

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

FACULTE : TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT : GENIE CIVIL
N° :.....



DOMAINE : GENIE CIVIL
FILLIERE : GENIE CIVIL
OPTION : MATERIAUX DE
CONSTRUCTION

Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique

Par : Benslimane Aymen Abdoumounim

Bellatreche Amir

Intitulé :

Etude expérimental de la perméabilité a l'eau
dans le béton comme indicateur de durabilité

Soutenu devant le jury composé de :

Pr : Naceri Abdelghani	Université de M'sila	Président
Pr : Bencheikh Mohamed	Université de M'sila	Rapporteur
Dr : Amriou Abderrachid	Université de B.B. Arréridj	Examineur

Année universitaire : 2020/2021

REMERCIEMENTS

Nous remercions avant tout notre dieu qui nous avoir donné la force, la volonté, le courage et la patience pour terminer ce travail de fin d'étude.

*Nous tenons à remercier notre encadreur Mr : **BENCHEIKH MOHAMED** pour leur soutien, leurs conseils judicieux et leur grande bien vaillance durant l'élaboration de ce travail.*

Nous remercions de tout notre cœurs nos très chers parents et tout notre familles pour leurs sacrifices, leurs encouragements, leur soutien jusqu'à ce que nous avons réalisé ce travail.

Nos remerciements vous aux membres de jury d'avoir accepté d'examiner, d'évaluer et d'enrichir ce travail.

Nous présentons nos sincères remerciements à tous nous enseignants de faculté et en particulier dans notre spécialité

Enfin, nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail. Merci à tous et à toutes.

RESUME

Le béton est l'un des matériaux les plus importants au monde pour la construction (bâtiments, ponts, barrage...), ce succès est dû à sa résistance, sa durabilité, sa participation à l'architecture par les formes, la bonne isolation thermique et phonique, en plus est un matériau économique.

Un bon béton c'est un béton qui doit résister au cours du temps aux diverses agressions ou sollicitations (physiques, mécaniques, chimiques...), un béton ne brûle pas, ne rouille pas, il résiste au feu, au vent, à l'eau, aux vibrations et aux attaques d'environnement.

Donc la durabilité des structures en béton est maintenant devenue un point important, c'est-à-dire c'est inutile de formuler un béton intrinsèquement résistant, si sa durabilité n'est pas conforme aux différentes agressions, il en résultera que l'ouvrage ne respectera pas sa durée à terme pendant sa durée de vie requise.

Le but de ce mémoire est une validation d'une méthode de contrôle expérimentale de la qualité de béton lorsqu'elle a un rôle d'étanchéité comme une piscine, qui nous permet de contrôler des différents bétons avec un indicateur majeur de durabilité, c'est à partir de l'essai de perméabilité à l'eau dans le béton qui représente la capacité du matériau poreux à être traversé par un fluide sous un gradient de pression.

Mots clés : Béton, Durabilité, Contrôle, Perméabilité

Abstract

Concrete is one of the most important materials in the world for the construction (buildings, bridges, dams...), This success is due to its resistance, its durability, its participation in the architecture by the forms, the good insulation thermal and sound, in addition is an economical material.

A good concrete is a concrete which must resist over time to various aggressions or stresses (physical, mechanical, chemical ...), a concrete does not burn, does not rust, it is resistant to fire, wind, water, vibrations and environmental attacks.

So the durability of concrete structures has now become an important point, that is to say it is useless to formulate an intrinsically resistant concrete, if its durability does not comply with the different aggressions, it will result that the the work will not meet its term during its required life.

The goal of this thesis is a validation of an experimental method of controlling the quality of concrete when it has a waterproofing role like a swimming pool, which allows us to control different concretes with a major indicator of durability, that is is from the test of water permeability in concrete which represents the capacity of the porous material to be crossed by a fluid under a pressure gradient.

Keywords :

Concrete, durability, Control, Permeability.

ملخص

تعتبر الخرسانة من أهم المواد في العالم للبناء (مباني، جسور، سدود...) ، ويعود هذا النجاح إلى مقاومتها ، وقوة تحملها ، وسهولة تشكيلها معماريا، وعزلها الحراري الجيد والصوتي. بالإضافة إلى أنها مادة اقتصادية.

الخرسانة الجيدة هي الخرسانة التي يجب أن تقاوم مع مرور الوقت العديد من الاعتداءات أو الضغوط (الفيزيائية والميكانيكية والكيميائية ...) ، خرسانة لا تحترق ولا تصدأ ، مقاومة للحريق والرياح والماء والاهتزازات و لعدوانية الظروف البيئية.

لذلك أصبحت متانة الهياكل الخرسانية الآن نقطة مهمة ، وهذا يعني أنه من غير المجدي صياغة خرسانة مقاومة جوهرياً ، إذا كانت متانتها لا تتوافق مع الاعتداءات المختلفة ، فسيؤدي ذلك إلى تلفها خلال حياتها المطلوبة.

الهدف من هذه الرسالة هو التحقق من صحة طريقة تجريبية للتحكم في جودة الخرسانة عندما يكون لها دور مانع لتسرب المياه مثل حوض السباحة ، الذي يسمح بمراقبة الخرسانات المختلفة بمؤشر رئيسي على المتانة ، من خلال اختبار نفاذية الماء في الخرسانة الذي يمثل قدرة المادة المسامية التي يمكن عبورها بواسطة ضغط السائل.

الكلمات المفتاحية:

الخرسانة، المتانة، المراقبة، النفاذية.

Sommaire

Remercîment	
Résumé.....	
Abstract	
ملخص.....	
Sommaire.....	
Liste des tableaux.....	
Liste des figures	
Problématique	

CHAPITRE I : Pathologies des Bétons

I Introduction	5
II Notions général sur la durabilité.....	5
III LES PATHOLOGIES DU BETON	6
III.1. Dégradations mécaniques :.....	6
Introduction :.....	6
III.1.1 Surcharges simples :.....	7
III.1.2. Interaction sol-structure :.....	7
III.1.3. Dommages dus au séisme :.....	8
III.2. Dégradations Chimiques :.....	9
III.2.1. La Corrosion :.....	9
III.2.2. Les attaques par les sulfates :.....	11
III.2.3. Action des chlorures :.....	12
III.2.4. Les Alkali-réactions (RAG) :.....	14
III.2.5. Lixiviation:.....	17
III.2.6. Carbonatation de béton:.....	18
III.3. Dégradation physique :.....	19
III.3.1. Action de gel-dégel :.....	19
III.3.2. Action thermique :.....	21
Conclusion	

CHAPITRE II : La perméabilité du béton.

Introduction :	25
----------------------	----

I	Durabilité :.....	26
II	Les structures poreuses des bétons :	26
III	Les indicateurs de durabilité :	28
III.1.	Les indicateurs de durabilité spécifiques :	28
III.1.1.	Indicateurs de durabilité spécifiques à l'alcali-réaction :.....	28
III.2.	Les indicateurs de durabilité généraux :.....	29
III.2.1.	La Perméabilité aux gaz :.....	29
III.2.2.	Perméabilité a l'eau :.....	32
III.2.3.	Porosité :	37
Conclusion		

CHAPITRE III : Caractérisation des matériaux

I	. Caractéristiques des matériaux utilisés:	41
I.1.	Le ciment:	41
I.2.	L'eau de gâchage :.....	42
I.3.	L'adjuvant :.....	42
I.4.	L'ajout :	43
I.5.	Sable :	44
I.6.	Graviers concassés :	54
Conclusion		

CHAPITRE IV : Résultat et discussion

I	Modélisation par plan d'expérience (théorie):	60
I.1.	Préparation des corps d'épreuve	60
I.2.	Confection des éprouvettes :.....	61
I.3.	Mode de cure.....	61
II	Résultat d'expérience :	65
II.1.	Analyse des résultats:	67
II.1.1.	Interprétations des résultats des diagrammes:	68
II.1.2.	Résultats du Diagramme de Pareto des effets:	68
B)	Le rapport E/C.....	Error! Bookmark not defined.
II.1.3.	Résultats des effets principaux:	69
II.1.4.	Diagramme des interactions des facteurs prise deux à deux :.....	70
Conclusion général		
Bibliographie		74

Liste des figures

Figure 0-1 : Cas de pathologies de corrosion au niveau de oued el Ham commune de Benyou3	
Figure III-1 : dégradations de béton arme [4].....	6
Figure III-2 : Exemples des dommages des éléments en Béton armé dues aux surcharges mécaniques [4].....	7
Figure III-3 : Dommages de la structure dus au sol gonflant [4].....	7
Figure III-4 : Dommages dus au tassement de sol [4]	8
Figure III-5 : Dommages de portique exposé au séisme [4]	8
Figure III-6 : Exemples de corrosion des structures en béton armé.	9
Figure III-7 : Schéma de la cinétique de corrosion.....	10
Figure III-8 : La formation de l'ettringite secondaire	12
Figure 0-1 : Exemple de l'attaque par l'acide sulfurique dosé à 5% pour un béton ordinaire durant quatre mois [7]	12
Figure 0-2 : Exemple d'une section de béton attaqué par RAS, photo extraite de AAR (2013).	15
Figure 0-3 : Exemple d'un faïençage dans un pont affecté par RAG, AAR (2013).....	16
Figure 0-4 : lixiviation [9]	17
Figure 0-5 : Progression de la carbonatation ..	
Figure 0-6 : phénomène de la carbonatation.[9]	
18	
Figure II-1 : description schématique d'un	27
Figure II-2 : Démarche scientifique adoptée pour l'évaluation de la durabilité associée aux processus de transport	27
Figure III-1 : la perméabilité aux gaz.....	30
Figure III-2 : Mesure de la perméabilité au gaz k selon la méthode CEMBUREAU [15]	31
Figure III-3 : Principe de fonctionnement des appareils de mesure de la perméabilité à l'eau [1].....	33
Figure III-4 : Perméabilimètre à trois cellules (Laboratoire du développement des Géomatériaux – université de Msila)	35
Figure III-5 : perméabilimètre permettant les tests de six éprouvettes	36
Figure III-6 : Relation entre la résistance à la compression et la porosité	37
Figure 0-1 : Répartition pyrométrique dans le béton	38
Produit par la cimenterie de LAFARGE	
Figure I-1: sace du ciment CRS....	41
Figure I-2 : Super plastifiant MEDAPLAST SP 40.....	42
Figure I-3 : Hydrofuge	43
Figure I-4 : Terre blanc	
Figure I-5 : La terre calcinée	
44	
Figure I-6 : Diagramme d'analyse granulométrique de Sable de dune.....	46
Figure I-7 : Diagramme d'analyse granulométrique de Sable concassé	47
Figure I-8 : diagramme d'analyse granulométrique de 40% Sable concassé et 60% sable de dune	48
Figure I-9 : Equivalent de sable au piston.....	50
Figure I-10 : Détermination de la masse volumique absolue d'un matériau.	53

Figure I-11 : Diagramme d'analyse granulométrique de Gravier 3/8	55
Figure I-12 : Diagramme d'analyse granulométrique du gravier 40% (8/16) et 60% (3/8).....	57
Figure I-13 : Masse volumique apparent du Gravier (3/8).....	57
Figure I-1: Eprouvette de l'essai.....	61
Figure I-2 : Les éprouvettes après le découpage à 5cm d'épaisseur.....	62
Figure II-1: Résultats du Diagramme de Pareto des effets.....	68
Figure II-2 : L'effet de chaque facteur pris individuellement	69
Figure II-3 : Diagramme des interactions des facteurs prise deux à deux	70

Liste des tableaux

Tableau I-1 : l'analyse granulométrique de Sable de dune	46
Tableau I-2 : l'analyse granulométrique de Sable concassé.....	47
Tableau I-3 : l'analyse granulométrique de 40% Sable concassé et 60% sable de dune	48
Tableau I-4 : Classes de propreté d' après les valeurs de l'équivalent de sable	49
Tableau I-5: Propreté de sable de dune étudié.....	50
Tableau I-6 : Propreté de sable concassé étudié	51
Tableau I-7: Les résultats de la masse volumique apparente	52
Tableau I-8 : Les résultats Masse volumique absolue du sable.....	54
Tableau I-9 : Analyse granulométrique du gravier 3/8	54
Tableau I-10 : Analyse granulométrique du gravier 8/16	55
Tableau I-11 : Diagramme d'analyse granulométrique du gravier 8/16.....	56
Tableau I-12 : Analyse granulométrique du gravier 40% (8/16) et 60% (3/8).....	56
Tableau I-13 : Résultat Masse volumique apparente du Gravier (8/16).....	57
Tableau I-14: Résultats de la Masse volumique Absolue du gravier.....	58
Tableau I-1 : Tableau de la formulation.....	63
Tableau I-2 : Tableau des masses	64
Tableau I-3: Résultats de formulation 1	65
Tableau I-4 : Résultats de formulation 2	65
Tableau I-5 : Résultats de formulation 3	65
Tableau I-6 : Résultats de formulation 4.....	66
Tableau I-7 : Résultats de formulation 5	66
Tableau I-8 : Résultats de formulation 6.....	66
Tableau I-9: Résultats de formulation 7	67
Tableau I-10: Résultats de formulation 8	67

Introduction

La durabilité est l'une des propriétés essentielles des matériaux et des éléments de construction.

Une mauvaise durabilité se manifeste par une détérioration qui résulte de facteurs externes ou de phénomènes internes aux bétons, ces différentes actions peuvent être de nature physique, chimique ou mécanique. Les attaques chimiques externes sont principalement causées par la présence d'ions agressifs tels que les chlorures, les sulfates et le gaz carbonique. Les causes physiques de détérioration comprennent principalement les effets d'une température élevée à ! L'exception des sollicitations mécaniques, tous les effets néfastes à la durabilité font intervenir l'écoulement de fluides (liquides ou gaz) à travers le béton. [1]

L'agressivité des milieux dans lesquels peuvent se trouver les ouvrages en béton est liée à la présence d'eau et à l'aptitude de celle-ci à réagir avec certains minéraux de la matrice cimentaire du béton. En effet, les agents agressifs dissous dans l'eau constituent une solution chimiquement agressive pour le béton qui peut provoquer plusieurs types de phénomènes lorsque la formulation du béton n'est pas optimisée. Parce qu'une bonne préparation des facteurs contrôlant la qualité du béton est d'une grande importance pour produire un béton résistant face aux ces agressions, comme le non-contrôle de la quantité d'eau de gâchage ou le non-respect de la formulation prescrit par les études de formulation s'ils existent constituent les principaux problèmes de dégradations de béton. [2]

Touts ces effets sont des sources de pathologie et de dégradation de béton, comme la pénétration d'agents agressifs qui peut conduire à l'amorçage (et au développement) du processus de corrosion des armatures, le cas des réactions chimiques internes, qui mettant en jeu des espèces issues du milieu environnant ou déjà présentes dans le matériau, telles que l'alcali-réaction ou les attaques sulfatiques, sources de gonflement et de fissuration du béton.

Le cycle gel-dégel qui entraîne gonflements et fissuration du béton par gel interne et un écaillage des surfaces exposées aux sels de déverglaçage.

Le concept de durabilité s'est donc placé au cœur de la recherche et le développement du béton, par mettre en évidence les indicateurs de durabilité : Ce sont des paramètres qui apparaissent comme fondamentaux dans l'évaluation et la prédiction de la durabilité du matériau et de la structure vis-à-vis du processus de dégradation considéré.

Ces paramètres doivent être facilement quantifiables à partir d'essais de laboratoires (effectués sur éprouvettes ou sur prélèvements). Deux catégories d'indicateurs de durabilité peuvent être définies :

- les indicateurs de durabilité généraux, valables pour les différentes agressions (la porosité accessible à l'eau ; le coefficient de diffusion (apparent ou effectif) des ions chlore ; la perméabilité aux gaz ; la perméabilité à l'eau liquide et la teneur en portlandite).
- les indicateurs de durabilité spécifiques à un processus de dégradation donné (par exemple l'alcali-réaction). [3]

Dans notre mémoire nous avons fait le choix de l'essai de perméabilité à l'eau comme indicateur de durabilité, qui définit comme l'aptitude du matériau à se laisser traverser par un fluide sous un gradient de pression.

Avec un objectif de modéliser cette méthode comme un essai de contrôle de durabilité de béton.

PROBLEMATIQUE

En Algérie, les structures en béton armé présentent des défis importants de durabilité (corrosion des armatures, réaction alcali-granulats, carbonatation, écaillage) qui réduisent la durée de vie utile des ouvrages. Afin de palier à cette dégradation précoce, des interventions plus importantes et plus fréquentes sont requises pour maintenir les ouvrages en service. Ces interventions impliquent non seulement des coûts financiers associés aux réparations, mais aussi des conséquences sociales liées à l'impact des chantiers sur les habitations environnantes et les réseaux routiers déjà encombrés.



Figure 0-1 : Cas de pathologies de corrosion au niveau de oued el Ham commune de Benyou

Chapitre I :

Les pathologies des constructions

I: Introduction

Le monde est confronté à de graves problèmes de durabilité, qui affectent un grand nombre de structures en béton armé. Ceci est dû à diverses pathologies causées par le vieillissement du béton au fil du temps, que ce soit des conditions chimiques, physiques ou mécaniques, qui vont l'affecter, ce qui comporte de grands risques.

Dans ce chapitre nous parlerons de ces pathologies le diagnostic et la durabilité des constructions sous l'effet des agents agressifs. Parce qu'un bon diagnostic nous amène à réduire des dépenses en décrivant les mécanismes qui entraînent les dégradations ainsi que d'établir des recommandations préventives et curatives pour l'ouvrage existant.

II: Notions général sur la durabilité

La durabilité est directement liée à l'environnement actuel ou futur de la structure, et est un paramètre important qui doit être pris en compte aujourd'hui pour améliorer la résistance du béton aux influences extérieures: intempéries, érosion du sol et atmosphère chimique agressive.

Pour assurer la durabilité de la structure, un ensemble de spécifications techniques doit être considéré, basé sur des méthodes d'essai directes ou indirectes, ainsi que l'expérience et des recommandations pour la mise en œuvre, la fabrication et la maintenance.

