3 = \mathbf{F}$; $\text{SO}_3 = \mathbf{s}$; $\text{H}_2\text{O} = \mathbf{H}$ [2]

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:

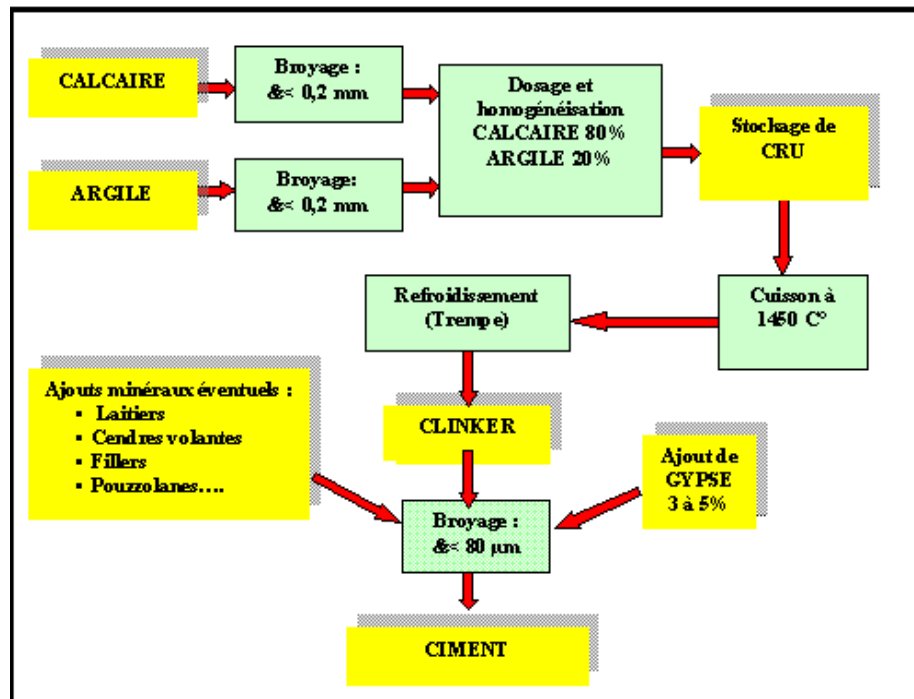


Figure I -1: Etapes de fabrication du ciment.

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 subit 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°C : Evaporation de l'eau constitutive à l'intérieur des minéraux.
- T > 600°C : Décomposition des matières argileuses. (Silice SiO₂, Alumine Al₂O₃, Ferrite Fe₂O₃).
- T > 850°C : Décarbonatation du calcaire. $\text{CaCO}_3 \longrightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$
- T > 900°C : Commencement des processus d'interaction et de combinaisons chimiques entre la chaux (CaO) et les oxydes d'argile (Silice SiO₂, Alumine Al₂O₃, Ferrite Fe₂O₃).
- T = 1450C° : 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 trempe). 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 µm ; 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).

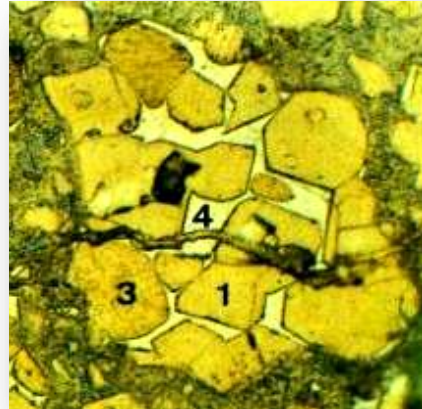
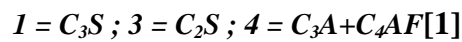


Figure I -2 : Grains polycristallins d'un ciment Portland anhydre (image obtenue par microscopie optique en lumière réfléchie sur section polie légèrement attaquée par HNO_3) :



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 :

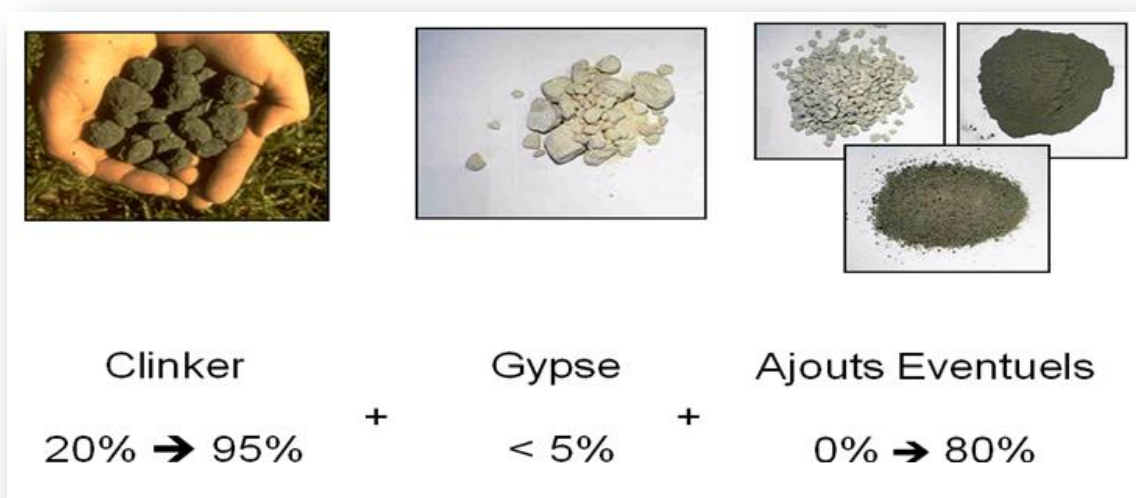


Figure I -3 : Les constituants du ciment. [1]

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 CO_2 ; et l'argile de diverses matières contenant surtout trois oxydes : SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 . La matière première destinée à la production doit contenir 75 à 78% de CaCO_3 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 , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3) 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) :

- ❖ C_3S ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) Alite
- ❖ C_2S ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) Belite
- ❖ C_3A ($2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) Aluminate tricalcique
- ❖ C_4AF ($4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$) Célite.

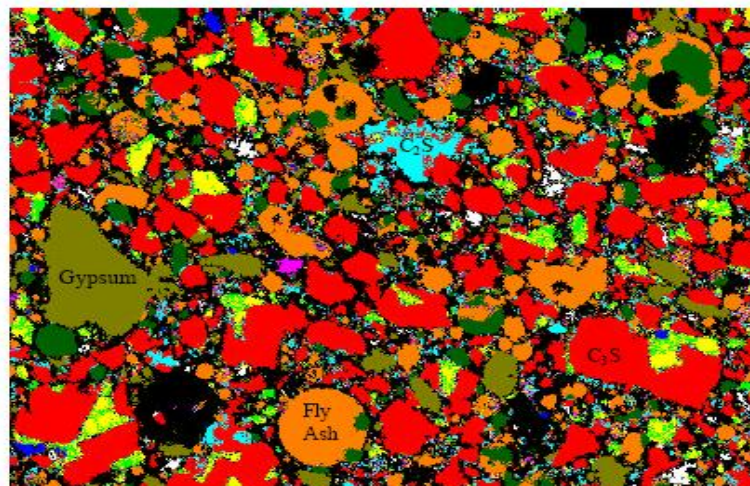


Figure I -4 : Microphotographie d'un clinker. [1]

Les couleurs sont les suivantes : noir = porosité, rouge = C_3S , bleu clair = C_2S , vert = C_3A , orange = C_4AF , vert = sulfates de calcium, jaune = K_2SO_4 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'eau et les 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 ; sablons ; sables ; graves ; 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.

La nature minérale des granulats est un critère fondamental pour son emploi, chaque roche possédant des caractéristiques spécifiques en termes de résistance mécanique, de tenue au gel et des propriétés physico-chimiques. Les granulats les plus usuels pour la fabrication des mortiers et des bétons sont élaborés à partir de roches d'origine alluvionnaire (granulats roulés ou semi-concassés) ou à partir de roches massives (granulats concassés).

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 de démolition de bâtiments. [3]

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.

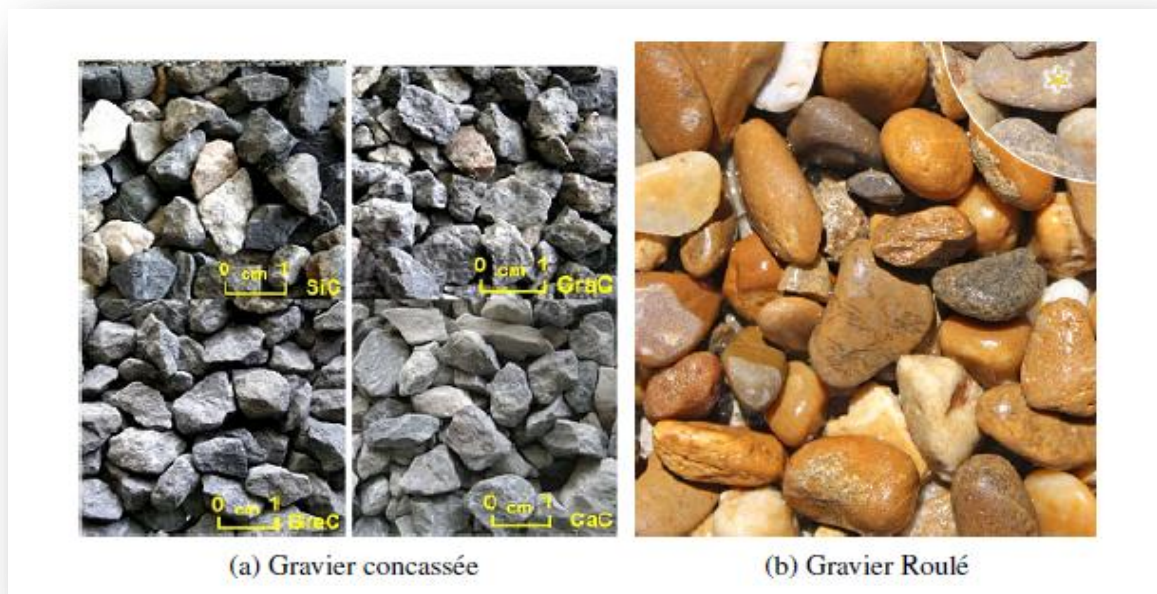


fig. I -5- Type de gravier[4].

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], c'est

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/granulat :

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.

a. Affaissement au cône d'Abrams :

Cet essai consiste à mesurer la hauteur d'affaissement d'un volume tronconique de béton frais où ce dernier est compacté dans un moule ayant la forme d'un tronc de cône.

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

b. 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.

a. 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.

b. Résistances à la traction par flexion (NF EN-12390-5) [14]:

Des éprouvettes prismatiques de dimensions 7x7x28 cm sont soumises à un moment de flexion par application d'une charge au moyen de rouleaux supérieurs et inférieurs.

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. Il épouse parfaitement les formes des coffrages les plus complexes, il ne doit pas subir de ségrégation et doit présenter des qualités comparables à celles d'un béton vibré classique [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. Ceci est obtenu grâce à leur faible porosité qui est diminuée en réduisant la quantité d'eau de gâchage par l'emploi d'adjuvants plastifiants et super plastifiants [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 qui se situe entre $20 \text{ Mpa} \leq f_{c28} \leq 50 \text{ Mpa}$ [15].

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 celles recherchées (résistance, consistance). Il existe deux méthodes pour déterminer une formulation

du béton :

- Les méthodes semi-empiriques (Bolomey, Faury, Vallette)
- Les méthodes graphiques (Dreux-Gorisse)

- **Méthodes semi-empiriques :**

- - **Méthode de Bolomey : [16]**

La formule de base est la suivante :

$$P = A + (100 - A) \sqrt{d/D} \dots\dots\dots \text{I.1}$$

P : Le pourcentage de grains passant à la passoire de diamètre **d**.

d : Le diamètre du plus petit granulat.

D : Le diamètre du plus gros granulat.

A : Représente le pourcentage d'éléments très fins contenus dans le mélange sec, éléments qui ont une incidence sur la maniabilité du béton. La valeur de cette constante dépend de la consistance souhaitée pour le béton et de la provenance des granulats (Tableau I.1)

Consistance du béton	Granulats roulés	Granulats concassés
Béton damé	6-8	8-10
Béton armé	10	12-14
Béton coulé	12	14-16

Tableau I.1 : valeur de coefficient du A

- Méthode de Faury :

Faury proposa une nouvelle loi de granulation du type continu, il s'est inspiré pour cela de la théorie de Caquot relative à la compacité d'un granulat de dimension uniforme correspondant à un serrage moyen. [17]

La loi de granulation qui en découle est une loi fonction de $\sqrt[5]{d}$. La courbe granulométrique idéale conduisant à la compacité maximale est alors théoriquement une droite ; cependant Faury

a distingué les grains fins et moyens ($<D/2$), des gros grains ($>D/2$) et la pente de la droite n'est pas la même pour chacune de ces deux catégories.

On trace pour l'ensemble du mélange, ciment compris une courbe granulométrique de référence qui est composée de deux droites si l'on opère sur un graphique gradué, en abscisse $\sqrt[5]{d}$.

L'abscisse du point de rencontre de ces deux droites est fixée à $D/2$ et son ordonnée Y est donnée par la formule suivante :

$$Y = 17\sqrt[5]{d} + B/(R/D + 0.75) \dots [17]$$

B : Varie de 1 à 2 selon que le béton ferme ou mou .

D : Exprimé en dimension de passoire.

R : Le rayon moyen du moule.

- Méthode de Valette:

Valette a mis au point une méthode essentiellement expérimentale mais qui nécessite certains nombres de calculs préparatoires. Cette méthode est souvent désignée par « dosage des bétons à compacité maximale » ou « dosage des bétons à minimum des sables » ou « dosage des bétons à granularité discontinue ». [18]

On calcule d'abord le dosage de sable et de ciment devant donner en principe le mortier plein avec un minimum de ciment. On ajoute ensuite, le maximum de gravier mouillé compatible avec une ouvrabilité permettant un moulage correct et une mise en œuvre facile dans les conditions du chantier. On obtient alors le béton plein à minimum de sable et le moins dosé en ciment.

- **Méthodes graphiques**

- **Méthode de Dreux-Gorisse [19] :**

Le choix de la méthode de formulation s'est fait en fonction des critères suivants :

- Une méthode assez simple et facile à utiliser.
- C'est une méthode appliquée au niveau des laboratoires de l'est algérien comme ceux du C.T.C. Est, le L.T.P. Est et autres laboratoires privés
- pour pouvoir comparer les résultats à ceux des autres organismes de contrôle.

a) **Détermination du dosage en ciment:**

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

$$R_b = GR_c \left(\frac{C}{E} - 0.5 \right)$$

OU :

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

G: Coefficient granulaire donné par le (Tableau I-2), en fonction de la qualité et de la dimension maximale (D_{max}) du gravier

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

Connaissant le rapport C \ E la fluidité désirée, qui est une donnée du problème, on peut déterminer le dosage en ciment d'après l'abaque (Figure I-6)

valeurs de G coefficient granulaire			
qualité des granulats	dimension des granulats D (mm)		
	Fins D 16	moyens 25 D 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

Tableau I.2 Valeurs de G coefficient granulaire

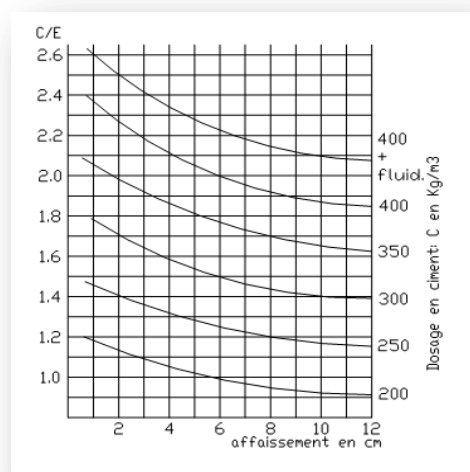


fig. I.6 – Dosage en ciment

b) Détermination du dosage en eau:

Connaissant C/E et le dosage en ciment (C) on déduit le dosage en eau total à prévoir par la formule :

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

c) Détermination du dosage en granulats:

C'est le pourcentage de sable et de gravier exprimé à partir de la courbe granulaire de référence construite par l'une des méthodes de composition de béton, (Figure 2.6) ci-dessous courbe OAB. La courbe OAB, où B à l'ordonnée 100% correspond à la dimension D du plus gros granulats et le point de brisure A à des coordonnées ainsi définies comme suit :

- **En abscisse:**

Si $D \leq 20\text{mm}$ l'abscisse est $D/2$,

Si $D \geq 20\text{mm}$ l'abscisse est située au milieu du segment, gravier limité par le module 38(5mm) et le module correspond à (D_{max}).

- **En ordonnée :** Y donnée par la formule suivante :

$$Y = 50 - \sqrt{D} - K$$

K : est un terme correcteur qui dépend du dosage en ciment, de l'efficacité du serrage, de la forme des granulats roulés ou concassés (sur tout le sable, dont l'influence est prépondérante) et également du module de finesse du sable qui est donné par le (Tableau I-3)

vibration	Faible		Normale		puissante	
	roulé	concassé	roulé	concassé	Roulé	Concassé
400+fluidifiant	-2	0	-4	-2	-6	-4
400	0	+2	-2	0	-4	-2
350	+2	+4	0	+2	-2	0
300	+4	+6	+2	+4	0	+2
250	+6	+8	+4	+6	+2	+4
200	+8	+10	+6	+8	+4	+6

table I -3-valeur du terme correcteur K

La courbe granulaire de référence OAB doit être tracée sur le même graphique que les courbes granulométriques des granulats composants. On trace alors les lignes de partage entre chacun des

granulats en joignant le point à 95% de la courbe du granulat suivant, et ainsi de suite. On lira alors sur la courbe de référence au point de croisement avec la ou les droites de partage le pourcentage en volume absolu de chacun des granulats g_1, g_2, g_3 par exemple.

