

Ministère de l'enseignement supérieur
et de la recherche scientifique

Université Mohamed Boudiaf - M'sila Faculté de
technologie

FACULTE : TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT : GENIE
CIVIL

N° :



DOMAINE : GENIE CIVIL

FILIERE : GENIE CIVIL

OPTION : MATERIAUX DE
CONSTRUCTION

Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique

Par : Leir Fatima Zohra
Benabderrahmane Amira Aya

Intitulé

**Étude de la perméabilité à l'eau comme
indicateur de la durabilité du béton**

Soutenu devant le jury composé de :

Nom et prénom Enseignant

Pr : Rahmouni Zine El Abidine

Université de M'sila

Président

Pr : Bencheikh Mohamed

Université de M'sila

Rapporteur

Pr : Nacéri Abdelghani

Université de M'sila

Examineur

Année universitaire : 2019/2020



REMERCIEMENTS



الحمد لله الذي أعاننا فبلغنا، ووفقنا فأنجزنا، له الحمد كل الحمد من قبل ومن بعد، أما بعد ...

فقد شرفنا على إنهاء هذا العمل المتواضع وما كان لهذا العمل أن يتم إلا بفضل الله وتوفيقه وفضل أصحاب الفضل الذين لهم ندين، وكنا بهم بعد الله نستعين.

فمن هذا المقام نتقدم بخالص شكرنا وامتناننا إلى أستاذنا الدكتور بن الشيخ محمد الذي أشرف على هذه الرسالة وغمرنا بفيض علمه، وكثير نصحه، وحسن معاملته وجميل صبره.

كما نتقدم بالشكر الجزيل إلى جميع أساتذة كلية التكنولوجيا بجامعة محمد بوضياف بالمسيلة، لما قدموه لنا من مساعدة ودعم معنوي لإنجاز هذا العمل.

أخيرا نتقدم بخالص الشكر والتقدير إلى كل من مد لنا يد العون والمساعدة في إتمام هذا العمل وإخراجه في أحسن صور وجزاهم الله عنا خير جزاء....



SOMMAIRE

Sommaire.....	
Remerciements.....	
Liste des tableaux.....	
Liste des figures.....	
ملخص	
Résumé.....	
Abstract	
Introduction	
Problématique	
CHAPITRE I : Les pathologies des bétons.	
– I. Introduction	01
– I. Généralité sur les de béton	01
- I.II Description des pathologies des bétons	02
- I.II.1 : Dégradations mécaniques	02
- I.II.2 : Dégradations Chimiques:.....	02
- I.II.2.1 : La corrosion.....	02
- I II.2.2 : L’alkali-réaction	10
- I.II.2.3 : Attaque sulfatique	13
– I.II.2.4 : Attaques Acides:.....	19
- I.II.2.5 : Lixiviation	23
- I.II.2.6 : La carbonatation.....	24
- I III.3 : Dégradations Physique:.....	26
- I III.3.1 : Action de gel-dégel	26
- I.III.3.2 : Action des sels fondants.....	28
Conclusion.....	29
CHAPITRE II : La perméabilité du béton.	
Introduction	31
II.I.1-Définition de la durabilité	31
II.I.2 - la durabilité des bétons en Algérie	32
II.I.3.- Relation entre durabilité et perméabilité du béton	33
II. II Introduction	34

II. II.1.Structure poreuse du béton et perméabilité à l'eau du béton.....	34
II. II.2Porosité et distribution de la taille des pores	35
II. III Introduction.....	37
II. III.1.Définition de la perméabilité.....	37
II. III.2.Loi de Darcy.....	38
II. III.3.Perméabilité à l'eau du béton.....	35
CHAPITRE III : Caractérisation des matériaux et essais.....	
III.1 Introduction	50
III. II.2.1 Caractéristiques des matériaux utilisés	50
III. II.2.1. : graviers concassés :.....	50
III. II.2. Sable	57
III II.3.Le ciment	67
III.II.4.L'eau.....	68
III. II.5.adjuvants	79
III. Conclusion :.....	79
CHAPITRE IIII : Analyse et interprétation des résultats.....	
III.1) : Modélisation par plan d'expérience	81
III.2) : Analyse des résultats	84
III. 3) : Interprétations des résultats des diagrammes:.....	86
III. Conclusion :.....	
CONCLUSION GENERALE	
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUESIII.....	

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre I : Les pathologies des bétons.

TABLEAU 1.1 : Composants du béton menacés par la corrosion.	22
--	----

Chapitre II : la perméabilité du béton

TABLEAU 2.1 : Réduction du coefficient de perméabilité d'une pâte de ciment à différents âges pour un rapport E/C de 0.7	45
--	----

TABLEAU 2.2 : représente le résultat d'une recherche sur la perméabilité à l'eau de quelques roches en comparaison avec des pâtes de ciment de même coefficient de perméabilité à l'eau.....	46
--	----

Chapitre III Matériaux matériels et essais

TABLEAU 3.1 : l'analyse granulométrique de fraction (3/8) du graver	52
---	----

TABLEAU 3.2 : l'analyse granulométrique de fraction (8/16) du graver.	53
--	----

TABLEAU 3.3 : l'analyse granulométrique des fractions ((40%3/8)/ (60%8/16) du gravier.....	54
--	----

TABLEAU 3.4 : Masse volumique apparente du Gravier (3/8).....	55
---	----

TABLEAU 3.5 : Masse volumique apparente du Gravier (8/16):.....	56
---	----

TABLEAU 3.6 : Résultats de la Masse volumique Absolue	57
---	----

TABLEAU 3.7 : l'analyse granulométrique de Sable de dune.....	58
---	----

TABLEAU 3.8 : l'analyse granulométrique de Sable concassé.....	59
--	----

TABLEAU 3.9 : l'analyse granulométrique de combinaison de 50% de sable de dune et 50% de sable concassée.....	60
---	----

TABLEAU 3.10 : l'analyse granulométrique de combinaison de 30% de sable de dune et 70% de sable concassée.....	61
--	----

TABLEAU 3.11 : Classes de propreté d' après les valeurs de l'équivalent de sable	62
--	----

TABLEAU 3.12 : Propreté de sable de dune étudié.....	63
--	----

TABLEAU 3.13 : Propreté de sable concassé étudié.....	64
---	----

TABLEAU 3.14 : les résultats de la Masse volumique apparente du sable.....	65
--	----

TABLEAU 3.15 : les résultats de la Masse volumique absolue du sable.....	67
--	----

TABLEAU 3.16 : Caractéristiques physiques du ciment CPJ 42.5 Lafarge	67
TABLEAU 3.17 : Résistance à la compression et à la flexion pour prisme du ciment	68
TABLEAU 3.18 : Composition chimique du ciment CPJ 42.5 Lafarge	68
TABLEAU 3.19 : Composition minéralogique du ciment CPJ 42.5 Lafarge.....	68
TABLEAU 3.20 : Domaine de mesure et nombre de dosages de SO ₄ 2.....	69
TABLEAU 3.21 : Graduation et nombre de dosages de Cl-.....	70
TABLEAU 3.22 : Tableaux représente le mode opératoire du Test Chlorures Cl-.....	72
TABLEAU 3.23 : Tableaux représente domaine de mesure et nombre de dosages de CaCO ₃	73
TABLEAU 3.24 : Tableaux représente le mode opératoire du Test Dureté totale.....	75
TABLEAU 3.25 : tableaux représente le mode opératoire du Test carbon dioxide.....	77
TABLEAU 3.26 : tableau représente les résultats des tests dioxyde.....	78

Chapitre III : Analyse et interprétation des résultats

TABLEAU 4.1 : la formulation du baton par le plan d'expérience	82
TABLEAU 4.2 : L'analyse des résultats qui a été effectué par le logiciel Minitab.	85

LISTE DES FIGURES

Chapitre I : Les pathologies des bétons.

Figure 1.1 : Corrosion bar les temps	03
Figure 1.2 : corrosion de l'armature.....	04
Figure 1.3 : Types de fissures développées lors de la corrosion des aciers d'armature.....	05
Figure 1.4 : Évolution de la dégradation d'une structure en béton armé.....	06
Figure 1.5 : Représentation schématique d'un cylindre en béton armé exposés d'eau de mer	08
Figure 1.6 : L'aéroport de Funchal sur l'île de Madère	09
Figure 1.7 : Capteur de corrosion intégré lors de l'extension de la piste d'atterrissage de L'aéroport de Funchal	09
Figure 1.8 : réactions alcalis-granulats.....	10
Figure 1.9 : facteurs intervenant sur l'apparition des 3 conditions nécessaires au déclenchement de l'alcali-réaction	12
Figure 1.10 : Exemples bétons dégradés par l'alcali-réaction.	13
Figure 1.11 : attaques sulfatiques	13
Figure 1.12 : La formation de l'ettringite s secondaire.....	15
Figure 1.13 : la thaumasite	18
Figure 1.14 : Attaques acides.....	19
Figure 1.15 : lixiviation.....	23
Figure 1.16 phénomène de la carbonatation.....	24
Figure 1.17 : Les phases de carbonatation	25
Figure 1.18 : Dégradation due aux sels de déverglaçage	28

Chapitre II : la perméabilité du béton.

Figure 2.1 : Schéma des pores dans un matériau	35
Figure 2.2 : Influence du degré d'inter connectivité sur l'écoulement de fluides.....	36
Figure 2.3 : Flux linéaire de l'eau à travers l'échantillon	38
Figure 2.4 : Principe de fonctionnement des appareils de mesure de la perméabilité à l'eau.....	40
Figure 2.5 : Perméabilimètre à trois cellules	41
Figure. 2.6 : perméabilimètre permettant les tests de six éprouvettes	42
Figure 2.7 : Relation entre le coefficient de perméabilité à l'eau et le rapport E/C d'une pâte de Ciment hydraté à 93 %	42
Figure 2.8 : montre le rôle de la durée de cure sur la perméabilité et les propriétés de transfert Dans le béton	45
Figure 2.9 : présente l'influence du rapport E/C et de la taille maximale des granulats sur Le coefficient de perméabilité à l'eau des bétons	47

Chapitre III : Matériaux matériels et essais

Figure 3.1 : les tamis.....	51
Figure 3.2 : L'analyse granulométrique de fraction (3/8) du graver	52
Figure 3.3 : l'analyse granulométrique de fraction (8/16) du gravier.....	53
Figure 3.4 : l'analyse granulométrique des fractions ((40% 3/8)/(60% 8/16) du gravier.....	54
Figure 3.5 : l'analyse granulométrique de Sable du dune	58
Figure 3.6 : l'analyse granulométrique de Sable concassé.....	59
Figure 3.7 L'analyse granulométrique de combinaison de 50% de sable de dune et 50% de sable concassée.....	60
Figure 3.8 : l'analyse granulométrique de combinaison de 30% de sable de dune et 70% de sable concassée.....	61
Figure 3.9 : équivalent de sable au piston.	63
Figure 3.10 : Méthode de mesure de la masse volumique apparente	65
Figure 3.11 : Méthode de mesure de la masse volumique absolue	66
Figure 3.12: sac de lave du ciment.....	67
Figure 3.13 : Réactifs et produits auxiliaires test à BANDELETTE SO4 2.....	70
Figure 3.14 : Réactifs et produits auxiliaires Test Chlorures Cl-	71
Figure 3.15 : photo représente les résultats du Test Chlorures Cl-	72
Figure 3.16 : Réactifs et produits auxiliaires de Test Dureté totale	74
Figure 3.17 : photo représente les résultats du Test Dureté totale.....	75
Figure 3.18 : photo représente domaine de mesure et nombre de dosages	76
Figure 3.19 : Réactifs et produits auxiliaires de Test carbon dioxide	77
Figure 3.20 : photo représente les résultats du Test carbon dioxide	78
Figure 3.20 : super-plastifiants	79

Chapitre III: Analyse et interprétation des résultats

Figure 4.1 : Résultats du Diagramme de Pareto des effets	86
Figure 4.2 : L'effet de chaque facteurs pris individuellement.....	87
Figure 4.3 : Diagramme de l'interaction des facteurs prise deux à deux	88

ملخص

تتطلب متانة الخرسانة التحكم الفعال والفعال في الأعمال والإنشاءات، وخاصة الهياكل الهندسية والأنفاق والسدود ، إلخ. يتطلب هذا قبل تنفيذ أي مشروع ، التحكم في جميع العوامل التي من المحتمل أن تؤثر على سلوكه بمرور الوقت. تشير التجربة إلى أن العوامل المؤثرة ، والأكثر أهمية من حيث المتانة والتي يجب بالتالي مراقبتها عن كثب ، هي تكوين الخرسانة (محتوى الأسمنت ونسبة الماء إلى الأسمنت) ، وضغط الخرسانة وحماية الخرسانة الطازجة أثناء التصلب.

الهدف من هذه الرسالة هو إيجاد طريقة للتحكم في متانة الخرسانة من اختبار نفاذية الماء عن طريق اختبار هذه الطريقة وهذه المعدات على أي خرسانة (خرسانة سيئة الصياغة ، وخرسانية متقنة الصنع وسليمة ولموسة قابلة للعدوان) بالإضافة إلى ذلك ، يتيح معيار **EN206-1** الآن تحديد خرسانة الأداء من خلال دمج مواصفات امتصاص الماء تحت تدرج ضغط. قد يبدو التحكم في امتصاص الماء للخرسانة أمرًا بسيطًا ، ولكن لا يزال يتعين على الجميع تقديم مساهمتهم الخاصة. ومع ذلك ، فإن متانة الهياكل الخرسانية تأتي بهذا السعر.

في ضوء المعرفة الحالية حول الموضوع ، فإن الطريقة الأكثر فعالية لتحقيق النمذجة (التحكم الملموس) هي منهجية التصاميم التجريبية

الكلمات الدالة:

المتانة ، التحكم ، الاكتناز ، النفاذية ، المسامية

RESUME

La durabilité des bétons exige un contrôle efficace et effectif des ouvrages et des constructions particulièrement les ouvrages d'arts, les tunnels, les barrages...

Ceci exige, avant toute réalisation de projet, un contrôle de tous les facteurs susceptibles d'affecter son comportement dans le temps. L'expérience montre que les facteurs d'influence, de très loin les plus importants en matière de durabilité et qui doivent donc faire l'objet d'un contrôle suivi, sont la composition du béton (teneur en ciment et rapport eau-ciment), la compacité du béton et la protection du béton frais en cours de durcissement.

Le but de ce mémoire est de trouver une méthode de contrôle de durabilité des bétons à partir de l'essai de perméabilité à l'eau par le teste de cette méthode et cette appareillage sur n'importe quel béton (bétons mal formulé, et des bétons très bien formulés, des bétons sains et des bétons soumis à l'agressions)

En outre, la norme EN206-1 permet aujourd'hui de prescrire des bétons à performances en intégrant des spécifications d'absorption d'eau sous un gradient de pression. Maîtriser l'absorption d'eau du béton peut paraître simple, mais encore faut-il que chacun apporte sa pierre à l'édifice. La durabilité des ouvrages en béton est pourtant à ce prix.

A la lumière des connaissances actuelles sur le sujet, le moyen le plus efficace pour aboutir à une modélisation (contrôle du béton) c'est la méthodologie des plans d'expérience

Mots clés :

Durabilité, contrôle, La compacité, perméabilité, porosité.

ABSTRACT

The durability of concrete requires efficient and effective control of structures and structures, particularly engineering structures, tunnels, dams, etc.

This requires, before any project is carried out, a control of all the factors likely to affect its behavior over time. Experience shows that the influencing factors, by far the most important in terms of durability and which must therefore be monitored closely, are the composition of the concrete (cement content and water-cement ratio) , the compactness of the concrete and the protection of the fresh concrete during hardening.

The purpose of this thesis is to find a method of controlling the durability of concrete from the water permeability test by testing this method and this equipment on any concrete (poorly formulated concrete, and very well formulated concrete, sound concrete and concrete subject to aggression)

In addition, the EN206-1 standard now makes it possible to specify performance concretes by incorporating specifications for water absorption under a pressure gradient. Controlling the water absorption of concrete may seem simple, but everyone still has to make their own contribution. However, the durability of concrete structures comes at this price.

In the light of current knowledge on the subject, the most effective way to achieve modeling (concrete control) is the methodology of experimental designs.

Keywords :

Durability, control, compactness, permeability, porosity

INTRODUCTION

L'une des propriétés essentielles des matériaux et des éléments de construction est leur durabilité. C'est pourquoi les problèmes de durabilité des matériaux ont toujours eu une place centrale dans la recherche dans le secteur de la construction. Et cela concerne tous les pays.

La durabilité d'un ouvrage caractérise sa capacité à conserver dans les conditions prévues les fonctions d'usage pour lesquelles il a été conçu (fonctionnement structurel, sécurité, confort des usagers...) et à maintenir son niveau de fiabilité et son aspect, dans son environnement, avec des frais et maintenance et d'entretien aussi réduit que possible.

La durabilité minimum d'une structure ou d'une pièce est en général imposée par le maître d'œuvre. Il convient de sélectionner des produits qui ont une durée de vie minimum au moins supérieure à celle imposée.

La durabilité d'une structure composite dépendra de l'environnement dans lequel, elle se trouve, des évolutions de son niveau de chargement, de la façon dont elle a été réalisée et des matériaux utilisés. Dans des environnements classiques, une structure composite peut raisonnablement avoir une durabilité supérieure à 120 ans pour les grands ouvrages d'art.

Les constructions, quelle que soit la nature de l'ouvrage, sont soumises à des agressions (physiques, mécaniques, chimiques...) c'est-à-dire aux charges auxquelles il est soumis, ainsi qu'aux actions diverses telles que le vent, la pluie, le froid, la chaleur, le milieu ambiant... tout en conservant son esthétisme.

Ces agressions peuvent altérer les matériaux, et engager la durabilité des structures, Ces aléas et le temps qui passe affectent inégalement les matériaux et nous parlons alors de pathologie de la construction.

Pour évaluer la durabilité "potentielle" d'un béton, il est nécessaire de connaître les mécanismes susceptibles de conduire à sa dégradation et d'étudier la résistance du matériau vis-à-vis de ces dégradations.

Si l'on exclut, d'une part les événements accidentels, et d'autre part les effets à long terme des sollicitations mécaniques, tels que la fatigue due à des sollicitations répétées ou le fluage pouvant engendrer des pertes de précontrainte ou encore l'abrasion, la durée de vie des ouvrages en béton armé ou précontraint peut être limitée par:

□ la pénétration d'agents agressifs qui peut conduire à l'amorçage (et au développement) du

processus de corrosion des armatures,

□ les réactions chimiques internes, 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,

□ Les cycles de gel-dégel qui entraînent gonflements et fissuration du béton par gel interne et un écaillage des surfaces exposées aux sels de déverglaçage.

Aujourd'hui Les recherches et les études touchant à la durabilité des bétons qui ont mis en évidence les indicateurs de durabilité des bétons : 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).

Afin d'évaluer la durabilité d'un matériau et de prédire la durée de vie d'un ouvrage, des modèles (d'écrivant) décrivant les phénomènes de transport des fluides sont donc nécessaires. Dans notre projet nous avons fait le choix de l'essai de la perméabilité à l'eau comme un indicateur de durabilité. La perméabilité à l'eau est donc définie comme l'aptitude du matériau à se laisser traverser par un fluide sous un gradient de pression.

Les perméabilités mesurées au laboratoire dépendent des conditions expérimentales qu'il convient de fixer avec soin si l'on veut procéder à des comparaisons entre différents béton qui sont fabriqués à partir des matériaux locaux (wilaya de M'sila).

L'objectif de ce mémoire est d'élaborer et modéliser une procédure d'essai de contrôle de durabilité des bétons à partir de l'essai de perméabilité à l'eau.

Mais est ce que cette procédure expérimentale basée sur l'essai de perméabilité sur éprouvettes en béton peut être un moyen de contrôle efficace de durabilité ?

PROBLEMATIQUE

La problématique générale de ce mémoire concerne la durabilité des bétons et plus particulièrement les transferts de matière. Ils peuvent être caractérisés par la perméabilité et la diffusion. L'étude de perméabilité est considérée en un transport sous gradient de pression .

dans ce travail, à répondre à un enjeu scientifique lié à la pénétration d'un agent agressif pour les bétons: les chlorures. Les sulfates et d'autres agents agressifs.

Avant de préciser les objectifs généraux de ce mémoire d'élaborer et modéliser une procédure d'essai de contrôle de durabilité des bétons à partir de l'essai de perméabilité à l'eau.

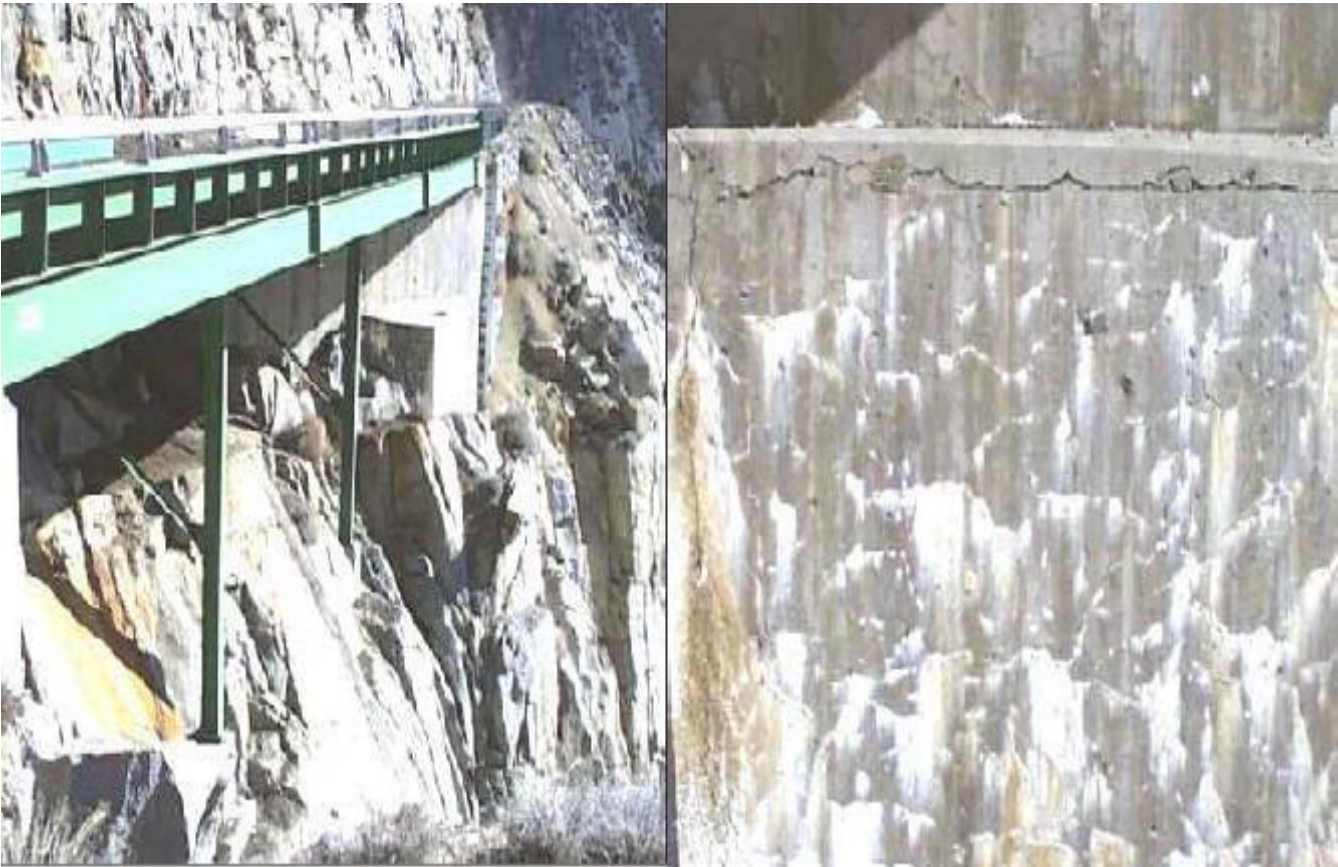


Figure : Des cas pathologiques d'éléments en béton en contact de sulfate.

