

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique
Département Génie Civil



Mémoire de Master
en Génie Civil

Intitulé :

***Durabilité des bétons
à la poudre de verre :
Etude de la pénétrabilité
des ions chlorures***

Proposé et dirigé par
Pr. A. BALI

Présenté par
TAMAOUST Aissam

Soutenu le (16/06/2015) devant le jury composé de

Présidente :	Pr. R. KETTAB	Professeur à l'ENP
Encadreur :	Pr. A. BALI	Professeur à l'ENP
Examineurs :	Mme. A. CHIKH	M.A.A à l'ENP
	Dr. R. BOUTEMEUR	M.A.A à l'ENP
	M. A. ABDELGUERFI	M.A.A à l'ENP

Promotion 2015

ENP : 10, avenue Hacène Badi, El Harrache, Alger
Tel : 213 21 52 53 01/03 – Fax : 213 21 59 7973

Résumé :

Le recyclage du verre pour la fabrication de nouveaux verres n'est actuellement pas économiquement viable. Ceci explique la recherche d'autres débouchés que le stockage ou l'enfouissement en décharges. Vu sa composition riche en silice réactive et en ions d'alcalis, il peut être utilisé comme ajout cimentaire pour produire un béton durable. Le principal risque identifié en termes de durabilité des bétons armés en est lié à la pénétration des agents sévèrement agressifs parmi eux on cite les chlorures. Ce phénomène a pour conséquence la corrosion des armatures. Le sujet est largement étudié dans le monde car l'enjeu économique est très important. Ce travail de recherche consiste à étudier l'influence de la nature du liant (ciment ou ciment+poudre de verre), le taux d'incorporation de l'ajout et le rapport E/L sur la pénétrabilité des chlorures dans le béton. La réduction de la pénétration des ions chlorures sous l'effet du taux d'incorporation et la variation du rapport E/L a été aussi étudiée. Les résultats montrent que la poudre du verre lorsqu'elle est utilisée comme ajout cimentaire améliore significativement la résistance du béton à la pénétration des ions chlorures.

Mots clés : Durabilité, performance, béton, poudre de verre, pénétrabilité des chlorures, diffusion des ions chlorures, coefficient de diffusion.

الملخص:

إن رسكلة الزجاج لصناعة زجاج جديد غير ممكن حالياً من الناحية الاقتصادية. وهذا ما يفسر البحث عن وسائل استعمال أخرى غير التخزين أو الدفن في مدافن النفايات. نظراً لتركيبته الغنية بالسيليكات و شوارد القلويات، فإنه يمكن أن يستخدم كإضافات إسمنتية لإنتاج خرسانة دائمة. الخطر الرئيسي الذي يهدد متانة و استدامة الخرسانة المسلحة متصل بتغلغل العناصر العدائية الكيميائية نذكر منها الكلوريدات. و تؤدي إلى تآكل حديد التسليح. يتم دراسة الموضوع على نطاق واسع في العالم لما له من منافع اقتصادية. يتم في هذا البحث دراسة تأثير طبيعة الرابط (الاسمنت أو الاسمنت + مسحوق الزجاج) ومعدل إدماج مسحوق الزجاج بالإضافة إلى المعامل (ماء/رابط) على اختراق الخرسانة من طرف الكلوريد. أظهرت النتائج أن مسحوق الزجاج عندما يستخدم كإضافة إسمنتية يحسن بطريقة هائلة من مقاومة الخرسانة لاختراق أيونات الكلوريد.

كلمات البحث: المتانة والأداء، الخرسانة، مسحوق الزجاج، اختراق الكلوريدات، وانتشار الكلوريدات، معامل انتشار الكلوريدات.

Abstract :

The glass recycling for the fabrication of new glass is not currently economic. This explains the search for outlets other than the storage or burial in landfills. Thanks to its rich reactive silica and alkali ion composition, it can be used as cement additive to produce a durable concrete. The main risk identified in terms of durability of reinforced concrete is related to the penetration of aggressive agents among them we mention the chlorides. This phenomenon has as result the steel reinforcement's corrosion. The topic is widely studied in the world because the economic issue is very important. This research is to study the influence of the nature of the binder (cement or cement + glass powder), the incorporation's rate of addition and the E/L on the penetration of chloride into the concrete. Reducing the penetration of chloride ions under the effect of the incorporation rate and the variation of the E / L ratio was also studied. The results show that the powder of glass when used as a cement addition significantly improves significantly the resistance of concrete to the penetration of chloride ions.

Keywords: Durability, performance, concrete, glass powder, chloride's penetrability, chloride's diffusion, diffusion's coefficient.

Remerciement:

Tout d'abord je tiens à remercier Dieu tout puissant de m'avoir donné le courage, la force et la patience d'achever ce modeste travail.

Je tiens à remercier particulièrement mon encadreur monsieur Abderrahim BALI professeur à l'ENP, pour l'honneur qu'il m'a fait d'encadrer ce travail, pour ses grandes qualités pédagogiques, pour sa rigueur scientifique, pour l'aide précieuse et l'intérêt constant qu'il a bien voulu montrer pour mener à bien ce travail.

Je remercie monsieur Malek OULD-HAMOU, chef de département du génie minier de nous avoir accueillis et permis de réaliser une partie de notre travail dans le laboratoire génie minier, ainsi qu'à monsieur Mustapha et madame pour leur assistance au laboratoire.

Je tiens à remercier tous mes enseignants qui ont contribué à ma formation et d'une façon distinguée Pr. Ratiba KETTAB pour son aide et ses conseils très précieux.

Je ne saurai tourner cette page sans adresser mes affectueux remerciements à tous mes amis qui m'ont aidé de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.



Dédicaces

J'ai le grand plaisir de dédier ce modeste travail à :

- ✚ Mon Père et ma Mère qui ont beaucoup sacrifiés à mon bonheur.
- ✚ Mes deux frères Ramzi et Abd-Erahim.
- ✚ Ma sœur Loubna.
- ✚ Toute la famille TAMAOUST.
- ✚ Tous mes amis de prêt ou de loin.
- ✚ à mon binôme Mekki à qui je souhaite tout le succès et le bonheur inchalah

Je termine par une dédicace très spéciale à toute ma promo

GC 2015, ainsi que tous mes amis à l'ENP



Aissam TAMAOUST

Table des matières

Introduction générale	1
Chapitre 1 :La durabilité des bétons avec ajouts cimentaires	3
1.1. Introduction	3
1.2. Propriétés de transport des bétons	3
1.2.1. La porosité.....	3
1.2.2. La perméabilité.....	4
1.3. Phénomènes influents sur la durabilité.....	7
1.3.1. Mécanismes de corrosion des armatures en acier dans le béton	7
1.3.2. Carbonatation	8
1.3.3. Action des eaux agressives.....	9
1.3.4. Action des chlorures	10
1.3.5. Les attaques sulfatiques.....	10
1.3.6. les réactions alcalis granulats(RAG)	12
1.4. L'effet des ajouts cimentaires sur la durabilité	13
1.4.1. La fumée de silice	13
1.4.2. La cendre volante	13
1.4.3. Le laitier	13
1.4.4. La poudre de verre.....	14
1.5. Conclusion.....	14
Chapitre 2 : La pénétrabilité des ions chlorures	15
2.1. Introduction	15
2.2. Définition de l'attaque par les ions chlorures	15
2.3. Source de l'attaque des ions chlores	15
2.4. Mécanisme d'attaque des ions chlores.....	16
2.4.1. Mécanisme d'attaque du Chlorure de sodium	16
2.4.2. Mécanisme d'attaque du Chlorure de magnésium.....	16
2.4.3. l'effet des ions chlorures sur les armatures	17
2.5. Les essais de pénétration des ions de chlores	17
2.5.1. Essai de migration en régime permanent	17
2.5.2. Essai de migration en régime transitoire	18

2.6. Teneur critique en ions chlorures	19
2.7. Facteurs influant sur la pénétration des chlorures	19
2.7.1. Le rapport E/C	19
2.7.2. La nature du ciment	20
2.7.3. La teneur en eau	21
2.7.4. Le flux de liquide	21
2.7.5. La teneur en chlorure	22
2.8. Les mécanismes de transport des ions chlorures dans le béton.....	22
2.8.1. La diffusion	23
2.9. Effet des ajouts sur la pénétrabilité des ions chlorures	23
2.10. L'effet de la poudre de verre sur la pénétrabilité des ions chlorures	24
2.11. Conclusion	24
Chapitre 3 : Objectif et méthodologie du travail pratique.....	25
3.1. Introduction	25
3.2. La poudre de verre.....	25
3.2.1. Description	25
3.2.2. Dosage	26
3.2.3. Mode d'emploi	26
3.3. L'essai de Pénétrabilité des ions chlorures accélérée (RCPT).....	26
Chapitre 4 : Présentation et interprétation des résultats	28
4.1. Introduction	28
4.2. Résultats des essais de pénétrabilité des ions chlorures accélérée (RCPT)	28
4.3. Observations et interprétations des résultats de la pénétrabilité des ions chlorures en fonction du rapport E/L	30
4.4. La réduction de la pénétrabilité des ions chlorure suivant le rapport E/L.....	31
4.5. Observations et interprétations de la réduction de la pénétrabilité des ions chlorures en fonction du rapport E/L	33
4.6. Conclusion.....	34
Conclusion Générale	35
Recommandations et perspectives	36
Références Bibliographiques.....	37
Annexe	40

Liste des figures

Figure 1-1 : Illustration de la différence entre la porosité et la perméabilité	5
Figure 1-2 : facteurs intervenant sur l'apparition des 3 conditions nécessaires	12
Figure 2- 1 : l'effet des ions chlorures sur les armatures : Modèle de PAGE	17
Figure 2- 2 : Cellule de migration en régime permanent.	18
Figure 2- 3 : Relation entre le coefficient de perméabilité à l'eau des pâtes de ciment totalement hydratées et le rapport E/C	20
Figure 2- 4 : Isotherme de fixation du chlore sur deux mortiers.....	20
Figure 2- 5 : Profil en chlorure total après imbibition de 48 heures sur matériaux secs par des solutions saines à 20 g/l en NaCl.....	20
Figure 3-1 : La poudre de verre.....	25
Figure 3-2 : L'essai de pénétrabilité des ions chlorures accélérée (RCPT)	27
Figure 4-1 : Histogrammes de la variation de la charge du courant dans différents milieux de conservation des différents types de béton en fonction de E/L à T=28J.....	29
Figure 4-2 : Histogrammes de la variation de la charge du courant dans différents milieux de conservation des différents types de béton en fonction de E/L à T=56J.....	29
Figure 4-3 : Histogrammes de la variation de la charge du courant dans différents milieux de conservation des différents types de béton en fonction de E/L à T=91J.....	29
Figure 4-4 : histogrammes de la réduction de la charge du courant à différents âges en fonction de E/L [a) béton contenant 20% de poudre de verre b) béton contenant 30% de poudre de verre]	32
Figure 4-5 : Courbes de la réduction de la charge du courant à différents âges en fonction de E/L [a) béton contenant 20% de poudre de verre b) béton contenant 30% de poudre de verre]	32

Liste des tableaux

Tableau 2-1 : La composition chimique des ciments de l'étude menée par FRANCY.	21
Tableau 3-1: Les caractéristiques Techniques de la poudre de verre.....	25
Tableau 3-2 : La composition chimique de la poudre de verre en %	26
Tableau 3-3 : Pénétration des ions chlore basée sur la charge passante	27

Introduction

générale

Introduction générale :

Bâtir a toujours été l'un des premiers soucis de l'homme et l'une de ses occupations majeures. A ce jour, la construction connaît un grand essor dans la plus part des pays, et très nombreux sont les professionnels qui se livrent à cette activité.

