

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

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT GENIE CIVIL

N° :



DOMAINE : Génie Civil

FILIERE : Génie Civil

OPTION : Matériaux

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

Par: BAIRA Sabrina Zineb

HAMOUD Safaa

Intitulé

**Étude Expérimentale de la diffusivité des ions
chlorures**

Dans le béton comme indicateur de durabilité

Soutenu devant le jury composé de:

Pr : NACERI Abdelghani

Université de M'sila

Président

Pr :BENCHEIKH Mohamed

Université de M'sila

Rapporteur

Dr : AMRIOU Abderrachid

Université de M'sila

Examineur

Année universitaire : 2020 /2021



REMERCIEMENT

Avant tout nous tenons à remercier **Allah** tout puissant de nous avoir donné la volonté, la santé et la patience durant nos années d'études et surtout pendant la réalisation de ce mémoire.

Nous ne pouvons pas réellement trouver les expressions élégantes que mérite notre encadreur **Pr. BENCHEIKH Mohamed** pour son écoute, son aide, sa sympathie et sa patience, son encouragement et ses conseils, ainsi que pour le temps qu'il a consacré pour évaluer et critiquer ce travail et sa présence totale au cours de cette modeste étude.

De même, nous remercions vivement l'ingénieur de laboratoire de développement Géomatériaux Université de M'sila **CHOUKEIR Sawsen** pour leur conseil, leur soutien et leur aide précieuse pendant la durée de nos travaux.

Nos remerciements s'adressent à tous les membres du jury qui ont accepté de juger notre travail.

Notre profonde gratitude à tous les enseignants du Département de génie civil en particulier dans notre spécialité Matériaux.. Je remercie aussi mon amie « **OMRI Imen Yamina** » pour leur conseil et leur aide et de sa bonne humeur.

Mes derniers remerciements vont à mes parents pour m'avoir toujours poussé dans mes études ; de m'avoir transmis les bonnes valeurs.

B.sabrina zineb

Dédicace

Je dédie ce projet :

A ma chère mère,

A mon cher père,

Qui n'ont jamais cessé, de formuler des prières à mon égard, de me soutenir et de m'épauler pour que je puisse atteindre mes objectifs.

A mon frère Raouf

A mes chères sœurs Meriem, Fairouz, Lila, Ibtisam

Pour ses soutiens moral et leurs conseils précieux tout au long de mes études.

à l'âme de mes grands parents,

A toute ma famille,

A tous mes autres ami(e)s,

A tous ceux que j'aime et ceux qui m'aiment.

B.sabrina zineb

RESUME

Le développement de la construction dans le monde s'éteint vers les bétons innovant à cause de ces hautes performances et sa haute résistance et durabilité, ces bétons particulièrement résistants aux agents agressifs (l'environnement, pénétration des chlorures, attaque de sulfates), le risque de corrosion des armatures.

En Algérie on se base sur la réglementation N 206-1 mais il y a un grand manque dans le domaine de contrôle technique de construction causé par l'absence de règlement et des normes locales .alors l'ingénieur dépend juste de mesurer la résistance mécanique.

L'objectif de notre travail est savoir fabriquer un béton étanche (imperméable) par l'expérience de la diffusivité aux ions chlorures (un très bon indicateur de durabilité), les bétons ayant un faible coefficient de diffusivité sont des bétons imperméable, pour atteindre cet objectif nous devons aboutir à une formulation adéquate permettant d'atteindre un min coefficient de diffusivité à l'aide d'un essai de migration sous champ électrique, le coefficient de diffusion (D_e) est déterminé en régime stationnaire à partir de l'équation de Nernst-Planck basée sur des mesures des flux de chlorures et de temps .la méthodologie utilisé s'est le plan d'expérience , les facteurs sélectionner dans notre étude sont : le dosage de ciment (350kg/m³/600kg/m³) ,rapport Eau/ciment (0.35/0.65), ajout 20%(poudre de marbre calciné et non calciné), adjuvant (hydrofuge, super plastifiant) et le mode de la cure (à l'eau et à l'air)
Mots clés : Durabilité,étanchéité ,imperméabilité, béton, Les sulfates, chlorures, diffusion des ions chlorures, migration des ions, coefficient de diffusion.

ABSTRACT

The development of construction in the world is moving towards innovative concretes because of these high performances and its high resistance and durability, these concretes particularly resistant to aggressive agents (the environment, penetration of chlorides, attack of sulphates), the risk of corrosion of reinforcements.

In Algeria it is based on regulation N 206-1 but there is a great lack in the field of technical control of construction caused by the absence of regulation and local standards. Then the engineer just depends on measuring the mechanical resistance.

The objective of our work is to know how to manufacture a waterproof concrete (impermeable) by the experience of diffusivity to chloride ions (a very good indicator of durability), concretes with a low coefficient of diffusivity are impermeable concretes, to achieve this objective we must arrive at an adequate formulation allowing to reach a min coefficient of diffusivity using a test of migration under electric field, the coefficient of diffusion (D_e) is determined in stationary mode starting from the equation of Nernst-Planck based on measurements of the flow of chlorides and time. The methodology used is the experimental design, the factors to be selected in our study are: the dosage of cement (350kg / m³ / 600kg / m³), ratio Water / cement (0.35 / 0.65), addition 20% (calcined and non-calcined marble powder), adjuvant (water repellent, super plasticizer) and the mode of cure (with water and air).

Key words: Durability, tightness, impermeability, concrete, Sulphates, chlorides, diffusion of chloride ions, migration of ions, diffusion coefficient.

ملخص

يتجه تطور البناء في العالم نحو خرسانة مبتكرة بسبب أداؤها العالي ومقاومتها العالية ومتانتها ، فهذه الخرسانة مقاومة بشكل خاص للعوامل العدوانية (البيئة ، اختراق الكلوريدات ، هجوم الكبريتات) ، وخطر تآكل التعزيزات ولكن هناك نقص كبير في مجال التحكم الفني للبناء بسبب غياب N 206-1 في الجزائر يعتمد على اللائحة التنظيم والمعايير المحلية ثم يعتمد المهندس فقط على قياس المقاومة الميكانيكية الهدف من عملنا هو معرفة كيفية تصنيع الخرسانة المقاومة للماء (غير منفذة) من خلال تجربة الانتشار لأيونات الكلوريد (مؤشر جيد جدًا على المتانة) ، والخرسانة ذات معامل الانتشار المنخفض هي خرسانة غير منفذة ، لتحقيق هذا الهدف نحن يجب أن يصل إلى صيغة مناسبة تسمح بالوصول إلى الحد الأدنى من معامل الانتشار باستخدام اختبار الهجرة Nernst-Planck في الوضع الثابت بدءًا من معادلة (De) تحت المجال الكهربائي ، ويتم تحديد معامل الانتشار استنادًا إلى قياسات تدفق الكلوريدات والوقت: المنهجية المستخدمة هي التصميم التجريبي ، والعوامل التي سيتم اختيارها في دراستنا هي: جرعة الأسمنت (350 كجم / م³ / 600 كجم / م³) ، نسبة الماء / الأسمنت (0.65 / 0.35) ، إضافة 20٪ (مسحوق الرخام المكلس وغير المكلس) والمواد المساعدة (طارد المياه والملدنات الفائقة) وطريقة المعالجة (بالماء والهواء).

الكلمات المفتاحية: المتانة ، العزل المائي ، النفاذية ، الخرسانة ، الكبريتات ، الكلوريدات ، انتشار أيون الكلوريد ، هجرة الأيونات ، معامل الانتشار

SOMMAIRE

Sommaire.....	
Remerciements.....	
..... ملخص	
Résumé.....	
Abstract.....	
Liste des tableaux.....	
Liste des figures.....	
Introduction générale.....	

CHAPITRE I : durabilité et les pathologies des bétons.

I.1 Introduction.....	I.2
I.2 Les pathologies des bétons.....	I.2
I.2.1 Causes de dégradation extérieure.....	I.2
I.2.1.1 La corrosion	I.2
I.2.1.2 Les attaques chimiques.....	I.9
I.2.2 Causes de dégradation physique.....	I.17
I.2.3 Causes de dégradation interne.....	I.19

Chapitre II : Mécanismes de transport diffusif dans les bétons

II.1 Introduction	II.2
II.2 Mécanismes de pénétration des chlorures.....	II.3
II.3 La porosité.....	II.4
II.4 la perméabilité	II.5
II.5 LE TRANSPORT DIFFUSIF DES IONS CHLORURES.....	II.6
II.5.1 Introduction.....	II.6
II.5.2 La diffusion en solution libre.....	II.8
II.5.3 Les essais basés sur la diffusion.....	II.14
II.5.4 Les essais de migration : exploitation en régime permanent.....	II.16
II.6 Facteurs influencent le transport des chlorures.....	II.18

Chapitre III PROGRAMME EXPERIMENTAL

III.1 Introduction	III.2
III.2 Caractéristiques des matériaux de béton.....	III.2
III.2.1 introduction	III.2
III.2.2 Le sable.....	III.3

III.2.3 Le gravier.....	III.13
III.2.4 le ciment	III.18
III.2.5 Les adjuvants	III.19
III.2.6 L'eau.....	III.21
III.2.7 L'ajout.....	III.27
III.3 Préparation des corps d'épreuve.....	III.28
III.4 Expériences de migration sous champs électrique des ions chlorures Selon la norme ASTM C1202.....	III.32
III.5 Expérience de Porosité du béton (NF EN 18 – 459) (La porosité accessible à l'eau)..	III.33
III.6 La Méthode des plans d'expériences.....	III.34

CHAPITRE IV ANALYSE DES RESULTATS

IV.1 introduction.....	IV.2
IV.2 Plan d'expériences par MINITAB :	IV.2
IV.2.1 Résultats d'essai de diffusivité.....	IV.2
- Matrice d'expériences et résultats de diffusivité.	IV.3
- Résultats du diagramme de Pareto des effets de diffusivité.....	IV.3
- Résultats du diagramme des effets principaux pour diffusivité.....	IV.4
- Résultats du diagramme des interactions pour diffusivité.	IV.5
- Modélisation par une équation mathématique.	IV.6
IV.2.2 Résultats d'essai de porosité	IV.7
- Matrice d'expériences et résultats	IV.7
- Résultats du diagramme de Pareto des effets.	IV.8
- Résultats du diagramme des effets principaux pour porosité.	IV.9
- Résultats du diagramme des interactions pour porosité.	IV.10
- Modélisation par une équation mathématique.	IV.12
IV.2.3 Résultats de la résistance à la compression	IV.12
- Matrice d'expériences et résultats	IV.13
- Résultats du diagramme de Pareto des effets.	IV.13
- Résultats du diagramme des effets principaux pour la résistance	IV.14
- Résultats du diagramme des interactions pour la résistance.	IV.15
- Modélisation par une équation mathématique.	IV.16
Conclusion générale.....	

LISTE DE FIGURES

Chapitre I : durabilité et les pathologies des bétons

Figure I.1 mécanisme de corrosion.....	I.4
Figure I.2 phénomène de corrosion des armatures	I.6
Figure I. 3 : mécanisme de la carbonatation.....	I.7
Figure I.4 fissuration de béton.....	I.8
Figure I.5 schémas des réactions conduisant aux milieux sulfatés expansif.....	I.11
Figure I.6 mécanismes de réaction aux milieux sulfatée expansif.....	I.11
Figure I.7 aiguilles aplatie (ettringite).....	I.12
Figure I.8 : mécanisme de la pénétration des acides sur le béton.....	I.13
Figure I.9 phénomène de lixiviation.....	I.14
Figure I.10 pénétration des eaux de mer sur le béton.....	I.16
Figure I.11 Zones d'exposition en site maritime	I.17
Figure I.12 réaction d'alcaline avec carbonate.....	I.20

Chapitre II Mécanismes de transport diffusif dans les bétons

Figure II-1 : Conditions d'exposition en environnement marin	II.4
Figure II.2 Schéma des pores dans un matériau	II.5
Figure II.3 : Effet des paramètres influençant la perméabilité	II.6
Figure II-4 : Transport des chlorures pour différentes zones d'expositions	II.7
Figure II-5 : Influence du coefficient de diffusion en solution sur la vitesse de déplacement des ions en l'absence de potentiel de jonction liquide	II.10
Figure II-6 : Influence du potentiel de jonction liquide sur la diffusion des ions.	II.11
Figure II-7: section unité pour définir le flux de chlorure.....	II.13
Figure II.8 : Unités de concentration en chlorure se rapportant au poids béton, au poids de ciment ou à la quantité de l'eau évaporable dans les pores.....	II.14
Figure II.9 : Schéma de principe de l'essai de migration.	II.17
Figure II.10: Evolution du coefficient de diffusion en fonction du type de béton et du rapport E/C.	II.21
Figure II.11 : Effet de la modification des différents facteurs (type de ciment, E/C, hydratation) sur le coefficient de diffusion des ions chlorures.	II.22
Figure II.12 : Influence de l'humidité relative sur le coefficient de diffusion des ions chlorure.....	II.23
Figure II.13 : Évolution du coefficient de diffusion en fonction de l'humidité relative.....	II.23

Figure II.14 : Exemple de profil des chlorures du béton à différentes températures.....	II.24
Figure II.15: Effet de la température sur le coefficient de diffusion.....	II.25

Chapitre III PROGRAMME EXPERIMENTAL

Figure III .1 L’essai l’équivalent de sable de Boussaâda.....	III.4
Figure III.2 essai de masse volumique absolue.....	III.8
Figure III.3 machine d’analyse granulométrique	III.10
Figure III.4 l’analyse granulométrique de Sable de dune.....	III.11
Figure III.5 l’analyse granulométrique de Sable concassé.....	III.12
Figure III.6 l’analyse granulométrique de combinaison de 60% de sable de dune et 40% de sable concassé.....	III.13
Figure III.7 L’analyse granulométrique de fraction (3/8) du gravier.....	III.16
Figure III.8 l’analyse granulométrique de fraction 8/16 du gravier.....	III.16
Figure III.9 sac de ciment MOKAOUEM	III.18
Figure III.10 hydrofuge sika liquide	III.20
Figure III.11 adjuvant super plastifiant MEDAPLAST SP 40.....	III.21
Figure III.12 Ph mètre.....	III.21
Figure III.13 Réactifs et produits auxiliaires de Test Dureté totale.....	III.22
Figure III.14 essai de Test Dureté totale.....	III.23
Figure III.15 Essai de dureté carbonaté.....	III.23
Figure III.16 test à BANDELETTE SO ₄ ²⁻	III.24
Figure III.17 résultat de test à BANDELETTE SO ₄ ²⁻	III.25
Figure III.18 Réactifs et produits auxiliaires Test Chlorures Cl.....	III.26
Figure III.19: les résultats du Test Chlorures Cl.....	III.27
Figure III.20 Préparation d’ajout.....	III.28
Figure III.21 la Confection des éprouvettes	III.31
Figure III.22 diagramme de cure appliquée.....	III.31
Figure III.23 photos représentent le mode de cure appliquée.....	III.32
Figure III.24 essai de diffusivité des ions chlorures.....	III.33
Figure III.25 essai de porosité accessible à l’eau.....	III.34

CHAPITRE IV ANALYSE DES RESULTATS

Figure IV.1 diagramme de Pareto des effets pour la diffusivité	IV.3
Figure IV .2 diagramme des effets principaux pour la diffusivité.....	IV.4
Figure IV.3 diagramme des interactions pour la diffusivité	IV.5

Figure IV.4 : Diagramme de Pareto des effets pour la porosité.....	IV.8
Figure IV.5 Diagrammes des effets principaux pour la porosité	IV.9
Figure IV.6 diagrammes des interactions pour la porosité	IV.10
Figure IV.7 diagramme de Pareto des effets pour la résistance	IV.13
Figure IV.8 diagramme des effets principaux pour la résistance a la compression.....	IV.14
Figure IV.9 diagramme des interactions pour la résistance à la compression.....	IV.15

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE I : durabilité et les pathologies des bétons.

Tableau I.1 composition des bétons soumis aux attaques chimiques.....	I.15
Tableau I.2 classe d'exposition aux milieux marin (Norme EN206-1).....	I.16

Chapitre II Mécanismes de transport diffusif dans les bétons

Tableau II.1 : Effet du type de ciment sur le coefficient de diffusion.....	II.18
Tableau II.2 : Coefficient de diffusion d'un ciment Portland pour différentes compositions.....	II.19

Chapitre III PROGRAMME EXPERIMENTAL

Tableau III. 1 : équivalent de sable de Boussaâda.....	III.5
Tableau III.2 : équivalent de sable concassé.....	III.5
Tableau III.3 : Comparaison des résultats.	III.6
Tableau III.4 la masse volumique apparente de sable de Boussaâda et sable concassé.	III.7
Tableau III.5 la masse volumique absolue du sable et sable concassé.....	III.8
Tableau III.6 l'analyse granulométrique de Sable de dune.....	III.11
Tableau III.7 analyse granulométrique de sable concassé.....	III.12
Tableau III.8 l'analyse granulométrique de combinaison de 60% de sable de dune et 40% de sable concassé.	III.12
Tableau III.9 masse volumique apparente de gravier.....	III.14
Tableau III.10 masse volumique absolue de gravier.....	III.15
Tableau III.11 : Analyse granulométrique pour le gravier fraction 3/8.....	III.17
Tableau III.12 analyse granulométrique pour le gravier fraction 8/16	III.17
Tableau III.13 : Analyse granulométrique pour le mélange de gravier 3/8 (60%) et gravier 8/16 (40%).....	III.17
Tableau III.14 les caractéristiques physiques et chimiques de ciment MOKAOUEM.....	III.19
Tableau III.15 les caractéristiques mécaniques de ciment MOKAOUEM	III.19
Tableau III.16: le mode opératoire du Test Dureté totale.....	III.23
Tableau III.17 : Domaine de mesure et nombre de dosages de SO_4^{-2}	III.24
Tableau III.18: le mode opératoire du Test Chlorures Cl^-	III.26

Tableau III.19: tableau représente les résultats des tests d'analyse de l'eau.....	III.27
Tableau III.20 tableau des compositions de béton... ..	III.30
Tableau III.21 tableau des valeurs d'essai de diffusivité.....	III.33

CHAPITRE IV ANALYSE DES RESULTATS

Tableau IV.1 matrice d'expérience et résultats de diffusivité	IV.2
Tableau IV.2 matrice d'expérience et de résultats de porosité	IV.7
Tableau IV.3 Matrice de résultats de la résistance à la compression	IV.12

Introduction générale

Durant les dernières décennies, plusieurs travaux scientifiques ont été élaborés dans la perspective d'améliorer les propriétés constructives du béton frais et durci. Aussi, des études et des découvertes n'ont cessé de lui conférer des performances et des aptitudes nouvelles dans le but de trouver un compromis entre l'ouvrabilité et la résistance. Les soucis des constructeurs sont d'aboutir à des hautes performances ou résistances avec un choix judicieux des matériaux et l'adjonction de nouveaux produits, telle que les adjuvants et les additions fines

L'ajout de tels matériaux permet d'accomplir deux fonctions, l'une physique et l'autre chimique. La première fonction assure le remplissage des micro vides de l'empilement des grains de ciment tout en améliorant la compacité du mélange et en faisant progresser encore les qualités de sa rhéologie à l'état frais, tandis que la deuxième fonction (fonction chimique) concerne la fixation de la portlandite produite lors de l'hydratation du ciment pour former un composant de silicate de calcium hydraté plus dense et plus résistant que celui des bétons ordinaires **(Benmansour M. et col., 2011)**

La durée de vie est devenue à la fois une exigence et un souci : il convient de l'assurer par une conception et une mise en œuvre adéquates, d'évaluer son état mécanique (d'où le recours à l'évaluation non destructive), de restaurer ou de renforcer l'ouvrage afin de prolonger sa durée de vie, (<https://www.gislirgec.f>).

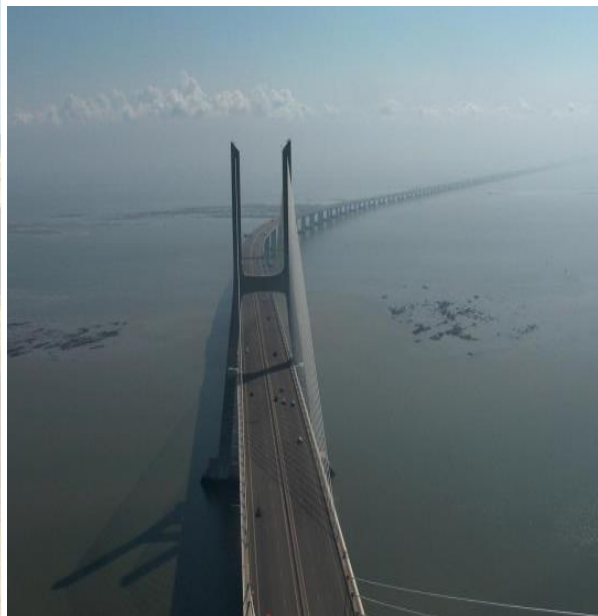
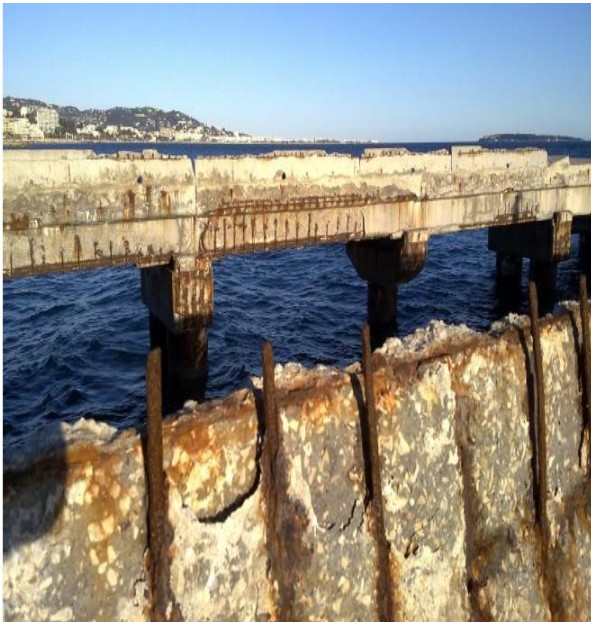
Les ouvrages de Génie Civil sont soumis à de multiples sources d'agression : les sollicitations climatiques, les sollicitations engendrées par leur usage, les événements accidentels et le vandalisme. Pour les matériaux de construction, on utilise le terme de durabilité qui qualifie l'aptitude à maintenir ses fonctions, par exemple de résistance aux agressions mécaniques et chimiques. Pour les ouvrages on parlera de durée de vie, qui est le temps durant lequel celui-ci remplit en toute sécurité les fonctions pour lesquelles il a été construit, compte tenu des conditions de service et des exigences économiques, (<https://www.gislirgec.f>).

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, en prenant en compte l'environnement dans lequel ils se trouvent ces structures. Dans des environnements classiques, une structure composite peut l'ingénieur

matériau doit, lui, apporter des solutions permettant aux ouvrages de mieux résister aux agressions de l'environnement. La garantie d'une durée de vie satisfaisante doit être trouvée en associant des matériaux adaptés à l'environnement, des méthodes de mises en œuvre et de cure soignées, des outils de calcul prenant en compte les dégradations possibles des ouvrages tout en maintenant une bonne sécurité, **(VICHOT J.-P. O., Avril 2008)**.

La dégradation des structures en béton armé exposées à des milieux agressifs est en grande partie liée à la pénétration des ions chlorures à travers le réseau poreux du matériau, **(Nassima, 2016)**

Pour évaluer la durabilité des matériaux et de faciliter la prédiction de la durée de vie des structures, il est nécessaire de connaître les mécanismes qui conduisent à leur détérioration et d'étudier les indicateurs de cette durabilité. Dans notre projet nous avons choisi et étudié comme indicateur la diffusivité qui est relative au déplacement d'une espèce chimique à l'échelle moléculaire sous l'effet d'un gradient de concentration. Où était notre objectif est de valider une méthode de contrôle pour évaluer la durabilité des bétons à partir de l'essai de diffusivité des ions chlorures. Mais est-ce qu'il y a des normes algériennes sur la durabilité du béton en Algérie? **(Kasri Sarra 2020)**



**Laboratoire d'étude et de recherches des matériaux, les preuves du temps,
www.lerm.fr ,Marseille, le 27 novembre 2013**

Chapitre I :

Durabilité et Les

pathologies de

béton

I.1 Introduction

Dans le domaine de génie civil, les ouvrages en béton sont exposés à côté des phénomènes d'altération due à la mise en œuvre comme la mauvaise formulation de béton, les erreurs de calcul, une mauvaise qualité des matériaux de construction...etc. et d'autres part aux conditions des milieux extérieur agressifs comme l'humidité la pluie, l'environnement. Des différentes pathologies peuvent exister et qui agissent sur la durabilité et la résistance de béton par des dilatations, fissures, ruptures. Cela exige de protéger et de prendre soin du béton par des méthodes de réparation ou de renforcement basé sur un bon diagnostic.

I.2 Les pathologies des bétons

Les ouvrages en béton armé constituent le matériau composite le plus couramment employé. Les principales causes de dégradation des bétons proviennent des attaques physiques et chimiques supportées dans le temps par les structures placées dans un environnement plus ou agressif. Les dégradations peuvent provenir de défauts initiaux dus soit à une conception mal adaptée, soit à une mauvaise mise en œuvre des bétons. La détermination précise des causes d'une détérioration quelconque du béton est un sujet complexe. Ceci s'explique par le manque de connaissance et la complexité des phénomènes que affectent ce matériau, à leur évolution dans le temps, ainsi qu'à leur concomitance.[1]

I.2.1 Causes de dégradation extérieure : qui sont le résultat de l'environnement agressif entoure du béton.

I.2.1.1 La corrosion

Définition

La corrosion est le problème le plus courant dans la construction qui est due à la plupart des fissures dans les constructions en béton et la durée de vie raccourcie de la corrosion. Le béton armé est considéré à partir des matériaux durables qui sont préférés par les concepteurs à de nombreux types de constructions et il ne réduit pas sa durée de vie et sa durabilité sauf la corrosion. il peut être simple et apparaître sous forme d'engourdissement Fissures légères – minces – lors du renforcement des barres d'armature ou des taches de corrosion, et cela peut entraîner une chute du béton les composants de la couverture en béton s'écaillent et la corrosion peut entraîner l'effondrement de l'ensemble de l'élément en béton. Et le danger de la corrosion est qu'elle commence et dure longtemps sans montrer de symptômes, en raison

de la détérioration associée à la corrosion est lente et peut durer des années, et son danger est aussi que tant qu'elle a commencé, elle continuera même si éliminer la source d'humidité à moins que le fer rouillé et le béton défectueux ne soient enlevés et remplacés par du béton intact. Et n'importe quel une procédure à suivre pour réparer un béton rouillé qui se détériore dépend entièrement d'une bonne compréhension des causes l'apparition de la rouille et les moyens de la contrôler et de l'empêcher de continuer. La vérité est que l'humidité et l'oxygène sont deux le carburant du processus de rouille qui commence lorsque la protection que le béton offre aux brochettes est perdue pour de nombreuses raisons tels que l'augmentation de la proportion de chlorures dans le mélange, ou la carbonisation du béton extérieur, ou des fissures en raison de causes autres que la corrosion, ce qui permet à l'humidité d'atteindre plus facilement les brochettes, et la corrosion commence.[2]

Mécanisme de la corrosion

C'est un processus électrochimique qui se produit à la surface de séparation entre l'armature en acier et le béton il a besoin d'un agent oxydant (oxygène), d'humidité et d'un flux d'électrons à gauche de l'électrode positive pour une électrode négative dans le métal et un milieu qui transfère le courant électrique de l'anode à l'anode doivent être disponibles négatif, qui est généralement de l'eau ou une solution aqueuse contenant des sels dissous. Et se produit dans ce processus un groupe de Les réactions chimiques sont les suivantes :

1- fer se décompose de l'anode sous forme d'ions ferreux ++ (Fe) selon la réaction :



2- L'électronique générée par la réaction précédente ($-4e^{-}$) se déplace dans la brochette de fer vers la zone de l'électrode la borne négative réagit avec l'oxygène et l'eau en formant des ions hydroxyle (OH) selon interaction :



3- Lorsque les produits des deux réactions – ions ferreux et ions hydroxydes se rencontrent – il précipite Hydroxyde ferreux selon la réaction :



4- L'hydroxyde ferreux produit par l'action de l'oxygène et de l'eau est oxydé en hydroxyde de fer.