CHAPITRE I :

Les pathologies des bétons

Introduction

Les structures en béton armé sont souvent affaiblies par les pathologies qui les affectent Durant leur vie, ceci est dû à l'environnement qui n'a pas été pris en considération. La pathologie qui affecte le béton, et surtout, ceux qui sont classées dangereuses seront la cause de son effondrement si elles sont ignorées. Pour ne pas arriver à ce stade on doit freiner sa progression ou la neutraliser le plus vite possible en prenant les mesures nécessaires qui s'imposent.

Dans ce chapitre nous parlerons de ces pathologies; comment sont détectées et leurs causes d'yêtre.Le diagnostic est l'étape essetielle dans le processus d'entretien de la structure en béton armé, c'est pour celà on a donné une grande importance à cette phase. Parce que un bon diagnostic nous amène à la décision adéquate pour que la pathologie si elle existait sera soignée et empêchée de se réponde dans l'élément et structure restera résistante et saine.

I.Généralité sur les de béton :

Le matériau béton, est devenu irremplaçable dans le domaine de la construction, pour des raisons économiques et techniques. Simple en apparence, il est en réalité très complexe, avec une diversité d'applications et de méthodes de formulations. C'est le matériau le plus utilisé au monde environ 7 milliards de mètres cubes de béton sont mis en oeuvre annuellement. La qualité et le potentiel du matériau béton dans la structure dépend bien sur, des matériaux de base entrent dans la formulation mais également des opérations de: malaxage, mise en oeuvre, vibration et cure (protection contre la desiccation

II. DESCRIPTION DES PATHOLOGIES DU BÉTON

Dans cette partie, nous intéresserons aux principales pathologies apparaissant dans le béton durci. Ces pathologies ont des causes et conséquences variables. Elles sont décrites dans ce qui suit : dégradations mécaniques, chimiques, et physiques.

II.1: Dégradations mécaniques:

Ces désordres se manifestent fréquemment par l'apparition de fissures, éventuellement aggravées par une déformation inacceptable de la structure. Lorsque des contraintes brusques, comme un impact ou une explosion, provoquent une dislocation plus ou moins importante du béton, le lien entre les dégâts et leur cause est généralement évident. Avant de procéder à des réparations, on s'assurera toutefois que d'autres mécanismes de dégradation actifs ne doivent pas être traités au cours des travaux.

Des désordres résultant d'une faible surcharge permanente ou d'un tassement des appuis sont en effet plus lents à se manifester, notamment en raison du fluage du béton. Outre une inspection in situ, une étude de stabilité sera nécessaire afin d'évaluer l'action d'une surcharge

II.2: Dégradations Chimiques:

II.2.1: La corrosion

1) Aspect physico-chimique de la corrosion

Avant d'être placée dans le coffrage, une armature en acier est rouillée, parce qu'elle a d'abord été exposée à l'atmosphère. Lorsque le béton frais est mis en place autour de cet acier, l'eau de gâchage pénètre à travers les pores de la rouille, où elle forme progressivement de la ferrite de calcium hydraté ($4\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 13\text{H}_2\text{O}$). Mais surtout, cette eau réagit avec l'acier et forme sur celui-ci une fine couche d'hydroxydes de fer $\text{Fe}(\text{OH})_2$ et de calcium $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Tous ces produits au voisinage de l'acier donnent à la solution interstitielle du béton un pH élevé, de l'ordre de 13 qui permet d'assurer la protection de l'acier par passivation. Une telle protection disparaît si la teneur en chlorure dépasse un certain seuil ou si la profondeur de carbonatation dépasse l'enrobage.

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 (**Figure 1.1**):

- Phase d'initiation (ou d'incubation) : 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 dépassement 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. (**yacine, et al., 2018**)

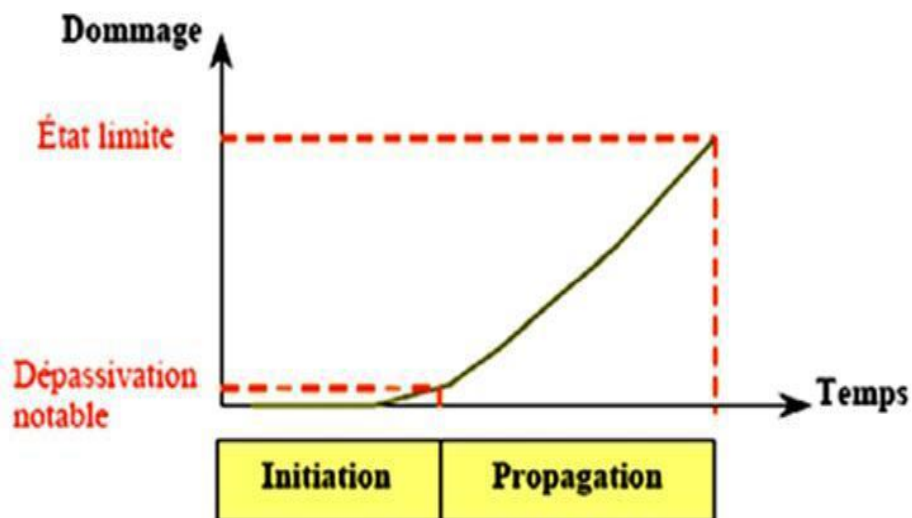


Figure 1.1 : Corrosion au fil du temps (**yacine, et al., 2018**)

3) 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, la 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. le schéma suivant décrit. (yacine, et al., 2018)



Figure 1.2: corrosion de l'armature. (yacine, et al., 2018)

4) Désordres dus par la corrosion

La corrosion des armatures a souvent pour conséquences des symptômes visibles sur le Parement, tels que fissurations au droit des armatures, décollements de béton, éclats et Épaufures, mais attention, d'autres mécanismes peuvent être à l'origine de ces dégradations « Les fissures créées par le gonflement de la barre consécutif à la formation de la rouille sont à Différencier des fissures de retrait et des fissures de flexion ou d'effort tranchant.....etc ». (salim, 2012)

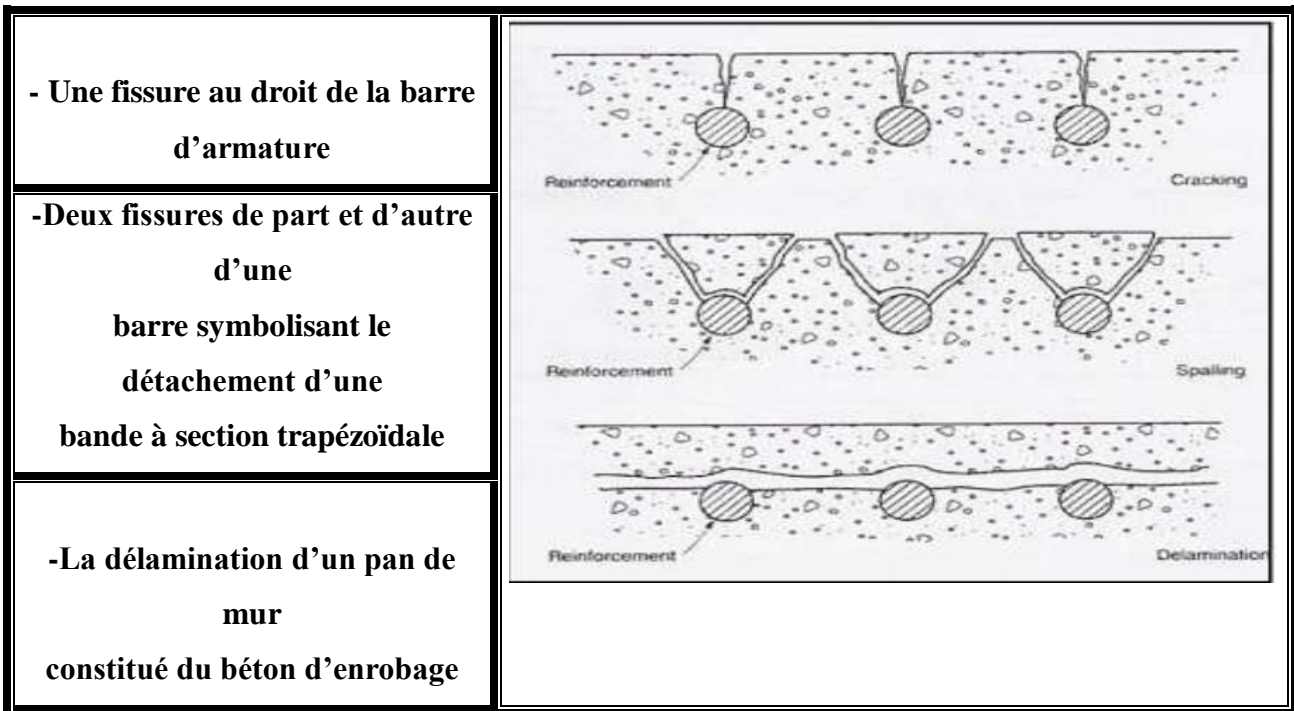


Figure 1.3 : Types de fissures développées lors de la corrosion des aciers d'armature. (salim, 2012)

5) 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 épaufrures, des décollements ... (yacine, et al., 2018)

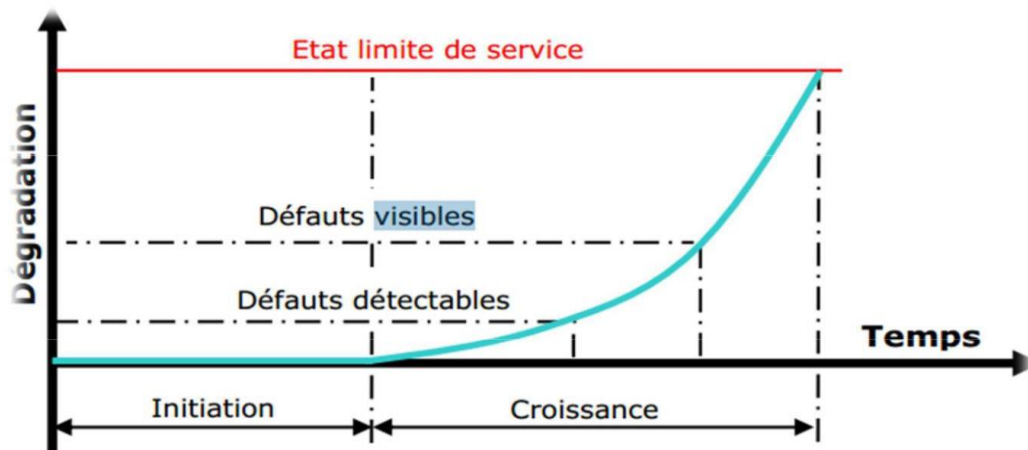


Figure 1.4: Évolution de la dégradation d'une structure en béton armé. (yacine, et al., 2018)

GENERALITE SUR LES PONTS

Un pont est un ouvrage qui permet de franchir ou d'enjamber tout obstacle naturel (oued, ravin) ou voie de circulation (route, autoroute, chemin de fer, canal). Les aqueducs pour le passage de canalisations et les passerelles pour piétons sont considérés aussi comme des ouvrages de franchissement pour l'un ou l'autre de ces obstacles.

- **Actions et pathologies agissants sur les ponts :**

- **Action Des Eaux**

Le béton n'est pas le seul matériau vulnérable aux processus physiques et chimiques de dégradation liées à l'eau. Par conséquent, il est souhaitable d'examiner de manière générale les caractéristiques de l'eau qui font le principal agent de la destruction des matériaux solides. L'eau se trouve sous diverses formes, telles que l'eau de mer, les eaux souterraines, eaux de rivière, l'eau de lac, la neige, la glace et la vapeur, est sans doute le liquide

le plus abondant dans la nature. Les molécules d'eau sont très petites et, par conséquent, sont capables de pénétrer dans les pores très fins ou des cavités. En tant que solvant, l'eau est réputée pour sa capacité à dissoudre plus de substances que tout autre liquide connu. Cette propriété représente la présence de nombreux ions et gaz (gaz carbonique en forme de H_2CO_3) dans certaines eaux qui, à leur tour, deviennent contribué à provoquer la décomposition chimique des matériaux solides. (salim, 2012)

En outre, l'eau a la plus forte chaleur de vaporisation parmi les liquides commune, par conséquent, à la température ordinaire, il a tendance à exister à l'état liquide dans un matériau poreux, plutôt que de vaporisation et de laisser les matériaux secs. Par ailleurs, avec des solides poreux, les mouvements de l'humidité interne et les transformations structurelles d'eau sont connus pour provoquer des changements de volume perturbateurs de nombreux types

Par exemple, la congélation de l'eau en glace (voire gel dégel), la formation d'une structure ordonnée

de l'eau dans les pores fins, le développement de la pression osmotique due à des différences de concentration ionique, et l'accumulation de pression hydrostatique par des pressions de vapeur différentielle peut conduire à de fortes contraintes internes. (**salim, 2012**)

- **Action de l'eau de mer**

La plupart des eaux de mer sont assez uniforme dans leur composition chimique, qui se caractérise par la présence d'environ 3,5 % des sels solubles en masse. Les concentrations ioniques de Na^+ et Cl^- sont les plus élevés, généralement 11 000 et 20 000 mg / l, respectivement. Cependant, du point de vue de l'action agressive sur les produits d'hydratation de ciment, des quantités suffisantes de Mg^{2+} et SO_4^{2-} sont présents, généralement 1400 et 2700 mg / L respectivement.

Le béton exposé à l'environnement marin peuvent se détériorer en raison des effets combinés de l'action chimique des constituants d'eau de mer sur les produits d'hydratation du ciment, alcali granulat d'expansion (lorsque des granulats réactifs sont présents), la pression cristallisation des sels dans le béton, si une face de la structure est soumis à de mouillage et d'autres à des conditions de séchage, action du gel dans les climats froids, la corrosion de l'acier encastré dans les membres armé ou précontraint, et l'érosion physique due à l'action des vagues et des objets flottants. Attaque sur le béton en raison de l'une de ces causes tend à augmenter la perméabilité, non seulement rendre le matériel de plus en plus sensibles à d'autres mesures par le même agent destructeur, mais aussi par d'autres types d'attaque, la figure 06 illustres les différentes attaque de l'eau de mer. (**salim, 2012**).

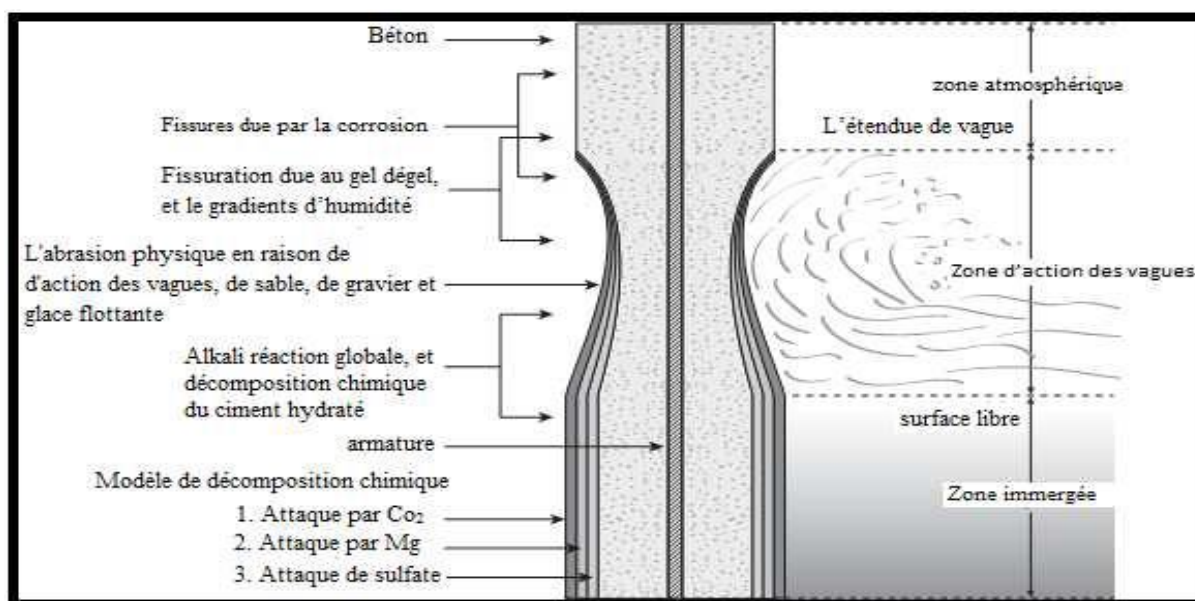


Figure 1.5: Représentation schématique d'un cylindre en béton armé exposés d'eau de mer (salim, 2012)

- **Retours d'expérience à l'étranger**

Le recours à des systèmes permanents de suivi de l'état des structures est reconnu comme étant un outil pertinent pour la prévention des désordres dus aux phénomènes de corrosion des armatures non seulement pour permettre aux gestionnaires d'ouvrage d'optimiser la planification des opérations de maintenance

et de réparation mais également pour alimenter les modèles prédictifs par des données in situ permettant d'estimer le développement de la corrosion et la durée de vie des structures en béton armé. De nos jours, les capteurs de corrosion peuvent être incorporés directement lors de la construction de nouvelle structure (**Figure 1.6**) ou intégrés dans des structures existantes. (MAI-NHU, Décembre 2015)



Figure 1.6 : L'aéroport de Funchal sur l'île de Madère (MAI-NHU, Décembre 2015)

En Europe, de nombreux ouvrages sont équipés de systèmes de corrosion permanents. Au Portugal par exemple, le retour d'expérience vis-à-vis des capteurs de corrosion a fait l'objet d'un rapport technique dans le cadre du projet européen DURATINET [DUR 12-2].

Exemple d'application de systèmes permanents de suivi de corrosion sur des structures nouvelles

En 2000, la piste d'atterrissage de l'aéroport de Funchal sur l'île de Madère a été agrandie en construisant un pont sur la mer de 1020 mètres de long supportée par 180 piliers de 70 m de hauteur (**Figure 1.7**). (MAI-NHU, Décembre 2015)



Figure 1.7 : Capteur de corrosion intégré lors de l'extension de la piste d'atterrissage de L'aéroport de Funchal (MAI-NHU, Décembre 2015)

II.2.2: L'alcali-réaction:

- **Définition :**

L'alcali-réaction, que l'on appelle aussi communément réaction alcali-granulat, désigne la réaction chimique entre la silice amorphe ou mal cristallisée contenue dans les granulats réactifs et certains ions de la solution interstitielle. Les conséquences macroscopiques de la réaction sont le gonflement des ouvrages atteints qui entraînent de la fissuration et la chute des caractéristiques mécaniques du béton.

Ces phénomènes sont préoccupants pour les Gestionnaires des structures atteintes car ils mettent en péril la sécurité des personnes et l'exploitation des ouvrages. De plus, il n'existe aucun moyen d'arrêter la réaction. Ainsi, la prédiction de l'évolution du gonflement et des dégradations des ouvrages atteints et l'évaluation de l'efficacité et de la périodicité des opérations d'entretien sont des points cruciaux. (abdelmohcene, 2016) .



Figure 1.8: réactions alcalis-granulats. (abdelmohcene, 2016)

II.2.2.1: Les différents types d'alcali-réactio:

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

- Réaction alcali-silice (RAS) :

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

- Réaction alcali-silicate:

La différence essentielle avec la réaction alcali-silice réside dans le fait que les granulats réactifs ne sont pas formés de silice libre mais sont des silicates variés (phyllosilicates, tecto-silicates, sains ou altérés). En ce qui concerne les produits de la réaction, on admet qu'ils sont voisins de ceux apparus dans la réaction alcalisilice; des études plus anciennes signalaient que l'on n'observe pas la production de gels siliceux.

- Réaction alcali-carbonate:

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

(abdelmohcene, 2016)

II.2.2.2: Conditions d'apparition de l'alcali-granulat:

Trois conditions doivent être simultanément remplies pour que ces réactions puissent avoir lieu. Il faut que :

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

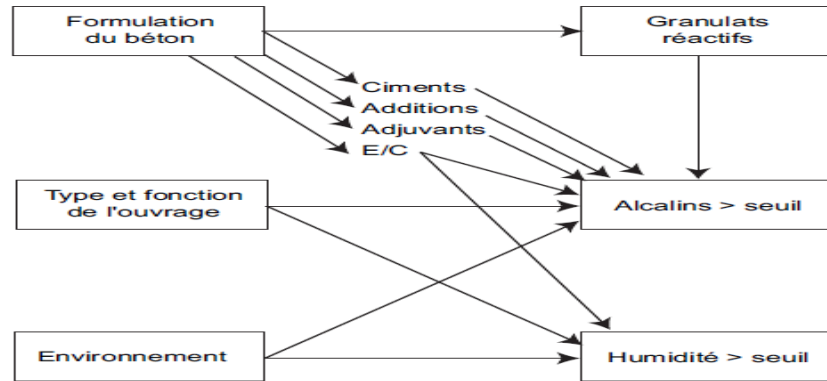


Figure 1.9 : facteurs intervenant sur l'apparition des 3 conditions nécessaires au déclenchement de l'alcali-réaction. (abdelmohcene, 2016).

II.2.2.3: Source de cette attaque:

Ces alcalins proviennent d'une part du ciment, et d'autre part, des autres constituants du béton (granulats, eau de gâchage, adjuvants,...). Initialement, ils sont présents à l'état diffuse dans les phases anhydres, et ils se dissolvent à l'état basique ($K+OH^-$, $Na+OH^-$) lors de l'hydratation. [La Pathologie et manifestations externes :La dégradation du béton des ouvrages résultant du phénomène d'alcali-réaction a été répertorié dans de nombreux pays.

En général les désordres apparaissent à des échéances variables de deux à dix ans ou plus.

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

- Une fissuration ;
- Un faïençage à mailles plus ou moins larges ou en étoile ou une fissuration orientée suivant une direction fonction de la distribution des armatures.

- Des exsudations blanches formées de calcite et parfois de gels translucides.

Des pustules ou cratères avec des éclatements localisés en forme de petits cônes résultant de la réaction de gros granulats superficiels qui sont visibles au fond des cratères d'éclatement

- Des mouvements et déformations,
- Des colorations ou décolorations. (abdelmohcene, 2016)



a) Fissuration sévère d'un massif de fondation. b) Exhaussement des bordures de crête sur l barrage du Chambone

Figure 1.10 : Exemples du bétons dégradés par l'alcali-réaction. (abdelmohcene, 2016)

II.2.3:Attaque sulfatique :

En fonction de la source des ions, l'attaque sulfatique est classée en deux types :

- l'attaque interne ou les sulfates sont déjà présents dans le mélange avant l'hydratation du ciment.

- l'attaque externe dans le cas où le béton est exposé à un environnement chargé en sulfates.

(SIAD, 27 juin 2018)



Figure 1.11 : attaques sulfatiques (IHAB, 2015/2016)

II.2.3.1: Les réactions sulfatiques externes:

1) Les sources de sulfates

Dans le milieu extérieur au béton, les principales sources de sulfates sont:

• Les sols

Les sulfates constituent un élément nutritif des plantes. Leur concentration est généralement assez faible (entre 0.01 et 0.05 % du sol sec). Toutefois, dans certaines régions où le sous-sol peut contenir du gypse ou de l'anhydrite (sous sol parisien par exemple), les valeurs peuvent être bien plus élevées (supérieures à 5 %).

Les sols alluviaux et argileux sont également susceptibles de contenir des pyrites (FeS₂) qui peuvent s'oxyder en sulfates au contact de l'air et de l'humidité.

Les sulfates peuvent aussi provenir de la décomposition biologique au contact de l'air de substances organiques contenant du soufre (engrais, plantes ...). (Mohamed, 2017-2018).

• Les eaux souterraines séléniteuses

Les eaux souterraines et les eaux d'infiltration venant en contact avec les sols sulfatiques se chargent en ions SO₄²⁻. La concentration en ions de l'eau va dépendre de la solubilité du sulfate qui dépend de la température et de la présence d'autres sels. Les sulfates présents sont souvent des sulfates alcalins ou de magnésium (les concentrations élevées en sulfates dans des eaux souterraines peuvent aussi être la conséquence de pollutions industrielles). (Mohamed, 2017-2018).