Si c 'est le dosage en ciment, le volume absolu des grains de ciment est :

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

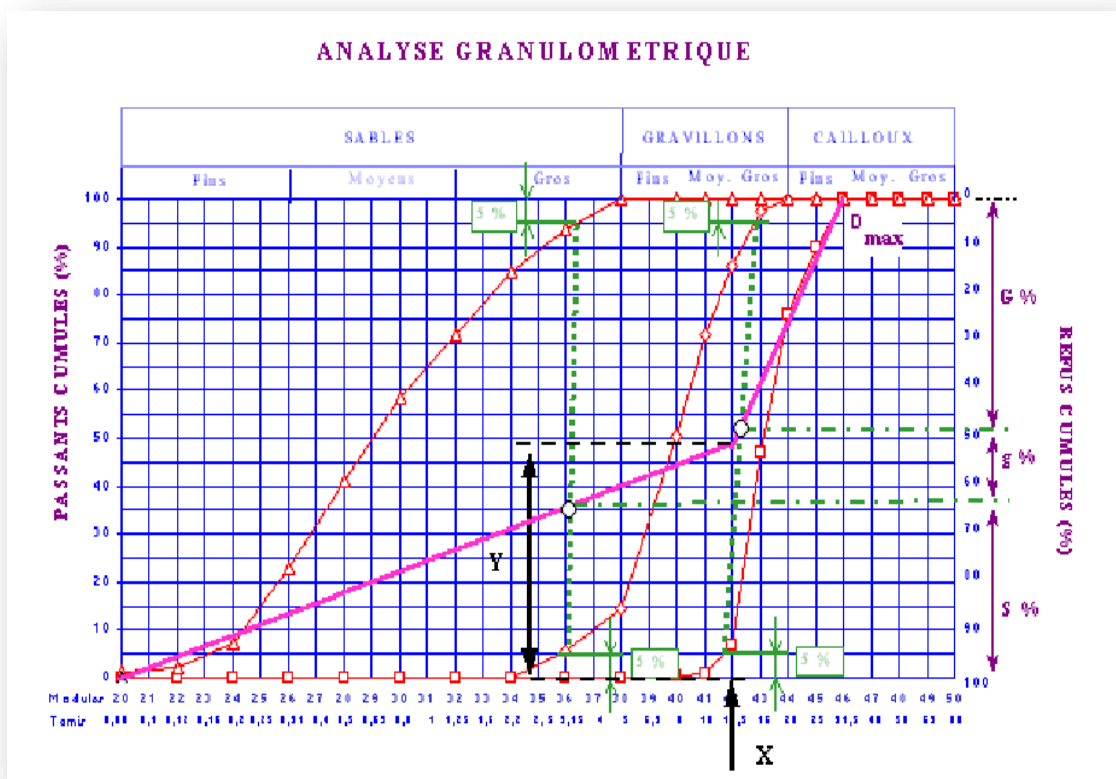
ρ_c : C 'est la masse spécifique pour les grains du ciment Le volume absolu de l'ensemble des granulats est :

$$V = 1000\gamma - c$$

ou : γ : coefficient de compacité qui est donné par le (Tableau I-4)

consistance du béton Frais	mode de serrage	G						
		D_{max} 5 mm	D_{max} 10 mm	D_{max} 12.5 mm	D_{max} 20 mm	D_{max} 31.5 mm	D_{max} 50 mm	D_{max} 80 mm
Molle	Piquage	0.750	0.780	0.795	0.805	0.810	0.815	0.820
	vibration faible	0.755	0.785	0.800	0.810	0.815	0.820	0.825
	vibration normal	0.760	0.790	0.805	0.815	0.820	0.825	0.830
plastique	Piquage	0.760	0.790	0.805	0.815	0.820	0.830	0.830
	vibration faible	0.765	0.795	0.810	0.820	0.825	0.835	0.835
	vibration normal	0.770	0.800	0.815	0.825	0.830	0.835	0.835
	vibration puissante	0.775	0.805	0.820	0.830	0.835	0.840	0.845
Ferme	vibration faible	0.775	0.805	0.820	0.830	0.840	0.840	0.845
	vibration normal	0.780	0.810	0.825	0.835	0.845	0.845	0.850
	vibration puissante	0.785	0.815	0.830	0.840	0.850	0.850	0.855

Tableau I-4- coefficient de compacité



I-6-La durabilité de béton

✓ Définition De La Durabilité:

La durabilité d'un béton est de pouvoir conserver sa résistance et de continuer de remplir sa fonction tout au long de sa durée de vie utile pas à une durée indéfinie, il en résulte que le béton doit résister aux mécanismes de dégradation aux quels il peut être exposé, tels que les cycles de gel-dégel et certaines formes d'attaques chimiques [20]. La mauvaise durabilité se manifeste par une détérioration qui peut résulter de facteurs externes ou de phénomènes internes du béton, les actions peuvent être mécaniques, physiques ou chimiques, Ces dernières sont causées par les réactions alcali-silice et alcali-carbonate, les attaques chimiques externes sont causées par la présence d'ions agressifs tels que les chlorures, les sulfates et les gaz carboniques ainsi que de nombreux gaz et liquides d'origines naturelles ou industrielles. Il convient de noter avant toutes choses que la détérioration du béton est rarement attribuable à une seule cause: le béton peut souvent se comporter de façon satisfaisante en dépit de certaines déficiences, mais

lorsqu'un facteur défavorable s'ajoute, les désordres apprêteront. [20]

Dans notre cas d'étude, Le béton est soumis au pire des cas, ou les ouvrages sont exposés a deux milieux très agressifs, d'un coté l'eau de la nappe phréatique de Ouargla qui présente un cas rare d'agressivité et d'un autre coté les eaux usées, dont les substances chimiques sont ceux qui dégradent le plus les ouvrages en béton.

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 -8: Des cas pathologiques d'éléments en béton en contact de sulfate. [23]

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.[21]

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

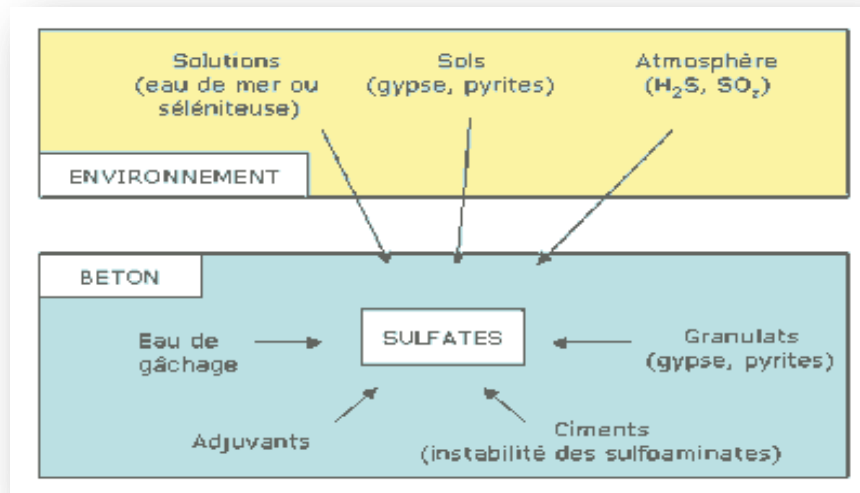


Figure I-9- L'origine des sulfates (interne ou externe). [21]

Les sulfates peuvent avoir différentes origines:

- Ils peuvent d'abord provenir du régulateur de prise ajouté au ciment (gypse, hémihydrate, 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 $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ 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 $SO_4(NH_4)_2$, 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.

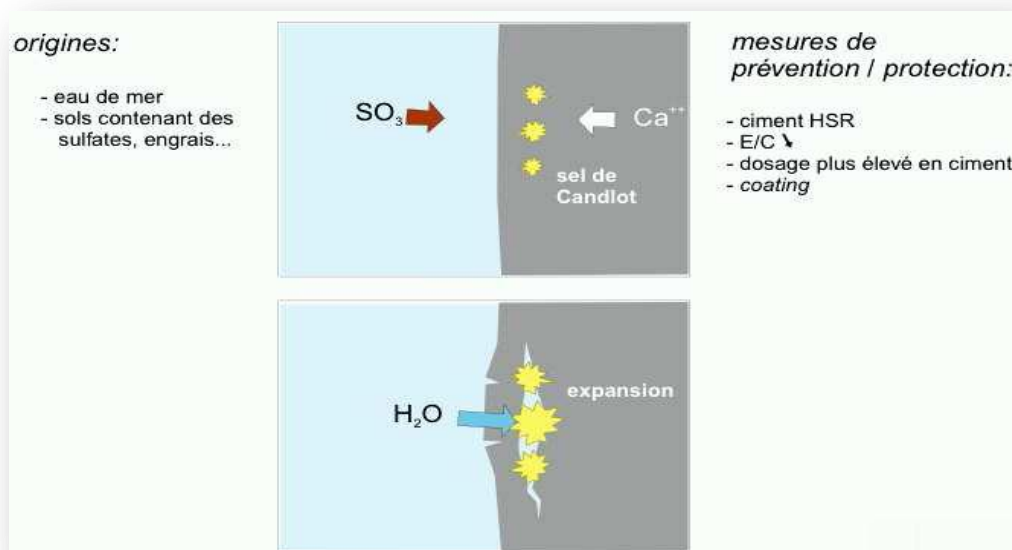


Figure I-10: L'attaque par les sulfates. [22]

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

- Expansion ;
- Perte des propriétés liantes des C-S-H.

Les aluminates et la portlandite sont les deux produits les plus sensibles à l'attaque 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 :

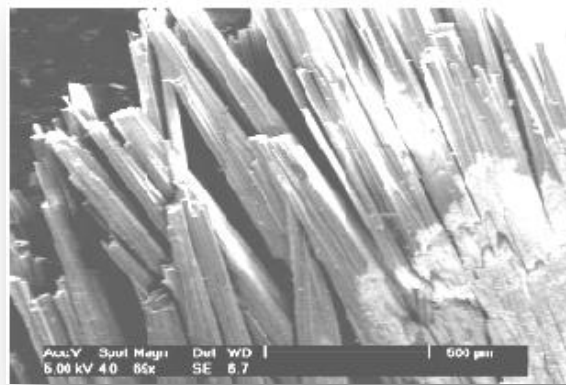
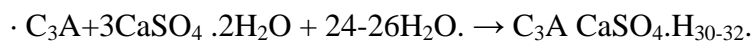


Figure I-11-: La formation de l'ettringite secondaire. [23]

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.

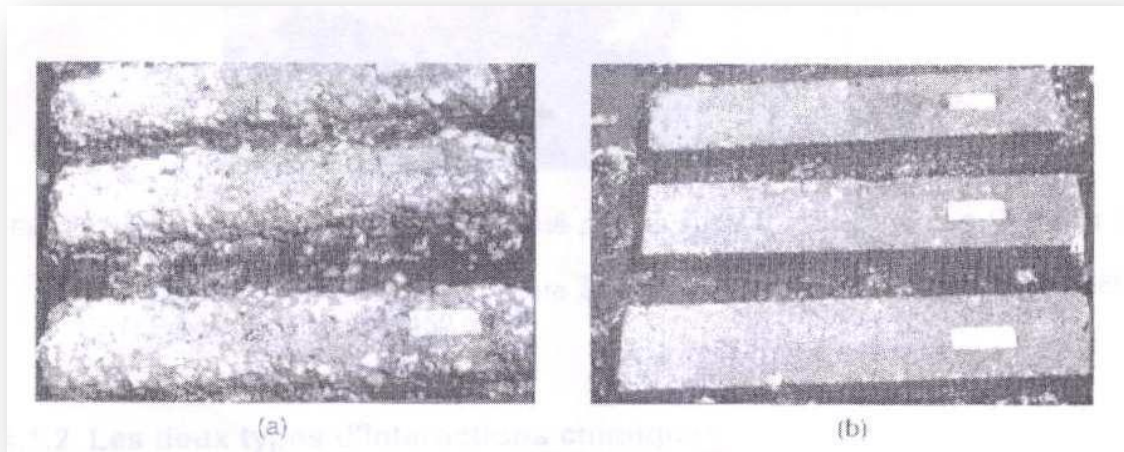
B- Réaction entre le gypse secondaire et les aluminates de calcium du ciment forment l'ettringite, plusieurs scénarios sont envisageables :

- Soit à partir de reliquats de C_3A anhydre :



- 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 hydrates.



**Figure I-12-: Eprouvette de béton dégradée après 5ans
de contact avec des sols riches en sulfates. [23]**

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 :

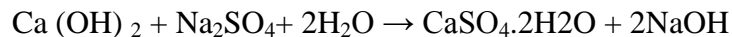
- Mise en contact de la surface du béton avec la solution agressive.
- Pénétration des anions SO_4 , par diffusion limitée à une zone superficielle.
- Pénétration du cation associé et réaction de substitution : cation (Mg^{+2} , Na^{+2} , $NH_4...$), Ca^{+2} et formation de gypse en solution ou cristallisé, suivant les concentrations en SO_4 et en $Ca(OH)_2$.
- Réaction ponctuelle des ions sulfates avec les aluminates anhydres (C_3A) ou hydraté (C_4AH_x et $C_3ACASO_4H_{12}$).
- 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. [23]

Exemples de l'attaque par les sulfates :

Le cas de sulfate de sodium (Na₂SO₄) :

A- Formation de gypse secondaire :



NaOH : alcalinité élevée → Stabilisation des C-S-H

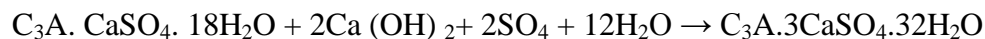
CaSO₄·2H₂O : produit expansif mais qui se forme uniquement dans les espaces internes de la pâte de ciment hydraté (pas ou peu d'expansion).

B-Formation d'ettringite secondaire :

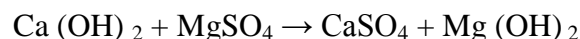
- à partir du C₃A anhydre résiduel



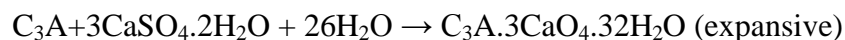
- à partir des aluminates hydratés (monosulfoaluminate)



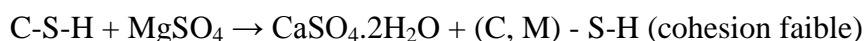
Le cas de sulfate de magnésium Mg SO₄ (double action) :



Mg (OH)₂ : brucite caractérisée par une faible solubilité et un faible pH.



Substitution des ions Ca²⁺ par les ions Mg²⁺ dans les C-S-H :



Etant donné la très faible solubilité du Mg(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 Mg(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. [24]

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 [24], 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.

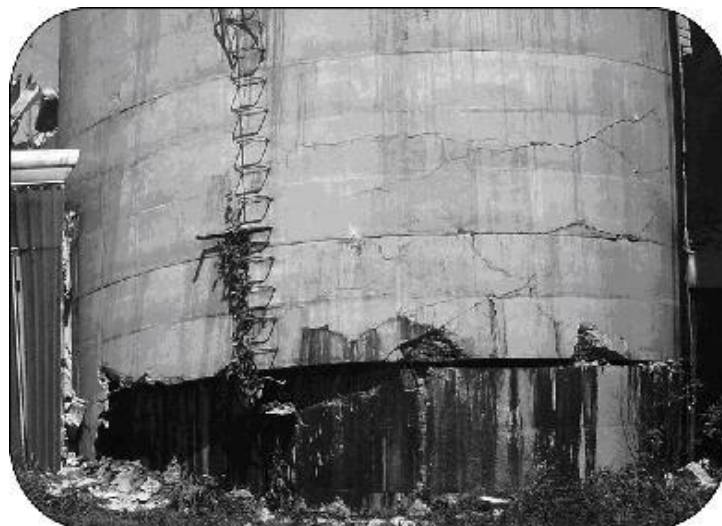


Figure I-13: La détérioration des silos-tours en béton due à l'attaque des acides d'ensilage.

(Photo offerte par : Thomas P. Rylett Ltd., ingénieur-conseil en structures). [23]

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 par ce 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 est dissoute graduellement provoquant une détérioration progressive du béton. Une forme d'attaque assez similaire peut survenir sur les réservoirs de stockage pétroliers en haute mer. [24]

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.

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

Tableau I.5 : Composants du béton menacés par la corrosion.

On distingue deux types de détérioration:

- i- L'agression résolvente ;
- ii- Le gonflement.

I-7-3) La carbonatation :**Définition de la carbonatation :**

La carbonatation est un phénomène de vieillissement naturel qui concerne tous les bétons et qui conduit à la formation de carbonates de calcium par réaction entre les composés des ciments (principalement la portlandite) et le dioxyde de carbone atmosphérique (CO_2), présent dans l'air à un taux moyen de 0,03 % en volume. Ce taux est plus important en milieu urbain qu'en milieu rural.

Elle est un phénomène chimique présent dans l'épiderme du béton tout au long de sa vie. La combinaison de l'hydrate de chaux (contenu dans le ciment) et de l'acide carbonique

de l'air forme du calcaire en libérant de l'eau, le pH du béton baisse et la corrosion des aciers commence. [25]

A partir d'une distance de 25 à 30 mm à l'intérieur du béton, il n'y a plus d'échange gazeux grâce aux dépôts de calcaire de la pâte du ciment. Le pH reste stable à une valeur d'environ 11. La corrosion ne se manifeste pas.