Réaction secondaire – qui se décompose pour former de la rouille de fer (oxyde de fer) en fonction de la réaction :



L'oxyde de fer résultant est hautement absorbant l'eau et peu adhérent au fer, le facilitant ainsi retirez-le en fondant lentement, en laissant la surface du fer pour permettre à une nouvelle rouille de se former, et cela peut être fait en mesurant le courant l'électrophorèse dans les brochettes de fer rouillé peut identifier la corrosion dans les brochettes qui sont difficiles à détecter, et ce Il aide à déterminer le degré de danger des structures en béton exposées à la rouille. Et hydroxyde de fer la taille résultante est beaucoup plus grande que la taille de la brochette d'origine, ce qui conduit à la génération de contraintes de séparation Haut autour des barres d'armature, conduisant à des fissures longitudinales parallèles aux barres et en cas de corrosion plus que cela le béton de surface commence à tomber. [2]

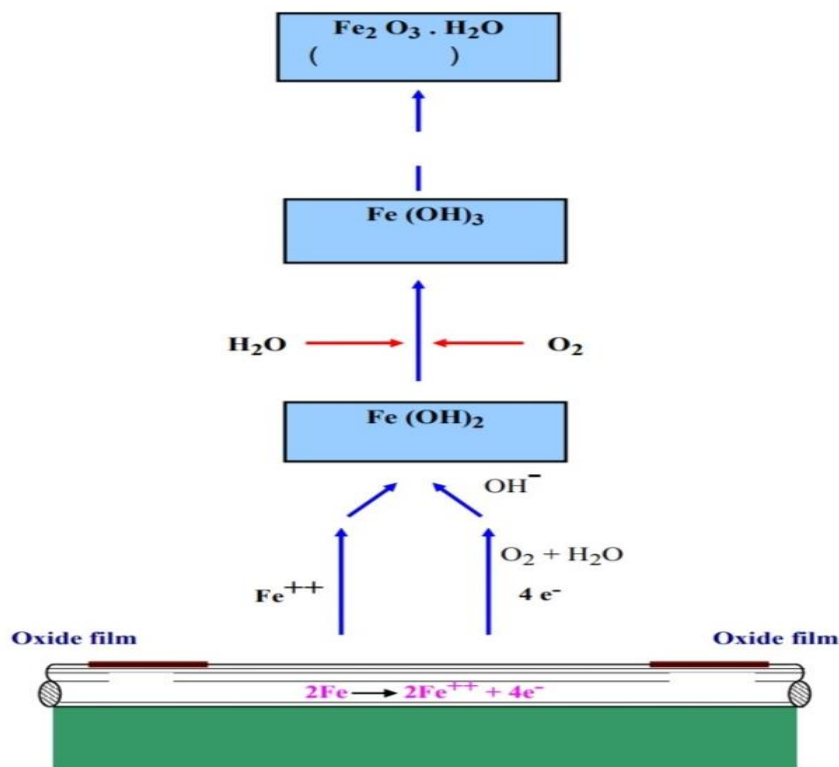


Figure I.1 mécanisme de corrosion [2]

Les causes de la corrosion

Lorsque la couverture de béton tombe en dessous d'une certaine limite, la brochette devient exposée aux éléments et peut commencer corrosion en présence d'humidité et d'oxygène.

Même avec une couverture de béton suffisante, la corrosion peut commencer lorsque la base du béton entourant les brochettes diminue au point où l'exposant est réduit PH à 10 ou moins, auquel cas la couche de protection passive se déséquilibre et se brise. Cela fait passer le courant électrique à travers la brochette, puis la corrosion commence. Une perte de base se produira en conséquence pour un ou plusieurs des facteurs suivants :

- Carbonatation du béton dans la couverture de béton.
- Vapeurs ou solutions acides auxquelles l'organe est exposé.
- Pénétration de chlorures dans le béton à partir de l'eau environnante ou de leur présence dans le mélange de béton.
- La présence de fissures de surface

Ainsi que des autres causes que la rouille peut atteindre les armatures au profondeur comme :

➤ **Les ions chlorures :**

Les ions chlorures est l'une des substances qui détruisent la protection la plus passive des armatures en acier béton intérieur. Ces chlorures peuvent être présents dans le béton à partir du moment où ils sont mélangés (Ils proviennent d'agrégats, d'eau de gâchage ou d'additifs contenant du chlorure de calcium) ou atteignent le béton après avoir utilisé l'origine (ses sources sont l'eau de mer ou les eaux souterraines). Et la présence de chlorures peu importe sa source dans le béton conduit à l'activation du processus de corrosion, même si la base en béton est encore haute. La corrosion due à la présence de chlorures dans le mélange de béton est plus dangereuse et plus difficile à réparer que la corrosion le résultat du changement de carbone car s'il est possible d'empêcher une dégradation supplémentaire des organes transformés son béton de surface est carbonique, il n'y a donc aucun moyen efficace d'empêcher la dégradation en présence d'une concentration élevée de chlorures dans le mélange de béton, sauf pour l'élimination complète du béton défectueux autour des barres d'armature. Les ions chlorure libres présents dans l'eau à l'intérieur des vides du béton attaquent l'acier le renfort et la corrosion.

La mécanique des réactions chimiques dans ce cas est cependant assez complexe on peut dire simplement que les ions chlorure sont capables de perturber les réactions se produisant à la surface du fer renforcement, qui lui assure une protection passive, même si la base en béton est encore haute et ne lui est pas venue à l'esprit transfert de carbone En cas de transfert de carbone, des valeurs plus faibles de chlorures détruiront la protection négative pour le fer et le

taux de rouille deviendra plus rapide. Il est à noter qu'au cours de la période récente, les valeurs admissibles dans les normes internationales et privées ont été réduites d'un pourcentage concentration de chlorures dans le béton, à la lumière des expériences et expertises disponibles, pour que les valeurs soient devenues la valeur autorisée est maintenant bien inférieure aux valeurs précédemment autorisées. Et empêchez les chlorures de pénétrer dans le béton dépend principalement de l'imperméabilité de ce béton ainsi que de l'épaisseur de l'enrobage en béton.[2]



Figure I.2 phénomène de corrosion des armatures [2]

➤ La Carbonatation :

Le béton de revêtement extérieur perd sa basicité à la suite d'un processus appelé carbonisation du béton réaction du dioxyde de carbone présent dans l'atmosphère avec les matériaux de base du béton – hydroxyde calcium – le convertir en carbonate en présence d'humidité :



En conséquence, la base en béton est réduite à moins que le niveau requis pour fournir une protection passive pour les brochettes (moins de 10.) et puisque le changement de carbone résulte de la réaction avec le dioxyde de carbone dans l'air, il part de la surface et se prolonge vers l'intérieur. Un bon béton imperméable ne permet pas un déplacement de carbone, sauf dans les limites d'une couche très superficielle (plusieurs millimètres), même lorsqu'il devient vieux. Le bâtiment est vieux, mais le béton perméable à l'eau subit une transformation carbonatée jusqu'à dix fois la profondeur de braquage dans un bon béton. Un processus

similaire de transformation du carbone se produit en présence de dioxyde de soufre dans l'atmosphère environnante c'est ce qu'on appelle le processus de sulfuration, et cela provoque également un manque de base en béton entourant les barres d'armature, et si une transformation du carbone et du soufre se produit ensemble, cela entraînera une augmentation c'était simple dans la rapidité avec laquelle le béton a perdu sa basicité. C'est pourquoi il est recommandé d'augmenter l'enrobage en béton de l'armature en acier dans l'atmosphère polluée par le sulfate. [2]

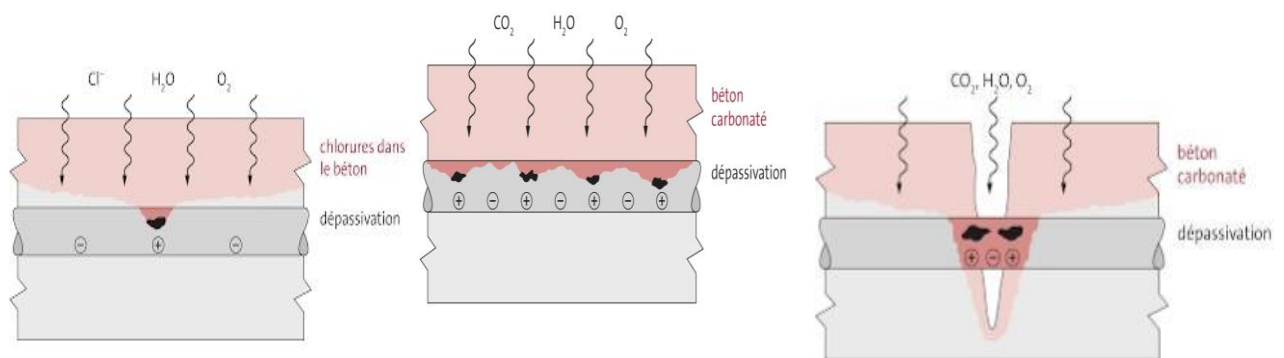


Figure I. 3 : mécanisme de la carbonatation [2]

➤ Les fissures :

Les fissures sont une sortie facile pour l'oxygène, l'humidité et les chlorures, donc ont des fissures de surface parallèles les brochettes peuvent faciliter le processus de rouille, qui à son tour entraînera de nouvelles fissures. Et ça peut être la cause de ces fissures est le retrait ou l'affaissement du plastique, qui sont des fissures qui se produisent sur la surface des carreaux. Remplir dans les cas où ces surfaces sont exposées à des sels, ces fissures deviennent un entrepôt de contamination proche de fer supérieur.

Les plus dangereux d'entre eux sont les espaces qui se produisent sous les barres d'armature lors de ballonnements. Du béton et son affaissement se produit ductile. Toutes ces lacunes sont très difficiles à trouver et constituent une source permanente l'humidité et une forte cause de rouille car la protection des barres d'armature dépend du béton recouvrant la surface de la brochette tout. La meilleure solution dans de tels cas est d'éviter l'apparition de ces lacunes en veillant à ce que les propriétés du béton conviennent à la méthode de coulage et de durcissement. Ceci est très important pour éviter la corrosion. [3]



Figure I.4 fissuration de béton [3]

➤ **Les fumées ou Les solutions acides qui sont exposées au béton :**

L'armature perd la protection de base du béton en raison de la pénétration de vapeurs acides dans l'air.

Principalement du dioxyde de carbone et dans les zones industrielles du dioxyde de soufre à l'intérieur du béton dépend cette pénétration dans la perméabilité du béton est importante. Et le béton pauvre souvent il est perméable et un bon béton est imperméable.

Cette pénétration dépend également de l'épaisseur du bouchon Béton. La perméabilité du béton et l'épaisseur de l'enrobage en béton sont responsables de la protection des brochettes contre les influences extérieures et leur grand changement d'une origine à une autre est ce qui explique le grand changement au moment du début corrosion dans différents établissements exposés aux mêmes conditions météorologiques.[3]

Protection de béton armé de la corrosion :

Protection cathodique : Il est actuellement considéré comme la meilleure méthode de protection des structures en béton pour les zones côtières, en particulier pour les installations L'eau de mer, mais elle est relativement chère, et elle est destinée à convertir la corrosion en un autre métal lié aux barres d'armature. Le métal agit comme une électrode positive et le fer comme une électrode négative. Il existe deux méthodes de protection cathodique, à savoir :

a-Méthode actuelle pilotée

b-sacrificielle d'anode

Les deux méthodes sont utilisées pour protéger les structures en acier de la corrosion, mais leur utilisation dans le cas du béton armé est encore limitée. [3]

Ajout de certaines substances au ciment pour réduire sa perméabilité :

Ce procédé peut être moins coûteux que la protection cathodique mais sa durée de vie est bien inférieure à celle de Cathodique.

La corrosion empêche : Il en existe deux types : le premier dépend de la protection de la couche négative autour de l'armement et le second dépend de la protection de l'armement.

Utilisation de fer galvanisé : Il est considéré comme ayant une efficacité appropriée en particulier pour les bâtiments soumis à la carbonisation.

Réduction de l'usure du fer dans l'armement : La majeure partie de la corrosion dans les armements est causée par le transport d'ions chlorure vers une surface fer. Le phénomène de corrosion se produit souvent en milieu marin et industriel, et nous nous référons ici à la protection de la surface fer provenant de la corrosion est étroitement lié à la qualité de l'enveloppe extérieure du béton, et voici le rôle important la fibre n'existe pas, car la capacité des chlorures à pénétrer dans le béton pour atteindre l'armature à partir de pendant les fissures, ce sera très limité.[3]

Peinture de renfort en acier époxy : Cette méthode a donné des résultats positifs, en particulier pour les armements exposés à l'eau de mer. Ne pas peindre l'armature avec de l'époxy car en cas de rouille elle ne peut pas être protégée par une protection. Cathodique et car en cas de carence dans le revêtement, le processus de rouille s'accélérera en cas d'arrivée à lui.

Fer en acier inoxydable : En raison de son coût élevé, il est utilisé dans une gamme limitée

I.2.1.2 Les attaques chimiques

Une petite partie des structures en béton est parfois exposée à l'influence des produits chimiques. Évitez au maximum ces effets car la résistance du béton aux produits chimiques est souvent inférieure à sa résistance. Pour d'autres influences. Parmi les effets courants des produits chimiques figurent les effets des sels de sulfate, de l'eau de mer et de l'eau. L'acidité naturelle et la résistance du béton aux produits chimiques dépendent du type de ciment utilisé. Je l'ai fait. De plus, la densité du béton et son imperméabilité affectent davantage la

durabilité du béton L'effet de la différence de type de ciment. Ce qui suit est une brève explication de l'effet des produits chimiques les plus courants sur Béton :

➤ Les attaques des sulfates :

Comprend les sels de sulfate présents dans le sol et les eaux souterraines qui peuvent endommager le béton sur sulfate de calcium, sulfate de sodium, sulfate de magnésium, sulfate de potassium et ceux-ci les sulfates à l'exception du sulfate de calcium réagissent avec l'hydroxyde de calcium Chaux OH (Ca)₂ du sulfate de calcium (gypse) est présent à l'intérieur du béton durci selon l'équation suivante



Le sulfate de calcium réagit à son tour avec l'aluminate de calcium pour former de l'aluminate de calcium le soufre aqueux est communément appelé étringite



Les cristaux d'étringite provoquent des contraintes internes qui provoquent la fissuration et la détérioration du béton. Et la prévention est faite béton dans les sols riches en sulfates en réalisant une couche d'asphalte ou en le peignant avec du bitume ou les autres couches d'isolation doivent être complètement collées à la surface du béton afin de ne pas s'en séparer un bon béton mélangé avec du ciment Portland peut être utilisé dans des sols contenant : faible pourcentage de sulfates. Dans le cas des sols contenant un pourcentage élevé de sulfates, il est nécessaire de faire attention à la conception des mélanges de béton et à l'utilisation de ciment Portland résistant pour les sulfates.[3]

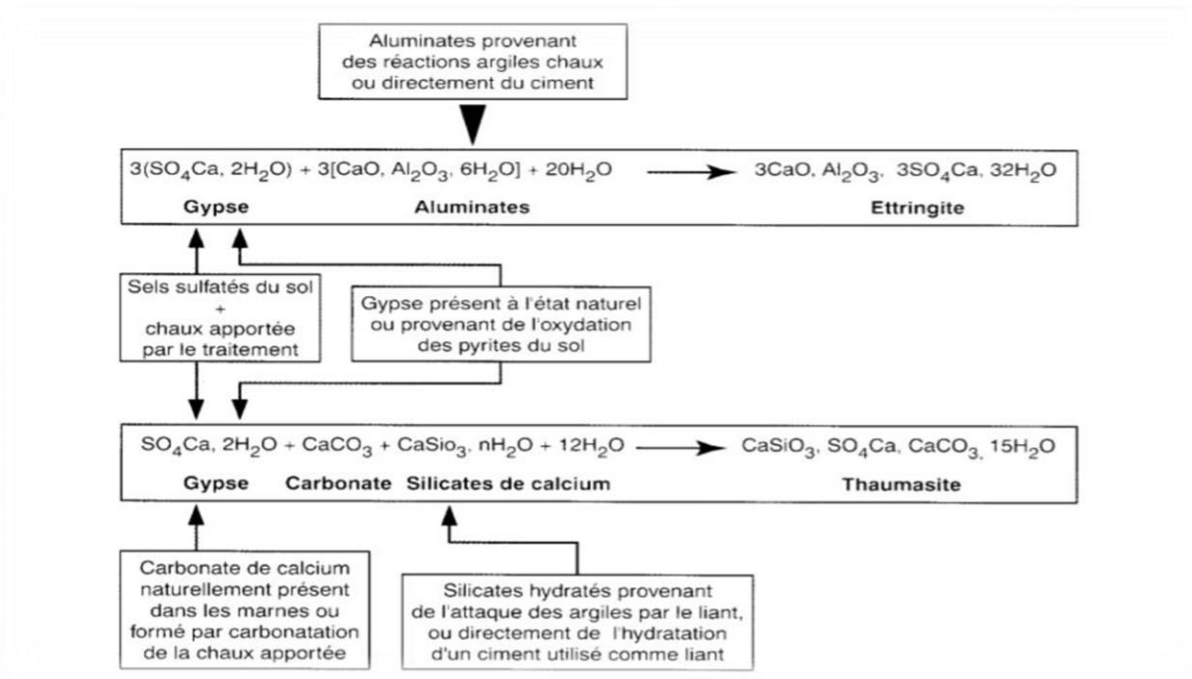


Figure I.5 schémas des réactions conduisant aux milieux sulfatés expansif [3]

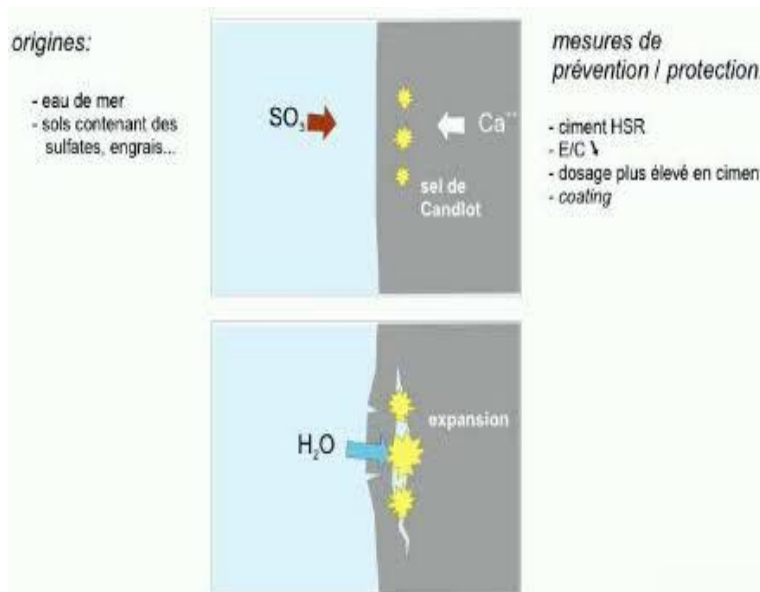


Figure I.6 mécanismes de réaction aux milieux sulfatée expansif [3]

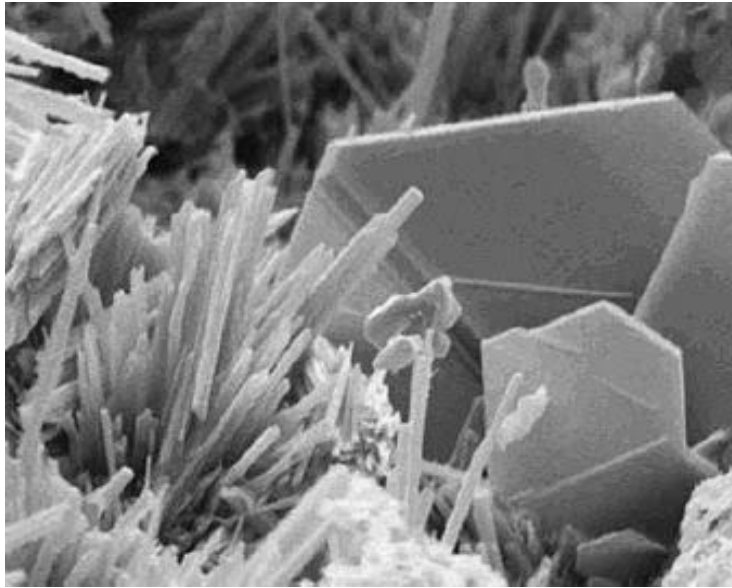


Figure I.7 aiguilles aplatie (ettringite) [3]

➤ Les attaques acides

Le béton est un matériau basique et se voit donc attaqué par les acides. Ceux-ci réagissent avec les matériaux à base de calcium du béton durci pour mener à la formation de sels de calcium de l'acide corrodant (sel soluble). IL y a donc dissolution de la structure du ciment durci. Les granulats calcaires eux aussi sont attaqués par les acides. Les granulats siliceux (de rivière ou de mer) ainsi que ceux de porphyres sont résistants. Dans le secteur agricole, l'attaque par les acides est la plus destructrice des agressions citées dans le schéma. Les principaux acides rencontrés sont les acides acétique et lactique. On les trouve par exemple dans les jus de silos. Les aliments pour animaux en contact avec la salive et tombant de l'auge attaquent également le sol de l'étable ou de la porcherie. La vitesse d'attaque dépend des éléments suivants : le degré d'acidité (pH) de la solution acide. Un pH entre 6,5 et 5,5 est considéré comme 'faiblement agressif', un pH entre 5,5 et 4,5 comme 'moyennement agressif' et un pH inférieur à 4,5 (jus de silos par exemple) comme 'fortement agressif ; les solutions stagnantes sont moins agressives que les solutions ruisselantes et répétées; la solubilité du sel formé.[4]

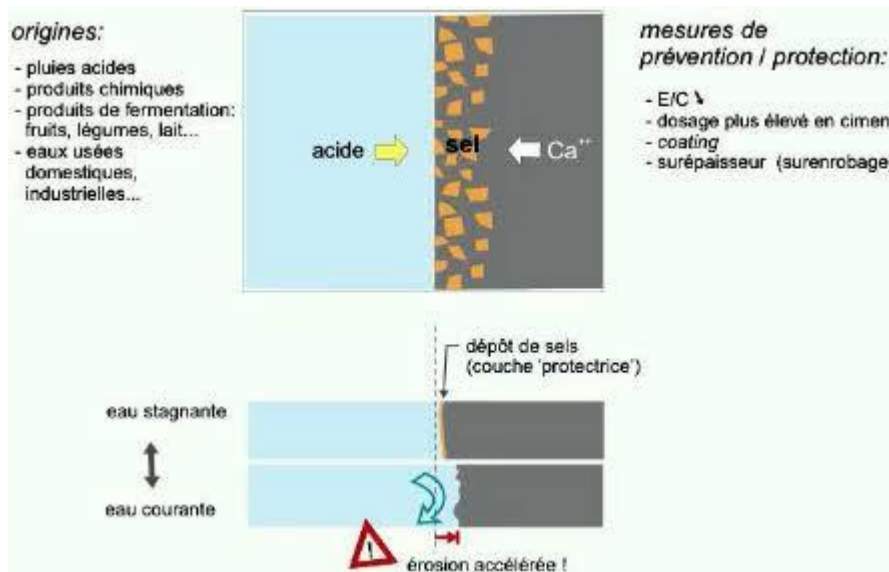


Figure I.8 : mécanisme de la pénétration des acides sur le béton [3]

➤ Attaque des sels d'ammonium et de magnésium

Des sels agressifs (comme les sels d'ammonium et de magnésium) décomposent le ciment durci. Ces deux sels se trouvent. Dans le lisier, le purin, les engrais chimiques. Le magnésium se substitue au calcium du liant pour former, soit de l'hydroxyde de magnésium, soit du silicate de magnésium, précipitant sous forme de composé gélatineux. Il faut noter que si la cristallisation de $Mg(OH)_2$ est expansive, il n'en reste pas moins que l'attaque par le magnésium aurait plutôt un caractère dissolvant qu'expansif. Le sel d'ammonium réagit avec la chaux (hydroxyde de calcium) pour donner un gaz qui s'échappe du béton (l'ammoniac) et un sel de calcium généralement soluble.[5]

➤ Lixiviation (attaque par les eaux)

Le béton est susceptible d'être attaqué par différents types d'acides (acide sulfurique, nitrique, phosphorique, acétique, lactique, ...). L'acide sulfurique est connu comme une des sources les plus communes de dégradation. Les structures enterrées en béton peuvent en effet être attaquées par les eaux contenues dans le sol et chargées naturellement (par oxydation de minéraux comme la pyrite) ou de par le dépôt de déchets chimiques industriels.



Figure I.9 phénomène de lixiviation [6]

L'eau usée : ils peuvent être le siège d'un phénomène d'attaque complexe : les eaux qu'ils transportent contiennent des composés soufrés et des bactéries réductrices de sulfate qui transforment ces composés en acide sulfhydrique (H_2S), un gaz qui s'échappe des eaux usées. Ce dernier peut ensuite être oxydé par d'autres bactéries, puis transformé en acide sulfurique (H_2SO_4), qui attaque le béton. Ce phénomène est appelé « attaque acide bactérienne ». Il se produit dans la partie supérieure des égouts sur des profondeurs pouvant parfois atteindre 6 à 12 mm par an.[6]

Les pluies acides constituent également une source d'agression pour les structures en béton (des pH de 5 à 3 ont été mesurés). Autre exemple d'attaque : la dégradation chimique des structures en béton exposées à des substances agricoles. On trouve de l'acide acétique et lactique dans les liquides qui se forment à l'intérieur des silos lors de la fermentation des aliments, sur le sol des étables ou des porcheries en présence d'eau (salive). Des pH de 3,8 ont été mesurés dans des liquides de fermentation d'aliments pour porcs. Les engrais chimiques et les eaux usées industrielles, quant à eux, contiennent souvent des sels agressifs, tels que le sel d'ammonium et le sel de magnésium, qui décomposent le ciment durci. Le sel d'ammonium réagit avec l'hydroxyde de calcium pour former l'ammoniac, un gaz volatil qui s'échappe du béton. Une situation d'équilibre ne pouvant s'instaurer, la réaction se poursuit indéfiniment.[6]

Mécanisme d'attaque : L'attaque du béton par les acides comprend un ensemble de processus complexes qui entraînent une réduction des propriétés structurelles du matériau,

telles que la résistance. Tout comme les granulats calcaires, le béton est un matériau basique (son pH est supérieur à 12,5) susceptible d'être attaqué par les acides. Ceux-ci réagissent avec les composés calciques du béton pour mener à la formation de sel de calcium de l'acide corrodant. Si l'acide circule suffisamment pour éliminer ce dépôt de sel, l'attaque se renouvelle indéfiniment. La mobilité du liquide acide est donc un facteur capital du degré d'agressivité. La réaction des acides avec les corps composés à base de calcium entraîne finalement une dissolution de la structure du ciment durci. Selon la littérature, la vitesse de l'attaque est influencée par différents facteurs [6]

- facteurs liés à la solution acide : concentration, pH, mobilité, type de l'acide et solubilité du sel de calcium de l'acide
- facteurs liés au béton ou au matériau à base de ciment : qualité du béton (curing, compactage, ...), composition (rapport E/C teneur en ciment, type de ciment, alcalinité du béton, ...), perméabilité du béton (elle-même fonction de la géométrie des pores et de leur distribution)
- d'autres facteurs comme la température, les conditions d'attaque (le mécanisme d'attaque est intensifié lorsque le béton est soumis à des cycles d'immersion et de séchage)[6]

Tableau 1 Composition des bétons soumis aux attaques chimiques (norme NBN EN 206-1).

PRESCRIPTIONS	CLASSE D'EXPOSITION		
	XA1	XA2	XA3
Rapport eau/ciment maximal	0,55	0,50	0,45
Classe de résistance minimale	C30/37	C30/37	C35/45
Teneur minimale en ciment (kg/m ³)	300	320	360
Autres prescriptions	Ciment résistant aux sulfates (HSR) si la teneur en sulfates est supérieure à 500 mg/kg dans l'eau ou à 3000 mg/kg dans le sol.		

Tableau I.1 composition des bétons soumis aux attaques chimiques [6]

L'eau de mer : Le béton armé est utilisé pour la réalisation de très nombreux ouvrages d'art ou de structures situés en sites maritimes. La dégradation de ces ouvrages est en grande partie liée aux processus de transfert des ions chlorures contenus dans l'eau de mer à travers

le béton d'enrobage. Le transfert des ions chlorures favorise l'initiation de la corrosion des armatures, affectant ainsi la durabilité de l'ouvrage et entraînant des coûts importants de maintenance, de réparation et de reconstruction. [7]



Figure I.10 pénétration des eaux de mer sur le béton[7]

Les mécanismes de dégradation sont fonction de l'exposition de l'ouvrage par rapport à son environnement. Ainsi, en site maritime, quatre zones d'exposition sont définies : la zone atmosphérique, la zone immergée, la zone d'éclaboussures et la zone de marnage. Dans ces deux zones, les teneurs en chlorures et en oxygène sont très élevées, l'alternance des cycles d'humidification / séchage a pour effet d'accélérer le processus de transfert des chlorures par diffusion et convection dans un béton partiellement saturé. Dans la zone totalement immergée, les risques de corrosion sont plus limités car les chlorures ne pénètrent que par diffusion. Enfin, dans la zone atmosphérique, les risques de corrosion sont modérés en raison des faibles concentrations en chlorures et en humidité.[7]

	<i>Description de l'environnement</i>	<i>Exemples d'ouvrages</i>
<i>XS1</i>	<i>Exposés à l'air marin, mais pas en contact direct avec l'eau de mer</i>	<i>Structures sur ou à proximité d'une côte</i>
<i>XS2</i>	<i>Immergé en permanence</i>	<i>Eléments de structures marines</i>
<i>XS3</i>	<i>Zone de marnage Zone soumise à des projections ou à des embruns</i>	<i>Eléments de structures marines</i>

Tableau I.2 classe d'exposition aux milieux marins (Norme EN206-1) [7]

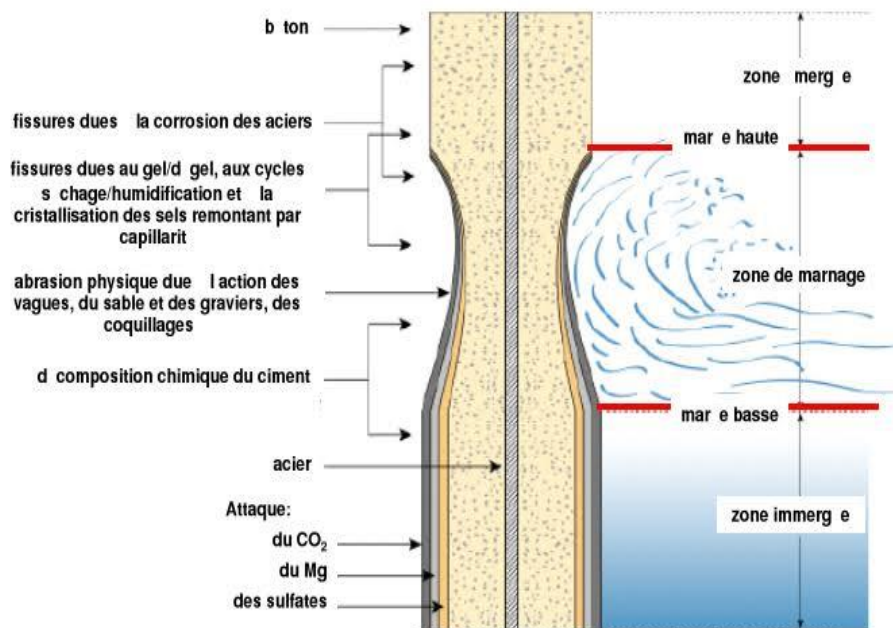


Figure I.11 Zones d'exposition en site maritime [7]

I.2.2 Causes de dégradation physique

Abrasion: Usure accompagnée d'une perte de matière consécutive au frottement d'un élément par un abrasif ou par le passage répétitif des piétons, véhicules et chariots industriels, etc. [8]

Erosion: Perte de matière résultant du frottement d'un corps solide et d'un fluide contenant des particules solides en suspension et en mouvement. [8]

Cavitation: Usure d'une structure hydraulique caractérisée par une perte de masse en présence de bulbes de vapeur qui se forment lors d'un changement brusque de direction d'un écoulement rapide de l'eau [8]

Chocs: Le béton éclate sous l'effet de chocs produits par des engins de transport ou de levage, des outils. Surcharges : Il s'agit d'ouvrages ayant supporté des charges trop importantes qui ont entraîné des fissurations et des éclatements du béton. [8]

Cycle gel/ dégel: Après un nombre important de cycles gel/dégel, certains bétons peuvent se déliter en surface et se désagréger. C'est le cas des ouvrages de montagne, des chambres froides. [8]

La résistance au feu : La résistance au feu d'un élément en béton est la période pendant laquelle cet élément peut résister au feu. Il résiste à la pénétration de la flamme et des gaz chauds à travers lui, et la résistance au feu du béton dépend de facteurs. Ce qui suit :

1- de la structure en béton : la résistance augmente avec l'épaisseur de la structure, et le béton en vrac est plus résistant au feu. Par conséquent, il est pris en compte dans certaines structures en béton de faible épaisseur. De même, dans le béton précontraint, le revêtement doit d'abord être recouvert d'une couche de béton. Suivi d'une couche de plâtre de Paris.