• L'eau de mer

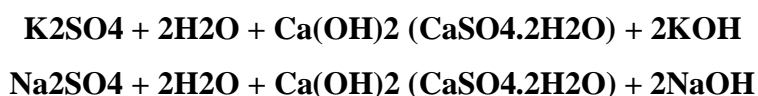
L'eau de mer renferme des ions variés mais c'est l'action du sulfate de magnésium qui peut entraîner le plus de désordres d'origine chimique dans un béton. (Mohamed, 2017-2018).

2) Les mécanismes de réaction

Schématiquement, la formation de l'ettringite se produit en deux étapes :

a) Formation de gypse secondaire

Les sulfates peuvent pénétrer dans les pores du béton sous forme ionique. Ils réagissent dans la pâte de ciment avec la portlandite pour former du gypse, en solution aqueuse, et de l'hydroxyde alcalin. Le mécanisme est le suivant :

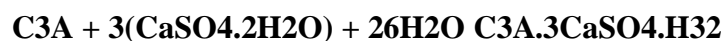


Le volume du solide précipité représente un peu plus du double de celui des produits de départ et une expansion peut se manifester.

b) Formation d'ettringite secondaire

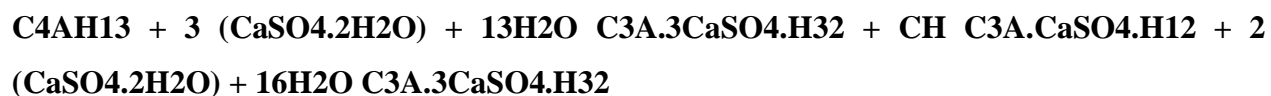
Ce gypse secondaire réagit avec les aluminates présents dans la pâte de ciment durcie pour former de l'ettringite secondaire. Plusieurs scénarios sont envisageables:

- À partir des reliquats de C3A anhydre:



Le volume molaire du produit formé est trois fois plus élevé que celui du produit initial.

- à partir de l'aluminat tétracalcique hydraté (C4AH13) ou du monosulfoaluminate de calcium hydraté (C3A.CaSO4.H12) :



Le volume molaire du produit formé peut atteindre huit fois celui du produit initial. (Mohamed, 2017-2018).

3) Les mécanismes d'expansion de l'ettringite

Différentes théories ont été proposées pour expliquer le mécanisme suivant lequel l'ettringite provoque l'expansion béton : - théorie des pressions de cristallisation qui suggère que la pression engendrée par la précipitation d'un sel quelconque est liée au taux de sursaturation de la solution ;

- théorie de la double couche électrique de Mehta où les forces d'expansion sont dues à la répulsion électrostatique entre les particules d'ettringite « colloïdale » chargées négativement, accompagnée d'une forte absorption des molécules d'eau polaires ;

- gonflement par effet stérique étudié par Cottin et Li basé sur le fait que le volume des hydrates étant toujours supérieur au volume des anhydres dont ils sont issus, le composé néoformé, s'il ne dispose pas de l'espace nécessaire à sa formation, créera cet espace par augmentation du volume apparent du système. Les trois théories peuvent être synthétisées de la manière suivante:

- l'intensité de la force développée par la croissance d'un cristal dépend du degré de sursaturation de la solution

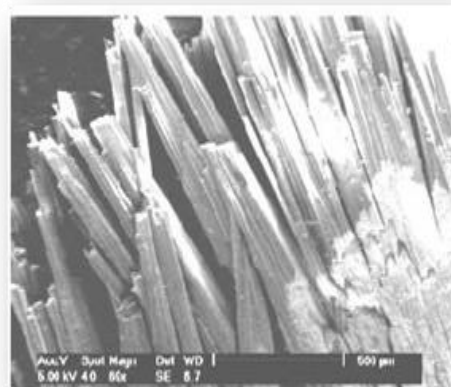


Figure 1.12: La formation de l'ettringite secondaire

- le cristal ne croîtra pas là où il doit exercer une pression pour se développer s'il a la possibilité de croître dans des espaces libres (pores, fissures)

- pour un cristal se développant dans un pore, dans certaines conditions d'équilibre, des pressions peuvent s'exercer sur les parois du pore si son rayon est inférieur à une certaine dimension (environ 100 nm). Les contraintes générées localement s'exercent sur des domaines de plusieurs dizaines à centaines de micromètres, c'est à dire dans des espaces relativement restreints et confinés. De l'ensemble de ces considérations il ressort que les pressions de gonflement sont régies par deux paramètres majeurs : le degré de sursaturation local et le confinement dans des régions microporeuses de la pâte de ciment durcie, le confinement impliquant un degré de sursaturation élevé.

Dans les ciments hydratés, des conditions de sursaturation peuvent exister au niveau des sites réactifs (aluminates et silicates anhydres et hydratés) où, au contact des sulfates venus de l'extérieur, l'ettringite précipite instantanément in situ, suivant un processus dynamique d'échange entre la phase liquide interstitielle et les phases solides.

Les conditions nécessaires au gonflement sont particulièrement favorables dans les liants riches en portlandite où les ions Ca^{2+} libérés par la dissolution de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ et des C-S-H peuvent réduire la solubilité de l'ettringite.

Il faut aussi tenir compte des alcalins présents dans la solution interstitielle du béton qui peuvent avoir une influence sur les conditions de stabilité du minéral en favorisant son passage en solution. (Mohamed, 2017-2018).

II.2.3.2:-Les réactions sulfatiques internes :

Il convient de séparer la formation d'ettringite différée, consécutive à un échauffement thermique, de la réaction liée à la présence dans les bétons de composants qui peuvent être la source des sulfates en excès.

- **Réaction sulfatique interne avec source interne de sulfates**

A l'intérieur même du béton, les granulats peuvent fournir des sulfates. C'est essentiellement le cas des granulats contenant des pyrites (sulfures de fer) plus ou moins bien cristallisées qui peuvent s'oxyder, ou des granulats gypseux (la teneur en soufre total des granulats, exprimée en SO_3 , est limitée en France à 0.4 %).

Les sulfates peuvent être présents sur les granulats suite à une pollution accidentelle (déchets de plâtre par exemple).

Les phénomènes de dégradation sont équivalents à ceux observés pour les réactions sulfatiques externes. Toutefois, les dégradations sont beaucoup plus rapides.

- **Cas particulier de l'ettringite différée**

Une réaction sulfatique peut aussi se produire sans apport de sulfates : C'est la Réaction Sulfatique Interne (ou RSI en France), ou la Delayed Ettringite Formation (ou DEF suivant la terminologie anglo-saxonne).

se rencontrer lors des traitements par étuvage ou au coeur de pièces massives.

Sous ces conditions, l'ettringite primaire est instable et ne se forme pas ou se décompose. Le retour à la température ordinaire peut provoquer dans certains cas la formation de cette ettringite différée pouvant avoir un caractère expansif. Il faut la conjonction de plusieurs paramètres pour que cette réaction s'amorce et se développe :

- l'eau et l'humidité : l'eau est le milieu réactionnel nécessaire au déroulement de la réaction. Elle intervient dans les processus de transfert et dans la formation des produits de réaction. Ainsi, la RSI touche essentiellement les parties d'ouvrages au contact avec de l'eau ou soumises à des venues d'eau

- la température et sa durée de maintien : un fort échauffement du béton (> 65°C) pendant sa prise et son durcissement est une condition indispensable à cette réaction. Ceci peut se produire dans certains bétons étuvés ou dans des pièces massives d'ouvrages.

- les teneurs en sulfates et en aluminates du ciment : les sulfates et les aluminates interviennent directement dans

le mécanisme réactionnel pour former l'ettringite. Ainsi, les ciments à fortes teneurs en sulfates (teneur en $SO_3 \geq 4\%$) et en aluminates sont ceux pour lesquels le risque de RSI est le plus élevé ;

- les teneurs en alcalins du béton : l'ettringite est plus soluble quand le taux d'alcalins augmente. Ainsi, plus la teneur en alcalins est élevée, plus la température conduisant à la formation de la RSI est faible.

L'existence d'une réaction alcali-granulats est également susceptible d'accentuer l'expansion due à la formation d'ettringite différée: en effet, la consommation des alcalins par la réaction alcali-granulats conduit à une diminution de la solubilité du composé et facilite sa précipitation.

On considère que les sulfates, combinés dans un premier temps sous forme de monosulfoaluminates ou adsorbés par les C-S-H, réagissent avec des aluminates "libres" pour former une ettringite dite "différée", elle aussi expansive mais d'apparence amorphe. Cette

ettringite différée peut se transformer ultérieurement en ettringite secondaire qui précipite dans les défauts de la structure.

- **Cas particulier de la thaumasite**

La thaumasite, de formule générale $\text{CaSiO}_3 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 15\text{H}_2\text{O}$, se présente sous forme d'aiguilles souvent plus trapues que l'ettringite. Elle peut être rencontrée dans les cas d'attaque par les sulfates.

Contrairement à l'ettringite, dans le cas de la **thaumasite**, les composés subissant les transformations les plus importantes sont les **C-S-H**, qui sont consommés dans les réactions avec les sulfates et les carbonates. Le résultat observé est un composé riche en

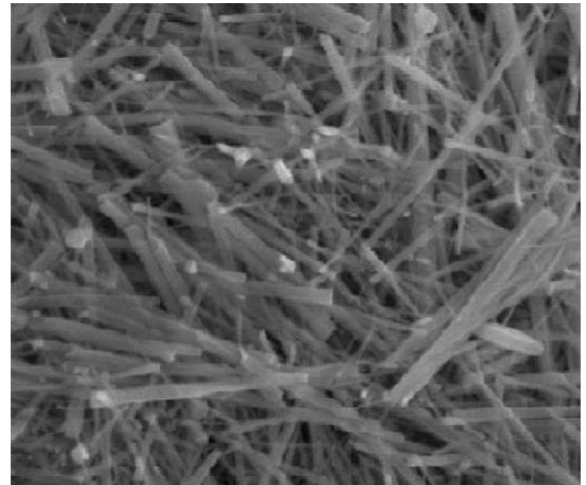
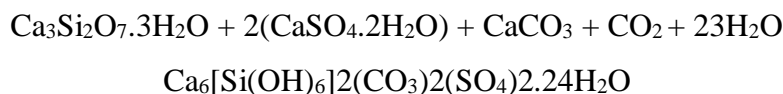


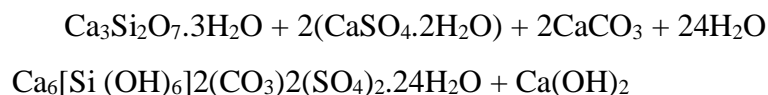
Figure 1.13: la thaumasite

silice, en carbonate et en sulfate **mais ne** contenant pas (ou très peu) d'alumine. Par ailleurs la désagrégation du béton se traduit par la formation d'un produit sans cohésion, de consistance molle, résultant essentiellement de la dégradation des C-S-H.

La réaction chimique directe à partir des C-S-H peut s'écrire :



ou encore :



Les conditions de formation de la thaumasite sont principalement:

- une température basse ($< 15^\circ\text{C}$) ;
- une humidité relative élevée ;
- une source de carbonate (CO_2 atmosphérique, carbonates...) ;
- une source de sulfate (endogène ou exogène) ;
- une source de silice (C-S-H, minéraux argileux...) ; - la présence d'une petite quantité d'alumine.

La formation du composé est associée à des dégradations du béton ou à des gonflements de sols ou remblais contenant les produits nécessaires à la réaction. Elle a pu être associée également à

la présence de fines calcaires dans les bétons (granulats, fillers).

Les principales mesures préventives sont :

- la confection de bétons compacts ;
- éviter dans la mesure du possible la présence de fines calcaires dans le béton ;
- choisir un ciment adapté, sachant que les CEM I ES à faible teneur en C3A ne permettent pas d'éviter le risque thaumasite ; les ciments de type CEM III à forte teneur en laitier de haut fourneau sont résistants à ce type d'attaque .
- éviter autant que possible les infiltrations d'eau. (Mohamed, 2017-2018).

III.2.4:Attaques Acides :

Le béton présente un caractère basique élevé induit par les composés hydratés de la pâte de ciment (la phase interstitielle contenue dans le béton a un pH très élevé).

Il peut donc présenter une certaine réactivité vis-à-vis des solutions acides telles que les pluies acides, les eaux naturelles chargées en dioxyde de carbone, les eaux résiduaires, les eaux des industries agroalimentaires ou Industrielles contenant des acides organique, les eaux chargées en acides minéraux, mais aussi les eaux pures. (Mohamed, 2017-2018).



Figure 1.14: Attaques acides. (Mohamed, 2017-2018).

III.2..41: Les différents types des acides:

1) les pluies acides (cas extrême des eaux douces) :

Les pluies dites « propres » ont généralement un pH compris entre 5,6 et 7. Elles n'ont pas d'effets nocifs sur le béton réalisé suivant les règles de l'art. Par contre, les pluies dites « acides », dont le pH peut descendre jusqu'à 4 et parfois moins, sont agressives. L'occurrence de ce type de pluies est en relation principalement avec la pollution par les oxydes de soufre SO_x d'origine industrielle ou domestique (combustion des charbons, fiouls, carburants) qui représentent environ un tiers de tous les oxydes de soufre de l'atmosphère. Le résultat est la formation d'acide sulfurique très hygroscopique qui se condense rapidement en gouttelettes susceptibles de contenir des métaux lourds (mercure, plomb, argent, cadmium) et des sulfates (d'ammonium, de sodium). Les oxydes d'azote NO_x également présents se transforment en acide nitrique. La composition et le pH des pluies peuvent varier en fonction de la saison et des conditions locales. Les pluies acides peuvent provoquer des dégradations superficielles suivant des processus plus ou moins complexes faisant entrer en jeu des phénomènes de dissolution dus aux acides (sulfurique, nitrique, carbonique) et d'expansion dus à la cristallisation de sels, tels que le gypse (salissures des façades) ou l'ettringite. (abdelmohcene, 2016).

2) Les eaux naturelles

Leur agressivité dépend de trois paramètres qui sont le pH, la dureté et la teneur en dioxyde de carbone agressif :

- le **pH** d'une eau indique son caractère acide ou basique (eau acide si elle renferme du dioxyde de carbone libre, des acides minéraux ou des sels d'acides forts et de bases faibles, eau basique si elle contient des carbonates, des bicarbonates et des hydroxydes) .

- **la dureté de l'eau**, ou titre hydrotimétrique (TH), est égale à la somme des concentrations en cations métalliques à l'exception de ceux des métaux alcalins (Na, K) et de l'ion hydrogène (la dureté est surtout due aux ions Ca⁺⁺ et Mg⁺⁺). Elle indiquera donc la teneur globale de l'eau en sels incrustants.

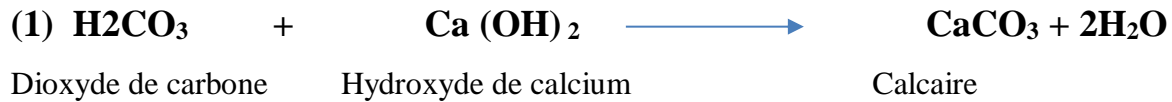
Fréquemment, la dureté est définie par le titre alcalimétrique complet (TAC) qui est égal à la somme des concentrations en alcalis libres [OH⁻], carbonates [CO₃⁻⁻] et bicarbonates [HCO₃⁻].

- **la teneur en dioxyde de carbone agressif**, capable de dissoudre le calcaire, est établie en faisant le bilan des différents états du CO₂ dissous dans l'eau. s'il y a **excès de CO₂ libre**, on a une dissolution par l'eau qui est qualifiée d'**agressive** .

- s'il y a un **déficit en CO₂ libre**, les bicarbonates sont transformés en carbonates qui précipitent et l'eau est qualifiée d'**incrustante**.

Les résultats de l'analyse d'une eau sont généralement exploités à partir d'abaques comme celui de TILLMANS.

Réactions



Lorsque de l'eau contenant du gaz carbonique entre en contact avec le béton, le gaz carbonique réagit avec l'hydroxyde de calcium pour former un calcaire presque insoluble, étanchant le béton.



Au cours d'une phase ultérieure, le gaz carbonique transforme le calcaire en bicarbonate de calcium. Ce produit de réaction très soluble dans l'eau (165 g/l) est facilement lessivé.

L'agressivité de l'eau dépend de la teneur en gaz carbonique et de la dureté de l'eau. Il est à noter que l'eau dure est, à teneur en gaz carbonique équivalente, beaucoup moins agressive que l'eau douce. (Mohamed, 2017-2018)

3) les eaux pures et les eaux douces

Les eaux pures et certaines eaux douces (TAC < 1 méq/l, CO₂ agressif compris entre 15 et 30 mg/l et pH compris entre 5.5 et 6.5) sont classées dans la catégorie des environnements faiblement agressifs (P18-011).

L'attaque du béton par les eaux pures et douces, débute par une dissolution de la portlandite, puis des silicates et des aluminates hydratés. L'attaque se fait par dissolution progressive du calcium ce qui provoque une perte de masse et une augmentation de la porosité

Cette attaque peut se traduire par une érosion progressive de la surface (contact superficiel de l'eau), mais elle peut entraîner un lessivage important du béton à coeur (pénétration d'eau agressive sous l'effet d'un gradient de pression hydraulique pour les barrages et les tunnels).

Dans le cas où le renouvellement d'eau agressive est limité, un processus de dissolution-précipitation est observé et la précipitation de carbonates accroît momentanément la compacité du béton.

En général, les bétons bien composés sont peu sensibles aux attaques par ces eaux. De même, les

ciments qui produisent peu de chaux (ciments aux pouzzolanes) résistent bien à la lixiviation des ions Ca^{++} . (Mohamed, 2017-2018)

III.2.3.2: Mécanisme d'attaque des acides :

Le béton est très alcalin en nature, il est extrêmement susceptible à l'attaque de l'acide. Le mécanisme pour ce processus est très simple. De façon générale, les réactions chimiques et/ou l'élimination physique n'endommage qu'un ou deux composants de la pâte de ciment.. (abdelmohcene, 2016)

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

TABLEAU 1.1: Composants du béton menacés par la corrosion. (abdelmohcene, 2016)

On distingue deux types de détérioration:

- L'agression résolvante.
- Le gonflement.

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 (IHAB, 2015/2016)



Figure 1.15 : lixiviation (IHAB, 2015/2016)

III.2.6: La carbonatation

La carbonatation du béton est un phénomène indissociable de ce matériau de construction. Pendant la durée de vie de l'ouvrage, le dioxyde de carbone présent dans l'atmosphère pénètre dans le béton à partir de la surface du matériau.

Le dioxyde de carbone peut alors réagir avec les produits résultant de l'hydratation du ciment. La carbonatation modifie progressivement la composition chimique et la microstructure interne du béton. Durant la vie de l'ouvrage, le béton piège ainsi du dioxyde de carbone à hauteur de 10 à 15 % du CO₂ émis lors de la décarbonatation du calcaire nécessaire à la fabrication du ciment.

Les ingénieurs ont, au cours du XX^e siècle, appris à maîtriser certaines conséquences problématiques du phénomène de carbonatation. À la fin de vie de l'ouvrage, la carbonatation peut, cette fois, être exploitée pour fixer du CO₂ dans la pâte de ciment durcie d'un béton de démolition. (IHAB, 2015/2016).

III.2.6.1: Les mécanismes de la carbonatation

L'atmosphère de notre planète contient en moyenne 0,03 à 0,04 % de CO₂. Cette concentration en dioxyde de carbone varie localement avec la température, la pression atmosphérique et la proximité éventuelle d'une agglomération.

Dans les zones fortement industrialisées, dans les parkings et aux abords des grands axes routiers, la quantité de CO₂ atmosphérique peut être multipliée par un facteur trois ou quatre pour atteindre 0,1 %. (IHAB, 2015/2016)



Figure 1.16: phénomène de la carbonatation. (IHAB, 2015/2016).

III.2.6.2: Les causes de la carbonatation:

Le CO₂ présent dans l'atmosphère peut être à l'origine d'une carbonatation des matrices cimentaires. Il se diffuse alors sous forme gazeuse dans la porosité du béton ou du mortier et se dissout en formant des acides au contact de la solution interstitielle contenue dans la pâte de ciment avec une prédominance de H₂CO₃, HCO₃⁻ ou CO₃²⁻ suivant la gamme de Ph.. (IHAB, 2015/2016)

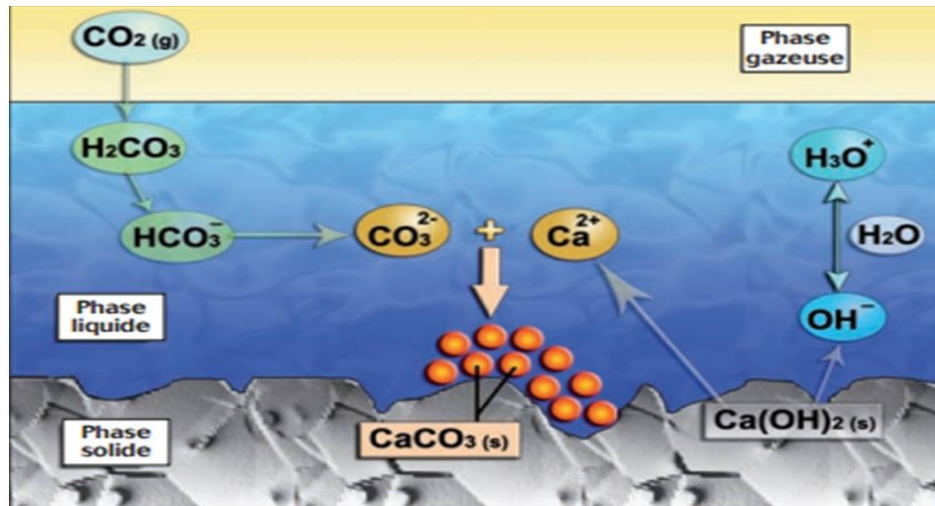


Figure 1.17 : Les phases de carbonatation. (IHAB, 2015/2016)

III.2.6.3: 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 (salim, 2012)..

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. (salim, 2012).

III.3: Dégradations Physique:

Les mécanismes de dégradation du béton sont liés à l'alternance de cycles répétés de phases de gel et de dégel. Le risque de désordres est d'autant plus élevé que le degré de saturation en eau du béton est important. C'est le cas notamment des parties d'ouvrages non protégées des intempéries et en contact direct avec des eaux saturées en sel. Une formulation mal adaptée et une mise en œuvre incorrecte du béton peuvent amplifier les dégradations.

Ce phénomène est aggravé, en surface, par l'application des sels de déverglaçage (ou fondants routiers), qui engendrent un accroissement des gradients de concentrations en sels, générant ainsi des pressions osmotiques plus élevées.

Les dégradations occasionnées par le gel peuvent être de deux types :

- Une microfissuration répartie dans la masse du béton (feuilletage parallèle aux parois), provoquée par un mécanisme de gel interne ;
- Un délitage de la zone superficielle (dégradation superficielle), appelé écaillage, sous l'effet conjugué des cycles de gel-dégel et des sels de déverglaçage.

Un gradient thermique important au voisinage de la surface, générée par l'application des sels à titre curatif sur un film de glace, amplifie la dégradation de surface.

Ces deux formes de dégradation peuvent se produire simultanément ou de manière indépendante, elles peuvent affecter la durabilité de la structure et en particulier la pérennité architecturale des ouvrages. (IHAB, 2015/2016).