III: LES PATHOLOGIES DU BETON

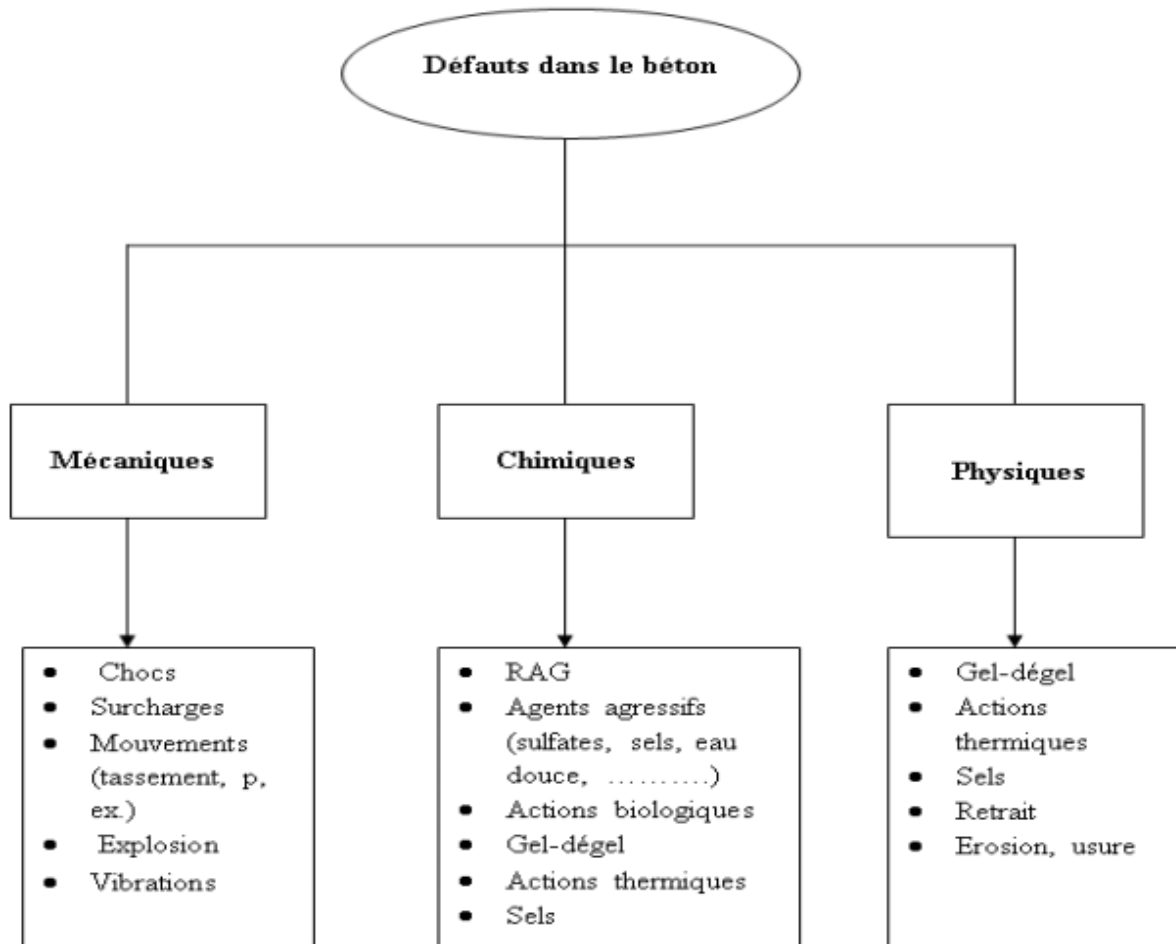


Figure III-1 : dégradations de béton arme [4]

III.1. Dégradations mécaniques :

Introduction : Les structures en béton armé sont calculées pour résister toutes les surcharges mécaniques usuelles ou accidentelles (poids propre, surcharge d'exploitation, séisme, poussée de sol, chocs ou explosions modéré). Malheureusement, on ne peut pas éliminer totalement l'apparition des dommages dus aux sollicitations mécaniques quel que soit la qualité de conception effectuée, à cause que les méthodes de calcul des constructions sont approchées. En outre, les sollicitations mécaniques ont des interactions avec d'autres sollicitation comme les conditions climatiques environnementales, interaction sol-structure et les actions imprévues. [4]

III.1.1 Surcharges simples :

Lorsque la contrainte admissible de la structure est dépassée, Des dommages sont apparues (fissures, failles, rotation, ...). Ci-dessous, nous citons quelques exemples de celles-ci :

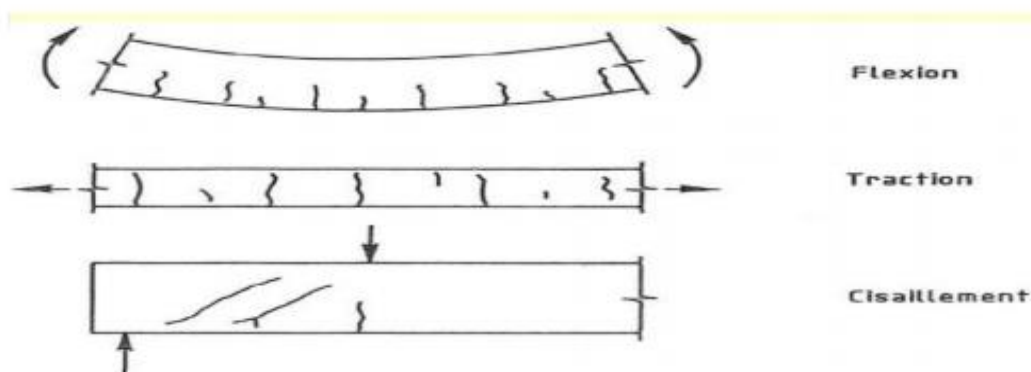


Figure III-2 : Exemples des dommages des éléments en Béton armé dues aux surcharges mécaniques [4]

III.1.2. Interaction sol-structure :

1) **Gonflement de sol** : La pose des constructions sur des sols d'argileux gonflants génèrent des problèmes de résistance et de stabilité de ceux derniers. Si le sol de fondation est en contact avec de l'eau, il se gonfle. Ensuite, il soulève l'ossature et le plancher comme montre l'exemple de la figure [4] :

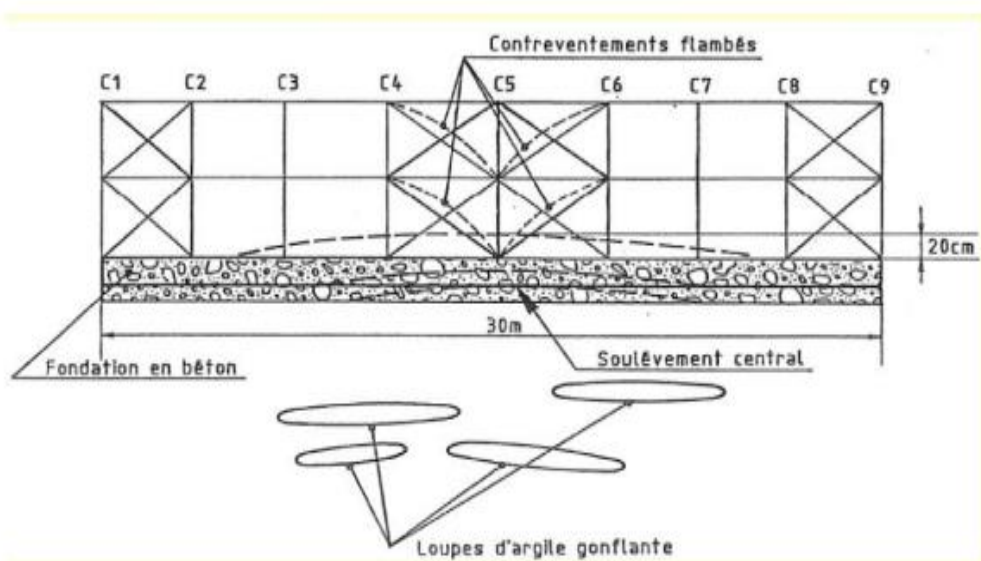
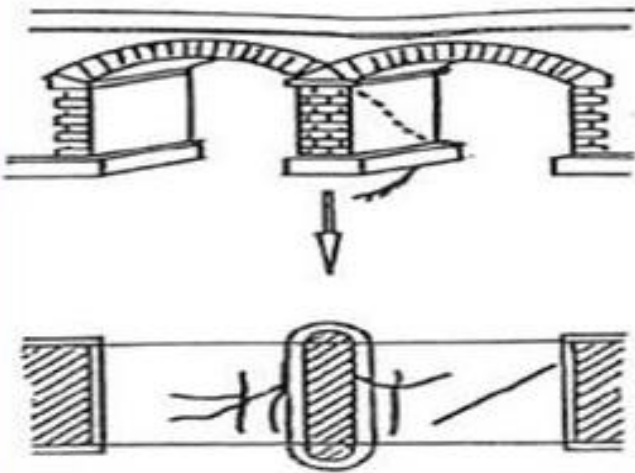


Figure III-3 : Dommages de la structure dus au sol gonflant [4].

2) Tassement de sol :



Le tassement de sol d'assise de pilier central du pont exerce des contraintes sur le pilier et le plancher et génère des fissures → Donc, Il y a un risque de rupture du pont si nous n'intervenons pas rapidement pour résoudre ce problème Figure-II.8.

Dommages dus au tassement de sol. [4]

Figure III-4 : Dommages dus au tassement de sol [4]

III.1.3. Dommages dus au séisme :

Exemple : endommagement d'un portique exposé aux secousses séismiques

Déformation de portique → Diagonales comprimés dans les remplissages.

→ Cisaillement des poteaux et des poutres → ruine fragile. [4]

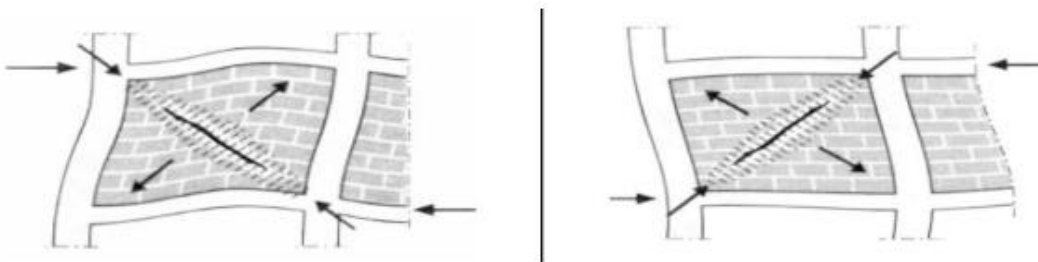
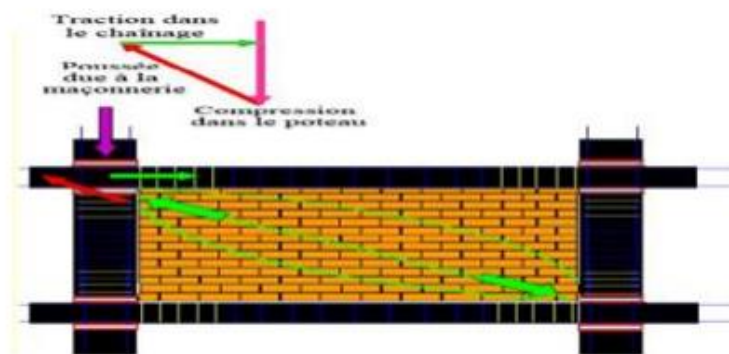


Figure III-5 : Dommages de portique exposé au séisme [4]

III.2. Dégradations Chimiques :

III.2.1. La Corrosion :

Une étude menée en Angleterre a montré qu'entre 1974 et 1978, la corrosion des armatures était la cause directe de l'effondrement d'au moins huit structures en béton. La corrosion se manifeste par une expansion, qui peut conduire à la formation de fissures, ce qui peut provoquer la séparation du revêtement de l'acier. Ci-dessous, nous montrons un exemple de structure en béton armé exposée à la corrosion.



Figure III-6 : Exemples de corrosion des structures en béton armé.

III.2.1.1. Les causes de la corrosion :

On distingue principalement deux facteurs favorisant l'apparition de la corrosion dans le béton armé. Tout d'abord, il y a la carbonatation du béton, lorsque le pH du béton descend en dessous de 9 les armatures ne sont plus passives. Ce phénomène est occasionné par la réaction entre les hydrates de la pâte de ciment et le CO₂ atmosphérique.

L'autre facteur étant les chlorures, le dé passivation s'opère lorsque la teneur en chlorures au niveau des armatures dépasse un certain seuil. Il est admis que ce seuil correspond à une teneur de 0,4% par rapport à la masse du ciment. [5]

III.2.1.2. Phases de la corrosion :

La durée de vie d'un ouvrage en béton armé vis-à-vis de la corrosion des aciers est souvent décrite à travers les étapes suivantes :

- Phase d'initiation (ou d'amorçage) : c'est le stade durant lequel les agents agressifs, tels que le dioxyde de carbone (CO₂) ou les chlorures (Cl⁻), présents dans le milieu environnant, pénètrent dans le béton.
- Phase de propagation: cette phase commence lorsque ces agents agressifs se trouvent à des concentrations fortes au niveau des armatures. Cette phase correspond à la croissance de la rouille, qui peut ensuite faire éclater le béton d'enrobage. Ainsi, pour décrire la corrosion des aciers dans les bétons, il convient de préciser, d'une part, la pénétration des agents agressifs dans le béton et, d'autre part, les conditions de dé passivation de ces armatures, puis la vitesse de dissolution du métal et la croissance de la rouille. L'observation de la dégradation d'un ouvrage en béton armé intervient souvent au cours de la phase de propagation, lorsque les destructions deviennent visibles, c'est-à-dire bien souvent tardivement. Il devient alors très lourd de réparer l'ouvrage et il convient donc de prévoir les effets à long terme de ces agressions.

Cette prévision est fondée sur la définition des investigations à effectuer. Elle doit permettre en particulier d'ajuster une formulation adéquate du béton et de définir les paramètres d'exécution de l'ouvrage en fonction de son environnement. [6]

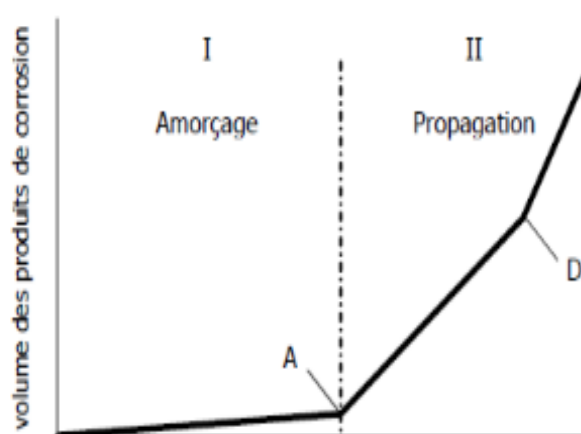


Figure III-7 : Schéma de la cinétique de corrosion des armatures dans le béton

III.2.1.3. Les conséquences de la corrosion :

La formation de la corrosion s'effectue aux dépens de métal d'origine. Ce phénomène entraîne à la fois une augmentation importante de volume ainsi qu'une perte de la section efficace de l'armature. Cela a pour conséquences d'une part l'apparition de différentes pathologies au niveau du parement suite à l'augmentation de volume, mais aussi une perte de capacité portante due à la diminution de la section efficace.

Ces pathologies peuvent être des fissures, des épaufures, des décollements ...ect. [5]

III.2.2. Les attaques par les sulfates :

Généralement, l'attaque par les sulfates peut détériorer fortement le béton dans une durée relativement courte. Les sulfates peuvent être d'origine naturelle, biologique ou provenir de pollution domestique et industrielle. On trouve les sulfates dans :

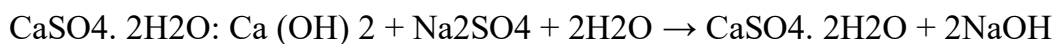
- Les eaux de mer, les eaux souterraines et les eaux industrielles,
- Les sols sous formes de Gypse (généralement entre 0.01 % et 0.05% exprimés en SO₄). De plus, les sols argileux peuvent aussi contenir des pyrites qui s'oxydent en sulfate.
- Les effluents des fours utilisant des combustibles riches en soufre,
- La décomposition des matières organiques dans les égouts génèrent des sulfures. Exemple des sulfates : NaSO₄, K₂SO₄, CaSO₄, MgSO₄, H₂SO₄, HCl

➤ Mécanismes de base :

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

- ✓ **Expansion** : formation de produits expansifs → cette expansion du béton peut causer des dommages structuraux importants.

Formation de Gypse secondaire :



Gypse secondaire $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ → Produit expansif se forme dans les espaces internes.

NaOH → alcalité élevée → stabilisation des C-S-H.

Formation d'ettringite secondaire :



$\text{C}_3\text{A} \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ → La précipitation rapide de l'ettringite conduit à la formation de cristaux très fins (ettringite non fibreuse de nature colloïdale) dont le volume molaire est de 3 à 8 fois supérieures au volume du solide initial.

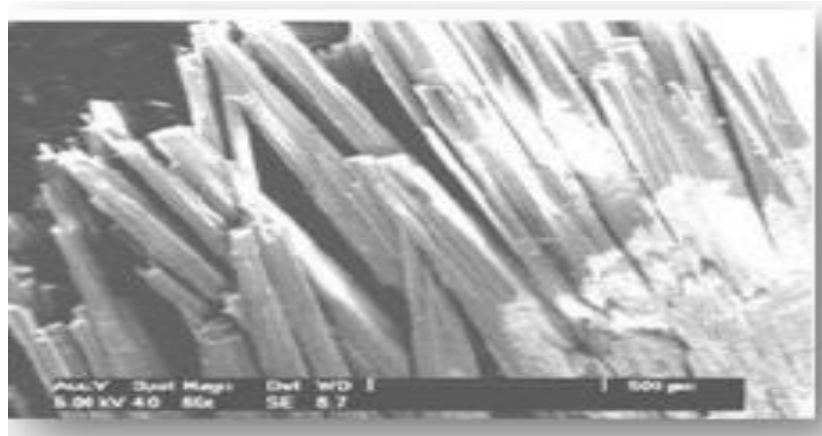


Figure III-8 : La formation de l'ettringite secondaire

Perte des propriétés liantes des C-S-H → action des sulfates engendre une perte de résistance et une perte de masse (voir la figure ci-dessous) du béton en surface. [7]



Figure 0-1 : Exemple de l'attaque par l'acide sulfurique dosé à 5% pour un béton ordinaire durant quatre mois [7]

III.2.3. Action des chlorures :

III.2.3.1. Généralités :

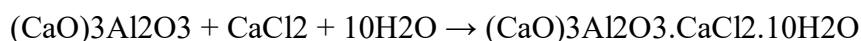
L'action de chlorures se limite généralement à des certaines constructions dans lesquels peut se trouve le béton. L'origine de ces chlorures peut être extérieure, comme l'eau de mer pour les ouvrages situés en milieu maritime, ou les sels utilisés pour le déverglaçage des routes. Également, ces chlorures peuvent aussi proviennent du milieu intérieur à partir des composants du béton (sable.... gravier... etc.) ou incorporées au moment du malaxage (adjuvants accélérateurs de prise, l'eau de gâchage...etc.).

Pour les structures maritimes, en milieu saturé où l'élément est totalement immergé, les chlorures pénètrent dans le béton par diffusion sous gradient de concentration. Dans le cas où l'élément se trouve dans un milieu saturé cycliquement (cycles d'humidification/séchage) grâce au marnage et aux embruns, le transfert de chlorures se fait par absorption capillaire et par convection due au mouvement de la phase liquide, François et al (2001). Ensuite par diffusion là où le degré de connectivité de la phase liquide le permet dans les zones partiellement saturée. Les recherches ont montré que la vitesse de propagation de chlorures par convection est plus rapide à celle de diffusion, François et al (1998) ont constaté que l'humidification d'un matériau sec avec une solution saline durant une journée peut faire pénétrer les chlorures plus profondément que ne le feraient plusieurs mois de diffusion en milieu saturé. [8]

Entre autres, les chlorures se trouvent au niveau de béton sous deux formes :

- Les chlorures libres : qui se trouve sous forme ionique soluble dans l'eau dans la solution interstitielle.

- Les chlorures totaux : qui regroupent outre de chlorures libres, tous les ions Cl interagissent avec les composés du béton (appelés chlorures liés) tel que ceux fixés par le C-S-H, et ceux réagissent chimiquement dans la matrice cimentaire avec certains composés comme l'aluminate tricalcique (C3A) pour former de nouveaux produits en particulier le chloroaluminates de calcium hydraté ou sel de Friedel, $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ selon les réactions suivantes :



La capacité d'un béton de fixer des ions chlorures dépend fortement de sa teneur en C3A et C4AF. Pour les bétons à base de CEMI qui présentent une teneur relativement élevée en $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$, beaucoup de chercheurs ont considéré que seuls les chlorures libres peuvent être diffusés et joués un rôle actif dans le processus de dé passivation.

III.2.3.2. Concentration critique en chlorures :

Contrairement à la corrosion par carbonatation, la corrosion par les chlorures ne prend place qu'à partir d'un certain seuil de concentration de Cl près des armatures dite seuil critique (C_{crit}). Cette valeur a fait le sujet des nombreuses études, mais la diversité des résultats et le nombre important des facteurs influençant la concentration critique ne permettent pas de

déterminer avec précision cette valeur. Toutefois, certains chercheurs ont exprimé cette valeur par la teneur en chlorures totaux par rapport au poids de ciment selon Hope et al (1987), Stoltzner et al (1997). Selon d'autres, seule la teneur en chlorures libres peut être prise en considération, Holden et al (1983), Hussain et al (1995).

Il existe d'autres travaux qui expriment cette valeur par le rapport des ions activant sur les ions passivant $[Cl^-] / [OH^-]$. Dans ce cas, il est souvent admis que le risque de corrosion devient réel à partir d'une valeur de 0.6, selon Hausman (1967), Goni et al (1990).

En revanche, ce seuil de concentration n'est pas fixe, il dépend de nombreux paramètres ;

- Internes : tels que les constituants du mélange (la teneur en C3A, le dosage et la nature du ciment et des additions), le rapport E/C, le degré d'hydratation, la microstructure du béton.

- Externes : la température, l'humidité relative, la teneur en oxygène. Selon Hussain et al (1995), plus la teneur en C3A augmente plus C_{crit} augmente, ce résultat a été confirmé par Franczy (1998) dont il a étudié le mécanisme de fixation de chlorures sur deux mortiers différents ayant la même teneur en ciment, il a constaté que le mortier qui a une teneur élevée en aluminates possède une capacité de fixation de 30% supérieure à celle de mortier de référence. La microstructure du béton et les propriétés de transfert rentrent aussi en jeu, où la migration des ions chlorures au sein du béton se fait à travers la structure poreuse. Encore, la concentration critique C_{crit} augmente lorsque le rapport E/C diminue. [8]

III.2.4. Les Alkali-réactions (RAG) :

III.2.4.1. Généralités :

Appelé aussi les réactions alcali-granulats, c'est une pathologie qui se caractérise par des réactions chimiques entre certains granulats réactifs du béton et les alcalins contenus dans le ciment (sodium et potassium). En fait, pour qu'une RAG se produise, trois facteurs essentiels doivent se réunir ;

- 1- Une concentration critique en alcalins : d'après Hobbs (1988), les alcalins ne deviennent nocifs qu'au-dessus d'une valeur de 4 kg/m³, une des sources principales d'alcalines est le ciment, plus précisément la dissolution des sulfates alcalins du clinker, leur teneur peut aller de 0.3 à 1.2%. Les adjuvants constituent aussi une source, Matsukawa (1991) a constaté que certains super-plastifiants peuvent accroître la teneur alcaline dans la solution interstitielle. De plus, le milieu extérieur peut aussi contribuer au démarrage et

au développement des réactions en fournissant les alcalins nécessaires, notamment l'eau de mer et les sels fondants.