2- Type de structure (pleine ou creuse) : la résistance au feu du béton massif est inférieure à celle du béton évacué et elle doit être prise en compte. Tenez compte du fait que le béton conserve sa résistance aux charges après avoir été exposé à la chaleur du feu. Et souvent si l'incendie a duré plus d'une heure ou deux, de sorte que le béton pouvait atteindre une température d'environ mille degrés centigrade, ce qui le rend plus approprié comme matériau de structure en raison de sa fracture sévère avec fracture d'expansion d'acier de renfort et sa fragmentation dans différentes positions. Et la chaleur d'un feu a un mauvais effet sur les barres d'armature de l'acier doux, sa résistance diminue et par conséquent la limite d'élasticité, ce qui affaiblit la durabilité du béton armé.

3- Type d'agrégats : Il existe certains types d'agrégats qui ont une haute résistance au feu, tels que les agrégats légers (Laitier de four – formule – fraction brique ... etc.) suivi de la fraction calcaire, puis vient après ces gravats de sable et de gravier.

4- Type et quantité de ciment : si le ciment dans le béton (c'est-à-dire celui qui s'est formé et durcit) a été exposé à la chaleur parce qu'il contient de l'eau, il rétrécit puis se dilate, provoquant l'effritement du béton en raison de sa mauvaise conductivité thermique, ce qui entraîne une grande différence de température entre l'extérieur du béton et à l'intérieur, ce qui génère des contraintes qui provoquent des fissures et une fragmentation du béton.

Les températures élevées ont un effet négatif dans le ciment Portland en raison de la présence de chaux libre qui se calcifie et se réunit avec l'eau, ce qui provoque une augmentation de taille et par conséquent une fissuration du béton, plus il diminue de chaux sans ciment car sa résistance au feu s'améliore. Fer ou ciment ordinaire mélangé avec des matériaux pouzzolaniques est meilleur que le ciment Portland normal. Le ciment d'alumine est considéré le meilleur là-bas car il ne contient pas de chaux libre. Il est considéré comme le

type de béton le plus résistant les produits ignifuges sont ceux fabriqués à partir de ciment d'aluminium et d'agrégats légers ou d'agrégats issus de fractures de briques réfractais

Dans tous les cas, le ciment Portland ordinaire peut être utilisé pour fabriquer du béton résilient Chauffer jusqu'à 150 ° C, à condition que des précautions soient prises pour chauffer progressivement le béton et le changement de température est lent. Si le béton a été exposé à environ 1000 ° C comme dans certaines installations telles que les fondations de fours et de chaudières. [8]

I.2.3 Causes de dégradation internes

➤ Réaction alcaline pour les agrégats

Il existe deux types de réaction alcaline pour les agrégats : la réaction alcaline avec la silice et la réaction alcaline avec les carbonates et le premier type sont plus courants. Le problème avec la réaction alcaline des agrégats est qu'elle peut n'apparaître qu'après une longue période il n'y a toujours pas de test rapide et précis permettant de savoir si l'agrégat a été mélangé une certaine quantité avec un certain ciment dans un certain pourcentage conduira à l'émergence de ce problème ou non, et en même temps il n'existe pas une méthode spécifique pour le traitement permanent de ce phénomène.[8]

➤ Réaction alcaline avec de la silice

Certains types d'agrégats contiennent différents types de silice active, comme l'opale et la cristallite, qui peut réagir chimiquement avec l'alcali déjà présent dans le ciment et d'autres tels que Oxyde de sodium (Na_2O) et oxyde de potassium (K_2O). Ces réactions peuvent produire des substances gonflement gélatineux lors de l'absorption d'eau, ce qui entraîne des contraintes internes dans le béton le fait craquer ou s'effondrer. Pour réduire le risque de réaction alcaline avec la silice, les actions suivantes peuvent être effectuées :

1- de ciment Portland contenant un faible pourcentage d'alcali, ne dépassant pas 0,6%. Calculé en oxyde de sodium (Na_2O).

2- Détermination de la teneur en alcali équivalente à NaO (Na_2O) dans le mélange de béton, y compris pas plus de 3,0 kg / m³.

3- Substitution d'une partie du ciment dans le mélange de béton par des matériaux pouzzolaniques, après référence ressources spécialisées pour déterminer le dosage de la pouzzolane et son efficacité.

4- Travailler pour réduire la pénétration de l'eau dans le béton en utilisant des films ou des peintures imperméables.[8]

➤ Réaction alcaline avec carbonate

Certains types d'agrégats du calcaire Dolomitique peuvent réagir avec les alcalis dans le ciment produisant des composés qui, au fil du temps, conduisent à une expansion qui à son tour conduit à l'émergence de fissures dans le béton qui affectent sa durabilité dans le temps. Et doit lors de la découverte de ce phénomène en les granulats sont exclus de l'utilisation ou utilisés avec du ciment dont le rapport alcalin ne dépasse pas 0,4%. Étant donné que ce phénomène est affecté par la composition minérale de l'agrégat et le rapport de la calcite à la dolomite. [8]



Figure I.12 réaction d'alcaline avec carbonate [8]

Conclusion

La détérioration du béton connue par sa nature poreuse, Les structures et ouvrages en béton armé sont soumis depuis leur plus jeune âge, à des contraintes d'ordre mécanique ou environnementales. Leur comportement vis-à-vis de la durabilité est essentiellement lié au comportement particulier du matériau béton. Celui-ci réagit avec l'environnement.

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

survenir essentiellement des phénomènes de corrosion des armatures afin de mieux maintenir diagnostiquer et réparer ces désordres.

Chapitre II

Mécanismes de transport diffusif dans les bétons

II.1 Introduction

La résistance à la compression dépendant en grande partie de la porosité totale, ne suffit pas à garantir seule, la durabilité à long terme des matériaux cimentaires qu'est directement conditionnée par la structure des pores (un matériau cimentaire de résistance élevée n'est pas nécessairement moins perméable à l'eau ou au déplacement des ions par diffusion qu'un matériau cimentaire de résistance plus faible). Du point de vue de la durabilité, il est nécessaire de compléter la mesure de la résistance avec d'autres mesures qui puissent permettre de déterminer la facilité de déplacement à travers le matériau, des liquides chargés de substances nuisibles dissoutes ou de gaz, et d'estimer la capacité du béton à empêcher la pénétration des agents agressifs par certaines propriétés de transfert tels la perméabilité et la diffusivité. L'estimation des propriétés de transport des matériaux cimentaires par une mesure de perméabilité et de diffusion est nécessaire dans le but d'évaluer leur durabilité. Ces deux grandeurs physiques restent cruciales pour caractériser en juste proportion le monde complexe des bétons, ils sont considérés comme des «Indicateurs de la durabilité», la perméabilité et la diffusivité correspondent à deux mécanismes bien distincts de transport de matière.

- La perméabilité décrit un écoulement (d'eau ou du gaz par exemple) qui se produit sous gradient de pression, elle dépend de la taille des espaces poreux dans les quels s'écoule le fluide ainsi que de leur interconnexion.
- La diffusivité est relative au déplacement d'une espèce chimique à l'échelle moléculaire sous l'effet d'un gradient de concentration.

Des outils théoriques qui permettent d'aborder ces deux mécanismes couplés ou non ont été proposé depuis quelques années, non pas par les ingénieurs du génie civil mais par les physiciens des sols, préoccupés par la salinisation des sols en régions arides. Depuis plus d'un siècle, la description du transport de matières dans les milieux poreux est menée par des approches phénoménologiques basées sur le concept de potentiel de transport, initiées par Darcy (1856) puis par Buckingham (1907). Pour décrire le mouvement des fluides dans un sol non saturé, on fait souvent appel à des lois empiriques de type Darcy-Fick, dérivées de l'observation expérimentale et ayant pour principe que le transport s'effectue sous l'effet des gradients des potentiels (capillaires, chimiques, osmotique ou thermiques).

Chapitre II Mécanisme de transport diffusif dans le béton

Depuis les années **80**, de nouvelles approches ont été proposées parallèlement au développement considérable de la thermodynamique des processus irréversibles. Elles ont l'avantage d'offrir un cadre théorique permettant l'explication et la validation des lois de transport d'origine expérimentale de type **Darcy-Fick**

La compréhension des mécanismes de transport dans un milieu poreux est très importante, par ailleurs la description de ces phénomènes et les équations qui les gouvernent font l'objet de ce chapitre présentant de manière générale les différents modes de transport, une attention plus particulière est apportée aux phénomènes de diffusion des ions chlorures pour rester dans le contexte de notre mémoire. [9]

II.2 Mécanismes de pénétration des chlorures :

La pénétration des ions chlorure à l'intérieur et la migration de ceux-ci dans la solution interstitielle du béton sont gouvernées par nombreux phénomènes physiques et chimiques. Ces mécanismes dépendent de beaucoup de facteurs, comme les écoulements de l'eau interstitielle, la perméabilité, la porosité, du degré de saturation des pores, des conditions environnementales.

Dans les zones immergées, l'agressivité de l'eau de mer est essentiellement de nature chimique et les ions chlore diffusent dans l'ouvrage sous gradient de concentration, de la surface contenant des chlorures en grande quantité vers le cœur du matériau. Une évolution importante de la microstructure de la pâte de ciment peut être observée notamment avec la formation de nouveaux composés expansifs tels que le trisulfoaluminate de calcium ou l'ettringite qui peuvent éventuellement causer des gonflements et de la fissuration à l'intérieur de la structure en béton. Par contre, dans ces zones, où le béton est constamment saturé, les risques de corrosion des aciers sont limités du fait du très faible coefficient de diffusion de l'oxygène dans l'eau.

En zone de marnage, les chlorures peuvent pénétrer par absorption capillaire et migrer avec la phase liquide par convection dans la zone concernée par les cycles (Saetta et col., 1993) (Wang, 2012). En outre, le problème est plus complexe en raison des actions physiques qui viennent se superposer aux processus chimiques : l'action mécanique des vagues, la marée, les cycles d'humidification/séchage, les variations de température journalières et saisonnières, dissolution/recristallisation de sels (chlorure de sodium), s'ajoutent aux problèmes d'ordre chimique. Les risques de corrosion des aciers sont également les plus importants dans ces zones.

Chapitre II Mécanisme de transport diffusif dans le béton

Dans les zones aériennes, le béton est exposé aux embruns marins et les chlorures sont absorbés par capillarité (gradient de pression) au sein du béton, mais moins rapidement que dans la zone de marnage. Cette zone aérienne n'est pas sollicitée mécaniquement par les vagues ; mais les variations thermo-hydriques sont influentes dans cette zone. Dans le cadre de cette étude, on s'intéresse particulièrement aux dégradations de type chimique. Les essais de laboratoire concernent les bétons saturés uniquement, quant aux essais in situ, les bétons saturés et partiellement saturés correspondant aux différentes zones sus-indiquées, sont considérés.[10]

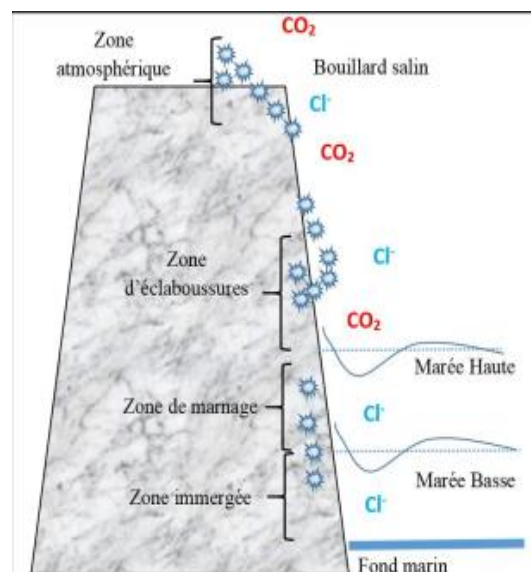


Figure II-1 : Conditions d'exposition en environnement marin (CEB, 1989)

II.3 La porosité

La porosité est un des facteurs les plus importants influençant le mécanisme de transport et joue donc un rôle primordial dans la durabilité des bétons [11]

La porosité est définie comme suit :

$$p = \frac{v}{V} = \frac{v}{v + V_s}$$

avec :

- v : le volume des pores
- V : le volume total

V_s : le volume de la phase solide

Chapitre II Mécanisme de transport diffusif dans le béton

La porosité est formée par différents types de pores

- les *pores de compactages* (diamètre > 1mm): bulles d'air restées emprisonnées dans le mélange lors du malaxage du béton
- les pores de la zone de transition : à l'interface ciment/granulat, la porosité est plus grande.
- les pores capillaires ($0,01 \text{ } \mu\text{m} < \text{diamètre} < 5 \mu\text{m}$) : proviennent des vides laissés par l'eau en surplus évaporée.
- les pores de gel de ciment (diamètre < 40 \AA) : résulte de l'adsorption d'eau à la surface des feuillettes de C-S-H. Ils n'influencent pas significativement la perméabilité. Par ailleurs, une différenciation entre porosité et facilité de déplacement de matières dans un milieu poreux doit être faite. En effet, cette dernière dépend du type de pores qui peuvent être fermés, ouverts d'un côté ou ouverts des deux côtés. Dès lors, dans le cas d'une porosité fermée, la résistance au transfert de substance est importante, par contre pour une porosité ouverte, le transfert peut se faire facilement [12]

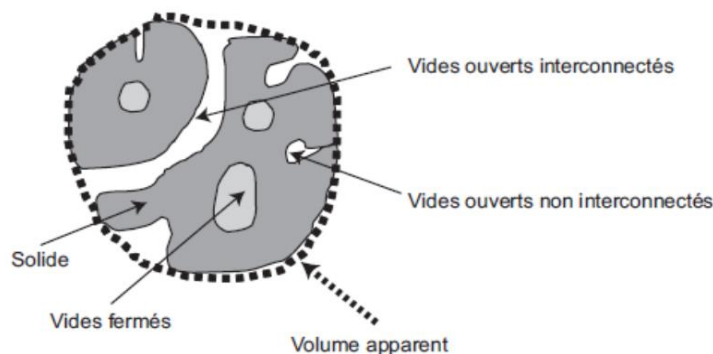


Figure II.2 Schéma des pores dans un matériau A.Vichot, J. P. Ollivier 2008

II.4 la perméabilité

La perméabilité indique la facilité avec laquelle un fluide peut pénétrer et traverser un matériau poreux et dépend de 5 paramètres particuliers :

- La connectivité : plus la connectivité est faible, plus la perméabilité est faible
- La constrictivité : plus la constrictivité est forte, plus la perméabilité est faible
- La porosité : plus la porosité est faible, plus la perméabilité est faible
- La tortuosité : plus la tortuosité est forte, plus la perméabilité est faible

La force motrice de la perméabilité est due à une différence de pression. Chaque matériau poreux est représenté par un coefficient de perméabilité S qui caractérise la facilité avec laquelle un

Chapitre II Mécanisme de transport diffusif dans le béton

liquide ou un gaz pénètre et se déplace dans ce matériau sous l'effet d'un gradient de pression .Le coefficient de perméabilité à l'eau est exprimé par l'équation :

$$K_w = q/t \cdot l/A \cdot u/\Delta p$$

Où :

- K_w : le coefficient de perméabilité [m^2]
- q : le volume du liquide s'écoulant [m^3]
- t : le temps [s]
- l : l'épaisseur de la section pénétrée [m]
- A : la section de pénétration [m^2]
- u : la viscosité dynamique du fluide [Ns/m^2]
- Δp : différence de pression [N/m^2]

Le coefficient de perméabilité est une caractéristique intrinsèque du matériau et ne dépend pas des propriétés du liquide. Ainsi, il est souvent exprimé par la loi de Darcy :[13]

$$K_w^* = q/t \cdot l/A \cdot 1/\Delta h$$

Où :

- K_w^* : le coefficient de perméabilité de l'eau (m/s)
- Δh : le gradient de pression [m]

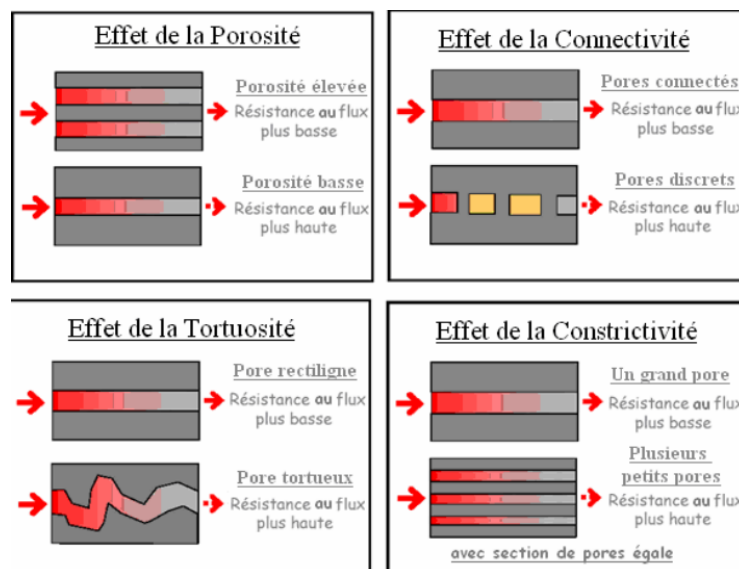


Figure II.3 : Effet des paramètres influençant la perméabilité (d'après Scrivener (2001) citée par Choinska (2006))

II.5 LE TRANSPORT DIFFUSIF DES IONS CHLORURES

II.5.1 Introduction

La pénétration d'agents agressifs dans le béton, notamment les chlorures en environnement marin, peut avoir lieu sous l'effet de deux mécanismes : l'absorption capillaire et la diffusion. L'absorption capillaire se produit lorsque le béton sec ou partiellement saturé est imbibé par la solution saline. La diffusion résulte d'un gradient de concentration en chlorures de la solution porale entre la surface exposée et le cœur sain, elle se produit en milieu saturé.

Dans le cas de cycles d'humidification et séchage, les deux mécanismes peuvent coexister.

Cela concerne par exemple les zones de marnage des ouvrages partiellement immergés (**Figure II-4**). [14]

Vue la complexité des processus mis en jeu, les phénomènes sont, bien souvent, étudiés séparément. Nous intéressons, dans ce mémoire, qu'à l'aspect diffusif du problème en milieu saturé. De ce fait, il nous faut donc pouvoir caractériser théoriquement et expérimentalement la diffusion des chlorures dans le béton. Deux paramètres sont essentiels pour décrire ce phénomène. A cet effet, on définit le coefficient de diffusion des chlorures qui caractérise leur mobilité, comme étant le paramètre déterminant du taux de l'entrée de chlorure en béton ; ainsi que les isothermes de fixation ou d'interactions des chlorures dans le cas de matériaux cimentaires.

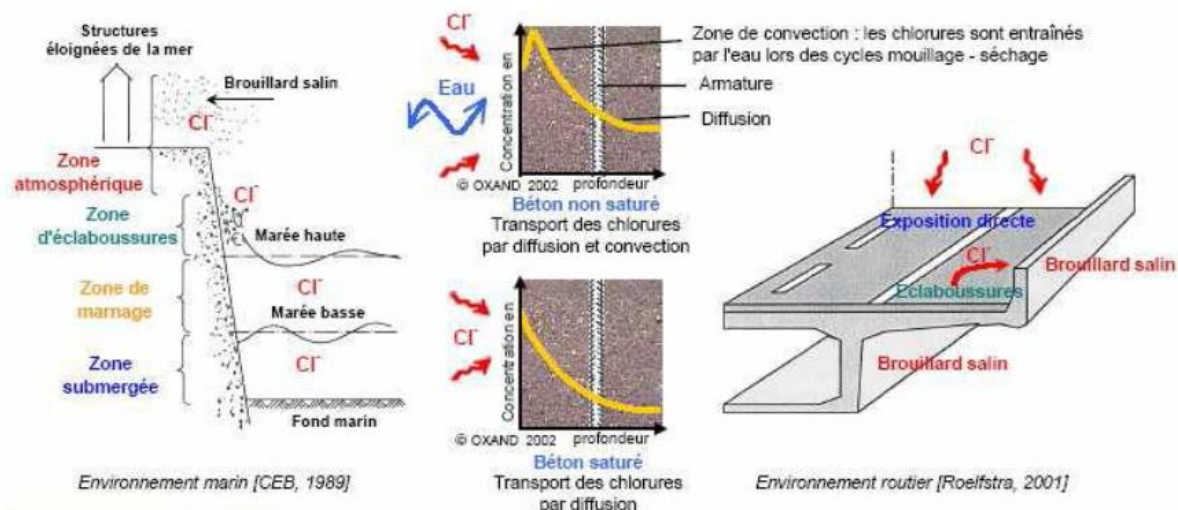


Figure II-4 : Transport des chlorures pour différentes zones d'expositions (CEB, 1989)

Au cours de ce paragraphe, une description thermodynamique de la diffusion en solution des molécules et des ions va être présentée dans un premier temps, ainsi qu'une revue des principales équations qui décrivent le transport ionique. Ensuite un passage sera consacré à la mobilité des

Chapitre II Mécanisme de transport diffusif dans le béton

ions des solutions ioniques pour établir des relations et des propriétés qui seront exploitées dans des essais de migration encore appelés essais d'électro migration.

Aussi, le passage de l'étude de la diffusion en solution à l'étude de la diffusion en milieu poreux cimentaire sera présenté. Par la suite, on présentera les principales lois régissant le transport qui permettent de relier les mesures expérimentales aux valeurs des paramètres fondamentaux de la diffusion tels que les coefficients de diffusion. Enfin, La notion d'interactions des isothermes d'ions chlorures sera à cette occasion précisée [9].

II.5.2 La diffusion en solution libre

Avant de traiter de la diffusion en milieu poreux, il semble opportun de présenter la diffusion en solution libre. Pour cela, une approche thermodynamique va tout d'abord être employée.

En l'absence de gradients de pression et de phénomènes de convection s'exerçant sur le système, le transport de matière à travers une solution se fait essentiellement par des mécanismes de diffusion. L'application des principes de la thermodynamique à ces phénomènes permet généralement de déterminer des relations applicables à des essais expérimentaux de diffusion où le gradient de concentration constitue le gradient de potentiel chimique.

Il faut cependant distinguer deux grandes catégories de diffusion que sont la diffusion moléculaire et la diffusion ionique. [9]

II.5.2.1 La diffusion moléculaire

La diffusion moléculaire peut être décrite comme le processus de transport d'un constituant dispersé ou en solution sous l'effet de son agitation moléculaire aléatoire provoque des collisions entre les particules, collisions qui changent leur direction et leur vitesse initiale. Ce phénomène encore appelé mouvement Brownien (**1827**) il est à l'origine de l'explication du transport par diffusion. L'existence d'un gradient de potentiel chimique entre deux points de la solution tel qu'un gradient de concentration par exemple, conduit à un déplacement préférentiel global de matière du point où le potentiel est le plus élevé vers le point où le potentiel est le moins élevé. D'un point de vue physique, les chocs et les changements de direction dus aux mouvements Brownien sont plus nombreux dans la zone la plus concentrée. Le mouvement global de matière vers une zone moins concentrée peut alors s'expliquer par le mouvement de matière vers une zone où les chocs, moins nombreux, réduisent, d'un point de vue statistique, les possibilités de changement de direction et de retour vers la zone la plus concentrée (**Bockris, 1970**).

L'application des lois de la thermodynamique permet de décrire ces phénomènes puisqu'il a été montré que les principes applicables au cas des gaz parfaits pouvaient être étendus au cas des

Chapitre II Mécanisme de transport diffusif dans le béton

molécules en solution. Ainsi, le potentiel chimique μ_i équivalent à l'énergie libre en solution d'une espèce moléculaire i peut être décrit par la relation suivante (**Bockris, 1970**)

$$\mu_i = \left(\frac{\partial G}{\partial n_i} \right)_{T,P} = \mu_i^0 + RT \ln(\alpha_i)$$

Où μ_i^0 est le potentiel chimique standard de l'espèce i dans une solution infiniment diluée, G l'énergie libre (énergie de Gibbs), n_i le nombre de moles de l'espèce i , R la constante des gaz parfaits, T la température et α_i est l'activité de l'espèce i égale ($\alpha_i = \gamma_i \cdot c_i$) ou c_i est la concentration de l'espèce i et γ_i le coefficient d'activité de la solution. Nous considérerons, pour l'instant, afin de faciliter la description des équations, que le coefficient d'activité γ_i est égal à 1 et que, par conséquent, les solutions sont considérées comme idéales, l'équation devient

$$\mu_i = \mu_i^0 + RT \ln(c_i)$$

Comme on peut le voir le potentiel chimique est directement relié à la concentration de l'espèce diffusante.

D'autre part, si un gradient de concentration unidirectionnel existe, une force de potentiel chimique, F_i , origine du déplacement des molécules, peut être définie :

$$F_i = - \left(\frac{\partial \mu_i}{\partial x} \right)_{T,P} = - \frac{RT}{c_i} \left(\frac{\partial c_i}{\partial x} \right)_{T,P}$$

Dans le respect du second principe de la thermodynamique, il est alors possible de définir le flux de l'espèce moléculaire J_i comme étant proportionnel à la force de potentiel chimique définie par cette équation (**Beson, 1984**) :

$$J_i = \frac{D_i^0 c_i}{RT} F_i$$

$$J_i = -D_i^0 \cdot \frac{\partial c_i}{\partial x}$$

Ou plus généralement :

$$J_i = -D_i \text{grad}(c_i)$$

Chapitre II Mécanisme de transport diffusif dans le béton

Où D_i est le coefficient de diffusion constant et égal à D_i^0 pour une solution idéale. Sa valeur est une constante physique.

Le cas de la diffusion des chlorures ne peut pas être traité de manière aussi simple. Ces ions, de par les charges électriques qu'ils transportent, subissent, en plus des effets de la viscosité du solvant intervenant dans le calcul du coefficient de diffusion, des forces électrostatiques provenant des interactions des autres ions présents mais également du solvant. La description de ce type de diffusion particulière est traitée dans le paragraphe suivant. [9]

II.5.2.2 La diffusion ionique

En solution, le déplacement d'ions, sous l'effet d'un gradient de concentration, ne peut se faire que de manière concertée. Afin de préserver l'électro neutralité dans la solution lors de la diffusion, les ions qui n'ont pas tous la même vitesse de déplacement en solution subissent une accélération ou un ralentissement suivant qu'ils sont respectivement plus lents ou plus rapides en solution. Ce phénomène naturel qui est à relier aux charges électriques que transportent les ions et donc aux forces coulombiennes associées, se traduit physiquement par l'apparition d'un champ électrique local résultant de la distribution de potentiels électriques locaux. Ce champ électrique est appelé potentiel de jonction liquide.

L'exemple d'une solution constituée de NaCl dissous dans laquelle existe un gradient de concentration permet de mieux appréhender le phénomène. En l'absence de potentiel de jonction liquide, les ions Na^+ et Cl^- pourraient se déplacer indépendamment. Le coefficient de diffusion des chlorures étant plus important que celui des ions sodium (**Bockris, 1970**), les chlorures devraient se déplacer plus vite en solution et, par conséquent, interdire le respect de l'électro neutralité (**Figure II-10**). [9]

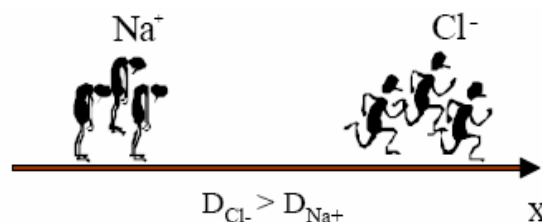


Figure II-5 : Influence du coefficient de diffusion en solution sur la vitesse de déplacement des ions en l'absence de potentiel de jonction liquide (**Truc, 2000**). [9]

En réalité, l'existence du potentiel de jonction liquide permet d'assurer un mouvement concerté des ions lors des phénomènes diffusifs. Par conséquent, le respect de l'électro- neutralité de la solution est vérifié en tout point.