II.3.1: Action de gel-dégel:

La plupart des dégradations sont observées dans le cas d'environnement correspondant à un gel sévère (zones de montagne et pays nordiques). (Mohamed, 2017-2018)

III.3.1.1 Mécanisme d'attaque:

Comme la plupart des matériaux poreux, le volume du béton augmente lorsqu'il est soumis au gel, cependant, il est généralement admis que le volume induit par la transformation de l'eau en glace (de l'ordre de 9%) n'est pas la cause principale de la dégradation du béton soumis au cycle gel-dégel. Or, durant l'hydratation de ciment, une quantité d'eau absorbée

chimiquement entre dans la formation du béton durci tandis que l'autre reste libre dans les pores capillaires, et ce n'est qu'au-delà d'un certain seuil critique de la quantité d'eau libre (nommé degré de saturation critique généralement de 90%) où le risque devient réel. Préalablement, dans de telles conditions, l'eau se transforme en glace dans les plus gros pores, et comme elle n'est pas pure à 100 % (solution saline), une séparation se produit entre la glace et le reste de la solution aqueuse (plus concentré). De plus, l'eau gèle à une température qui dépende fortement de la taille de pore (certaine eau liée dans les pores très fins est fortement structurée et il ne peut pas cristalliser que pour de température de -78 oC, notamment celle liée au C-S-H). Par conséquent, pour rétablir l'équilibre des concentrations, l'eau contenue dans les pores voisins le plus fins et qui n'a pas encore gelée, migre par osmose vers les pores le plus gros, ce qui engendre une pression nommée pression osmotique dans les réseaux capillaires. Si cette pression dépasse la résistance à la traction du béton, une fissuration de celui-ci peut se produire. (SIAD, 27 juin 2018)

De plus de la pression osmotique, un autre type de pression peut être considéré est celui lié à l'écoulement d'humidité de zones chaudes (pores plus fins) vers les zones froides (les gros pores) par le principe de thermodynamique. La pression développée par ce phénomène peut parfois dépasser la résistance à la traction du béton ce qui provoque des déformations locales et des fissurations du béton. (SIAD, 27 juin 2018)

La pression osmotique a tendance à créer un autre type de pression nommée hydraulique, provoquée par l'expulsion d'eau en excès dans les pores en raison de l'augmentation de volume qui s'accompagne la transformation de l'eau en glace (augmentation de 9%). Ce type de pression est fonction de la résistance à l'écoulement, de la vitesse de refroidissement et principalement de la distance du trajet entre le pore initial et le prochain vide susceptible d'accepter l'eau expulsée.

Si ce trajet dépasse une certaine distance, la pression hydraulique développée peut dépasser la résistance à la traction du béton, ce qui provoque des détériorations du béton, (SIAD, 27 juin 2018)

III.3.1.2: Facteurs influençant l'attaque par les cycles gel/dégel :

La détérioration cumulative du béton dépend du nombre de cycles gel-dégel. La sévérité de chaque cycle dépend aussi de plusieurs paramètres, notamment:

- La vitesse de refroidissement ou la formation de glace: plus elle est rapide, plus les pressions développées sont intenses.
- La température minimale atteinte : plus elle est basse, plus l'eau gelable est importante.

-
- Le degré de saturation du béton : plus il est fort, plus la dégradation est importante.
 - L'air entraîné : plus le volume d'air entraîné est important, plus le béton résiste au gel.
 - Le rapport E/C : plus il est élevé, plus la quantité d'eau gelable est importante, plus le béton ne résiste pas au gel.
 - La porosité et la perméabilité des granulats utilisés : plus elle est importante, plus les pressions développées sont intenses. (SIAD, 27 juin 2018)

II.3.2: Action des sels fondants:

L'emploi de fondants accroît les dégâts dus au gel en provoquant un écaillage de surface (affecte donc principalement la peau du béton qui est une zone particulièrement fragile, poreuse et saturée en eau).

Les mécanismes d'actions ne sont pas entièrement élucidés mais deux causes peuvent être retenues :

- le choc thermique : la fusion de la glace lors de l'application du fondant est une réaction endothermique (335 KJ/kg) qui va refroidir brutalement la surface du béton, créer ainsi un gradient thermique et donc des contraintes dans le matériau susceptibles d'engendrer une fissuration ;
- une action chimique liée à la pénétration des sels fondants (chlorures pour l'essentiel, sulfates). (Mohamed, 2017-2018)



Figure 1.18: Dégradation due aux sels de déverglçage. (IHAB, 2015/2016)

Conclusion :

Dans ce chapitre on a fait la connaissance aux différents types de pathologies du béton qui est, dans la majorité des cas, la cause essentielle dans l'effondrement des structures. Comme on a vu les causes et les types (dangereuses et la moins dangereuses) de ces pathologies. Evidemment la dangereuse est prise en considération pour la neutraliser, par conséquent, la moins dangereuse, devient dangereuse, si elle n'est pas prise en compte pour des éventuelles réparations plus tard.

La réparation des ouvrages est devenue aujourd'hui une nécessité économique et un impératif technique dans la gestion des patrimoines. Elle implique des entreprises spécialisées qui cumulent une grande expérience, une maîtrise des moyens matériels et jouissants de compétences humaines de qualité.

Elle permet à moindre cout de réhabiliter des ouvrages et assurer ainsi leur état de service initial ce qui nous permet de nous économiser par ne pas recourir à la construction nouvelle.

CHAPITRE II :

La perméabilité du béton.

Introduction :

Les études et recherches concernant la durabilité du béton connaissent un engouement et un développement accru, notamment à travers les effets résultants de l'exposition des ouvrages en béton, aux actions. **(Mehena, 2009)**

Un ouvrage doit résister au cours du temps aux diverses agressions, c'est-à-dire aux charges auxquelles il est soumis, ainsi qu'aux actions diverses telles que le vent, la pluie, le froid, la chaleur, le milieu ambiant... tout en conservant son esthétisme. Il doit satisfaire, avec un niveau constant, les besoins des utilisateurs au cours de sa durée d'utilisation. **(Infociments, 2018)**

1/Définition de la durabilité :

La durabilité d'un ouvrage caractérise sa capacité à conserver, dans les conditions prévues, les fonctions d'usage pour lesquelles il a été conçu (fonctionnement structurel, sécurité, confort des usagers...etc.) et à maintenir son niveau de fiabilité et son aspect, dans son environnement, avec des frais de maintenance et d'entretien aussi réduits que possible. **(Mehena, 2009)**

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. **(Infociments, 2018)**

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.

Pour s'assurer de cette durabilité pendant longtemps, les bétons ont été longuement spécifiés en considérant les performances mécaniques requises à 28 jours associées éventuellement à un dosage minimum en ciment.

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. **(Infociments, 2018)**

Aujourd'hui, la durabilité est appréhendée en considérant un ensemble de propriétés dont, bien sûr, la résistance mécanique à 28 jours. Les autres caractéristiques prises en compte visent à assurer l'adéquation entre les propriétés physico-chimiques du béton et les contraintes qui s'appliquent à l'ouvrage. Les caractéristiques à prescrire pour garantir la pérennité des ouvrages sont désormais plus complètes et plus précises.

Elles dépendent de l'environnement auquel sera soumis l'ouvrage et se traduisent par des spécifications sur la nature et le dosage minimal en ciment, la compacité minimale, la valeur maximale du rapport Eau/Ciment, l'enrobage minimal et la teneur maximale en chlorures dans le béton...etc. (Mehena, 2009). Prescrire un béton durable nécessite d'apprécier, dès sa conception, l'ensemble des contraintes environnementales et les agressions potentielles qu'il aura à subir pendant toute sa durée de service, de respecter et mettre en œuvre les recommandations en vigueur. Les connaissances actuelles sur les ciments et les bétons permettent d'optimiser et d'adapter encore mieux la composition et la formulation des bétons aux contraintes environnementales auxquelles ils seront soumis, tout en respectant les critères de performances mécaniques. (Infociments, 2018) Un béton durable est un béton compact (présentant une faible porosité) dont les constituants de qualité ont été bien choisis conformément aux normes.

Cependant quelles que soient les précautions prises pour adapter et optimiser la formulation du béton, il ne pourra assurer sa fonction durablement que si les « règles de l'art » ont été respectées lors de sa fabrication (malaxage efficace adapté à la formulation, respect des tolérances sur les constituants) et de sa mise en œuvre (vibration correcte, cure adaptée, prise en compte des conditions climatiques lors du bétonnage, retraits maîtrisés, respect des valeurs d'enrobage des armatures, etc.). Pour obtenir la durabilité spécifiée, il convient de respecter les recommandations ou les normes d'exécution des ouvrages. (Infociments, 2018)

2/ la durabilité des bétons en Algérie :

Les recherches et les études touchant à la durabilité des bétons en Algérie connaissent moins d'engouement par rapport à ce qui se fait dans les pays avancés malgré l'existence de conditions plus au moins sévères et les pertes économiques colossales engendrées par l'entretien et les réparations souvent employé chez nous. Il y a lieu de signaler néanmoins,

les recherches entreprises par les chercheurs du « CNERIB » dans ce sens qui ont mis en évidence les facteurs influant sur la durabilité des bétons à savoir :

- L'effet de la température .
- La présence d'agents agressifs dans l'air ambiant tel que les embruns marins.
- Les sulfates dans le sol notamment dans régions du sud du pays.
- L'effet des vibrations sismiques.....etc. et de proposer par la suite une méthodologie générale, structurée en différentes étapes ou modules (processus). (Mehena, 2009)

Cette « méthodologie » inclut :

- Les indicateurs de durabilité (généraux, spécifiques ou de substitution) et des paramètres complémentaires optionnels, accompagnés des méthodes d'essais correspondantes et d'un système de classes (et de valeurs limites) directement utilisable pour l'évaluation de la durabilité « potentielle » et de là, pour la comparaison et le classement de différentes formules de béton.
- Des spécifications types par rapport à la corrosion des armatures et l'alcali-réaction relatives aux indicateurs de durabilité sélectionnés, en fonction de la durée de vie exigée pour la structure et de son type d'environnement. Ainsi, les « recommandations » proposées permettent de spécifier des durées de vie (par exemple 30, 50, 100, 120 ans ou plus) pour les ouvrages en béton, sur la base de 1, 2, 3 ou 4 grandeurs physiques mesurées ;
- Des modèle(s)prédictif(s).
- Des témoins de durée de vie accompagnés des méthodes d'essais correspondantes.
- même si ce type d'agression est rarement rencontré en Algérie, il a été jugé utile de la maintenir en raison de la gravité des dégâts causés par cette agression et de le prendre comme mesure de sécurité sur les granulas locaux employés. (Mehena, 2009)

3/ Relation entre durabilité et perméabilité du béton :

La durabilité du béton est en grande partie fonction de la difficulté qu'ont les agents agressifs à pénétrer dans le réseau poreux du béton (J. Baron, J.P. Ollivier).

La capacité de ce matériau à résister à l'intrusion de ces agents agressifs est principalement caractérisée par la perméabilité. Cette dernière est influencée par les pores capillaires interconnectés qui dépendent du rapport eau/ciment (W/C).

L'objectif de cette étude est : premièrement, de passer en revue et de discuter les principales méthodes existantes utilisées pour mesurer la perméabilité à l'eau des matériaux cimentaires. Deuxièmement, de proposer une nouvelle méthode expérimentale qui permet d'augmenter la surface de contact de l'eau avec l'échantillon. La forme cylindrique pleine de l'échantillon permet ainsi un écoulement verticale du liquide dubas vers le haut. Cette méthode permet d'obtenir un débit volumétrique d'eau élevé et assure une bonne étanchéité entre l'échantillon et la cellule de l'appareil. (A Amriou, Bencheikh M, 2017 Elsevier)

II .Introduction:

La qualité des bétons est fortement liée à leurs propriétés de transfert, principalement la perméabilité. Lors de l'hydratation, le volume des hydrates augmente au détriment des phases primaires (ciment anhydre et eau).

Les espèces inter granulaires initialement remplies d'eau de gâchage se remplissent et la porosité diminue. Les transferts dans le béton durci sont établis par le réseau de pores, qui apparaît normalement dans la structure de la pâte interstitielle lors de son hydratation.

La perméabilité du béton est fortement influencée par la quantité d'eau et le dosage en ciment. La perméabilité est définie par la facilité avec laquelle les gaz et les liquides peuvent pénétrer et se déplacer dans le béton. Le béton à haute perméabilité favorise la pénétration d'agents agressifs qui provoquent une détérioration rapide du béton et la corrosion des barres d'armature.

Les tests de perméabilité à l'eau pour le béton n'ont généralement pas été normalisés.

De nombreuses méthodes d'essai ont été proposées pour déterminer la perméabilité à l'eau du béton.

Dans ces tests, tels qu'ils sont utilisés, le débit du flux sous l'influence d'une pression appliquée est mesuré. Ainsi, le coefficient de perméabilité K est calculé à partir de la loi de Darcy. Afin de mesurer le coefficient de perméabilité K , on utilise la loi de Darcy. . (A Amriou, Bencheikh M, 2017 Elsevier).

II.1/ Structure poreuse du béton et perméabilité à l'eau du béton:

Le béton est un matériau hétérogène composé de granulats maintenu par un liant poreux appelé « pâte de ciment hydraté » qui est la phase continue du composite. La porosité de cette phase est critique en ce qui concerne le mouvement de l'eau et des substances chimiques dans le béton. Le mouvement des fluides est une caractéristique intéressante pour la durabilité des matériaux cimentaires

principalement le béton. (AMRIOU A, 19/03/2018) La durabilité du béton est liée aux capacités d'échanges de ce matériau avec le milieu extérieur qui sont fonction des caractéristiques poreuses. Le béton est un matériau composé d'une phase solide, d'une phase liquide et d'une phase gazeuse. La partie solide est constituée de granulats, d'une partie hydratée et de grains de ciment non hydratés plus une partie gazeuse. Les pores dans le béton peuvent être représentés selon la figure 1 suivante : (Wei CHEN, le 9 décembre 2011)

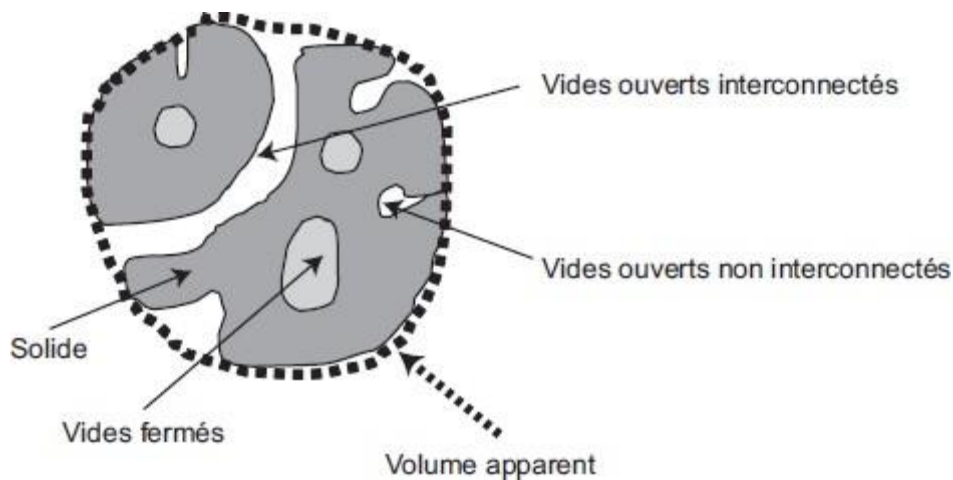


Figure 2.1 : Schéma des pores dans un matériau. (AMRIOU A, 19/03/2018)

II.2/ Porosité et distribution de la taille des pores :

La porosité d'un matériau caractérise l'importance des vides qu'il contient. Elle est définie par le rapport entre le volume des pores V_p , et le volume total V_t .

$$P = \frac{V_p}{V_t} = \frac{V_p}{V_p + V_s} \quad (I.1)$$

Où V_s est le volume des grains solides.

La porosité comprend tous les pores du matériau, elle est généralement supérieure à 10% pour un béton courant. Les pores forment des réseaux de vides plus ou moins.

La porosité dépend de plusieurs facteurs : le rapport E/C (Eau sur Ciment), la compacité du béton frais, le volume pâte/granulats et la porosité des granulats.

Généralement, on distingue trois types de pores :

- Les pores interconnectés : ils forment un espace connecté dans le milieu poreux et participent au transport de matière à travers le matériau.
- Les pores isolés : ils ne communiquent pas avec le milieu extérieur.

La porosité ouverte, aussi appelée « porosité accessible », rassemble deux des catégories de pores précités (pores interconnectés et aveugles). Dans le cas du béton, on néglige la proportion volumique de pores isolés, la porosité accessible est considérée comme égale à la porosité totale.

La distribution des pores dans un béton couvre un large spectre de taille de pores : capillaires, internes aux hydrates, bulles d'air et fissures. Dans le cas du béton, deux familles de taille de pores sont à considérer :

- les pores capillaires,
- les pores internes aux hydrates. (Wei CHEN, le 9 décembre 2011)

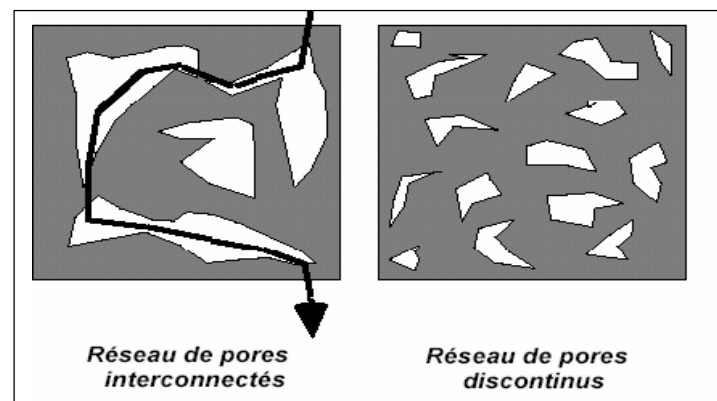


Figure 2.1 : Influence du degré d'inter connectivité sur l'écoulement de fluides
(AMRIOU A, 19/03/2018)

Deux grandeurs physiques permettent de caractériser l'aptitude des bétons à résister à l'intrusion des agents agressifs : la perméabilité et la diffusion. Ces deux grandeurs correspondent à deux mécanismes bien distincts de transport de matière : la perméabilité décrit un écoulement qui se produit sous gradient de pression et la diffusion un transport à l'échelle moléculaire sous gradient de concentration. Nous présenterons les lois qui relient ces deux grandeurs aux caractéristiques poreuses des matériaux. C'est grâce à elles que l'ingénieur peut trouver des moyens d'action, moyens qui concernent le choix des composants, la formulation et les conditions d'hydratation. (J. Baron, J.P. Ollivier)

III .Introduction

Chaque structure en béton doit conserver ces qualités et continuer de remplir ces fonctions au cours du temps. Il en résulte que le béton doit être en mesure de résister aux mécanismes de détérioration auxquels il peut être exposé.

La détérioration des bétons résulte de facteurs externes ou de facteurs internes au béton. Les actions sur le béton peuvent être mécaniques, chimiques ou physiques.

Les dommages d'origine mécaniques comprennent les chocs, l'érosion...

-Les causes chimiques comportent les agressions par les chlorures, les sulfates, le gaz carbonique et les liquides et gaz d'origine naturelle ou industrielle....

-Les causes physiques de détérioration comprennent l'élévation de température, les cycles de gel-dégel...

A l'exception des sollicitations mécaniques, tous les effets néfastes associés à la durabilité font intervenir l'écoulement d'un fluide (liquide ou gaz) à travers le béton. Il est donc nécessaire de bien comprendre ce phénomène lorsque la durabilité est en cause. (AMRIOU A, 19/03/2018)

III .1. Définition de la perméabilité

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. (AMRIOU A, 19/03/2018)

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. (AMRIOU A, 19/03/2018)

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. (AMRIOU A, 19/03/2018) (J. Baron, J.P. Ollivier)

III .2.Loi de Darcy

Darcy (1856) a proposé une loi d'écoulement des fluides dans un milieu poreux avec les hypothèses suivantes:

- les forces d'écoulement sont dues à la viscosité (les forces d'inertie sont négligées);
- le milieu poreux est totalement saturé par une seule phase fluide;
- les écoulements du fluide sont supposés laminaires;
- le fluide n'a pas d'interaction physico-chimique avec le matériau.

Dans la dernière hypothèse, le fluide est supposé sans interaction avec le milieu poreux, mais ce n'est pas le cas de l'eau dans les matériaux cimentaires.

Loosveldt a montré qu'il existait une bonne corrélation entre la perméabilité au gaz (Argon) et la perméabilité à l'éthanol corrigée par l'effet de Klinkenberg sur mortier séché à 60°C jusqu'à stabilisation de la masse. Cependant la perméabilité à l'eau présente au moins un ordre de grandeur de moins que la perméabilité à l'éthanol.

(Wei CHEN, le 9 décembre 2011)

La perméabilité intrinsèque K (m^2) est définie selon la loi de Darcy qui s'écrit :

$$Q = \frac{K}{\mu} A \frac{dp}{dx} \quad (I.2)$$

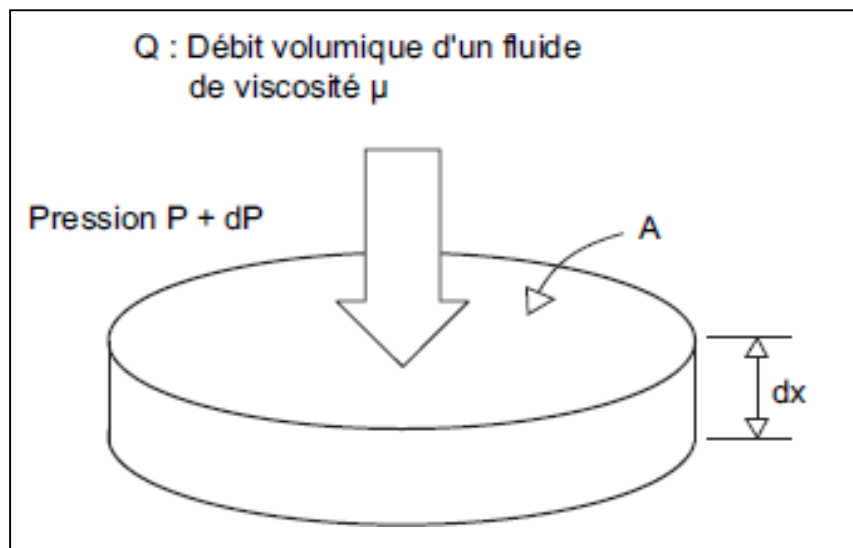


Figure 2.3: Flux linéaire de l'eau à travers l'échantillon (AMRIOU A, 19/03/2018), (J. Baron, J.P. Ollivier)

La relation (I.2) suppose que le régime d'écoulement est laminaire dans les pores du matériau et que le fluide est inerte vis-à-vis du matériau. Lorsque le fluide qui s'écoulant à travers le matériau est l'eau, on emploie une autre grandeur notée K_w appelée « coefficient de perméabilité à l'eau ».

On exprime alors la vitesse apparente de l'eau u_a , rapport entre le débit volumique et la section apparente du matériau, et on introduit le gradient hydraulique :

$$\frac{dh}{dx} \left(\frac{dp}{dx} = \frac{dh \rho_{\text{eau}} g}{dx} \right) \quad (\text{I.3})$$

Où ρ_{eau} est la masse volumique de l'eau.

La relation (I.4) peut alors s'écrire :

$$u_a = \frac{Q}{A} = \frac{k \rho_{\text{eau}} g}{\mu_{\text{eau}}} \cdot \frac{dh}{dx} = K_w \frac{dh}{dx} \quad (\text{I.4})$$

K_w est défini par la relation :

$$K_w = \frac{k \rho_{\text{eau}} g}{\mu_{\text{eau}}} \quad (\text{I.5})$$

Le coefficient de perméabilité K_w est homogène à une vitesse et s'exprime en m/s dans le système international. Ce n'est plus une grandeur intrinsèque puisqu'elle dépend du matériau, mais aussi des caractéristiques de l'eau.

D'après la définition de K_w , on peut montrer qu'une perméabilité de 1 m^2 , correspond à un coefficient de perméabilité de 10^7 m/s à 20 °C . (AMRIOU A, 19/03/2018)

Les essais de perméabilité à l'eau du béton n'ont généralement pas été normalisés. De nombreuses méthodes d'essais permettant de déterminer la perméabilité à l'eau du béton ont été proposées. Dans ces essais tels qu'ils sont utilisés, le débit de l'écoulement sous l'influence d'une pression appliquée est mesuré. Ainsi, le coefficient de perméabilité K est calculé à partir de la loi de Darcy. Afin de mesurer la perméabilité des matériaux cimentaires, il est nécessaire d'utiliser une méthode souple, assez simple à appliquer, d'un temps de mesure court et avec une haute précision.