Compte tenu de l'absence d'échanges gazeux, les bétons immergés ne carbonatent pas. Il est à remarquer que des manifestations de carbonatation peuvent survenir sur des faces intérieures de béton lors de climatisation et d'humidification de l'air ambiant. [25]

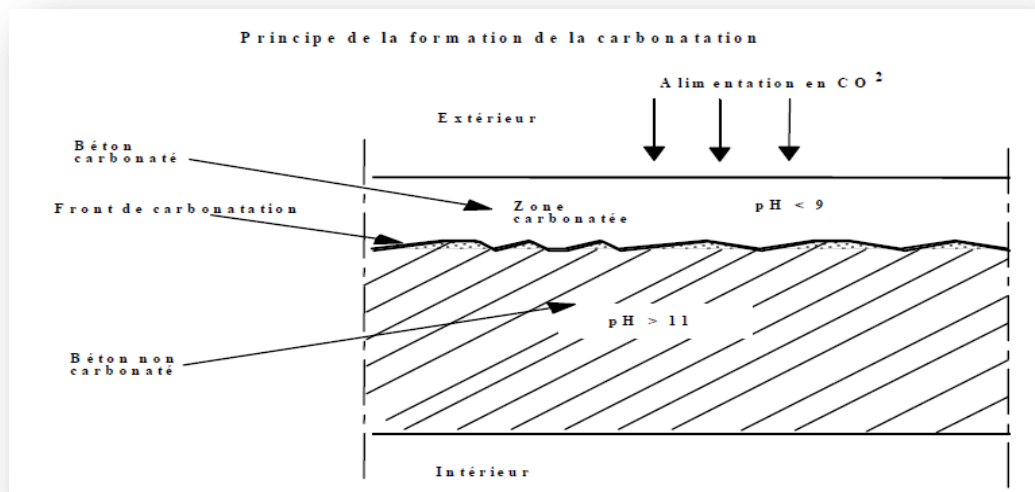


Figure I -14-: Coupe théorique d'un mur en béton. [46]

I-7-4) L'alcali-réaction :

I -7-4-1) Définition :

L'alcali-réaction, que l'on appelle aussi communément réaction alcali-granulat, désigne la réaction chimique entre la silice amorphe ou mal cristallisée contenue dans les granulats réactifs et certains ions de la solution interstitielle. Les conséquences macroscopiques de la réaction sont le gonflement des ouvrages atteints qui entraînent de la fissuration et la chute des caractéristiques mécaniques du béton. Ces phénomènes sont préoccupants pour les gestionnaires des structures atteintes car ils mettent en péril la sécurité des personnes et l'exploitation des ouvrages. De plus, il n'existe aucun moyen d'arrêter la réaction. Ainsi, la

prédiction de l'évolution du gonflement et des dégradations des ouvrages atteints et l'évaluation de l'efficacité et de la périodicité des opérations d'entretien sont des points cruciaux. [26]

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 (phyllosilicates, 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-granat :

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. [26]

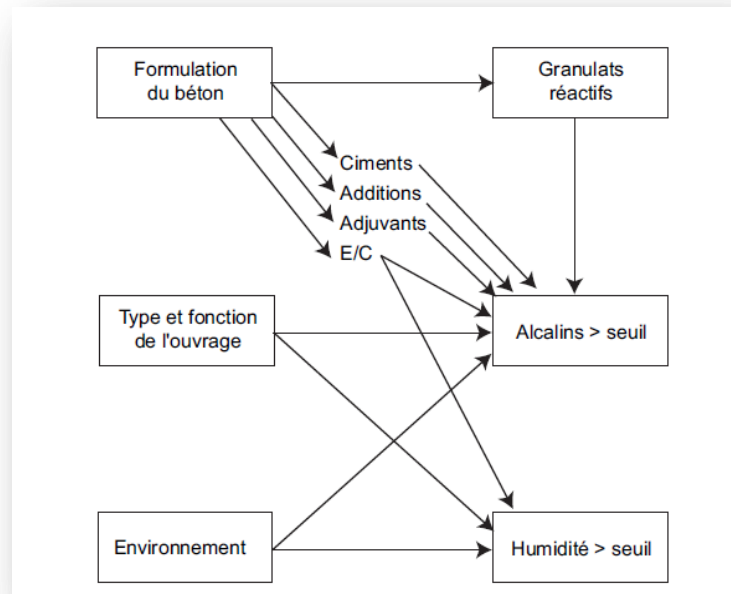


Figure I -15-: facteurs intervenant sur l'apparition des 3 conditions nécessaires au déclenchement de l'alcali-réaction. [1]

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. [27]

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 des 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,
- Des colorations ou décolorations. [27]



a) Fissuration sévère d'un massif de fondation .



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

Figure I -16: Exemples bétons dégradés par l'alcali-réaction. [27]

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 :Presse de 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 du Seuil, 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 doctorat Paris, 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] Dreux.G et Festa.J : Nouveaux guide du béton et de ces constituants, Ed. Eyrolles 1998,116p.
- [17] Dreux.G. : Nouveaux guide du béton, Ed. Eyrolle, 1979, 121p.
- [18] Dreux.G et Festa. J :Nouveaux guide du béton et de ces constituants, Ed. Eyrolles 1998,125p. [19] 2009 Dupain R., Lanchon R. et Saint-Arroman J.-C., “ Granulats, Sols,

Ciments

et Bétons – Caractérisation des Matériaux de Génie Civil par les Essais de Laboratoire
”, Éditions Casteilla, 2ème Édition, Paris, 2000, p. 26 –394.

[20] ADAM.M "propriétés des bétons"; centre de recherches interuniversitaire sur le
béton université SHERBOOK; édition EYROLLES,

[21] KERBOUCHE : Influence des ajouts minéraux sur les résistances mécaniques et la
durabilité des mortiers (Mémoire de Magister- l’ENSET d’Oran-2009).

[22] Dr. Ir. P. Boeraeve : Cours de Béton armé

[23] 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).

[24] GRUBE H., RECHENBERG W. – “Durability of concrete structures in acidic water”.
Cem. Concr. Res., vol. 19, n° 5, p 183-

[25] Le LERM : Dossier technique (laboratoire et société d’études et de conseil en matériaux
de construction (BTP/génie Civil, Patrimoine Bâti, Environnement).

[26] 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.

[27] 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

Chapitre 02 : Matériaux et essais

II.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 CPJ de la cimenterie ACC de Hammam Dhalàa.
- ◆ L'eau potable du laboratoire.
- ◆ Gravier roulée (BOUSAADA).

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

II.2.1. Origine du sable :

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

II.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**.

II. 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.

Volume de sable : $V_1 = V - 300$ (ml).

La masse volumique absolue du sable est déterminée par la formule: $\rho = \frac{M}{V_1}$

Avec : $M = 300\text{g}$.

Résultats obtenus :

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

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

II.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.
- Volume de récipient $V_r = 900\text{cm}^3$.

La masse volumique apparente du sable est donnée par la formule suivante :

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

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

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

II.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 :

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

Où :

M_1 : Masse du récipient à vide.

M_2 : Masse du récipient plus le sable.

V_r : Volume du récipient $V_r = 900 \text{ cm}^3$.

N° d'essai	M_1 (g)	M_2 (g)	ρ_{app} (g/cm ³)	$\rho_{app \text{ moy}}$ (g/cm ³)
01	114	1681	1.74	1.733
02	114	1670	1.72	
03	114	1685	1.74	

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

II .2.2.3. Porosité : (NF P 18-554)

C'est le volume des vides entre les grains du sable. La porosité peut être déterminée par la formule suivante :

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

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

On distingue deux cas :

Pour le sable de Boussaâda :

- Etat lâche : $\rho_L = 37.8\%$.

- Etat compacte : $\rho_c = 30.95\%$.

II.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 : $C_c = 69.04\%$.

II.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 :

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

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

II.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.

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

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

B / Equivalent de sable visuel (ESP):

- Introduire le piston dans l'éprouvette et laisser descendre doucement jusqu'à ce qu'il repose sur le sédiment. A cet instant bloquer le manchon du piston et sortir celui-ci de l'éprouvette.
- Introduire le réglet dans l'encoche du piston jusqu'à ce que le zéro vienne buter contre la face intérieure de la tête du piston. Soit h'_2 la hauteur lue et correspondant à la hauteur de la partie sédimentée.

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

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

N^\bullet <i>d'essai</i>	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

Tableau II.5 : Equivalent du sable de Boussaâda.

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

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

Donc: $85\% < ESV$

$80 < ESP$

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

Tableau II.6 : Comparaison des résultats.

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.

II.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 défini en pourcentage d'après la formule suivante.

$$A = \left(\frac{M_2 - M_1}{M_1} \right) \times 100 [\%]$$

Où :

- M_1 : La masse du matériau sec en (g).
- M_2 : La masse du matériau saturé d'eau superficiellement sec en (g).

<i>N° d'essai</i>	M_1 (g)	M_2 (g)	A (%)	A_{moy} (%)
1	300	307,98	2,66	2,67
2	300	308,66	2,88	
3	300	308,86	2,95	

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

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 %**.

II.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



Figure II.1 :Les Tamis.

- En abscisse, le logarithme de la dimension des ouvertures des tamis 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 respectivement

de haut en bas : **5-2,5-1,25-0,63-0,315-0,125** et éventuellement **0,08**mm. 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 : **$T = 100 - R_c$**

Où :

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

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

Tableau II.8 : analyse granulométrique du sable d'oued (Oued Maitre).

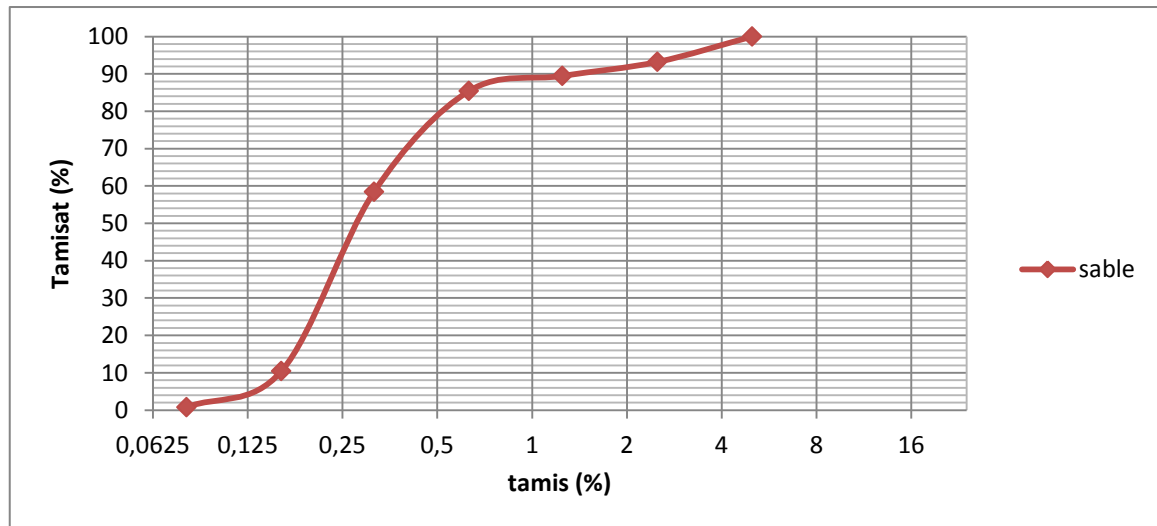


Figure II.2 : La courbe granulométrique du sable (0/5).

Commentaire :

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

\Rightarrow 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.

II.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 :

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

Où : R_c : Refus cumulé.

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

Les normes soviétiques spécifient le Mf des sables comme suit :

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

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**.

II.2.3. 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.**).

<i>CONSTITUANTS</i>		
<i>Elément</i>	<i>Symbole</i>	<i>Teneur en (%)</i>
Silice	SiO ₂	86.95
Chaux	CaO	6.33
Oxyde de ferrique	Fe ₂ O ₃	0.90
Alumine	AL ₂ O ₃	1.92
Oxyde de magnésium	MgO	0.53
Sulfate	SO ₃	0.44
Pente au fer	P.A.F	2.81

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

Commentaire :

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

II .3. Gravier :

II. 3.1.Gravier concassé :

II.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**).

II.3.1.1.1. Classes granulaires:

Les fractions du gravier sont :

- Fraction **3/8**.
- .Fraction **8/16**

II.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**.

II.3.1. 2. Caractéristiques physiques du gravier utilisé:

II.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

fraction	Essai	M ₁ (kg)	M ₂ (kg)	ρ_{app} (kg/l)	ρ_{app} moyen (kg/l)
8/16 V=10 L	1	3.49	16.78	1.329	1.321
	2		16.66	1.317	
	3		16.67	1.318	

Tableau II.10 : Masse volumique apparente du gravier concassé 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)
8/16 V=10 L	1	3.49	18.13	1.464	1.442
	2		17.97	1.448	
	3		18.09	1.415	

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

Gravier concassée de fraction 3/8

A l'état lâche

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	11.63	1.244	1.246
	2		11.65	1.247	
	3		11.66	1.248	

Tableau II.12: Masse volumique apparente du gravier concassé 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	12.74	1.402	1.389
	2		12.59	1.381	
	3		12.62	1.385	

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

II.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 concassé.

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

Graviers	N° d'essai	M ₁ (g)	Ve(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	
8/16	01	300	300	416	2.58	2.59
	02	300	300	415	2.60	
	03	300	300	415	2.60	

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

II.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 :

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

La compacité donnée par la formule :

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

L'indice des vides est donné par la formule suivante :

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

<i>fraction de gravie</i>	Porosité (%)	Compacité (%)	l'indice de vide
3/8	51.64	48.36	0.936
8/16	44.32	55.68	0.795

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

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

<i>Graviers</i>	<i>N°d'essai</i>	$M_1(g)$	$M_2(g)$	$A (%)$	$A_{moy} (%)$
3/8	01	700	709,06	1,29	1.29
	02	700	709,77	1,39	
	03	700	708,53	1,21	
8/16	01	700	712	1,71	1.66
	02	700	711	1,57	
	03	700	712	1,71	

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

II.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)

<i>Tamis (mm)</i>	<i>Refus partiel (g)</i>	<i>Refus cumulé (g)</i>	<i>Refus cumulé (%)</i>	<i>Tamisât (%)</i>
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 II.17 : Analyse granulométrique du gravier concassé 3/8 .

b)- Fraction 8/16 (3Kg)

<i>Tamis (mm)</i>	<i>Refus partiel (g)</i>	<i>Refus cumulé (g)</i>	<i>Refus cumulé (%)</i>	<i>Tamisât (%)</i>
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

Tableau II.18 : analyse granulométrique du gravier concassé 8/16.

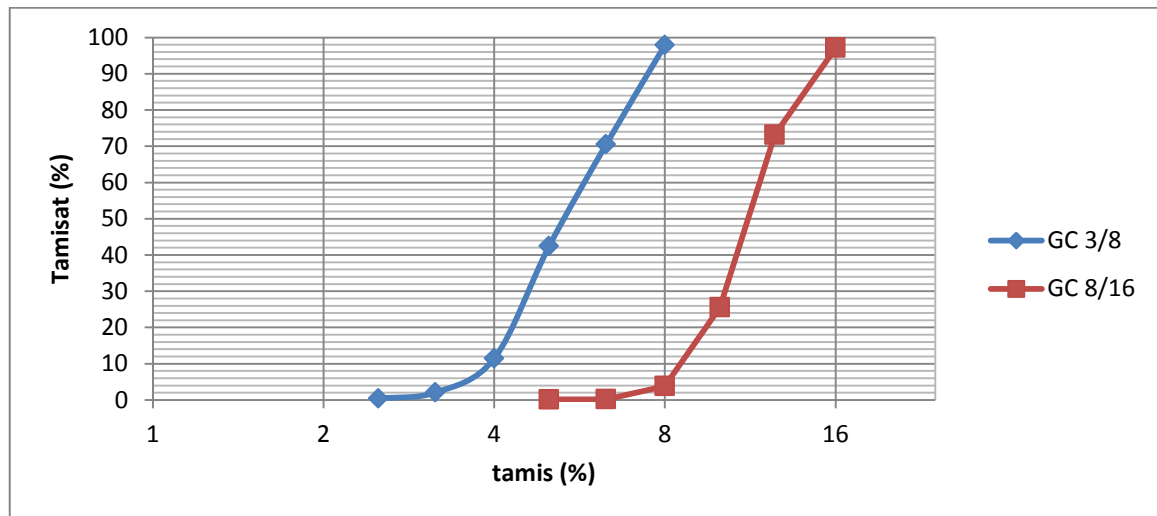


Figure II.3 : La courbe granulométrique des graviers concassés (3/8-8/16).

II.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.

II.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 II.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 :

<i>Fraction de Gravier</i>	<i>Nombre de boules</i>	M (Kg)	m (Kg)	Coef L_A %
Gravier 3/8	7	5	1.050	21%
Gravier 8/16	11	5	0.942	19%

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

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

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

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

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),

II.3.1.4. 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**).

ELEMENT	SiO_2	AL_2O_3	CAO	FE_2O_3	MGO	SO_3	K_2O	NA_2O
Teneur (%)	40.65	8.87	40.56	3.25	3.65	0.79	0.65	0.01

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

II.3.2. Gravier roulée :

II .3.2.1. Origine de gravier:

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

II.3.2.1.1. Classes granulaires:

Les fractions du gravier sont :

- Fraction **3/8**.
- Fraction **8/16**.

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

II.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 roulé .

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

A l'état lâche

Fraction	Essai	M ₁ (kg)	M ₂ (kg)	ρ _{app} (kg/l)	ρ _{app} moyen (kg/l)
8/16 V=10 L	1	3.49	18.611	1.512	1.51
	2		18.630	1.514	
	3		18.593	1.510	

Tableau II.22: Masse volumique apparente du gravier roulé 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)
8/16 V=10 L	1	3.49	19.708	1.622	1.61
	2		19.636	1.615	
	3		19.553	1.601	

Tableau II.23: Masse volumique apparente du gravier roulé 8/16 a l'état compact.