Cependant, si le métier de construire a une grande importance pour l'homme, la durabilité des ouvrages constitue l'une de ses préoccupations essentielles dans la conception, la réalisation ou l'entretien des ouvrages de génie civil ; car les ouvrages en béton sont conçus et construits pour durer.

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

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

Traditionnellement l'aptitude d'un béton à résister à la dégradation - c'est-à-dire sa stabilité était de l'apprécier par sa résistance à la compression. La perméabilité et la diffusivité permettent de caractériser l'aptitude des bétons à résister à l'intrusion des agents agressifs.

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

Les altérations observées sont d'ordre chimique ou physique. Les agents chimiquement agressifs peuvent être classés en quatre catégories. (1)

- Les gaz, d'origine naturelle où résultent de pollutions atmosphérique ;
- Les liquides inorganiques ou organiques qui, indépendamment de leurs éventuels effets purement physiques, agissent surtout par leur caractère acide ou basique, et par les ions agressifs qu'ils peuvent contenir ;
- Les solides essentiellement des sols et déchets d'origines diverses ;
- Les milieux biologiques, fermentations bactériennes aérobies ou anaérobies.

L'agression chimique entraîne presque toujours la dissolution de la chaux contenue dans la pâte de ciment, mais l'attaque des silicates et aluminates de chaux hydratées ne sont pas négligeables. Si les produits de réactions sont solubles, la matrice devient de plus en plus

Introduction générale

ouverte, la perméabilité augmente et la résistance de surface chimique diminue progressivement.

Au contraire, si les produits de réactions sont insolubles, deux cas peuvent se présenter suivant que la nouvelle phase est ou non expansive. Si les nouveaux cristaux ne sont pas ou sont très faiblement expansifs, ils comblent progressivement la porosité des bétons et ainsi diminuent la perméabilité et augmentent la durabilité.

Lorsque la nouvelle formation est expansive, elle induit des pressions plus élevées que la résistance à la rupture.

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

Nous allons essayer de présenter une étude sur la durabilité des bétons avec poudre de verre vis-à-vis de la pénétrabilité des ions chlorures dans ce mémoire qui comprend quatre chapitres :

Le premier chapitre est consacré à l'étude bibliographique dans lequel il est mentionné les principaux Phénomènes influents sur la durabilité des bétons avec ajouts cimentaires.

Le deuxième chapitre porte sur l'apport des ajouts cimentaires à la résistance vis-à-vis de la pénétrabilité des ions chlorures.

Le troisième chapitre traitera la partie expérimentale avec toutes les caractéristiques physico-chimiques des matériaux entrant dans la composition des bétons élaborés pour réaliser l'étude sur l'effet de la poudre de verre sur la pénétrabilité des ions chlorures.

Le dernier chapitre est consacré à la présentation des résultats obtenus avec une discussion et une interprétation détaillée.

Une conclusion générale rappelant les principaux résultats obtenus et des recommandations et perspectives pour des potentielles études à venir est donnée à la fin de ce travail.

Chapitre 1

La durabilité des bétons avec ajouts cimentaires

1.1. Introduction

La durabilité d'un ouvrage caractérise sa capacité à conserver les fonctions d'usage, pour lesquelles il a été conçu (fonctionnement structurel, sécurité, confort des usagers), et à maintenir son niveau de fiabilité et son aspect esthétique dans son environnement, avec des frais de maintenance et d'entretien aussi réduits que possible (sous réserve de la mise en œuvre d'une maintenance préventive programmée).(1)

La durabilité du maintien de ses fonctions doit être assortie d'une durée, temps minimal et raisonnable pour lequel l'ouvrage est conçu, qui est appelé la durée de service de l'ouvrage (ou durée d'utilisation de projet). La prise en compte de cette durabilité permet de valider et de justifier la rentabilité de l'investissement.

La durabilité directement liée à l'environnement immédiat ou futur des ouvrages et partie d'ouvrage est aujourd'hui le paramètre important à considérer pour optimiser la résistance des bétons aux influents externes

Le béton est un matériau poreux. En d'autres termes, il comporte des pores ou vides. Ces pores sont déterminants pour la résistance et la durabilité du béton. En effet, une faible porosité constitue le meilleur moyen de défense des bétons contre tous les agents agressifs.

1.2. Propriétés de transport des bétons

1.2.1. La porosité

1.2.1.1. Généralités

La porosité est la conséquence naturelle de la quantité d'eau mise en plus de celle nécessaire à l'hydratation et des vides éventuels présents dans les granulats. L'influence de cette porosité est visible sur deux propriétés : la résistance mécanique et la durabilité du béton. La quantité d'eau pouvant être liée chimiquement par un ciment Portland est d'environ 25 % de la masse de ciment. En outre, une quantité d'eau, environ égale à 15 % de la masse de ciment, est liée physiquement. Cette eau est absorbée à la surface des produits d'hydratation ou constitue un film d'eau mono moléculaire entre les produits de cristallisation plats. L'eau liée physiquement s'évapore complètement dans une étuve à 105 °C, mais, malgré cette liaison libre, elle est incapable de réagir avec le ciment non encore lié. De plus, les produits d'hydratation occupent un volume absolu inférieur à la somme des volumes

Chapitre 1 : La durabilité des bétons avec ajouts cimentaires

absolus de l'eau et du ciment qui ont déjà réagi. De l'espace s'est donc libéré : ce sont les pores capillaires. Ceux-ci sont vides ou remplis d'eau. En effet, pour une bonne ouvrabilité du béton, le facteur E/L du béton est généralement supérieur à 0,40. Une partie de l'eau n'est donc pas liée chimiquement ni physiquement et s'installe dans les pores capillaires (eau interstitielle), d'où elle peut éventuellement s'évaporer ultérieurement. Cette formation de pores capillaires signifie un affaiblissement mécanique du béton. Etant donné que des substances agressives peuvent s'infiltrer aisément dans le béton via ce réseau capillaire, la durabilité s'en trouve influencée de manière négative(2).

1.2.1.2. La porosité et le rapport E/L

La réduction du rapport E/L permet non seulement de diminuer le volume total des pores capillaires mais elle permet aussi de réduire leur diamètre. Pour un E/L plus faible la porosité capillaire est en fait constituée d'un réseau de pores plus fin et plus discontinu.

En réduisant le rapport E/C de 0,45 à 0,25, le volume total de la porosité (cumulative porosity) passe de 40% à moins de 20% et, en même temps, le diamètre moyen des plus gros pores est diminué par un facteur 10. (3)

1.2.2. La perméabilité

1.2.2.1. Généralités

La perméabilité d'un matériau se définit comme son aptitude à se laisser traverser par un fluide (eau ou gaz par exemple) sous l'effet d'un gradient de pression. Elle s'exprime au moyen de la relation de DARCY qui est valide en régime d'écoulement laminaire.

$$Q = -K \cdot \frac{A}{\mu} \cdot \frac{dP}{dZ}$$

Avec :

- Q = débit volumique du fluide de viscosité μ
- K = perméabilité du milieu (m^2)
- A = aire apparente du matériau
- $\frac{dP}{dZ}$ = gradient de pression

Chapitre 1 : La durabilité des bétons avec ajouts cimentaires

La perméabilité K est une caractéristique intrinsèque du matériau dans la mesure où certaines conditions sont satisfaites. Elle s'exprime en m^2 . L'écoulement doit se faire dans des conditions données (température et caractéristiques constantes du matériau en fonction du temps) et il ne doit pas y avoir d'interactions physiques et chimiques entre le fluide et le matériau (c'est rarement vrai dans le cas du béton).

La perméabilité K peut être utilisée pour estimer l'aptitude du matériau à se laisser traverser par un fluide. Plus la valeur de K est élevée, plus le matériau est perméable et, inversement, plus la valeur de K est faible, plus le matériau est imperméable.

Dans le cas du béton, on peut mesurer expérimentalement la valeur K en utilisant des appareils spécialement conçus à cet effet. En pratique, la perméabilité K peut être utilisée pour caractériser la perméabilité à l'eau et au gaz du béton. (4)

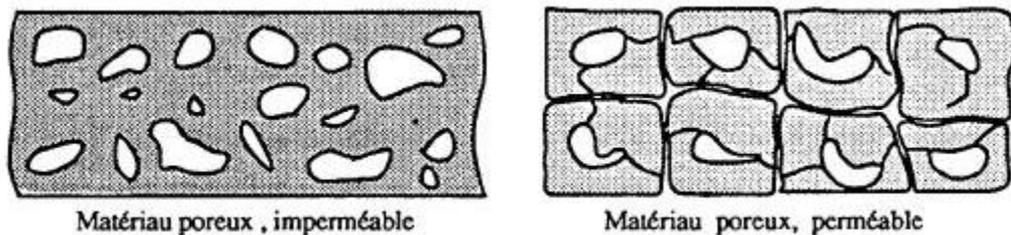


Figure 1-1 Illustration de la différence entre la porosité et la perméabilité (4)

1.2.2.2. La perméabilité au gaz du béton (air ou O_2)

1.2.2.2.1. Définition

Pour certaines applications, la perméabilité au gaz du béton peut être considérée comme une propriété importante. Par exemple, elle constitue une propriété cruciale dans le cas des réservoirs de gaz naturel ou des enceintes de confinement des centrales nucléaires. On utilise aussi la perméabilité au gaz pour caractériser la perméabilité des matériaux réactifs avec l'eau (béton) ou très faiblement perméables (béton à hautes performances).