La majorité des méthodes utilisées pour déterminer la perméabilité des matériaux poreux reposent sur la loi de Darcy. Dans la forme de base de cette loi, le fluide s'écoule à travers un échantillon formé de disque sous un gradient de pression. Le fluide est appliqué sous pression sur un côté de l'échantillon en maintenant l'autre côté libre à la pression atmosphérique. La perméabilité est calculée ainsi directement en appliquant la formule proposée par Darcy. Malgré que ces méthodes sont relativement simples à réaliser, ils peuvent prendre un certain temps qui peut atteindre plusieurs semaines. L'hydratation au cours de cette longue période de test peut changer la structure poreuse du matériau qui pourrait conduire à des changements de la perméabilité. Dans le but de réduire le temps de mesure nécessaire, les recherches proposent d'appliquer une grande pression. Mais, en raison d'une pression élevée, la probabilité de fuite au niveau de l'interface entre l'échantillon et les cellules de l'appareil de test peut être plus grande. Cette fuite influe énormément sur le résultat final .

III .03.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 (Figure 2.4) .

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.

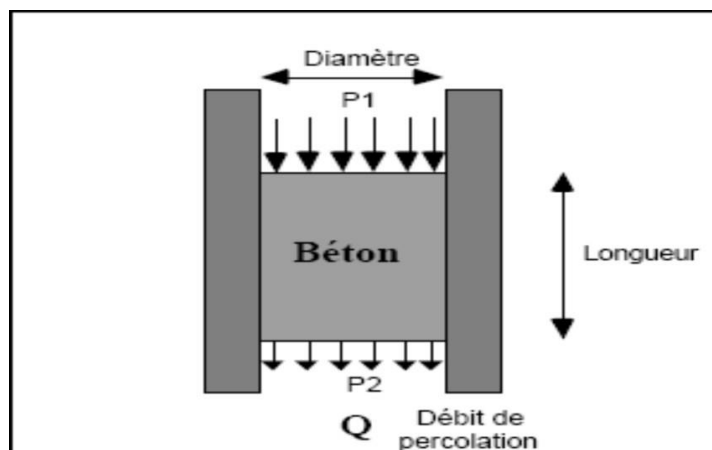


Figure 2.4: Principe de fonctionnement des appareils de mesure de la perméabilité à l'eau.

(AMRIOU A, 19/03/2018)

- **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. (AMRIOU A, 19/03/2018)

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.

- **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. (AMRIOU A, 19/03/2018)

1) **Perméamètre à trois (3) cellules :**

Cet appareil permet de porter trois éprouvettes. Les trois cellules en verre de capacité 1l 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 2.5: Perméabilimètre à trois cellules
(Laboratoire du développement des Géomatériaux – université de Msila)

2) Perméamètre à six (6) cellules : ce qui on a utilisé dans notre travail

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. (AMRIOU A, 19/03/2018)

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 2.6: perméabilimètre permettant les tests de six éprouvettes

- **Inconvénients rencontrés dans les appareils courants de perméabilité à l'eau**

Les inconvénients les plus courants rencontrés lors de la réalisation de tests de perméabilité en laboratoire sur des échantillons de béton sont illustrés comme suit :

1) La taille d'échantillon

Plusieurs tests de perméabilité nécessitant des exigences strictes en ce qui concerne les dimensions pour résoudre les problèmes d'étanchéité ce qui n'est pas toujours possible avec des échantillons obtenus à partir d'échantillons prélevés in situ.

La plupart des appareils de perméabilité actuels nécessitent une forme cylindrique. Mais, puisque l'écoulement de fluide est linéaire par l'une des extrémités plates ce qui rend difficile d'éviter les fuites du liquide.

Dans le cas d'application d'une haute pression sur l'échantillon, une autre question concernant la rigidité suffisante de l'éprouvette doit être prise en considération.

2) Quantité d'écoulement du fluide

D'après Janssen [54], pour des gradients hydrauliques faibles et des tailles d'échantillon moyennes, on peut s'attendre à ce que la quantité d'écoulement du fluide Q à travers un échantillon soit faible. En cas d'application d'une haute pression, il est nécessaire d'augmenter les dimensions de l'échantillon. Cela nécessite de longues périodes de temps pour réaliser l'essai.

3) Fuite de fluide autour de l'échantillon

Les problèmes de fuite du fluide autour de l'échantillon sont couramment rencontrés. Le procédé de scellage latéral de l'échantillon est nécessaire ; le maintien des joints étanches autour de l'éprouvette semble être difficile et nécessite un grand effort. De plus, une mauvaise confection et la non-conformité de l'échantillon peuvent contribuer à la fuite du fluide.

4) Air emprisonné dans l'échantillon pendant l'essai

La présence d'air emprisonné dans l'échantillon ou dans l'appareil rend difficile l'écoulement du fluide ce qui peut influencer considérablement sur les résultats obtenus et conduirait à une diminution de la perméabilité au fil du temps. Au début des essais, il est nécessaire de purger les bulles d'air ce qui n'est pas toujours facile à réaliser.

- **Malaxage et cure appliquée aux bétons : (norme NF P18-404)**

Les constituants du béton ont été mélangés à sec pendant une minute après avoir été introduits dans le malaxeur par ordre décroissant de granulométrie (gros élément, liant, sable).

L'eau a été ensuite introduite et le malaxage est poursuivi durant 2 minutes.

Les échantillons ont été confectionnés par gâches permettant d'obtenir six éprouvettes pour chaque type de béton (trois éprouvettes seront conservées à l'eau et trois autres éprouvettes conservées à l'air). Les éprouvettes des essais de perméabilité à l'eau ont la forme cylindrique creuse alors que ceux des essais de porosité et résistance à la compression ont été coulés dans des moules (10x10x10) cm³.

Après une période initiale de conservation de 24 heures, les échantillons ont été démoulés. Une partie de ces éprouvettes ont été plongées directement dans l'eau à $23 \pm 1^\circ\text{C}$ pendant 28 jours, . Une autre partie des éprouvettes ont été conservées dans des solutions d'acide avec une concentration de 5% pendant 28 jours. (AMRIOU A, 19/03/2018)

- **Influence du rapport E/C sur la perméabilité à l'eau**

Le coefficient de perméabilité à l'eau diminue avec le rapport E/C. Pour des pâtes de ciment de même degré d'hydratation, la perméabilité diminue lorsque le dosage en ciment augmente, c'est à dire lorsque le rapport E/C diminue. La figure I.16 montre la variation de la perméabilité à l'eau d'une pâte de ciment avec le rapport E/C. Dans cette figure, on peut constater qu'une réduction du rapport E/C de 0.7 à 0.3 réduit considérablement le coefficient de perméabilité.

Les données de la figure 2.7 confirment bien le rôle de l'interconnexion des capillaires. Les capillaires sont toujours interconnectés pour des rapports E/C supérieurs à 0,7. Dans ce cas, la perméabilité augmente très vite avec la quantité d'eau de gâchage. (AMRIOU A, 19/03/2018)

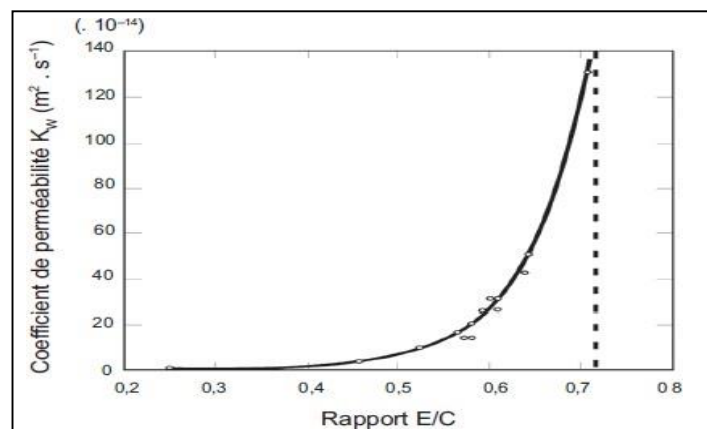


Figure 2.7 : Relation entre le coefficient de perméabilité à l'eau et le rapport E/C d'une pâte de ciment hydratée à 93 %. (AMRIOU A, 19/03/2018)

- **Influence de la durée de cure humide initiale sur la perméabilité**

La progression de l'hydratation influe considérablement sur la perméabilité d'une pâte de ciment. Lorsque la pâte est fraîche, l'écoulement de l'eau est influé par les grains de ciment anhydre. Lorsque l'hydratation progresse, la perméabilité décroît rapidement parce que le gel remplit l'espace occupé par l'eau de gâchage . Le tableau I.4 présente les valeurs du coefficient de perméabilité d'une pâte de ciment à différents âges pour un rapport E/C de 0.7

Age (jours)	Coefficient de perméabilité K(m/s)
Frais	2×10^{-6}
5	4×10^{-10}
6	1×10^{-10}
8	4×10^{-11}
13	5×10^{-12}
24	1×10^{-12}
final	6×10^{-13}

TABLEAU 2.1 : Réduction du coefficient de perméabilité d'une pâte de ciment à différents âges pour un rapport E/C de 0.7. (AMRIOU A, 19/03/2018)

L'hydratation de la peau du béton exposée à l'air atmosphérique peut être empêchée et la segmentation de la porosité capillaire peut être interrompue même pour un rapport E/C faible.

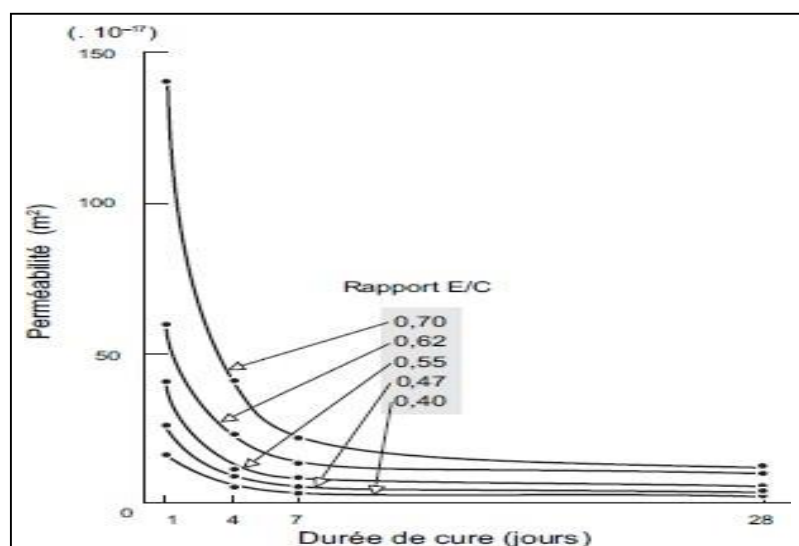


Figure 2.8: ontre le rôle de la durée de cure sur la perméabilité et les propriétés de transfert dans le béton. (AMRIOU A, 19/03/2018)

- **Influence des granulats sur la perméabilité**

La différence entre une pâte de ciment et un béton est la présence de granulats. La perméabilité des granulats influe le comportement du béton et principalement sa perméabilité. Alors, si les granulats ont une faible perméabilité, cela réduit la surface à travers laquelle l'eau peut s'écouler et l'eau doit contourner les granulats pour passer dans le béton. Ainsi, le trajet parcouru par l'eau devient plus long ce qui réduit considérablement la perméabilité

Types de roche	Coefficient de perméabilité (m/s)	Rapport E/C des pâtes de ciment de même perméabilité
Basalte danse	2.47×10^{-14}	0.38
Quartz	8.24×10^{-14}	0.42
Marbre 1	2.39×10^{-13}	0.48
Marbre 2	5.77×10^{-12}	0.66
Granite 1	5.35×10^{-11}	0.70
Grès	1.23×10^{-10}	0.71
Granite 2	1.56×10^{-10}	0.71

TABLEAU 2.2 : le résultat d'une recherche sur la perméabilité à l'eau de quelques roches en comparaison avec des pâtes de ciment de même coefficient de perméabilité à l'eau.

(AMRIOU A, 19/03/2018)

- **Comparaison de la perméabilité de différents types de roches et de pâtes de ciment**

La perméabilité à l'eau du mortier ou du béton est généralement supérieur à celle de la pâte pour un même rapport E/C à cause de zones d'interface pâte – granulat. Cette zone est moins dense et plus poreuse que le reste de la partie formée par la pâte de ciment hydraté. Cette zone d'interface présente alors une grande partie de microfissures, ce qui offre un chemin de passage facile à l'eau et aux gaz. (AMRIOU A, 19/03/2018)

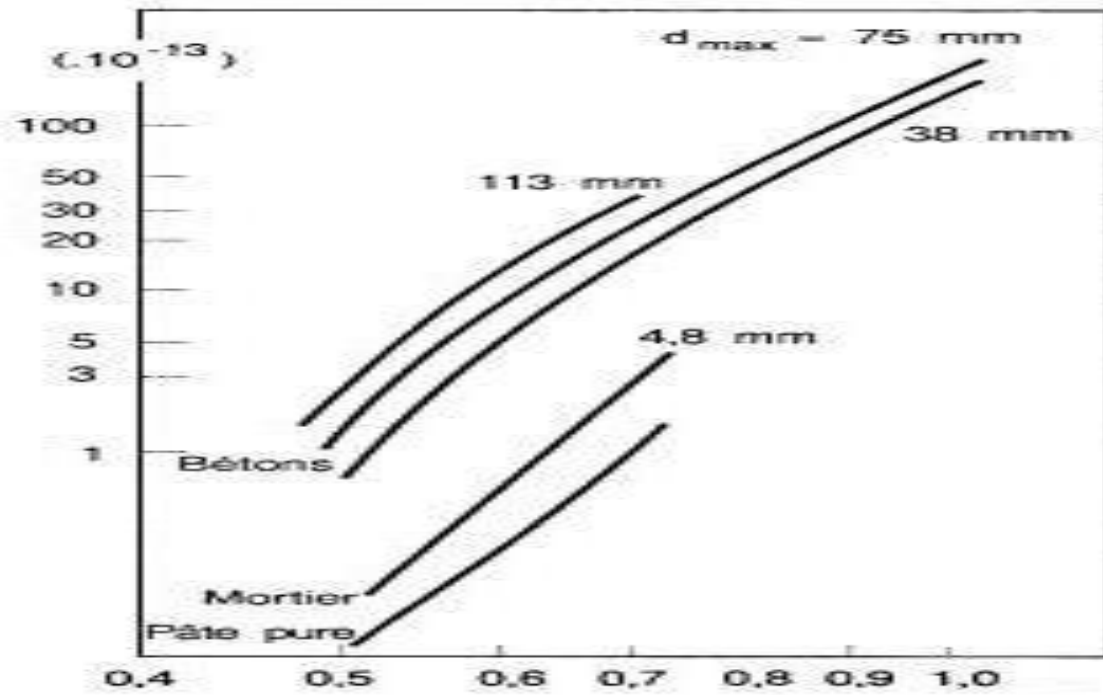


Figure 2.9 : présente l'influence du rapport E/C et de la taille maximale des granulats sur le coefficient de perméabilité à l'eau des bétons.

(AMRIOU A, 19/03/2018)

Conclusion

La durabilité des bétons dépend de la porosité ouverte et plus particulièrement de la porosité ouverte interconnectée. Celle qui facilite la pénétration des agents agressifs extérieurs à travers le béton.

- ❖ Le coefficient de perméabilité à l'eau diminue avec le rapport E/C. Pour des pâtes de ciment de même degré d'hydratation, la perméabilité diminue lorsque le dosage en ciment augmente, c'est à dire lorsque le rapport E/C diminue.
- ❖ L'hydratation de la peau du béton exposée à l'air atmosphérique peut être empêchée et la segmentation de la porosité capillaire peut être interrompue même pour un rapport E/C faible.
- ❖ Pour l'obtention d'un bon béton, sa composition doit être étudiée et suivie d'une mise en œuvre correcte et en fin un durcissement dans un environnement adéquat surtout pendant les premiers jours de durcissement. Le durcissement est l'ensemble des précautions prises pour favoriser l'hydratation complète du ciment.
- ❖ Les essais de perméabilité à l'eau du béton n'ont généralement pas été normalisés. De nombreuses méthodes d'essais permettant de déterminer la perméabilité à l'eau du béton ont été proposées. Malgré le grand intérêt de la perméabilité à l'eau du béton, il n'existe pas de méthode standard de test de perméabilité autre que les méthodes indirectes.
- ❖ Pour réaliser des tests directs de perméabilité, chaque laboratoire a développé sa propre méthode avec différentes configurations en ce qui concerne.
- ❖ La majorité des méthodes utilisées pour déterminer la perméabilité des matériaux poreux reposent sur la loi de Darcy.

Chapitre I I I :

Caractérisation des matériaux et essais

I. Introduction:

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 connaitre 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 CPJ de la cimenterie ACC de Hammam Dhalàa.
- L'eau potable du Laboratoire du développement des Géomatériaux – université de Msila
- Gravier roulée (BOUSAADA).

II. Caractéristiques des matériaux utilisés:

II.1. : graviers concassés :

- **Origine:**

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.

A. Analyse granulométrique

a) gravier de fraction 3/8 :

- **Principe de l'essai:**

La granulométrie ou analyse granulométrique s'intéresse à la détermination de la dimension des grains et la granularité concerne la distribution dimensionnelle des grains d'un granulat. La granulométrie ou analyse granulométrique consiste donc à fractionner des granulats au moyen d'une colonne de tamis dont les dimensions des mailles sont normalisées et décroissantes du haut vers le bas .



Figure 3.1: les tamis

- **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 tamis et de la masse initiale...).

Les résultats des analyses granulométriques de gravier de fraction 3/8 :

Les résultats des analyses granulométriques sont représentés sur le (Tableau 1) , le courbe granulométrique est représentée en (Figure 2)

Tamis (mm)	Poids des tamis vide (g)	Poids des tamis+sable	refus du sable	Refus cumulés	Refus cumulés %	Tamisât cumulés %
8	0.652	0.677	0.025	0.025	1.666	98.34
6.3	0.638	0.878	0.24	0.265	17.66	82.34
5	0.656	1.026	0.37	0.635	42.33	57.67
4	0.603	1.092	0.489	1.124	74.93	25.07
3.15	0.604	0.821	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 3.1 : l'analyse granulométrique de fraction (3/8) du gravier .

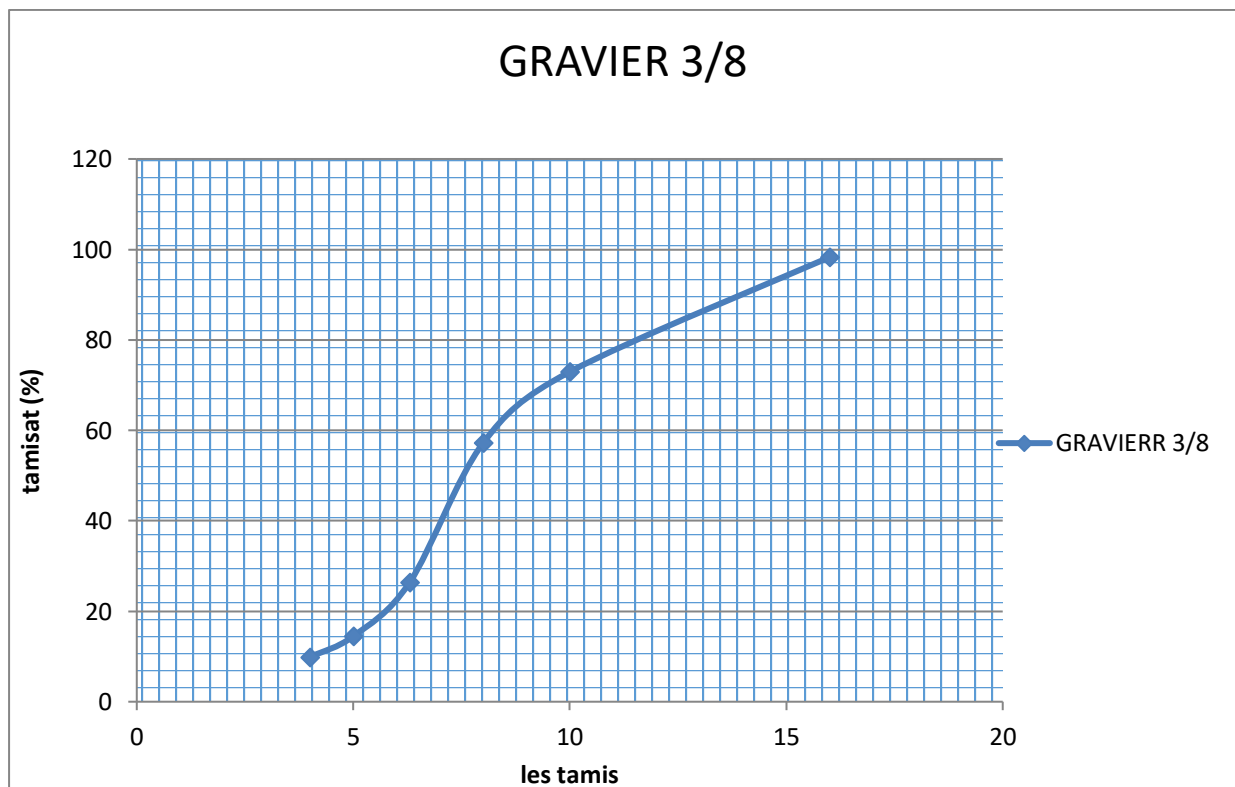


Figure 3.2: L'analyse granulométrique de fraction (3/8) du gravier

b) gravier de fraction 8/16 :

Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique par tamisage (Norme NFP 94-056) permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant les échantillons.. 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.

Les résultats des analyses granulométriques de gravier de fraction 8/16:

Les résultats des analyses granulométriques sont représentés sur le (Tableau 2), le courbe granulométrique est représentée en (Figure 3)

Tamis (mm)	Poids des tamis vide (g)	Poids des tamis+sabl 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 3.2 : l'analyse granulométrique de fraction (8/16) du graver .