- 2- La présence des granulats réactifs : l'activité des RAG dépend surtout de la réactivité des granulats, mais aussi de leur nature, leur dosage et leur composition minéralogique. En effet, certains granulats sont plus réactifs que d'autres, par exemple un granulats concassé présente plus de matière réactive qu'un granulats roulé.
 - 3- Une humidité relative importante : permettant le transport des alcalins vers les phases réactives. En fait, on considère qu'un alcali-réaction ne pourra pas endommager un béton à température ordinaire (20 °C) que si l'humidité relative moyenne est au-dessus d'une valeur seuil égale à 80-85 % Carles et al (2008). Comme le cas des ouvrages en contact avec l'eau notamment les murs de soutènement, les parois des tunnels, les barrages...etc.
- [8]

III.2.4.2. Les types des RAG :

Les RAG se présentent sous trois formes ;

1. Réaction alcali-silice : nommé RAS, c'est le cas le plus rencontré des RAG, elle se produit entre la silice amorphe, mal cristallisée qui se trouve libre dans les granulats siliceux (acide silicique ou dioxyde de silicium (SiO_2), et les alcalins (Na^+ , K^+) de la solution interstitielle. Cette réaction développe un gel de silice alcalin à l'intérieur et/ou autour de l'agrégat de caractère hygroscopique qui a la capacité d'absorber d'eau et de se gonfler. La poursuite de la réaction et d'absorption d'eau, augmente la pression interne au point où elle dépasse la 38 résistance à la traction du béton, qui génère en fin de compte, une fissuration sous forme de faïençage (fig. I-7) similaire à celle développée par RSI. En général, la RSI peut se produire après le coulage du béton de quelques années.

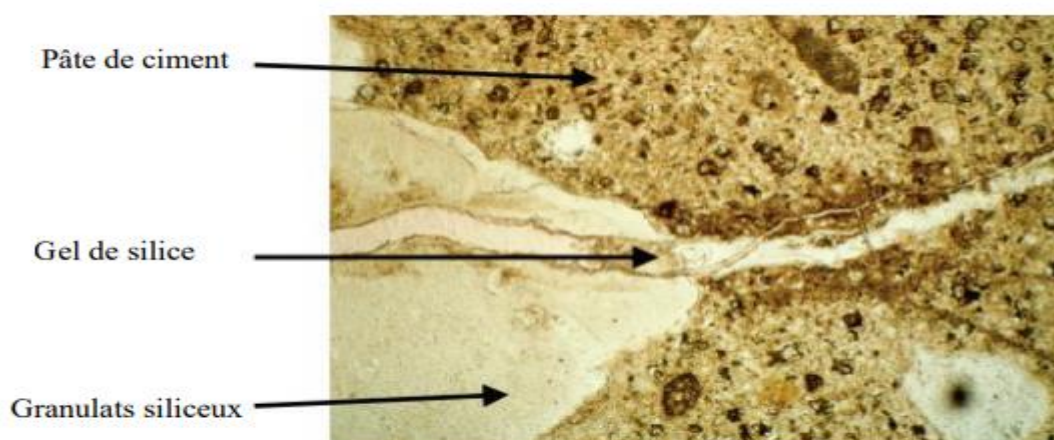


Figure 0-2 : Exemple d'une section de béton attaqué par RAS, photo extraite de AAR (2013).

2. Réaction alcali-silicate : le rythme de cette réaction est similaire au RAS, sauf dans ce cas les granulats réactifs sont des silicates variés à la place de silice (phyllo-silicates, tectosilicates...etc.). En général, ce type des réactions peut se produire après le coulage du béton de quelques décennies.
3. Réaction alcali-carbonate : c'est la réaction entre les granulats réactifs composés de dolomites et les alcalins (Na^+ , K^+ , OH^-) de la solution interstitielle. Pratiquement, très peu de cas ayant été recensés à ce sujet comparativement avec la réaction alcali-silice et la réaction alcali-carbonate.

III.2.4.3. Conséquence des RAG sur les structures en béton armé :

Les désordres macroscopiques les plus rencontrés dans les ouvrages atteints par la RAG sont principalement des réseaux des fissures irrégulières dont l'ouverture peut aller de quelques dixièmes de millimètre sous forme de faïençage, aux quelques millimètres (inférieure à 10 mm), avec une progression variable qui peut dépasser 1mm/an, Carles et al(2008).

Également, leur profondeur, qui Pâte de ciment Gel de silice Granulats siliceux³⁹ dépend aussi de l'état d'avancement des réactions, peut parfois atteindre les armatures.

Le faïençage développé par RAG est similaire à celui développé par RSI, la seule différence est la couleur blanchâtre provenant de l'exsudation du gel de silice qui ressort à la surface du béton à travers les fissures, sauf dans les structures en BA où la couleur des fissures devient brunâtre du fait de la corrosion des armatures (figure 11).



Figure 0-3 : Exemple d'un faïençage dans un pont affecté par RAG, AAR (2013)

Du point de vue mécanique, la résistance à la traction semble le plus affaiblie par RAG par rapport à la résistance à la compression, le module d'élasticité peut aussi subir des réductions importantes avant même l'apparition des produits expansives.

En outre, dans les éléments en BA, l'effet des armatures sur les bétons atteints par l'alcali-réaction est très visible, les performances mécaniques sont très peu touchées pour des carottes extraites de poutres en béton armé comparativement à celles extraites du béton non armé. Par ailleurs, l'application d'une charge sur des éléments en béton armé dès leur fabrication a tendance à prolonger leur vie de 50 à 60% comparativement avec des éléments non chargés, [8]

III.2.5. Lixiviation:

Dans une structure en béton exposée à l'air ambiant, l'eau ne s'évapore que sur une épaisseur limitée à quelques centimètres. Les pores sont saturés lorsque le béton est en contact de manière prolongée avec l'eau. Des ions en provenance du milieu extérieur peuvent alors transiter, dans la phase liquide interstitielle du béton. En fonction de la nature des éléments chimiques qui pénètrent dans le matériau, il peut en résulter des réactions chimiques de dissolution/précipitation et donc une lixiviation progressive des hydrates. Les eaux pures ou très peu chargées ont un grand pouvoir de dissolution, elles peuvent dissoudre les constituants calciques du béton (la portlandite notamment). Malgré la complexité des réactions chimiques générées par les eaux agressives, l'application de quelques principes de prévention élémentaires respectés au niveau de la formulation du béton (formulation adaptée, dosage en ciment adéquat, faible E/C, béton compact et peu perméable), de la conception de l'ouvrage et lors de sa réalisation (vibration, cure) permettent d'obtenir des bétons résistants durablement dans les milieux agressifs. [9]



Figure 0-4 : lixiviation [9]

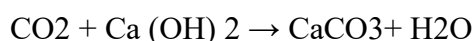
III.2.6. Carbonatation de béton:

Introduction :

La carbonatation est un phénomène de vieillissement naturel qui concerne tous les bétons. Elle correspond à une transformation progressive d'essentiellement un des composés du béton durci, la Portlandite, en calcite au contact du dioxyde de carbone contenu dans l'air et en présence d'humidité. Cette transformation s'accompagne d'une diminution du pH (le béton sain a un pH d'environ 13, ce qui constitue un milieu protecteur pour les armatures en acier et permet la formation d'une couche d'oxydes passifs. Une des conséquences principales de la carbonatation est de favoriser la corrosion des armatures, lorsque le front de carbonatation les atteint [11].

III.2.6.1. Processus de carbonatation :

Il correspond à la réaction du CO₂ avec tous les hydrates du ciment et plus particulièrement avec la chaux hydratée, généralement, on peut schématiser cette réaction de la manière suivante :



L'attaque commence à la surface et le CO₂ pénètre par diffusion dans la phase liquide. La carbonatation provoque une baisse du **pH** et la **dépassivation** de l'acier d'armature. En outre, la vitesse de celle-ci est maximale pour une humidité comprise entre 40% et 80%. Donc, pour un environnement sec, la quantité d'eau est insuffisante pour dissoudre le CO₂. On peut mesurer la profondeur de carbonatation par un essai de coloration à la phénolphtaléine (voir les figures ci-dessous).

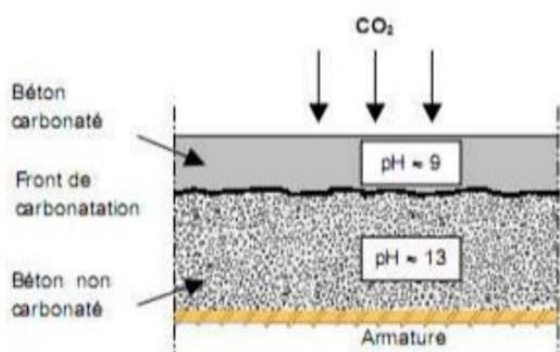


Figure 0-5 : Progression de la carbonatation



Figure 0-6 : phénomène de la carbonatation.[9]

La carbonatation est bénéfique si l'on se place du point de vue de la résistance mécanique et des propriétés de transfert du béton (diminution de la perméabilité et de la porosité) car la réaction se produit dans les pores et les capillaires avec une légère augmentation de volume (12%). Cependant, dans le cas des bétons armés, la réduction de la basicité du béton due à la réaction de carbonatation ne permet plus la stabilité de la couche passive de l'acier et la corrosion peut s'amorcer. De même, les hydrates stables en milieu basique, comme les chloroaluminates et l'étringite, sont susceptibles de voir leur stabilité déplacée, ce qui peut entraîner des modifications structurelles (suite à la libération de chlorures et de sulfates par exemple). [6]

III.2.6.2. Conséquences de la carbonatation:

- a) Béton Du point de vue du béton seul, on considère que la carbonatation a une conséquence bénéfique, en effet, la réduction de la porosité conduit à améliorer les résistances mécaniques et limite la pénétration d'agents agressifs. On parle d'un effet dit « Colmatage » des pores.
- La diminution de porosité associée à la carbonatation engendre une augmentation de résistance mécanique. La calcite consolide la microstructure, il est en effet bien connu que le carbonate de calcium est un excellent liant, ce qui assure l'essentiel de la résistance mécanique des mortiers de chaux
- b) Armatures L'hydroxyle de Calcium existe dans le béton augmente l'alcalinité de ce dernier, qui maintient un niveau de pH de 12-13 après l'attaque et la propagation des carbonates à l'intérieur du béton, forme du carbonate de calcium, à partir de cela la valeur du pH sera réduite à un niveau ($\text{pH} < 8$) ce qui provoque la corrosion des armatures. [10]

III.3. Dégradation physique :

III.3.1. Action de gel-dégel :

Il est généralement admis que l'accroissement de volume, de l'ordre de 9 %, accompagnant la transformation de l'eau en glace (le béton contient toujours de l'eau non combinée, une partie de cette eau gèle dès que la température descend de quelques degrés en dessous de 0 °C) n'est pas la seule cause de la dégradation du béton.

Dans la zone atteinte par le gel, des cristaux de glace se forment dans les plus gros capillaires, créant un déséquilibre thermodynamique qui va déclencher une migration de l'eau

des capillaires les plus fins vers les capillaires dans lesquels l'eau est gelée (l'eau dans les capillaires les plus fins restant à l'état liquide). C'est l'accroissement des pressions hydrauliques dans les capillaires, engendré par ces mouvements de l'eau interne non gelée vers les « fronts de congélation », ainsi que les pressions osmotiques créées par les différences de concentrations en sels dissous entre l'eau située à proximité de l'eau gelée et celle non gelée (présente dans les capillaires fins), qui est considéré aujourd'hui comme la cause principale des dégradations. Ces pressions (hydrauliques et osmotiques) peuvent localement fissurer la pâte de ciment, si elles sont supérieures à la résistance à la traction de la pâte. Ce sont les modifications répétées et alternées de température (température positive à température négative) qui après un certain nombre de cycles peuvent dégrader le béton.

Les dégradations sont le résultat d'un endommagement progressif. Elles dépendent de la vitesse de descente en température, du nombre de cycles et de la durée du gel. Les dégradations de gel interne ne se produisent pas lorsqu'il existe dans le béton un réseau de petites bulles d'air, dense et homogène, permettant le déplacement de l'eau ou lorsque la quantité d'eau gelable est suffisamment faible (c'est le cas de certains BHP qui ont une compacité très élevée). Pour empêcher l'apparition de pressions excessives dans le béton, il est possible de créer, grâce à un agent entraîneur d'air, un réseau de bulles qui doivent être nombreuses, de petites dimensions, bien réparties et suffisamment rapprochées. Le respect de la quantité d'air entraîné dans un béton n'est pas suffisant pour garantir sa résistance au gel, il faut créer un véritable réseau de bulles d'air. Leurs dimensions ne doivent pas dépasser quelques dizaines de microns. Leur espacement, qui détermine le niveau de pression, proportionnel au trajet parcouru par l'eau pour atteindre le front de gel le plus proche, doit être inférieur à une valeur seuil de l'ordre de quelques centaines de microns. Ce réseau de bulles va servir de « vases d'expansion » permettant les mouvements de l'eau et la formation de glace sans préjudice pour le matériau. L'agent entraîneur d'air a un double rôle: – maintenir dans le béton un pourcentage d'air de l'ordre de 3 à 8 % du volume de béton; – fractionner les bulles en de nombreuses petites bulles de faibles dimensions (créer le plus grand nombre de bulles de petites dimensions). L'utilisation d'un agent entraîneur d'air permet de stabiliser les bulles qui ont été créées au moment du malaxage, sous forme d'un réseau homogène et dense de petites bulles d'air. Un réseau efficace de bulles d'air est caractérisé par deux paramètres: – le volume d'air total exprimé en pourcentage du volume du béton (la mesure de ce paramètre est effectuée sur béton frais au moyen d'un aéromètre); – le facteur d'espacement des bulles d'air L (barre) qui correspond approximativement à la demidistance moyenne séparant les parois de deux bulles voisines, d'un réseau supposé

régulier. Il représente la distance moyenne que doit parcourir l'eau pour atteindre une bulle d'air. Il conditionne la tenue au gel des bétons formulés avec un agent entraîneur d'air, sa valeur doit être inférieure à des valeurs seuil. [11]

III.3.2. Action thermique :

L'action de la haute température sur les constructions en béton armé est une action désastreuse qui peut même arriver à une ruine totale de l'ouvrage. En somme, elle est liée à deux types essentiels de dégradation, l'écaillage et éclatement du béton et la perte de résistance mécanique.

III.3.2.1. Écaillage et éclatement du béton :

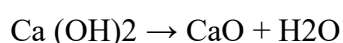
Le comportement du béton vis-à-vis à l'éclatement dépend de la sollicitation thermique. En fait, l'écaillage se produit généralement dans des températures comprises entre 190 °C et 350 °C, généralement, une élévation de la température entraîne une évaporation d'eau contenant dans le béton, d'abord l'eau dans les pores, ensuite l'eau dans les micropores, et l'eau liée dans les hydrates. Ce vapeur peut causer des contraintes de traction importantes, qui peut conduire à un détachement des morceaux de tailles différentes de béton dans des points singuliers comme les bords et les angles, et même à un éclatement explosif local au niveau de la surface exposée du béton. De plus, la pression induite par les dilatations différentielles des composants du béton peut aussi provoquer des fissurations internes qui peuvent propager jusqu'à la surface, et traduit par un écaillage. D'après Hertz (2003), les différents facteurs qui favorisent ces deux phénomènes sont :

- La faible perméabilité.
- Les sollicitations thermiques.
- Le taux d'humidité et d'eau libre dans le béton.
- Les dilatations thermiques empêchées.
- La montée rapide en température.

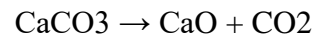
III.3.2.2. La perte des résistances mécaniques :

L'élévation de la température dans le béton entraîne une déshydratation des composés hydratés de la pâte de ciment durci. Schneider et al (1981) ont étudié les changements des différentes phases durant le chauffage du béton en fonction de la variation de température, cette étude révèle ;

- Une déshydratation de l'ettringite et des C-S-H au-delà de 100 °C
- Une décomposition de la portlandite à 500 °C par la réaction :



- Une transformation du quartz à 570 °C
- Une décomposition des C-S-H à 600 °C
- Une décarbonatation du calcaire due à la décomposition du carbonate de calcium au-delà de 800 °C suivant la réaction :



Ces changements dans les propriétés du béton peuvent conduire certainement à une perte massive des propriétés mécaniques, et par conséquent la ruine de la structure. [8]

.

Conclusion :

Dans ce chapitre on a fait la connaissance aux différents types de pathologies du béton qui influent direct sur la dégradation du béton au cours de temps. Cependant, les maladies où les dégradations d'une construction en béton armé se manifestent sous diverses formes (fissuration, écaillage, faïençage, éclatement du béton), elles peuvent survenir à n'importe quel moment (au moment de collage jusqu'à à long terme), tout cela conduit à des très grands dangers sur les gens.

Pour bien assurer la sécurité des biens et des personnes, un diagnostic est essentiel au moment de l'apparition de la première dégradation, d'ailleurs, c'est l'étape essentielle dans le processus d'entretien de la structure

Chapitre II :

La perméabilité du

béton

Introduction :

La durabilité est dans la plupart des cas liée à l'aptitude du matériau à résister à la pénétration d'agents agressifs. De plus, tout mécanisme de dégradation, même interne au béton, fait intervenir un processus de transport au moins d'eau, et éventuellement d'ions ou de gaz. [12]

Dans ce chapitre on discute sur les paramètres indicateurs de la durabilité du béton, principalement la porosité et la perméabilité à l'eau.

I: Durabilité :

Le béton, par sa nature, est un matériau relativement durable. Il est aujourd'hui le matériau le plus utilisé dans le domaine des travaux publics. Sa durabilité, définie par son aptitude à résister vis-à-vis des mécanismes divers susceptibles de le dégrader, représente un objectif de qualité primordial en génie civil. [13]

La durabilité désigne l'aptitude à conserver au cours du temps un niveau de performance suffisant. La durabilité sous-entend donc un objectif de qualité, orientant aussi bien la conception de l'ouvrage que celle du matériau et sa mise en œuvre.