1.2.2.2.2. Paramètres influençant la perméabilité à l'air

a-Le rapport E/L

Le rapport E/L, en raison de son influence sur la structure du réseau de pores capillaires, exerce une grande influence sur la perméabilité à l'air. Quelle que soit la composition du béton (rapport E/L, fumée de silice, cendres volantes), la résistance à la compression semble un bon indicateur du niveau de perméabilité à l'air. (5)

Chapitre 1 : La durabilité des bétons avec ajouts cimentaires

b-Les ajouts minéraux (fumée de silice et cendres volantes)

Les fumées de silice, utilisées en remplacement du ciment permettent généralement de diminuer la perméabilité à l'air du béton. Cet effet peu s'expliquer par le raffinement et la segmentation de la porosité capillaire engendrés par l'hydratation des sphères de fumée de silice.

Le taux de remplacement optimal se situe aux environs de 10%. Pour des taux de remplacement plus élevés, l'effet sur la perméabilité devient très faible. (6)

Les cendres volantes utilisées en remplacement du ciment peuvent influencer la perméabilité à l'air du béton. On doit s'attendre à obtenir des effets très variables en fonction du type de cendres (type C ou type F).

Les cendres volantes diminuent la perméabilité à l'air si le taux de remplacement du ciment est compris entre 10% ou 20%. Pour des taux de remplacement plus élevés (30% et 50%), les cendres volantes ont plutôt pour effet d'augmenter la perméabilité à l'air. (6)

1.2.2.3. La perméabilité à l'eau du béton

1.2.2.3.1. Définition(7)

Lorsque le fluide s'écoule à travers le béton sous l'effet d'un gradient de pression et de l'eau, on utilise généralement le coefficient de perméabilité que l'on désigne par K_w . Il est défini par:

$$K_w = K \cdot \frac{w_e}{\mu_e}$$

avec

- w_e = poids volumique de l'eau (à 20 °C = $104 \frac{N}{m^3}$)
- μ_e = viscosité de l'eau (à 20 °C = $10^{-3} \frac{N \cdot s}{m^2}$)
- K = Perméabilité du matériau (équation de DARCY)
- K_w = Coefficient de perméabilité à l'eau (m/s)

1.2.2.3.2. Paramètres d'influence

a-Le rapport E/L

Le rapport E/L exerce une très grande influence sur la perméabilité à l'eau de la pâte de ciment hydraté. Plus le rapport E/L est faible, plus la perméabilité de la pâte diminue. La chute est très rapide entre 0,7 et 0,6 puisque c'est dans cette plage que le réseau de pores capillaires devient discontinu.

Chapitre 1 : La durabilité des bétons avec ajouts cimentaires

Comme pour la perméabilité à l'air, il existe un lien entre la perméabilité à l'eau et la résistance à la compression du béton (béton avec ou sans ajout et des rapports E/L compris entre 0.25 et 0.45). Pour les rapports E/C les plus faibles (<0,30), la perméabilité atteint des valeurs très faibles (< 5 x 10⁻¹⁴ m/s). En pratique, on peut considérer que ces bétons sont imperméables à l'eau.

Il existe une relation très nette entre la perméabilité à l'eau et la résistance à la compression. La perméabilité à l'eau diminue rapidement avec l'augmentation de la résistance. Cependant, pour des résistances supérieures à 55 MPa, la perméabilité évolue très peu et atteint un niveau très faible. (8)

b-Les ajouts minéraux (fumée de silice et cendres volantes)

La fumée de silice permet de réduire considérablement la perméabilité à l'eau du béton. Cet effet s'explique, une fois de plus, par le fractionnement de la porosité capillaire. Le remplacement de 10% du ciment par de la fumée de silice rend pratiquement imperméable à l'eau un béton fabriqué avec un rapport E/L de 0,45.(9)

Les CV n'ont pas toujours un effet positif sur la perméabilité à l'eau du béton.

Après 28 jours de mûrissement, les CV (20% à 30%) provoquent généralement une augmentation de la perméabilité à l'eau (par rapport à un béton de référence). Cependant, à plus long terme (quelques mois), la perméabilité des bétons avec CV devient généralement plus faible que celle du béton de référence.

Il faut s'attendre à ce que l'efficacité des CV soit très variable en fonction du taux de remplacement, de l'origine et du type de cendres.(7)

1.3. Phénomènes influents sur la durabilité

1.3.1. Mécanismes de corrosion des armatures en acier dans le béton (10)

Dans des conditions normales, les armatures enrobées d'un béton compact et non fissuré sont protégées naturellement des risques de corrosion par un phénomène de passivation qui résulte de la création, à la surface de l'acier, d'une pellicule protectrice de $Fe_2O_3 \cdot CaO$ (dite de passivation).

Cette pellicule est formée par l'action de la chaux libérée et par les silicates de calcium sur l'oxyde de fer. La présence de chaux maintient la basicité du milieu entourant les armatures (l'hydratation du ciment produit une solution interstitielle basique de pH élevé de l'ordre de 12 à 13). Les armatures sont protégées tant qu'elles se trouvent dans un milieu présentant un pH compris entre 9 et 13,5.

Chapitre 1 : La durabilité des bétons avec ajouts cimentaires

Deux principaux phénomènes peuvent dans certaines conditions détruire cette protection et initier la corrosion des armatures en acier :

- la carbonatation du béton d'enrobage par l'adsorption du gaz carbonique contenu dans l'atmosphère;
- la pénétration des ions chlorures, jusqu'au niveau des armatures.

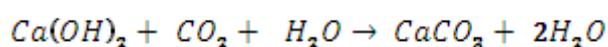
La plus ou moins grande rapidité d'action de ces divers phénomènes est fonction de l'humidité ambiante, de la porosité du béton et de la présence de fissures qui favorisent la diffusion des gaz ou des liquides agressifs. Le diagnostic des ouvrages affectés par une détérioration du béton d'enrobage recouvrant les armatures révèle que les dommages sont dus, dans la grande majorité des cas, à une épaisseur d'enrobage trop mince et/ou à un béton d'enrobage trop poreux et pas assez résistant.

Effets de la corrosion(11)

Le développement de la corrosion des armatures peut provoquer par gonflement une poussée sur le béton d'enrobage (les oxydes de fer étant plus volumineux que l'acier, ils génèrent des contraintes internes dans le béton qui peuvent être supérieures à sa résistance en traction) et donc une altération de l'aspect extérieur de l'ouvrage (éclatements localisés, formations de fissures, formations d'épaufrures, apparitions en surface de traces de rouille et éventuellement mise à nu des armatures) entraînant une réduction de la section efficace de l'armature et de son adhérence au béton.

1.3.2. Carbonatation (11)

La carbonatation du béton par le gaz carbonique de l'air (CO_2) est un phénomène naturel qui n'est pas nocif pour le béton. Au cours de la prise et du durcissement, les ciments se combinent avec l'eau pour former des produits hydratés de caractère basique. Certains de ces produits [KOH , $NaOH$ et $Ca(OH)_2$] restent dissous dans la solution aqueuse interstitielle du béton (dont le pH est compris entre 12 et 13). Le gaz carbonique contenu dans l'air a tendance à se combiner avec les produits hydratés, en commençant par les bases alcalines dissoutes dans la solution aqueuse interstitielle, en particulier le $Ca(OH)_2$, selon une réaction produisant du carbonate de calcium $CaCO_3$:



Chapitre 1 : La durabilité des bétons avec ajouts cimentaires

Le milieu basique (pH 12 à 13) se trouve progressivement modifié par la neutralisation de l'alcalinité du ciment pour atteindre un pH de l'ordre de 9, n'assurant plus la protection des armatures et entraînant une dépassivation de l'acier (destruction de la couche de passivation), ce qui développe une réaction d'oxydation à la surface des armatures.

La progression de la carbonatation se fait de l'extérieur de l'ouvrage, en contact avec l'air ambiant, vers l'intérieur. Dans un premier temps, la vitesse de propagation est ralentie par la formation des carbonates qui colmatent partiellement la porosité. Elle diminue donc avec la profondeur atteinte.

Dans un second temps, la carbonatation a pour conséquence une neutralisation (chute du pH de la solution interstitielle) du milieu de protection des armatures, qui peuvent alors s'oxyder. La cinétique du processus dépend de la teneur en dioxyde de carbone et de la facilité avec laquelle le gaz carbonique pénètre dans les pores du béton. Plus le béton est compact, le dosage en ciment élevé, le rapport eau/ciment faible et la résistance du béton élevée, plus la progression du front de carbonatation est lente. Tout ce qui conduit à diminuer la porosité du béton retarde l'échéance de dépassivation des armatures.

L'humidité relative de l'air joue, en particulier, un rôle important : la vitesse de carbonatation est maximale pour une humidité relative de l'ordre de 60 %, pratiquement nulle en atmosphère sèche ou pour des bétons complètement saturés en eau.

Une cure prolongée permet d'augmenter la résistance du béton à la pénétration du dioxyde de carbone en améliorant les propriétés de surface du béton. Action des eaux agressives

1.3.3. Action des eaux agressives (11)

Un ouvrage peut être soumis à de multiples agressions engendrées par l'action des sels ou des gaz en solution dans l'eau (eaux souterraines, eaux de mer, pluie, etc.). Les eaux peuvent être chargées en sels minéraux les plus divers en fonction des sols traversés. Les milieux les plus agressifs sont soit acides, soit salins (chlorures, nitrates, et surtout sulfates de sodium, de calcium ou de magnésium).

L'agressivité des milieux dans lesquels peuvent se trouver les ouvrages en béton est liée à la présence d'eau et à l'aptitude de celle-ci à réagir avec certains minéraux de la matrice cimentaire du béton.

En effet, les agents agressifs dissous dans l'eau constituent une solution chimiquement agressive pour le béton qui peut provoquer plusieurs types de phénomènes lorsque la formulation du béton n'est pas optimisée.