Chapitre II Mécanisme de transport diffusif dans le béton

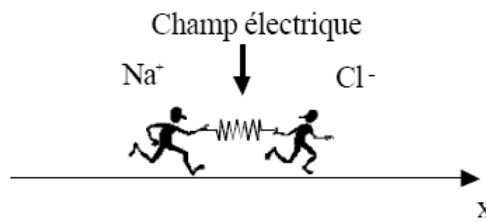


Figure II-6 : Influence du potentiel de jonction liquide sur la diffusion des ions
(Truc, 2000). [9]

Malgré ce paramètre supplémentaire, par rapport à la diffusion moléculaire, la diffusion ionique peut être décrite par l'utilisation d'un potentiel dénommé potentiel électrochimique. Ce dernier est le cumul d'un potentiel chimique et d'un potentiel électrique (Bockris, 70) : [9]

$$\tilde{\mu}_i = \mu_i + z_i F \varphi$$

ou le potentiel chimique défini par la relation , z_i la valence de l'ion, F la constante de Faraday et φ le potentiel électrique local (potentiel de jonction liquide).

Le flux de l'espèce i devrait alors, de la même manière que précédemment, pouvoir être décrit comme la résultante de l'action d'une force dérivant du potentiel électrochimique de l'espèce i .

En fait, le calcul du flux est plus complexe. Il dépend non seulement du potentiel électrochimique de l'espèce i mais aussi des potentiels électrochimiques des autres espèces présentes en solution. Un système d'équations appelé relations d'Osanger (Beson, 1984) reliant les flux et les potentiels électrochimiques des différents ions est alors constitué :

$$J_i = \sum_k l_{ik} F_k$$

Où l_{ik} sont les coefficients phénoménologiques de transport et F_k les forces dérivant de chacun des potentiels électrochimiques.

Il est à noter que pour des concentrations inférieures à **3000 mol.l⁻¹**, les coefficients Phénoménologiques l_{ik} , $i \neq k$ n'ont pas de réelle influence sur les flux (Nugue, 2002).

Chapitre II Mécanisme de transport diffusif dans le béton

Par conséquent, ces termes seront négligés par la suite, c'est à dire que le flux de l'espèce i ne dépendra que du potentiel électrochimique associé. En effet, dans le cas d'une solution au comportement idéal, le coefficient D_i est égal à $(D_i^0 c_i/RT)$.

Finalement, dans le cas de la diffusion ionique, l'expression du flux d'ions i peut être décrite simplement par l'équation suivante :

$$J_i = -\frac{D_i c_i}{RT} \text{grad}(\tilde{\mu}_i) = -D_i c_i \text{grad}(\ln \alpha_i) - \frac{z_i F D_i c_i}{RT} \text{grad}(\varphi)$$

$$J_i = -D_i^0 \text{grad}(c_i) - \frac{z_i F D_i^0 c_i}{RT} \text{grad}(\varphi)$$

L'équation est connue sous le nom de la relation de Nernst-Planck.

Le potentiel électrique intervenant dans l'équation de Nernst-Planck peut être extérieur c'est le cas lorsque l'on cherche à accélérer des mouvements ioniques dans la solution.

Enfin, il peut être constaté qu'en l'absence de l'effet de potentiel électrique, et l'effet de l'activité de la solution, donc lorsque l'on traite de la diffusion de particules non chargées, l'équation redevient l'équation de la première loi de Fick.

Jusqu'à présent les équations ont été établies en considérant que les phénomènes décrits se développaient en solution libre c'est à dire en l'absence de parois. Lorsqu'il est traité de la diffusion dans les bétons saturés, le mode de pénétration des chlorures est principalement la diffusion au travers de l'espace disponible dans le solide, le phénomène de diffusion de matière se développe dans la solution interstitielle contenue dans les pores.

Il convient de préciser dans une première approche que, concernant les processus de diffusion, ce ne sont pas les tailles de pores qui influent sur la diffusivité mais plutôt la connectivité des pores entre eux (**Buill, 1992**).

A noter que dans la suite, lorsque la porosité sera évoquée, il s'agira de la porosité ouverte c'est à dire de la porosité interconnectée qui seule contribue à la diffusion de la matière dans le matériau. [9]

II.5.2.3 Définition du coefficient de diffusion

D'après Cranck (**1975**), le coefficient de diffusion (**figure II-16**) est défini comme étant le taux de transfert de la substance de dispersion à travers une section d'unité de superficie divisé par le

Chapitre II Mécanisme de transport diffusif dans le béton

gradient de l'espace de la concentration à la section.

J étant le flux en **mol/m².s** et $\frac{\partial c}{\partial t}$ le gradient de concentration.

$$D(m^2 / s) = \frac{J}{\frac{\partial c}{\partial t}}$$

(II -16)

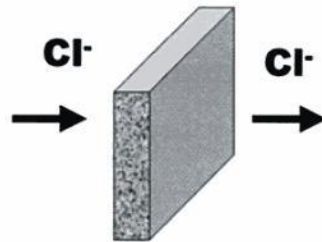


Figure II-7: section unité pour définir le flux de chlorure [9]

Pour que cette définition soit appliquée, le volume total devrait demeurer constant de chaque côté de l'unité de section pendant que la diffusion procède et la même unité de la longueur doit être employée en mesurant le volume qui apparaît dans la définition de la concentration.

Cette définition attire l'attention sur l'importance des unités du coefficient de diffusion et de la concordance entre elles dans l'expression entière. Les unités utilisées pour exprimer la concentration en chlorure dans un béton est montré en figure II-17 :

Pour le béton : en % ou en **kg/m³** de béton

Pour le ciment : en % ou en **kg/kg** de ciment

Pour la solution de pore : en **g** ou **mol Cl/l** de solution

Ainsi, on définit d'une part le prétendu coefficient de diffusion du régime stationnaire, se rapportant à la concentration de solution de pore et exprime donc le mouvement des chlorures soluble dans l'eau. D'autre part le régime non stationnaire, ou le coefficient de diffusion, est exprimé par le volume de béton ou de masse du ciment et se rapporte donc à la quantité totale de chlorures dans l'échantillon (**Andrade, 1993**).[9]

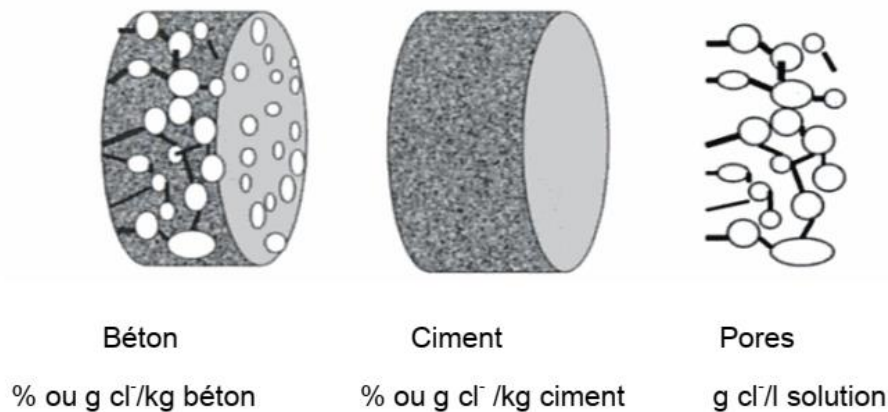


Figure II.8 : Unités de concentration en chlorure se rapportant au poids béton, au poids de ciment ou à la quantité de l'eau évaporable dans les pores. [9]

III.5.3 Les essais basés sur la diffusion

Ces essais sont les plus proches des phénomènes rencontrés en milieu naturel.

Malheureusement, malgré des conditions expérimentales modulables telles que le choix de l'épaisseur ou des concentrations d'essai qui peuvent conduire à une réduction du temps d'expérimentation, ces essais se révèlent très longs, leur durée pouvant en effet aller jusqu'à plusieurs années.

Trois grandes familles d'essais de diffusion vont être présentées :

- _ Les essais de diffusion en cellule en régime permanent (flux d'espèces diffusantes stabilisé à une valeur constante),
- _ Les essais d'immersion,
- _ Les essais de diffusion en régime transitoire (flux d'espèces diffusantes non stabilisé)
- _ Le suivi de la diffusion est effectué par la détermination de la concentration des chlorures en solution
- _ Compte tenu de la lenteur des processus de diffusion (**Fick Cl - D**, est de l'ordre de **10-12 m².s-1** dans les matériaux cimentaires à comparer à **Cl - D** valant **2,03 10-9 m².s-1** en solution libre), cet essai est bien souvent limité à des matériaux tels que des pâtes de ciment et mortiers pour lesquels l'épaisseur peut être réduite tout en conservant une bonne représentativité du matériau (**V.E.R.**).
- _ Le dépouillement d'un tel essai par la première loi de Fick suppose que les espèces diffusantes soient des espèces non chargées ce qui est faux pour les ions chlorures.
- _ Le flux de l'espèce diffusante étudiée est également supposé être indépendant des mouvements

des autres espèces.

_ Le matériau est considéré comme étant stable et inerte durant toute la durée de l'essai malgré les évolutions de concentration des espèces présentes dans la solution interstitielle.

En conséquence, le coefficient de diffusion effectif est supposé indépendant du temps et représentatif du matériau dans sa configuration micro structurelle initiale.

_ Les conditions aux limites sont supposées constantes malgré les périodes inter renouvellements pendant lesquelles les solutions des compartiments évoluent. [8]

II.5.3.1 Les essais de diffusion en cellule en régime transitoire

Francy (1998) propose l'essai de diffusion en cellule présenté au paragraphe précédent.

Mais au lieu d'attendre l'établissement du régime permanent, toujours très long, le profil de concentration des chlorures présent dans l'échantillon en phase transitoire est étudié.

Les principaux avantages de cette méthode résident dans la possibilité de pouvoir déterminer un coefficient de diffusion effectif dépendant, le cas échéant, de la concentration et de pouvoir vérifier par ailleurs les isothermes d'interactions mesurées (**Francy, 1998**).

Le principal inconvénient de cette méthode réside dans le fait que son application est théoriquement limitée aux milieux semi-infinis. Ainsi, l'utilisation d'une telle méthode sur des échantillons de taille finie, placés dans des cellules de diffusion conventionnelles suppose que les chlorures n'atteignent pas le compartiment aval. A noter que dans un souci de respect des travaux de l'auteur, les notations indiquées ci-dessous sont celles utilisées dans la référence (**Francy, 1998**).

Le principe de la méthode est le suivant :

_ Détermination du profil de teneurs massiques en chlorures totaux **MCT(X)**. Il permet, moyennant la connaissance de l'isotherme d'interaction et de la porosité, de retrouver : le profil de teneurs volumiques en chlorures totaux **mCT(X)** et le profil de concentration en chlorures libres **CF(X)**. Les points suivants de cette méthode peuvent être retenus :

_ Un essai proche des conditions réelles de diffusion des chlorures,

_ La possibilité par un seul essai de déterminer un coefficient de diffusion effectif dépendant de la concentration et de vérifier les isothermes d'interactions,

_ La limitation de cette méthode à des milieux semi-infinis ou assimilés,

_ Des incertitudes de calcul liées à la précision de la détermination des profils pouvant être relativement importantes. Ainsi, l'intégrale sous la courbe **mCT** aux faibles concentrations est peu précise à cause de la difficulté à déterminer l'intersection de la courbe avec l'axe des abscisses. D'autre part, le calcul de la pente $\tan \alpha$ est sensible à la précision des profils de

Chapitre II Mécanisme de transport diffusif dans le béton

concentration en chlorures libres,

_ La non prise en compte du fait que les chlorures sont des espèces chargées pouvant interagir avec les autres espèces ioniques présentes dans la solution interstitielle. [9]

III.5.3.2 Les essais basés sur la migration

Comme indiqué précédemment, les essais basés sur la diffusion sont longs.

Aussi, pour réduire cette durée, des essais consistant à accélérer le déplacement des ions par un champ électrique ont été développés. Le principe, simple, consiste à appliquer à un échantillon saturé, par l'intermédiaire d'électrodes, une différence de potentiel entre ses faces provoquant ainsi le déplacement des ions vers l'électrode de signe opposé. Les relations présentées dans le paragraphe précédent indiquent que plus le champ électrique est grand, plus la force appliquée aux ions est grande et que, par conséquent, plus le déplacement est rapide. Un choix judicieux du champ électrique appliqué permet de réduire la durée des essais de plusieurs mois ou années à quelques jours ou semaines.

Le principal inconvénient de ce type d'essai concerne les processus de déplacement mis en jeu. Pour les essais de diffusion, c'est le gradient de concentration qui conduit au déplacement des ions tandis que pour les essais de migration, le moteur principal du déplacement des ions n'est plus un gradient de concentration mais un champ électrique.

Ainsi, des espèces ioniques telles que Na^+ qui diffusaient de concert avec les ions Cl^- à cause de phénomènes de potentiels de jonction liquide lors d'essais de diffusion, se trouvent, lors de l'application d'un champ électrique externe, mis en mouvement dans un sens opposé à celui des chlorures. Ceci n'est qu'un exemple des phénomènes apparaissant avec ce type d'essai et dont certains ne sont pas encore clairement expliqués.

Deux grandes familles d'essais de migration peuvent être distinguées :

Les essais en régime permanent où sont mesurés les flux de matière,

Les essais en régime transitoire où ce sont principalement les profils de pénétration en chlorures qui sont utilisés. [9]

III.5. 4 Les essais de migration : exploitation en régime permanent

III.5. 4.1 Le principe expérimental

Les cellules employées comportent deux compartiments entourant l'échantillon :

l'un amont comportant la solution chlorée, l'autre aval dépourvu de chlorures. Le champ électrique externe est appliqué à l'échantillon par l'intermédiaire de deux électrodes placées respectivement à l'amont pour la cathode (-) et à l'aval pour l'anode (+)

Chapitre II Mécanisme de transport diffusif dans le béton

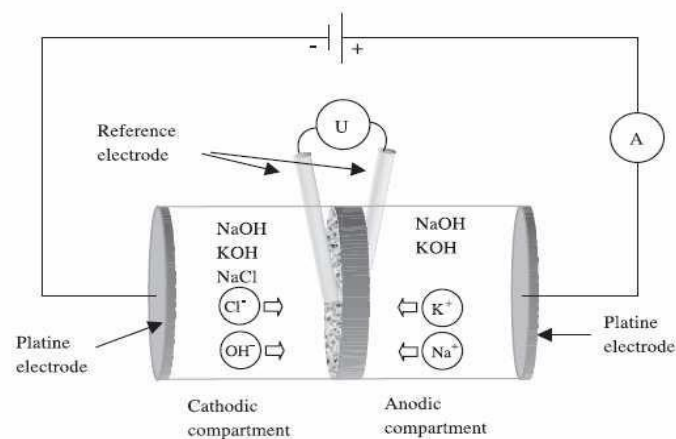


Figure II.9 : Schéma de principe de l'essai de migration. [9]

Lors de l'application du champ électrique, les ions vont se déplacer vers l'électrode dont la charge est de signe opposé. Les solutions qui sont utilisées sont, comme pour les essais de diffusion, généralement basiques afin de préserver le matériau cimentaire même si ce n'est pas toujours le cas (Andrade, 1993) (Castellote etcol., 2000).

Ces solutions sont bien souvent composées d'une association de soude et de potasse. Cependant des essais utilisant des solutions uniquement composée de soude ou de potasse sont aussi réalisées(Arsenault, 1999) (Truc, 2000). Le but principal de ces ajouts en produits basiques est principalement de maintenir la solution à un **pH** relativement élevé et proche de celui de la solution interstitielle du béton. L'utilisation de ces cellules en régime permanent nécessite de pouvoir maintenir les conditions aux limites constantes pendant l'essai. Aussi, tout comme pour les essais de diffusion, des renouvellements sont régulièrement effectués à l'aval et à l'amont. Il convient de noter que, du fait de la rapidité de cet essai, les volumes des compartiments sont généralement relativement importants ceci afin d'éviter de renouveler les solutions trop souvent. Les solutions ainsi récupérées peuvent alors être dosées pour déterminer la teneur en chlorures. Plusieurs types de dépouillement de cet essai, basés sur la mesure du champ électrique appliqué ou sur la mesure de l'intensité traversant l'échantillon, peuvent être effectués. Ils font l'objet des paragraphes suivants. [9]

III.5.4.2 L'exploitation par l'utilisation de l'équation de Nernst-Planck

Ce type de dépouillement est basé sur le suivi du flux de chlorures traversant l'échantillon. La loi de Nernst-Planck, définie dans le paragraphe, est alors utilisée (en Unidirectionnel)

$$J_{e,i} = -D_{e,i} \frac{\partial c_i}{\partial x} - \frac{Z_i F D_{e,i} c_i}{RT} \frac{\partial \phi}{\partial x}$$

Chapitre II Mécanisme de transport diffusif dans le béton

II.6 Facteurs influencent le transport des chlorures

Plusieurs paramètres peuvent influencer le transport des chlorures au sein d'un matériau cimentaire. Ces paramètres sont soit liés aux propriétés intrinsèques du matériau, soit à l'environnement extérieur. Dans les sections suivantes, on mettra en revue brièvement, quelques-uns des facteurs intrinsèques. Plus de détail sera consacré aux facteurs extrinsèques.

II.6.1 Facteurs liés au matériau

Différents éléments liés au matériau cimentaire, tels que : la nature du ciment, le rapport eau/ciment, l'âge et la période de cure, etc., peuvent influencer le coefficient de diffusion et contribuer à la réduction du transfert de masse à l'intérieur d'une structure située sur le littoral. Afin d'évaluer le comportement du béton, plusieurs recherches ont été effectuées en faisant varier ses paramètres de composition. On va, dans ce qui suit, présenter les résultats de travaux de recherches synthétisés à partir de la littérature, (**Touil Brahim, 2017**).

II.6.1.1 Effet du ciment et du rapport E/C

Dans ce contexte, on peut citer les travaux de Page et col. (Page et col., 1981) qui ont constaté dans leurs investigations que le coefficient de diffusion est de 2 à 6 fois plus élevé lorsque le rapport E/C augmente de 0,4 à 0,6. Aussi, la valeur du coefficient de diffusion peut être affecté par le type du liant comme on le voit dans le tableau II.1, (**Touil Brahim, 2017**).

Type du liant	De (10-13 m ² /s)
CEM I / 65 % laitiers	4,1
CEM I / 30 % cendres volantes	14,7
CEM I	44,7
SRPC (ciment résistant aux sulfates)	100

Tableau II.1 : Effet du type de ciment sur le coefficient de diffusion, (**Touil Brahim,2017**).

L'effet de la composition de la pâte de ciment durcie et le rapport E/C d'un béton sur la diffusion des chlorures a été aussi étudié par Frey et col. (Frey et col., 1994). Leurs

Chapitre II Mécanisme de transport diffusif dans le béton

résultats ont montré que le coefficient de diffusion augmente avec l'augmentation du rapport E/C et la réduction de la teneur en ciment et la teneur en alumine (Tableau II.2), (Touil Brahim, 2017).

Ciment	C3A	Al ₂ O ₃	C4AF	De (10-12 m ² /s) au rapport E/C			
				0,4	0,5	0,6	0,7
PC35	<1%	<3%	-	6,0	7,0	10,0	19,0
PC45	<1%	<3%	-	2,9	3,0	5,0	11,0

Tableau II.2 : Coefficient de diffusion d'un ciment Portland pour différentes compositions, (Touil Brahim, 2017).

PC55	<1%	<3%	-	1,7	2,1	3,2	6,5
PC35	≈1%	-	≈7%	0,2	0,5	1,1	3,0
PC45	≈1%	-	≈7%	0,09	0,25	0,50	1,5
PC55	≈1%	-	≈7%	0,05	0,07	0,11	0,21

II.6.1.2 Effet des additions

Le remplacement partiel du ciment portland par les additions minérales telles que les laitiers, les cendres volantes et les matériaux pouzzolaniques, conduit à la réduction du transport d'ions chlorure au sein des matériaux cimentaires. Papadakis (Papadakis, 2000) a étudié l'effet de la fumée de silice et des cendres volantes sur la diffusion des chlorures dans le béton en utilisant le NORDTEST (NT Build 443, 1995). Il a constaté que les mélanges incorporant des additions telles que les cendres volantes ou la fumée de silice, présentaient significativement de plus faibles teneurs en chlorures totaux à toutes les profondeurs, à l'exception d'une fine couche près de la surface d'exposition. Cette caractéristique se traduit par un coefficient de diffusion inférieur. Les résultats obtenus par Yang et Wang (Yang et Wang, 2004) sur des essais

Chapitre II Mécanisme de transport diffusif dans le béton

d'immersions en solution chlorhydrique pendant 90 jours et des essais de migration accélérés réalisés sur des mélanges de béton contenant des cendres volantes ou du laitier ont également montré que dans les deux cas, le coefficient de diffusion est nettement réduit en raison d'une amélioration de la structure des pores. Ils ont également rapporté une diminution du coefficient de diffusion quand le rapport E/C diminue, (Touil, 2017).

II.6.1.3 Effet de la cure et d'hydratation

L'avantage de la cure humide conduit à une amélioration de la structure poreuse du béton et par conséquent de ses propriétés de pénétration comme il a été rapporté dans de nombreuses études. Ramezani pour et Malhorta (Ramezani pour et Malhorta, 1995) ont examiné l'effet de différentes cures sur la résistance à la pénétration de chlorure selon la norme ASTM C1202 à différents âges allant jusqu'à 180 jours, dans laquelle la performance des bétons utilisant des laitiers, des cendres volantes et de la fumée de silice ont été étudiés. Les bétons ont été soumis à quatre types de cure : un durcissement en cure humide, une cure à température ambiante après le démoulage, une cure à température ambiante après deux jours de cure humide, et une cure à 38 °C de température et 65% d'humidité.

Les résultats ont montré que la cure humide est essentielle pour atteindre la plus faible pénétration des chlorures dans le béton. Les bétons n'ayant pas reçu de cure après démoulage ont montré les performances les plus faibles. Les bétons qui ont subi une cure humide pendant deux jours seulement ont affichés des résultats significativement meilleurs que les bétons n'ayant pas mûré en cure humide. Aussi, les résultats ont indiqué que la diminution des périodes de cure humide amène à une porosité plus élevée et des bétons plus perméables. La résistance des bétons contenant des cendres volantes ou du laitier semble être plus sensible à un mauvais durcissement que le béton de contrôle avec les quantités croissantes utilisées de cendres volantes ou de laitier dans les mélanges. L'incorporation de laitier ou de fumée de silice ou de volumes importants de cendres volantes dans les mélanges de béton, augmentent la résistance aux ions chlorure et produit des bétons plus durable.

Hassoune et col. (Hassoune et col., 2014) ont étudié l'effet du rapport E/C, de la nature du ciment et du temps de cure sur le coefficient de migration de trois bétons - Béton1 : béton à base de ciment CEM II/A 42.5 ayant mûré pendant 1 mois,

- Béton 2 : béton à base de ciment CEM II/A 32.5 ayant subi 1 mois de cure,

- Béton 3 : béton à base de ciment CEM II/A 42.5 ayant mûré pendant 8 mois.

Chapitre II Mécanisme de transport diffusif dans le béton

Il a été constaté une augmentation du coefficient de diffusion effectif des chlorures avec l'accroissement du rapport E/C pour les bétons étudiés. En revanche, ce coefficient diminue avec l'augmentation de la classe de résistance des ciments. De plus, l'âge du béton favorise la diminution relative du coefficient de diffusion (Figure II.11). Par ailleurs, les résultats obtenus montrent, que l'influence du rapport E/C et la nature des ciments composés utilisés, sur la fixation des chlorures dans les bétons étudiés n'est pas très significative, (Touil Brahim, 2017).

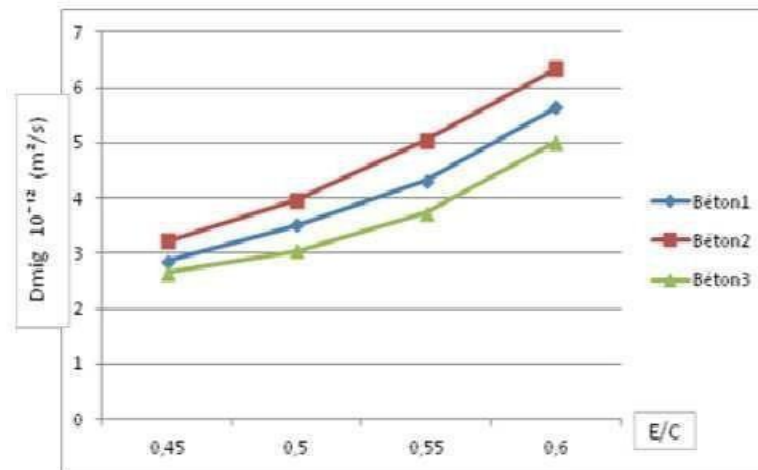


Figure II.10: Evolution du coefficient de diffusion en fonction du type de béton et du rapport E/C, (Touil Brahim, 2017).

Dans le même contexte les travaux de Zhang et col. (Zhang et col., 2005) sur des bétons utilisant deux types de ciment canadiens (Type 10 et Type 50), montrent que le ciment de type 50 (faible concentration en C3A) ne pouvait pas fixer autant d'ions chlorures que le ciment de type 10 et de cette manière la quantité d'ions chlorures libres présents dans la solution poreuse d'un béton réalisé à base d'un ciment de type 50 contribue à accroître le phénomène de diffusion par rapport à un béton à base d'un ciment de type 10. En résumé les essais de migration réalisés par Zhang et col. (Zhang et col., 2005) sur ces deux types de béton en fonction du rapport E/C, du type de ciment et de l'âge ont montré que les coefficients de diffusion des mélanges d'un béton de rapport E/C de 0,75 sont supérieurs à ceux de 0,45. Les bétons avec un ciment type 10 présentent des coefficients de diffusion plus faibles que celui de type 50. Finalement, il est possible de noter une réduction du coefficient de diffusion pour des bétons dont l'âge passe de 28 à 91 jours (Figure II.12), (Touil Brahim, 2017).

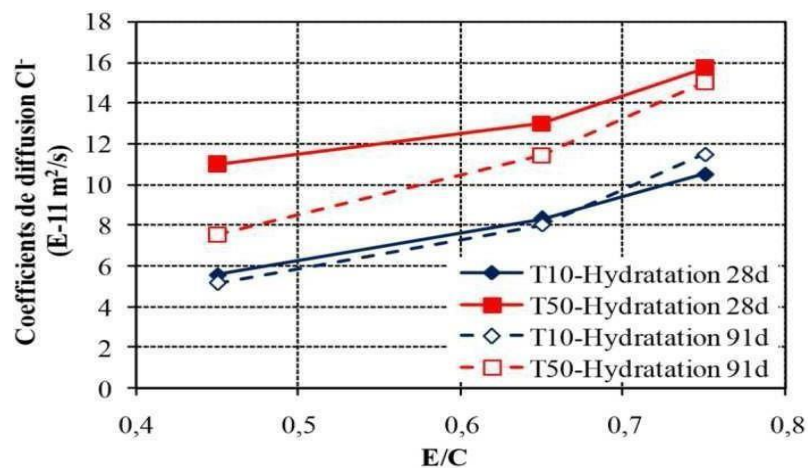


Figure II.11 : Effet de la modification des différents facteurs (type de ciment, E/C, hydratation) sur le coefficient de diffusion des ions chlorures, (Touil Brahim, 2017).

II.6.2 Facteurs liés à l'environnement

II.6.2.1 Influence de l'humidité relative

Le processus de transport est fortement influencé par l'humidité relative. Les ions chlorure ont besoin d'une phase liquide continue dans le système des pores pour diffuser. La vitesse de diffusion des ions chlorure dans le béton est donc élevée en milieu saturé ou presque saturé et devient négligeable pour une humidité relative inférieure à 50%. La figure II.23 illustre schématiquement comment la diffusion du chlorure est influencée par l'humidité relative, (Touil Brahim, 2017).

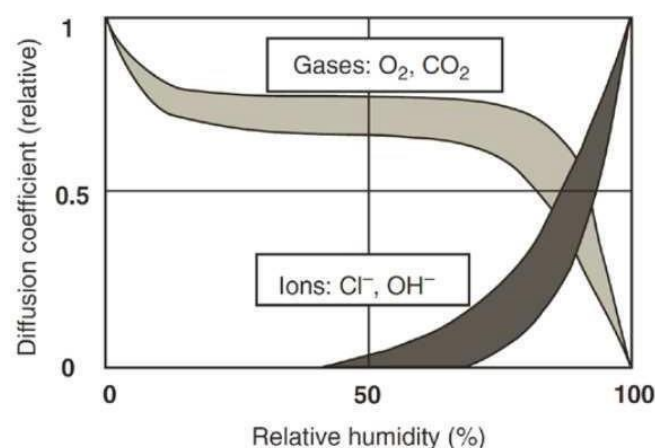


Figure II.12 : Influence de l'humidité relative sur le coefficient de diffusion des ions chlorure, (Touil Brahim, 2017).

Chapitre II Mécanisme de transport diffusif dans le béton

En simulant l'effet de marnage avec contrôle de l'humidité relative dans une enceinte climatique, Ben Fraj (Ben Fraj, 2009) a démontré dans ses travaux de thèse que le coefficient de diffusion des ions chlore, sur des bétons composés de CEM I et de CEM I avec des laitiers, augmentent avec la diminution de l'humidité relative (voir figure II.14). Le gradient d'humidité joue un rôle majeur dans le transport des ions chlore. En réduisant l'humidité relative, on désature les pores et on favorise alors l'absorption capillaire, (Touil Brahim,2017).