La durabilité directement liée à l'environnement immédiat ou futur des ouvrages et partie d'ouvrage est aujourd'hui le paramètre important à considérer pour optimiser la résistance des bétons aux influences externes : intempéries, agressivité des sols, atmosphères chimiquement agressives. La durabilité d'un ouvrage dépend de nombreux paramètres dont la qualité de sa conception, la qualité des matériaux et des produits utilisés, la qualité des dispositions constructives, de la réalisation de l'ouvrage et de la mise en œuvre des produits ainsi que des diverses conditions d'usage, d'exploitation et de maintenance. [14]

Pour la construction d'une structure, seules les exigences de résistance et de comportement en service étaient prises en compte. Un béton performant ayant en principe un dosage correct en ciment et une bonne compacité, ces deux prescriptions pouvaient effectivement garantir une certaine durabilité du matériau béton. [14]

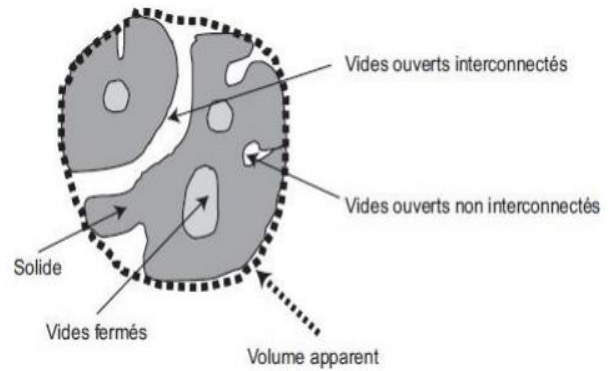
Pour s'assurer expérimentalement de sa durabilité, il faut vérifier comment il résiste vis-à-vis de certain nombre de mécanismes susceptibles de le dégrader tels que l'alcali-réaction, la corrosion des armatures, l'attaque sulfatique,... [13]

II: Les structures poreuses des bétons :

La durabilité du béton est ainsi intimement liée à ses capacités d'échanges avec le milieu l'extérieur qui sont conditionnées par la nature des phases en présence mais aussi par les caractéristiques de sa structure poreuse. [6]

Le béton est un matériau polyphasique. Il est composé d'une phase solide, d'une phase liquide et d'une phase gazeuse. Le solide est constitué des granulats, des hydrates et des parties du liant non hydratées. La phase liquide est la solution interstitielle et la phase gazeuse est un mélange d'air et de vapeur d'eau. [6]

Figure II-1 : description schématique d'un Matériau poreux [6]



Le béton étant un matériau composite associant une phase granulaire et une phase liante, sa structure poreuse dépend de l'arrangement granulaire et de la structuration de la phase liante. Concevoir un béton durable consistera donc à optimiser le squelette granulaire et à rechercher une phase liante dense. [6]

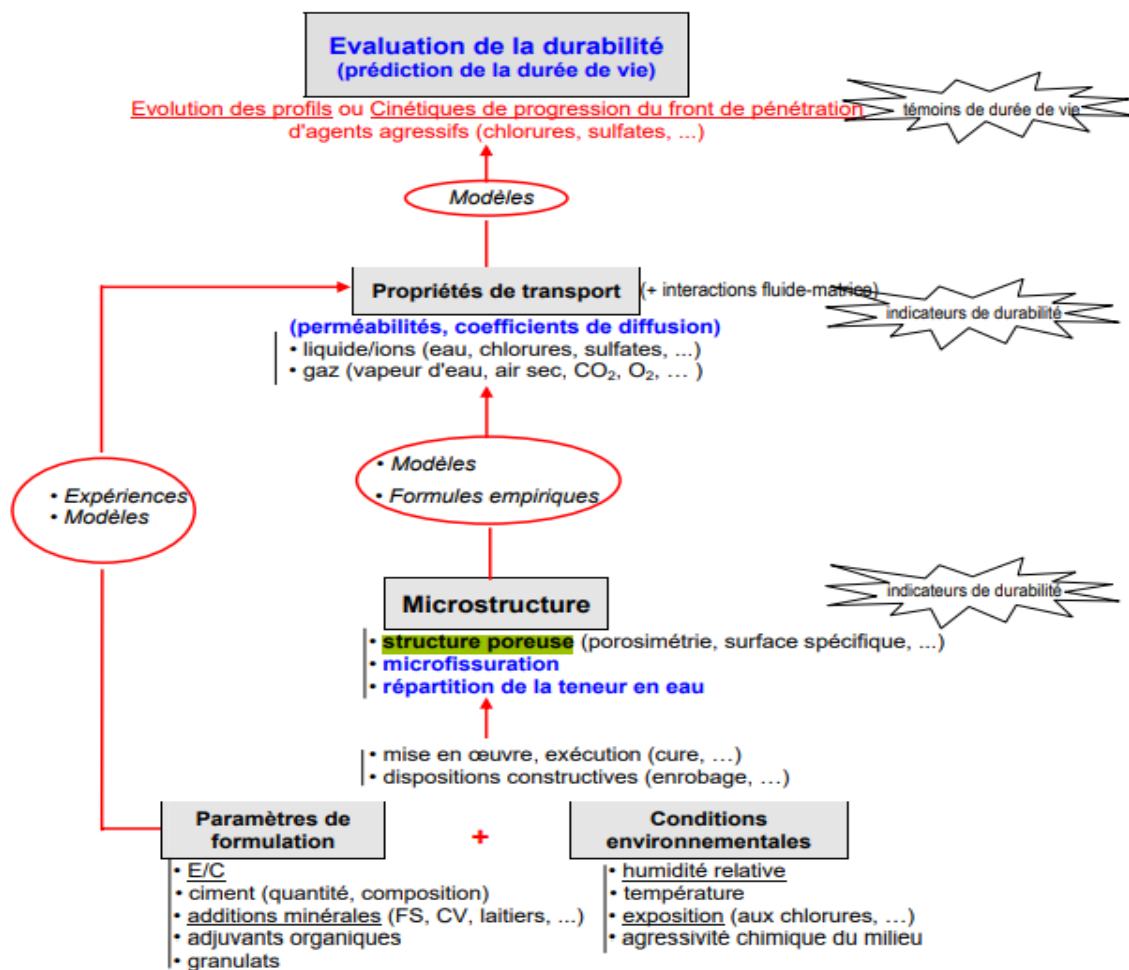


Figure II-2 : Démarche scientifique adoptée pour l'évaluation de la durabilité associée aux processus de transport

III: Les indicateurs de durabilité :

Il s'agit de paramètres relatifs au matériau constitutif, (béton), qui apparaissent comme fondamentaux pour l'évaluation et la prédiction de la durabilité du matériau et de la structure vis-à-vis d'un ou de plusieurs processus de dégradation. Ils interviennent par exemple dans les équations régissant les phénomènes et figurent parmi les données d'entrée des modèles de prédiction de la durée de vie. Cette première condition permet d'assurer leur pertinence théorique. Une seconde condition doit en outre être vérifiée : ces paramètres doivent être facilement quantifiables à partir d'essais de laboratoire pratiqués sur éprouvettes ou sur prélèvements, selon des modes opératoires bien définis et validés. Les méthodes d'essai doivent de plus présenter une reproductibilité, une précision, une simplicité et une rapidité adéquates. [15]

Deux catégories d'indicateurs de durabilité peuvent être définies :

- **les indicateurs de durabilité spécifiques** à un processus de dégradation donné (par exemple l'alcali-réaction.)
- **les indicateurs de durabilité généraux** (valables pour les différentes dégradations envisagées) ,

III.1. Les indicateurs de durabilité spécifiques :

Pour avoir une bonne estimation de la durabilité des ouvrages, il peut s'avérer nécessaire de compléter le panel d'indicateurs généraux par des indicateurs spécifiques [AFGC, 2004]. Selon la classe d'exposition des ouvrages (la pénétration de chlorures XS, la carbonatation des bétons XC, les attaques sulfatiques XA), un indicateur de durabilité spécifique est défini. Dans la plupart des cas, il s'agit d'un essai de dégradation accélérée. Par exemple, pour le cas de la prévention des dégradations dues à la carbonatation, un essai de carbonatation accélérée permet de mesurer une profondeur de carbonatation. [16]

III.1.1. Indicateurs de durabilité spécifiques à l'alcali-réaction :

Les indicateurs de durabilité généraux sont complétés le plus souvent par des indicateurs spécifiques au processus de dégradation auquel l'ouvrage sera exposé. Dans le cas de la prévention des dégradations dues à l'alcali-réaction, les indicateurs spécifiques retenus peuvent être classés en deux catégories qui sont les suivants:

- ❖ Indicateurs chimiques (relatifs aux constituants du béton) spécifiques à l'alcali réaction tels que la quantité de silice libérée par les granulats en fonction du temps (cinétique) et la concentration en alcalins équivalents ($\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$) actifs de la solution interstitielle ;
- ❖ Indicateur global et macroscopique (relatif au béton durci) spécifique à l'alcali réaction tels que la déformations de gonflement d'éprouvettes en béton ("essai de performance" d'une formule de béton vis-à-vis de l'alcali-réaction, faisant l'objet de la norme NF P 18-454).

III.2. Les indicateurs de durabilité généraux :

Les indicateurs de durabilité généraux, c'est-à-dire dans le cas du présent guide, les paramètres qui apparaissent fondamentaux, aussi bien vis-à-vis de la prévention de la corrosion des armatures que de l'alcali-réaction. [17]

Les indicateurs généraux utilisés dans ce chapitre sont des paramètres qui permettent d'évaluer la durabilité des bétons. Comme un béton d'enrobage fournit une barrière physique et une protection chimique (due à son alcalinité) aux armatures, les indicateurs de durabilité généraux sont destinés à évaluer ces barrières. Des essais de **perméabilité a l'eau**, de **perméabilité aux gaz**, **porosité accessible à l'eau**, **d'absorption d'eau par capillarité**, et de **diffusion des ions chlorure** caractérisent la barrière physique, tandis que la mesure de **la teneur en Portlandite** permet de quantifier la barrière chimique [16]

III.2.1. La Perméabilité aux gaz :

La perméabilité aux gaz est un indicateur de durabilité général majeur qui évalue la capacité du matériau vis-à-vis de la pénétration d'agents agressifs. [16]

La perméabilité au gaz constitue une propriété importante en ce qui concerne les matériaux cimentaires. Par exemple, dans le cas des réservoirs de gaz naturel ou dans les enceintes de confinement des centrales nucléaires. Les essais de perméabilité au gaz sont utilisés pour caractériser la perméabilité des matériaux réactifs avec l'eau (béton) ou dans le cas des bétons très faiblement perméables (béton à hautes performances) [1]

Pour un gaz qui pénètre dans un échantillon de béton de longueur L sous une pression P_1 à l'entrée, et qui s'échappe sous une pression P_2 à la sortie avec $P_2 < P_1$. Le flux de gaz Q est régi par l'équation de Darcy en y ajoutant un terme qui tient compte de la compressibilité des gaz. [1]

Dans le cas du déplacement du gaz dans le béton, on doit faire une distinction entre le cas où le gaz se déplace sous l'effet d'une pression différentielle. On parle alors de la perméabilité. Le deuxième cas concerne la situation où la pression est la température, dans ce cas les gaz se déplacent à travers le béton par diffusion. [6]

Théoriquement, le coefficient de perméabilité intrinsèque d'un béton doit être le même dans les deux cas, il est indépendamment du fait qu'on utilise un liquide ou un gaz pendant l'essai. Mais, les coefficients de perméabilité au gaz sont plus élevés que celles obtenues en utilisant l'eau en raison d'un phénomène de glissement du gaz par rapport à l'eau. [1]

La perméabilité à l'air (gaz) du béton est fortement influencée par son degré d'humidité ; c'est pour cette raison que l'état de l'échantillon doit être défini avant les tests. L'humidité du béton constitue un paramètre important de la mesure, car la solution interstitielle contenue dans les pores s'oppose au passage du gaz. Ainsi, le débit mesuré c'est-à-dire la perméabilité calculée dépend de l'état de saturation du béton. [1]

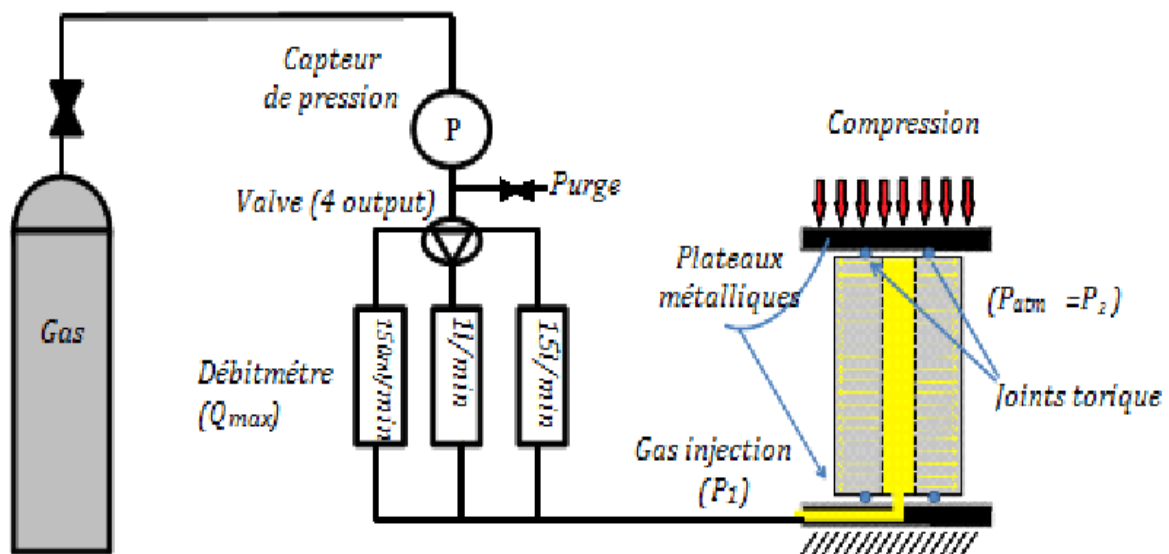


Figure III-1 : la perméabilité aux gaz

III.2.1.1. Mesure de la perméabilité aux gaz :

III.2.1.2. Méthode de mesure disponible :

La perméabilité aux gaz des bétons durcis peut être mesurée en laboratoire (sur éprouvettes ou

sur prélèvements issus d'ouvrages) après un séchage préalable en appliquant soit une charge constante, c'est-à-dire un gradient de pression constant (appareillage CEMBUREAU), soit une charge variable. La mesure au perméamètre à charge constante a fait l'objet de recommandations de la part de l'AFPC-AFREM, sous l'intitulé « Essai de perméabilité aux gaz du béton durci ». C'est donc cet essai qui sera décrit ici. [15]



Figure III-2 : Mesure de la perméabilité au gaz k selon la méthode CEMBUREAU [15]

III.2.1.3. Mesure au perméamètre à charge constante (CEMBUREAU) :

L'essai consiste à soumettre l'éprouvette en béton à un gradient de pression constant de gaz. La perméabilité (en m^2) est alors déterminée à partir de la mesure du flux (débit massique) de gaz traversant l'éprouvette en régime permanent, en appliquant la **loi de Darcy**.

Le résultat direct de la mesure est une perméabilité apparente, car il dépend de la nature du fluide et de la pression appliquée. Le gaz le plus couramment utilisé pour la mesure est l'oxygène, mais l'essai peut également être pratiqué avec tout autre gaz inerte vis-à-vis du béton tel que l'azote ou l'air sec (suivant l'alimentation en gaz choisie au niveau du dispositif expérimental).

Le mode opératoire recommandé par l'AFPC-AFREM préconise de réaliser l'essai à une surpression P relative = 0,1 MPa.

Toutefois, si l'on souhaite déterminer la perméabilité intrinsèque du matériau, c'est-à-dire une perméabilité indépendante de la pression du gaz, il est nécessaire de réaliser des mesures à différentes pressions, afin de pouvoir effectuer le calcul. L'appareil CEMBUREAU permet de réaliser des essais à une P relative comprise entre 0,1 et 0,5 MPa. On peut par ailleurs accéder directement à la perméabilité intrinsèque par une technique différente de l'appareil

CEMBUREAU, la technique d'impulsion de pression, y compris pour des matériaux faiblement perméables.

Avec l'appareil CEMBUREAU, il est possible de déterminer la perméabilité aux gaz sur une large gamme de bétons allant des matériaux très poreux de résistance moyenne 20-25 MPa ($K_{\text{gaz}} \approx 10^{-15} \text{ m}^2$), jusqu'aux bétons à très hautes performances contenant des fumées de silice, de résistance moyenne 120 MPa ($K_{\text{gaz}} \approx 10^{-19} \text{ m}^2$). Il est donc envisageable de comparer et de classer des formules de béton très différentes sur la base de ces mesures.

III.2.1.4. Pré-conditionnement des éprouvettes

Préalablement à la mesure de la perméabilité aux gaz par l'appareil CEMBUREAU, il est nécessaire d'une part, de sécher au moins partiellement l'éprouvette destinée à la mesure afin que le gaz puisse percoler à travers cette éprouvette et, d'autre part, de connaître le taux de saturation en eau moyen, ou mieux, la répartition de la teneur en eau, de l'éprouvette, correspondant à la perméabilité mesurée.

Il est possible de sécher les échantillons sous vide, par lyophilisation, ou encore par étuvage. [15]

III.2.2. Perméabilité a l'eau :

La perméabilité du béton est sa capacité d'être traversé par des fluides sous un gradient de pression. Les fissures interconnectées provoquent une augmentation de la perméabilité en facilitant la pénétration d'agent agressif. Ainsi, la durabilité du béton dépend largement de la facilité avec laquelle les fluides, à la fois liquide et gaz, peuvent pénétrer et se déplacer à l'intérieur du béton. [1]

La perméabilité est une propriété macroscopique pour les matériaux contenant des pores interconnectés. Le débit qui traverse le béton résulte des écoulements à travers les pores du matériau. Les bétons durables sont, en général, des bétons de faible perméabilité dans la mesure où cette faible perméabilité limite la pénétration des agents agressifs au sein du béton. [1]

Le coefficient de perméabilité d'un matériau K est défini par la relation de Darcy .Cette relation exprime le débit volumique Q du liquide de viscosité μ traversant une épaisseur dx du matériau de section A sous un gradient de pression dp . Cette relation suppose un régime d'écoulement permanent dans les pores du matériau. [1]

III.2.2.1. Perméabilité à l'eau du béton :

Il n'existe pas de procédure standardisée pour mesurer la perméabilité à l'eau du béton.

Chaque laboratoire possède sa propre procédure en utilisant des appareils différents. Malgré tout, presque toutes les procédures sont basées sur le même principe qui consiste à appliquer une pression hydraulique à une extrémité d'un échantillon cylindrique et à mesurer le débit de percolation en régime permanent

À partir du débit de percolation et des dimensions de l'échantillon, on peut déterminer le coefficient de perméabilité (K) selon la loi de DARCY. [1]

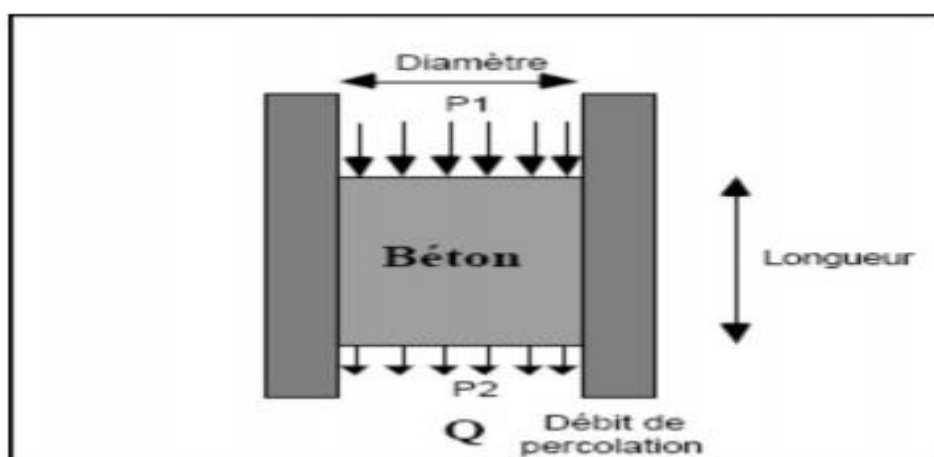


Figure III-3 : Principe de fonctionnement des appareils de mesure de la perméabilité à l'eau [1].

III.2.2.2. Mesure directe dans le cas des bétons perméables :

Dans le cas des bétons perméables et très perméables, la perméabilité à l'eau liquide peut être déterminée expérimentalement à partir d'un essai de perméabilité de l'eau sous pression. La mesure consiste à saturer en eau une éprouvette, à appliquer une pression d'eau progressivement croissante par paliers sur l'une de ses faces et à mesurer la quantité d'eau ayant traversé l'éprouvette (lorsque le flux est constant) en fonction de la valeur et de la durée des différents paliers. On notera que différents dispositifs expérimentaux existent et qu'aucun mode opératoire recommandé par l'ensemble de la communauté scientifique n'a pour l'instant été publié. On peut toutefois se baser pour réaliser l'essai sur des modalités proches de celles définies par la norme NF P 18-855 relative aux produits spéciaux pour constructions en béton. [15]

III.2.2.3. Méthodes applicables dans le cas des bétons faiblement perméables :

Dans le cas des bétons faiblement et très faiblement perméables (bétons ordinaires de bonne qualité et bétons à hautes et à très hautes performances), la mesure directe de la perméabilité à l'eau liquide avec un perméamètre courant, telle que décrite précédemment, est délicate et difficile à effectuer. En effet, tout d'abord la saturation préalable de l'éprouvette peut s'avérer difficile et une forte pression d'eau liquide est nécessaire pour obtenir des débits mesurables. De plus, pour les bétons très compacts, la valeur escomptée pour la perméabilité à l'eau liquide peut être inférieure à 10^{-21} m². Or les perméamètres courants permettent d'exercer des différences de pression allant seulement jusqu'à 10 MPa. De ce fait, pour un ordre de grandeur de 10^{-21} m² de la perméabilité, une épaisseur d'éprouvette de l'ordre de 5 cm et une saturation complète, la loi de Darcy prévoit une vitesse de filtration de l'ordre du cm/an.

- **Appareil de mesure de la perméabilité à l'eau du béton**

La littérature propose plusieurs types de perméamètres, tout valables selon les auteurs, mais chacun possédant leur propre mode de fonctionnement et leurs propres limites et utilise une forme d'échantillon spéciale. [1]

Selon les études de Jensen en 1988, il existe trois principaux modes permettant de mesurer la perméabilité à l'eau des bétons :

- ✓ La mesure de l'écoulement à travers un béton saturé
- ✓ La mesure de la pénétration d'eau dans le béton
- ✓ L'étude de la chute d'une pression appliquée sur une éprouvette de béton.