Gravier roulé de fraction 3/8

A l'état lâche

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 II.24: Masse volumique apparente du gravier roulé 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	14.376	1.636	1.64
	2		14.399	1.639	
	3		14.369	1.635	

Tableau II.25: Masse volumique apparente du gravier roulé 3/8 a l'état compact.

II.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.

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

Graviers	N° d'essai	M ₁ (g)	Ve(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	
8/16	01	300	300	415	2.608	2.56
	02	300	300	417	2.564	
	03	300	300	419	2.521	

Tableau II.26 : Masse volumique absolue du gravier roulé.

II.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 :

Les fractions	Gravier 3/8	Gravier 8/16
Densité normale	2.55	2.56

Tableau II.27 : la densité du gravier roulé.

II.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.

fraction de gravie	Porosité (%)	Compacité (%)	l'indice de vide
3/8	41.57	58.43	0.71
8/16	41.02	58.98	0.69

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

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

<i>Graviers</i>	<i>N° d'essai</i>	$M_1(g)$	$M_2(g)$	$A (%)$	$A_{moy} (%)$
3/8	01	100	98.84	1.17	1.1
	02	100	99.03	0.98	
	03	100	98.86	1.15	
8/16	01	100	99.55	0.75	0.81
	02	100	99.29	1.18	
	03	100	99.72	0.51	

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

II.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

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 II.30 : Analyse granulométrique du gravier roulée 3/8.

b)- Fraction 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

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

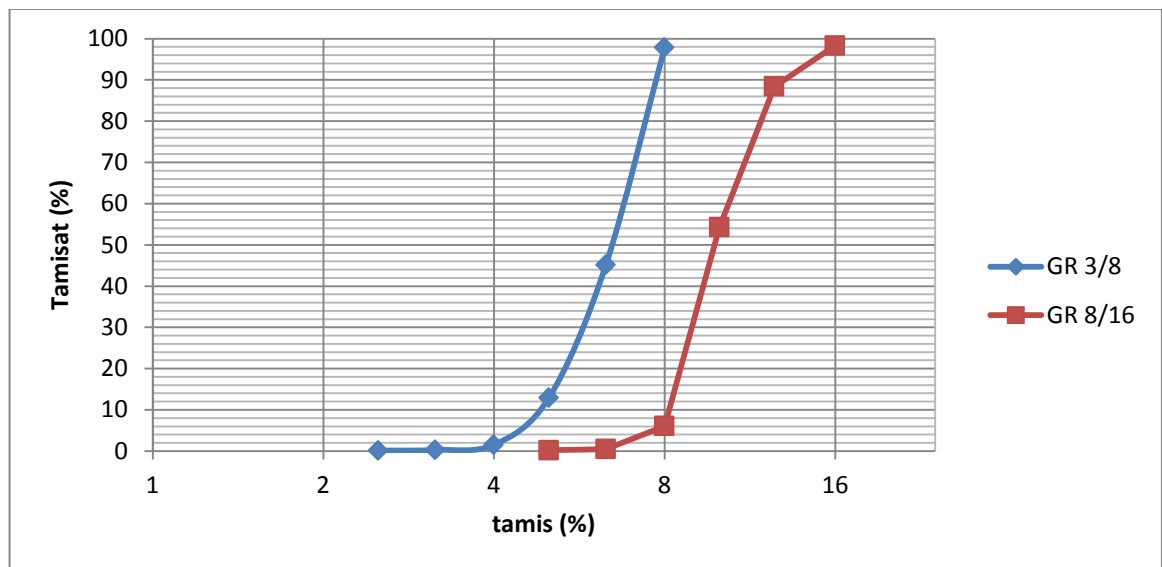


Figure II.05 : La courbe granulométrique des graviers roulée (3/8-8/16-).

II.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.

II.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 :

Gravier	Masse initiale M (Kg)	Masse m (Kg)	Coef de Los A L _A %
Gravier 3/8	5	1,115	27,875
Gravier 8/16	5	1,118	22,36

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

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

Tableau II.33 : Classification des roche en fonction du coefficient LA.

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

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

II . 4. Type de mélange :

II.4.1. Mélange1 : gravier concassé (60% 8/16, 40% 3/8) :

1. Masses volumiques absolues:

Mélange	Essai	M ₁ (g)	V ₁ (ml)	V ₂ (ml)	ρ_{abs} (g/ml)	ρ_{abs} moy (g/ml)
M ₁	1	300	300	414	2.63	2.636
	2			413	2.65	
	3			414	2.63	

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

2. Masse volumique apparente:

A l'état lâche

Mélange	Essai	M ₁ (kg)	M ₂ (kg)	ρ_{app} (kg/l)	ρ_{app} moy (kg/l)
M ₁ $v=0.9l$	1	0.114	1.510	1.551	1.551
	2		1.505	1.545	
	3		1.516	1.557	

TABLE II.35 : Masse volumiques apparentes des fractions 3/8 et 8/16 du gravier concassé

A l'état compacte

Mélange	Essai	M_1 (kg)	M_2 (kg)	ρ_{app} (kg/l)	$\rho_{app_{moy}}$ (kg/l)
M_1 $v=0.9l$	1	0.114	1.547	1.592	1.577
	2		1.538	1.582	
	3		1.535	1.557	

TABLE II.36 : Masse volumiques apparentes des fractions 3/8 et 8/16 du gravier concassé

3.la Porosité et la Compacité Et Indice Des Vides:

le mélange	l'état	Porosité (%)	Compacité (%)	l'indice de vide
M_1	l'état lâche	41.16	42.75	0.699
	l'état compacte	40.17	59.83	0.671

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

6. Degré d'absorption d'eau(A) :

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	

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

7.. Analyse granulométrique :

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

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

TABLE II.39 – Résultat de l’analyse granulométrique de gravillon concassé ((40%3/8)/(60%8/16))..... mélange n 01

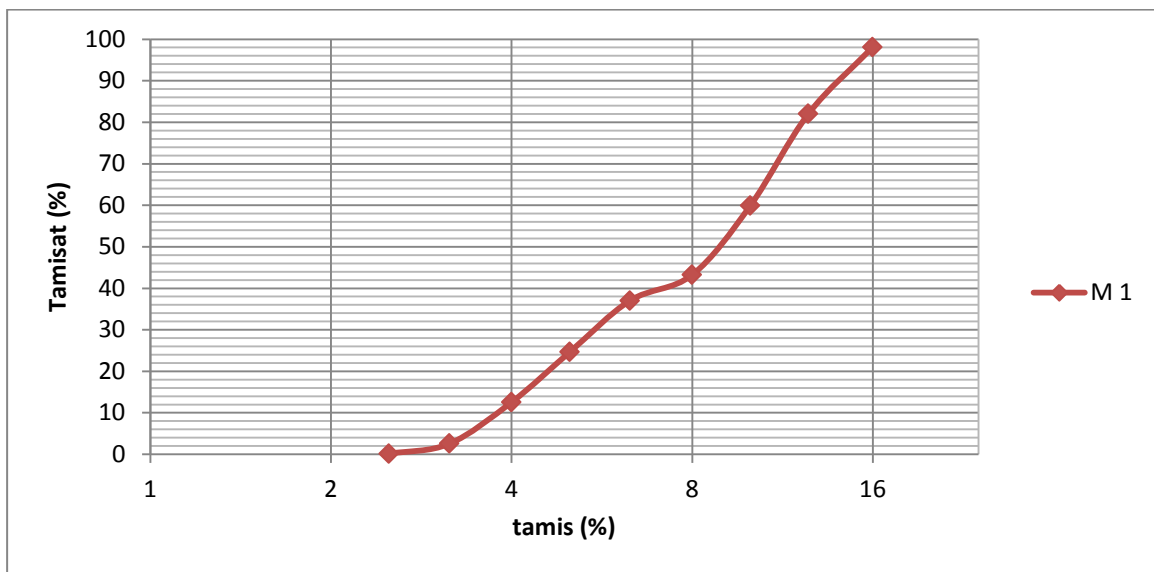


Figure II.06 : La courbe granulométrique des graviers concassés (3/8-8/16) mélange n 01.

II.4.3. Mélange 2 : (roulée 20%3/8 et 30 % 8/16 ; concassée 20%3/8 et 30 % 8/16)

1. Masses volumiques absolues:

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	

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

2. Masse volumique apparente:

A l'état lâche

Mélange	Essai	M_1 (kg)	M_2 (kg)	ρ_{app} (kg/l)	$\rho_{app_{moy}}$ (kg/l)
M_2 $v=0.9l$	1	0.114	1.508	1.548	1.548
	2		1.506	1.546	
	3		1.509	1.55	

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

A l'état compacte

Mélange	Essai	M_1 (kg)	M_2 (kg)	ρ_{app} (kg/l)	$\rho_{app_{moy}}$ (kg/l)
M_2 $v=0.9l$	1	0.114	1.546	1.591	1.588
	2		1.543	1.587	
	3		1.554	1.588	

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

3.1a Porosité et la Compacité Et Indice Des Vides:

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

Tableau II.43 : Porosité, Compacité Et Indice Des Vides de gravier de Mélange 2 .

6. Degré d'absorption d'eau(A) :

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	

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

7. 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 % 8/16 ; concassée 20%3/8 et 30 % 8/16) (2Kg)

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

Tableau II.45 : Résultat de l'analyse granulométrique de gravillon (roulée 20%3/8 et 30 % 8/16 ; concassée 20%3/8 et 30 % 8/16) mélange n 03

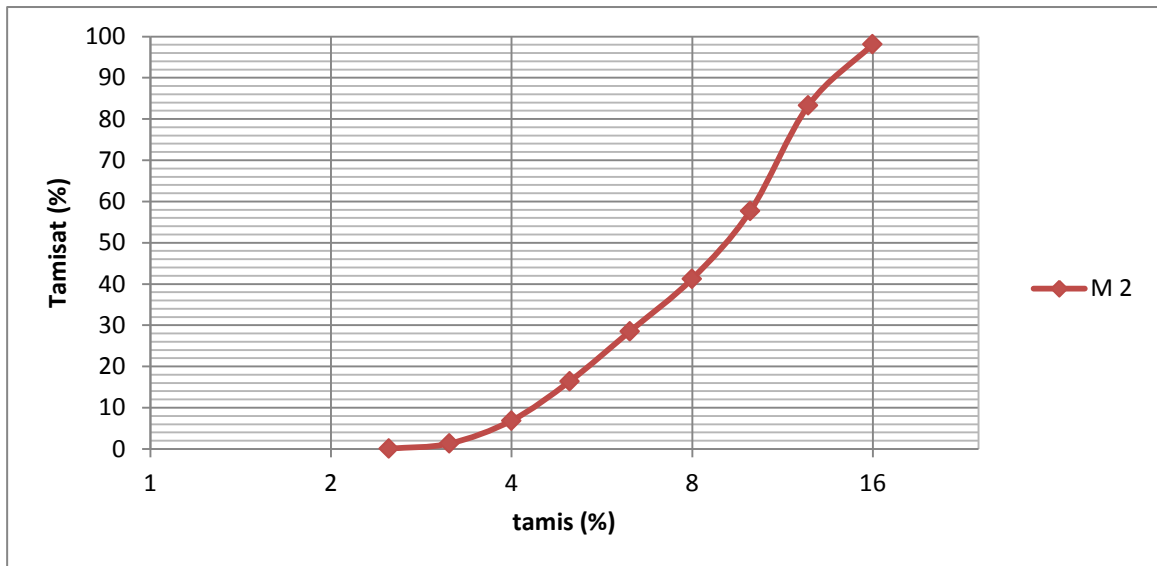


Figure II.7 : La courbe granulométrique des graviers (roulée 20%3/8 et 30 % 8/16 ; concassée 20%3/8 et 30 % 8/16) mélange 02.

II.4.2. mélange 03 (gravier roulée) (60% 8/16, 40% 3/8) :

1. Masses volumiques absolues:

Mélange	Essai	M ₁ (g)	V ₁ (ml)	V ₂ (ml)	ρ_{abs} (g/ml)	ρ_{abs} moy (g/ml)
M ₃	1	300	300	419	2.52	2.526
	2			418	2.54	
	3			419	2.52	

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

2. Masse volumique apparente:

A l'état lâche

Mélange	Essai	M ₁ (kg)	M ₂ (kg)	ρ_{app} (kg/l)	ρ_{app} moy (kg/l)
M ₃ <i>v=0.9l</i>	1	0.114	1.545	1.59	1.56
	2		1.523	1.56	
	3		1.506	1.54	

TABLE II.47 : Masse volumiques apparentes des fractions 3/8 et 8/16 du gravier roulé

A l'état compacte

Mélange	Essai	M ₁ (kg)	M ₂ (kg)	ρ_{app} (kg/l)	ρ_{app} moy (kg/l)
M ₃ <i>v=0.9l</i>	1	0.114	1.568	1.615	1.62
	2		1.585	1.634	
	3		1.577	1.625	

TABLE II.48 : Masse volumiques apparentes des fractions 3/8 et 8/16 du gravier roulé

3.1a Porosité et la Compacité Et Indice Des Vides:

<i>le mélange</i>	l'état	Porosité (%)	Compacité (%)	l'indice de vide
M₃	l'état lâche	38.2	61.8	0.61
	l'état compacte	35.86	64.14	0.56

Tableau II.49 : Porosité, Compacité Et Indice Des Vides.

6. Degré d'absorption d'eau(A) :

Mélange	<i>N° d'essai</i>	<i>M₁(g)</i>	<i>M₂(g)</i>	<i>A (%)</i>	<i>A_{moy} (%)</i>
<i>M₃</i>	01	300	301	0.33	0.44
	02	300	302	0.66	
	03	300	301	0.33	

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

7. Analyse granulométrique :

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

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

Tableau II.51 : Résultat de l'analyse granulométrique de gravillon roulé ((40%3/8)/(60%8/16))..... mélange n 03

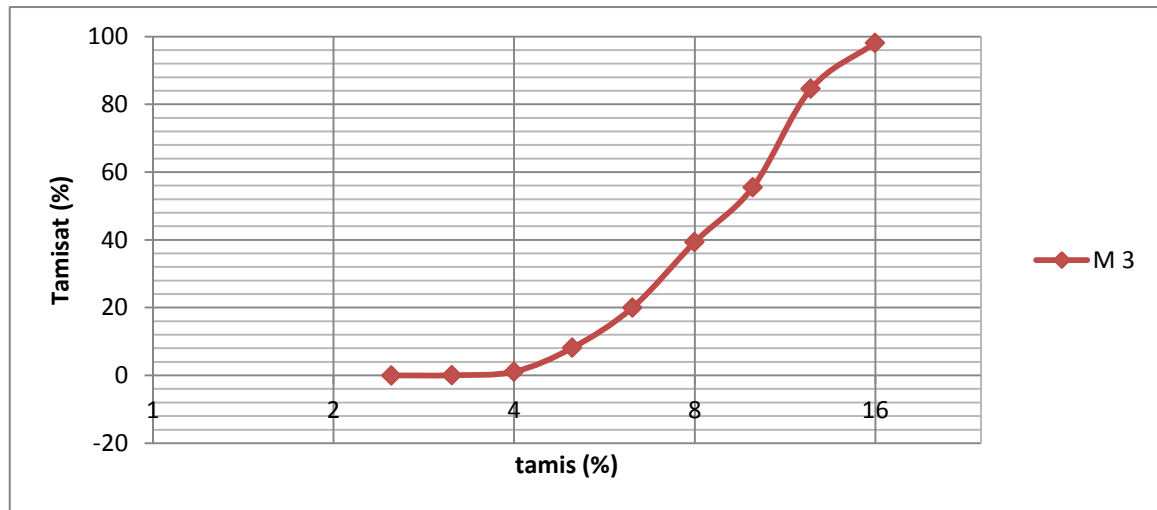


Figure II.8 : La courbe granulométrique des graviers roulés (3/8-8/16-) mélange 03.

II.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.

II.5.1. Caractéristiques du ciment CPJ-CEM II:

II.5.1.1. Description :

Le ciment portland composé **CPJ-CEM II / 42,5** est un produit en broyant le clinker qui se compose essentiellement de silicate de calcium avec le gypse comme ajout constitué de différentes forme se calcium, il est conforme à la norme NA 442. Il est généralement utilisé lorsqu'il n'y a pas de besoins spéciaux, dans les ouvrages en béton qui ne sont pas exposés à des conditions sévères comme l'attaque des sulfates du sol ou de l'eau.

Il est appliqué dans plusieurs domaines à savoir :

Le secteur de construction en béton armé pour les bâtiments résidentiels et administratifs

Le secteur de travaux publics pour les ponts, les revêtements des routes ou les structures ferroviaires.

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

Les caractéristiques du CPJ sont regroupées dans le tableau suivant:

		<i>Unités</i>	<i>Valeur</i>
<i>Masse volumique absolue</i>		g/cm ³	3,1
<i>Consistance normale</i>		%	26 – 28
<i>La finesse (Blaine)</i>		cm ³ /g	4000 – 4200
<i>Le Chatelier</i>	A froid	Mm	00
	A chaud		2
<i>Temps de prise</i>	Début	Heur : min	2 : 30
	Fin		3 : 30
<i>Résistance à la compression</i>	2 jours	MPa	18
	7 jours		32
	28 jours		Plus de 42.5

Tableau II. 52 : Caractéristiques du CPJ.