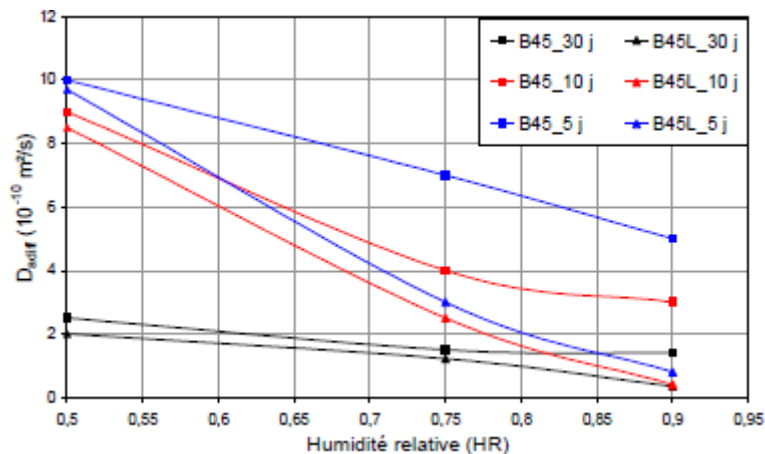


Figure II.13 : Évolution du coefficient de diffusion en fonction de l'humidité relative, (Touil Brahim, 2017).

II.6.2 Influence de la température

Il est connu que la température est un catalyseur qui agit sur la cinétique de diffusion. Ainsi, l'effet de la température affecte le transport des ions chlorures dans le béton de deux manières.

Le mouvement des ions chlorures peut d'une part, être accéléré par l'augmentation de la température, car la vitesse moléculaire augmente avec celle-ci, et d'autre part, la quantité de chlorures piégée par les hydrates de ciment peut être ainsi influencée par la fluctuation de la température. En effet, une température élevée peut à la fois diminuer la fixation physique des chlorures en raison de la vibration thermique plus élevée de ces derniers et augmenter la teneur en chlorures liée chimiquement, à cause de l'augmentation de la vitesse des réactions.

Yang et Weng (Yang et Weng, 2011) ont utilisé un test de migration accéléré des chlorures (ACMT) pour un béton non chauffé (20°C) et un béton chauffé (95°C). L'essai a montré une augmentation significative des coefficients de migration des chlorures trois à onze fois en régime non stationnaire et trois à sept fois pour un régime stationnaire, lorsque la température des échantillons de béton est passée de la température ambiante de 20°C à 95°C. Il a été rapporté aussi que l'évolution des pores et leurs connectivités est en grande partie à l'origine

Chapitre II Mécanisme de transport diffusif dans le béton

de cette augmentation, plus particulièrement en zone d'interface agrégat/matrice, (Touil Brahim, 2017).

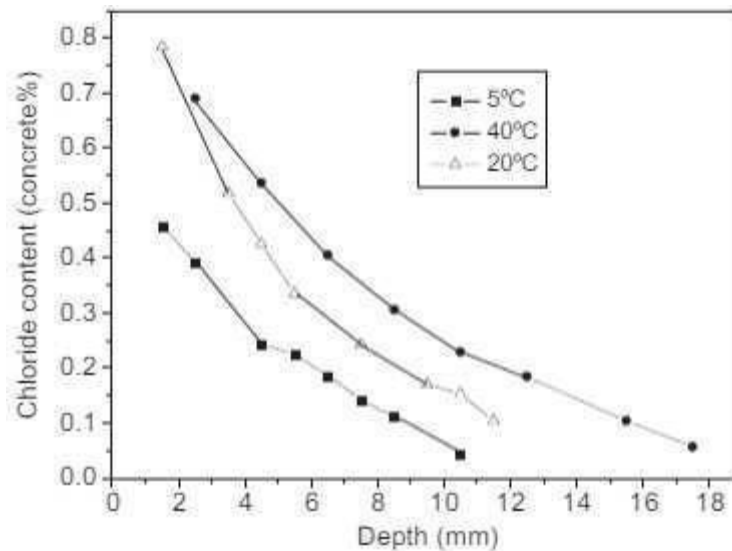


Figure II.14 : Exemple de profil des chlorures du béton à différentes températures, (Touil Brahim, 2017).

[BEL 2011] a constaté qu'une variation du gradient thermique de 0 à 40° C, accroît le coefficient de diffusion de 57% pour un béton ordinaire (figure II.27), (MEZOUAR. M et CHERIF. R, 2013).

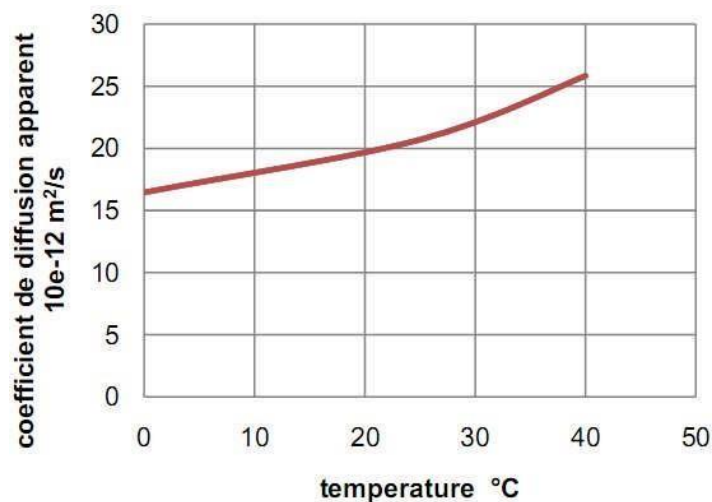


Figure II.15: Effet de la température sur le coefficient de diffusion, (MEZOUAR. M et CHERIF. R, 2013).

Chapitre II Mécanisme de transport diffusif dans le béton

Dans la majorité des cas, nous avons, en période estivale, une augmentation du coefficient de diffusion. Cette augmentation est influencée par l'humidité relative qui diminue et la température qui augmente. L'augmentation de la température, influe sur la vitesse des réactions chimiques et l'adsorption des ions chlore au sein du matériau, et fait augmenter le coefficient de diffusion, **(Touil Brahim, 2017)**

II.6 Conclusion

En ce qui concerne la diffusion des ions chlorures, l'analyse des mécanismes et des essais existants a permis de sélectionner deux modes opératoires :

- l'essai de migration en régime permanent qui a l'avantage de découpler les effets de la fixation des chlorures par la matrice cimentaire et les effets des caractéristiques du réseau poreux. Il peut donc être utilisé pour la compréhension des phénomènes, pas uniquement dans le cas de la pénétration des chlorures, mais aussi pour la pénétration d'autres substances agressives,
- l'essai en régime transitoire a l'avantage de la représentativité, comme permettent de le supposer l'analyse des mécanismes mis en jeu Il ya un certain nombre de méthodes d'essai ASTM et AASHTO pour évaluer la résistance du béton à la pénétration des substances agressives notamment les ions chlorures. Ils mesurent la pénétration des électrolytes au sein du béton par des mécanismes différents et doivent être choisis en fonction des conditions environnementales auxquelles les ouvrages seront exposés afin d'adapter la composition du béton.

Certains tests sont longs à réaliser et ne conviennent que pour la recherche ou des tests de présélection. Les essais de conductivité électrique demeurent de bons indicateurs de la résistance du béton à la pénétration des polluants. Jusqu'à l'obtention de meilleurs tests standards, est disponible : l'indice des tests rapides, telle que la norme ASTM C1202 ou AASHTO TP 64, qui sont les plus utiles, **(Belarouci. A, 2011)** .

Chapitre III

PROGRAMME

EXPERIMENTAL

III.1 Introduction

Le travail réalisé durant ce mémoire s'inscrit, dans le cadre d'étude des performances de durabilité des bétons en milieu acide. Tester le matériau béton est incontournable vis-à-vis des paramètres de transfert qui tient compte des critères de durabilité mis en évidence par certaines recommandations plus particulièrement celles de l'AFPCAFREM (AFGC, 1997).

Dans l'optique de la prévention de la corrosion des armatures du béton armé. Les indicateurs de durabilité généraux sont les suivants (Baroghel et col. 2004) : - Coefficient de diffusion des ions chlorure - Teneur en portlandite Ca(OH)_2 . Au départ de cette étude, notre objectif principal est de choisir parmi différentes options d'essais de diffusion, une méthode rapide et accéléré, qui vise à déterminer le coefficient de diffusion des ions chlorures. Puis, tester des bétons à matériaux locaux, à la suite du montage d'un banc d'essai de migration sous champ électrique.

Le programme expérimental a été développé, en réalisant le montage d'une cellule de migration sous champ électrique, pour pouvoir déterminer le coefficient de diffusion des ions chlorures dans les bétons durcis en régime stationnaire. La cellule est une simulation du phénomène de transfert des ions chlorures à travers un béton en condition saturée.

Dans ce chapitre, une présentation des matériaux bétons utilisés à base de matériaux locaux est décrite. Par la suite nous présenterons les essais de détermination des indicateurs de durabilité. A cette occasion, le banc d'essai de diffusion réalisé au sein de notre laboratoire Développement des Géomatériaux est décrit de manière détaillé

III.2 Caractéristiques des matériaux de béton

III.2.1 introduction

Cette partie s'intéresse plus à l'identification et la caractérisation des matériaux utilisés dans la conception de béton.

Les matériaux utilisés sont :

Le sable fin de la région de BOUSAADA (OUED MAITAR).

Le sable concassé de carrière (COSIDAR).

Le gravier de carrière située à 25Km de M'sila, en allant vers B.B.A(COSIDER).

Le ciment MOKAOUEM (CRS) LA FARGE de M'sila .

Adjuvants hydrofuge SIKA liquide, super plastifiant GRANITEX MEDAPLAST SP 40 .

L'eau potable du Laboratoire du développement des Géomatériaux – université de Msila.

Ajout : poudre de marbre blanc d'atelier de Boussaâda.

III.2.2 Le sable

III.2.2.1 Origine du sable :

Le sable du dune de base de notre recherche provient des abords d'oued maitar (BOUSAADA)

III.2.2.2 Caractéristiques physique de sable utilisé :

III. 2.2 .2 .1 .Equivalente de sable : NF P 18-598

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

Mode opératoire :

- Tamiser une quantité de sable (masse supérieure à **500g**)
 - Prendre une pesée de **120 g**.
 - Remplir l'éprouvette de solution la vente jusqu'au premier repère (**10cm**)
 - A l'aide de l'entonnoir verser la prise d'essai (**120g**) dans l'éprouvette et taper fortement à plusieurs reprises avec la paume de la main afin de chasser toutes les bulles d'air et favoriser le mouillage de l'échantillon.
 - Laisser reposer pendant **10** minutes.
 - Fermer l'éprouvette à l'aide du bouchon en caoutchouc et lui imprimer **90** cycles de **20** cm de cours horizontale en **30** secondes à la main à l'aide d'un agitateur mécanique.
- $$e = V_v / V_s = P / (100 - P)$$
- Retirer ensuite le bouchon, le rincer avec la solution lavante au-dessus de l'éprouvette, rincée ensuite les parois de celle-ci.
 - Faire descendre le tube laveur dans l'éprouvette, le rouler entre le pouce et l'index en faisant tourner lentement le tube et l'éprouvette et en imprimant en même temps au tube un léger

Chapitre III PROGRAMME EXPERIMENTAL

piquage.

Cette opération a pour but de laver le sable et de faire monter les éléments fins et argileux. Effectuer cette opération jusqu'à ce que la solution la vante atteigne le **2ème** repère .Laisser ensuite reposer pendant **20** minutes.

A .Equivalent de sable visuel (ESV) :

- Apres 20 minutes de dépôt de sable, lire la hauteur h_1 du niveau le du floculant jusqu'au fond de l'éprouvette à l'aide d'une réglette.

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

$$EVS = \frac{h_2}{h_1} \times 100[\%] \quad \begin{matrix} h_2 \\ \text{partie} \end{matrix}$$

Equivalent de sable visuel (ESV) :

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

B .Equivalent de sable au piston (ESP) :

- Introduire de piston dans l'éprouvette et laisser descendre doucement jusqu'à ce repose sur le sédiment. A cet instant bloquer le manchon du piston et sortir celui-ci de l'éprouvette.

- Introduire le réglet dans l'encoche du piston jusqu'à ce que le zéro vienne buter contre la face intérieure de la tête du piston .Soit h'_2 la hauteur lue et correspondant à la hauteur de la partie sédimentée.

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

Où : $h'_2 < h_1$ avec : h'_2 : la hauteur du sable



Figure III .1 L'essai l'équivalent de sable de Boussaâda

Chapitre III PROGRAMME EXPERIMENTAL

Résultats d'essai

Equivalent de sable de dune masse 120g :

N de l'essai	1	2	3
La hauteur1	10.8	10.6	10.2
La hauteur2	8.8	8.6	8.3
h'	8.5	8.2	8.1
ESV %	79.62	77.35	79.41
ESP %	78.70	77.35	76.85

Tableau III. 1 : équivalent de sable de Boussaâda

Moyen ESV%= 78.79%

moyen ESP=77.63%

Donc 75<ESV<85 %

70<ESP<80%

Equivalent de sable concassé masse 120g :

N de l'essai	1	2	3
La hauteur 1	12.8	12.7	13.1
La hauteur2	8.8	8.9	9.3
h'	7.8	8	8.2
ESV%	68.75	70.07	70.99
ESP%	60.33	62.99	62.59

Tableau III.2 : équivalent de sable concassé

Moyen ESV%=69.63%

moyenESP%=62.17%

Donc 65<ESV 75%

65 <ESP<70%

Chapitre III PROGRAMME EXPERIMENTAL

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

Tableau III.3 : Comparaison des résultats.

Le sable de dune de Boussaâda 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.

III.2.2.2 Mass volumique apparente et absolu de sable:

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

La masse volumique apparente d'un matériau est la masse volumique d'un mètre cube du matériau pris en tas , comprenant à la fois des vides perméables et imperméables de la particule ainsi que les vides entre particules .

Chapitre III PROGRAMME EXPERIMENTAL

Mode Opérateur :

Tamiser le sable dans le tamis de 3.5mm.

peser le récipient de 1L de volume vide soit m1 .

Remplir le récipient par l'entonnoir avec une distance de chute de 15cm.

Araser la couche supérieure du récipient à l'aide d'une règle que l'on anime d'un mouvement de « va et vient »,

peser le récipient plein : soit m2 (g) sa masse.

La masse volumique apparente et donnée par la relation :

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

Où :

V : Volume du récipient.

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

M2 : Le poids du récipient plein de sable.

matériaux	Sable de dune Boussaâda M=60g			Sable concassé M=60g		
	M1	0.115	0.115	0.115	0.115	0.115
M2	1.408	1.423	1.418	1.354	1.364	1.367
M2-M1	1.293	1.308	1.303	1.239	1.249	1.252
$\rho_{app} \text{ (kg/m}^3\text{)}$	1436	1453	1447.77	1376.77	1387.77	1391.1
$\rho_{app} \text{ (kg/m}^3\text{)}$	1454.59			1385.21		

Tableau III.4 la masse volumique apparente de sable de Boussaâda et sable concassé.

$M_{Moy} M_{V APP}$ de sable de dune 1454.59(Kg/m³)

$M_{Moy} M_{V APP}$ de sable concassé 1385.2(Kg/m³)

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

But de l'essai : Cet essai est pour le but de permettre de connaître la masse d'une fraction granulaire lorsque par exemple on élabore une composition de bétons. Ce paramètre permet,

Chapitre III PROGRAMME EXPERIMENTAL

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 $\rho = M/(V_2-V_1)$



Figure III.2 essai de masse volumique absolue

	<i>Sable de dune (m=100g)</i>			<i>Sable concassé (m=100g)</i>		
<i>V1</i>	<i>300</i>	<i>300</i>	<i>300</i>	<i>300</i>	<i>300</i>	<i>300</i>
<i>V2</i>	<i>340</i>	<i>340</i>	<i>340</i>	<i>337</i>	<i>340</i>	<i>342</i>
<i>V2-V1</i>	<i>40</i>	<i>40</i>	<i>40</i>	<i>37</i>	<i>40</i>	<i>42</i>
<i>P(kg/m³)</i>	<i>2500</i>	<i>2500</i>	<i>2500</i>	<i>2702</i>	<i>2500</i>	<i>2380</i>
<i>M</i>	<i>0.1Kg</i>			<i>0.1Kg</i>		
<i>P_{Moyen}</i> <i>(kg/m³)</i>	<i>2500</i>			<i>2527.33</i>		

Tableau III.5 la masse volumique absolue du sable et sable concassé

III.2.2.2.3 Analyse granulométrique : NF P 18-560

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

1. Tamisage.
2. Sédimentation.

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

- En abscisse, le logarithme de la dimension des ouvertures des tamis en valeurs croissante
- En ordonnée, le pourcentage, en poids du matériau total de la fraction du sable dont les grains ont un diamètre moyen inférieur à celui de l'abscisse correspondante (passant) on constate que la courbe granulométrique est un élément fondamental de classification du matériau comme la perméabilité, l'aptitude au compactage et l'utilisation comme filtre.

Mode opératoire :

- Prélever (1.5 kg) de matériau (sable).
- Peser chaque tamis à vide à 1g près, soit m_i la masse du tamis.
- Constituer une colonne de tamis propres et secs dont l'ouverture des mailles est respectivement de haut en bas : **5-2,5-1,25-0,63-0,315-0,125** et éventuellement **0,08mm**

La colonne est coiffée par un fond pour recueillir les éléments passant au dernier tamis et un couvercle pour éviter la dispersion des poussières .On commence par peser les tamis ainsi que le fond.

- Verser le matériau (sable sec) sur la colonne et la fixer soigneusement sur la machine d'agitation mécanique, agite pendant 5minute. Arrêter l'agitateur, puis séparer avec soin les différents tamis
- Peser chaque tamis séparément à 1g près .Soit M_i masse du tamis (I) + le sable. La différence entre M_i et m_i correspond au refus partiel R_1 du tamis 1.
- Reprendre l'opération pour le tamis immédiatement inférieur.
- Ajoute le refus obtenu sur le sixième tamis à R_1 , soit R_2 la masse des différents refus cumuler du tamis **2($R_2=R_1$ +Refus partiel sur tamis)**.
- Poursuivre l'opération avec le reste des tamis pour obtenir les masses de différents refus cumules R_3, R_4, \dots Le tamisât cumulé est donne par la relation suivante : **$T=100R_c$**

Où :

Chapitre III PROGRAMME EXPERIMENTAL

T : Tamisât en%

Re : Refus cumulés en %



Figure III.3 machine d'analyse granulométrique

Tamis (mm)	Poids des tamis vide (g)	Poids des tamis+sable	refus du sable	Refus cumulés	Refus cumulés %	Tamisât cumulés %
5	0.625	0.625	0.004	0.003	0.2	99.8
2.5	0.597	0.711	0.165	0.119	7.93	92.07
1.25	0.501	0.569	0.05	0.179	11.93	88.07
0.63	0.506	0.546	0.063	0.243	16.2	83.8
0.315	0.479	1.170	0.68	0.936	62.2	37.6
0.160	0.272	0.686	0.52	1.346	89.73	10.27
0.08	0.272	0.414	0.14	1.488	99.2	0.8
Fond	0.450	0.472	0.009	1.497	99.8	0.2

Tableau III.6 l'analyse granulométrique de Sable de dune

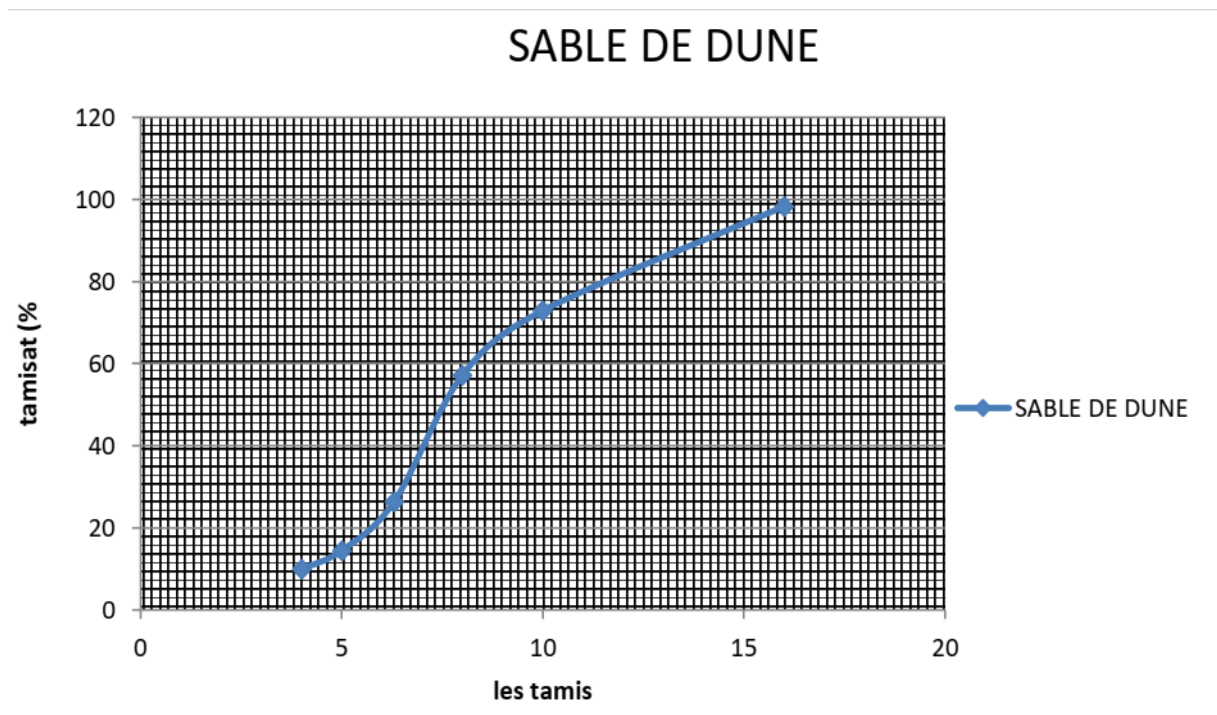


Figure III.4 l'analyse granulométrique de Sable de dune

Tamis (mm)	Poids des tamis vide (g)	Poids des tamis+sabl e	refus du sable	Refus cumulés	Refus cumulés %	Tamisât cumulés %
5	0,623	0,627	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	0,5	0,662	0,162	1,224	81,6	18,4
0,315	0,47	0,648	0,178	1,402	93,46	6,54
0,16	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	1,5	100	0

Tableau III.7 analyse granulométrique de sable concassé

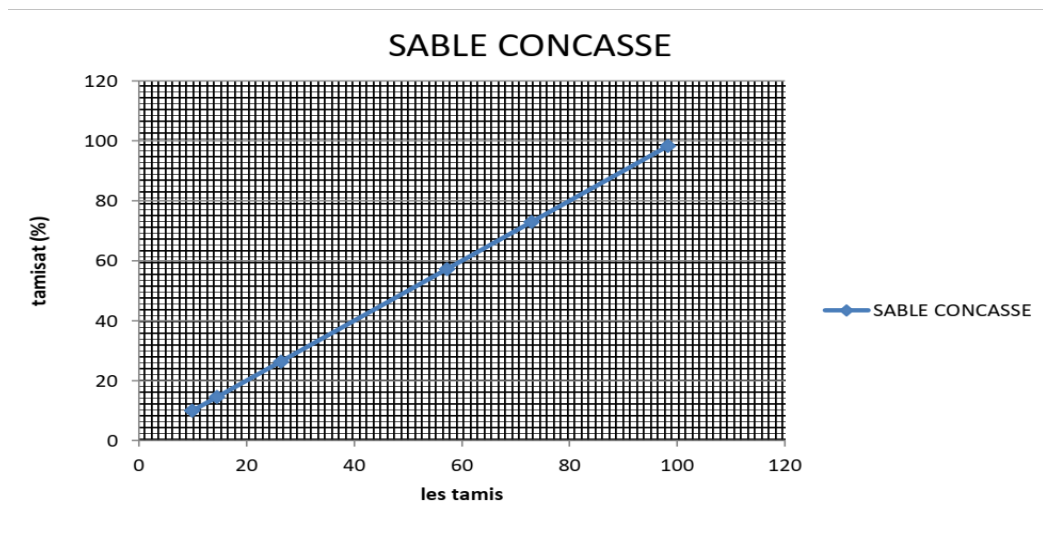


Figure III.5 l'analyse granulométrique de Sable concassé

- pour 60% de sable de dune de Boussaâda et 40% de sable concassé

Tamis (mm)	Poids des tamis vide (g)	Poids des tamis+sabl e	refus du sable	Refus cumulés	Refus cumulés %	Tamisât cumulés %
5	0,623	0,625	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	0,5	0,697	0,197	0,981	65,4	34,6
0,315	0,47	0,747	0,277	1,258	83,86	16,14
0,16	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 III.8 l'analyse granulométrique de combinaison de 60% de sable de dune et 40% de sable concassé

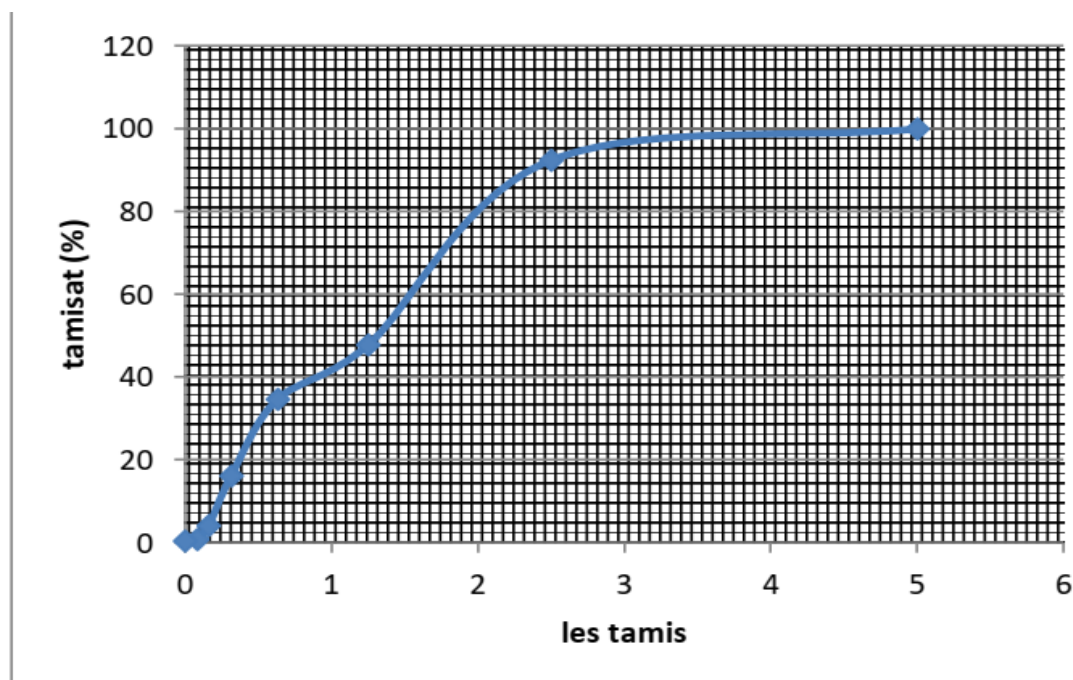


Figure III.6 l'analyse granulométrique de combinaison de 60% de sable de dune et 40% de sable concassé

• 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, $MFSD= 3.87$ $MFSC= 5.52$

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.

Chapitre III PROGRAMME EXPERIMENTAL

III.2.3 Le gravier :

Dans ce paragraphe, on présente les caractéristiques du gravier utilisé dans notre étude.

III.2.3.1 L'origine :

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

Les fractions du gravier sont : Fraction 3 /8, Fraction 8 /16.

III.2.3.2 Caractéristiques physique de gravier utilisé :

III.2.3.2.1.Masse volumique apparente (NF EN 1097 - 6 (2001)

Mode opératoire :

- Sécher le matériau jusqu'au poids constant.
- Peser le récipient à l'état vide (M).
- Poser le récipient sur une table et à l'aide d'une pelle le remplir de gravier avec un certain excédent que l'on relève au ras de la surface du récipient.

La distance séparant le récipient de la pelle doit être au environ de 10 cm.

- Peser de nouveau le récipient plein de gravier. soit M2 ce poids.

La masse volumique apparente est déterminée par la formule suivante : ρ (kg/L)

$$\rho \text{ (kg/m}^3\text{)} = (M2-M1)/V$$

Où :

V : Volume du récipient.

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

M2 : Le poids du récipient plein de gravier

Masse volumique apparente de gravier :

	<i>Gravier</i>	<i>3/8</i>		<i>Gravier</i>	<i>8/16</i>	
<i>m1</i>	<i>0.116</i>	<i>0.116</i>	<i>0.116</i>	<i>0.116</i>	<i>0.116</i>	<i>0.116</i>
<i>m2</i>	<i>1.390</i>	<i>1.330</i>	<i>1.350</i>	<i>1.303</i>	<i>1.316</i>	<i>1.302</i>
<i>M2-M1</i>	<i>1.274</i>	<i>1.214</i>	<i>1.234</i>	<i>1.187</i>	<i>1.2</i>	<i>1.186</i>
<i>P kg/m3</i>	<i>1415.55</i>	<i>1348.88</i>	<i>1371.11</i>	<i>1318.88</i>	<i>1333.3</i>	<i>1317.77</i>
ρ (kg/m ³)	1378.51			1323.32		

Tableau III.9 masse volumique apparente de gravier

Chapitre III PROGRAMME EXPERIMENTAL

III.2.3.2.2 Masse volumique absolue :

Mode opératoire :

Le mode opératoire est le même que l'on a utilisé pour la masse volumique absolue de sable

Masse volumique absolue de gravier :

	<i>Gravier</i>	<i>3/8</i>		<i>Gravier</i>	<i>8/16</i>	
<i>V1</i>	<i>200</i>	<i>200</i>	<i>200</i>	<i>200</i>	<i>200</i>	<i>200</i>
<i>V2</i>	<i>240</i>	<i>245</i>	<i>240</i>	<i>249</i>	<i>248</i>	<i>247</i>
<i>V2-V1</i>	<i>40</i>	<i>45</i>	<i>40</i>	<i>49</i>	<i>48</i>	<i>47</i>
<i>P kg/m3</i>	<i>3000</i>	<i>2666.6</i>	<i>3000</i>	<i>2448.97</i>	<i>2500</i>	<i>2553.19</i>
ρ (kg/m ³)	2888.88			2500.72		

Tableau III.10 masse volumique absolue de gravier

III.2.3.2.3 Analyse granulométrique :

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

Pour gravier de fraction 3/8

Tamis (mm)	Poids des tamis vide (g)	Poids des tamis+sabl e	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	0,72	0,116	1,457	97,13	2,87
Fond	0,452	0,486	0,034	1,491	99,4	0,6

Tableau III.11 : Analyse granulométrique pour le gravier fraction 3/8.