III.2.2.4. Appareillages existant au niveau du laboratoire développement des Géomatériaux - l'université de M'Sila- (Algérie)

Le laboratoire du développement des Géomatériaux de l'Université de M'Sila dispose de deux appareils permettant de réaliser les essais de perméabilité à l'eau du béton. Dans ces appareils, l'eau s'écoule sous pression constante à travers des échantillons de béton et le coefficient de perméabilité est déterminé en appliquant la loi de Darcy. [1]

1- Perméamètre à trois (3) cellules :

Cet appareil permet de porter trois éprouvettes. Les trois cellules en verre de capacité 1 l d'eau chacune, permettent la lecture du débit d'eau écoulé. La fixation des éprouvettes est assurée par serrage de boulons sur le dispositif de maintien des échantillons.



Figure III-4 : Perméabilimètre à trois cellules (Laboratoire du développement des Géomatériaux – université de Msila)

2- Perméamètre à six (6) cellules :

Le dispositif d'essai ci-dessous permet de porter six échantillons de béton à la fois. La lecture du débit d'eau écoulé pour chaque éprouvette est assurée sur des cellules (six cellules) en verre de 1.5 l d'eau de capacité chacune. Le maintien des éprouvettes est assuré par un système de serrage manuel.

Les éprouvettes qui peuvent être utilisés sont des cylindres de diamètre 160 mm et de hauteur variable. La technique expérimentale est basée sur l'écoulement de l'eau, c'est-à-dire l'eau traverse l'éprouvette en béton sous l'effet d'une pression appliquée. [1]

Les composants de l'appareil sont :

- Six emplacements pour la mise en place des éprouvettes avec un système de fixation.
- Des joints en silicone en haut et en bas.
- Un régulateur de pression.
- Six cellules graduées de capacité 1500 ml pour la mise en place de l'eau et la lecture du débit d'eau écoulée.

- Compresseur d'air automatique de capacité de 10 bars.
- Perméabilimètre permettant les tests de six éprouvettes



Figure III-5 : perméabilimètre permettant les tests de six éprouvettes

III.2.2.5. Loi de DARCY :

La perméabilité quantifie l'aptitude d'un matériau à se laisser traverser par un fluide sous gradient de pression totale. La vitesse de filtration v (en $m.s^{-1}$) d'un fluide régie par la loi de Darcy s'écrit en conditions non saturées, en négligeant les effets de gravité et les effets dynamiques selon : [17]

$$\vec{v} = -\frac{K}{\eta} \cdot k_r(S) \cdot \vec{\nabla}p$$

où ∇p : gradient de pression auquel est soumis l'échantillon de matériau,

$k_r(S)$: perméabilité relative au fluide qui est fonction du taux de saturation en eau,

η : viscosité dynamique du fluide,

K : perméabilité intrinsèque du matériau, théoriquement indépendante des phases saturantes.

La perméabilité apparente ($K.k_r(S)/\eta$) dépend donc des caractéristiques du fluide, du réseau poreux du matériau (distribution des volumes poreux, connectivité, ...) et également de l'état hydrique de l'éprouvette ou de la structure considérée. La perméabilité dépend également de

l'état de (micro)fissuration, bien que la corrélation entre ces deux paramètres ne soit pas clairement établie. L'écoulement est grandement influencé par la taille (ou ouverture) des vides (pores et fissures) et par leur connectivité, ainsi que par la rugosité des fissures. Si le réseau n'est pas connecté, la perméabilité est quasiment nulle. Au-delà du seuil de percolation et en présence de fissures, la perméabilité peut augmenter de plusieurs ordres de grandeurs.

Lorsque les transferts de fluide dans le béton sont susceptibles d'avoir lieu sous forme gazeuse et liquide, il est important de quantifier à la fois la perméabilité apparente aux gaz et celle aux liquides (notamment à l'eau)

III.2.3. La porosité :

La porosité est le premier facteur qui apparaît comme fondamental dans la caractérisation des bétons. Il est important de limiter la porosité car elle affecte la durabilité des ouvrages et peut conduire à une perte de capacité structurale en influençant la résistance en compression et d'autres propriétés du béton. [16]

La résistance à la compression du béton dépend grandement du volume des vides qu'il comporte. La porosité définie comme étant le volume total de l'ensemble des vides exprimé en pourcentage du volume global de la pâte de ciment hydraté. Elle est l'un des facteurs principaux influant la résistance à la compression de la pâte de ciment [4]. La figure I.23 représente une relation linéaire entre la résistance et la porosité pour des valeurs de porosité de 5 à 28 %. Les vides pris en compte sont supérieurs à ceux des vides de gel (diamètre supérieur à 20 nm). L'effet des vides de diamètre inférieur à 20 nm est négligeable. D'après cette figure, on peut voir qu'une diminution des pores entraîne une augmentation de la résistance. [1]

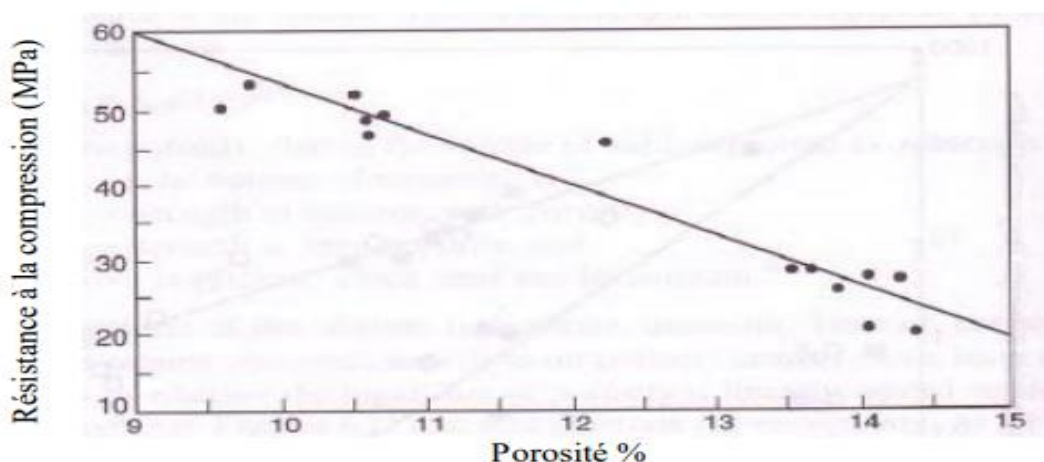


Figure III-6 : Relation entre la résistance à la compression et la porosité

La porosité volumique totale ϕ d'un matériau est définie par :

$$\phi = \frac{V_p}{V_T} \times 100 \quad \text{avec} \quad V_T = V_p + V_s$$

Où V_T : volume total d'un échantillon de matériau,

V_p : volume poreux de l'échantillon,

V_s : volume solide de l'échantillon

La porosité diminue au cours du temps avec la progression de l'hydratation du ciment. Les paramètres de transfert comme la diffusivité ou la perméabilité dépendent largement de la porosité. Cependant, deux bétons peuvent avoir, pour une même porosité, des diffusivités ou des perméabilités différentes. En effet, la proportion volumique des vides dans un matériau n'est pas un critère suffisant pour caractériser les propriétés de transfert des bétons. Deux autres paramètres sont à considérer : [16]

- La distribution de la taille des pores,
- La connectivité et la tortuosité des réseaux poreux.

D'une manière générale, tous les phénomènes de transfert dépendent de la taille des pores.

L'ensemble des pores est constitué :

- Des pores capillaires : ($0,01 \mu\text{m} < \phi \text{ pore} < 5,00 \mu\text{m}$) vestiges des espaces intergranulaires de la pâte fraîche. Ils sont directement liés au rapport E/C et à l'hydratation.
- Les pores des hydrates désignent les espaces inter-feuillets ou les pores de gel : ($\phi \text{ pore} < 40 \text{ \AA}$) qui sont associés à la formation des hydrates et qui, au contraire de la famille précédente, dépendent faiblement du rapport E/C.

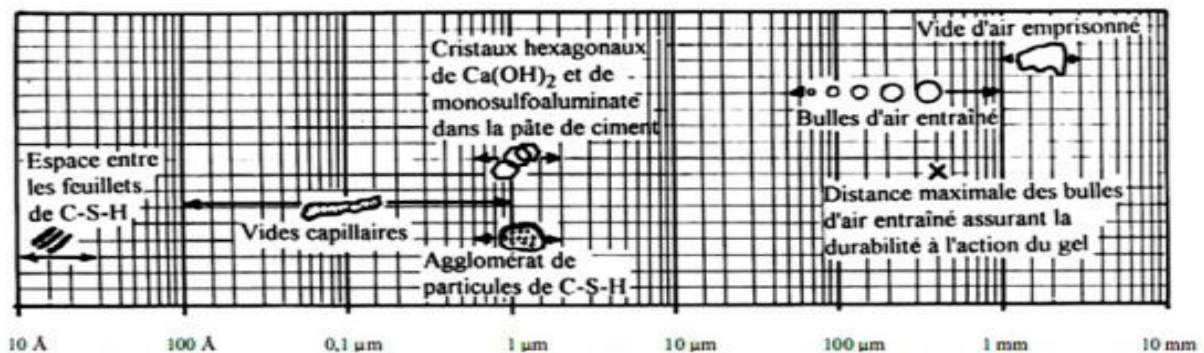


Figure 0-1 : Répartition pyrométrique dans le béton

Les propriétés de transfert des matériaux ne dépendent pas que de la valeur de la porosité globale et de la taille de pores, mais, ils dépendent aussi de la connectivité et de la tortuosité des pores. Distingue trois catégories de familles de pores en caractérisant l'interconnexion du réseau : [16]

- Les pores interconnectés qui forment un espace continu dans le milieu poreux et qui ont un impact majeur sur les propriétés de transport du matériau,
 - Les pores isolés (ou occlus) qui constituent la porosité fermée et ne communiquent pas avec le milieu ou extérieur,
 - Les pores aveugles (ou bras morts) et qui sont connectés uniquement par une voie accessible à un fluide extérieur et qui ne participent pas au transport.
- [16]

Conclusion :

Les structures et ouvrages en béton armé sont soumis, dès leur plus jeune âge, à des contraintes d'ordre mécanique ou environnementales. Leur comportement vis-à-vis de la durabilité est essentiellement lié au comportement particulier du matériau béton. En effet, celui-ci réagit sans cesse avec l'environnement.

La durée de vie est alors devenue à la fois une exigence et un souci, il convient de l'assurer par une conception et une mise en œuvre adéquates, de la quantifier, de la restaurer ou de la prolonger. Les maîtres d'ouvrages ont donc le souci de connaître l'état du patrimoine existant afin de s'assurer de sa stabilité dans le temps, tout en étudiant les désordres qui peuvent survenir essentiellement des phénomènes de corrosion des armatures afin de mieux maintenir, diagnostiquer et réparer ces désordres. [17]

Chapitre III :

Essais et

Caractérisation des

matériaux

I. . Caractéristiques des matériaux utilisés:

Ce chapitre s'intéresse plus particulièrement à l'identification et la caractérisation des matériaux exploités dans notre étude; le sable de dune, le ciment et eau de gâchage. La caractérisation est faite d'un point de vue physique (la masse volumique apparente et absolue, l'analyse granulométrie et, la propreté, etc.).

Ces connaissances permettraient de bien connaître les différents paramètres qui vont influencer les propriétés physiques et mécaniques du mélange contenant ces matériaux. Les essais d'identification des matériaux utilisés ont été réalisés au sein du laboratoire de Génie civil.

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 Mokaouem de la cimenterie Lafarge de Hammam Dhalàa.
- L'eau potable du Laboratoire du développement des Géo matériaux – université de Msila
- Adjuvant super plastifiant MEDAPLAST SP 40
- Adjuvant hydrofuge SIKA.
- Terre blanche de la région BOUKHMISSA.

I.1. Le ciment:

Le ciment utilisé dans ce travail est un ciment composé de type NA 442 – CEM classe de résistance 42.5, est un ciment gris résistant aux sulfates, résultat de la mouture d'un clinker contenant un faible taux d'aluminates de calcium avec une proportion de gypse inférieure à celle d'un ciment portland composé.

Produit par la cimenterie de LAFARGE



Figure I-1: sac du ciment CRS

I.2. L'eau de gâchage :

L'eau utilisée pour le gâchage des bétons est l'eau du robinet du laboratoire (laboratoire de génie civil de Msila) d'un PH de 8.5.

I.3. L'adjuvant :

1) Super plastifiant :

L'adjuvant utilisé est un super plastifiant haut réducteur d'eau dit MEDAPLAST SP 40 sa plage d'utilisation est fixée par la fiche technique :

Aspect.....Liquide

- CouleurMarron
- PH..... 8,2
- Densité..... $1,20 \pm 0,01$
- Teneur en chlore< 1g/L
- Extrait sec40%

Dosage:

Plage de dosage recommandée : 0,6% à 2,5% du poids de ciment soit 0,5L à 2L pour 100 kg de ciment Le dosage optimal doit être déterminé sur chantier en fonction du type de béton et des effets recherchés.



Figure I-2 : Super plastifiant MEDAPLAST SP 40.

2) Hydrofuge :

- Aspect.....Liquide
- Couleur blanc laiteux
- Densité..... 1,20 ± 0,01
- Teneur en chlore< 0,1 %
- Extrait sec40%

Dosage :

Plage d'utilisation recommandée 0,7 à 2 % du poids du ciment (soit 0,68 à 1,96 L pour 100 kg de ciment)



Figure I-3 : Hydrofuge

I.4. L'ajout :

L'ajout utilisé est un terre blanche se forme des roches de la région BOUKHMISSE, les roches broyer dans laboratoire de Géo Matériaux de université M'sila et tamiser avec tamis 0.63, avec une calcination au four a 850°.



Figure I-4 : Terre blanc



Figure I-5 : La terre calcinée

I.5. Sable :

Origine du sable :

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

➤ Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique par tamisage (Norme NFP 94-056) [17] permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant les échantillons. Elle s'applique à tous les granulats de dimension nominale inférieure ou égale à 63 mm, à l'exclusion des fillers (dimension nominale inférieure ou égale à 0.080 mm). L'essai consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série de tamis, emboîtés les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas.

Le matériau étudié est placé en partie supérieure des tamis et l'opération de tamisage des grains s'obtiennent par vibration de la colonne de tamis par l'intermédiaire d'une tamiseuse électrique. Dans notre étude, nous avons utilisé les tamis de modules 20 (0.080 mm), 23 (0.160 mm), 26 (0.315 mm), 39 (0.630 mm), 32 (1.25 mm), 35 (2.50 mm) et 38 (5 mm).

Les tableaux présentent les résultats de l'analyse granulométrique de sable de dune SD , sable concassé SC et les combinaisons de les deux .

• Principe d'essai:

L'essai consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série de tamis, emboîtés les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. Le matériau étudié est placé en partie supérieure des tamis et les classements des grains s'obtiennent par vibration de la colonne des tamis, pendant cinq minutes pour le sable et sept minutes pour le gravier puis on prélève les différents refus de chaque tamis et on les pèse.

Les résultats des analyses granulométriques :

- **Mode opératoire :**
- Monter la colonne de tamis dans l'ordre décroissant de l'ouverture des mailles en ajoutant le couvercle et le fond
- Verser le matériau sec dans la colonne de tamis
- Agiter mécaniquement cette colonne
- Reprendre un à un les tamis en commençant par celui qui a la plus grande ouverture, en adaptant un fond et un couvercle
- Agiter manuellement chaque tamis jusqu'à ce que le refus du tamis ne varie pas de plus de 1% en masse par minute de tamisage
- Verser le tamisât recueilli dans le fond sur le tamis immédiatement inférieur
- Déterminer ainsi la masse du refus de chaque tamis
- Suivre l'opération jusqu'à déterminer la masse du refus contenu dans le fond de la colonne de tamis
- Vérifier la validité de l'analyse granulométrique imposée par la Norme NF EN 933-1 (différence entre la somme des masses de refus et de tamisas et de la masse initiale...).

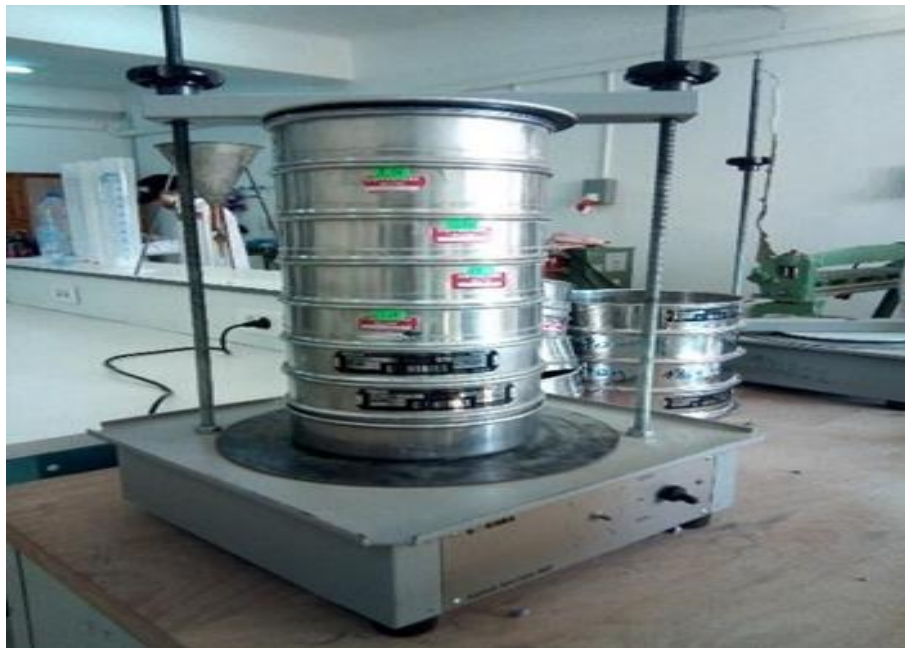


Figure VI 5: les tamis

1) **Sable de dune :**

Tamis (mm)	Poids des tamis vide (g)	Poids des tamis + sable	refus du sable	Refus cumulés	Refus cumulés %	Tamisât cumulés %
5	0.626	0.626	0.002	0.002	0.13	99.13
2.5	0.595	0.712	0.117	0.119	7.93	98.74
1.25	0.505	0.567	0.062	0.181	12.06	89.47
0.63	0.500	0.555	0.05	0.231	15.4	61.73
0.315	0.477	1.172	0.695	0.926	61.73	15.4
0.160	0.280	0.691	0.411	1.337	89.13	12.06
0.08	0.278	0.418	0.14	1.477	98.47	7.93
Fond	0.453	0.463	0.01	1.487	99.13	0.13

Tableau I-1 : l'analyse granulométrique de Sable de dune

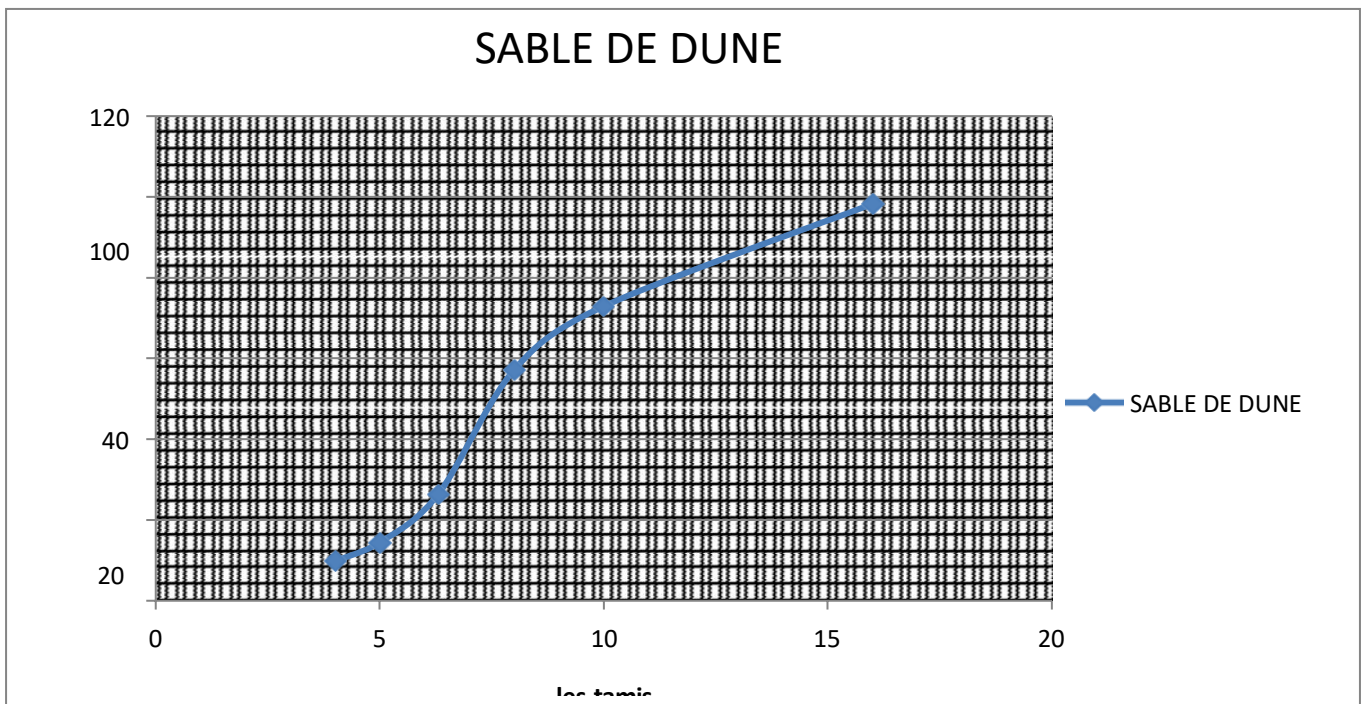


Figure I-6 : Diagramme d'analyse granulométrique de Sable de dune

2) **Sable concasse :**

Tamis (mm)	Poids des tamis vide (g)	Poids des tamis+sable	refus du sable	Refus cumulés	Refus cumulés %	Tamisât cumulés %
5	0.623	0.627	0.004	0.004	0.266	99.73
2.5	0.596	0.718	0.122	0.126	8.4	91.6
1.25	0.507	1.443	0.936	1.062	70.8	29.2
0.63	0.500	0.662	0.162	1.224	81.6	18.4
0.315	0.470	0.648	0.178	1.402	93.46	6.54
0.160	0.281	0.345	0.064	1.466	97.73	2.27
0.08	0.276	0.305	0.029	1.495	99.6	0.4
Fond	0.454	0.459	0.005	1.500	100	0