II. 5.1.3. Les caractéristiques chimiques du ciment utilisé:

L'analyse chimique et minéralogique du CPJ est établie au laboratoire de l'ACC. Les résultats sont regroupés dans les tableaux

Suivants :

ELEMENT	S ₁ O ₂	AL ₂ O ₃	C _A O	FE ₂ O ₃	M _G O	SO ₃	N _{A2} O
Teneur (%)	20.7	4.75	62.92	3.75	1.90	1.98	0.09

Eléments	C3S	C2S	C3A	C4AF
	3CaOSiO ₂	2CaOSiO ₂	3CaAl ₂ O ₃	4CaOAl ₂ O ₃ Fe ₂ O ₃
Teneur %	59	14	6	10

Tableau II.53 : Caractéristiques chimiques du CPJ.

II.6 l'eau de gâchage:

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

II.7 Calcul de la proportion des constituants :

GC : gravier concassé

GR : gravier roulé

Appellation des mélanges :

Mélange n 01: **M 1**: $M_{60\% GC 8/16+40\%GC 3/8}$

Mélange n 02 : **M 2**: $M_{30\% GC 8/16+20\%GC 3/8 +30\% GR 8/16+20\%GR 3/8}$

Mélange n 03 : **M 3**: $M_{60\% GR 8/16+40\%GR 3/8}$

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 .

Béton	Fraction de gravier			
	GC 3/8	GC 8/16	GR 3/8	GR 8/16
B 1	40 %	60 %	0 %	0 %
B 2	20 %	30 %	20 %	30 %
B 3	0 %	0 %	40 %	60 %

Tableau II.54 : Composition de béton pour 1 m³.

II.7.1 .Formulation du béton Méthodes de Dreux_Gorisse :

* mélange 01 : **M 1**

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

$$R_b = GR_c \left(\frac{C}{E} - 0.5 \right)$$

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

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

Tableau II.55. Valeurs de G coefficient granulaire

D = 16mm → G =0.45

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

$$\frac{C}{E} = \frac{R_b}{G * R_c} + 0.5 = \frac{28.75}{0.45 * 46} + 0.5$$

$$\frac{C}{E} = 1.89$$

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).

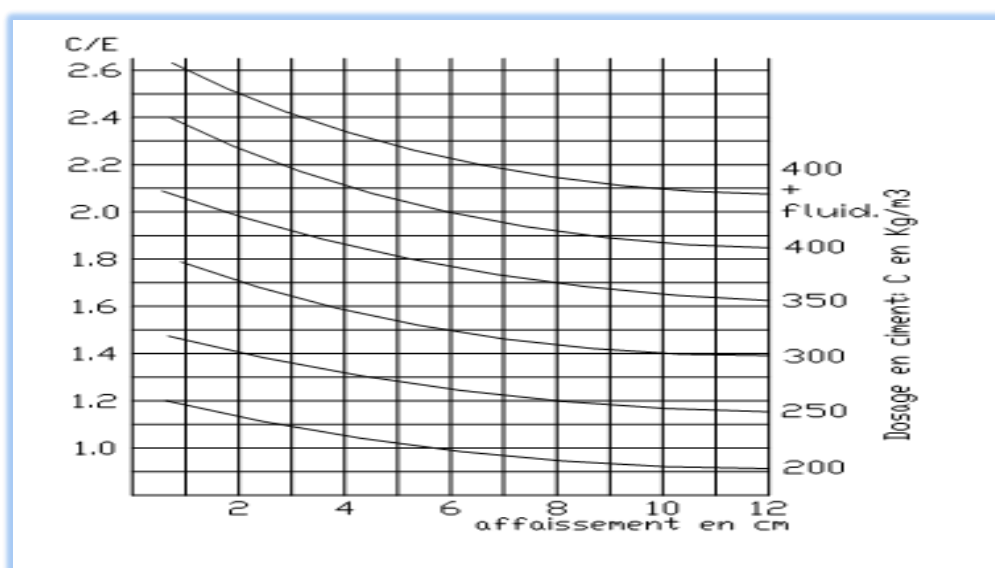


fig II .9 Dosage en ciment

$$A_f = 7cm$$

→ l'abaque donne la valeur du dosage en ciment : $C = 373.33Kg$ (voir fig. III .10)

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

2. Détermination du dosage en eau:

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

→ On en déduit la valeur de E qui est : $E = 200.82Kg$

$$C = 373.33 Kg$$

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 :

$$D = 16 < 20mm : X_A = D/2 = 8$$

$$Y_A = 50 - \sqrt{D} + K \rightarrow Y_A = 44$$

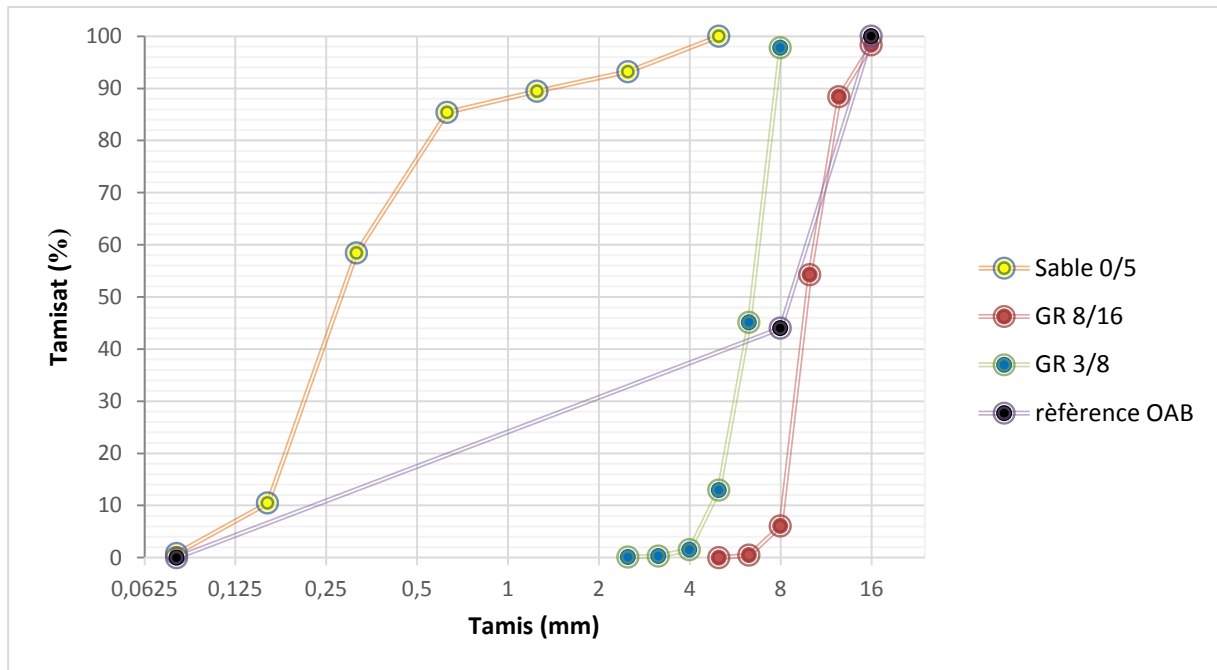


fig II .10 Courbe Granulométrique

les pourcentages des granulats suivants :

- Sable 0/5 : 37%
- Gravier 3/8 : 25.2
- Gravier 8/16 : 37.8%

4. Coefficient de compacité :

$$V_M = V_s + V_G + V_C$$

$$V = 1000\gamma - c$$

5. Dosage des granulats :

Volume absolu du ciment :

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

$$c = \frac{373.33}{3.1} = 120.42 \text{ kg}$$

Volume absolu du granulats (l'ensemble) :

$$V_G = 1000 * 0.805 - 120.42 = 684.58 \text{ kg}$$

- Volume absolu du Sable :

$$V_S = 253.29 \text{ kg}$$

- Volume absolu du Gravier 3/8 :

$$V_{GC\ 3/8} = 172.51 \text{ kg}$$

- Volume absolu du Gravier 8/16 :

$$V_{GC\ 8/16} = 258.77 \text{ kg}$$

Les dosages en masse des élément secs (granulats, sable) pour 1m^3 de béton sont donnès par :

- Masse de Sable :

$$M_S = V_S * \gamma_S = 658.55 \text{ Kg}$$

- Masse de Gravier 3/8 :

$$M_{GC\ 3/8} = V_{GC\ 3/8} * \gamma_{GC\ 3/8} = 448.526 \text{ kg}$$

- Masse de Gravier 8 /16 :

$$M_{GC\ 8/16} = V_{G8/16} * \gamma_{G8/16} = 672.80 \text{ kg}$$

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

* mélange 01 : M 1

Constituants	Masse (kg)
Sable 0/5	658.55
GC 3/8	448.526
GC 8/16	672.8
Ciment CPJ	373.33
Eau (E)	200.82

*** mélange 02 : M 2**

Constituants	Masse (kg)
Sable 0/5	672.99
GC 3/8	229.18
GC 8/16	343.77
GR 3/8	229.18
GR 8/16	343.77
Ciment CPJ	373.33
Eau (E)	200.82

*** mélange 03 : M 3**

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

Constituants	Masse (kg)
Sable 0/5	672.99
GR 3/8	458.36
GR 8/16	687.54
Ciment CPJ	373.33
Eau (E)	200.82

B1: (béton témoin)

- Pour coulage de 21 éprouvettes cubiques et 15 éprouvettes prismatiques:

$$V = [(0.1 \times 0.1 \times 0.1) \times 21 + (0.07 + 0.07 + 0.28) \times 15] \times 1.25 = 0.05197 \text{ m}^3$$

Formulation de Béton à base de : (40% 3/8 concassé + 60% 8/16 concassé)

$$\left\{ \begin{array}{l} E = 10.43 \text{ l/m}^3 \\ C = 19.40 \text{ kg} \\ S = 34.22 \text{ kg} \\ G_{3/8} = 23.306 \text{ kg} \\ G_{8/16} = 34.396 \text{ kg} \end{array} \right.$$

• B2 :

- Pour coulage de 21 éprouvettes cubiques et 18 éprouvettes prismatiques :

$$V = [(0.1 \times 0.1 \times 0.1) \times 21 + (0.07 \times 0.07 \times 0.28) \times 18] \times 1.25 = 0.05197 \text{ m}^3$$

Formulation de Béton à base de : (20% 3/8 concassé + 30% 8/16 concassé + 20% 3/8 roulé + 30% 8/16 roulé)

$$\left\{ \begin{array}{l} E = 10.43 \text{ l} / \text{m}^3 \\ C = 19.40 \text{ kg} \\ S = 34.97 \text{ kg} \\ G_{GC3/8} = 11.91 \text{ kg} \\ G_{GC8/16} = 17.86 \text{ kg} \\ G_{GR3/8} = 11.91 \text{ kg} \\ G_{GR8/16} = 17.86 \text{ kg} \end{array} \right.$$

• B3 :

- Pour coulage de 21 éprouvettes cubiques et 15 éprouvettes prismatiques:
- $V = [(0.1 \times 0.1 \times 0.1) \times 21 + (0.07 + 0.07 + 0.28) \times 15] \times 1.25 = 0.05197 \text{ m}^3$

Formulation de Béton à base de : (40% 3/8 roulé + 60 8/16 roulé)

$$\left\{ \begin{array}{l} E = 10.43 \text{ l} / \text{m}^3 \\ C = 19.40 \text{ kg} \\ S = 34.97 \text{ kg} \\ G_{3/8} = 23.82 \text{ kg} \\ G_{8/16} = 35.73 \text{ kg} \end{array} \right.$$



fig II .11 .les moules 07*07*28 cm



II .12 .les moules 10*10*10 cm

II.8. Performances des bétons à l'état frais et à l'état durci:**II.8.1. Affaissement au cône d'Abrams:**

a) Principe de l'essai: Cet essai consiste à mesurer la hauteur d'affaissement d'un volume tronconique de béton frais. Ce dernier est compacté dans un moule ayant la forme d'un tronc de cône. Lorsque le cône est soulevé verticalement, l'affaissement du béton permet de mesurer sa consistance.

b) Appareillage:

- Moule pour former l'éprouvette : en métal non directement attaquant par la pâte de ciment, d'une épaisseur minimale de 1,5 mm. La paroi intérieure du moule doit être lisse, sans aspérités. Le moule doit avoir la forme d'un tronc de cône creux aux dimensions intérieures suivantes :

- diamètre de la base : (200 ± 2) mm;
- diamètre du haut : (100 ± 2) mm;
- hauteur : (300 ± 2) mm;

Le moule doit être muni, à sa partie supérieure, de deux poignées et, à sa partie inférieure, de pattes de fixation ou d'appui, afin de l'immobiliser.

- Tige de piquage : de section circulaire, rectiligne, en acier, de (16 ± 1) mm de diamètre, et de (600 ± 5) mm de longueur, dont les extrémités sont arrondies.
 - Entonnoir (facultatif) : en matériau non absorbant et non directement attaquant par la pâte de ciment, ayant un dispositif permettant à l'entonnoir d'être placé correctement sur le moule spécifié ci-dessus.
 - Règle : graduée de 0 mm à 300 mm, avec des graduations de 5 mm, le zéro étant situé à une extrémité de la règle.
 - Surface ou plateau de base : plateau ou autre surface, rigide, plat, non absorbant, sur lequel le moule sera posé.
 - Récipient de ré-homogénéisation : plateau plat de structure rigide, en matériau non absorbant et non directement attaquant par la pâte de ciment. Ses dimensions doivent être appropriées de sorte que le béton puisse être facilement regâché, à l'aide de la pelle carrée.
 - Pelle carrée : La pelle de forme carrée est nécessaire pour assurer un mélange correct du matériau sur le récipient de ré-homogénéisation
- Minuterie ou horloge : capable de mesurer le temps à 1 seconde près.

c) Mode opératoire:

- Humidifier le moule et le plateau de base, puis placer le moule sur le plateau
- Maintenir fermement le moule en place pendant le remplissage, en le solidarissant par les deux pattes de fixation.

- Remplir le moule en trois couches, chacune correspondant approximativement, après serrage, au tiers de la hauteur du moule. Piquer chaque couche 25 fois avec la tige de piquage. Répartir les coups uniformément sur la section de chaque couche. Pour la couche inférieure, il est nécessaire d'incliner légèrement la tige et de donner approximativement la moitié des piquages avec des coups en spirale jusqu'au centre. Piquer la deuxième couche et la couche supérieure, chacune sur toute son épaisseur, de sorte que la tige pénètre légèrement dans la couche sous-jacente. Lors du remplissage et du compactage de la couche supérieure, mettre un excès de béton au-dessus du moule avant de commencer le piquage. Si lors du piquage de la couche supérieure apparaît un manque de béton au dessous du bord supérieur du moule. Ajouter du béton pour avoir toujours un excès. Après avoir piqué correctement la couche supérieure, araser le béton suivant le bord supérieur du moule en effectuant un mouvement de sciage et de roulage à l'aide de la tige de piquage.
- Enlever le béton qui s'est écoulé sur le plateau de base. Démouler le béton en soulevant verticalement le moule avec précaution.
- Immédiatement après avoir retiré le moule, mesurer l'affaissement (h) en déterminant la différence entre la hauteur du moule et le point le plus haut du corps d'éprouve affaissé.

II.8.2 .Résistance à la compression :

L'essai de compression est mené sur des éprouvettes de forme cubique normalisée et d'élanement 2 (10*10*10 cm; norme NFP18-406,NA427) .La vitesse de chargement est constante. La machine d'essai est une presse de force de classe « B » et d'une capacité maximale de 1500 kn conforme à la norme NF P 18-412 (NA 2832).

Les éprouvettes sont conservées sans être déplacées pendant 24 heures. Après démoulage, Des éprouvettes 10x10x10 cm³ sont conservées dans l'eau à une température de 20 à 23°C jusqu'à 28 jours. Des essais d'écrasement ont été réalisés aux âges (7, 14 , 28 , 60 , 90)par jours La résistance est calculée selon la formule :

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

f_c : résistance en compression, exprimée en mégapascal (Newton par millimètres carrés)

F : charge maximale, exprimée en Newtons

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

La résistance à la compression doit être exprimée à **MPa (N/mm^2)** près.



fig II .13.la machine de compression



fig II .14.les essais de la compression

II.8.3.Résistance à la traction par flexion :

Des éprouvettes prismatiques de dimensions 7 x 7 x 28 cm sont soumises à un moment de flexion par application d'une charge au moyen de rouleaux supérieurs et inférieurs. La charge maximale enregistrée au cours de l'essai est notée et la résistance à la flexion est calculée.

Les mesures sont faites sur une presse qui répond aux normes NFP18-407(NA428), munie d'un banc de flexion à 4 points. Pour une charge totale P, le moment de flexion constant entre les deux points d'application de la charge est :

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

et la contrainte de traction correspondante sur la fibre inférieure est $f_{tj} = 6M / a^3$

la relation suivante permet de calculer la résistance :

$$F_{tjj} = 1.8 \frac{P}{a^2}$$



fig II .15 Essai de traction par flexion



fig II .16 Machine d'essai de traction

II.9 Conclusion:

Dans ce chapitre , les différentes caractéristiques des composant sont été établies. Les courbes granulométriques de toutes les classes granulaires sont présentées. Il était important de définir la partie normative à laquelle doivent répondre les différents mélanges. La méthode de formulation a été développée et le calcul de la proportion des constituants a été fait. L'essai au cône d'Abrams nous a permis de déterminer la consistance des bétons étudiés. Les essais à la compression et . Ils seront utilisés pour obtenir les valeurs des résistances à la compression de tous les mélanges.

Chapitre 03

Chapitre 03 : résultat discussion

III.1. Introduction:

Les résultats des essais vont nous permettre de générer un ensemble de données qui vont servir à valider le choix des classes granulaires spécifiques. Pour cela, la formulation de plusieurs mélanges de béton a été élaborée. L'étude c'est faite sur les caractéristiques des granulats, des classes granulaires et des bétons. A partir des résultats obtenus, nous vérifions l'influence des acides sulfurique avec différents pourcentages de concentration, sur nos mélanges de bétons, et nous vérifions l'influence de la qualité des graviers (roulés et concassés) et leurs résistances aux attaques acide.