1.3.4. Action des chlorures (10)

L'action des chlorures est spécifique à certains environnements dans lesquels peut se trouver le béton comme les ouvrages soumis aux sels de déverglaçage ou situés en site maritime (zone de marnage, surfaces soumises aux embruns). Les ions chlorures peuvent pénétrer par diffusion ou migrer par capillarité à l'intérieur du béton, franchir la zone d'enrobage, atteindre les armatures, et provoquer des corrosions (par mécanisme de dissolution du métal suivant une réaction d'oxydoréduction: **Métal(M) → ions métal M^{n+} + n électrons**) d'abord ponctuelle (corrosion par piqûres) puis généralisée à toute la surface de l'acier. La vitesse de pénétration des chlorures dépend aussi de la porosité du béton. Elle décroît lorsque le rapport eau/liant diminue.

La corrosion s'amorce dès que la teneur en chlorures au niveau des armatures atteint un certain seuil de dépassivation. Ce seuil est fonction du pH de la solution interstitielle et de la teneur en oxygène au niveau des armatures ; il est de l'ordre de 0,4 à 0,5 % par rapport au poids du ciment. Il est atteint plus rapidement si le béton est carbonaté

1.3.5. Les attaques sulfatiques

1.3.5.1. Généralités

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

L'attaque sulfatique est accompagnée d'une précipitation de produits sulfatés dits «secondaires» dont la formation est postérieure à l'hydratation du ciment, d'une expansion importante et de détériorations chimico-mécaniques (modification des propriétés de transport et de la porosité, fissures, pertes de résistance et de cohésion). Ceci conduit à la ruine du matériau cimentaire, à plus ou moins long terme en fonction de l'attaque (nature, teneur et concentration des sulfates au contact) et du ciment utilisé.(11)

On distingue deux types d'attaques : les attaques par les sulfates externes présents dans l'environnement du béton et les attaques sulfatiques internes pour lesquelles les sulfates proviennent des composants du béton lui-même. (11)

-Lorsqu'il s'agit d'une attaque par les sulfates provenant de l'extérieur, il y a formation de couches de gypse et d'ettringite secondaire ainsi que la thaumasite($Ca_3Si(OH)_6(CO_3)(SO_4)$)à

Chapitre 1 : La durabilité des bétons avec ajouts cimentaires

partir de la surface exposée aux sulfates. L'attaque par les sulfates externes est souvent combinée avec l'attaque par le cation correspondant, selon la provenance des sulfates, qui peuvent réagir avec certains granulats ou fillers, ou avec les C-S-H ou la portlandite, et contribuer d'avantage à la dégradation du béton. De plus, l'attaque par les sulfates externes peut être combinée à une attaque par l'acide ce qui accélère également la destruction de la pâte hydratée.

-Lorsqu'il s'agit d'une attaque interne par les sulfates, ces derniers proviennent presque uniquement des sulfates de calcium qui se trouvent dans le béton dès sa confection. Par conséquent, ces sulfates sont uniformément répartis dans la pâte hydratée et le seul produit expansif de la réaction est l'ettringite. L'ettringite secondaire qui est le résultat d'une attaque par les sulfates externes, n'est pas seule à endommager le béton, c'est plutôt la formation du gypse qui contribue à la fissuration, la lixiviation et le délaminage des couches superficielles.(12)

Les aluminates et la portlandite sont les deux produits les plus sensibles à l'attaque par les sulfates.

1.3.5.2. Facteurs contrôlant la résistance aux sulfates du béton :

Suite aux études effectuées, à travers le monde, sur l'influence de l'attaque sulfatique sur les matériaux cimentaires, il a été conclu que :

- La résistance aux sulfates augmente avec la teneur en ciment.(13).
- Les bétons avec un dosage en ciment plus élevé sont généralement plus compacts et ont une perméabilité plus faible.
- Le taux de dégradation est proportionnel à la quantité de C_3A du ciment.
- Un béton poreux (faible dosage en ciment) peut être vulnérable mais si la teneur en C_3A du ciment est faible.
- Les ajouts minéraux (particulièrement les laitiers) permettent généralement d'augmenter la résistance aux sulfates.

1.3.6. les réactions alcalis granulats(RAG)

1.3.6.1. Définition

La réaction alcalis-granulats est un mécanisme d'endommagement affectant sur le long terme la durabilité des ouvrages en béton. Elle correspond à des réactions chimiques entre les hydroxydes alcalins (Na^+ , K^+ , OH^-) de la solution interstitielle du béton et certaines phases minérales présentes au sein des granulats.(1)

Les désordres apparaissent après quelques dizaines d'années sous la forme de fissuration en réseaux caractéristiques. Les propriétés mécaniques peuvent se voir ainsi diminuer de 30–50 %. Ces désordres sont déclenchés par des granulats chimiquement instables au contact de la solution interstitielle alcaline du béton. Il résulte de cette attaque chimique du granulat, désigné ici comme alcali-réactif, la formation d'un gel expansif, lequel incorpore pour se former l'eau provenant de l'humidité du béton. On constate, ainsi macroscopiquement un gonflement du béton, et macroscopiquement une destruction de sa structure.

Trois conditions doivent être simultanément remplies pour qu'une réaction RAG se produise: un granulat réactif, des alcalis, un béton suffisamment humide. L'absence d'un seul de ces facteurs empêche le développement de la RAG.(14)

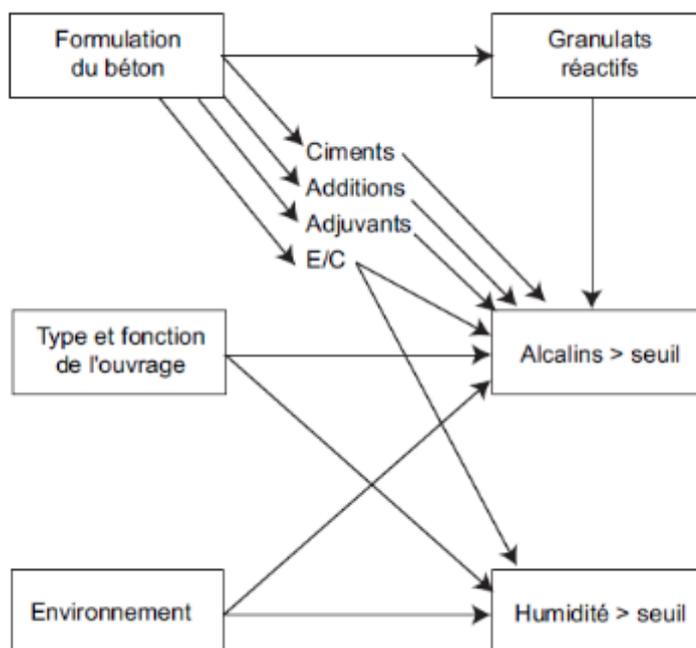


Figure 1-2 : Facteurs intervenant sur l'apparition des 3 conditions nécessaires. (15)

1.3.6.2. Source de cette attaque

Ces alcalins proviennent d'une part du ciment, et d'autre part, des autres constituants du béton (granulats, eau de gâchage, adjuvants,..). Initialement, ils sont présents à l'état diffus dans les phases anhydres, et ils se dissolvent à l'état basique (K^+OH^- , Na^+OH^-) lors de l'hydratation. (15)

1.4. L'effet des ajouts cimentaires sur la durabilité

1.4.1. La fumée de silice

La fumée de silice permet de réduire considérablement la perméabilité à l'eau du béton. Cet effet s'explique, une fois de plus, par le fractionnement de la porosité capillaire. Le remplacement de 10% du ciment par de la fumée de silice rend pratiquement imperméable à l'eau un béton fabriqué avec un rapport E/L de 0,45 .ce ci nous permet d'avoir un béton avec une bonne résistance aux cycles gel-dégel, aux pénétrabilité des ions chlorures et les attaque aux sulfates. (9)

1.4.2. La cendre volante

L'utilisation de la cendre volante n'a pas un grand effet sur la carbonation dans le béton mais elle réduit la pénétrabilité aux ions chlorures d'une manière significative. Les bétons avec cendres volantes procurent de bonnes résistances au gel même pour des taux de remplacement élevés.

1.4.3. Le laitier

Les bétons au laitier résistent à l'action des eaux agressives, surtout en immersion complète. Les études qui ont été faites, montrent que l'incorporation du laitier dans le béton améliore la résistance aux sulfates surtout pour les taux de remplacement élevés, grâce à :

- la réduction de la perméabilité ;
- la diminution de la chaux libre de la teneur en aluminat.

Il faut rajouter que le laitier à un effet bénéfique sur les réactions alcalis-silice, ces dernières décroissent avec l'augmentation de la teneur en laitier due à la fixation par ce dernier des ions sodium.

Chapitre 1 : La durabilité des bétons avec ajouts cimentaires

1.4.4. La poudre de verre

L'incorporation de la poudre de verre comme addition, réduit considérablement la pénétration des ions chlorure dans le béton, par un meilleur raffinement des pores dû à la formation des C-S-H secondaires. (16)

Les bétons avec addition de poudre de verre ont montré des propriétés performantes vis-à-vis de la durabilité, excepté par rapport à la carbonatation. Il est envisageable que l'oxyde de soude (Na_2O) contenu dans le verre se transforme en carbonate ou bicarbonate de soude par fixation du dioxyde de carbone.

1.5. Conclusion

La durabilité des ouvrages en béton est liée à plusieurs facteurs qui peuvent être internes ou externes.

Parmi les facteurs internes on cite la porosité et la perméabilité, ces deux facteurs sont inversement proportionnelle à la durabilité, c'est-à-dire : plus le béton présente une faible porosité et perméabilité, il pourra être considéré comme un matériau durable. L'influence des facteurs externes (les attaques sulfatiques et les attaques par des chlorures) dépend directement des facteurs internes.

Il faut souligner que l'incorporation des ajouts cimentaires dans le béton a un effet bénéfique sur la durabilité de ce dernier.

Dans la suite de ce travail on va se focaliser sur le phénomène de pénétrabilité des ions chlorures et l'influence des ajouts cimentaires en général et la poudre de verre en particulier sur la pénétrabilité des ions chlorures dans les bétons.

Chapitre 2
La pénétrabilité
des
ions chlorures

2.1. Introduction

Les ions chlorures présents dans le béton peuvent avoir été introduits par l'eau de gâchage ou par des agrégats contaminés, ou bien provenir du milieu environnant (atmosphère marine, sels de déverglaçage, produits chimiques). Les chlorures peuvent exister dans le béton sous les deux formes suivantes : (17)

- Les chlorures libres qui sont dissous dans la solution interstitielle ;
- Les chlorures piégés ou liés qui résultent de la réaction chimique avec les hydratés du ciment, ou combinés avec des agrégats, ou adsorbés physiquement sur les parois des pores de béton.