Tableau I-2 : l'analyse granulométrique de Sable concassé

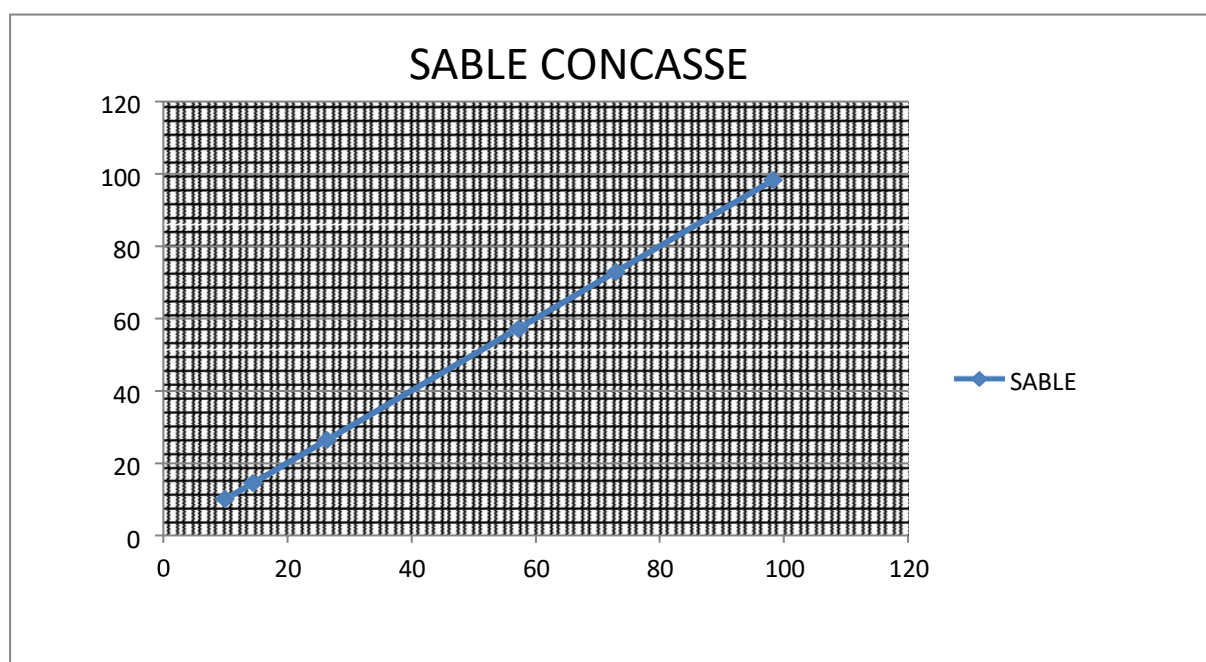


Figure I-7 : Diagramme d'analyse granulométrique de Sable concassé

3) Combinaison de 60% sable de dune et 40% concassé :

Tamis (mm)	Poids des tamis vide (g)	Poids des tamis+sable	refus du sable	Refus cumulés	Refus cumulés %	Tamisât cumulés %
5	0.623	0.627	0.004	0.004	0.266	99.734
2.5	0.596	0.700	0.104	0.108	7.2	92.8
1.25	0.507	0.787	0.28	0.388	25.86	74.14
0.63	0.500	0.728	0.228	0.616	41.06	58.94
0.315	0.470	0.987	0.517	1.133	75.53	24.47
0.160	0.281	0.544	0.263	1.396	93.06	6.94
0.08	0.276	0.370	0.094	1.490	99.33	0.67
Fond	0.454	0.460	0.006	1.496	99.73	0.27

Tableau I-3 : l'analyse granulométrique de 40%Sable concassé et 60% sable de dune

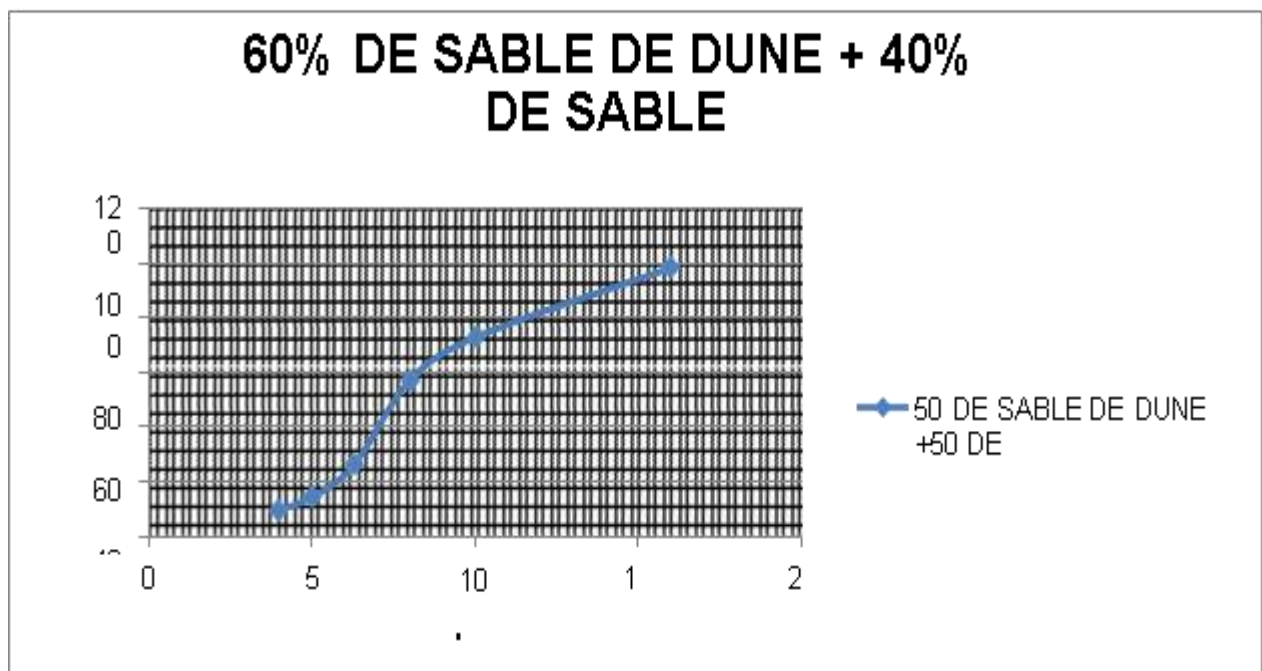


Figure I-8 : diagramme d'analyse granulométrique de 40%Sable concassé et 60% sable de dune

➤ **Propreté des sables :**

La propreté d'un sable peut être appréciée par l'intermédiaire d'un essai appelé « équivalent de sable » [21] (Norme NF EN 933-8). Cet essai consiste à donner une indication sur l'importance des impuretés (argile, poussière, matière organique, etc.) contenues dans les sables. Ces impuretés influent négativement sur l'adhérence entre les grains de sable et le ciment, ce qui conduit à chuter la résistance mécanique des bétons et des mortiers.

Selon la méthode de mesure, l'équivalent de sable est désigné par ESV pour l'équivalent de sable à vue et par ESP pour l'équivalent de sable au piston.

$$E. S. V = (H_2 / H_1) \times 100 \%$$

H₂ : hauteur de sable propre déterminée visuellement

$$E. S. P = (H'_2 / H_1) \times 100 \%$$

H₁ : hauteur de sable propre + hauteur imputées

H'₂ : hauteur de sable propre déterminée au Piston

<i><u>ESV</u> a vue (%)</i>	<i>ES au piston (%)</i>	<i>Qualité du sable</i>
<i><u>ESV</u> < 65</i>	<i>ES < 60</i>	<i>Sable argileux : à ne pas utiliser.</i>
<i>65 ≤ <u>ESV</u> < 75</i>	<i>60 ≤ ES < 70</i>	<i>Sable légèrement argileux : admissible pour bétons courants avec risque de retrait important.</i>
<i>75 ≤ <u>ESV</u> < 85</i>	<i>70 ≤ ES < 80</i>	<i>Sable propre : convient bien pour les bétons de haute qualité.</i>
<i><u>ESV</u> ≥ 85</i>	<i>ES ≥ 80</i>	<i>Sable très propre : absence presque totale de fines argileuses.</i>

Tableau I-4 : Classes de propreté d' après les valeurs de l'équivalent de sable

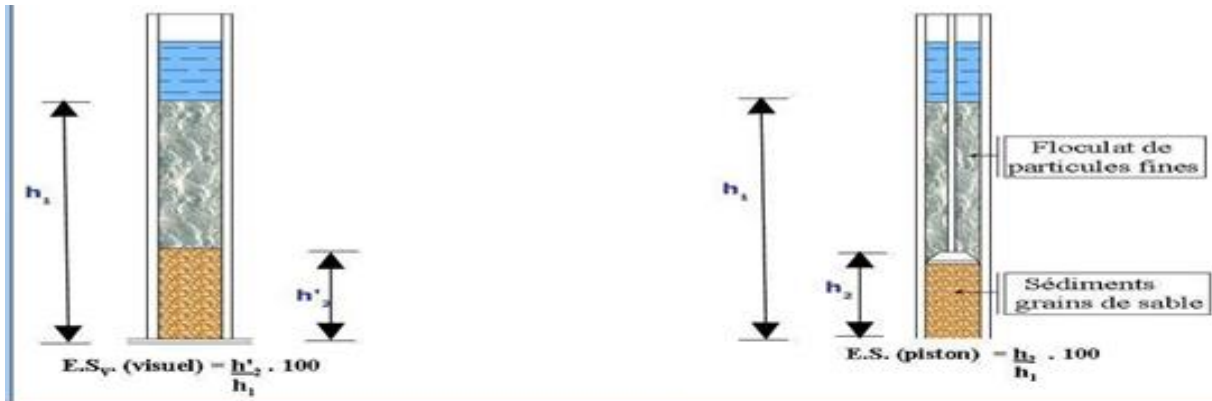


Figure I-9 : Equivalent de sable au piston

Les valeurs de l'équivalent de sable obtenues sont résumées dans le tableau.

- **Sable de dune (m =120g)**

	H1 (cm)	H2 (cm)	H'2 (cm)	ESV %	ESP%
Essai 1	10.8	8.8	8.5	79.62	78.70
Essai 2	10.6	8.6	8.2	77.35	77.35
Essai 3	10.2	8.3	8.1	79.41	76.85

Tableau I-5: Propreté de sable de dune étudié.

(ESV) moy = 78.79%

(ESP) moy = 77.63%

- **Sable concassé (m=120g)**

	H1 (cm)	H2 (cm)	H'2 (cm)	ESV%	ESP%
Essai 1	12.8	8.8	7.8	68.75	60.33
Essai 2	12.7	8.9	8	70.07	62.99
Essai 3	13.1	9.3	8.2	70.99	62.59

Tableau I-6 : Propreté de sable concassé étudié

(ESV) moy = 69.93%

(ESP) moy = 62.17%

Résultats :

-Le sable de dune étudié donne un équivalent de sable à vue supérieur à 75%, et celui au piston supérieur à 70%, ce qui confirme que ce sable est un Sable propre convient bien pour les bétons de haute qualité.

-Le sable concassé donne un équivalent de sable à vue supérieur à 65%, et celui au piston supérieur à 60%, ce qui confirme que ce sable est un Sable légèrement argileux de propriété admissible pour les bétons courants avec risque de retrait important .

Module de finesse

Le module de finesse d'un sable est égal au centième de la somme des refus, exprimés en pourcentages sur les différents tamis.

Le module de finesse est plus particulièrement appliqué aux sables dont il est une caractéristique importante. Un module de finesse est d'autant plus faible que le granulat est riche en éléments fins.

Le module de finesse (MF) est une facture très importante qui nous permet de juger la qualité du sable, $MF_{SD} = 3.87$ $MF_{SC} = 5.52$

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:

Les deux types du sable, sable de dune est sable concassé sont des sables gros.

➤ Masse volumique apparente: (NF EN 1097 - 6 (2001))

Le But :

Déterminer les masses volumiques apparentes du matériau, c'est - à- dire sa densité à l'état naturel (en présence des pores).

Matérielle Utilise :

- Balance technique avec une précision de 1 g.
- Un récipient de 1 L.
- Un entonnoir.
- Une petite règle plate métallique

Mode opératoire :

- peser le récipient de 1 L de volume vide : soit M2.
- Remplir le récipient par l'entonnoir avec une distance de chute de 15 cm.
- Araser la couche supérieure de récipient à l'aide d'une règle.
- Peser le récipient plein : soit M2.

La masse volumique apparente est déterminée par la formule suivante :

$$\rho \text{ (kg/L)} = (M2 - M1)/V$$

Où :

V : Volume du récipient.

M1 : Le poids du récipient à l'état vide.

M2 : Le poids du récipient plein de sable.

RESULTAT:

Matériaux	Sable de dune (m=60g)				Sable concassé (m=60g)	
M1 (kg)	0.115	0.115	0.115	0.115	0.115	0.115
M2 (kg)	1.408	1.423	1.418	1.354	1.364	1.367
M2-M1	1.293	1.308	1.303	1.239	1.249	1.252
ρ_{app} (kg/m³)	1436	1453.3	1447.77	1376.77	1387.77	1391.11
ρ_{app} (kg/m³)	1454.59			1385.2		

Tableau I-7: Les résultats de la masse volumique apparente

➤ Masse volumique Absolue (NF EN 1097 - 6 (2001))

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

Mode opératoire : (Méthode de l'éprouvette graduée)

1. Cette méthode est très simple et très rapide. Elle utilise du matériel très courant de laboratoire. Toutefois sa précision n'est faible.
2. Remplir une éprouvette graduée avec un volume V_1 d'eau.
3. Peser un échantillon sec M de granulats et l'introduire dans l'éprouvette en prenant soin d'éliminer toutes les bulles d'air.
4. Le liquide monte dans l'éprouvette. Lire le nouveau volume V_2 .
5. La masse volumique est donnée par la relation :

$$\gamma = M / V_2 - V_1$$

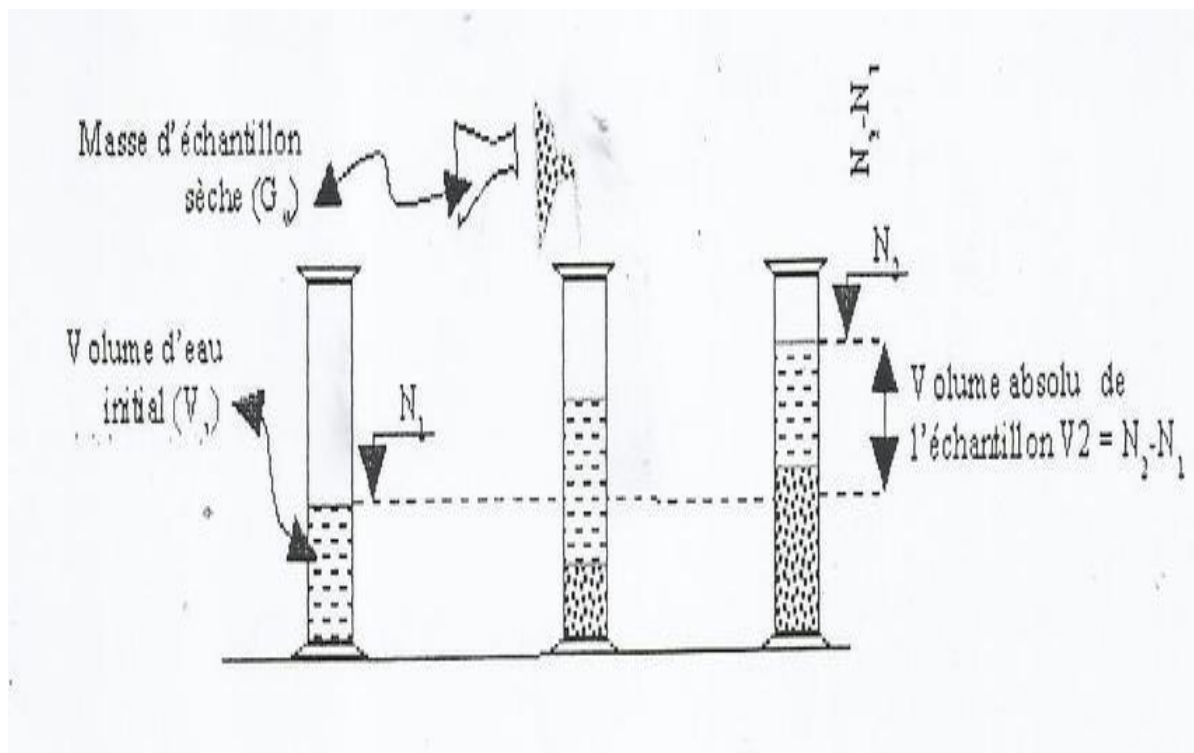


Figure I-10 : Détermination de la masse volumique absolue d'un matériau.

RESULTAT:

Matériau x	Sable de dune (m=0.1kg)				Sable concassé (m=0.1kg)	
V1(ml)	300	300	300	300	300	300
V2(ml)	340	340	340	337	340	342
V2-V1	40	40	40	37	40	42
M	0.1kg			0.1kg		
ρ (kg/m ³)	2500	2500	2500	2702	2500	2380
ρ (kg/m ³)	2500			2527.33		

Tableau I-8 : Les résultats Masse volumique absolue du sable

I.6. Grapiers concassés :

Les granulats utilisés proviennent de carrières de la région de B-B-A (carrière COSIDER). Ces granulats sont des matériaux concassés et sont commercialisés en tant que classes granulaires :

Des graviers de classes 3/8, 8/16.