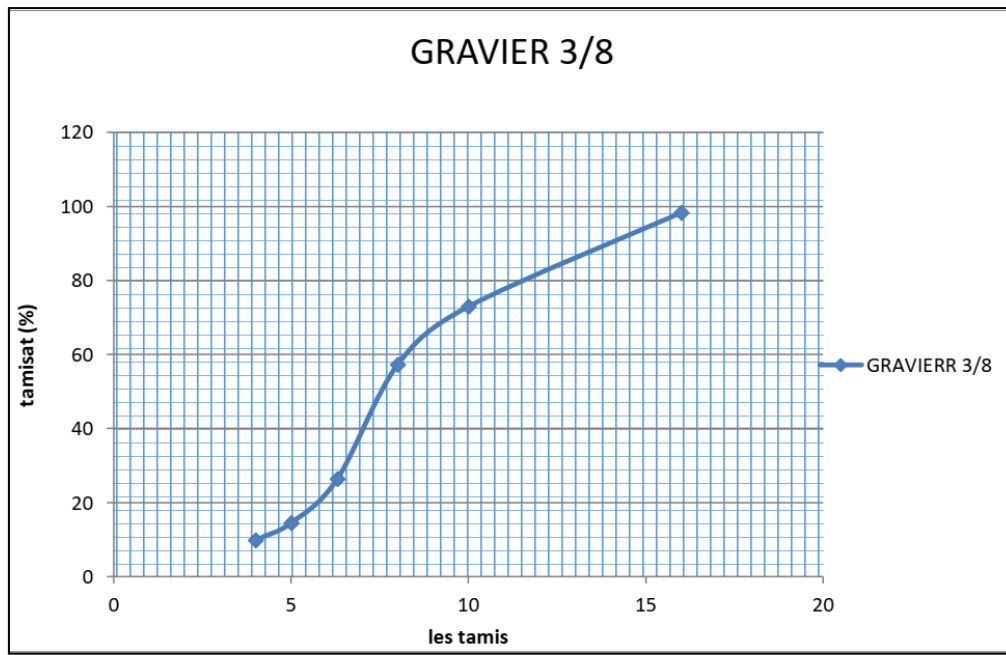


Figure III.7 L'analyse granulométrique de fraction (3/8) du gravier

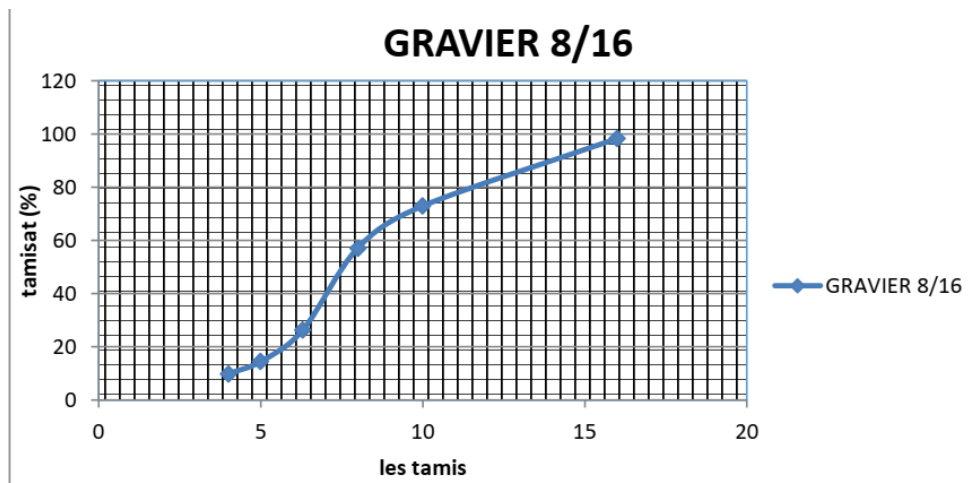


Figure III.8 l'analyse granulométrique de fraction 8/16 du gravier

Chapitre III PROGRAMME EXPERIMENTAL

Tamis (mm)	Poids des tamis vide (g)	Poids des tamis+sable	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	1,98	1,022	1,068	71,2	28,8
8	0,825	1,16	0,335	1,403	93,53	6,47
5	0,853	0,944	0,091	1,494	99,6	0,4
3	0,754	0,754	0,001	1,495	99,66	0,34
fond	0,566	0,57	0,004	1,499	99,93	0,07

Tableau III.12 analyse granulométrique pour le gravier fraction 8/16

Tamis (mm)	Poids de refus(kg)	Refus cumulé		Tamisât cumulé(%)
(kg)	(%)			
16	0,026	0,026	1,73	98,27
10	0,38	0,406	27,06	72,94
8	0,205	0,611	40,73	59,27
6,3	0,469	0,074	71,6	28,4
5	0,178	1,252	83,46	16,54
4	0,139	1,391	92,73	7,27
3,15	0,069	1,46	97,33	2,67
2,5	0,029	1,489	99,26	0,74
Fond	0,01	1,499	99,93	0,07

Tableau III.13 : Analyse granulométrique pour le mélange de gravier 3/8 (60%) et gravier 8/16 (40%)

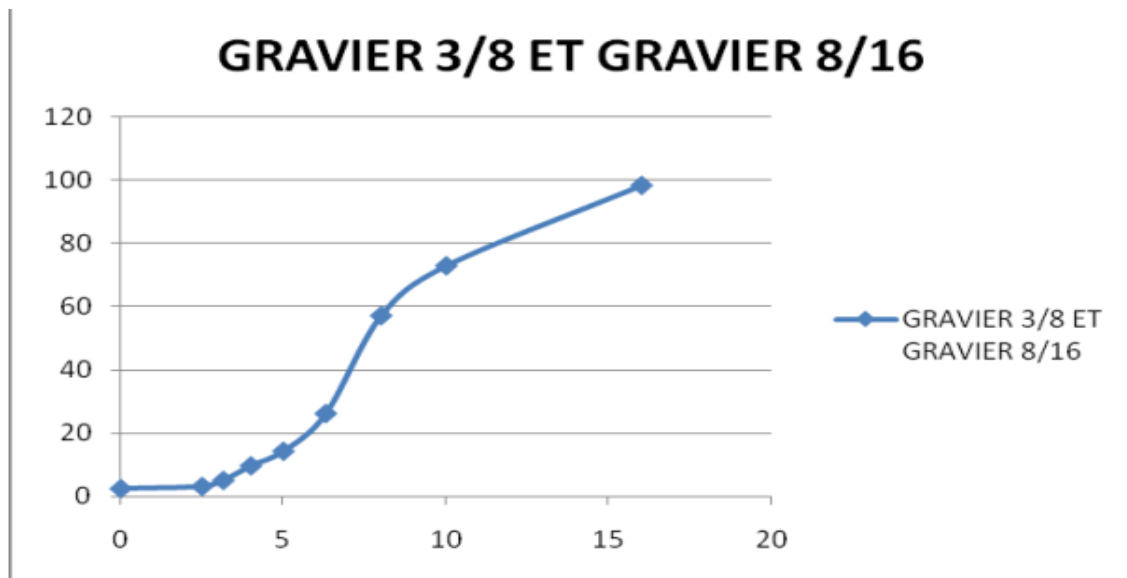


Figure III.9 Analyse granulométrique de mélange de 60% gravier 3/8 avec 40%de gravier 8/16

III.2.4 le ciment :

Le ciment utilisé dans notre travail pour la composition de béton est un ciment composé de type CEM I 42,5 N-SR3 NA 442 de classe de résistance 42.5 .Il est conforme à la norme nationale NA 442 v 2013 et à la norme Européenne EN 197-1 avec un taux en C3A < 3%, produit par la cimenterie de **LAFARGE**

MOKAOUEM est un ciment gris résistant aux sulfates, résultat de la mouture d'un clinker contenant un faible taux d'aluminates de calcium avec une proportion de gypse inférieure à celle d'un ciment portland composé. [15]



Figure III.9 sac de ciment MOKAOUEM

Chapitre III PROGRAMME EXPERIMENTAL

Caractéristiques physiques et chimiques :

Caractéristiques	Normes	Exigences NA 442/NA 443		Unité
SiO ₂	NA 5042	29,60	/	%
Al ₂ O ₃		9,84	/	%
Fe ₂ O ₃		3,24	/	%
CaO		56,76	/	%
K ₂ O		0,74	/	%
Na ₂ O		0,23	/	%
Na ₂ O-Equ			0,71	/
Perte au feu 'PAF'	NA 5042	0,72	≤ 5,0	%
Residus insolubles: ' Ins. Res'	NA 5042	0,72	/	%
Teneur en oxyde de Magnésium (MgO)		5,19	/	%
Teneur en anhydrite sulfurique (SO ₃)	NA 5042	2,55	≤ 4,0	%
Chlorure	NA5038	0,08	≤ 0,10	%
Chaleur hydratation (à 41 heures)	NA5061	221	≤ 270	j/g
Début du Temps de Prise (min)	NA 230	208	≥ 60	min
Fin du Temps de Prise (min)		348	/	min
Expansion "Le Chatelier" (mm)	NA 230	1	≤ 10	mm

Caractéristiques	Taux	Exigences NA 442/NA 443	Unité
Laitier	60 ≥ S ≤ 65	≥ 60	%

Tableau III.14 les caractéristiques physiques et chimiques de ciment MOKAOUEM

Caractéristiques mécaniques :

Caractéristiques	Normes		Exigences norme	Unité
2 days	NA 234	12,00	≥ 10	MPa
28 days		50,15	≥42,5 & ≤62,5	

Tableau III.15 les caractéristiques mécaniques de ciment MOKAOUEM

III.2.5 Les adjuvants

III.2.5.1 hydrofuge

Hydrofuge Sika® Liquide est un hydrofuge de masse liquide blanc pour bétons. Conforme à la norme NF EN 934-2. Hydrofuge Sika Liquide se combine à la chaux du ciment pour former des cristallisations complémentaires qui obstruent les capillaires du mortier, le rendant étanche à l'eau. Hydrofuge Sika Liquide est garanti sans chlore. Il est sans effet appréciable sur la prise et les résistances mécaniques des bétons.

Densité 1,02 ± 0,01

Teneur Totale en Ions Chlorure $\leq 0,1 \%$

Équivalent Oxyde de Sodium $\leq 2,0 \%$ [2]



Figure III.10 hydrofuge sika liquide [16]

III.2.5.2 Le super plastifiant

Le MEDAPLAST SP 40 est un super plastifiant haut réducteur d'eau permettant d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité. En plus de sa fonction principale de super plastifiant, il permet de diminuer considérablement la teneur en eau du béton. Conforme à la norme NA 774 , NA 5102 et NA 5075.

Propriétés : Grâce à ses propriétés le MEDAPLAST SP 40 permet :

Sur béton frais :

- Améliorer la fluidité
- Augmenter la maniabilité
- Réduire l'eau de gâchage
- Éviter la ségrégation
- faciliter la mise en œuvre du béton

Sur béton durci :

- Augmenter les résistances mécaniques même à jeune âge
- Diminuer la porosité
- Augmenter la durabilité

- Diminuer le retrait [17]



Figure III.11 adjuvant super plastifiant MEDAPLAST SP 40

III.2.6 L'eau

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

III.2.5.1 Mesure du PH

Le pH-mètre est un appareil permettant de mesurer le pH d'une solution. Il est constitué de deux éléments : un boîtier électronique qui affiche la valeur du pH et une électrode qui mesure cette valeur



Figure III.12 Ph mètre (Laboratoire du développement des Géomatériaux – université de Msila).

Chapitre III PROGRAMME EXPERIMENTAL

III.2.5.2 Test Dureté totale

On définit la dureté comme la teneur d'une eau en ions calcium, Ca^{2+} , et ions magnésium, Mg^{2+} . 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.

Réactifs et produits auxiliaires

Conservés hermétiquement fermés entre $+15$ et $+25^\circ\text{C}$, les réactifs-test sont utilisables jusqu'à la date indiquée sur l'emballage. Contenu d'un emballage :

- ✓ 1 flacon de réactif H-1 (solution indicatrice)
- ✓ 2 flacons de réactif H-2 (solution de titrage)
- ✓ 1 seringue plastique graduée de 5 ml
- ✓ 1 tube à essai



Figure III.13 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.
Réactif H-1	3 gouttes	Ajouter et agiter légèrement.
Réactif H-2		L'échantillon vire au rouge en présence des générateurs de dureté.

- 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 III.16: le mode opératoire du Test Dureté totale

1 goutte = 17.8 mg/L CaCO₃ → 70 gouttes = 1,24g/L



Figure III.14 essai de Test Dureté totale

III.2.5.3 Essai de dureté carbonaté

Déterminer le taux de HCO₃ dans un échantillon d'eau.

Mode opératoire

- Ajouter 3 gouttes de réactif H1 dans l'échantillon d'eau (5ml) la couleur devient bleu
- Ajouter le réactif H2 goutte à goutte jusqu'à ce que la couleur devienne rouge

1 goutte = 0.36 mmol/L * 61.2 = 21.96 mg/l → 12 gouttes = 263.606 mg/L



Figure III.15 Essai de dureté carbonaté

1 goutes = 0.36 mmol/L * 61.2 = 21.96 mg/l 12 goutes = 263.606 mg/L

III.2.5.4 Mesurer la présence de sulfate avec test à BANDELETTE SO₄²⁻

•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 III.17 : Domaine de mesure et nombre de dosages de SO₄²⁻



Figure III.16 test à BANDELETTE SO₄²⁻

Chapitre III PROGRAMME EXPERIMENTAL

Mode opératoire

Ce test de dureté est extrêmement simple et précis.

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

Prendre une bandelette de sulfate test qui est colorée en rose.

Mettre dans l'échantillon d'eau. Attendre 2 min, La bandelette change de couleur et voir la différence.

4 colonnes roses > 200mg/L

3 roses 1 orange >400 mg/L

2 rose 2 oranges >800mg/L

1 rose 3 oranges > 1200mg/L

0 rose 4 oranges >1600mg/L

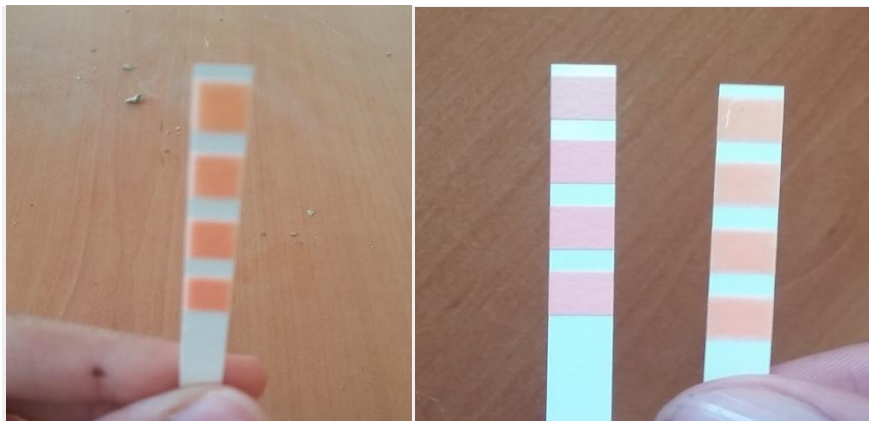


Figure III.17 résultat de test à BANDELETTE SO_4^{2-}

Résultat d'analyse :le changement montre que l'eau contient >1600 mg/l de SO_4

III.2.5.5 Test Chlorures Cl^-

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

Chapitre III PROGRAMME EXPERIMENTAL

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



Figure III.18 Réactifs et produits auxiliaires Test Chlorures Cl

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 vireau 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	
Réactif Cl-3		
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 III.18: le mode opératoire du Test Chlorures Cl-

Chapitre III PROGRAMME EXPERIMENTAL

•Résultats

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

Donc on a : 11*25=275mg/l de cl

(Après 2 gouttes de cl1) (Après 11 gouttes de cl3)



Figure III.19: les résultats du Test Chlorures Cl

Conclusion :

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

ph	8.13	
SO ₄ -2	≥ 1600mg/l (XA2)	Un danger modéré
CL-	275mg/l	Un danger modéré
CACO ₃	850mg/l	Un danger modéré
HCO ₃	263.606 mg/L	Un danger modéré

TABLEAU III.19: tableau représente les résultats des tests d'analyse de l'eau

III.2.7 L'ajout

Définition

La poudre de marbre est une matière calcaire blanche pure , au grain légèrement plus gros que la craie .l'utilisation de cette poudre dans le béton comme addition pour améliorer sa qualité , sa perméabilité et sa résistance mécanique .

La poudre de marbre utilisé dans notre travail commercialise d'une atelier à Boussaâda. On l'utilise dans les deux cas : calciné et non calciné. (La calcination dans le four à 850° pendant une heure) avec un pourcentage 20% de liant



Figure III.20 Préparation d'ajout(Laboratoire Développement des Géo Matériaux, M'sila)

III.3 Préparation des corps d'épreuve

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

III.3.1 Composition et mise en œuvre :

les détails de chacune composition de confection des béton sont reportons dans le tableau suivant :

essai	dosage	E/C	adjuvant	cure1	cure2	ajouts	Affaissement
1	350	0,66	0	eau	cl	20N	Ajout calciné 4cm Ajout non calciné 4.5cm
2	350	0,71	0	eau	cl	20C	
3	350	0,66	0	eau	air	20N	
4	350	0,71	0	eau	air	20C	
5	350	0,66	0	air	cl	20N	
6	350	0,71	0	air	cl	20C	
7	350	0,66	0	air	air	20N	
8	350	0,71	0	air	air	20C	
9	350	0,65	0	eau	cl	0	4cm
10	350	0,65	0	eau	air	0	
11	350	0,65	0	air	cl	0	
12	350	0,65	0	air	air	0	
13	350	0,44	2	Eau	cl	20N	Ajout non calciné 6cm Ajout calciné 5.5cm
14	350	0,43	2	Eau	cl	20C	
15	350	0,44	2	Eau	air	20N	
16	350	0,43	2	Eau	air	20C	
17	350	0,44	2	air	cl	20N	
18	350	0,43	2	air	cl	20C	
19	350	0,44	2	air	air	20N	
20	350	0,45	2	air	air	20C	
21	350	0,45	2	eau	CL	0	
22	350	0,45	2	eau	air	0	7cm
23	350	0,45	2	air	cl	0	
24	350	0,45	2	air	Air	0	
25	600	0,53	0	eau	cl	20N	Ajout non calciné 5 cm Ajout calciné 4.5cm
26	600	0,60	0	eau	cl	20C	
27	600	0,53	0	eau	air	20N	
28	600	0,60	0	eau	air	20C	
29	600	0,53	0	air	cl	20N	
30	600	0,60	0	air	cl	20C	
31	600	0,60	0	air	air	20C	

Chapitre III PROGRAMME EXPERIMENTAL

32	600	0,47	0	air	cl	0	
33	600	0,47	0	air	air	0	5cm
34	600	0,35	2	eau	cl	20C	ajout non calciné
35	600	0,35	2	eau	air	20C	
36	600	0,30	2	air	cl	20N	8cm
37	600	0,35	2	air	cl	20C	ajout calciné
38	600	0,30	2	air	air	20N	
39	600	0,35	2	air	air	20C	
40	600	0,45	2	eau	air	0	7cm
41	600	0,45	2	air	cl	0	
42	600	0,45	2	air	air	0	

Tableau III.20 tableau des compositions de béton

III.3.2 Confection des éprouvettes :

Les constituants du béton ont été introduits dans le malaxeur par décroissant de granulométrie et ont été mélangés à sec 30 secondes. pour les bétons contient les adjuvants (2% de super plastifiant + 2% hydrofuge) l'eau sera introduite avec les . Après l'introduction de l'eau et le malaxeur poursuivi pendant 3 minutes jusqu'à le mélange serai homogène. la mise en place du béton à été réalisé conformément aux normes françaises NFP 18-404 (Bétons - Essai d'étude, de convenance et de contrôle - Confection et conservation des corps d'épreuve »). La mise en table vibrante Quatre éprouvettes ont été confectionnées pour chaque composition béton. Pour les essais de diffusion Les moules sont des moules cylindriques en PVC et métalliques de dimensions **100 x 200mm**



Figure III.21 la Confection des éprouvettes(Laboratoire Développement des Géo Matériaux)

III.3.3 Cure appliquée

Après coulage, les éprouvettes ont été démoulées à 24 heures, puis coupées en 3 disques de **50 ± 1 mm** d'épaisseur à l'aide d'une scie à béton.

Ensuit, les éprouvettes sont conservés selon deux modes de cures pendant 28jours comme suit

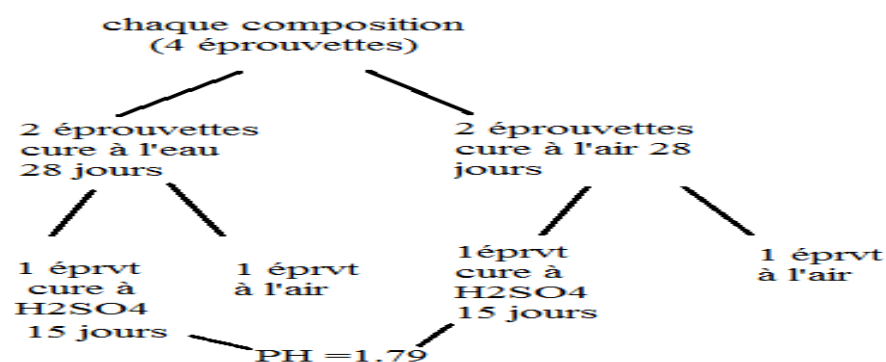


Figure III.22 diagramme de cure appliquée



Figure III.23 photos représentent le mode de cure appliquée

III.4 Expériences de migration sous champs électrique des ions chlorures Selon la norme ASTM C1202 :

Les indicateurs de durabilité et en particulier le coefficient de diffusion sont aujourd'hui des paramètres indispensables dans l'évaluation des durées de vie des ouvrages en béton armé. Dans les conditions naturelles, la diffusion des ions chlorures est lente.

Cela peut prendre des mois pour obtenir les D_{app} , Cl . Pour remédier à ce problème, des méthodes en conditions accélérées sont couramment utilisées. Un champ électrique est appliqué à une cellule contenant de part et d'autre du matériau une solution de contact. Les expériences de migration non-stationnaire (ou stationnaire) permettent l'obtention du coefficient de diffusion apparent (ou effectif). Au cours de cette expérience, la résistivité du matériau peut également être mesurée.

Les ions sont donc forcés de traverser l'échantillon au moyen d'un champ électrique. Cette expérience de migration présente l'avantage d'être rapide par rapport à la diffusion (quelques

Chapitre III PROGRAMME EXPERIMENTAL

heures au lieu de quelques mois).

L'expérience a été réalisée par l'université Mohamed Boudiaf à Msila à l'aide de cette nouvelle appareil qu'est l'appareil de mesure de pénétration des ions de chlorures dans le béton. une expérimentation non onéreuse mais pénible à la fois, car elle demande beaucoup de patience et de la curiosité de savoir elle nécessite beaucoup plus de grandes précautions vu les matière dangereuses à manipuler en autre le NAOH ainsi que les acide, et que chaque essai doit être préparé la veille sans aucune fuite, pour être branché demain durant six heures.

Charge ayant traversé l'échantillon de béton (Coulomb)	Perméabilité aux ions chlorures
> 4000	élevée
> 2000 – 4000	modérée
> 1000 – 2000	faible
100 – 1000	très faible
< 100	négligeable

Tableau III.21 tableau des valeurs d'essai de diffusivité



Figure III.24 essai de diffusivité des ions chlorures

Chapitre III PROGRAMME EXPERIMENTAL

III.5 Expérience de Porosité du béton (NF EN 18 – 459) (La porosité accessible à l'eau)

La durabilité du béton dépend essentiellement de la difficulté qu'ont les agents agressifs à pénétrer dans le réseau poreux du matériau. La porosité est un paramètre déterminant de la durabilité du béton. Les pores sont constitués :

- ✓ De pores capillaires interconnectés, qui forment un espace continu dans le réseau poreux.
- ✓ De pores isolés qui ne communiquent pas avec l'environnement.

Mode opératoire :

- Pesée hydrostatique, M_{eau} , Pesée dans l'air de l'éprouvette saturée d'eau, M_{air}
- Pesée dans l'air de l'éprouvette sèche, M_{sec} Séchage = étuve 105°C jusqu'à obtenir une masse constante (Remarque : Masse ne varie pas de plus de 0,05% entre deux pesées espacées de 24h)

Calcul de la porosité accessible à l'eau : $Peau = \{(M_{air} - M_{sec}) / (M_{air} - M_{eau})\} \times 100$



Figure III.25 essai de porosité accessible à l'eau

III.6 La Méthode des plans d'expériences :

Les plans d'expériences permettent d'organiser au mieux les essais qui accompagnent une recherche scientifique ou des études industrielles. Ils permettent en effet de modéliser au mieux un phénomène aléatoire, le plus souvent complexe, à l'aide d'un minimum d'essais. Ils s'inscrivent donc dans la démarche constante d'amélioration de la qualité ou de la productivité, (YAHIAOUI Idris, 2015).

Les plans d'expériences constituent essentiellement une stratégie de planification d'expériences afin d'obtenir des conclusions solides et adéquates de manière efficace et économique. La méthodologie des plans d'expériences se base sur le fait qu'une expérience convenablement organisée, conduira fréquemment à une analyse et à une interprétation statistique relativement simple des résultats, (Sandrine KARAM, 26/11/2004).

III.6.1 Choix de la méthode d'expérimentation :

La méthode d'expérimentation choisie doit faciliter l'interprétation des résultats.

Elle doit également minimiser le nombre des essais sans toutefois sacrifier la qualité.

La théorie des plans d'expériences assure les conditions pour lesquelles on obtient la meilleure précision possible avec le minimum d'essais. On a donc le maximum d'efficacité avec le minimum d'expériences et par conséquent le coût minimum, (Jacques Goupy, 2005)

III.6.2 Définition des niveaux des facteurs

Il s'agit de choisir les niveaux haut et bas de chaque facteur voir tableau.

Dosage de ciment : niveau + 600kg/m³ niveau- 350kg/m³

E/C : niveau+ 0.6 niveau – 0.35

L'ajout : niveau+ 20% niveau – 0%

Adjuvant : niveau + Réducteur d'eau 2% + Hydrofuge 2%, niveau- sans adjuvant

La cure 1 : niveau+ EAU niveau – à l'Air

Cure 2 : niveau + dans N₂SO₄ PH 1.79 niveau – à l'air

III.6.3 Présentation de logiciel « Mini tab » :

Mini tab est un logiciel propriétaire commercial de statistiques. Il est développé par Mini tab, Inc. pour le système d'exploitation Windows uniquement. Il est largement utilisé par les universités pour enseigner les statistiques, et les développeurs le dirigent particulièrement aux entreprises en affichant leur intention de les rendre plus performantes selon la méthode « Six

Sigma» Logiciel développé depuis 1972 et disponible en 8 langues.

Diagramme de Pareto :

Le diagramme de Pareto est un graphique représentant l'importance de différentes causes d'un phénomène. Ce diagramme permet de mettre en évidence les causes les plus importantes sur le nombre total d'effet et ainsi de prendre des mesures ciblées pour améliorer une situation.

Diagramme des effets principaux :

Un graphique des effets principaux permet d'examiner les différences entre les moyennes des niveaux d'un ou plusieurs facteurs. On parle d'effet principal lorsque les différents niveaux d'un facteur ont une incidence sur la réponse. Un graphique des effets principaux affiche la moyenne de la réponse pour chaque niveau de facteur connecté par une ligne.

Lorsque vous sélectionnez Stat > ANOVA > Graphique des effets principaux, Minitab crée un graphique qui utilise les moyennes des données. Après avoir ajusté et stocké un modèle, vous pouvez l'utiliser pour générer des graphiques utilisant des moyennes ajustées.

Diagramme des interactions :

La fonction Diagramme des interactions permet de déterminer l'influence d'un facteur de catégorie sur la relation entre un second facteur de catégorie et une réponse continue. Ce diagramme affiche les moyennes correspondant aux niveaux d'un facteur sur l'axe des X, ainsi qu'une courbe distincte pour chaque niveau d'un autre facteur.

Equation de régression :

Une équation de régression permet de décrire la relation entre la réponse et les termes du modèle. L'équation de régression est une représentation algébrique de la droite de régression.

L'équation de régression pour le modèle linéaire prend la forme suivante : $Y = b_0 + b_1x_1$.

Dans l'équation de régression, Y représente la variable de réponse, b_0 est la constante ou l'ordonnée à l'origine, b_1 est le coefficient estimé du terme linéaire (également appelé pente de la droite) et x_1 est la valeur du terme.