Les chlorures pénètrent dans le béton et arrivent au contact de l'acier et quand leur teneur atteint un seuil critique, ils attaquent l'acier, initialement passivé, en des points localisés. Dans ces points l'armature est dépassivée et correspondent aux zones anodiques où l'acier se dissout. Le reste de la surface qui est encore passivée correspond aux zones cathodiques. La surface des zones cathodiques étant bien plus importantes que celles des zones anodiques, la dissolution de l'acier croît en profondeur plutôt qu'en surface, formant ainsi des piqûres ou des cavernes. Le mécanisme de ce type de corrosion est complexe car la composition de la solution à l'intérieur de la piqûre est modifiée par rapport à celle de la solution interstitielle qui l'entoure.

2.2. Définition de l'attaque par les ions chlorures

C'est la réaction entre les ions chlorures qui pénètrent dans le béton et l'aluminate tricalcique C_3A (composant du ciment) qui forme des monochloroaluminates hydratés ($C_3A \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$), ce dernier peut réagir avec d'autre composant tel que les sulfates pour former l'ettringite susceptible de produire une expansion. (19)

2.3. Source de l'attaque des ions chlorures

Les chlorures présents dans le béton peuvent provenir de deux sources différentes. Soit ils sont présents au moment du gâchage : utilisation d'eau contenant des chlorures ou agrégats contaminés. Soit ils proviennent de l'environnement (atmosphère marine, sels de déverglaçage, produits chimiques) et ont diffusés dans le béton (18)

Chapitre 2 : La pénétrabilité des ions chlorures

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

2.4. Mécanisme d'attaque des ions chlorures

Les ions chlorures qui pénètrent dans le béton se combinent chimiquement avec l'aluminate tricalcique C_3A (composant du ciment) et forment des monochloroaluminates hydratés ($C_3A \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$), relativement stable dans le béton.

2.4.1. Mécanisme d'attaque du Chlorure de sodium

L'action du chlorure de sodium sur la matrice cimentaire est double :

1- Consommation des ions calcium de la portlandite et des C-S-H, par formation de chlorure de calcium soluble : $Ca(OH)_2 + 2NaCl \rightarrow CaCl_2 + 2NaOH$ (2.1)

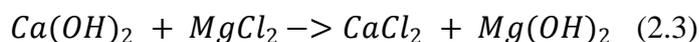
2- Formation de monochloroaluminate de calcium $C_3A \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$, par réaction des chlorures avec l'aluminate tricalcique C_3A et les aluminates hydratés : $C_3A + CaCl_2 + 10H_2O \rightarrow C_3A \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$ (2.2)

Cette réaction, qui consomme des chlorures, permet de réduire le taux d'ions libres, ce qui retarde le risque de corrosion des aciers.

Mais cette protection peut être déstabilisée par une action sulfatique associée qui, réagissant avec le mono-chloro-aluminate de calcium, peut produire de l'ettringite susceptible de produire une expansion. Dans les zones d'aspersion et de marnage, à côté de l'action chimique sur la matrice cimentaire, les cycles de dissolution-cristallisation du chlorure de sodium, peuvent mener à des pressions de cristallisation qui provoquent un écaillage de surface. Il s'agit d'un phénomène de lixiviation de la chaux qui accroît la porosité du béton.(19)

2.4.2. Mécanisme d'attaque du Chlorure de magnésium

Comme le chlorure de sodium ce sel exerce une action dissolvante sur la chaux. Mais le gel alors en solution conduit à la formation de brucite ($Mg(OH)_2$) :



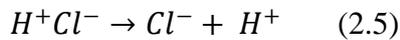
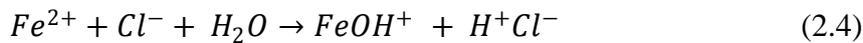
qui, précipitée à la surface du béton, peut ralentir la pénétration des ions agressifs dans le béton. Comme pour le chlorure de sodium, la réaction du chlorure de magnésium avec les aluminates provoque la formation de mono-chloro-aluminate de calcium.

Enfin, il est bon de signaler un phénomène fréquent de substitution ionique pouvant accompagner ce type de réactions en milieu marin, à savoir la substitution du calcium des C-S-H par le magnésium, donnant naissance à des M-S-H moins compacts et résistants.(19)

Chapitre 2 : La pénétrabilité des ions chlorures

2.4.3. l'effet des ions chlorures sur les armatures

Dans les piqûres, les ions chlorures s'associent avec l'ion hydrogène de l'eau pour former l'acide chlorhydrique qui sont constamment recyclés :



Ces réactions engendrent une importante baisse du pH, entre 3,8 et 5, la dissolution du fer est alors accélérée et les piqûres croissent en profondeur. (20). (21)

- les ions ferreux diffusés hors de la piqûre se combinent avec les ions hydroxyde de la phase interstitielle du béton tandis que la réaction cathodique est la même que dans le cas de corrosion en absence de chlorure.

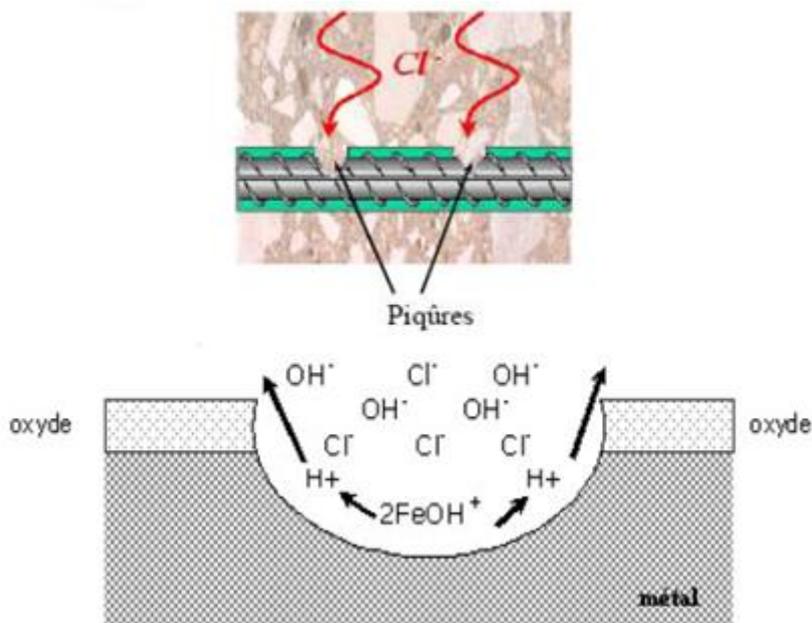


Figure 2- 1: l'effet des ions chlorures sur les armatures : Modèle de PAGE (22)

2.5. Les essais de pénétration des ions de chlorures :

Pour accélérer le transport des chlorures, l'essai de migration a été développé. Le principe consiste à appliquer une différence de potentiel dans la cellule de diffusion des chlorures, afin d'accélérer leur transport à travers le matériau. Il existe deux types d'essais :

2.5.1. Essai de migration en régime permanent

La figure (2-2), montre le principe de cet essai. Une éprouvette de béton saturée est placée entre deux conteneurs avec deux solutions différentes. Le conteneur attaché à la cathode contient une solution de chlorure de sodium, hydroxyde de sodium et hydroxyde de potassium.

Chapitre 2 : La pénétrabilité des ions chlorures

Le conteneur attaché à l'anode contient la même solution sauf les chlorures de sodium. La mesure de taux de chlorures est effectuée quand la concentration de chlorures dans le béton est stable.

Le champ électrique utilisé est situé entre 3 et 10V/cm. Pour la majorité des essais, le champ électrique est fixé à 4 V/cm. En effet cette valeur est suffisante pour le mouvement des chlorures et permet de limiter l'augmentation de la température, par conséquent, le risque de modification de la porosité du béton est négligeable. Sous l'effet du champ électrique, les ions chlorures se déplacent de la cathode vers l'anode quand le régime de l'écoulement est stable, et le coefficient de migration peut être déterminé.

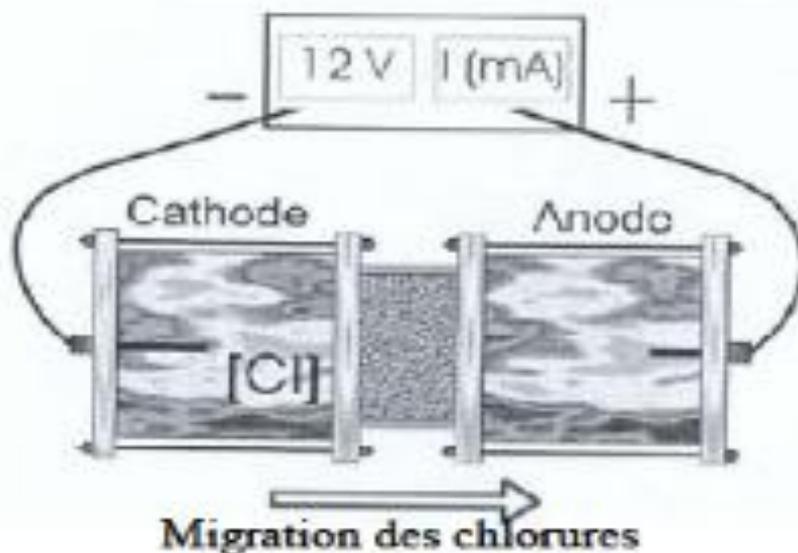


Figure 2- 2 : Cellule de migration en régime permanent.

2.5.2. Essai de migration en régime transitoire :

Cet essai a pour but la détermination de la profondeur de pénétration des chlorures pendant l'état de transition. Le premier essai de migration à l'état non stable est appelé « Rapidchloridepermeability test ». Cette méthode est utilisée principalement aux USA. Comme dans l'essai de migration en régime permanent, une tranche de béton est mise entre deux électrodes et un champ électrique est appliqué à travers l'échantillon.

Les paramètres qui sont mesurés pendant l'essai sont :

- La charge électrique totale qui passe à travers la tranche de béton durant l'essai.

· La résistivité du béton au début et à la fin de l'essai.

2.6. Teneur critique en ions chlorures

Dans le cas où la solution interstitielle contient une faible concentration en ions chlorure, il n'y aura pas de dépassivation des armatures, il existe donc une teneur critique en ions chlorures nécessaire pour l'amorçage de la corrosion.