- **Gravier concassé :**
 - **Analyse granulométrique ;**

1) Gravier de fraction 3/8

Tamis (mm)	Poids des tamis vide (g)	Poids des tamis+sab le	refus du sab le	Refus cumulés	Refus cumulés és %	Tamisât cumulés %
8	0.652	0.679	0.025	0.025	1.666	98.34
6.3	0.635	0.875	0.24	0.265	17.66	82.34
5	0.650	1.028	0.37	0.635	42.33	57.67
4	0.603	1.089	0.489	1.124	74.93	25.07
3.15	0.605	0.819	0.217	1.341	89.4	10.6
2.5	0.602	0.720	0.116	1.457	97.13	2.87
Fond	0.452	0.486	0.034	1.491	99.4	0.6

Tableau I-9 : Analyse granulométrique du gravier 3/8

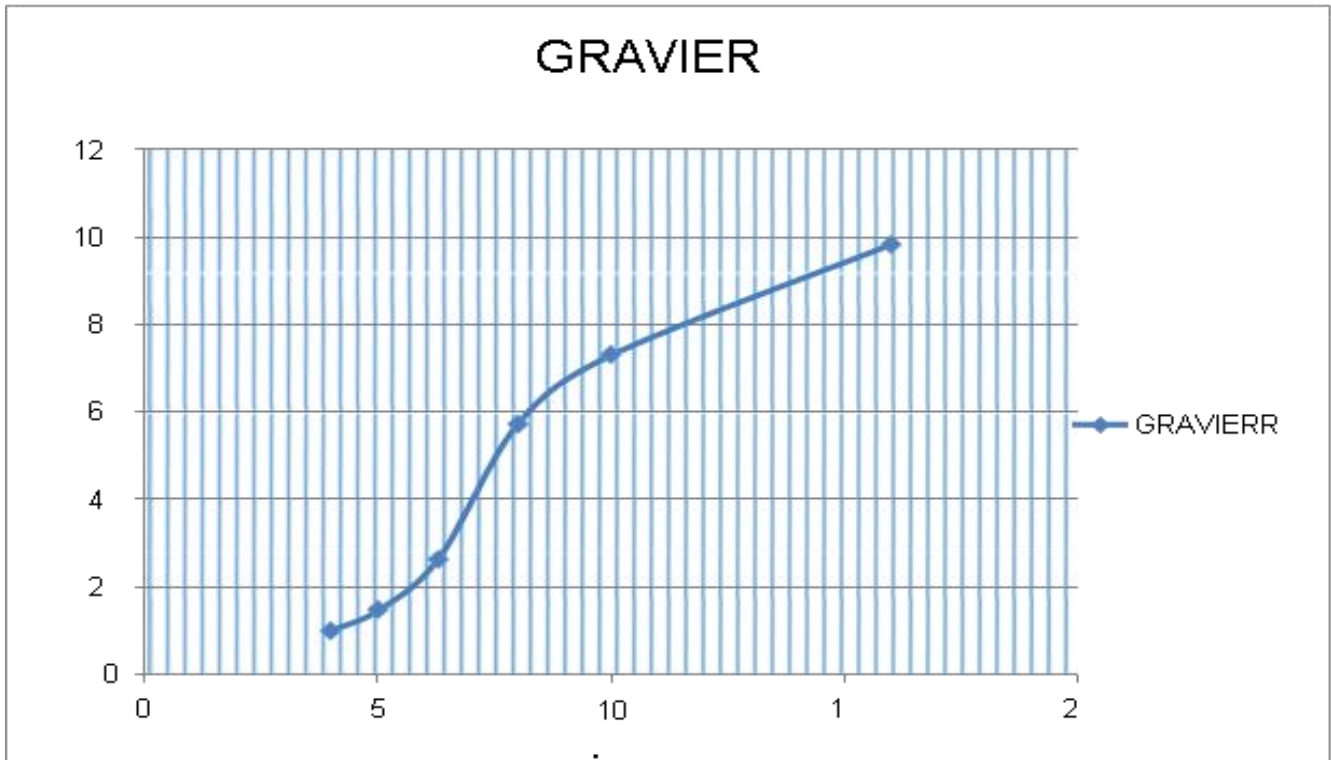


Figure I-11 : Diagramme d'analyse granulométrique de Gravier 3/8

2) Gravier de fraction 8/16

Tamis (mm)	Poids des tamis vide (g)	Poids des tamis+sa bl e	refus du gravier	Refus cumulés	Refus cumulés %	Tamisât cumulés %
16	0.929	0.975	0.046	0.046	3.06	96.94
10	0.958	1.980	1.022	1.068	71.2	28.8
8	0.825	1.160	0.335	1.403	93.53	6.47
5	0.853	0.944	0.091	1.494	99.60	0.4
3	0.754	0.754	0.001	1.495	99.66	0.34
fond	0.566	0.570	0.004	1.499	99.93	0.07

Tableau I-10 : Analyse granulométrique du gravier 8/16

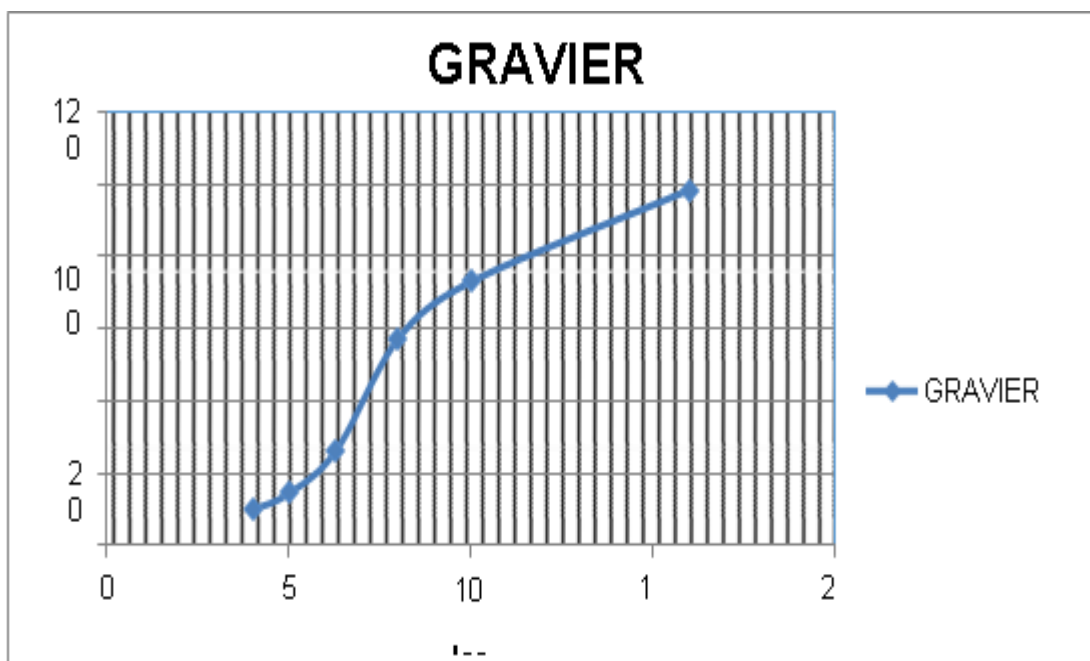


Tableau I-11 : Diagramme d'analyse granulométrique du gravier 8/16

3) Combinaison de 60% gravier 3/8 et 40% gravier 8/16

Tamis (mm)	Poids des tamis vide (g)	Poids des tamis+sabl	refus du sable	Refus cumulés	Refus cumulés %	Tamisât cumulés %
16	0.567	0.593	0.026	0.026	1.73	98.27
10	0.586	0.966	0.38	0.406	27.06	72.94
8	0.652	0.857	0.236	0.642	42.8	57.2
6.3	0.642	1.105	0.463	1.105	73.66	26.34
5	0.629	0.807	0.178	1.283	85.53	14.47
4	0.603	0.742	0.139	1.352	90.13	9.87
3.15	0.604	0.673	0.069	1.421	94.73	5.27
2.5	0.602	0.631	0.029	1.45	96.66	3.34
fond	0.454	0.464	0.01	1.46	97.33	2.67

Tableau I-12 : Analyse granulométrique du gravier 40% (8/16) et 60% (3/8)

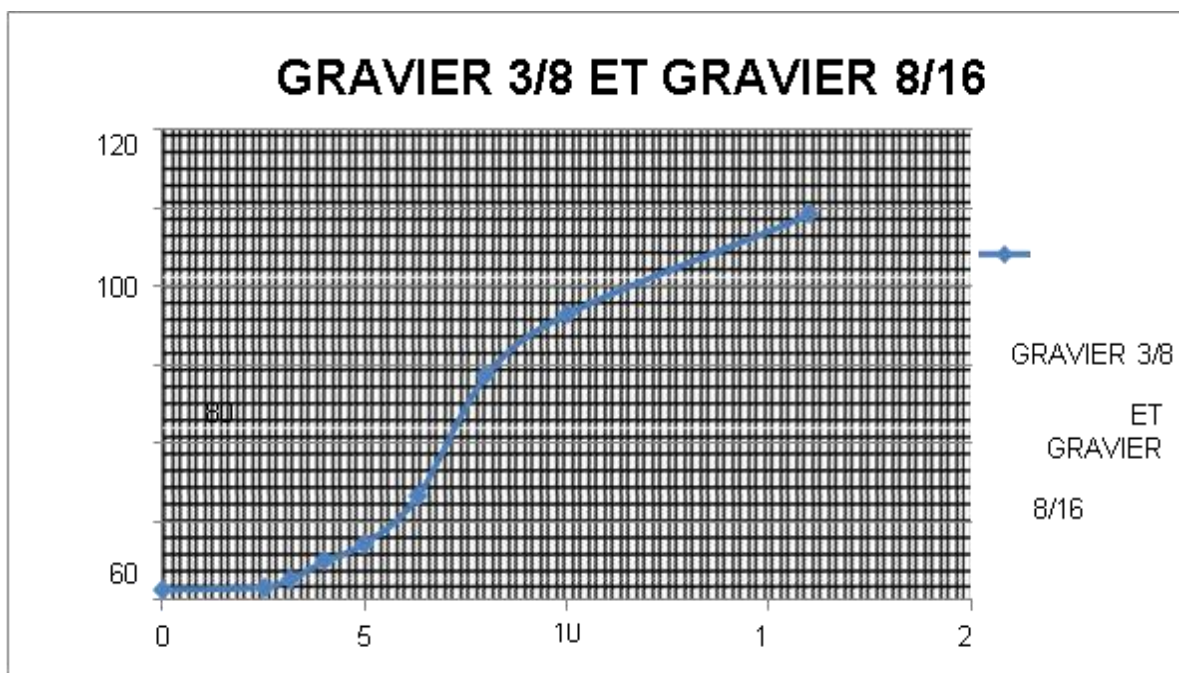


Figure I-12 : Diagramme d'analyse granulométrique du gravier 40% (8/16) et 60% (3/8)

➤ Masse volumique apparente

1) Gravier 3/8 :

Matériaux	Gravier 3/8 (m=120g)		
m1 (kg)	0.116	0.116	0.116
m2 (kg)	1.390	1.330	1.350
m2-m1	1.274	1.214	1.234
ρ (kg/m ³)	1415. 55	1348.88	1371. 11
ρ (kg/m ³)	1378.51		

Figure I-13 : Masse volumique apparent du Gravier (3/8).

2) Gravier 8/16

Matériaux	Gravier 8/16 (m=120g)		
m1 (kg)	0.116	0.116	0.116
m2 (kg)	1.303	1.316	1.302
m2-m1	1.187	1.2	1.186
ρ (kg/m ³)	1318.88	1333. 33	1317. 77
ρ (kg/m ³)	1323.32		

Tableau I-13 : Résultat Masse volumique apparente du Gravier (8/16).

➤ **Masse volumique absolue :**

- **Gravier 3/8 et 8/16**

Matéri aux	Gravier 3/8 (m=120g)			Gravier 8/16 (m=120g)		
V1 (ml)	200	200	200	200	200	200
V2 (ml)	240	245	240	249	248	247
V2-v1	40	45	40	49	48	47
Masse	0.12kg			0.12k g		
ρ (kg)	3000	2666. 66	3000	2448. 97	2500	2553. 19
ρ moy	2888.88			2500.72		

Tableau I-14: Résultats de la Masse volumique Absolue du gravier

Conclusion

Dans ce chapitre nous allons travailler sur les caractéristique des matériaux utilisé (sable, gravier, ciment, l'eau, l'adjuvant) et les essais réalisé dans laboratoire (la masse volumique, l'analyse granulométrique....).

Chapitre IV :

Résultat et discussion

Note : l'expérience de la perméabilité a été reportée cause de manque de temps.

I. Modélisation par plan d'expérience (théorie):

On a choisi la modélisation par le plan d'expérience car :

- Avec les plans d'expériences on obtient le maximum de renseignements avec le minimum d'expériences.
- Les plans d'expériences permettent d'organiser au mieux les essais qui accompagnent une recherche scientifique ou des études industrielles
- Dans le plan d'expériences on peut utiliser plusieurs facteurs au même temps
- Déterminer des valeurs optimales de réglage de différents paramètres, pour obtenir une valeur souhaitée sur un produit ou un service à mettre au point.
- Réduire le nombre d'essais à ce qui est strictement nécessaire, avec comme effet direct de minimiser les dépenses.
- Identifier les facteurs les plus influents, les interactions éventuelles entre les facteurs, et le nombre de points de mesures minimum pour obtenir le maximum d'informations

I.1. Préparation des corps d'épreuve

Les procédures de fabrication et de conservation des échantillons jouent un rôle important dans la constitution du réseau poreux ainsi que sur l'état de surface des échantillons. Les procédures utilisées doivent permettre la reproductibilité des caractéristiques physicochimiques des échantillons. Les procédures de fabrication et le dosage des bétons on est choisies comme dosage de béton de chantier pour avoir un aperçu plus proche de ce qui ce passe réellement sur terrain et la conservation des éprouvettes est basées sur la norme EN est sont présentés dans ce qui suit.

I.2. Confection des éprouvettes :

Les constituants du béton ont été introduits dans le malaxeur par ordre décroissant de granulométrie et ont été mélangés à sec pendant 30 secondes. L'eau sera introduite avec le Super plastifiant 2 % et hydrofuge 2% a été ensuite introduite pendant 1 minute et le malaxage poursuivi durant 3 minutes. La mise en place du béton a été réalisée conformément aux normes françaises NFP 18-404 («Bétons - Essai d'étude, de convenance et de contrôle - Confection et conservation des corps d'épreuve »). La mise en table vibrante quartes éprouvettes ont été confectionnées pour chaque composition de béton. Pour les essais de porosité Les moules sont des moules cylindriques en PVC et métalliques de dimensions (100 x 200mm).

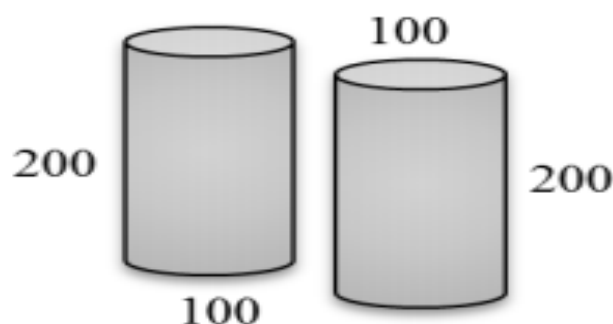


Figure I-1: Eprouvette de l'essai

I.3. Mode de cure

Toutes les éprouvettes de béton utilisées dans cette campagne expérimentale ont suivi la même cure et le même conditionnement conformément à la norme NFP 18- 404 et aux recommandations de l'AFPC-AFREM (1997).

Après coulage, les éprouvettes ont été démoulées à 24 heures, puis coupées en 3 disques de 50 ± 1 mm d'épaisseur à l'aide d'une scie à béton. Ensuite, les éprouvettes sont conservées selon deux modes de cures pendant 28,

- 16 éprouvettes à l'eau (8 mis à l'eau agressive (H Cl) + 8 mis à l'eau saine)
- 16 éprouvettes à l'air libre (8 mis à l'eau agressive (H Cl) + 8 mis à l'air)



Figure I-2 : Les éprouvettes après le découpage à 5cm d'épaisseur.

Le tableau de la formulation par le plan d'expérience : (nous avons réalisé 32 essais)
(combinaison des facteurs) :

	N° Essai	Dosage de ciment (Kg/m ³)	E/C %	Adjuvant %	Ajout %	Cure T=20°C H=20%	Eau agressive	Date du coulage	Affaissement
Formulation 1	1	350	0.35	2	15	A l'air	H Cl	20/04/2021	5
	2	350	0.35	2	15	A l'air	/	20/04/2021	5
	3	350	0.35	2	15	A l'eau	H Cl	20/04/2021	5
	4	350	0.35	2	15	A l'eau	/	20/04/2021	5
Formulation 2	5	350	0.47	2	0	A l'air	H Cl	11/04/2021	5.5
	6	350	0.47	2	0	A l'air	/	11/04/2021	5.5
	7	350	0.47	2	0	A l'eau	H Cl	11/04/2021	5.5
	8	350	0.47	2	0	A l'eau	/	11/04/2021	5.5
Formulation 3	9	350	0.66	0	15	A l'air	H Cl	07/04/2021	5.5
	10	350	0.66	0	15	A l'air	/	07/04/2021	5.5
	11	350	0.66	0	15	A l'eau	H Cl	07/04/2021	5.5
	12	350	0.66	0	15	A l'eau	/	07/04/2021	5.5
Formulation 4	13	350	0.65	0	0	A l'air	H Cl	04/04/2021	4
	14	350	0.65	0	0	A l'air	/	04/04/2021	4
	15	350	0.65	0	0	A l'eau	H Cl	04/04/2021	4
	16	350	0.65	0	0	A l'eau	/	04/04/2021	4

Formulation 5	17	600	0.35	15	2	A l'air	H Cl	19/04/2021	5
	18	600	0.35	15	2	A l'air	/	19/04/2021	5
	19	600	0.35	15	2	A l'eau	H Cl	19/04/2021	5
	20	600	0.35	15	2	A l'eau	/	19/04/2021	5
Formulation 6	21	600	0.35	0	2	A l'air	H Cl	18/04/2021	5.5
	22	600	0.35	0	2	A l'air		18/04/2021	5.5
	23	600	0.35	0	2	A l'eau	H Cl	18/04/2021	5.5
	24	600	0.35	0	2	A l'eau	/	18/04/2021	5.5
Formulation 7	25	600	0.65	15	0	A l'air	H Cl	05/04/2021	4.3
	26	600	0.65	15	0	A l'air	/	05/04/2021	4.3
	27	600	0.65	15	0	A l'eau	H Cl	05/04/2021	4.3
	28	600	0.65	15	0	A l'eau	/	05/04/2021	4.3
Formulation 8	29	600	0.65	0	0	A l'air	H Cl	05/04/2021	6
	30	600	0.65	0	0	A l'air	/	05/04/2021	6
	31	600	0.65	0	0	A l'eau	H Cl	05/04/2021	6
	32	600	0.65	0	0	A l'eau	/	05/04/2021	6

Tableau I-1 : Tableau de la formulation

La porosité accessible à l'eau : Peau :

Les essais de porosité accessible à l'eau sont réalisés selon la norme (NF EN 18-459).

L'objectif de cet essai est la mesure du le pourcentage de vide connecté à la surface du béton.

Le principe de l'essai est basé sur une série de pesées à l'air et hydrostatique des échantillons.

On obtient alors :

- Pesée hydrostatique (M eau)
- Pesée dans l'air de l'éprouvette saturée d'eau (Mair)
- Pesée dans l'air de l'éprouvette sèche (Msec).