Les réalisés sont les suivants :

✓ Essais Sur granulats roulés et concassés:

- masse volumique
- porosité

✓ Essais Sur béton :

- densité du béton à l'état frais
- affaissement
- rapport E/C et la réduction d'eau
- résistance à la compression à 7 jours
- résistance à la compression à 14 jours
- résistance à la compression à 28 jours
- résistance à la compression à 60 jours
- résistance à la compression à 90 jours
- résistance à la traction à 28 jours
- résistance à la traction à 60 jours
- résistance à la traction à 90 jours

III.2. Représentation et analyse des résultats:

III. 2.1 masse volumique et porosité des différent mélanges de granulats :

Mélanges	M1	M2	M3
Pourcentage de gravier roulé (%)	0	50	100
Masse volumique apparente (g/cm ³)	1.577	1.588	1.62
Porosité	40.17	38.28	35.86

Tableau III.1 masse volumique apparent et porosité des différentes mélanges de granulat

Avec ces mélanges optimums nous avons confectionnée nos bétons.

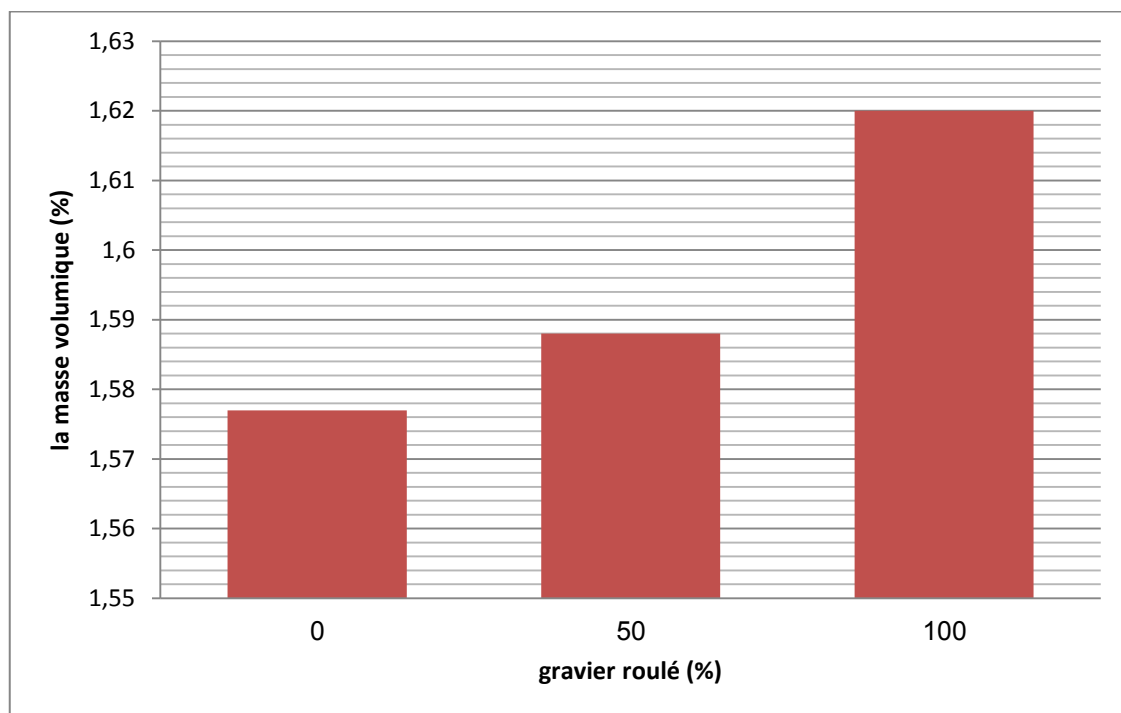


Fig III.1 Masse volumique des différentes mélanges Sur granulat

Du graphe N°III.1, on remarque que la Masse volumique du mélange de gravier augmente en augmentant le pourcentage de gravier roulé.

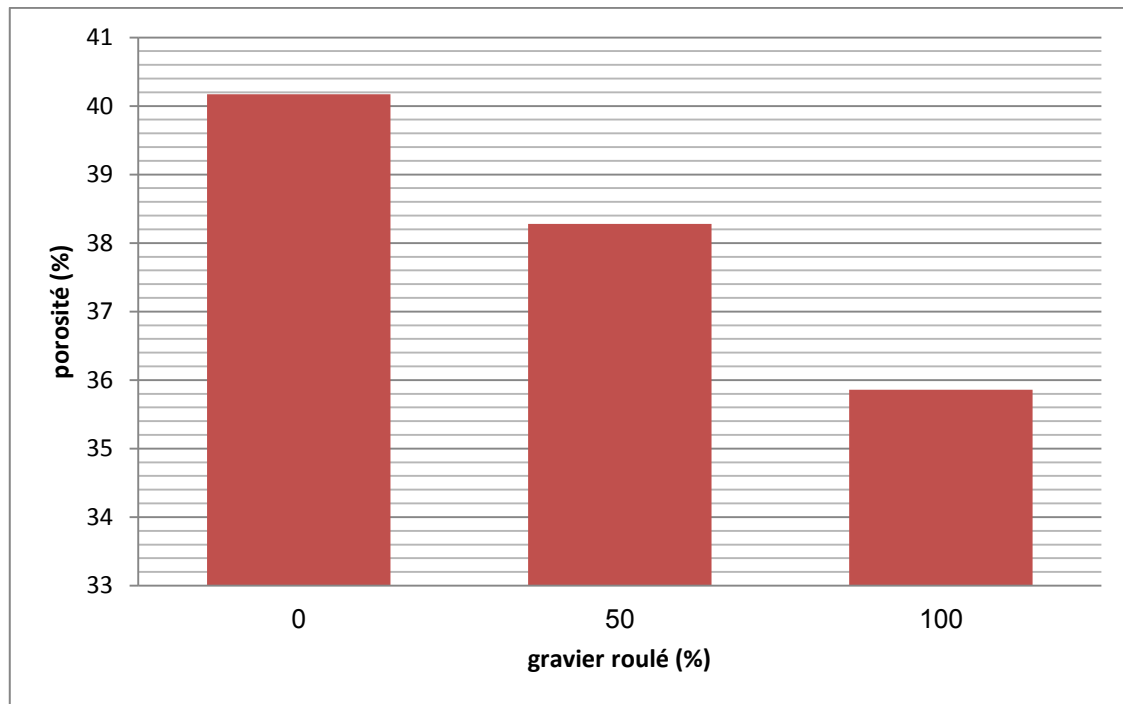


Fig III. 2 Porosité des différents mélanges Sur granulat

Du graphe N°III.2, on remarque que la porosité du mélange de gravier diminue en augmentant le pourcentage de gravier roulé.

III.2.2 Les résultats des essais effectués sur bétons

III.2.2.1 Essais sur béton frais

a) Masses volumiques

Mélanges	$G_{GR3/8}$ %	$G_{GR8/16}$ %	$G_{GC3/8}$ %	$G_{GC8/16}$ %	Masse volumique (kg/m ³)
B₁	0	0	40	60	2.414
B₂	20	30	20	30	2.426
B₃	40	60	0	0	2.452

Tableau III.2 : les résultats des mesures de la masse volumique des bétons à l'état frais

On constate d'après les résultats qu'il y a une variation de la masse volumique des mélanges.

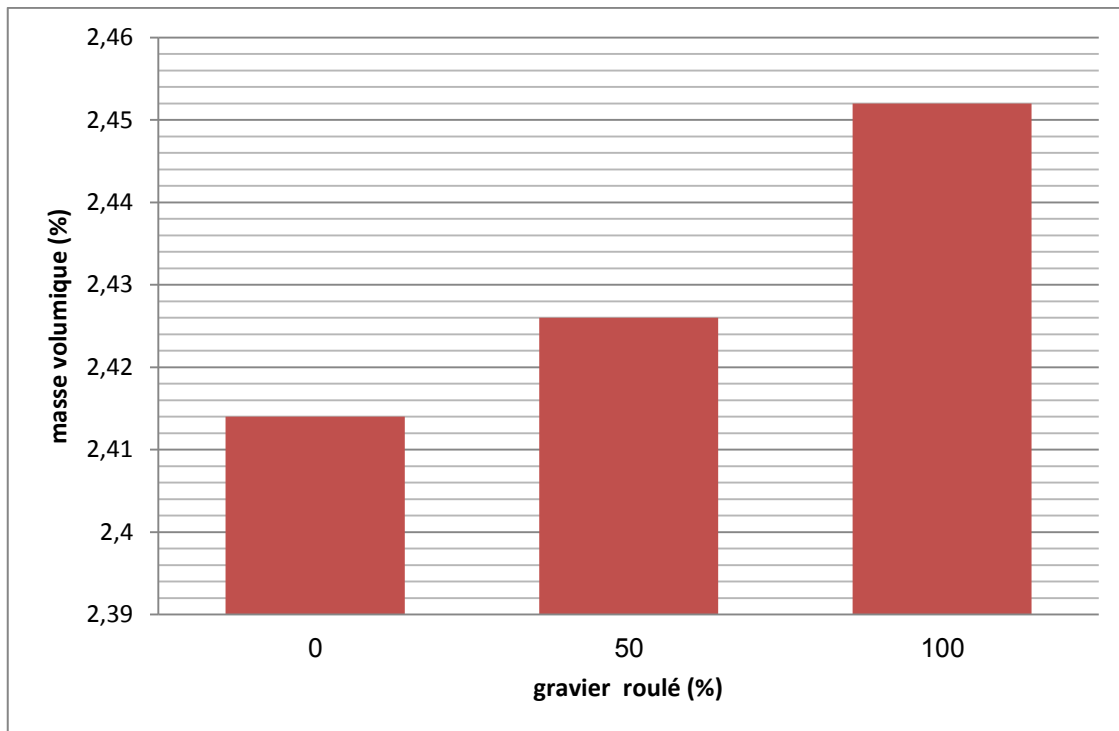


fig III.3 Masse volumique des bétons frais en fonction du pourcentage de gravier roulés

l'introduction de gravier roulé dans le mélange de béton favorise la maniabilité du béton , et on remarque une augmentation de la masse volumique du béton frais en augmentant le pourcentage de gravier roulé (Figure III.3) .

b) Affaissement

Mélanges	Gravie gravier roulé %	Affaissement
B ₁	0	7
B ₂	100	6
B ₃	50	6.5

Tableau III.3 Affaissement

L'affaissement de nos mélanges de bétons est maintenue constante, on peut pas travailler sur plusieurs paramètres à la fois.

C) rapport E/C et réduction d'eau :

Béton	B1	B2	B3
E/C	0.54	0.54	0.51

Tableau III.4 rapport E/C de différents béton

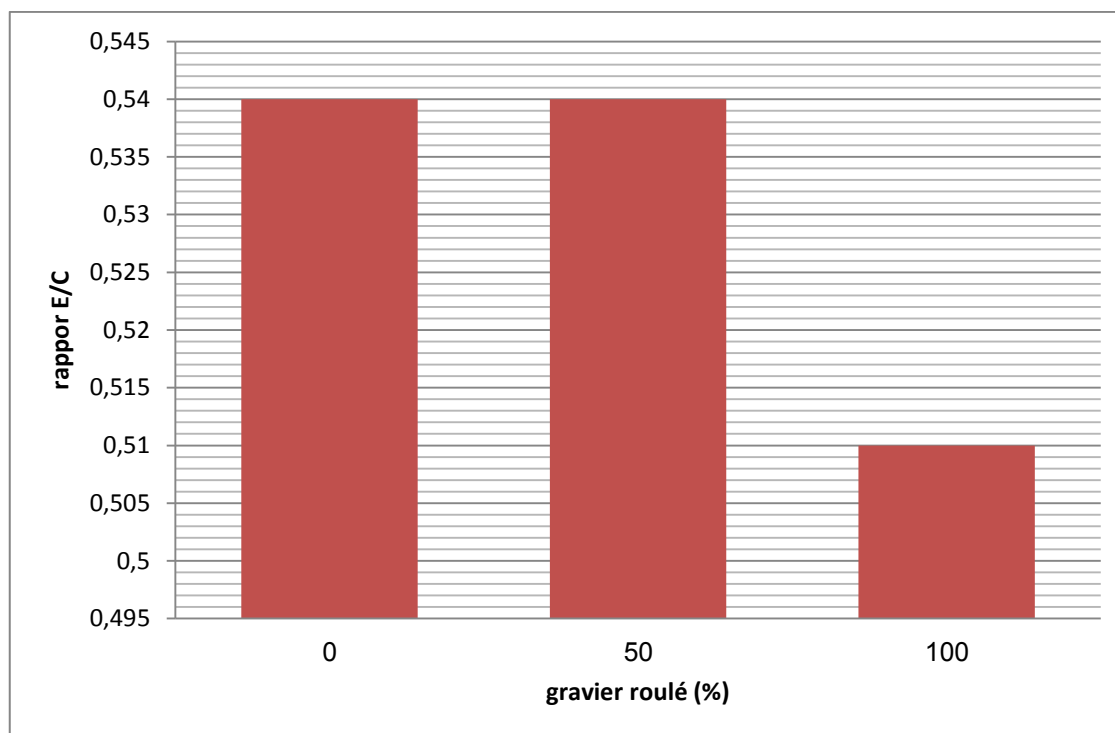


fig III.4 rapport E/C en fonction du pourcentage de gravier roulé.

on remarque une diminution du rapport E/C pour le mélange B3 avec 100 % gravier roulé, l'absorption des graviers roulés est faible par rapport aux graviers concassés cela améliore le rapport E/C.

III .2.2.2 Essais sur bétons durcis

a / Concentration de l'acide sulfurique 5%:

Nos éprouvette de béton après durcissement (28 jours) ont été introduit dans un milieu agressif , un bac rempli d'eau avec de l'acide sulfurique à une concentration de 5%

III .2.2.2.1. masse volumique des différents mélanges étudiés :

Mélanges	La masse volumique a l'état durci (kg/cm ³) Conservation dans l'eau				La masse volumique (kg/cm ³) a l'état durci (milieu agressive)	
	1 jours	7 jours	14 jours	28 jours	60 jours	90 jours
B ₁	2.406	2.408	2.409	2.411	2.409	2.407
B ₂	2.409	2.410	2.411	2.412	2.410	2.408
B ₃	2.415	2.416	2.418	2.419	2.417	2.414

Tableau III.5 : les résultats des mesures de la masse volumique à l'état durci des bétons

(concentration 5 %)

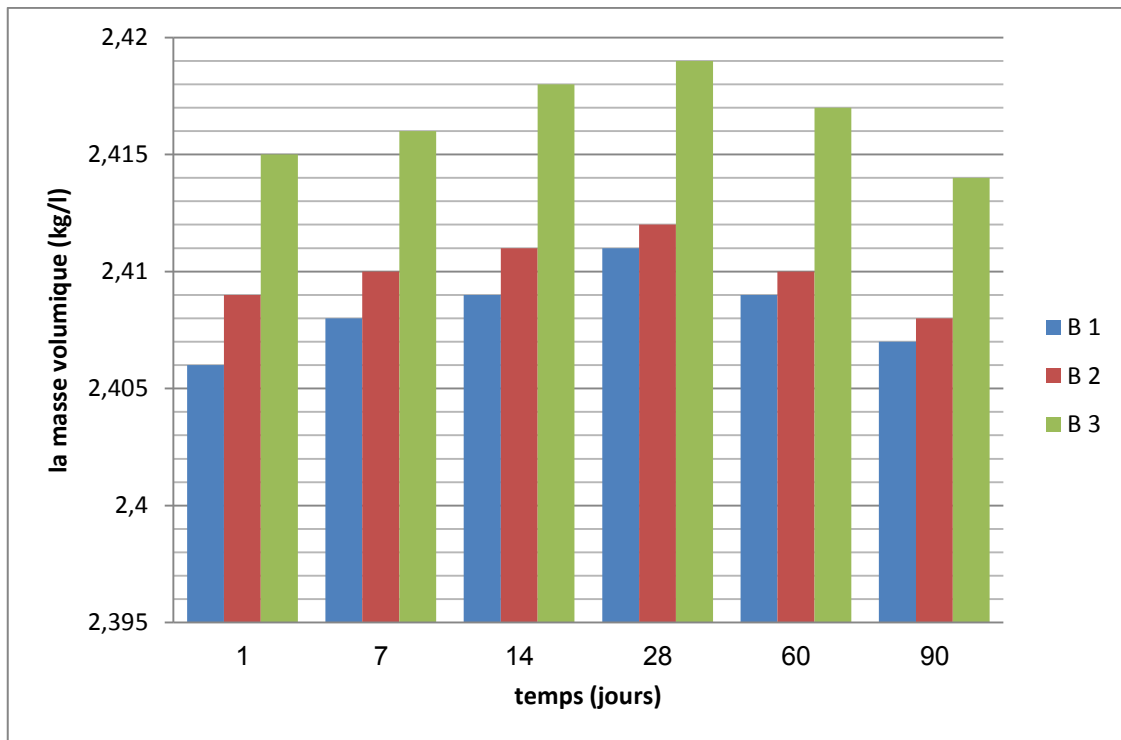


fig III.5 Masse volumique des bétons durci en fonction du temps de conservation
(concentration 5 %)

la masse volumique augmente avec le temps jusqu'à 28 jours, avec l'immersion en milieu acide de nos éprouvettes on remarque une diminution de la masse volumique à 60 jours et 90 jours,

on remarque aussi que le mélange B3 avec 100% de gravier roulé est moins affecté par l'attaque acide que les mélanges contenant des graviers concassés .

b / Concentration de l'acide sulfurique 10%:

Nos éprouvette de béton après durcissement (28 jours) ont été introduit dans un milieu agressif , un bac rempli d'eau avec de l'acide sulfurique à une concentration de 10%

masse volumique des différents mélanges étudiés :

Mélanges	La masse volumique à l'état durci (kg/cm ³)				La masse volumique (kg/cm ³) à l'état durci (milieu agressif)	
	1 Jours	7 jours	14 jours	28 jours	60 jours	90 jours
B₁	2.406	2.409	2.411	2.412	2.407	2.403
B₂	2.409	2.410	2.412	2.413	2.408	2.406
B₃	2.415	2.416	2.418	2.419	2.413	2.411

Tableau III.6 : les résultats des mesures de la masse volumique à l'état durci des bétons à la concentration 10 %.