Dans la littérature, il existe plusieurs expressions de C_{cr} , la teneur critique peut s'exprimer par le rapport Cl^- / H^+ (c'est le rapport des ions activant Cl^- sur les ions passivant OH^-), ou bien par la teneur en chlorures (libres+liés) par rapport au poids du ciment (de $350Kg/m^3$ par définition). Selon d'autres études, on considère que seuls les chlorures libres participent à la dépassivation des armatures et le seuil critique est exprimé en termes de la teneur en chlorures libre par rapport au poids du ciment.

Enfin, il existe d'autres travaux qui expriment la teneur seuil par $[Cl^-]=1,8 \text{ mol/l}$. (23)

2.7. Facteurs influant sur la pénétration des chlorures

La pénétration des ions chlorures peut être influencée par des facteurs liés à la composition du matériau ou bien à sa mise en œuvre ou liés au milieu environnant. Les plus essentiels sont :

2.7.1. Le rapport E/C :

Comme pour le phénomène de carbonatation, la migration des ions chlorures à travers la structure poreuse d'un béton est fortement liée aux propriétés de transfert des bétons (diffusivité et perméabilité). Ces propriétés de transfert sont elles-mêmes liées à la microstructure des bétons. POWERS et al. (24) ont mis en évidence l'importante diminution de la perméabilité d'une pâte de ciment lorsque le rapport E/C diminue au dessous d'un rapport critique $E/C=0,70$ (Figure 2-3). Pour des rapports E/C plus élevés, le réseau des capillarités reste toujours interconnecté, même si l'hydratation du ciment est complète

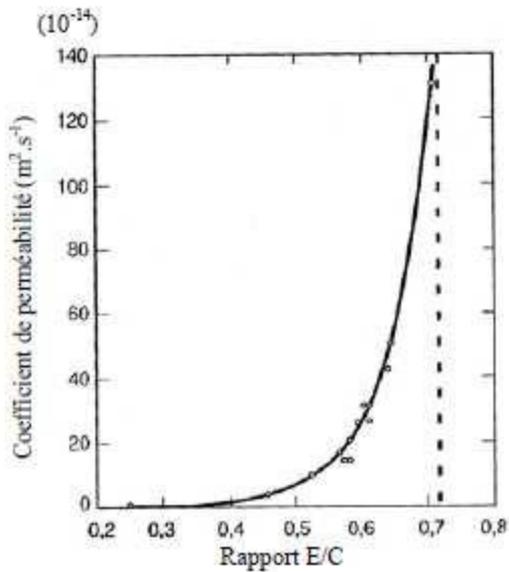


Figure 2- 3 : Relation entre le coefficient de perméabilité à l'eau des pâtes de ciment totalement hydratées et le rapport E/C. (24)

2.7.2. La nature du ciment :

La nature du ciment joue un rôle important dans la fixation des ions chlorures. En effet, les chlorures sont soit adsorbés sur les C-S-H, soit fixés par les aluminates (C_3A) qui dépendent tous deux de la composition du ciment.

FRANCY (25) a montré l'influence de la teneur en aluminates de ciment sur la quantité de chlorures fixés (figure 2-4).

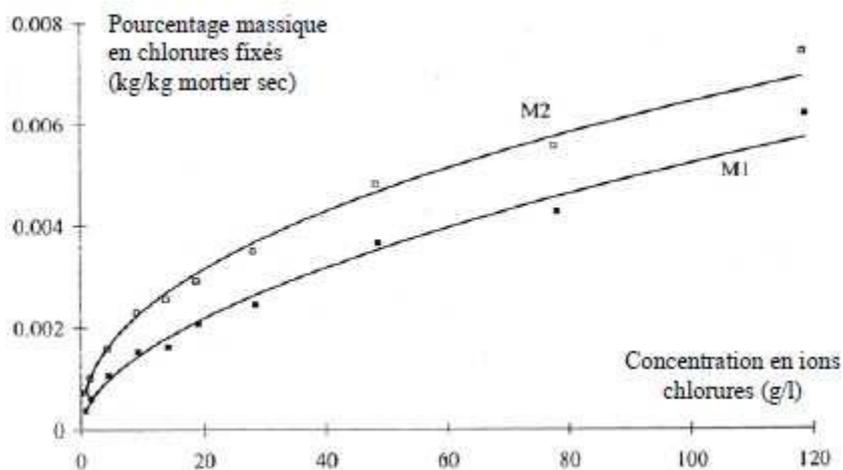


Figure 2- 4 : Isotherme de fixation du chlore sur deux mortiers. (25)

FRANCY a fait une comparaison des isothermes de fixation du chlore de deux mortiers de référence M1 et M2 (sable Leucate et E/C=0,5), chaque mortier utilisant un ciment différent (tableau 2.1).

Chapitre 2 : La pénétrabilité des ions chlorures

Tableau 2- 1La composition chimique des ciments de l'étude menée par FRANCY.(25)

Mortier	Type de ciment	Composition de Bogue(%)				
		C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF	$CaSO_4.H_2O$
M1	CEM I	67.2	16.4	4.5	6.5	4.5
M2	CEM II	58.8	14.7	11.3	6.6	4.5

On constate que le mortier M2, dont la teneur en aluminates du ciment est supérieure à celle du ciment M1, possède une capacité de fixation environ 30% supérieur à celle du mortier M1, pour une même teneur en pâte de ciment.

Une augmentation de la teneur en C_3A du ciment conduit donc à une diminution de la teneur en chlorures libres, c'est-à-dire à une augmentation de la teneur en chlorures fixés (pour une teneur en chlorures totaux constante).

2.7.3. La teneur en eau :

Il est naturel de penser que la capacité de fixation du matériau vis-à-vis des ions chlorures est directement liée à la surface spécifique en contact avec la solution interstitielle : elle diminuerait avec l'humidité interne (26)

Cependant, malgré une diminution de la teneur en eau les parois des pores restent couvèrent d'une couche adsorbé d'eau, il en résulte une augmentation de la solution au voisinage de ces pores (27). Donc pour de faible teneur en eau, on aura des chlorures piégés dans une mince pellicule d'eau qui pourront être considérés comme fixés, et une diminution de la mobilité des ions chlorures.

2.7.4. Le flux de liquide :

Les mouvements d'eau peuvent réduire la fixation des ions chlorures. Des essais d'imbibition capillaires par solution saline menés par FRANCY (25)montrent que les ions chlorures sont transportés par l'eau (figure 2.5) et qu'une durée d'imbibition insuffisante ne permet pas d'atteindre l'équilibre de fixation du chlorure.

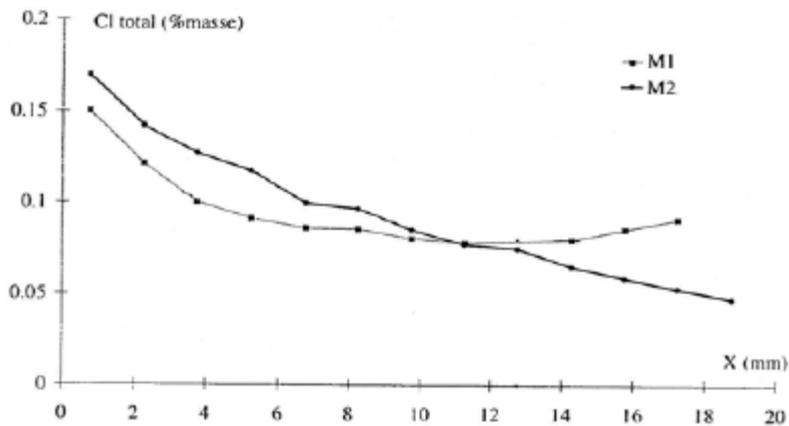


Figure 2- 5 : Profil en chlorure total après imbibition de 48 heures sur matériaux secs par des solutions saines à 20 g/l en NaCl(25)

2.7.5. La teneur en chlorure :

Les chlorures présents dans le béton peuvent soit être introduits lors du gâchage, soit provenir du milieu environnant. Lorsque la teneur en chlorures atteint ou dépasse une valeur critique ou valeur seuil, on dit qu'il y a dépassivation de la couche protectrice de l'acier, l'enrobage ne peut plus protéger les armatures et la corrosion s'amorce si les quantités d'eau et d'oxygène sont suffisantes

2.8. Les mécanismes de transport des ions chlorures dans le béton

La pénétration des chlorures dans un environnement naturel a 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'une différence de concentration en ions chlorures entre la surface exposée et le cœur du béton sain, ce phénomène engendre un transport des chlorures de la zone la plus concentrée vers la zone la moins concentrée, elle se produit en milieu saturé. Dans le cas de cycle d'humidification et séchage, les deux mécanismes peuvent coexister. Cela concerne par exemple les zones de marnage des ouvrages partiellement immergés.

Chapitre 2 : La pénétrabilité des ions chlorures

2.8.1. La diffusion :

2.8.1.1. Le transport par diffusion

Le transport d'une espèce par diffusion est lié au gradient de sa concentration. Dans une solution idéale, c'est-à-dire infiniment diluée, il est possible de négliger les interactions électrochimiques, alors, on peut exprimer le flux diffusif des ions par l'équation suivante:

$$J = -D_c \overrightarrow{\text{grad}}(C) \quad (2.7)$$

Où : c la concentration de l'espèce considérée ; D_c le coefficient de diffusion de l'ion en solution.

Dans un volume élémentaire, où la variation de la concentration entre deux instants est égale à la quantité de matière échangée par diffusion, la relation (8.2.1) devient :

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -\text{div}(\overrightarrow{J}) = \text{div}(D_c \overrightarrow{\text{grad}}(c)). \quad (2.8)$$

Le coefficient de diffusion D_c des ions en solution dépend de la mobilité de l'ion et donc de son diamètre et de la force ionique de la solution. Si l'on considère que le volume élémentaire représentatif est cette fois-ci le milieu poreux, d'autres paramètres tels que la tortuosité ou la connectivité du réseau influent alors sur le mouvement de l'ion au sein du milieu poreux.

2.9. Effet des ajouts sur la pénétrabilité des ions chlorures :

Les additions minérales et les adjuvants donnent au béton un niveau de résistance à la compression fixé. La résistance à la compression peut constituer un critère vis-à-vis de la durabilité.

Les fillers calcaires ne modifient pas la perméabilité et la diffusivité du béton, cependant, d'autres additions minérales, comme les laitiers, les cendres volantes ou encore la fumée de silice, modifient la nature et la texture de ces hydrates. Ils réduisent la portlandite dans les hydrates. Cette réduction de la portlandite s'accompagne, en général, d'un affinement des pores et des capillaires, et donc une réduction de la perméabilité. Cette action peut prendre quelques jours pour les fumées de silice, et quelques semaines pour les laitiers, et quelque mois pour les cendres volantes.