Le séchage des éprouvettes est réalisé dans une étuve à une température de 105°C jusqu'à obtenir une masse constante (la masse ne varie pas de plus de 0,05 % entre deux pesées espacées de 24h). La porosité accessible à l'eau est calculée par la relation suivante : [18]

$$\text{Peau} = \frac{M1 - M3}{M1 - M2} \times 100$$

Tableau des masses obtenus :

N	M air (g)	M eau (g)	M3 sec (g)
1	957.8	548.97	922.67
2	991.77	578.03	962.5
3	1021.97	592.53	992.83
4	990	568.97	947
5	943.93	546.97	912.07
6	971.2	556.1	943.2
7	956.23	557	924.47
8	1002.87	590.3	970.5
9	948.5	542.07	893.17
10	988.17	562.33	937.17
11	1044.97	597.03	985.83
12	975.73	551.13	936.37
13	935.8	539.83	867.43
14	972.57	559.4	914.5
15	942.67	544.27	883
16	991.57	573.73	940.57
17	959.2	545.9	923
18	993.57	570.73	957.7
19	960.33	574.07	933.13
20	994.63	593.5	961.73
21	939.07	543.7	908.67
22	990.87	575.4	960.5
23	952.8	555.5	929.6
24	990.1	581.87	964.83
25	943.77	539.83	900.73
26	976.03	550.77	933.67
27	945.3	546.87	903.1
28	989.5	572.97	949.5
29	1030.33	594.6	972.53
30	986.33	575.76	952.5
31	952.6	548.5	917.23
32	989.8	569.5	956.23

Tableau I-2 : Tableau des masse

II: Résultat d'expérience :

	N° Essai	Dosage de ciment (Kg/m ³)	E/C %	Adj uva nt %	Ajout %	Cur e	Eau agressive	Compressi on	Porosité
Formulation 1	1	350	0.35	2	15	A l'air	/	45.01	8.03
	2	350	0.35	2	15	A l'eau	/	45.01	6.74
	3	350	0.35	2	15	A l'air	H Cl	45.01	8.59
	4	350	0.35	2	15	A l'eau	H Cl	45.01	7.07

Tableau II-1: Résultats de formulation 1

	N° Essai	Dosage de ciment (Kg/m ³)	E/C %	Adj uva nt %	Ajout %	Cur e	Eau agressive	Compressi on	Porosité
Formulation 2	5	350	0.47	2	0	A l'air	/	34	7.96
	6	350	0.47	2	0	A l'eau	/	34	7.85
	7	350	0.47	2	0	A l'air	H Cl	34	10.21
	8	350	0.47	2	0	A l'eau	H Cl	34	9.62

Tableau II-2 : Résultats de formulation 2

	N° Essai	Dosage de ciment (Kg/m ³)	E/C %	Adj uva nt %	Ajout %	Cur e	Eau agressive	Compressi on	Porosité
Formulation 3	9	350	0.66	0	15	A l'air	/	30.67	17.27
	10	350	0.66	0	15	A l'eau	/	30.67	14.05
	11	350	0.66	0	15	A l'air	H Cl	30.67	13.61
	12	350	0.66	0	15	A l'eau	H Cl	30.67	11.98

Tableau II-3 : Résultats de formulation 3

	N° Essai	Dosage de ciment (Kg/m ³)	E/C %	Adj uva nt %	Ajout %	Cur e	Eau agressive	Compressi on	Porosité
Formulation 4	13	350	0.65	0	0	A l'air	/	26.42	14.98
	14	350	0.65	0	0	A l'eau	/	26.42	12.21
	15	350	0.65	0	0	A l'air	H Cl	26.42	13.20
	16	350	0.65	0	0	A l'eau	H Cl	26.42	9.27

Tableau II-4 : Résultats de formulation 4

	N° Essai	Dosage de ciment (Kg/m ³)	E/C %	Adj uva nt %	Ajout %	Cur e	Eau agressive	Compressi on	Porosité
Formulation 5	17	600	0.35	2	15	A l'air	/	41.97	7.69
	18	600	0.35	2	15	A l'eau	/	41.97	7.31
	19	600	0.35	2	15	A l'air	H Cl	41.97	8.77
	20	600	0.35	2	15	A l'eau	H Cl	41.97	8.48

Tableau II-5 : Résultats de formulation 5

	N° Essai	Dosage de ciment (Kg/m ³)	E/C %	Adj uva nt %	Ajout %	Cur e	Eau agressive	Compressi on	Porosité
Formulation 6	21	600	0.35	2	0	A l'air	/	36.97	5.84
	22	600	0.35	2	0	A l'eau	/	36.97	6.19
	23	600	0.35	2	0	A l'air	H Cl	36.97	7.04
	24	600	0.35	2	0	A l'eau	H Cl	36.97	8.20

Tableau II-6 : Résultats de formulation 6

	N° Essai	Dosage de ciment (Kg/m ³)	E/C %	Adj uva nt %	Ajout %	Cur e	Eau agressive	Compressi on	Porosité
Formulation 7	25	600	0.65	0	15	A l'air	/	31.6	13.27
	26	600	0.65	0	15	A l'eau	/	31.3	8.24
	27	600	0.65	0	15	A l'air	H Cl	31.6	10.66
	28	600	0.65	0	15	A l'eau	H Cl	31.6	9.69

Tableau II-7: Résultats de formulation 7

	N° Essai	Dosage de ciment (Kg/m ³)	E/C %	Adj uva nt %	Ajout %	Cur e	Eau agressive	Compressi on	Porosité
Formulation 8	29	600	0.65	0	0	A l'air	/	26.68	8.57
	30	600	0.65	0	0	A l'eau	/	26.68	7.99
	31	600	0.65	0	0	A l'air	H Cl	26.68	10.60
	32	600	0.65	0	0	A l'eau	H Cl	26.68	9.60

Tableau II-8: Résultats de formulation 8

II.1. Analyse des résultats:

L'analyse des résultats à été effectué par le logiciel Mini tab

Ce logiciel permet de représentation des résultats sous forme de :

- Diagramme de Pareto des effets
- L'effet de chaque facteur
- L'interaction des facteurs prise deux a deux
- Modélisation par une équation mathématique

Ce logiciel permet de tracer les diagrammes de surface.

II.1.1. Interprétations des résultats des diagrammes:

II.1.2. Résultats du Diagramme de Pareto des effets:

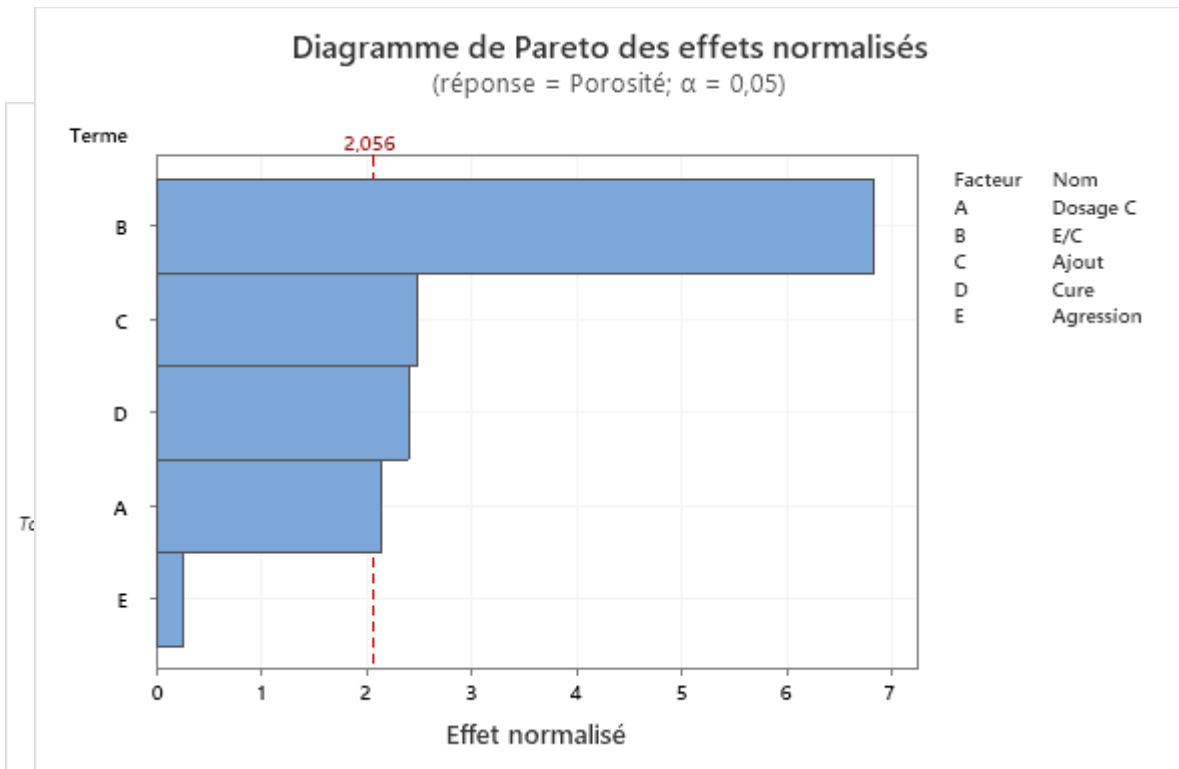


Figure II-1: Résultats du Diagramme de Pareto des effets

Ces facteurs sont les facteurs les plus influents et par l'ordre suivants :

- B) Le rapport E/C
- C) Le pourcentage d'ajout
- D) Le mode de cure
- A) Le dosage de ciment

Résultats des effets principaux:

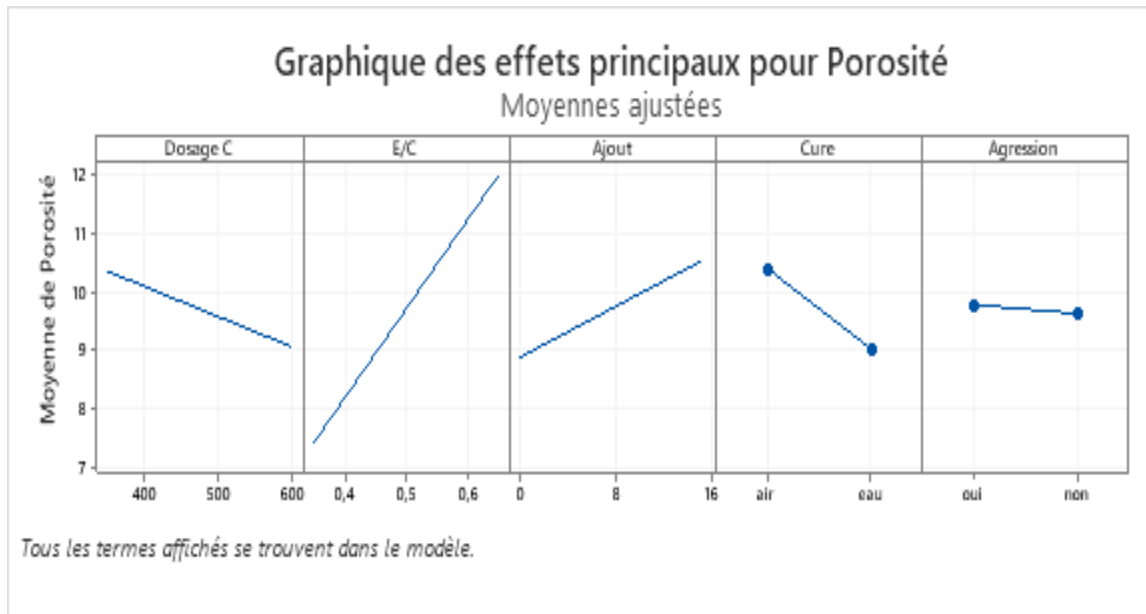


Figure II-2 : L'effet de chaque facteur pris individuellement

Les résultats de l'influence de chaque paramètre sur la porosité sont :

- La porosité diminue lorsque le dosage de ciment augmente
- La porosité diminue fortement lorsque le rapport E/C diminue
- La porosité augmente lorsqu'en utilise 15% d'ajout
- La porosité diminue en utilisant une cure dans l'eau saine.
- La porosité augmente en utilisant une eau agressive.

II.1.3. Diagramme des interactions des facteurs prise deux à deux :

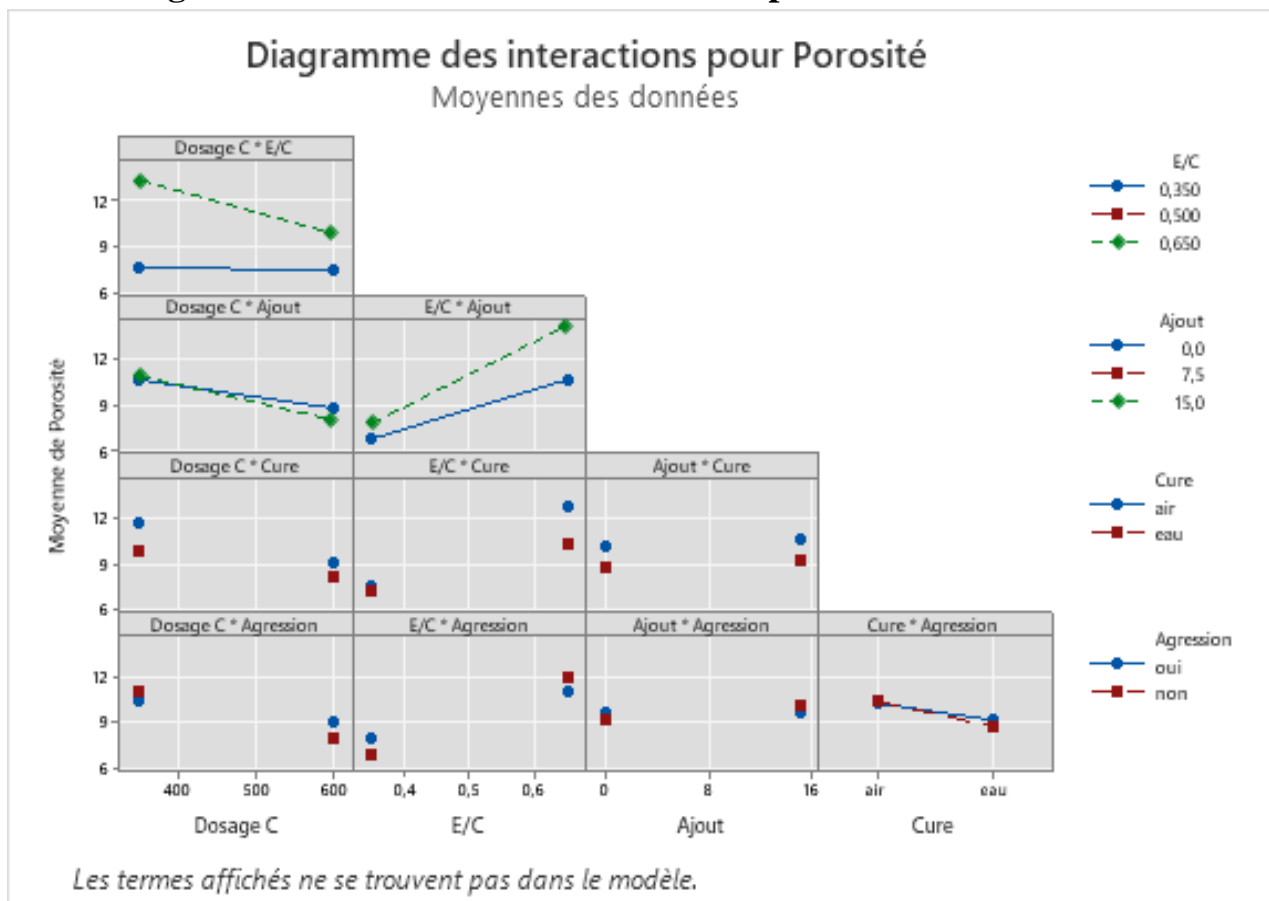


Figure II-3 : Diagramme des interactions des facteurs prise deux à deux

1. Un dosage de ciment 600kg/m³ sans agression produit un béton de faible porosité alors que un dosage de ciment de 350kg/m³ dans l'eau agressive produit un béton de forte porosité.
2. Un dosage de ciment 600kg/m³ et une cure dans l'eau saine produit un béton de faible porosité alors que un dosage de ciment de 350kg/m³ produit un béton de forte porosité.
3. Un dosage de ciment 600kg/m³ avec 15% d'ajout produit un béton de faible porosité alors que un dosage de ciment de 350kg/m³ sans ajout produit un béton de forte porosité.
4. Un dosage de ciment 600kg/m³ et un rapport E/C=0.35% produit un béton de faible porosité alors que un dosage de ciment de 350kg/m³ et un rapport E/C=0.6% produit un béton de forte porosité.
5. Un rapport E/C=0.35% sans agression produit un béton de faible porosité alors qu'un rapport E/C=0.6% dans l'eau agressive produit un béton de forte porosité.

6. Un rapport $E/C=0.35\%$ et un cure dans l'eau saine produit un béton de faible porosité alors qu'un rapport $E/C=0.6\%$ et un cure a l'air libre produit un béton de forte porosité.
7. Un rapport $E/C=0.35\%$ sans ajout produit un béton de faible porosité alors qu'un rapport $E/C=0.6\%$ avec 15% d'ajout produit un béton de forte porosité.
8. Un pourcentage de 0% ou 15% d'ajout dans l'eau agressive ou bien sans agression produit presque un béton de même porosité.
9. Un pourcentage de 0% d'ajout et un cure dans l'eau saine produit un béton de faible porosité alors que un pourcentage de 15% d'ajout avec un cure a m'air libre produit un béton de forte porosité
10. Un cure l'l'eau saine avec agression produit un béton de faible porosité alors que un cure a l'air avec l'eau agressive produit un béton de forte porosité.

CONCLUSION GENERALE

La résistance mécanique n'est plus le seul facteur pris en compte par l'ingénieur, dans le calcul de la stabilité des structures en béton armé. La performance durabilité qui traduit le vieillissement de ces structures dans des milieux agressifs, est d'actualité car elle peut être à l'origine de la diminution de la durée de vie du béton armé soumis à des milieux d'agressivité sévère.

Les stations en béton armés dans un milieu agressif souffrent de graves problèmes de dégradation affectant considérablement leur durabilité. Pour améliorer la performance et la durabilité des structures en génie civil il est indispensable de connaître les paramètres influant La durée de vie de ces structures en béton armé est conditionnée par la réponse aux agressions physique et chimique de l'environnement.

La porosité du béton est un des indicateurs généraux de durabilité. C'est un paramètre qui apparaît comme fondamental dans l'évaluation et la prédiction de la durabilité du matériau et de la structure vis-à-vis du processus de dégradation. Il est important alors de quantifier ce paramètre à partir d'essais de laboratoire réalisés sur des éprouvettes ou sur des prélèvements selon des modes opératoires bien définis.

Les résultats de cette recherche de Porosité réalisés en laboratoire a permis d'observer l'influence de certains facteurs et d'arriver aux conclusions suivantes :

- ✚ La porosité diminue lorsque le dosage de ciment augmente
- ✚ La porosité diminue fortement lorsque le rapport E/C diminue
- ✚ La porosité augmente lorsqu'on utilise 15% d'ajout
- ✚ La porosité diminue en utilisant une cure dans l'eau saine.
- ✚ La porosité augmente en utilisant une eau agressive.

Cette étude nous a permis d'acquérir plusieurs connaissances:

- ✚ Nous a permis de s'insérer dans le monde de la recherche scientifique.
- ✚ Savoir gérer les équipements de recherche scientifique.
- ✚ Savoir analyser, organiser et modéliser les résultats par la méthodologie des plans d'expériences.
- ✚ Savoir évaluer la durabilité du béton par l'essai de porosité pour n'importe quel type de béton voulu.

- ✚ Savoir formuler un béton durable et moins perméable.
- ✚ Savoir connaître les facteurs affectant la porosité dans le béton

Bibliographie

- [1] AMRIOU, Abderrachid. Détection par rayon x de la dégradation du béton sous l'effet des agressions chimiques (sulfates). 2009. Thèse de doctorat. M'sila, Université Mohamed Boudiaf. Faculté des Sciences et des Sciences de L'ingénierat..
- [2] Infociments.fr (2018). Récupéré sur <https://www.infociments.fr/betons/resistance-aux-agents-agressifs>.
- [3] LEIR, Fatima Zohra et BENABDERRAHMANE, Amira Aya. Étude de la perméabilité à l'eau comme indicateur de la durabilité du béton. 2020. Thèse de doctorat. Univ M'sila..
- [4] Plumier. A, Pathologies et réparations structurales des constructions, Presse de l'université de liège, 232, 2011..
- [5] Yacine, Lammari et et-tayib, houmeur mouaadh. 2018. Pathologie des bétonsdes .
- [6] Jean-Pierre Ollivier et Angélique Vichot, La durabilité des bétons, Association Technique de l'Industrie des Liant Hydrauliques, Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, pp. 868, Paris, 2008..
- [7] Mustafa Çullu., Metin Arslan., The effects of chemical attacks on physical and mechanical properties of concrete produced under cold weather conditions, Construction And Building Materials, 2014; 57 (2) 53-60..
- [8] ALI, S. I. A. D. Pathologie des constructions en béton, diagnostic et méthodes de réparations. Etude de cas de l'effet combiné de pré-fissuration/corrosion sur le comportement des poutres en béton armé. 2018. Thèse de doctorat. Université Mohamed Boudiaf-.
- [9] IHAB, ITMAIZEH. 2015/2016. pathologie de structures en béton armé. s.l. : Université dz larbi ténéssi, 2015/2016..
- [10] Salim, Hamlaoui. 2012. Maintenance,entretien et réparation des ponts. Biskra : Universiyé mohammed kheider, 2012..
- [11] BARON, Jacques, DESDEVISES, A., BUIL, M., et al. La durabilité des bétons. 1992..
- [12] JAAFAR, Walid. Influence de la carbonatation sur la porosité et la perméabilité des bétons. DEA Géomatériaux. Division Bétons et Composites Cimentaires. Section Microstructure et Durabilité du Béton, LCPC, 2003..
- [13] KASSOUMI, L., ELAAL, MAIT, OUALI, A., et al. APPROCHE PERFORMANTIELLE ET PREDICTIVE DU BETON DES OUVRAGES D'ART SUR LA BASE D'INDICATEURS DE DURABILITE..
- [14] «Infociments. (2018),» [En ligne].

- [15] Oualit Mehena. (2009). Indicateurs de durabilité du béton dans le contexte Algérien, Mémoire de .
- [16] ALLAHYARI, Ilgar. Approche performantielle des bétons: vers une meilleure caractérisation des indicateurs de durabilité. 2016. Thèse de doctorat. Université Paul Sabatier-Toulouse III..
- [17] KASRI, Sarra et MEFTAH, Roqiya. Etude de la diffusivité des ions chlorures comme indicateur de durabilité. 2020. Thèse de doctorat. Univ M'sila..
- [18] AMRIOU, Abderrachid, BENCHEIKH, Mohamed, DEBOUCHA, Sadek, et al. Effet du climat chaud sur la porosité et la résistance à la compression du béton., [En ligne].