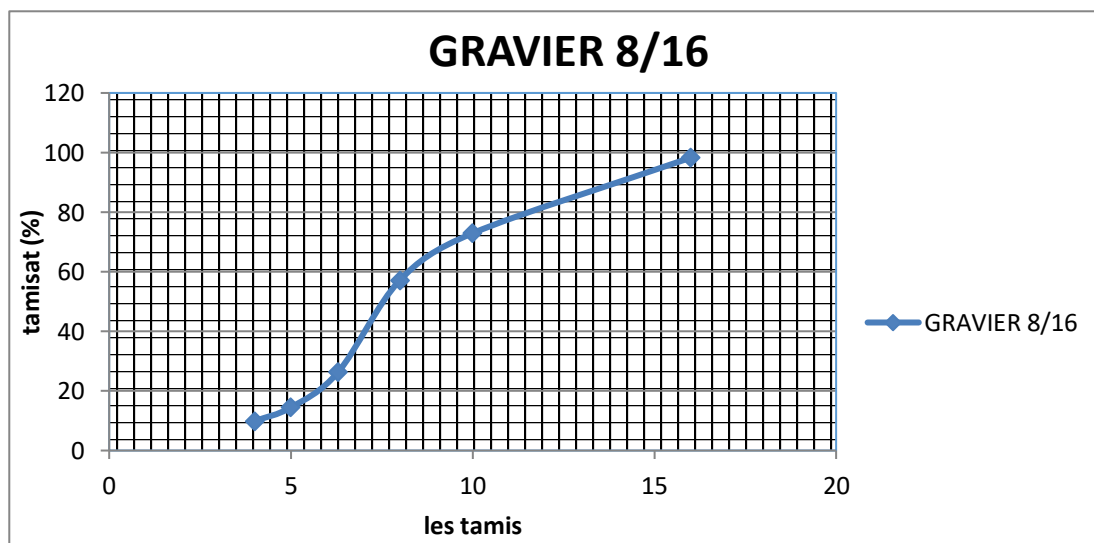


Figure 3.3: l'analyse granulométrique de fraction (8/16) du gravier

Les résultats des analyses granulométriques l'analyse granulométrique des fractions ((40%3/8)/(60%8/16) du gravier :

Les résultats des analyses granulométriques sont représentés sur le (Tableau 3) , le courbe granulométrique est représentée en (Figure 4)

Tamis (mm)	Poids des tamis vide (g)	Poids des tamis+sabl e	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 3.3: l'analyse granulométrique des fractions ((40%3/8)/(60%8/16) du

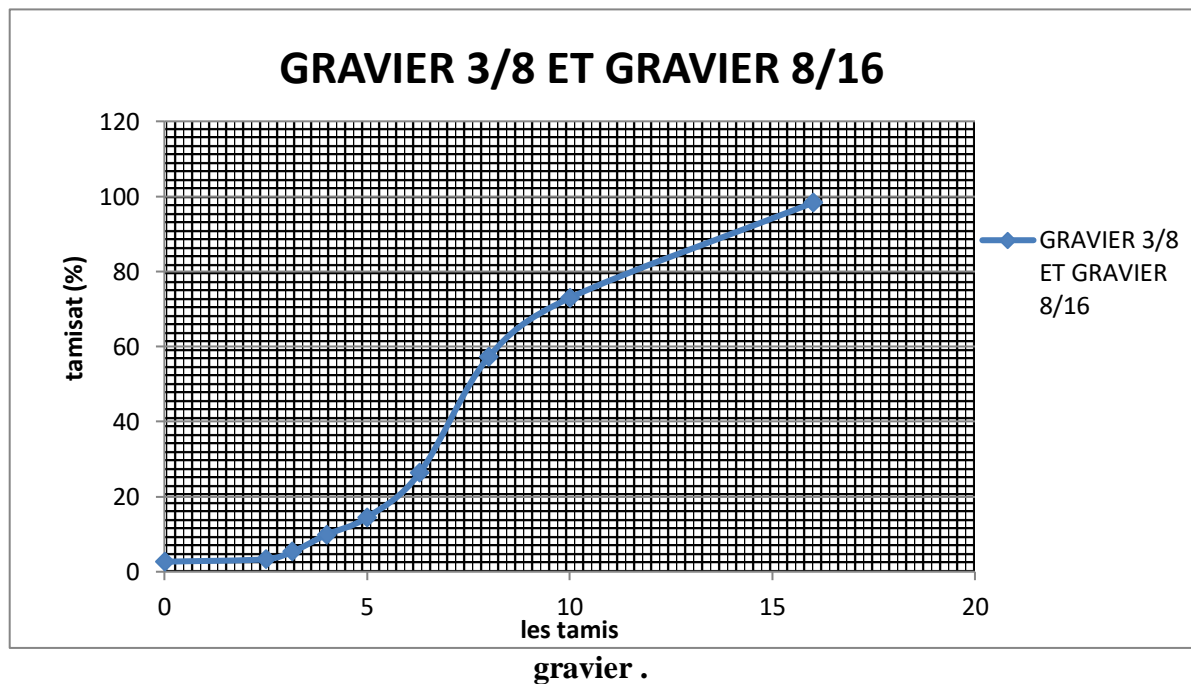


Figure 3.4: l'analyse granulométrique des fractions ((40%3/8)/(60%8/16) du gravier

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 Opérateur :**

- * peser le récipient de 1 L de volume vide soit m1 .
- * Remplir le récipient par l'entonnoir avec une distance de chute de 15 cm.
- * Araser la couche supérieure du 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 gravier

Matériaux	Gravier 3/8 (m=120g)		
	m1 (kg)	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		

TABLEAU 3.4: Masse volumique apparent du Gravier (3/8).

Matériaux	Gravier 8/16 (m=120g)		
	m1 (kg)	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 3.5: Masse volumique apparente du Gravier (8/16).

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

- **But de l'essai:**

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

d'un béton dont les caractéristiques sont imposées.

- **Matériel utilisé :**

1. Balance technique avec une précision de 1 g.
2. Une éprouvette graduée.
3. Un entonnoir.
4. Un pycnomètre

- **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 est faible.
2. Remplir une éprouvette graduée avec un volume V_1 d'eau.
3. Peser un échantillon sec M de granulats (environ 120 g) 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 .
La masse volumique est donnée par la relation :

$$\gamma = \frac{M}{V_2 - V_1}$$

Résultats obtenus :

Matériaux	Gravier 3/8 (m=120g)			Gravier 8/16 (m=120g)		
	V1 (ml)	200	200	200	200	200
V2 (ml)	240	245	240	249	248	247
V2-v1	40	45	40	49	48	47
Masse	0.12kg			0.12kg		
ρ (kg)	3000	2666.66	3000	2448.97	2500	2553.19
ρ moy	2888.88			2500.72		

TABLEAU 3.6: Résultats de la Masse volumique Absolue**II.2. 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 sont représentés sur le (Tableau 7,8,9 et 10) , le courbe granulométrique est représentée en (Figure5,6,7et 8)

Tamis (mm)	Poids des tamis vide (g)	Poids des tamis+sabl e	refus du sable	Refus cumulés	Refus cumulés %	Tamisât cumulés %
5	0.623	0.626	0.003	0.003	0.2	99.8
2.5	0.596	0.712	0.166	0.119	7.93	92.07
1.25	0.507	0.567	0.06	0.179	11.93	88.07
0.63	0.500	0.555	0.055	0.243	16.2	83.8
0.315	0.470	1.172	0.702	0.936	62.2	37.6
0.160	0.281	0.691	0.41	1.346	89.73	10.27
0.08	0.276	0.418	0.142	1.488	99.2	0.8
Fond	0.454	0.463	0.009	1.497	99.8	0.2

TABLEAU 3.7: l'analyse granulométrique de Sable de dune

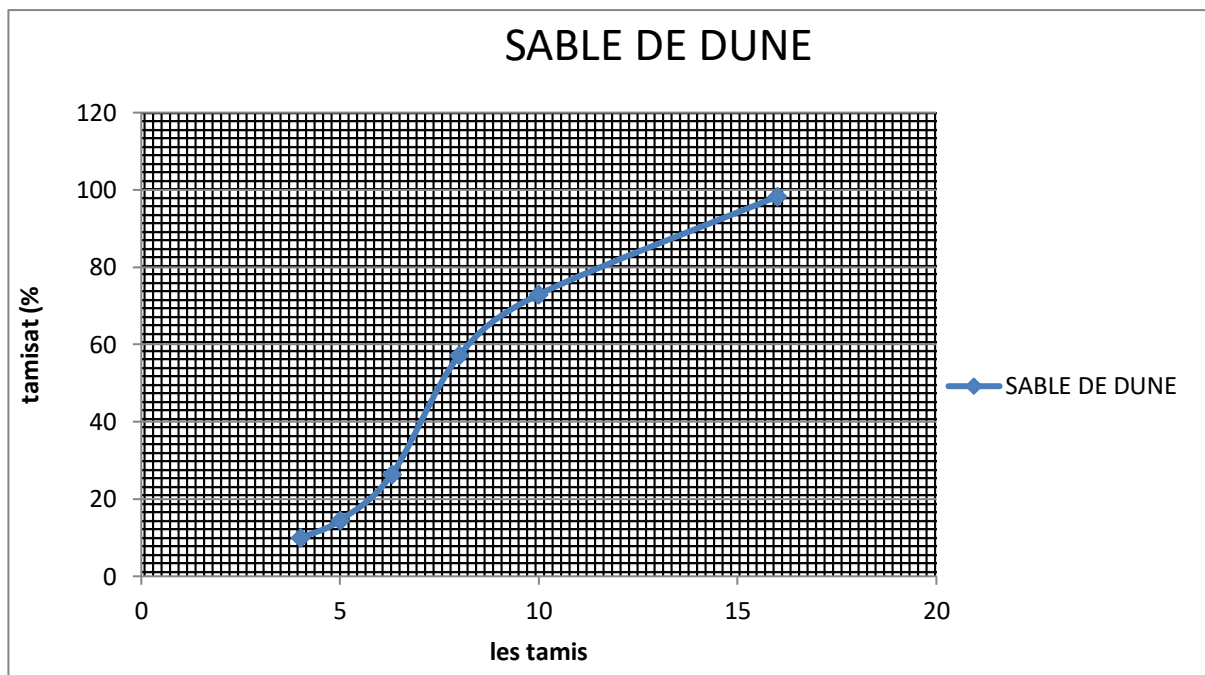


Figure 3.5: l'analyse granulométrique de Sable de dune

Tamis (mm)	Poids des tamis vide (g)	Poids des tamis+sable	refus du sable	Refus cumulés	Refus cumulés %	Tamisât cumulés %
5	0.623	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 3.8: l'analyse granulométrique de Sable concassé

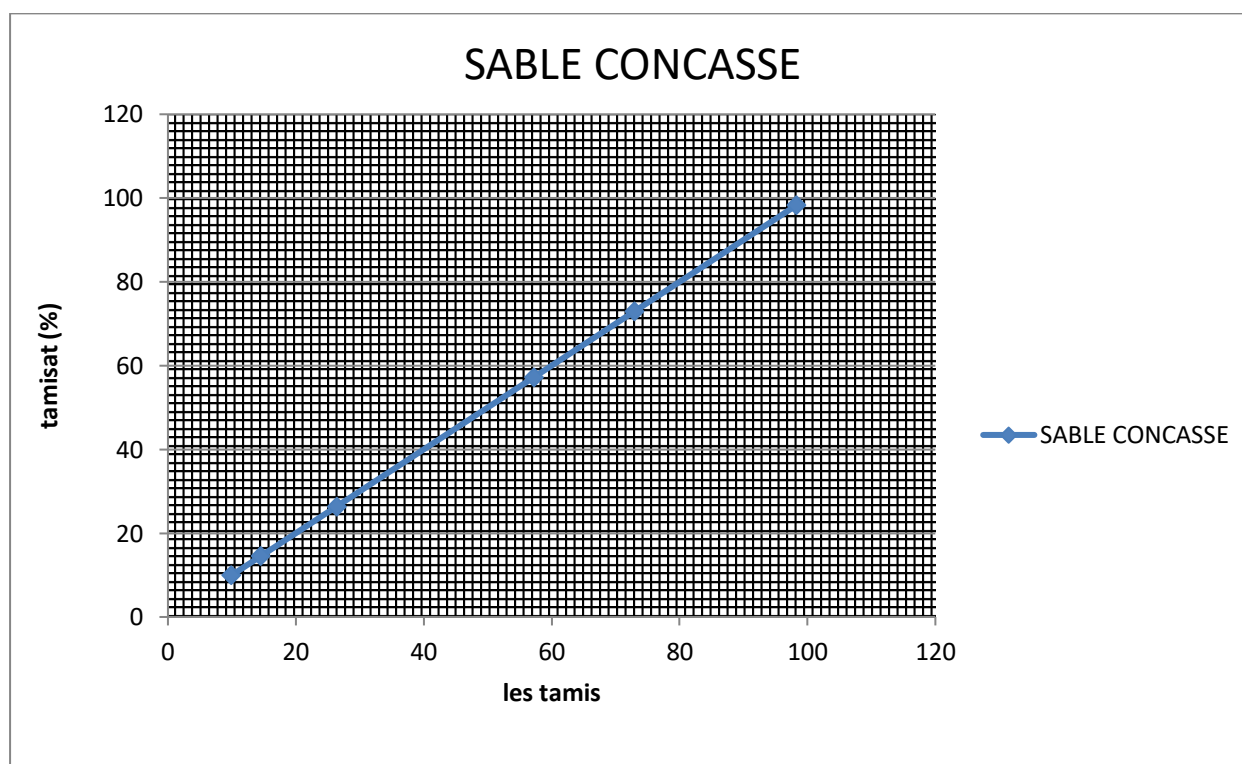


Figure 3.6: l'analyse granulométrique de Sable concassé

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 3.9: l'analyse granulométrique de combinaison de 50% de sable de dune et 50% de sable concassée

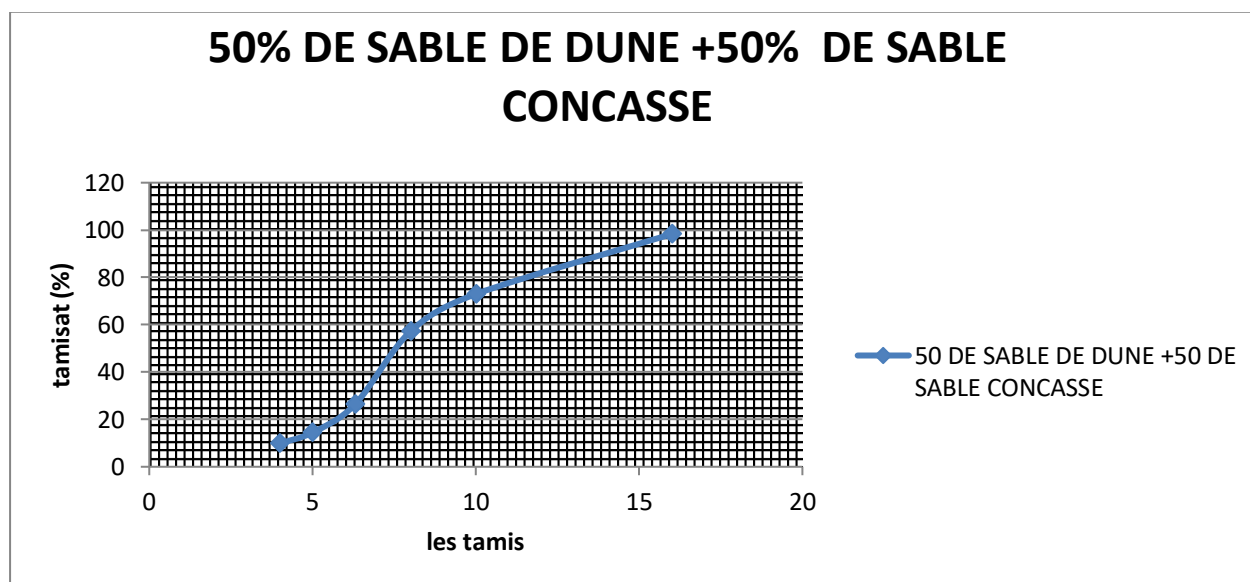


Figure 3.7: L'analyse granulométrique de combinaison de 50% de sable de dune et 50% de sable concassée

Tamis (mm)	Poids des tamis vide (g)	Poids des tamis+sable	refus du sable	Refus cumulés	Refus cumulés %	Tamisât cumulés %
5	0.623	0.625	0.002	0.002	0.133	99.867
2.5	0.596	0.709	0.133	0.115	7.666	92.334
1.25	0.507	1.176	0.669	0.784	52.266	47.734
0.63	0.500	0.697	0.197	0.981	65.4	34.6
0.315	0.470	0.747	0.277	1.258	83.86	16.14
0.160	0.281	0.462	0.181	1.439	95.93	4.07
0.08	0.276	0.327	0.051	1.49	99.33	0.67
Fond	0.454	0.459	0.005	1.495	99.66	0.34

TABLEAU 3.10: l'analyse granulométrique de combinaison de 30% de sable de dune et 70% de sable concassée

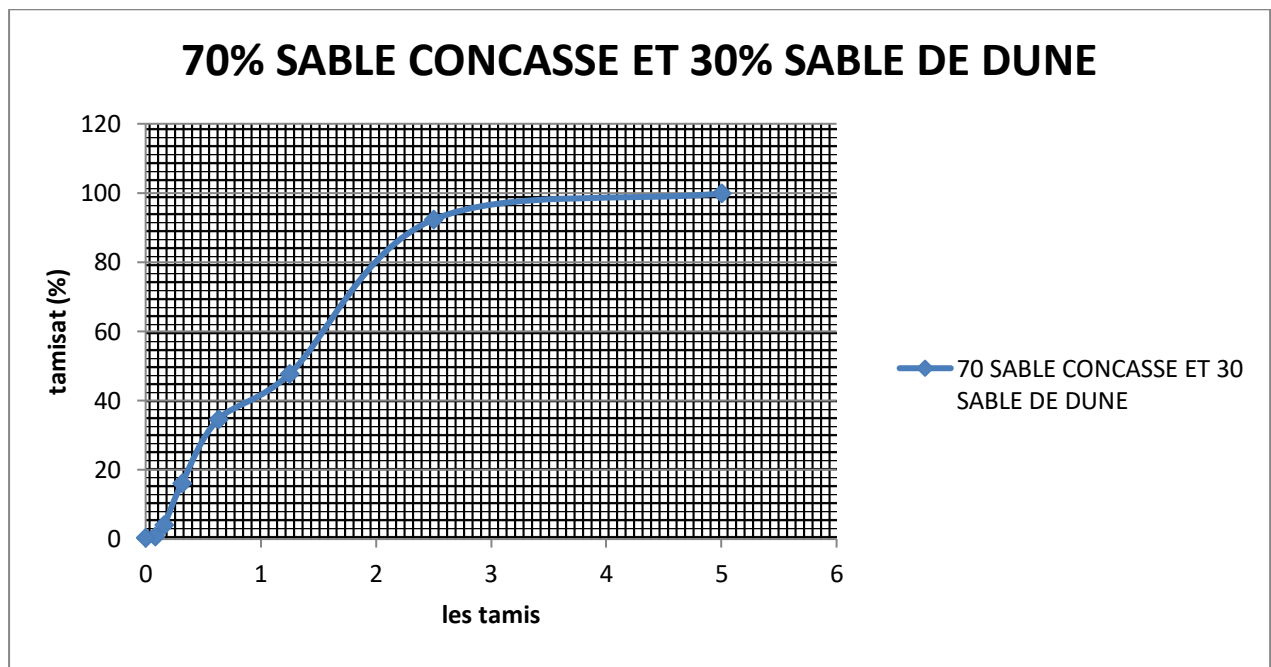


Figure 3.8: l'analyse granulométrique de combinaison de 30% de sable de dune et 70% de sable concassée

- **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.

$$E. S. V = (H 2 / H 1) \times 100 \%$$

H 2 : hauteur de sable propre déterminée visuellement

$$E. S. P = (H' 2 / H 1) \times 100 \%$$

H' 2 : hauteur de sable propre déterminée au Piston .

H 1 : hauteur de sable propre + hauteur imputées.

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

TABLEAU 3.11: Classes de propreté d'après les valeurs de l'équivalent de sable

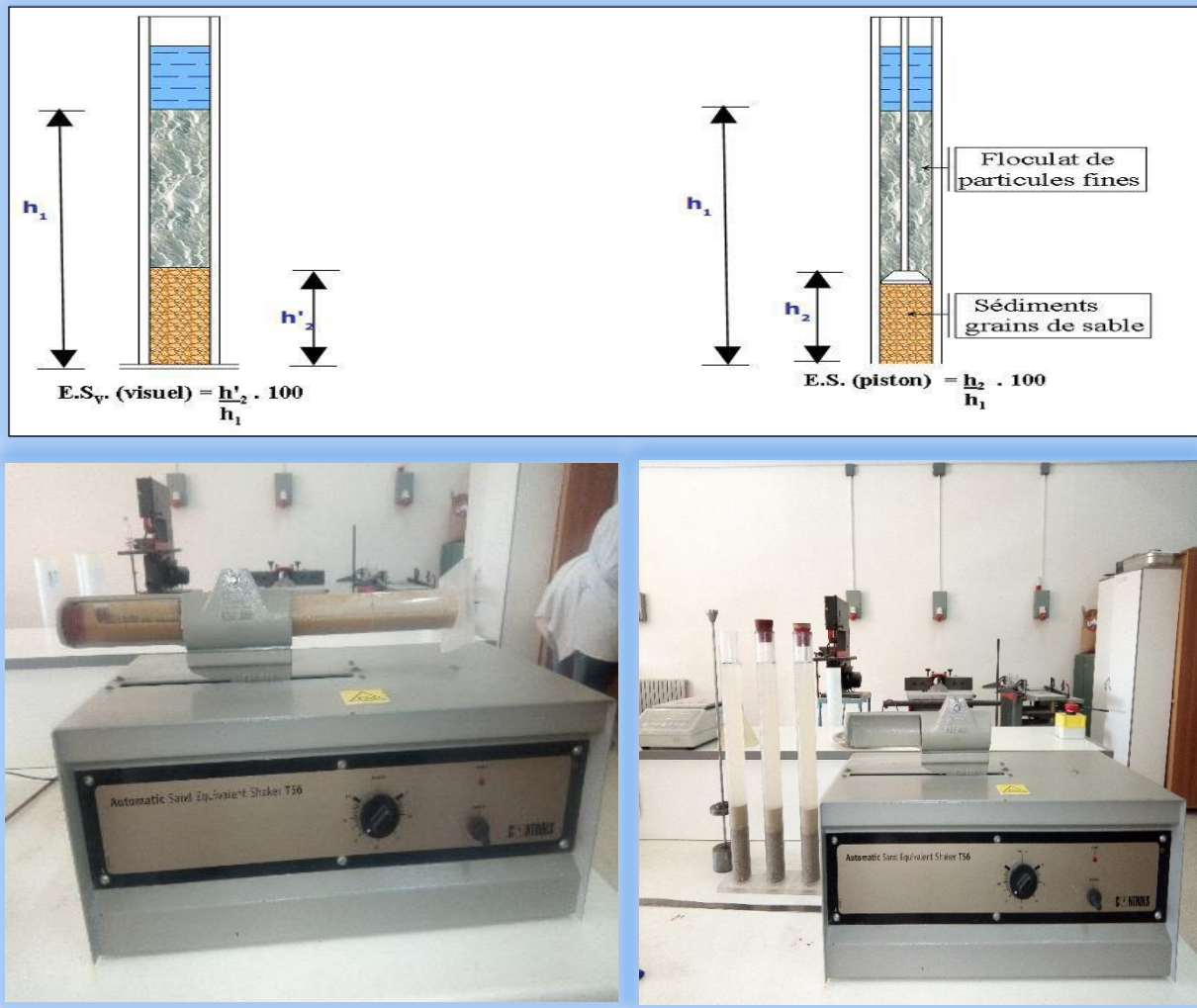


Figure 3.9: Equivalent de sable au piston.

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	11.7	9.1	8.3	77.78	70.94
Essai 2	12.2	9.4	8.7	77.04	71.31
Essai 3	12.5	9.3	8.4	74.4	68.85

TABLEAU 3.12: Propreté de sable de dune étudié.

(ESV)_{moy} = 76.41% (ESP)_{moy} = 70.36%

- **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 3.13 : 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:**

- **Mode Opérateur :**

- * peser le récipient de 1 L de volume vide soit m_1
- * Remplir le récipient par l'entonnoir avec une distance de chute de 15 cm.
- * Araser la couche supérieure du récipient à l'aide d'une règle
- * peser le récipient plein : soit m_2 .

La masse volumique apparente est déterminée par la formule suivante :

$$\rho \text{ (kg/L)} = (M_2 - M_1)/V$$

Où :

V : Volume du récipient.

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

M2 : Le poids du récipient plein de sable.



Figure 3.10 : Méthode de mesure de la masse volumique apparente

Matériaux	Sable de dune (m=60g)			Sable concassé (m=60g)		
m1 (kg)	0.116	0.116	0.116	0.116	0.116	0.116
m2 (kg)	1.421	1.432	1.419	1.457	1.458	1.463
m2-m1	1.305	1.316	1.303	1.341	1.342	1.347
ρ_{app} (kg/m³)	1450	1462.22	1447.77	1490	1491.11	1496.66
ρ_{app} (kg/m³)	1453.33			1492.5		

TABLEAU 3.14: les résultats de la masse volumique apparente.

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

- **But de l'essai:**

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

d'un béton dont les caractéristiques sont imposées.