L'ajout de produits minéraux modifie la valeur critique du seuil de dépassivation, mais surtout réduit la vitesse de pénétration des chlorures, ce qui est déterminant dans le développement de la corrosion. On peut cependant affirmer qu'en ce qui concerne la période

Chapitre 2 : La pénétrabilité des ions chlorures

d'amorçage, la qualité du béton (faible rapport E/L et classe de résistance du ciment élevée) a une plus grande influence que le choix du type de ciment utilisé et que les conditions d'exposition des ouvrages jouent un rôle majeur sur la corrosion des armatures.

2.10. L'effet de la poudre de verre sur la pénétrabilité des ions chlorures

La poudre de verre contribue à la réduction systématique de la pénétrabilité des ions chlorure dans tous les bétons quel que soit leur âge. Cette réduction de la pénétrabilité des ions chlorure dans les bétons à la poudre de verre est relativement importante à plus de deux mois de cure humide, correspondant à un âge du béton où l'effet de la réaction pouzzolanique devient plus importante. La réduction importante de la pénétrabilité des ions chlorure des bétons en présence de la poudre de verre résulte de l'effet filler et essentiellement de l'effet pouzzolanique .(28)

Il faut bien savoir aussi que la poudre de verre donne de meilleures performances (vis-à-vis de la pénétrabilité des ions chlorure) dans les bétons de rapport E/L élevé.

2.11. Conclusion :

La résistance à la pénétration des ions chlorures est affectée positivement par les ajouts cimentaires. Elle est proportionnelle au type d'ajout et au taux d'incorporation. La pénétrabilité des ions chlorures des bétons avec ajouts est faible par rapport aux bétons sans ajouts grâce à la modification du réseau poreux et la conductivité de la solution interstitielle. L'effet de chaque ajout sur la résistance du béton aux chlorures est étroitement lié à sa composition chimique et à son caractère pouzzolanique.

Chapitre 3
Objectif et méthodologie
du travail pratique

3.1. Introduction

Cette étude a pour objectif d'analyser la pénétrabilité des chlorures des bétons à base de poudre de verre avec différents rapports E/L réalisés par Ablam ZIDOL (Université de Sherbrooke), et procéder par des essais de pénétrabilité des ions chlorures accélérée (RCPT) pour montrer l'influence de la poudre de verre sur la pénétrabilité des ions chlorures. Les caractéristiques des matériaux ont été données dans le projet de fin d'étude. (29)

3.2. La poudre de verre

3.2.1. Description

Le verre est un matériau ou un alliage dur, fragile et transparent à la lumière visible. Il est constitué le plus souvent d'oxyde de silicium (silice SiO_2 , le constituant principal du sable) et de fondants. Parmi tous les types de verre, le plus courant est le verre sodocalcique. Du point de vue physique, le verre est un matériau amorphe (c'est-à-dire non cristallin) présentant le phénomène de transition vitreuse. La poudre de verre est un ajout cimentaire obtenu par broyage du verre mixte (déchets de verre de différentes couleurs).



Figure 3-1 : La poudre de verre

3.2.2. Caractéristiques techniques

Les principales caractéristiques du verre sont résumées au tableau 3-1

Tableau 3-1: Les caractéristiques Techniques de la poudre de verre

Densité	2,54
Finesse Blaine (m^2/kg)	440
Diamètre moyen (μm)	10,9

Chapitre 3 : Objectif et méthodologie du travail pratique

3.2.3. Dosage

Le dosage de cet ajout cimentaire alternatif varie de 20 à 30% du poids du ciment. L'incorporation de la poudre de verre à dosage désiré dépend des performances recherchées.

3.2.4. Mode d'emploi

La poudre de verredoitêtre mélangée à sec avec le ciment, avant l'ajout de l'eau de gâchage. Leurs propriétés chimiques sont données au tableau 3-2

Tableau 3 - 2 : La composition chimique de la poudre de verre en %

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	PAF
72.66	1.57	0.39	11.41	1.24	0.07	0.54	12.89	0.38

3.3. L'essai de Pénétrabilité des ions chlorures accélérée (RCPT)

L'essai de pénétrabilité des ions chlorures accélérée (RCPT) a été effectué sur des éprouvettes cylindrique (50 mm × 95 mm) conformément à la norme ASTM C 1202 après une cure de 28,56 et 91 jours. Ces éprouvettes sont extraites à partir d'un cylindre de 100 x 200 mm.

L'éprouvette de béton (50 mm × 95 mm) saturé est placée entre deux compartiments de solution amont et aval, la première contient une solution de 3% chlorure de sodium(NaCl) et la deuxième contient une solution d'hydroxyde de sodium(NaOH) à 0.3 N, avec deux électrodes disposées sur chaque face du bé ton. Sous l'influence d'une différence de potentielle (ddp) de 60 volts, maintenue entre les deux extrémités de l'éprouvette, les chlorures se déplacent par migration de la cathode à l'anode.

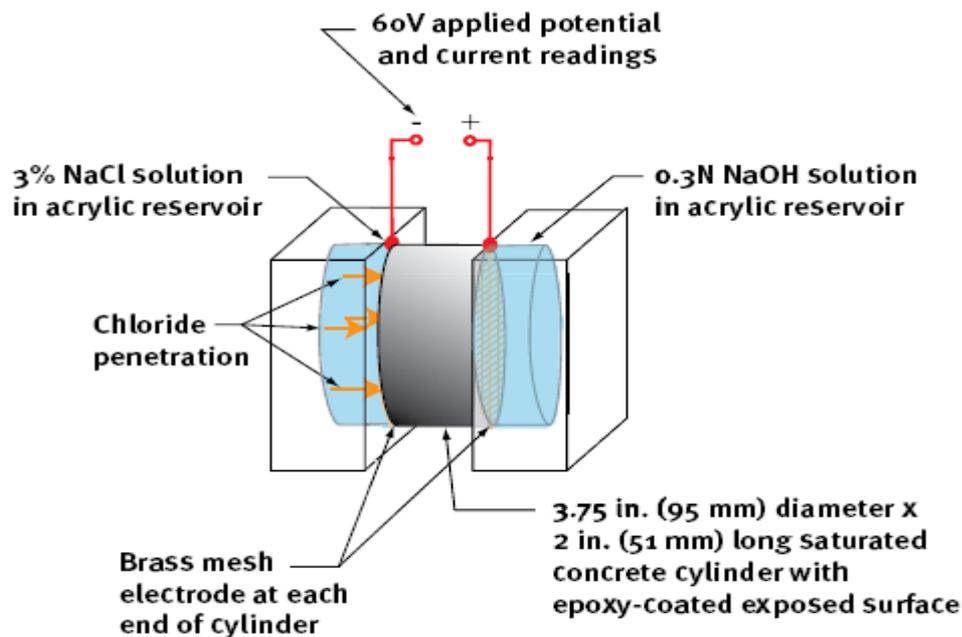


Figure 3-2 : L'essai de pénétrabilité des ions chlorures accélérée (RCPT)

L'essai consiste à mesurer la charge électrique totale, exprimée en coulombs qui passe à travers l'éprouvette pendant 6 heures. La charge mesurée exprime la pénétrabilité des ions chlorure à travers l'échantillon.

Les résultats sont interprétés par référence aux valeurs du tableau 3-3 qui exprime le niveau de pénétrabilité aux ions chlorure dans l'échantillon en fonction de la charge.

Tableau 3 - 3 : Pénétration des ions chlore basée sur la charge passante

Charge passée (coulombs)	Pénétration des ions chlore
>4000	Élevée
>2000 – 4000	Moyenne
>1000-2000	Faible
100-1000	Très faible
<100 négligeable	Négligeable