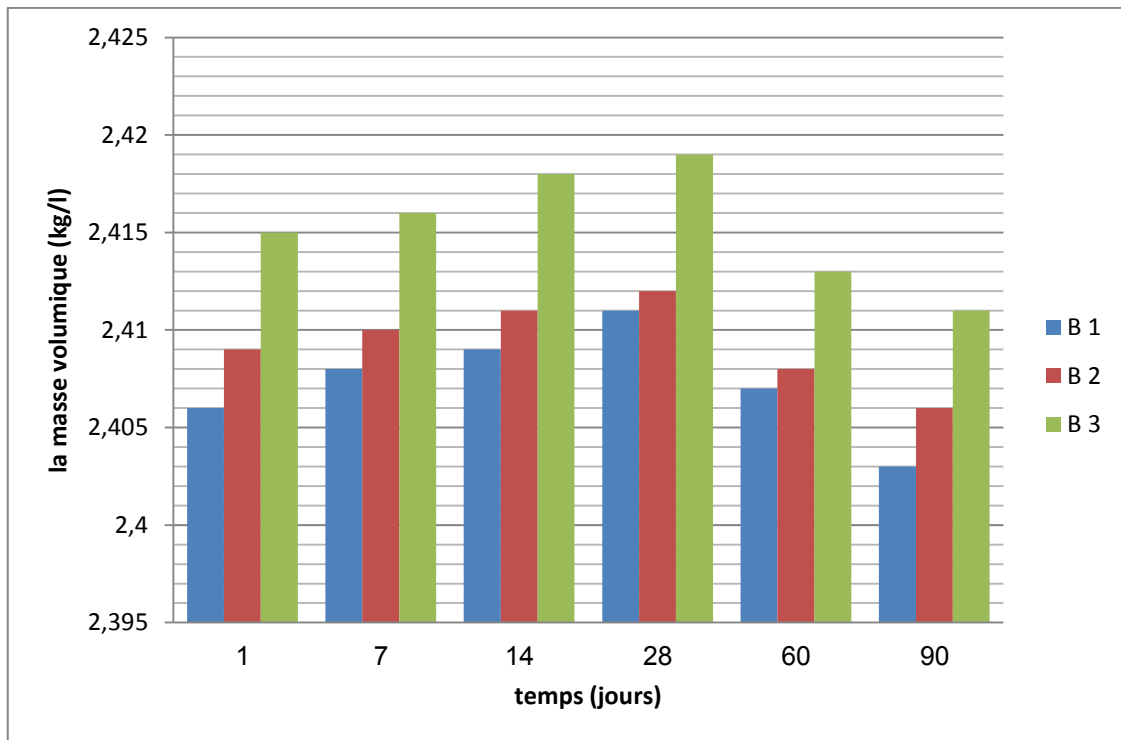


fig III.6 Masse volumique des bétons durci a la concentration 10 %

la masse volumique augmente avec le temps j'us qua 28 jours, avec l'immersion en milieu acide de nos éprouvettes remarque une diminution de la masse volumique à 60 jours et 90 jours.

on remarque aussi que le mélange B1 avec 100% de gravier concassé est plus affecté par l'attaque acide que les mélange contenant des graviers roulé .

III .2.2.2.2. La résistance :

- **Concentration de l'acide sulfurique 5%:**

Nos éprouvette de béton après durcissement (28 jours) ont étaient introduit dans un milieu agressif , un bac rempli d'eau avec de l'acide sulfurique à une concentration de 5%

a/ Résistance à la compression à 7 ; 14 ; 28 ; 60 ; 90 jours

Mélanges	$G_{GR3/8}$ %	$G_{GR8/16}$ %	$G_{GC3/8}$ %	$G_{GC8/16}$ %	Resistances à la compression MPA			Resistances à la compression (milieux agressive) (mpa)	
					7 jours	14 jours	28 jours	60 jours	90 jours
B₁	0	0	40	60	26.15	31.56	35.26	30.02	27.02
B₂	20	30	20	30	25.7	30.75	33.7	29.37	25.98
B₃	40	60	0	0	25.03	30.00	33.1	27	24.15

Tableau III.7 : Résistances à la compression a la concentration 5 %

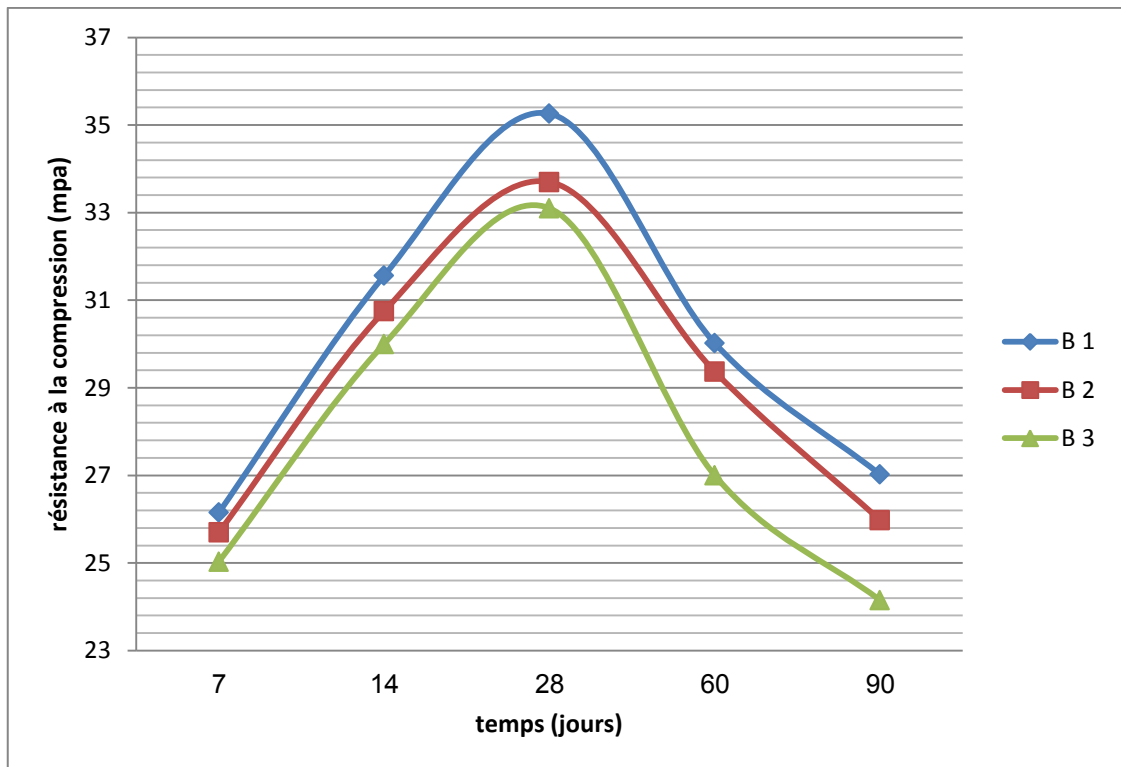


fig III.7 résistance à la compression en fonction du temps (concentration 5%)

la résistance de la compression augmente avec le temps jusqu'à 28 jours, avec l'immersion en milieu acide de nos éprouvettes on remarque une diminution de la résistance à 60 jours et 90 jours, on remarque aussi que le mélange B3 avec 100% de gravier roulé est plus affecté par l'attaque acide que les mélanges contenant des graviers concassés.

b/ Résistance à la traction par flexion à 28 ; 60 ; 90 jours

Mélanges	$G_{GR3/8}$ %	$G_{GR8/16}$ %	$G_{GC3/8}$ %	$G_{GC8/16}$ %	Résistances à la traction (mpa)	
					28 Jours	60 jours / 90 jours
B₁	0	0	40	60	5.98	5.64 / 5.35
B₂	20	30	20	30	5.71	5.4 / 5.20
B₃	40	60	0	0	5.50	5.30 / 5.10

Tableau III.8 : Résistances de la traction à la concentration 5 %

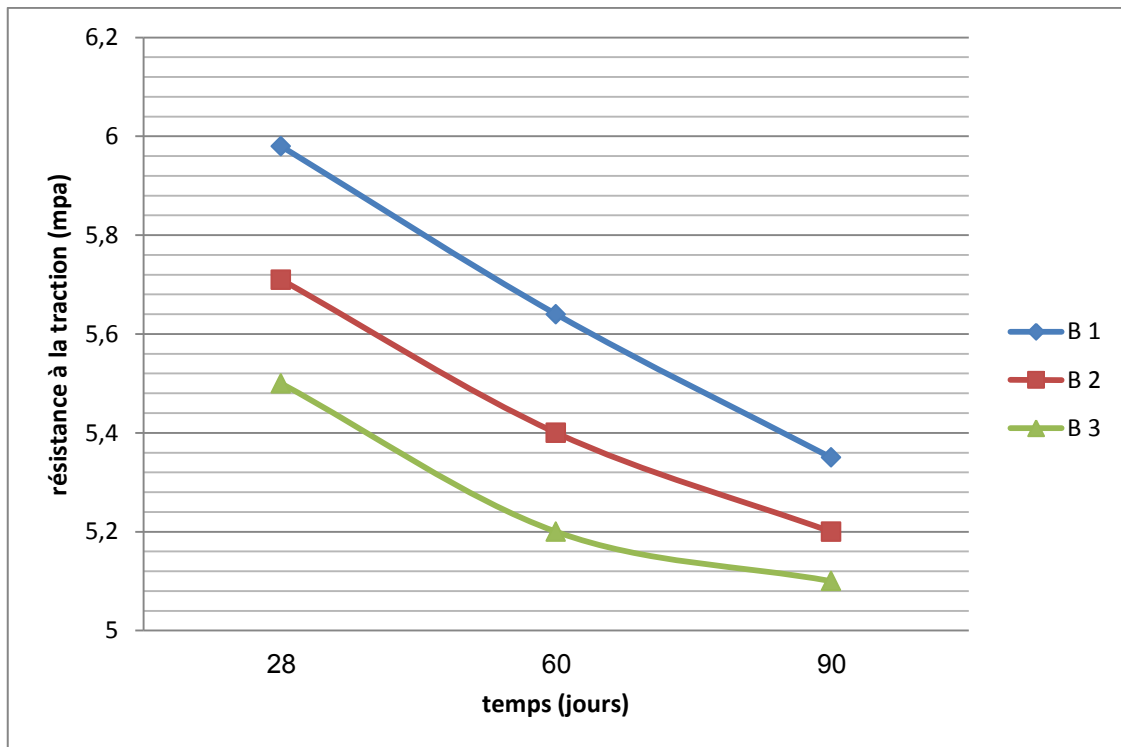


fig III.8 Résistances de la traction à la concentration 5 %

la résistance de la traction augmente avec le temps j'us qua 28 jours, avec l'immersion en milieu acide de nos éprouvettes remarque une diminution de la résistance à 60 jours et 90 jours.

on remarque aussi que le mélange B3 avec 100% de gravier roulé est plus affecté par l'attaque acide que les mélange contenant des graviers concassé .

- **Concentration de l'acide sulfurique 10%:**

Nos éprouvette de béton après durcissement (28 jours) ont étaient introduit dans un milieu agressif , un bac rempli d'eau avec de l'acide sulfurique à une concentration de 10%

a / Résistance à la compression à 7 ; 14 ; 28 ; 60 ; 90 jours

Mélanges	$G_{GR3/8}$ %	$G_{GR8/16}$ %	$G_{GC3/8}$ %	$G_{GC8/16}$ %	Resistances à la compression MPA			Resistances à la compression (milieux aggressive) (mpa)	
					7 jours	14 jours	28 jours	60 jours	90 jours
B₁	0	0	40	60	26.15	31.56	35.26	28.14	25.63
B₂	20	30	20	30	25.7	30.75	33.7	26.98	24.07
B₃	40	60	0	0	25.03	30.00	33.1	25.50	22.88

Tableau III.9 : Résistances à la compression de la concentration 10%

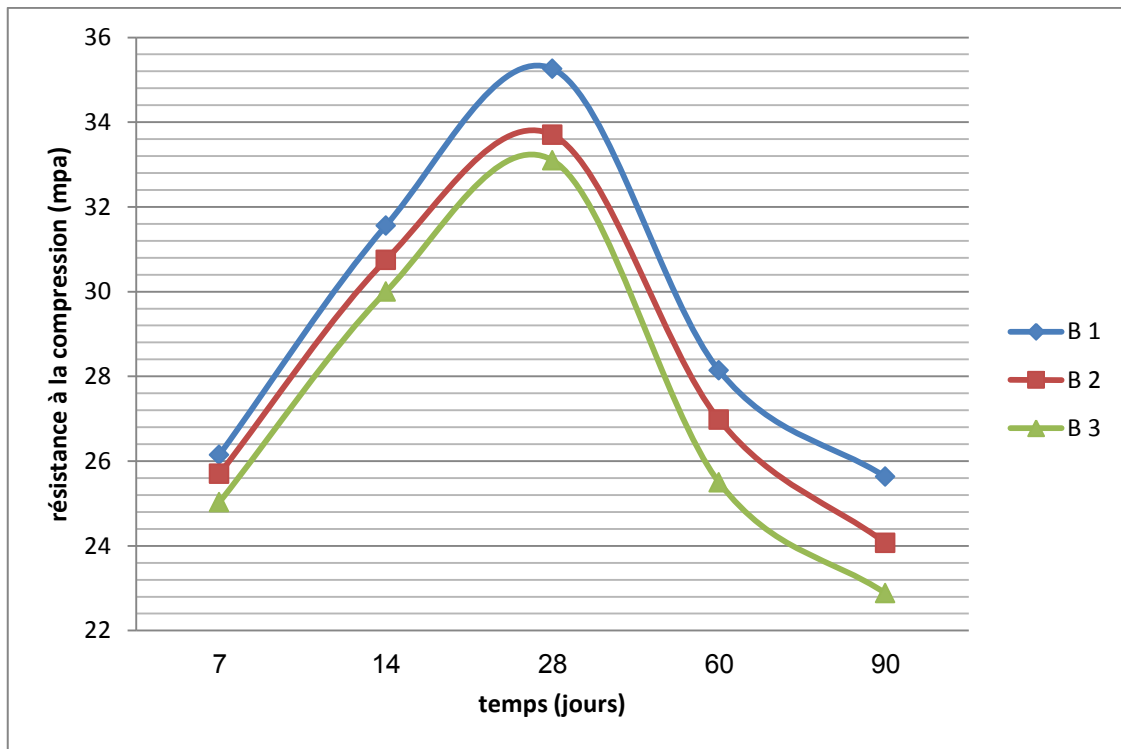


fig III.9 Résistances à la compression de la concentration 10 %

la résistance de la compression augmente avec le temps jusque 28 jours, avec l'immersion en milieu acide de nos éprouvettes remarque une diminution de la résistance à 60 jours et 90 jours.

on remarque aussi que le mélange B3 avec 100% de gravier roulé est plus affecté par l'attaque acide que les mélanges contenant des graviers concassés.

b/ Résistance à la traction à 28 ; 60 ; 90 jours

Mélanges	$G_{GR3/8}$ %	$G_{GR8/16}$ %	$G_{GC3/8}$ %	$G_{GC8/16}$ %	Resistances à la traction (mpa)	
					28 Jours	60 jours / 90 jours
B ₁	0	0	40	60	5.98	5.60 / 5.25
B ₂	20	30	20	30	5.71	5.35 / 5.05
B ₃	40	60	0	0	5.50	5.23 / 4.9

Tableau III.10 : Résistances à la traction de la concentration 10 %

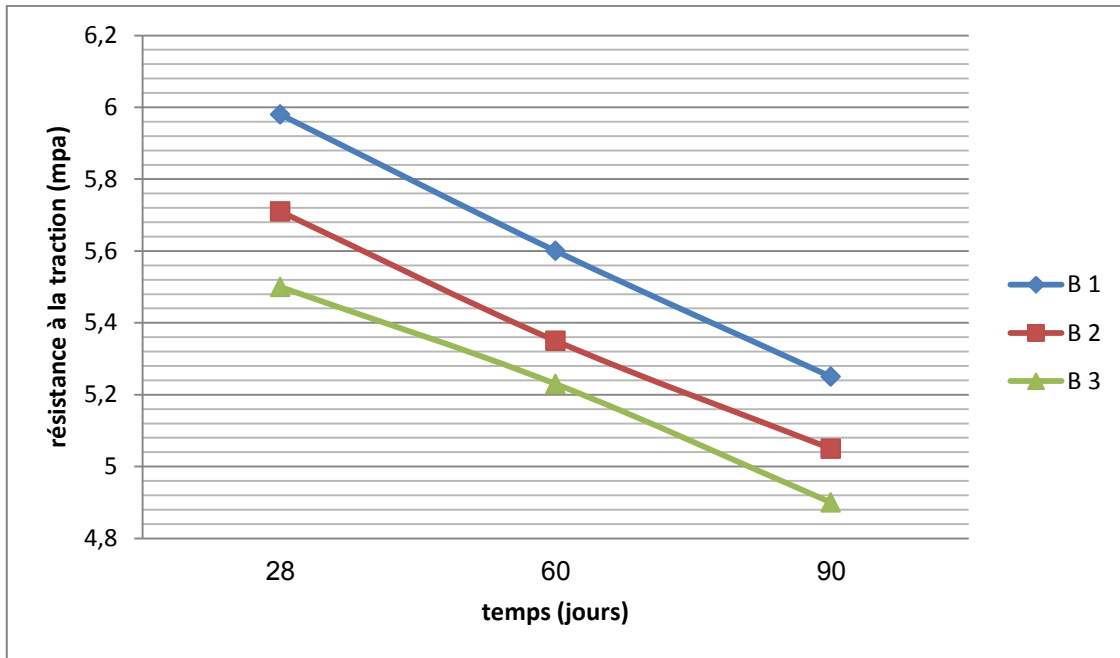


fig III.10 Résistances à la traction de la concentration 10 %

la résistance de la traction augmente avec le temps jusqu'à 28 jours, avec l'immersion en milieu acide de nos éprouvettes on remarque une diminution de la résistance à 60 jours et 90 jours.

on remarque aussi que le mélange B3 avec 100% de gravier roulé est plus affecté par l'attaque acide que les mélanges contenant des graviers concassés.