- **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 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 :

$$\gamma = \frac{M}{V_2 - V_1}$$

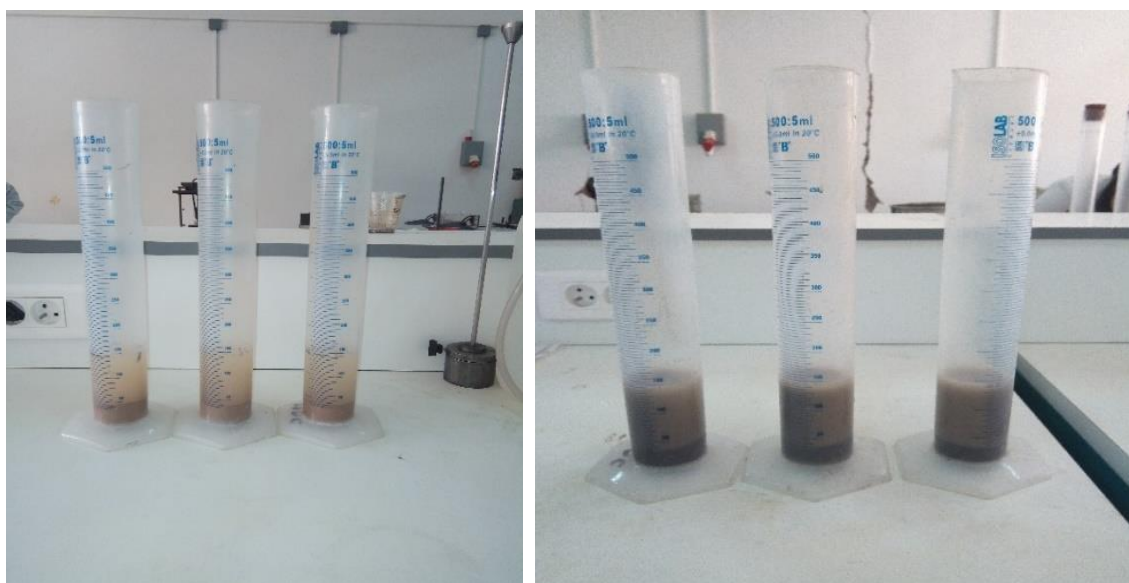


Figure 3.11: Méthode de mesure de la masse volumique absolue

• **Résultats obtenus :**

Matériaux	Sable de dune (m=0.06kg)			Sable concassé (m=0.06kg)		
	V1(ml)	120	120	120	120	120
V2(ml)	145	145	145	145	144	144
V2-v1	25	25	25	25	24	24
M	0.06kg			0.06kg		
ρ (kg/m ³)	2400	2400	2400	2400	2500	2500
ρ (kg/m ³)	2400			2466.66		

TABLEAU 3.15: Masse volumique absolue du sable

II.3.Le ciment:

Le ciment utilisé dans ce travail est un ciment composé de type CEM II/B 42.5N de classe de résistance 42.5, produit par la cimenterie de **LAFARGE** les caractéristiques physiques, chimiques et minéralogiques et mécaniques sont données dans les tableaux suivants :



Figure 3.12: sac de lave du ciment

➤ **Caractéristiques physiques :**

Caractéristiques	Résultats	Unités	Norme
Consistance normal	28	(%)	NF EN 196-3
Début de prise	150	(min)	NF EN 196-3
Fin de prise	188	(min)	NF EN 196-3
SSB	3750-5250	(Cm ² /g)	NF EN 196-6
Expansion	0.3-2.5	(g/cm ³)	NF EN 196-5
Retrait à 28 jours	<100	(μ m/mm)	NF EN 197-7

TABLEAU 3.16: Caractéristiques physiques du ciment CPJ 42.5 Lafarge

➤ **Caractéristiques mécaniques :**

Résistance « MPA »	1J	2J	7J	28J
Compression	11.556	19.215	35.429	44.929
	11.444	20.447	35.906	45.057
Flexion	1.902	4.278	5.912	6.876

TABLEAU 3.17: Résistance à la compression et à la flexion pour prisme du ciment « 40×40×160 » mm »

➤ **Caractéristiques chimiques :**

CaO	SiO2	AL2O3	Fe2O3	SO3	Na2O	K2O	MgO	Chlorures	PAF	insoluble
61.90	15.80	4.15	2.31	2.80	0.06	0.69	2.39	0.023	9.59	0.7-2

TABLEAU 3.18: Composition chimique du ciment CPJ 42.5 Lafarge.

Éléments	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	CaO	gypse	pouzzolane
%	58	16	7	12	01	06	-

TABLEAU 3.19: Composition minéralogique du ciment CPJ 42.5 Lafarge.

II.4.L'eau

L'eau utilisée pour le gâchage de béton est l'eau du robinet de Laboratoire du développement des Géomatériaux – université de Msila)

Pratiquement, toute eau naturelle potable n'ayant pas une odeur ou un goût prononcé peut être employée pour la fabrication du béton. L'utilisation de l'eau potable dans les bétons est considérée comme une pratique sécuritaire.

1) Mesurer la présence de sulfates avec un test à BANDELETTE SO_4^{2-}

• Méthode

Les ions sulfates réagissent avec un complexe thorine-baryum rouge et libèrent alors de la thorine jaune. La concentration en sulfates est déterminée semi-quantitativement par comparaison visuelle des zones réactionnelles de la bandelette-test avec les séries colorées d'une échelle colorimétrique

• Domaine de mesure et nombre de dosages

Domaine de mesure / graduation de l'échelle colorimétrique	Nombre de dosages
400 - >800 - >1200 - >1600 mg/l de SO_4^{2-}	100

TABLEAU 3.20: Domaine de mesure et nombre de dosages de SO_4^{2-}

• Applications

- ✓ Echantillons : Eaux souterraines et eaux de surface
- ✓ Eau potable
- ✓ Eaux usées
- ✓ Eaux industrielles
- ✓ Préparation
- ✓ Les échantillons contenant plus de 1600 mg/l de SO_4^{2-} doivent être dilués avec de l'eau distillée.
- ✓ Le pH doit être compris entre 4 et 8. Si nécessaire, tamponner l'échantillon avec de l'acétate de sodium ou ajuster le pH avec de l'acide tartrique

• Mode opératoire

Ce test de dureté est extrêmement simple et précis.

- ✓ Versez 50ml d'eau à tester dans un récipient
- ✓ Trempez la bandelette
- ✓ La bandelette change de couleur

• Résultat

Résultat d'analyse : changement de couleur dénote que l'eau contient >1600 mg/l de SO_4^{2-} .



Figure 3.13 : Réactifs et produits auxiliaires test à BANDELETTE SO_4^{2-}

2) Test Chlorures Cl^-

- **Méthode**

Dosage titrimétrique avec flacon compte-gouttes Dans une solution nitrique, les ions chlorures sont titrés avec une solution de nitrate de mercure(II) contre la diphényl-1,5-carbazone comme indicateur en formant le chlorure de mercure(II) peu dissocié. A la fin du titrage les ions mercure(II) excédentaires forment avec l'indicateur un complexe bleu violet. La concentration en chlorures résulte de la consommation de solution de titrage (dosage mercurimétrique).

- **Graduation et nombre de dosages :**

Graduation	Nombre de dosages
1 goutte $\hat{=}$ 25 mg/l de Cl^-	100 à 150 mg/l de Cl^-

TABLEAU 3.21: Graduation et nombre de dosages de Cl^-

Applications Echantillons :

- ✓ Eaux souterraines, eaux de surface et eau de mer (après dilution)
- ✓ Eaux de l'aquaculture Eaux potables et minérales
- ✓ Eaux d'addition (bâtiment)
- ✓ Eaux industrielles et eaux usées
- ✓ Eaux de chaudières et d'alimentation de chaudières, eaux de refroidissement
- ✓ Eau de piscine Aliments après prétraitement approprié de l'échantillon Sols et engrais après prétraitement approprié de l'échantillon

• Réactifs et produits auxiliaires :

Tenir compte de tous les avertissements figurant sur l'emballage et les réactifs. Conservés hermétiquement fermés entre +15 et +25 °C, les réactifs-test sont utilisables jusqu'à la date indiquée sur l'emballage. Contenu d'un emballage :

- ✓ 1 flacon de réactif CI-1 (solution indicatrice)
- ✓ 1 flacon de réactif CI-2
- ✓ 1 flacon de réactif CI-3 (solution de titrage)
- ✓ 1 seringue plastique graduée de 5 ml
- ✓ 1 tube à essai 1 carte avec mode d'emploi abrégé



Figure 3.14: Réactifs et produits auxiliaires Test Chlorures CI-

- **Mode opératoire :**

Rincer le tube à essai plusieurs fois avec l'échantillon préparé.		
Echantillon préparé (15 - 30 °C)	5 ml	Introduire à la seringue dans le tube à essai. Ajouter et agiter légèrement. En général l'échantillon vire au bleu. Ajouter en agitant légèrement jusqu'au virage de goutte1) la couleur au jaune.
Réactif Cl-1	2 gouttes	
Réactif Cl-2	Goutte à gouttes	
En tenant le flacon de réactif verticalement, ajouter lentement, goutte à goutte et en agitant légèrement, le réactif Cl-3 à l'échantillon jusqu'à ce que sa couleur vire du jaune au bleu violet. Juste avant le virage, attendre quelques secondes après chaque goutte.		

TABLEAU 3.22 : tableaux représente le mode opératoire du Test Chlorures Cl-

- **Résultats**

Résultat en mg/l de Cl⁻ = nombre de gouttes x 25

Donc on a : $10 \times 25 = 250 \text{ mg/l de cl}$



(Après 2 gouttes de cl1)



(Après 10 gouttes de cl3)

Figure 3.15: photo représente les résultats du Test Chlorures Cl-

3) Test Dureté totale

- **Définition :**

La dureté (dureté totale) d'une eau est conditionnée par sa teneur en sels des métaux alcalino-terreux calcium, magnésium, strontium et baryum (« générateurs de dureté »). Comme le strontium et le baryum ne se trouvent en général dans les eaux que sous forme de traces, on définit la dureté comme la teneur d'une eau en ions calcium, Ca^{2+} , et ions magnésium, Mg^{2+} (« ions dureté »). Il est d'usage de ne rapporter l'indication de la dureté de l'eau que sur le calcium, c'est-à-dire d'exprimer aussi la teneur en ions magnésium comme teneur en calcium. Les unités pour la dureté d'une eau se réfèrent au calcium ou à ses composés CaO ($1^\circ\text{d} = 10 \text{ mg/l de CaO}$) ou CaCO_3 ($1^\circ\text{e} = 14,25 \text{ mg/l de CaCO}_3$; $1^\circ\text{f} = 10 \text{ mg/l de CaCO}_3$), la teneur en magnésium étant exprimée comme teneur en calcium et y étant incluse.

- **Méthode Dosage :**

Titrimétrique avec pipette de titrage Les ions calcium et magnésium forment avec un indicateur un composé complexe rouge. A partir de celui-ci, l'indicateur est libéré par titrage avec une solution du sel di sodique di hydraté de l'acide éthylène di nitrilotétra acétique

A la fin du titrage la couleur vire au vert. La dureté totale résulte de la consommation de solution de titrage.

- **Domaine de mesure et nombre de dosages :**

Domaine de mesure	Graduation de la Nombre de pipette de titrage	Nombre de dosages
1 - 100 mg/l de CaCO_3	1 mg/l de CaCO_3	300 à 53,5 mg/l de CaCO_3

TABLEAU 3.23: tableaux représente domaine de mesure et nombre de dosages de CaCO_3

Applications Echantillons :

- ✓ Eaux souterraines et eaux de surface, eau de mer Eaux potables et minérales
- ✓ Eaux de l'aquaculture
- ✓ Eau de piscine
- ✓ Eaux de chaudières

• Réactifs et produits auxiliaires

Conservés hermétiquement fermés entre +15 et +25 °C, les réactifs-test sont utilisables jusqu'à la date indiquée sur l'emballage. Contenu d'un emballage :

- ✓ flacons de réactif H-1 (solution indicatrice)
- ✓ flacons de réactif H-2 (solution de titrage)
- ✓ 1 seringue plastique graduée de 5 ml 1 tube à essai
- ✓ 1 carte avec mode d'emploi abrégé



Figure 3.16: Réactifs et produits auxiliaires de Test Dureté totale

- **Mode opératoire**

Rincer le tube à essai plusieurs fois avec l'échantillon préparé		
Echantillon (15 - 30 °C)	5 ml	préparé Introduire à la seringue dans le tube à essai. Ajouter et agiter légèrement. L'échantillon vire au rouge en présence des générateurs de dureté.
Réactif H-1	3 gouttes	
Réactif H-2		
<ul style="list-style-type: none"> • Dans un récipient on ajoute 50ml (d'eau de cure : dans l'abaque du laboratoire) + 3 gouttes de (H-1) on observe un changement de couleur → (marron) Et dans un autre récipient on ajoute 14 gouttes → couleurs verte • Et maintenant on refait le test avec l'eau potable : (H-1) → 3 gouttes (dans 50ml d'eau) → changement de couleur → marron (H-2) → 50 gouttes (dans 50ml d'eau) → changement de couleur → vert 		

TABLEAU 3.24 : tableaux représente le mode opératoire du Test Dureté totale

Résultats : $17 \times 50 = 850 \text{mg/l}$ de CaCO_3 dans l'eau

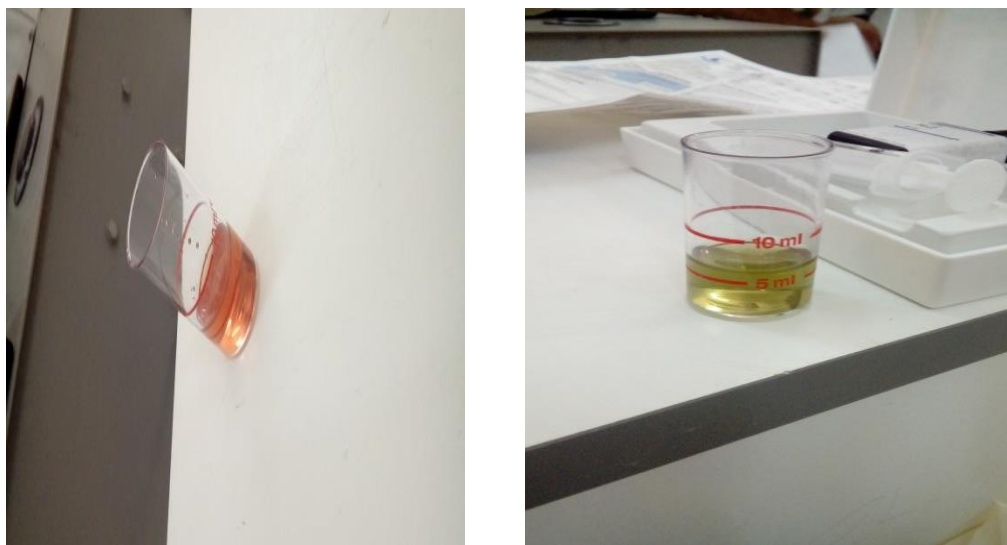


Figure 3.17: photo représente les résultats du Test Dureté totale-

4) Test carbon dioxide

- **Objectif_:**

C'est de connaître la quantité du carbone dans l'eau

- **Définitions**

La teneur en dioxyde de carbone est l'aspect primordial pour l'effet tampon d'une eau. À la condition préalable que les composants de l'eau tampon autres que l'acide carbonique et ses sels puissent être négligés - comme c'est le cas avec la plupart des eaux naturelles - la teneur en dioxyde de carbone peut être déterminée par titrage avec une solution d'hydroxyde de sodium jusqu'au point d'équivalence de pH 8,2.

- **Méthode**

Détermination titrimétrique avec flacon compte-gouttes Un échantillon est titré avec une solution d'hydroxyde de sodium contre la phénolphthaléine jusqu'à ce que sa couleur vire du rose au rouge (à pH 8,2). La teneur en dioxyde de carbone est déterminée à partir de la consommation de solution de titrage

- **Domaine de mesure et nombre de dosages :**

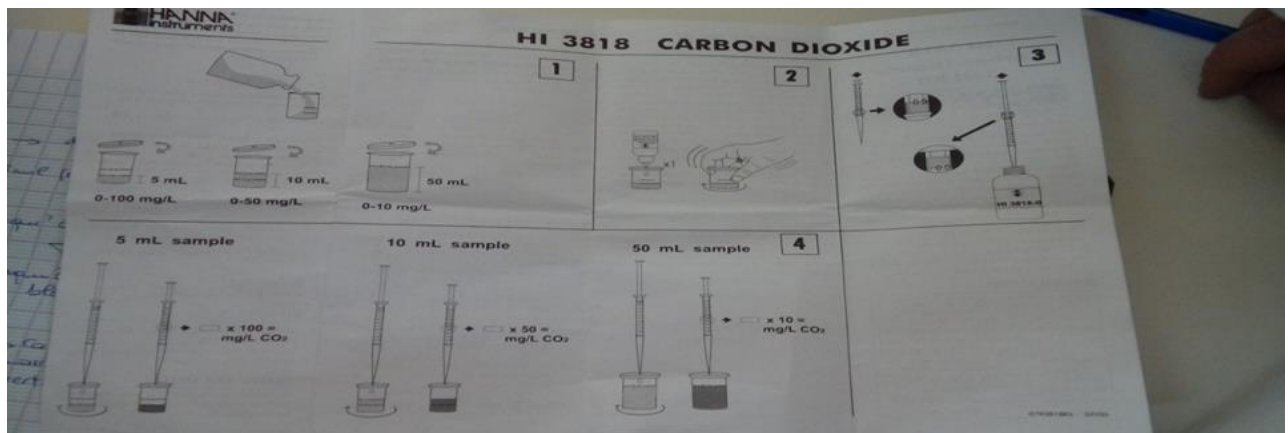


Figure 3.18: photo représente domaine de mesure et nombre de dosages

- **Applications Echantillons**

Chaque kit est fourni avec:

- 1) Indicateur de phénolphthaléine
- 2) 1 flacon (10 ml) avec compte-gouttes
- 3) HI 3818-0
- 4) 1 bouteille (120 ml)
- 5) 2 récipients calibrés (10 et 50 ml)
- 6) 1 seringue calibrée



Figure 3.19: Réactifs et produits auxiliaires de Test carbon dioxide

- **Mode opératoire**

Rincer le tube à essai plusieurs fois avec l'échantillon préparé		
Echantillon (15 - 30 °C)	5 ml	préparé Introduire à la seringue dans le tube à essai.
phénolphtaléine	1gouttes	
<p>Ajouter et agiter légèrement. L'échantillon vire au mauve.</p>		
<ul style="list-style-type: none"> • Retirez le capuchon du petit récipient en plastique. Rincer le récipient en plastique avec un échantillon d'eau, remplir jusqu'au repère 5 ml et replacer le capuchon. • Ajouter 1 goutte d'indicateur de phénolphtaléine par l'orifice du capuchon et mélanger soigneusement en agitant le récipient en cercles serrés <p>On a remarqué que la couleur de l'échantillon est changée vers le rose violet</p>		

TABLEAU 3.25: tableaux représente le mode opératoire du Test carbon dioxide

Résultats : 1(goutte)*100=100 mg/l de co₂



Figure 3.20: photo représente les résultats du Test carbon dioxide

Conclusion :

D'après nos résultats et d'après la norme EN206-1

SO_4^{-2}	$\geq 1600\text{mg/l (XA}_2)$	Un danger modéré
CL^-	250mg/l	Un danger modéré
CACO_3	850mg/l	Un danger modéré
CO_2	100mg/l (XA ₂)	Environnement a agressivité chimique modéré

TABLEAU 3.26: tableau représente les résultats des tests

II.5.adjuvants:

Les adjuvants sont des produits incorporés au moment du malaxage du béton à un dosage

Inférieur ou égale à 5 % en masse du poids de ciment pour modifier ou améliorer les propriétés du mélange à l'état frais et ou du béton durci,

Dans notre étude on a utilisé les super-plastifiants à savoir: MEDAPLAST 40 de GRANITEX (super-plastifiant)



Figure 3.21: super-plastifiants

Conclusion :

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

Chapitre III :

Analyse et

interprétation des

résultats

III.1): Modélisation par plan d'expérience:

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

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

N°	Dosage de Ciment	E/C	E/C	G/S	Sc/Sb %	eau	La Cure	Chiffre d'épreuve	La date de collage	La date de cure	La date de cure MA	perméabilité
1	250	0.35	0.6	1	50-50 %	3.12	T=20/= H=90	EP01	26/02/2020	01/03/2020		
2	250	0.35	0.6	1	50-50 %	3.12	Milieu agressif	EP02	26/02/2020	01/03/2020	08/03/2020	
3	250	0.35	0.97	1	50-50 %	3.928	T=20/= H=90	EP03	01/03/2020	05/03/2020		
4	250	0.35	0.97	1	50-50 %	3.928	Milieu agressif	EP04	01/03/2020	05/03/2020	08/03/2020	
5	250	0.35	0.79	1	70-30 %	3.292	T=20/= H=90	EP05	02/03/2020	05/03/2020		
6	250	0.35	0.79	1	70-30 %	3.292	Milieu agressif	EP06	02/03/2020	05/03/2020	08/03/2020	
7	250	0.35	0.98	1	70-30 %	4	T=20/= H=90	EP07	08/03/2020	09/03/2020		
8	250	0.35	0.98	1	70-30 %	4	Milieu agressif	EP08	08/03/2020	09/03/2020	11/03/2020	
9	250	0.35	0.47	2	50-50 %	1.942	T=20/= H=90	EP09	09/03/2020	10/03/2020		
10	250	0.35	0.47	2	50-50 %	1.942	Milieu agressif	EP10	09/03/2020	10/03/2020		
11	250	0.35	0.93	2	50-50 %	3.805	T=20/= H=90	EP11	09/03/2020	10/03/2020		
1	250	0.35	0.9	2	50-50	3.80	Milieu	EP12	09/03/2020	10/03/2020		

2			3		%	5	agressif					
1 3	250	0.35		2	70- 30 %		T=20/= H=90	EP13				
1 4	250	0.35		2	70- 30 %		Milieu agressif	EP14				
1 5	250	0.35		2	70- 30 %		T=20/= H=90	EP15				
1 6	250	0.35		2	70- 30 %		Milieu agressif	EP16				
1 7	600	0.6	0.2 7	1	50- 50 %	3.36	T=20/= H=90	EP17	01/03/2020	02/03/2020		
1 8	600	0.6	0.2 7	1	50- 50 %	3.36	Milieu agressif	EP18	01/03/2020	02/03/2020	08/03/2020	
1 9	600	0.6	0.5	1	50- 50 %	4.86	T=20/= H=90	EP19	02/03/2020	05/03/2020		
2 0	600	0.6	0.5	1	50- 50 %	4.86	Milieu agressif	EP20	02/03/2020	05/03/2020	08/03/2020	
2 1	600	0.6	0.4 1	1	70- 30 %	3.99 9	T=20/= H=90	EP 21	08/03/2020	09/03/2020		
2 2	600	0.6	0.4 1	1	70- 30 %	3.99 9	Milieu agressif	EP 22	08/03/2020	09/03/2020		
2 3	600	0.6	0.4 4	1	70- 30 %	4.3	T=20/= H=90	EP23	09/03/2020	09/03/2020		
2 4	600	0.6	0.4 4	1	70- 30 %	4.3	Milieu agressif	EP 24	09/03/2020	09/03/2020		
2	600	0.6	0.3	2	50- 50	3	T=20/=	EP25	09/03/2020	09/03/2020		

5					%		H=90					
26	600	0.6	0.3	2	50-50%	3	Milieu agressif	EP 26	09/03/2020	09/03/2020		
27	600	0.6	0.47	2	50-50%	4.6	T=20/= H=90	EP 27	11/03/2020			
28	600	0.6	0.47	2	50-50%	4.6	Milieu agressif	EP 28	11/03/2020			
29	600	0.6		2	70-30%		T=20/= H=90	EP 29				
30	600	0.6		2	70-30%		Milieu agressif	EP 30				
31	600	0.6		2	70-30%		T=20/= H=90	EP 31				
32	600	0.6		2	70-30%		Milieu agressif	EP 32				

Tableaux 4.1 : la formulation du béton par le plan d'expérience

III.2): Analyse des résultats:

L'analyse des résultats à été effectué par le logiciel Minitab 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.