L'équation de régression avec plusieurs termes prend la forme suivante :

$$y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_kX_k$$

Dans l'équation de régression, les lettres représentent les éléments suivants :

y est la variable de réponse, b_0 est la constante. b_1, b_2, \dots, b_k sont les coefficients. X_1, X_2, \dots, X_k sont les valeurs du terme, Si le modèle contient à la fois des variables continues et des variables de catégories, le tableau de l'équation de régression peut afficher une équation pour chaque combinaison de niveaux des variables de catégorie. Pour utiliser ces équations afin

Chapitre III

PROGRAMME EXPERIMENTAL

d'effectuer des prévisions, vous devez choisir celle qui est la mieux adaptée, en vous fondant sur les valeurs des variables de catégorie, puis entrer les valeurs des variables continues.

Conclusion

Ce chapitre résume tout les essais de caractérisation des matériaux utilisé (gravier, sable ,ciment, adjuvant, ajout, eau) .ainsi que la méthode utilisé dans notre travail ,la méthode des plan d'expériences qui amène une méthodologie pour résoudre nos problèmes d'optimisation.

Chapitre IV

Analyse des

résultats

CHAPITRE IV

ANALYSE DES RESULTATS

IV.1 introduction

Ce chapitre présente les résultats et les interprétations convenables pour les valeurs obtenues d'essai de diffusivité et porosité ainsi que la résistance de chaque formulation réalisé.

IV.2 Plan d'expériences par MINITAB

IV.2.1 Résultats d'essai de diffusivité

❖ Matrice d'expériences et résultats.

dosage	E/C	cure1	Ajout	Diffusivité 'c'
350	0,65	eau	20N	7909
350	0,65	eau	0	6585
350	0,65	air	20N	8532
350	0,65	air	0	5967
350	0,65	eau	0	5320
350	0,65	air	0	7181
350	0,35	eau	20N	6937
350	0,35	eau	0	4203
350	0,35	air	20N	7337
350	0,35	air	0	5253
350	0,35	eau	0	8220
350	0,35	air	0	7105
600	0,65	eau	20N	4082
600	0,65	eau	0	8624
600	0,65	air	0	9568
600	0,65	air	0	3804
600	0,35	eau	0	6554
600	0,35	air	20N	3462

600	0,35	air	0	9870
600	0,35	eau	0	2349
600	0,35	air	0	4050

Tableau IV.1 matrice d'expérience et résultats de diffusivité

- Résultats du diagramme de Pareto des effets de diffusivité.

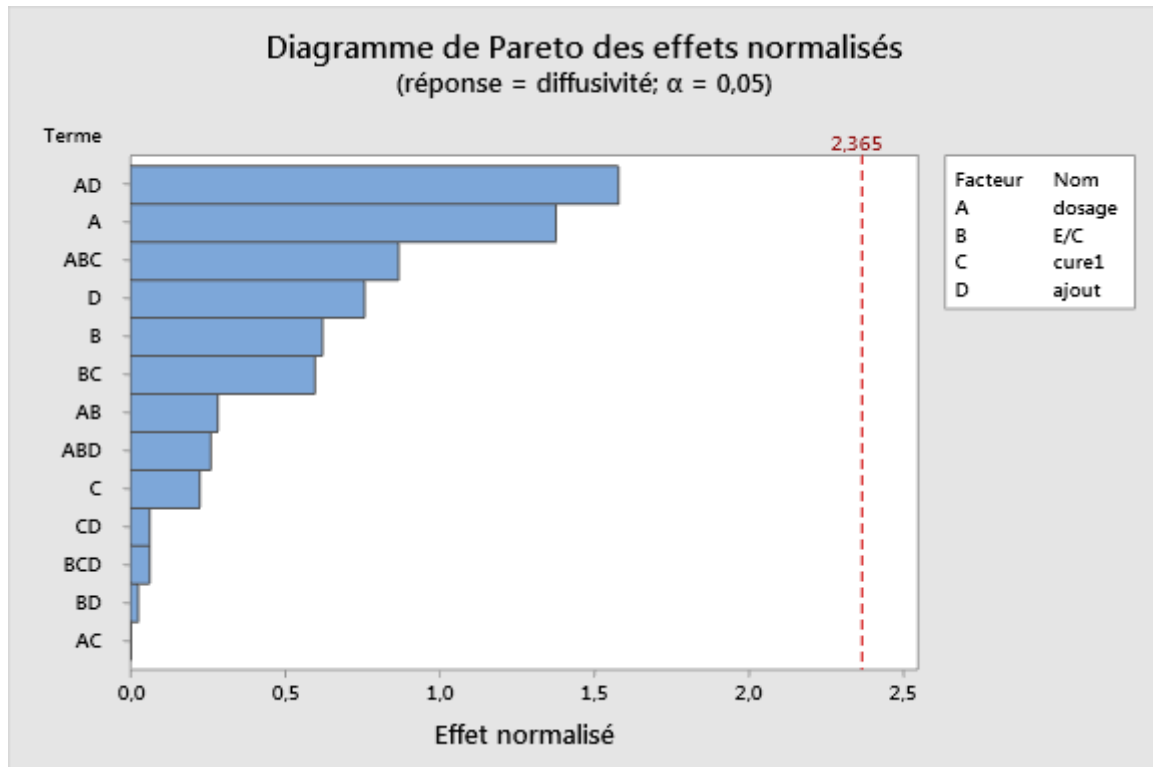


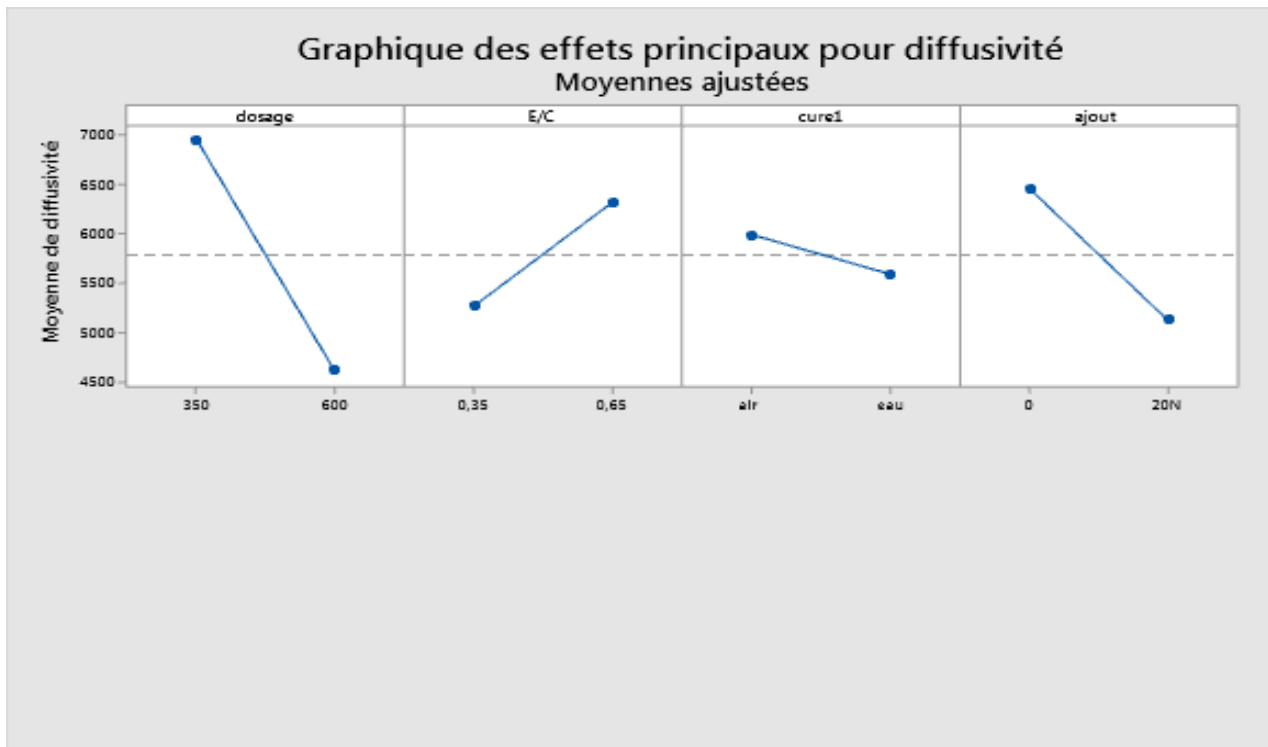
Figure IV.1 diagramme de Pareto des effets pour la diffusivité

La question qui se pose qu'elles sont les facteurs les plus influents sur la diffusivité ?

❖ Vu que la ligne rouge est plus proche d'une interaction de deux facteurs et deux autres facteurs cela signifie que ce sont les plus influents sur la diffusivité

Ces facteurs sont classés par l'ordre suivant :

- 1) AB : l'interaction de dosage de ciment et de pourcentage d'ajout.
- 2) A : le dosage de ciment

- Résultats du diagramme des effets principaux pour la diffusivité**Figure IV .2** diagramme des effets principaux pour la diffusivité

Les résultats montrent que la diffusivité est influée par chaque paramètre à il seule comme suit :

- 1- la valeur de diffusivité est inversement proportionnelle au dosage de ciment où elle diminue fortement lorsqu'on augmente de dosage de ciment.
- 2- elle diminue avec un minimum de rapport E/C.
- 3- Elle diminue relativement en utilisons le mode de cure à l'eau au lieu le mode à l'air.
- 4- Elle diminue fortement en utilisant 20% d'ajout non calciné au lieu de le calciné et son absence.

Ceux produisent un béton moins perméable et étanche.

- Résultats du diagramme des interactions pour la diffusivité

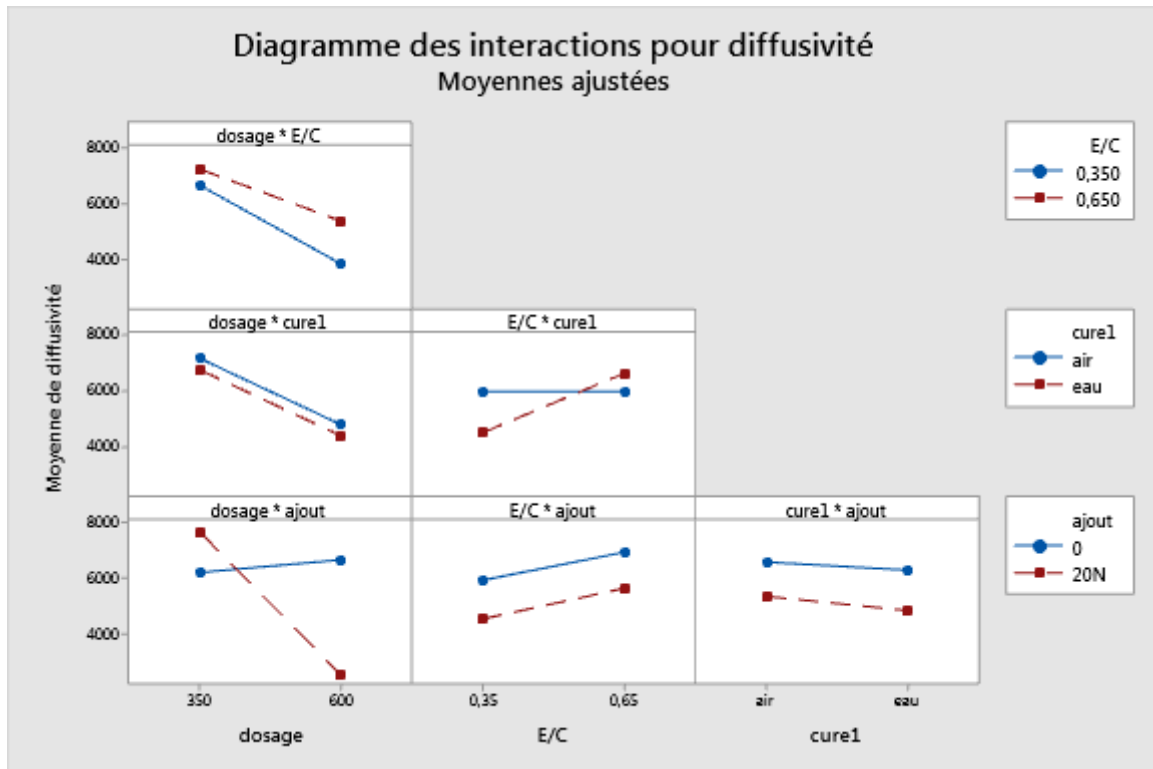


Figure IV.3 diagramme des interactions pour la diffusivité

- 1- Un dosage de ciment 600kg/m^3 et un pourcentage de 20% d'ajout non calciné donnent une faible perméabilité ceux produit un béton étanche.
- 2- Un dosage de 350kg/m^3 avec ou sans l'introduction de l'ajout donnent une grande diffusivité béton perméable.
- 3- Un faible rapport E/C 0.35 avec un pourcentage de 20% d'ajout non calciné donnent une faible diffusivité.
- 4- Un grand rapport E/C 0.65 donne une forte diffusivité cela produit un béton très perméable.
- 5- Le mode de cure à l'eau avec ajout non calciné diminue la diffusivité ceux produit un béton peut perméable
- 6- Un dosage de ciment 600kg/m^3 avec un mode de cure à l'air ou a l'eau donnent une faible diffusivité ceux produisent un béton imperméable.

7- Un rapport de **E/C 0.35** avec un mode de cure à l'eau diminue la diffusivité et améliore **l'imperméabilité de béton** au contraire le rapport **E/C 0.65**.

8- Un dosage de **600kg/m³** avec un rapport **E/C= 0.35** produit un **béton imperméable**.

9- Un dosage de ciment **350kg/m³** avec un rapport **E/C 0.35 ET E/C 0.65** donnent une forte diffusivité ceux produisent un **béton perméable**.

- Modélisation par une équation mathématique

Equation de régression en unités non codées

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

$$\begin{aligned} \text{diffusivité} = & 11507 - 15,7 \text{ dosage} - 2561 \text{ E/C} + 6108 \text{ cure1} \\ & + 1633 \text{ ajout} + 12,8 \text{ dosage} * \text{E/C} \\ & - 17,0 \text{ dosage} * \text{cure1} - 5,0 \text{ dosage} * \text{ajout} - \\ & 12632 \text{ E/C} * \text{cure1} + 5992 \text{ E/C} * \text{ajout} \\ & - 234 \text{ cure1} * \text{ajout} + 34,0 \text{ dosage} * \text{E/C} * \text{cure1} - \\ & 12,3 \text{ dosage} * \text{E/C} * \text{ajout} \\ & + 359 \text{ E/C} * \text{cure1} * \text{ajout} \end{aligned}$$

IV.2.2 Résultats d'essai de porosité

❖ Matrice d'expériences et résultats

dosage C	E/C	cure1	cure2	ajouts	porosité
350	0,65	eau	cl	20N	10.08
350	0,65	eau	cl	20C	17.13
350	0,65	eau	air	20N	10.09
350	0,65	eau	air	20C	13.14
350	0,65	air	cl	20N	12,25
350	0,65	air	cl	20C	13.89
350	0,65	air	air	20N	10.27
350	0,65	air	air	20C	12.39
350	0,35	Eau	cl	20C	10,75
350	0,35	Eau	air	20N	10,15
350	0,35	Eau	air	20C	5,32
350	0,35	air	cl	20N	8,53
350	0,35	air	cl	20C	6
350	0,35	air	air	20N	8,3
350	0,35	air	air	20C	6,75
350	0,35	eau	CL	0	7,79
350	0,35	eau	air	0	7,11
350	0,35	air	cl	0	6,5
350	0,35	air	Air	0	6,82
600	0,65	eau	cl	20N	8,65
600	0,65	eau	cl	20C	17,39
600	0,65	eau	air	20N	11,07
600	0,65	eau	air	20C	10,63
600	0,65	air	cl	20N	9,69
600	0,65	air	cl	20C	12,14
600	0,65	air	air	20N	12,4
600	0,65	air	air	20C	15,48
600	0,35	eau	cl	20N	8,87
600	0,35	eau	cl	20C	13,6
600	0,35	eau	air	20N	9,67
600	0,35	eau	air	20C	10,04
600	0,35	air	cl	20N	1,24
600	0,35	air	cl	20C	14,18
600	0,35	air	air	20N	5,53
600	0,35	air	air	20C	7,28
600	0,35	eau	cl	0	7,23
600	0,35	air	air	0	9,51
600	0,35	air	cl	0	6,11
600	0,35	air	air	0	8,21

Tableau IV.2 matrice d'expérience et de résultats de porosité

- Résultats du diagramme de Pareto des effets pour porosité

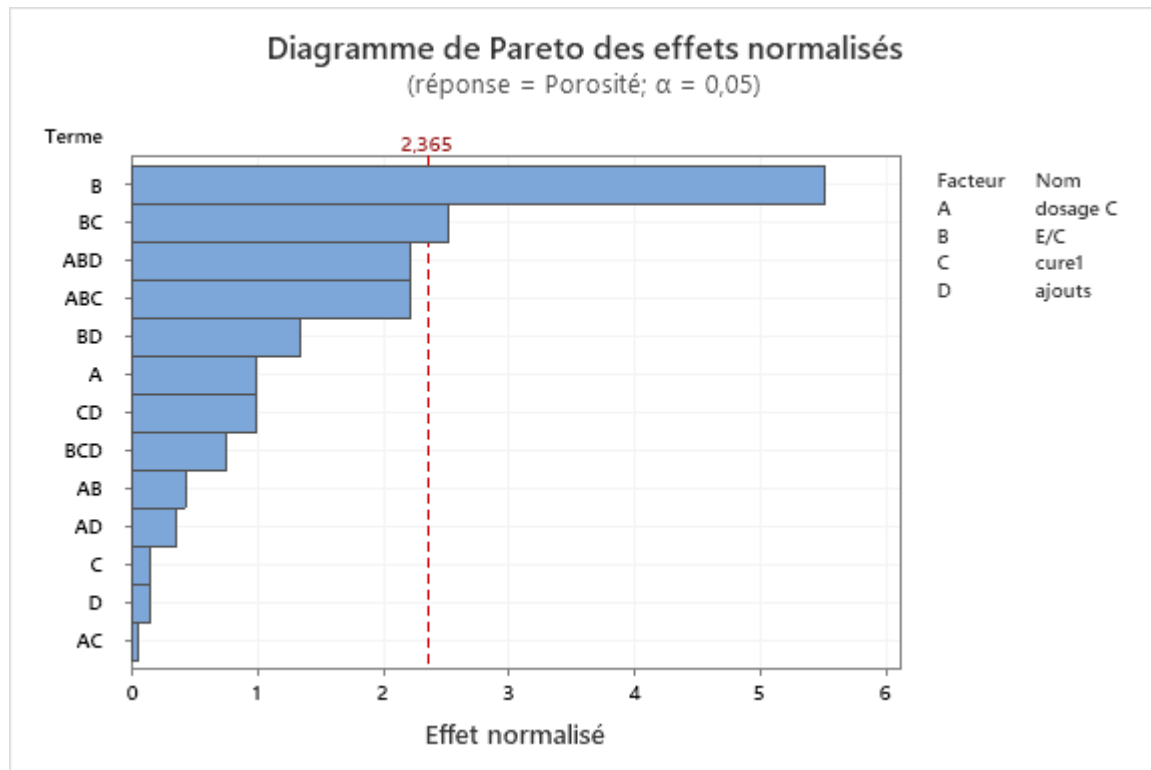


Figure IV.4 : Diagramme de Pareto des effets pour la porosité

La question qui se pose qu'elles sont les facteurs les plus influents sur la porosité?

Nous remarquons que **la ligne rouge** passe par **une facteur et une interaction de deux facteurs** cela signifie que ce sont les facteurs les plus influents, mais avec un effet graduel, qui sont classés par l'ordre suivant :

- 1)- B rapport E/C
- 2)- BC interaction du rapport E/C avec le mode de cure

- Résultats du diagramme des effets principaux pour porosité.

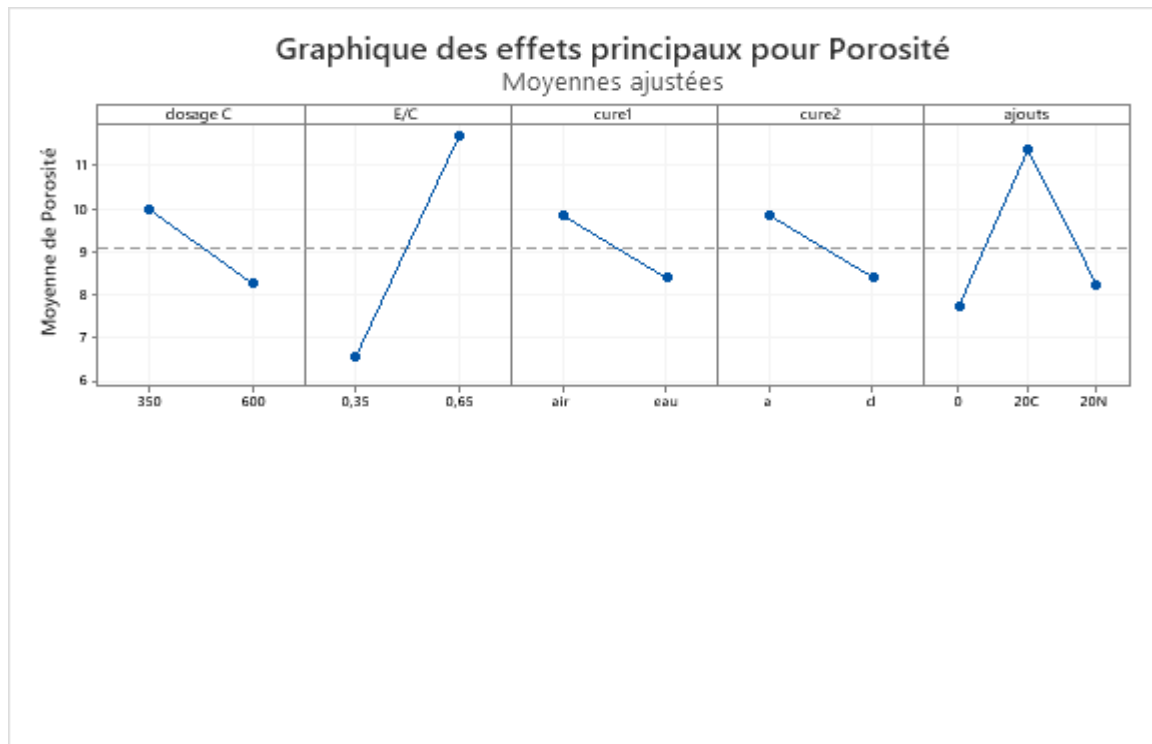


Figure IV.5 Diagrammes des effets principaux pour la porosité

les résultats montrent que la porosité est influée par chaque paramètre :

- 1- la porosité diminue lorsque le dosage de ciment augmente à 600kg/m³ ou plus
- 2- la porosité diminue fortement en utilisant un rapport E/C 0.35 .
- 3- la porosité augmente fortement en utilisant un rapport E/C 0.65
- 4- le mode de cure à l'eau diminue la porosité par contre le mode à l'air .
- 5- le mode de cure 2 CL (N₂SO₄) diminue la porosité a cause de la lixiviation de la chaux portlandite et du CSH (accroissement de la porosité).
- 6- la porosité diminue dans les deux cas en utilisant 20% d'ajout non calciné et son absence par contre elle augmente fortement lorsqu'en utilisant ajout calciné.

- Résultats du diagramme des interactions pour porosité.

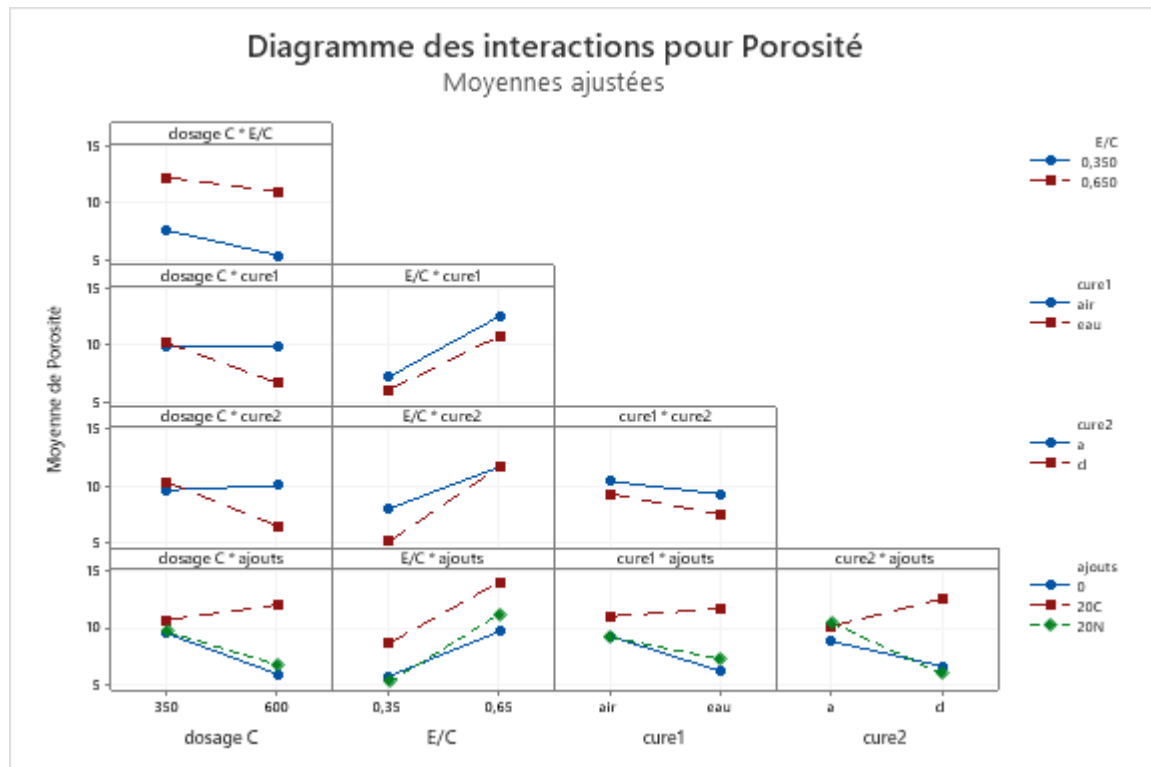


Figure IV.6 diagrammes des interactions pour la porosité

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

- 1) un dosage de ciment 600kg/m³ et un 20% d'ajout non calciné produit un béton étanche.
- 2) un dosage de ciment 600kg/m³ et un 20% d'ajout calciné produit un béton poreux.
- 3) un dosage de ciment 350kg/m³ avec ou sans ajout produit un béton de faible porosité.
- 4) un rapport E/C 0.35 avec ou sans ajout non calciné produit un béton étanche.
- 5) un rapport E/C 0.65 avec ou sans ajout produit un béton poreux.
- 6) la présence de l'ajout non calciné avec un mode de cure 1 dans l'eau produit un béton étanche alors que la présence d'ajouts calciné avec mode de cure1 dans l'eau ou dans l'air produit un béton poreux, perméable.
- 7) un mode de cure2 Cl (NH₂SO₄) avec un ajout non calciné et sans ajout , diminuent fortement la porosité alors que l'introduction de l'ajout calciné dans ce mode de cure2 augmente la

porosité.

8) le mode de cure 2 Cl (NH₂SO₄) avec dosage de ciment 600kg/m³ et un rapport E/C 0.35 diminuent la porosité.

9) un mode de cure1 à l'eau avec un dosage de ciment 600kg/m³ et un rapport E/C 0.35 produisent un béton étanche.

10) un dosage de ciment 600kg/m³ avec un rapport E/C 0.35 produit un béton imperméable alors que un dosage de ciment 350kg/m³ avec un rapport E/C 0.35 produit un béton peu perméable.

11) un rapport E/C 0.65 avec un dosage de ciment 600kg/m³ ou 350kg/m³ produit un béton poreux.