- **comparaison entre concentration 5 % et 10% :**
- **a / résistance à la compression : (résistance à 60 jours):**

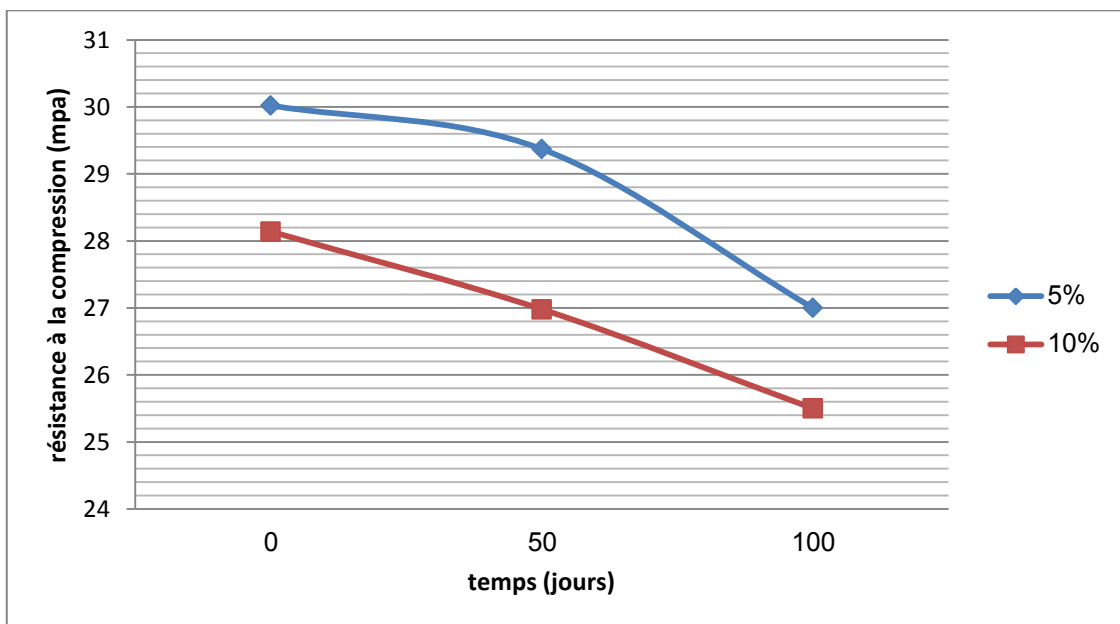


fig III.11 résistance à la compression (résistance à 60 jours)

pourcentage de réduction de la résistance :

$$\frac{Re_{5\%} - Re_{10\%}}{Re_{10\%}} * 100$$

A 0 % de pourcentage de gravier roulé = 6.68 %

A 50 % de pourcentage de gravier roulé = 8.13 %

A 100 % de pourcentage de gravier roulé = 5.88 %

on remarque que plus en augmente la concentration de l'acide sulfurique à 10% dans le milieu de conservation résistance à la compression diminue .

b / résistance à la compression : (résistance à 90 jours):

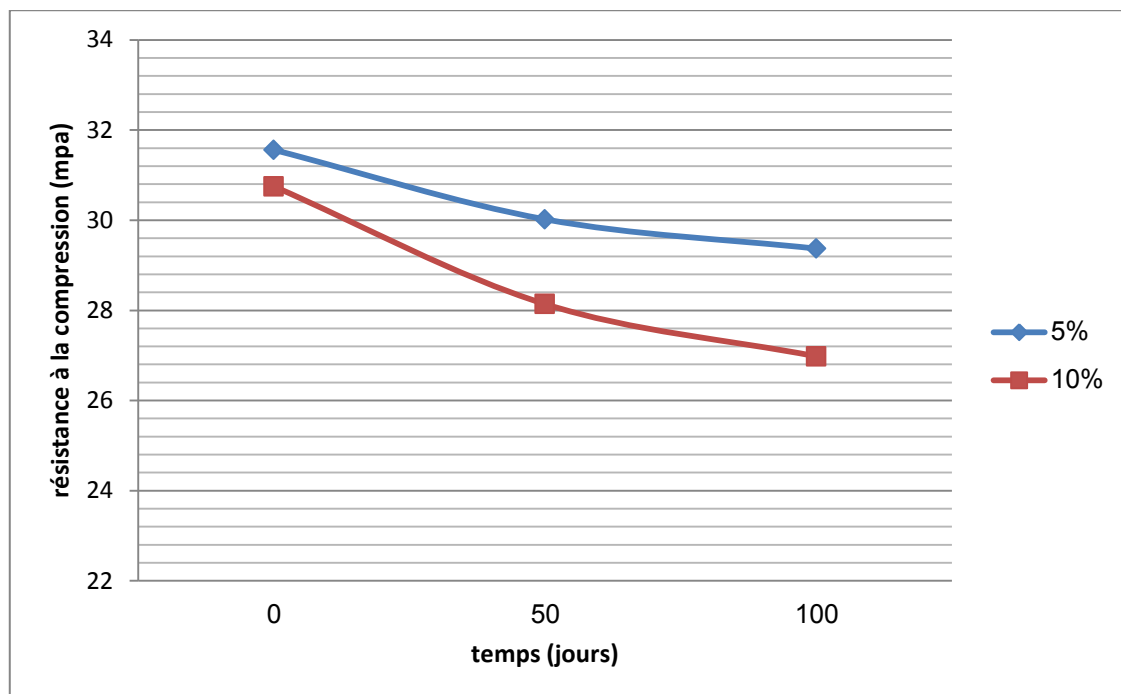


fig III.12 résistance à la compression (résistance à 90 jours)

pourcentage de réduction de la résistance :

A 0 % de pourcentage de gravier roulé = 5.42 %

A 50 % de pourcentage de gravier roulé = 7.93%

A 100 % de pourcentage de gravier roulé = 5.55%

on remarque que plus en augmente la concentration de l'acide sulfurique à 10% dans le milieu de conservation résistance à la compression diminue .

a / résistance à la traction : (résistance à 60 jours)

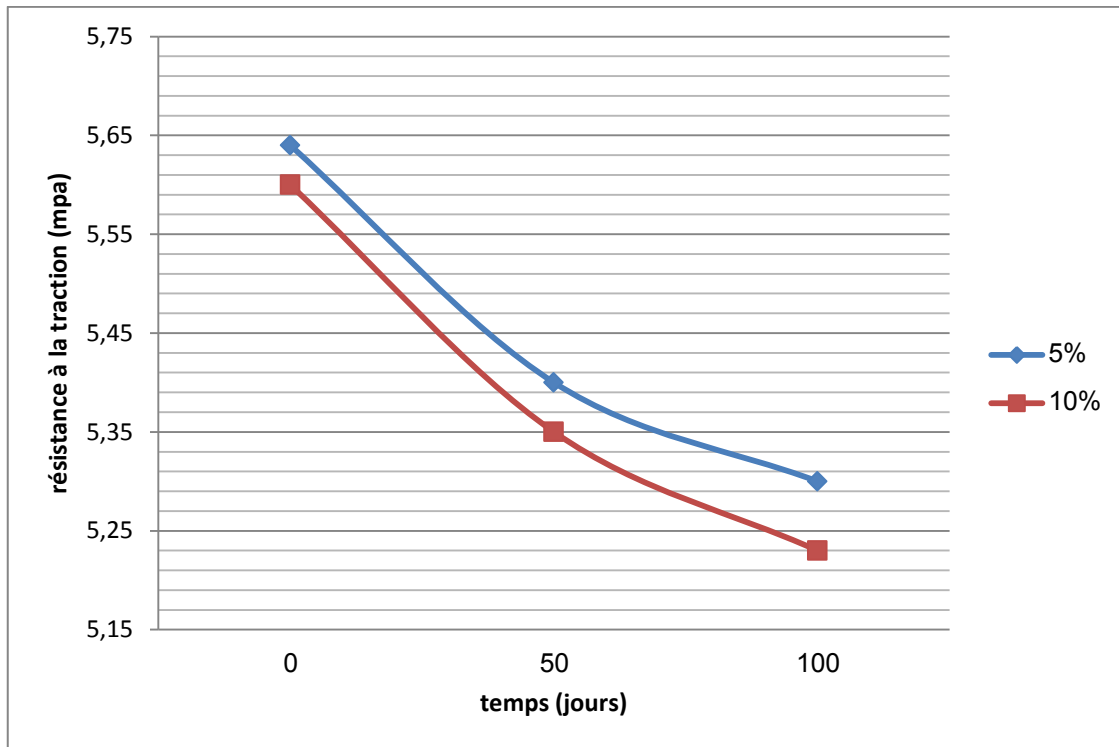


fig III.13 résistance à la traction (résistance à 60 jours)

on remarque que plus en augmente la concentration de l'acide sulfurique à 10% dans le milieu de conservation, plus la résistance à la traction diminue .

A 0 % de pourcentage de gravier roulé = 0.7 %

A 0 % de pourcentage de gravier roulé = 0.93 %

A 0 % de pourcentage de gravier roulé = 1.3 %

b / résistance à la traction : (résistance à 90 jours):

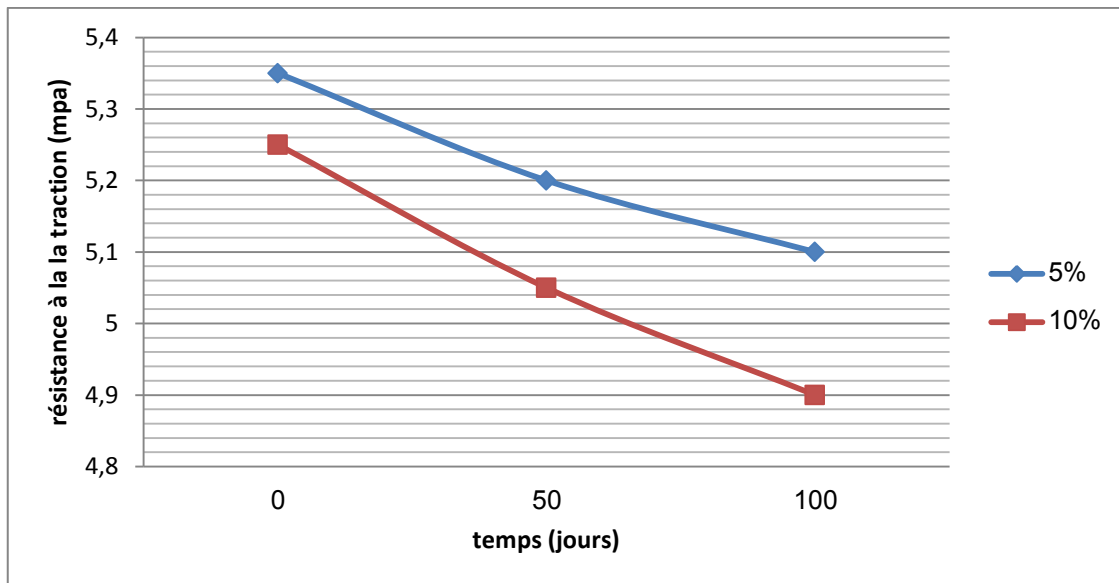


fig III.14 résistance à la traction (résistance à 90 jours)

pourcentage de réduction de la résistance :

A 0 % de pourcentage de gravier roulé = 1.9 %

A 50 % de pourcentage de gravier roulé = 2.97 %

A 100 % de pourcentage de gravier roulé = 4.08 %

l'augmentation de la concentration de l'acide sulfurique à 10% dans le milieu de conservation influe d'avantage sur la résistance à la traction qui diminue d'une façon plus importante .

Chapitre 04

Chapitre 04 : Conclusion générale

Conclusion générale :

Les résultats des essais vont nous permettre de générer un ensemble de données qui vont servir à valider le choix des classes granulaires spécifiques. Pour cela, la formulation de plusieurs mélanges de béton a été élaborée. L'étude c'est faite sur les caractéristiques des granulats, des classes granulaires et des bétons . A partir des résultats obtenus, nous vérifions l'influence des acides sulfurique avec différents pourcentages de concentration, sur nos mélanges de bétons, et nous vérifions l'influence de la qualité des graviers (roulés et concassés) et leurs résistances aux attaques acide.

Pour la Masse volumique des différentes mélanges Sur granulat on remarque que la masse volumique du mélange de gravier augmente en augmentant le pourcentage de gravier roulé.

Pour la Porosité des différentes mélanges Sur granulat on remarque que la porosité du mélange de gravier diminue en augmentant le pourcentage de gravier roulé.

Pour on remarque que l'introduction de gravier roulé dans le mélange de béton favorise la maniabilité du béton , et on remarque une augmentation de la masse volumique du béton frais en augmentant le pourcentage de gravier roulé .

Pour l'affaissement on remarque L'affaissement de nos mélanges de bétons est maintenue constante, on peut pas travailler sur plusieurs paramètres à la fois.

Pour le rapport E/C on remarque une diminution du rapport E/C pour le mélange **B3** avec **100 %** gravier roulé, l'absorption des graviers roulés est faible par rapport aux graviers concassés cela améliore le rapport E/C

Pour la masse volumique à l'état durci des bétons on remarque la masse volumique augmente avec le temps j'us qua 28 jours, avec l'immersion en milieu acide de nos éprouvettes remarque une diminution de la masse volumique à 60 jours et 90 jours, Avec de concentration de l'acid sulfurique (**5%**) on remarque aussi que le mélange **B3** avec **100%** de gravier concassé est plus affecté par l'attaque acide que les mélange contenant des graviers roulé .

Pour la masse volumique à l'état durci des bétons la masse volumique augmente avec le temps j'us qua 28 jours, avec l'immersion en milieu acide de nos éprouvettes remarque une diminution de la masse volumique à 60 jours et 90 jours, Avec de concentration de l'acide sulfurique (**10%**) on remarque aussi que le mélange **B1** avec **100%** de gravier concassé est plus affecté par l'attaque acide que les mélange contenant des graviers roulé .

Pour la résistance de la compression on remarque la résistance de la compression augmente avec le temps j'usqua 28 jours, avec l'immersion en milieu acide de nos éprouvettes on remarque une diminution de la résistance à 60 jours et 90 jours, Avec de concentration de l'acides sulfurique (**5%**) on remarque aussi que le mélange **B3** avec **100%** de gravier roulé est plus affecté par l'attaque acide que les mélange contenant des graviers concassé

Pour la résistance de la compression on remarque la résistance de la compression augmente avec le temps j'us qua 28 jours, avec l'immersion en milieu acide de nos éprouvettes remarque une diminution de la résistance à 60 jours et 90 jours, Avec de concentration de l'acide sulfurique

(10%) on remarque aussi que le mélange **B3** avec **100%** de gravier roulé est plus affecté par l'attaque acide que les mélange contenant des graviers concassé .

Pour la résistance de la traction on remarque la résistance de la traction augmente avec le temps j'us qua 28 jours, avec l'immersion en milieu acide de nos éprouvettes remarque une diminution de la résistance à 60 jours et 90 jours, Avec de concentration de l'acide sulfurique (**5%**) on remarque aussi que le mélange **B3** avec **100%** de gravier roulé est plus affecté par l'attaque acide que les mélange contenant des graviers concassé .

Pour la résistance de la traction on remarque la résistance de la traction augmente avec le temps j'us qua 28 jours, avec l'immersion en milieu acide de nos éprouvettes remarque une diminution de la résistance à 60 jours et 90 jours, Avec de concentration de l'acide sulfurique (**10%**) on remarque aussi que le mélange **B3** avec **100%** de gravier roulé est plus affecté par l'attaque acide que les mélange contenant des graviers concassé .

Pour la résistance de la compression à 60 jours on remarque que plus en augmente la concentration de l'acide sulfurique à **10%** dans le milieu de conservation résistance à la compression diminue .

Pour la résistance de la compression à 90 jours on remarque que plus en augmente la concentration de l'acide sulfurique à **10%** dans le milieu de conservation résistance à la compression diminue .

Pour la résistance de la traction à 60 jours on remarque que plus en augmente la concentration de l'acide sulfurique à **10%** dans le milieu de conservation, plus la résistance à la compression diminue .

Pour la résistance de la traction à 90 jours l'augmentation de la concentration de l'acide sulfurique à **10%** dans le milieu de conservation influe d'avantage sur la résistance à la compression qui diminue d'une façon plus importante .