Matrice des données et résultats obtenus :

un	Ciment (kg/m3)	G/S	Sd/Sc	Ajout(%)	Cure	Perméabilité m/s 10 ⁻¹²
1	250	1	50/50	0	Eau saine	12,18
2	250	1	50/50	0	Eau Agressive	14,70
3	250	1	50/50	10	Eau saine	4,07
4	250	1	50/50	10	Eau Agressive	4,50
5	250	1	30/70	0	Eau saine	14,70
6	250	1	30/70	0	Eau Agressive	16,70
7	250	1	30/70	10	Eau saine	5,20
8	250	1	30/70	10	Eau Agressive	6,25
9	250	2	50/50	0	Eau saine	19,20
10	250	2	50/50	0	Eau Agressive	20,80
11	250	2	50/50	10	Eau saine	5,50
12	250	2	50/50	10	Eau Agressive	6,40
13	250	2	30/70	0	Eau saine	22,40
14	250	2	30/70	0	Eau Agressive	31,20
15	250	2	30/70	10	Eau saine	7,50
16	250	2	30/70	10	Eau Agressive	8,60
17	600	1	50/50	0	Eau saine	2,00
18	600	1	50/50	0	Eau Agressive	2,80
19	600	1	50/50	10	Eau saine	0,08
20	600	1	50/50	10	Eau Agressive	0,02
21	600	1	30/70	0	Eau saine	6,20
22	600	1	30/70	0	Eau Agressive	8,10
23	600	1	30/70	10	Eau saine	2,20
24	600	1	30/70	10	Eau Agressive	4,40
25	600	2	50/50	0	Eau saine	2,70
26	600	2	50/50	0	Eau Agressive	4,70
27	600	2	50/50	10	Eau saine	0,08
28	600	2	50/50	10	Eau Agressive	2,45
29	600	2	30/70	0	Eau saine	10,04
30	600	2	30/70	0	Eau Agressive	12,02
31	600	2	30/70	10	Eau saine	2,30
32	600	2	30/70	10	Eau Agressive	3,00

Tableaux 4.2 : les résultats obtenus

III.3): Interprétations des résultats des diagrammes:

III.3.1): Résultats du Diagramme de Pareto des effets:

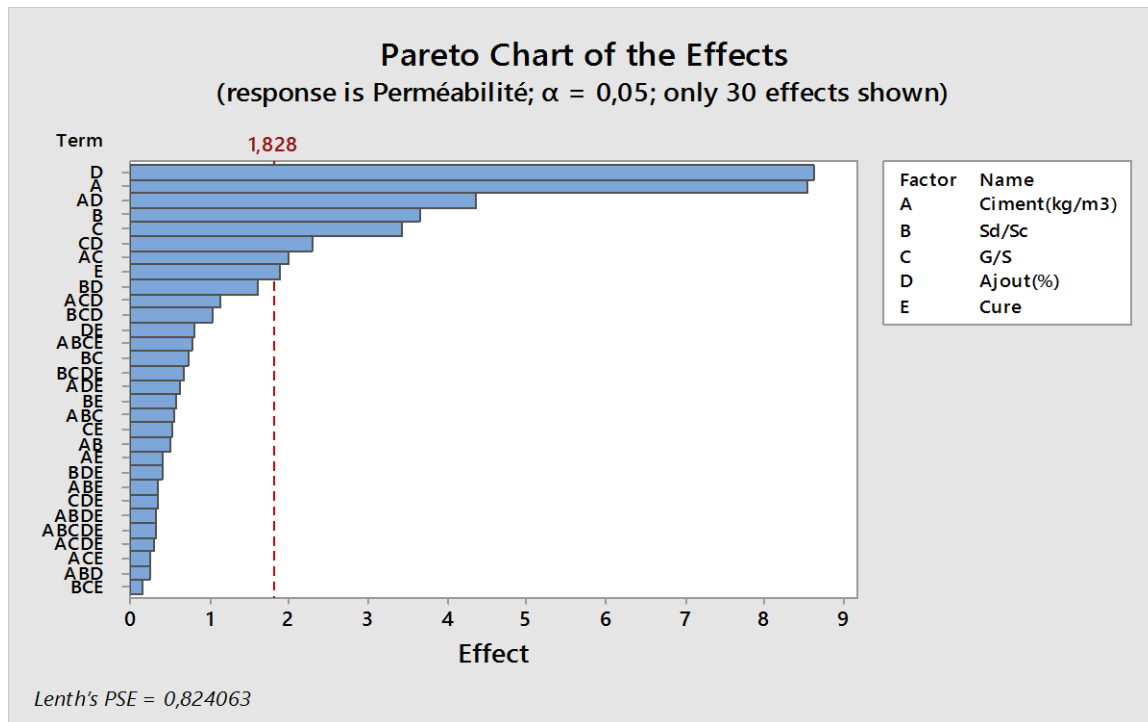


Figure. 4.1: Résultats du Diagramme de Pareto des effets

La question qui se pose qu'elles sont les paramètres les plus influents?

Vue que la ligne rouge passe par 5 facteurs et 3 interactions de 2 facteurs ça implique que tous les facteurs sont influents.

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

- 1) D : le pourcentage d'ajout
- 2) A : le dosage de ciment
- 3) AD : l'interaction de dosage de ciment et le pourcentage d'ajout.
- 4) B : le rapport S_D/S_C
- 5) C : le rapport G/S
- 6) CD : l'interaction rapport G/S et le pourcentage d'ajout.
- 7) AC : l'interaction de dosage de ciment et le rapport G/S.
- 8) E : la cure

I I I.3.2):.Résultats des effets principaux:

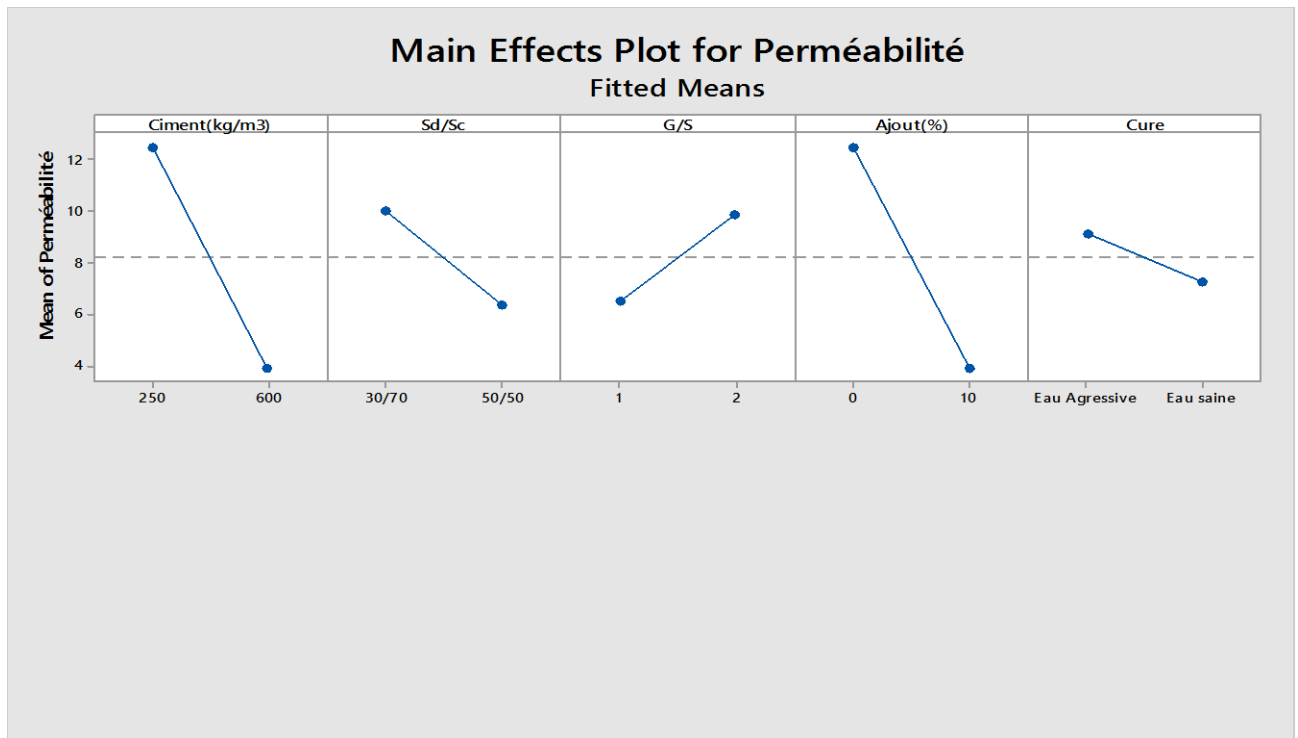


Figure 4.2: L'effet de chaque facteurs pris individuellement

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

- La perméabilité diminue fortement lorsque le dosage de ciment augmente
- La perméabilité diminue en utilisant le rapport S_D/S_C (50/50%).
- La perméabilité augmente en utilisant le rapport $G/S= 2$.
- La perméabilité diminue fortement en utilisant le pourcentage d'ajoute 10%.
- La perméabilité diminue en utilisant une cure dans l'eau saine.

I I.3.2):.Diagramme des interaction des facteurs prise deux à deux

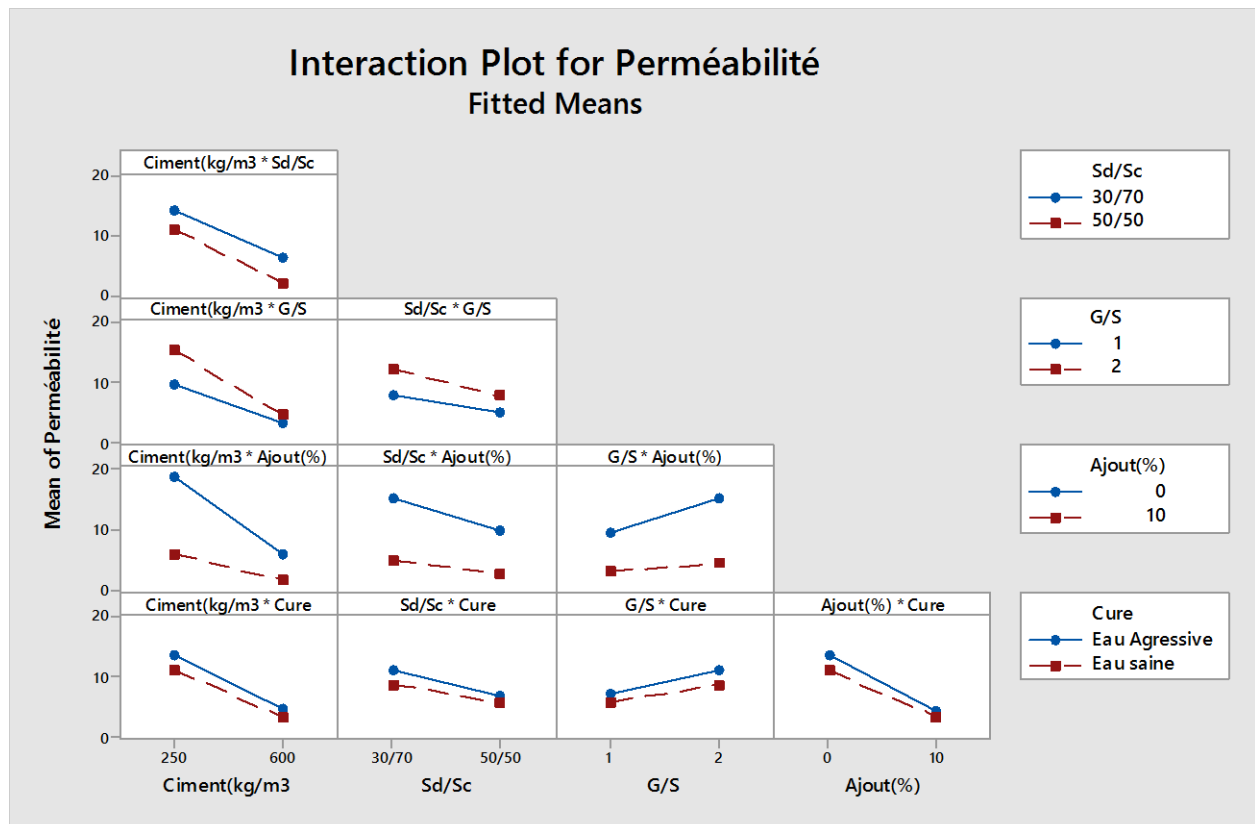


Figure 4.3: Diagramme des interaction des facteurs prise deux à deux

Les résultats montrent que la perméabilité est influée par l'interaction des paramètres deux à deux:

- 1) Un dosage de ciment 600kg/m³ et une cure dans l'eau saine produit un béton de faible perméabilité alors que un dosage de ciment de 250kg/m³ avec une cure dans l'eau agressive produit un béton de forte perméabilité
- 2) Un rapport SD/SC (50/50) avec une cure dans l'eau saine produit un béton de faible perméabilité alors qu'un rapport SD/SC (30/70) avec une cure dans l'eau agressive produit un béton de forte perméabilité
- 3) Un rapport (G/S =1) avec un cure dans l'eau saine produit un béton de faible perméabilité par contre Un rapport (G/S =2) avec un cure dans l'eau agressive produit un béton de forte perméabilité

-
- 4) Le pourcentage d'ajout =10% avec une cure dans l'eau saine produit un béton de faible perméabilité alors que un pourcentage d'ajout =0% avec un cure dans l'eau agressive produit un béton de forte perméabilité
 - 5) Un dosage de ciment 600kg/m³ avec de 10% d'ajoute produit un béton de faible perméabilité et Un dosage de ciment 250kg/m³ avec un 0% d'ajoute produit un béton de forte perméabilité.
 - 6) Un rapport SD/SC (50/50) avec de 10% d'ajout produit un béton de faible perméabilité et Un rapport SD/SC (30/70) avec un 0% d'ajout produit un béton de forte perméabilité.
 - 7) Un rapport (G/S =1) avec de 10% d'ajout produit un béton de faible perméabilité et Un rapport
 - a. (G/S =2) avec un 0% d'ajout produit un béton de forte perméabilité.
 - 8) Un dosage de ciment 600kg/m³ avec un rapport (G/S =1) produit un béton de faible perméabilité et Un dosage de ciment 250kg/m³ avec Un rapport (G/S =2) produit un béton de forte perméabilité.
 - 9) Un rapport SD/SC (50/50) avec Un rapport (G/S =1)) produit un béton de faible perméabilité et Un rapport SD/SC (30/70) avec Un rapport (G/S =2) produit un béton de forte perméabilité.
 - 10) Un dosage de ciment 600kg/m³ avec Un rapport SD/SC (50/50) produit un béton de faible perméabilité et Un dosage de ciment 250kg/m³ avec Un rapport SD/SC (30/70) produit un béton de forte perméabilité.

- **Equation de régression en unités non codées:**

Regression Equation in Uncoded Units

$$\begin{aligned}
 \text{Perméabilité} = & 8,279 - 0,01016 \text{ Ciment (kg/m}^3) + 2,729 \text{ Sd/Sc} \\
 & + 13,29 \text{ G/S} - 0,4114 \text{ Ajout (\%)} \\
 & \quad + 0,8364 \text{ Cure} - 0,006357 \text{ Ciment (kg/m}^3) * \text{Sd/Sc} - \\
 & 0,01783 \text{ Ciment (kg/m}^3) * \text{G/S} \\
 & \quad + 0,000554 \text{ Ciment (kg/m}^3) * \text{Ajout (\%)} - \\
 & 0,001986 \text{ Ciment (kg/m}^3) * \text{Cure} \\
 & \quad - 2,970 \text{ Sd/Sc} * \text{G/S} - 0,1571 \text{ Sd/Sc} * \text{Ajout (\%)} - \\
 & 3,928 \text{ Sd/Sc} * \text{Cure} \\
 & \quad - 1,007 \text{ G/S} * \text{Ajout (\%)} - 2,291 \text{ G/S} * \text{Cure} - \\
 & 0,1032 \text{ Ajout (\%)} * \text{Cure} \\
 & \quad + 0,002800 \text{ Ciment (kg/m}^3) * \text{Sd/Sc} * \text{G/S} \\
 & + 0,000016 \text{ Ciment (kg/m}^3) * \text{Sd/Sc} * \text{Ajout (\%)} \\
 & \quad + 0,007471 \text{ Ciment (kg/m}^3) * \text{Sd/Sc} * \text{Cure} \\
 & + 0,001294 \text{ Ciment (kg/m}^3) * \text{G/S} * \text{Ajout (\%)} \\
 & \quad + 0,003286 \text{ Ciment (kg/m}^3) * \text{G/S} * \text{Cure} \\
 & + 0,000181 \text{ Ciment (kg/m}^3) * \text{Ajout (\%)} * \text{Cure} \\
 & \quad + 0,1738 \text{ Sd/Sc} * \text{G/S} * \text{Ajout (\%)} \\
 & + 3,509 \text{ Sd/Sc} * \text{G/S} * \text{Cure} \\
 & \quad + 0,3268 \text{ Sd/Sc} * \text{Ajout (\%)} * \text{Cure} \\
 & + 0,2235 \text{ G/S} * \text{Ajout (\%)} * \text{Cure} \\
 & \quad + 0,000081 \text{ Ciment (kg/m}^3) * \text{Sd/Sc} * \text{G/S} * \text{Ajout (\%)} \\
 & \quad - 0,006314 \text{ Ciment (kg/m}^3) * \text{Sd/Sc} * \text{G/S} * \text{Cure} \\
 & \quad - 0,000379 \text{ Ciment (kg/m}^3) * \text{Sd/Sc} * \text{Ajout (\%)} * \text{Cure} \\
 & \quad - 0,000358 \text{ Ciment (kg/m}^3) * \text{G/S} * \text{Ajout (\%)} * \text{Cure} - \\
 & 0,2987 \text{ Sd/Sc} * \text{G/S} * \text{Ajout (\%)} * \text{Cure} \\
 & \quad + 0,000381 \text{ Ciment (kg/m}^3) * \text{Sd/Sc} * \text{G/S} * \text{Ajout (\%)} * \text{Cure}
 \end{aligned}$$

On utilise les équations de régression en unités non codées pour avoir la réponse pour n'importe quelle composition de béton voulu.

CONCLUSION GENERALE

Chaque structure en béton doit conserver ces qualités et continuer de remplir ces fonctions au cours du temps. La détérioration des bétons résulte des facteurs externes (les attaques chimico-biologiques, l'eau de mer, les sulfates...), ou des facteurs internes (e/c élevée, dosage faible de ciment, eau de gâchage non potable...).

La perméabilité à l'eau du béton est un indicateur général 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 pores capillaires existent normalement dans une pâte de ciment à n'importe quel stade de l'hydratation. Cette porosité capillaire de la pâte dépend à la fois du rapport E/C et du degré d'hydratation. Ces pores capillaires de forme variée sont de l'ordre de 1.3 μm . S'ils sont interconnectés, ils sont principalement la cause de la perméabilité du béton. La porosité capillaire interconnectée permet la pénétration des agents agressifs extérieurs provoquant ainsi la dégradation du béton.

Les essais de perméabilité à l'eau du béton n'ont généralement pas été normalisés. De nombreuses méthodes d'essais permettant de déterminer la perméabilité à l'eau du béton ont été proposées. Dans ces essais tels qu'ils sont utilisés, le débit de l'écoulement sous l'influence d'une pression appliquée est mesuré. Ainsi, le coefficient de perméabilité K est calculé à partir de la loi de Darcy. Afin de mesurer la perméabilité des matériaux cimentaires, il est nécessaire d'utiliser une méthode souple, assez simple à appliquer, d'un temps de mesure court et avec une haute précision.

La durée de vie d'une structure en béton est très souvent liée à sa capacité à empêcher les agents agressifs extérieurs d'infiltrer dans sa porosité. La capacité d'un béton à résister à l'intrusion de ces agents est caractérisée par sa perméabilité. Des échantillons de bétons ont été conservés dans des solutions d'acides et de sulfates dont le but d'évaluer l'influence de ces agents agressifs sur la perméabilité à l'eau du béton et comparaison des résultats obtenus avec ceux d'un béton qui a reçu une cure standard dans l'eau pendant 28 jours.

La perméabilité à l'eau diminue avec le rapport E/C décroissant. En général, on s'attend à ce que la porosité capillaire totale du béton diminue lorsque son rapport E/C est réduit. La diminution de la porosité capillaire composée d'un grand nombre de pores connectés, conduit à une réduction des voies dans le béton durci. Ceci est traduit par une perméabilité réduite. Lorsque le dosage en ciment de la pâte augmente c'est-à-dire que le rapport E/C diminue. Ce dosage influe d'une manière significative sur la perméabilité à l'eau du béton. Pendant l'hydratation.

Le coefficient de perméabilité à l'eau diminue avec le temps. Cette diminution est attribuée à la partie externe du béton, appelée béton de peau. C'est la partie la plus sensible, car le séchage y est plus rapide et elle est plus poreuse que le cœur du béton. Ceci peut être dû à un rapport E/C localement plus élevé ou à des conditions d'hydratation moins favorables que le cœur du béton.

Les connaissances de cette étude que nous avons acquis par cette étude :

Traiter un sujet permettant de s'intégrer dans l'univers de la recherche scientifique savoir analyser et organiser et modéliser les résultats par la méthodologie des plans d'expériences .

Savoir manipuler les appareillage scientifique de recherche.

Savoir contrôler la durabilité du béton par l'essai de perméabilité pour n'importe quelle type de béton .

Savoir formuler un béton durable avec une faible perméabilité

savoir identifier les facteurs influents sur la perméabilité des bétons .

Ce travail expérimentale de mémoire de fin d'étude nous qualifie pour le travail sur le terrain et pour la vie professionnelle dans le domaine des contrôle des matériaux de génie civil .

Référence :

- 1) **Yacine, Lammari et et-tayib, houmeur mouaadh. 2018.** Pathologie des bétons des stations d'épuration sous l'influence des eaux agressives. Guelma : Université 05 mai 1945, 2018.
- 2) **Salim, Hamlaoui. 2012.** Maintenance, entretien et réparation des ponts. Biskra : Universiyé mohammed kheider, 2012.
- 3) **MAI-NHU, Jonathan. Décembre 2015.** Corrosion des armatures intérêt des inhibiteurs de corrosion et méthodologies pour le suivi durant la vie de l'ouvrage. s.l. : Centre d'Études et de Recherches de l'Industrie du Béton, Décembre 2015.
- 4) **Abdelmohcene, Debih. 2016.** durabilité d'un béton exposé à un milieu agressif (acide sulfurique), influence de la forme des granulats (concassé-roulés). M'sila : Université Mohamed Boudiaf , 2016.
- 5) **SIAD, Ali. 27 juin 2018.** Pathologie des constructions en béton, diagnostic et méthodes de réparations. Etude de cas de l'effet combiné de pré-fissuration/corrosion sur les propriétés mécaniques des poutres en béton armé. M'sila : Université Mohamed Boudiaf-, 27 juin 2018.
- 6) **IHAB, ITMAIZEH. 2015/2016.** pathologie de structures en béton armé. s.l. : Université dz larbi ténéssi, 2015/2016.
- 7) **Mohamed, BENCHEIKH. 2017-2018.** Cours de durabilité des matériaux. Msila : Université Mohamed Boudiaf , 2017-2018.
- 8) **.M, O. Mehena, O. (2009).** Indicateurs de durabilité du béton dans le contexte Algérien. Université de Boumerdès, Algérie: Mémoire de Magistère.

-
- 9) **Infociments. (2018).** Récupéré sur <https://www.infociments.fr/betons/notion-de-durabilite-des-betons>.
- 10) **A Amriou, Bencheikh M. (2017 Elsevier).** Nouvelle méthode expérimentale pour évaluer la perméabilité à l'eau du béton par une procédure d'écoulement latéral sur une éprouvette cylindrique creus.
- 11) **AMRIOU A. (19/03/2018).** THÈSE, EVALUATION DE LA DURABILITE DU BETON PAR ESSAIS DE PERMEABILITE A L'EAU SOUS CONDITIONS CLIMATIQUES ET CHIMIQUES PREJUDICIALES.
- 12) **Wei CHEN. (le 9 décembre 2011).** THESE DOCTORAT DELIVRE PAR L'ECOLE CENTRALE DE LILLE, Etude expérimentale de la perméabilité du béton sous conditions thermiques et hydriques variables.
- 13) **J. Baron, J.P. Ollivier. (s.d.).** La durabilité des bétons, Association technique de l'industrie des liants hydrauliques, in French, Paris, 1992. ISBN: 2-85978-184- 6