- Modélisation par une équation mathématique :

Equation de régression en unités non codées

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

$$\begin{aligned}
 \text{Porosité} = & 10,004 - 0,188 \text{ dosage } C_{350} + 0,188 \text{ dosage } C_{600} - 2,034 E/C_{0,35} + 2,034 E/C_{0,65} - 0,285 \text{ cure1}_{\text{air}} \\
 & + 0,285 \text{ cure1}_{\text{eau}} - 0,045 \text{ cure2}_{\text{air}} + 0,045 \text{ cure2}_{\text{cl}} - 0,49 \text{ ajouts}_{0+} + 1,629 \text{ ajouts}_{20C} - \\
 & 1,139 \text{ ajouts}_{20N} - 0,344 \text{ dosage } C^*E/C_{350} 0,35 + 0,344 \text{ dosage } C^*E/C_{350} 0,65 \\
 & + 0,344 \text{ dosage } C^*E/C_{600} 0,35 - 0,344 \text{ dosage } C^*E/C_{600} 0,65 + 0,022 \text{ dosage } C^*\text{cure1}_{350} \text{ air} - \\
 & 0,022 \text{ dosage } C^*\text{cure1}_{350} \text{ eau} - 0,022 \text{ dosage } C^*\text{cure1}_{600} \text{ air} + 0,022 \text{ dosage } C^*\text{cure1}_{600} \text{ eau} \\
 & - 0,451 \text{ dosage } C^*\text{cure2}_{350} \text{ air} + 0,451 \text{ dosage } C^*\text{cure2}_{350} \text{ cl} \\
 & + 0,451 \text{ dosage } C^*\text{cure2}_{600} \text{ air} - 0,451 \text{ dosage } C^*\text{cure2}_{600} \text{ cl} + 0,11 \text{ dosage } C^*\text{ajouts}_{350} 0 - \\
 & 0,772 \text{ dosage } C^*\text{ajouts}_{350} 20C + 0,663 \text{ dosage } C^*\text{ajouts}_{350} 20N - 0,11 \text{ dosage } C^*\text{ajouts}_{600} 0 \\
 & + 0,772 \text{ dosage } C^*\text{ajouts}_{600} 20C - 0,663 \text{ dosage } C^*\text{ajouts}_{600} 20N - 0,509 E/C^*\text{cure1}_{0,35} \text{ air} \\
 & + 0,509 E/C^*\text{cure1}_{0,35} \text{ eau} + 0,509 E/C^*\text{cure1}_{0,65} \text{ air} - 0,509 E/C^*\text{cure1}_{0,65} \text{ eau} \\
 & + 0,012 E/C^*\text{cure2}_{0,35} \text{ air} - 0,012 E/C^*\text{cure2}_{0,35} \text{ cl} - 0,012 E/C^*\text{cure2}_{0,65} \text{ air} \\
 & + 0,012 E/C^*\text{cure2}_{0,65} \text{ cl} + 0,418 \text{ cure1}^*\text{cure2}_{\text{air}} \text{ air} - 0,418 \text{ cure1}^*\text{cure2}_{\text{air}} \text{ cl} \\
 & - 0,418 \text{ cure1}^*\text{cure2}_{\text{eau}} \text{ air} + 0,418 \text{ cure1}^*\text{cure2}_{\text{eau}} \text{ cl} + 0,39 \text{ cure1}^*\text{ajouts}_{\text{air}} 0 \\
 & - 0,334 \text{ cure1}^*\text{ajouts}_{\text{air}} 20C - 0,054 \text{ cure1}^*\text{ajouts}_{\text{air}} 20N - 0,39 \text{ cure1}^*\text{ajouts}_{\text{eau}} 0 \\
 & + 0,334 \text{ cure1}^*\text{ajouts}_{\text{eau}} 20C + 0,054 \text{ cure1}^*\text{ajouts}_{\text{eau}} 20N + 0,60 \text{ cure2}^*\text{ajouts}_{\text{air}} 0 \\
 & - 1,458 \text{ cure2}^*\text{ajouts}_{\text{air}} 20C + 0,853 \text{ cure2}^*\text{ajouts}_{\text{air}} 20N - 0,60 \text{ cure2}^*\text{ajouts}_{\text{cl}} 0 \\
 & + 1,458 \text{ cure2}^*\text{ajouts}_{\text{cl}} 20C - 0,853 \text{ cure2}^*\text{ajouts}_{\text{cl}} 20N + 0,486 \text{ dosage } C^*E/C^*\text{cure1}_{350} \\
 & 0,35 \text{ air} - 0,486 \text{ dosage } C^*E/C^*\text{cure1}_{350} 0,35 \text{ eau} - 0,486 \text{ dosage } C^*E/C^*\text{cure1}_{350} 0,65 \text{ air} \\
 & + 0,486 \text{ dosage } C^*E/C^*\text{cure1}_{350} 0,65 \text{ eau} - 0,486 \text{ dosage } C^*E/C^*\text{cure1}_{600} 0,35 \\
 & \text{air} + 0,486 \text{ dosage } C^*E/C^*\text{cure1}_{600} 0,35 \text{ eau} + 0,486 \text{ dosage } C^*E/C^*\text{cure1}_{600} 0,65 \text{ air} - \\
 & 0,486 \text{ dosage } C^*E/C^*\text{cure1}_{600} 0,65 \text{ eau} + 0,455 \text{ dosage } C^*E/C^*\text{cure2}_{350} 0,35 \text{ air} - \\
 & 0,455 \text{ dosage } C^*E/C^*\text{cure2}_{350} 0,35 \text{ cl} - 0,455 \text{ dosage } C^*E/C^*\text{cure2}_{350} 0,65 \\
 & \text{air} + 0,455 \text{ dosage } C^*E/C^*\text{cure2}_{350} 0,65 \text{ cl} - 0,455 \text{ dosage } C^*E/C^*\text{cure2}_{600} 0,35 \text{ air} \\
 & + 0,455 \text{ dosage } C^*E/C^*\text{cure2}_{600} 0,35 \text{ cl} + 0,455 \text{ dosage } C^*E/C^*\text{cure2}_{600} 0,65 \text{ air} \\
 & - 0,455 \text{ dosage } C^*E/C^*\text{cure2}_{600} 0,65 \text{ cl} - 0,282 \text{ dosage } C^*\text{cure1}^*\text{cure2}_{350} \text{ air} \\
 & + 0,282 \text{ dosage } C^*\text{cure1}^*\text{cure2}_{350} \text{ air} \text{ cl} + 0,282 \text{ dosage } C^*\text{cure1}^*\text{cure2}_{350} \text{ eau} \text{ air} \\
 & - 0,282 \text{ dosage } C^*\text{cure1}^*\text{cure2}_{350} \text{ eau} \text{ cl} + 0,282 \text{ dosage } C^*\text{cure1}^*\text{cure2}_{600} \text{ air} \text{ air}
 \end{aligned}$$

- 0,282 dosage C*cure1*cure2_600 air cl - 0,282 dosage C*cure1*cure2_600 eau air
 + 0,282 dosage C*cure1*cure2_600 eau cl - 0,50 dosage C*cure1*ajouts_350 air 0
 - 0,318 dosage C*cure1*ajouts_350 air 20C + 0,814 dosage C*cure1*ajouts_350 air 20N
 + 0,50 dosage C*cure1*ajouts_350 eau 0 + 0,318 dosage C*cure1*ajouts_350 eau 20C
 - 0,814 dosage C*cure1*ajouts_350 eau 20N + 0,50 dosage C*cure1*ajouts_600 air 0
 + 0,318 dosage C*cure1*ajouts_600 air 20C - 0,814 dosage C*cure1*ajouts_600 air 20N
 - 0,50 dosage C*cure1*ajouts_600 eau 0 - 0,318 dosage C*cure1*ajouts_600 eau 20C
 + 0,814 dosage C*cure1*ajouts_600 eau 20N - 0,67 dosage C*cure2*ajouts_350 air 0
 + 0,684 dosage C*cure2*ajouts_350 air 20C - 0,018 dosage C*cure2*ajouts_350 air 20N
 + 0,67 dosage C*cure2*ajouts_350 cl 0 - 0,684 dosage C*cure2*ajouts_350 cl 20C
 + 0,018 dosage C*cure2*ajouts_350 cl 20N + 0,67 dosage C*cure2*ajouts_600 air 0
 - 0,684 dosage C*cure2*ajouts_600 air 20C + 0,018 dosage C*cure2*ajouts_600 air 20N
 - 0,67 dosage C*cure2*ajouts_600 cl 0 + 0,684 dosage C*cure2*ajouts_600 cl 20C
 - 0,018 dosage C*cure2*ajouts_600 cl 20N - 0,304 E/C*cure1*cure2_0,35 air air
 + 0,304 E/C*cure1*cure2_0,35 air cl + 0,304 E/C*cure1*cure2_0,35 eau air - 0,304 E/C*cure1*cure2_0,35
 eau cl + 0,304 E/C*cure1*cure2_0,65 air air - 0,304 E/C*cure1*cure2_0,65 air cl -
 0,304 E/C*cure1*cure2_0,65 eau air + 0,304 E/C*cure1*cure2_0,65 eau cl + 0,08 cure1*cure2*ajouts_air
 air 0 + 0,546 cure1*cure2*ajouts_air air 20C - 0,628 cure1*cure2*ajouts_air air 20N
 - 0,08 cure1*cure2*ajouts_air cl 0 - 0,546 cure1*cure2*ajouts_air cl 20C + 0,628 cure1*cure2*ajouts_air cl
 20N - 0,08 cure1*cure2*ajouts_eau air 0 - 0,546 cure1*cure2*ajouts_eau air 20C
 + 0,628 cure1*cure2*ajouts_eau air 20N + 0,08 cure1*cure2*ajouts_eau cl + 0,546 cure1*cure2*ajouts_eau
 cl 20C - 0,628 cure1*cure2*ajouts_eau cl 20N + 0,336 dosage C*E/C*cure1*cure2_350 0,35 air
 air - 0,336 dosage C*E/C*cure1*cure2_350 0,35 air cl - 0,336 dosage C*E/C*cure1*cure2_350 0,35 eau air
 + 0,336 dosage C*E/C*cure1*cure2_350 0,65 air cl - 0,336 dosage C*E/C*cure1*cure2_350 0,65 air air
 + 0,336 dosage C*E/C*cure1*cure2_350 0,65 air cl + 0,336 dosage C*E/C*cure1*cure2_350
 0,65 eau air - 0,336 dosage C*E/C*cure1*cure2_350 0,65 eau cl - 0,336 dosage C*E/C*cure1*cure2_600
 0,35 air air + 0,336 dosage C*E/C*cure1*cure2_600 0,35 air cl + 0,336 dosage C*E/C*cure1*cure2_600
 0,35 eau air - 0,336 dosage C*E/C*cure1*cure2_600 0,35 eau cl + 0,336 dosage C*E/C*cure1*cure2_600
 0,65 air air - 0,336 dosage C*E/C*cure1*cure2_600 0,65 air cl - 0,336 dosage C*E/C*cure1*cure2_600
 0,65 eau air + 0,336 dosage C*E/C*cure1*cure2_600*0,65 eau cl

IV.2.3 Résultats de la résistance à la compression

❖ Matrice d'expériences et résultats

dosage	E/C	ajout	R 28 J
350	0,65	20N	30,88
350	0,65	20C	24,55
350	0,65	0	35,91
350	0,35	20N	43,49
350	0,35	20C	35,43
350	0,35	0	36,91
600	0,65	20N	43,1
600	0,65	20C	32
600	0,65	0	36

600	0,35	20N	51,21
600	0,35	20C	35,86
600	0,35	0	45

Tableau IV.3 Matrice de résultats de la résistance à la compression

- Résultats du diagramme de Pareto des effets pour la résistance.

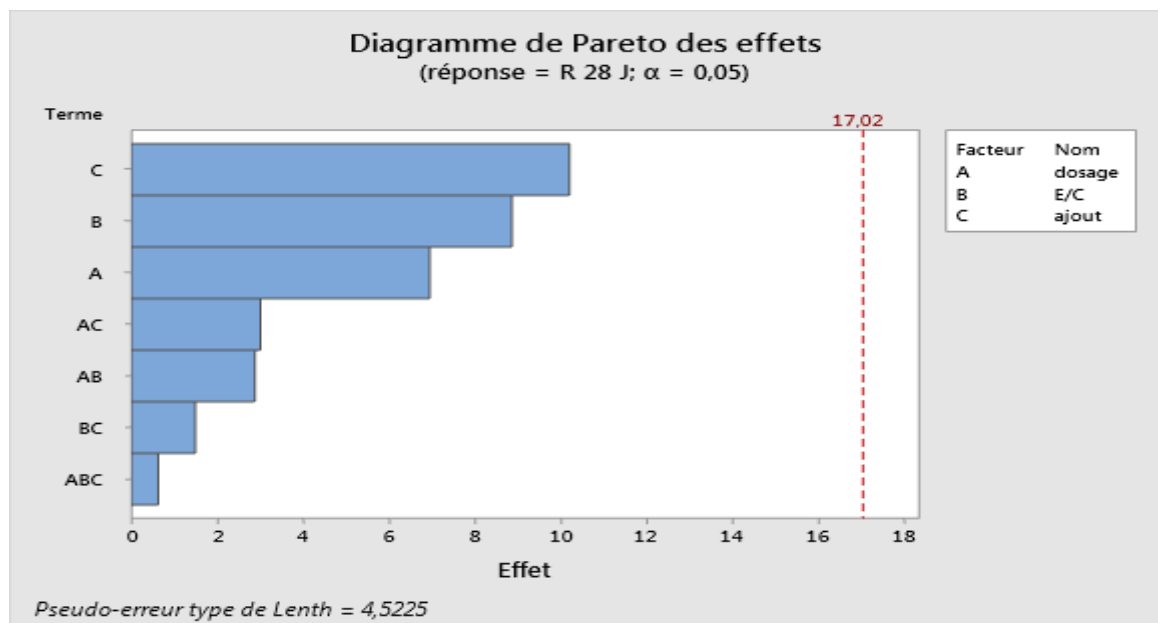


Figure IV.7 diagramme de Pareto des effets pour la résistance

La question qui se pose qu'elles sont les facteurs les plus influents sur la résistance à la compression ?

Vu que la ligne rouge et plus proche de 2 facteurs cela signifie que ce sont les plus influents sur la résistance à la compression
Ces facteurs sont classés par l'ordre suivant

- 1) C – l'ajout
- 2) B – le rapport E/C

- Résultats du diagramme des effets principaux pour la résistance a la compression

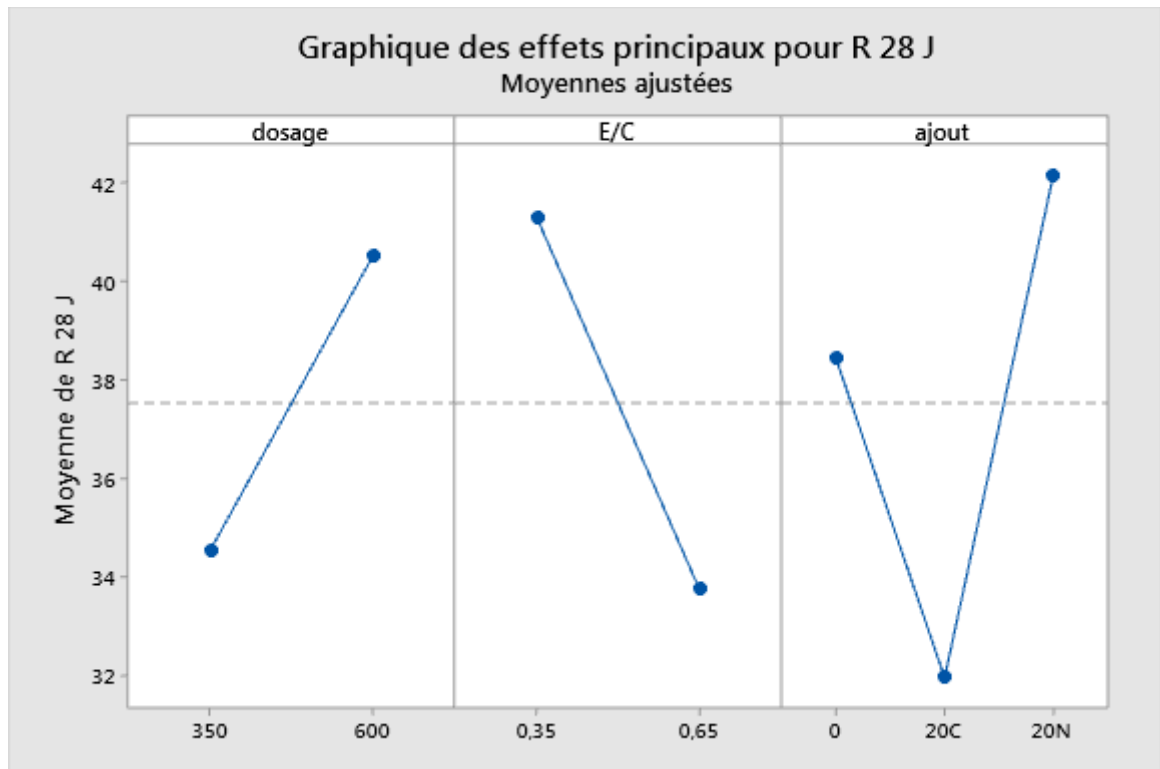


Figure IV.8 diagramme des effets principaux pour la résistance a la compression

les résultats montrent que la résistance à la compression est influée par chaque paramètre :

- 1- la résistance augmente en utilisant un dosage de ciment à 600kg/m³ ou plus
- 2- la résistance diminue en utilisant un dosage de ciment à 350kg/m³.
- 3- la résistance augmente en utilisant un rapport E/C 0.35
- 4- la résistance diminue en utilisant un rapport E/C 0.65
- 5- la résistance augmente fortement en utilisant l'ajout non calciné et diminue fortement en utilisant l'ajout calciné.

- Résultats du diagramme des interactions pour la résistance à la compression .

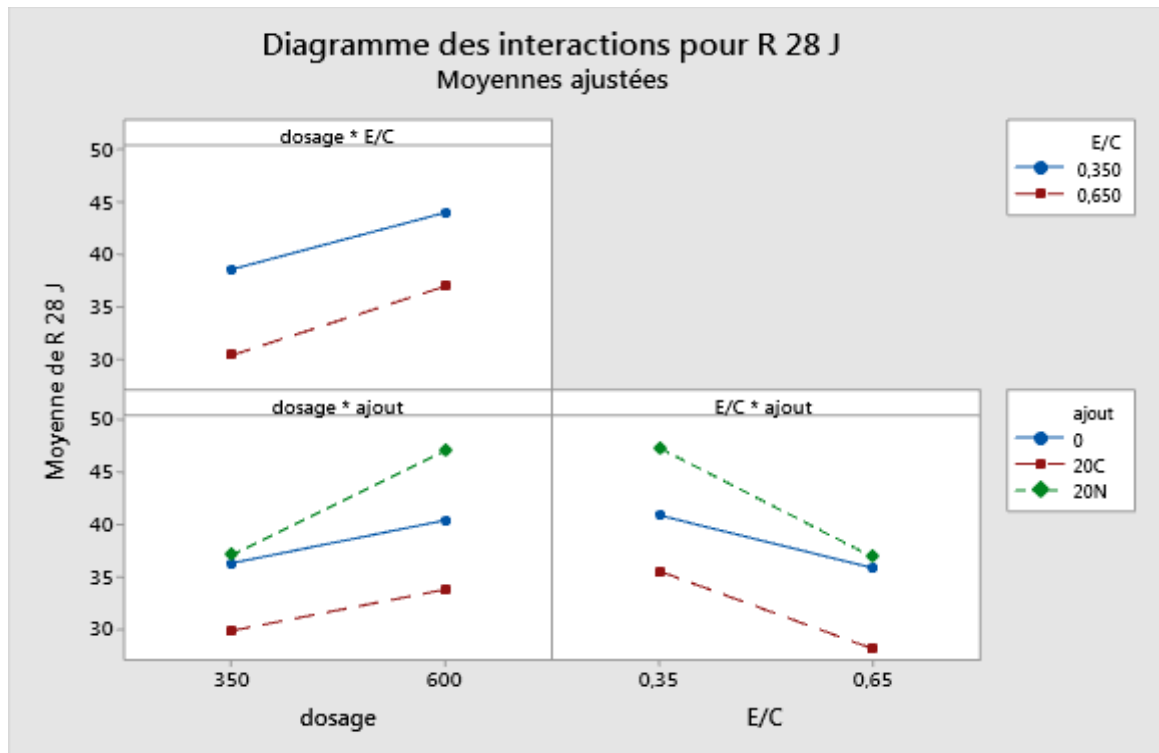


Figure IV.9 diagramme des interactions pour la résistance à la compression.

- 1- Un dosage de ciment 600kg/m^3 et un pourcentage de 20% d'ajout non calciné produit un béton résistant.
- 2- Un dosage de ciment 600kg/m^3 et un pourcentage de 20% d'ajout calciné produit un béton de faible résistance.
- 2- Un dosage de 350kg/m^3 avec ou sans l'introduction de l'ajout produit un béton de faible résistance.
- 3- Un faible rapport E/C 0.35 avec un pourcentage de 20% d'ajout non calciné produit un béton résistant..
- 4- Un rapport E/C 0.65 avec 20% d'ajout non calciné produit un béton avec une résistance modéré.
- 5- un rapport E/C 0.65 avec 20% d'ajout calciné ou sans ajout produit un béton de faible résistance

6- un rapport E/C 0.35 avec un dosage de ciment 350kg/m³ et 600 kg/m³ produit un béton de bonne résistance

7- un rapport E/C 0.65 avec un dosage de ciment 350kg/m³ ou 600kg/m³ produit un béton de faible résistance

- Modélisation par une équation mathématique.

Equation de régression

$$\begin{aligned} R_{28J} = & 37,53 - 3,000 \text{ dosage}_{350} + 3,000 \text{ dosage}_{600} + 3,788 E/C_{0,35} - 3,788 E/C_{0,65} \\ & + 0,9267 \text{ ajout}_0 - 5,568 \text{ ajout}_{20C} + 4,642 \text{ ajout}_{20N} + 0,2933 \text{ dosage} * E/C_{350} 0,35 - \\ & 0,2933 \text{ dosage} * E/C_{350} 0,65 - 0,2933 \text{ dosage} * E/C_{600} 0,35 + 0,2933 \text{ dosage} * E/C_{600} \\ & 0,65 + 0,9550 \text{ dosage} * \text{ajout}_{350} 0 + 1,030 \text{ dosage} * \text{ajout}_{350} 20C - \\ & 1,985 \text{ dosage} * \text{ajout}_{350} 20N - 0,9550 \text{ dosage} * \text{ajout}_{600} 0 - 1,030 \text{ dosage} * \text{ajout}_{600} \\ & 20C + 1,985 \text{ dosage} * \text{ajout}_{600} 20N - 1,288 E/C * \text{ajout}_{0,35} 0 - 0,1033 E/C * \text{ajout}_{0,35} \\ & 20C + 1,392 E/C * \text{ajout}_{0,35} 20N + 1,288 E/C * \text{ajout}_{0,65} 0 + 0,1033 E/C * \text{ajout}_{0,65} 20C \\ & - 1,392 E/C * \text{ajout}_{0,65} 20N - 2,293 \text{ dosage} * E/C * \text{ajout}_{350} 0,35 0 \\ & + 1,462 \text{ dosage} * E/C * \text{ajout}_{350} 0,35 20C + 0,8317 \text{ dosage} * E/C * \text{ajout}_{350} 0,35 \\ & 20N + 2,293 \text{ dosage} * E/C * \text{ajout}_{350} 0,65 0 - 1,462 \text{ dosage} * E/C * \text{ajout}_{350} 0,65 20C - \\ & 0,8317 \text{ dosage} * E/C * \text{ajout}_{350} 0,65 20N + 2,293 \text{ dosage} * E/C * \text{ajout}_{600} 0,35 0 - \\ & 1,462 \text{ dosage} * E/C * \text{ajout}_{600} 0,35 20C - 0,8317 \text{ dosage} * E/C * \text{ajout}_{600} 0,35 20N - \\ & 2,293 \text{ dosage} * E/C * \text{ajout}_{600} 0,65 0 + 1,462 \text{ dosage} * E/C * \text{ajout}_{600} 0,65 \\ & 20C + 0,8317 \text{ dosage} * E/C * \text{ajout}_{600} 0,65 20N \end{aligned}$$

Conclusion

Générale

Conclusion générale

L'innovation de construction en béton s'évolue rapidement grâce à le développement de la technologie, qui a amélioré ses propriétés et surtout sa durabilité.

Les structures en béton doivent garder ces performances au cours du temps contre la détérioration de béton qui peut résulter à des facteurs internes comme : un faible dosage de ciment, rapport E/C élevé, l'utilisation des matériaux de mauvaise qualité, l'absence des adjuvants ... etc. Ou des facteurs externes comme : les agressions chimique, l'environnement, l'eau de mer ... etc.

La résistance ne suffit pas à indiquer la durabilité de béton, il y a des autres indicateurs qui assurer la durée de vie de certains structure comme la porosité, la perméabilité et surtout la diffusivité des ions chlorures

En Algérie, il y a un grand manque dans le domaine de contrôle technique de construction causé par l'absence de règlement et des normes locales .alors l'ingénieur dépend juste de mesurer la résistance mécanique.

Dans le cadre de ce travail qui nous a été proposé, on a abordé la problématique de l'élaboration et caractérisation de durabilité des bétons par l'étude de s propriétés de diffusion des chlorures dans le cas d'environnement chimique agressif .la pénétration des chlorures dans le béton nécessite à quantifier le transport des ions dans le matériaux ciment , on dépend des essais normalisées de transport diffuse .

Notre travail nous aprons une méthodologie et une procédure expérimentale pour formuler et contrôler un béton soumis ou non soumis à des agressions chimique aussi de contrôler l'efficacité des facteurs utilisées (le dosage de ciment, le rapport E/C, la présence et l'absence des adjuvants, la présence et l'absence d'ajout ainsi que le pourcentage et l'état calciné/ non calciné, l'influence de mode de cure) à l'étanchéité de béton et contre les agressions chimiques . on a abordé la caractérisation de durabilité des bétons par l'étude des propriétés de diffusion des ions chlorures et de porosité dans le cas de milieu normal et le cas d'un milieu agressif (acide N_2SO_4 à un $Ph = 1.7$).

Ce travail a été réaliser dans le laboratoire de développement des géo matériaux à l'université de Mohamed Boudiaf à Msila à l'aide de l'appareil de mesure de pénétration des ions chlorures dans le béton .l'expérience nécessite de la patience et beaucoup de précautions vu que les matières à manipuler dangereuse (le NAOH et l'acide), l'efficacité de cette méthode ainsi que celle de l'utilisation de la méthode du plan d'expérience en terme de diagramme et de conclusion.

Le travail principale dans notre recherche est la diffusivité des ions chlorures et nous avons ajouté l'essai de porosité et la résistance mécanique pour assurer et confirmer les résultats de l'influence de certains facteurs et d'arriver aux conclusions suivantes :

- ❖ La diffusivité diminue fortement lorsque le dosage de ciment augmente.
- ❖ Elle diminue fortement lorsqu'on diminue le rapport E/C en utilisant des adjuvants.
- ❖ Elle diminue fortement en ajoutant 20% de la poudre de marbre non calciné au lieu de la calcination et de son absence.
- ❖ Elle diminue en utilisant la cure dans l'eau potable au lieu de la cure à l'air.

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 appareillages scientifiques de recherche.
 - Savoir évaluer la durabilité du béton par l'essai de diffusivité des ions chlorures et l'essai de porosité accessible à l'eau pour n'importe quel type de béton.
 - Savoir formuler un béton durable avec une faible perméabilité
 - savoir identifier les facteurs influents l'étanchéité de béton.
 - Ce travail nous qualifie pour le travail sur le terrain et pour la vie professionnelle dans le domaine de contrôle des matériaux de génie civil.
-

Les références bibliographiques

- [1] .NDZANA AKONGO Grégoire, TCHOUMI Samuel, « Réhabilitation des ouvrages en béton armé dégradés par la corrosion des armatures », DIPET2 (Diplôme des Professeurs des lycées d'Enseignement Technique 2ème grade), Génie Civil, Option: Bâtiment et Travaux, Université de Douala (Ecole Normale Supérieure de l'Enseignement Technique) ENSET .
- [2]. Rames R.Frank and Michel Enzien "Microbially Influenced Corrosion Environmentally Acceptable Methods Control Pipeline Corrosion " USA , may 1997 .
- [3]. BULLETIN DES LABORATOIRES DES P ONTS E T C HAUSSÉE S - 225 - MARS-AVRIL 2000 - RÉF 4316 - PP. 41-50 .
- [4]. corrosion of hydrated cement based materials. Part 1. Mechanism of the phenomenon. Prague, Institute of Chemical Technology – Academy of Sciences othe Czech Republic, Ceramics-Silikaty, n° 44 (3), pp. 114-120, 2000.
- [5]. FEBELCEM - Fédération de l'Industrie Cimentière Belge rue Volta 8 - 1050 Bruxelles auteur. Ir C.Ployaert éditeur responsable : J.P. Jacobs dépôt légal : 0/2001/0280/15 Usé 1. Allahverdi A. et Skvara F.
- [6]. De Belie N. Betondegradatie in veestallen onder invloed van voederzuren. Simulatieproeven. S-Hertogenbosch, Vereniging Nederlandse Cementindustrie, Cement, vol. 47, n° 4, p. 52-59, 1995.
- [7]. Soufi, A. (2013). Etude de la durabilité des systèmes béton armé : mortiers de réparation en milieu marin (Doctoral dissertation, Université de La Rochelle).
- [8]. KAOUADJI, M. S. (2013). DEGRADATIONS AU NIVEAU DE L'USINE ALZINC CONSTATS ET RECOMMANDATIONS (Doctoral dissertation).
- [9] .TOUIL Brahim (Etude de la diffusion des chlorures dans les bétons locaux) Mémoire en vue de l'obtention du diplôme de magistère en génie civil option : matériau béton Faculté des sciences de l'ingénieur département de génie civil 2009
-

[10] .Touil, Brahim. ETUDE DE LA DURABILITE DES BETONS DANS UN ENVIRONNEMENT MARIN APPROCHE PERFORMANTIELLE ET PREDICTIVE BASEE SUR LES INDICATEURS DE DURABILITE. Diss. 2017

[11] .Technologie. LA CORROSION DES ARMATURES DES BÉTONS ARMÉS ET PRÉCONTRAINTS.2008

[12]. CEB Comité Euro-international du béton durable. concrete structures. Bulletin 182. Lausanne 1989

[13] .Gérard, O. Travail de fin d'études. Durabilité des hydrofuges de surface pour la protection des ouvrages historiques en béton armé. 2012-2013

[14] .Cement Concrete & Aggregates Australia Chloride Resistance of Concrete June 2009 ,[http:// www.ccaa.com.au](http://www.ccaa.com.au)

[15].<https://www.lafarge.dz/ciment-mokaouemtm>

[16].<https://dza.sika.com/fr/construction/systemes-d-etancheite/adjuvants-d-impermeabilisationpourbeton/hydrofuge-sika-liquide.html>

[17].<https://silex-dz.com/wp-content/uploads/2020/04/MEDAPLAST-SP-40.pdf>

[18].YAHIAOUI Idris. (2015). Les plans d'expériences Initiation à la construction et l'analyse des plans factoriels complets à deux niveaux et du plan composite centré. Université A. MIRA - Bejaia.

[19].Sandrine KARAM. (26/11/2004). Application de la méthodologie des plans d'expériences et de l'analyse de données à l'optimisation des processus de dépôt, Thèse de doctorat. UNIVERSITE DE LIMOGES