Chapitre 4
Présentation et interprétation
des résultats

4.1. Introduction

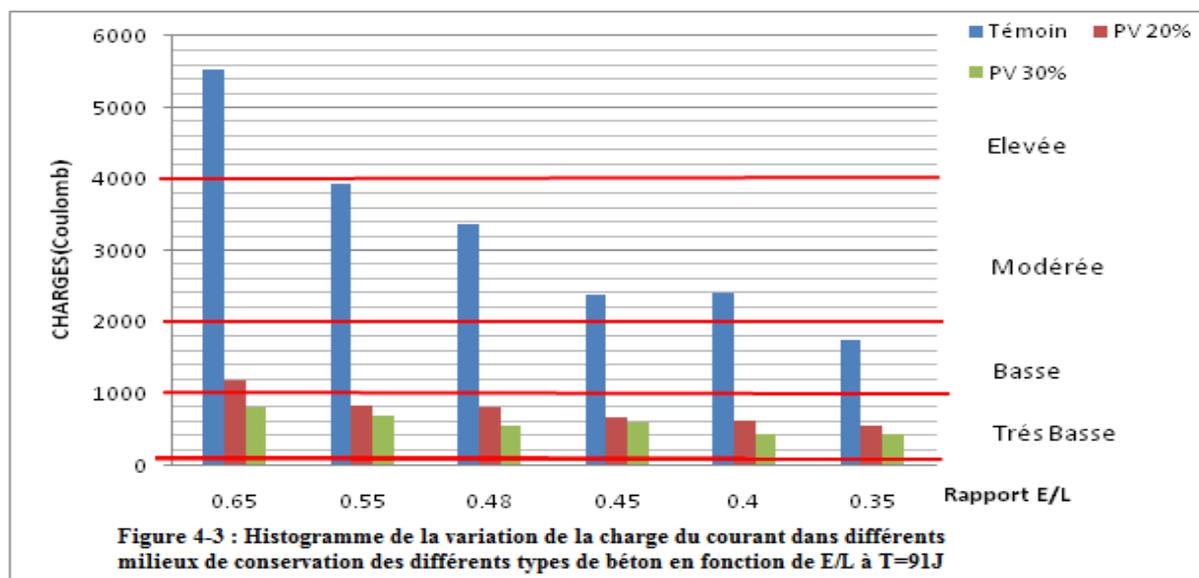
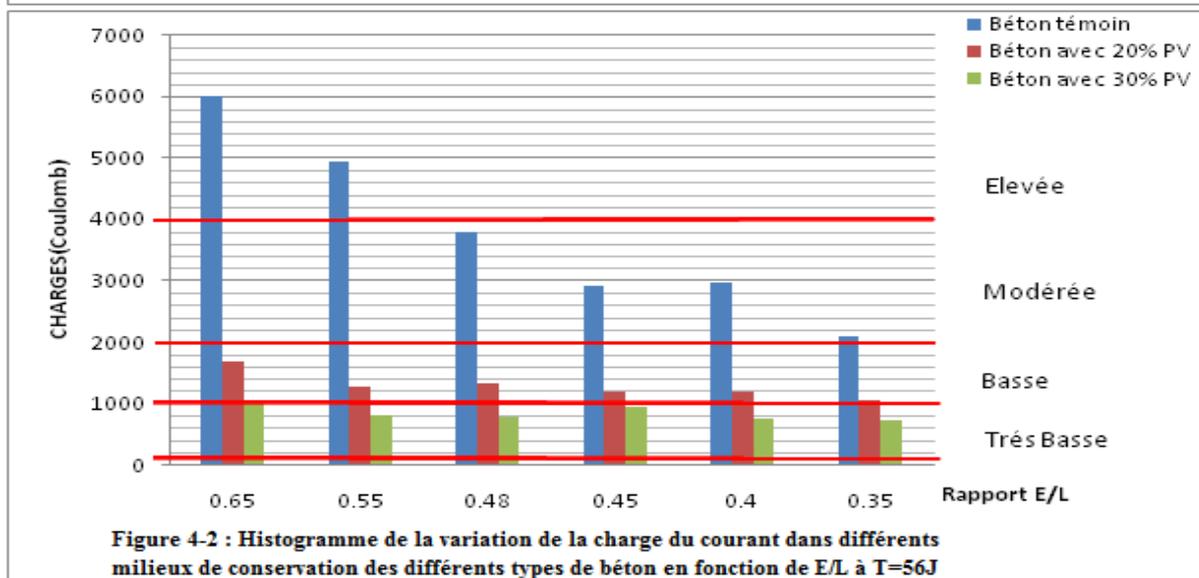
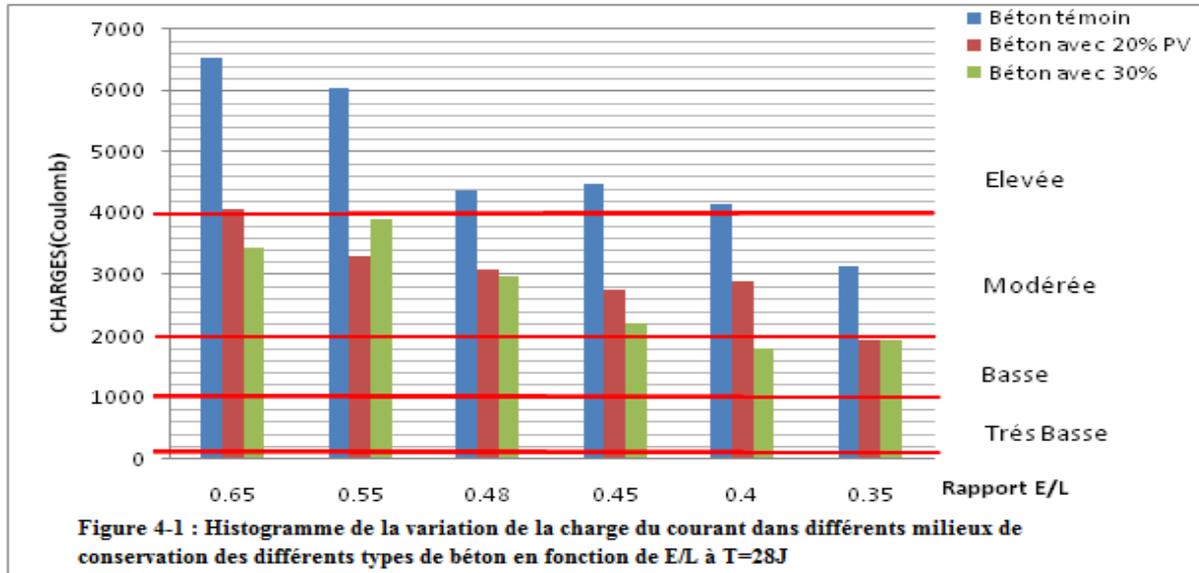
Les essais réalisés dans le cadre de ce projet de recherche ont produit de nombreux résultats. Il est à signaler qu'il était question que des étudiants de l'ENP se rendent à l'Université de Sherbrooke (Canada) dans le cadre de la convention existant entre les deux institutions. Ce déplacement de trois à quatre mois aurait permis aux stagiaires d'effectuer différents essais sur plusieurs sortes de bétons et d'interpréter les résultats obtenus. Malheureusement n'ayant pu bénéficier de ce stage qui hélas était programmé, nous avons tenu à réaliser notre projet de fin d'études sur le thème qui nous a proposé en exploitant et interprétant les résultats obtenus par Ablam ZIDOL étudiant en Génie civil à l'Université de Sherbrooke. Les essais et résultats de A. ZIDOL sont présentés dans ce chapitre avec référence en annexes lorsque nécessaire. On s'intéressera essentiellement à la poudre de verre et son comportement vis-à-vis de la pénétrabilité des ions chlorure en indiquant l'influence du temps ainsi que les effets de la variation du rapport (E/L). Nous avons exploité les résultats bruts de Zidol et nous avons procédé nous-mêmes à les représenter sous forme de courbes respectives et à les interpréter.

4.2. Résultats des essais de pénétrabilité des ions chlorures accélérée (RCPT)

Les résultats obtenus seront illustrés dans des histogrammes tirés des tableaux (voir annexe A) et présentés en fonction du rapport (E/L).

La pénétrabilité des ions chlorure (Kcl) peut être définie comme étant les charges totales en coulombs traversant un échantillon dans les 6 heures.

Chapitre 4 : Présentation et interprétation des résultats



4.3. Observations et interprétations des résultats de la pénétrabilité des ions chlorures en fonction du rapport E/L

Les résultats obtenus dépendent à la fois de la microstructure du béton ainsi que la conductivité de la solution interstitielle

Les bétons contenant poudre de verre présentent des pénétrabilités plus faibles que celles des témoins et cela est vrai pour les différents rapports E/L et taux d'incorporation.

L'effet de la microstructure

À 28 jours, on remarque les pénétrabilités des ions chlorures du béton témoin se trouve dans la classe de pénétrabilité élevée pour les rapports E/L : 0.65 ; 0.55 ; 0.48 ; 0.45 et 0.40 ou modérée pour E/L de l'ordre de 0.35, par contre celle des bétons contenant de la poudre de

verre sont classés modérées quel que soit le rapport E/L et le taux d'incorporation (20% ou 30%). Cette réduction de la pénétrabilité des ions chlorure en présence de la poudre de verre est due essentiellement à l'effet filler de la poudre puisque la réaction pouzzolanique ne s'est pas encore déclenchée.

À 56 jours, on remarque que le béton témoin présente encore des valeurs de pénétrabilité élevées ou modérées par contre on observe une réduction importante de la pénétrabilité des ions chlorure des bétons avec poudre de verre. Les valeurs de pénétrabilité des bétons avec 20 % poudre de verre se trouvent dans la classe basse quel que soit le rapport E/L, par contre les valeurs de pénétrabilité des bétons avec 30 % poudre de verre se trouvent dans la classe très basse sauf pour le rapport E/L=0.65. Tous les bétons contenant 20% de la poudre ont des valeurs des pénétrabilités des ions chlorures basses (< 20000 Coulombs) alors que les bétons contenant 30% de la poudre ont des pénétrabilités très basses (< 1000 coulombs). La réduction de la perméabilité augmente avec l'augmentation du taux d'incorporation de la poudre de verre. Cette réduction de la pénétrabilité dans ces bétons est due essentiellement à la réaction pouzzolanique de la poudre de verre qui remplit les pores par les CSH secondaires. Ce remplissage entraîne une modification du réseau poreux qui devient moins connecté.

Chapitre 4 : Présentation et interprétation des résultats

À 91 jours, le béton témoin présente toujours des valeurs de pénétrabilité élevées ou modérées. Les valeurs de pénétrabilité des bétons avec poudre de verre continuent à décroître quel que soit le taux d'incorporation.

Les valeurs de pénétrabilité des bétons avec 20 % poudre de verre se trouvent dans la classe très basse sauf pour le rapport E/L = 0.65, par contre celles des bétons avec 30 % poudre de verre se trouvent dans la classe très basse quel que soit le rapport E/L. Tous les bétons contenant 20% de la poudre ont des valeurs des pénétrabilités des ions chlorures basses (<1200 Coulombs) alors que les bétons contenant 30% de la poudre ont des pénétrabilités très basses (< 810 coulombs). L'augmentation du taux d'incorporation de la poudre de verre entraîne la réduction de la pénétrabilité des ions chlorures. Cette réduction peut être expliquée par le fait que les réactions pouzzolaniques sont accélérées à long terme : les produits d'hydratation remplissent les pores capillaires et augmentent la résistance et l'imperméabilité des bétons par affinage des pores capillaires et par transformation des gros cristaux de CH en un produit d'hydratation faiblement cristallisé CSH (affinage des grains).

L'effet de conductivité de la solution interstitielle

La résistance à la pénétration des ions chlorures des bétons contenant la poudre de verre est plus grande que celles des témoins et cela est vrai pour les différents rapports E/L et taux d'incorporation. Ceci peut être expliqué par le fait que la résistance à la pénétration des ions chlorures des bétons de même microstructure dépend de la conductivité de la solution interstitielle, elles sont proportionnelles [(30) ; (31)]. La poudre de verre incorporée dans le ciment libère plus d'ion alcalin dans la solution aqueuse que le ciment substitué, ce qui entraîne une augmentation de la conductivité de la solution interstitielle (31).

4.4. La réduction de la pénétrabilité des ions chlorure suivant le rapport E/L

La réduction de la pénétrabilité des ions chlorure notée ΔK_{Cl} , est la différence entre la charge du béton témoin et celle du béton contenant la poudre de verre rapportée en pourcentage de la charge totale du béton témoin pour un rapport E/L donné.

$$\Delta K_{Cl} = \frac{K_{Cl \text{ témoin}} - K_{Cl \text{ béton}}}{K_{Cl \text{ témoin}}} \times 100 \quad (4.1)$$

Chapitre 4 : Présentation et interprétation des résultats

Les résultats obtenus seront illustrés dans des histogrammes et des courbes tirés des tableaux (voir annexe B) et présentés en fonction du rapport (E/L).

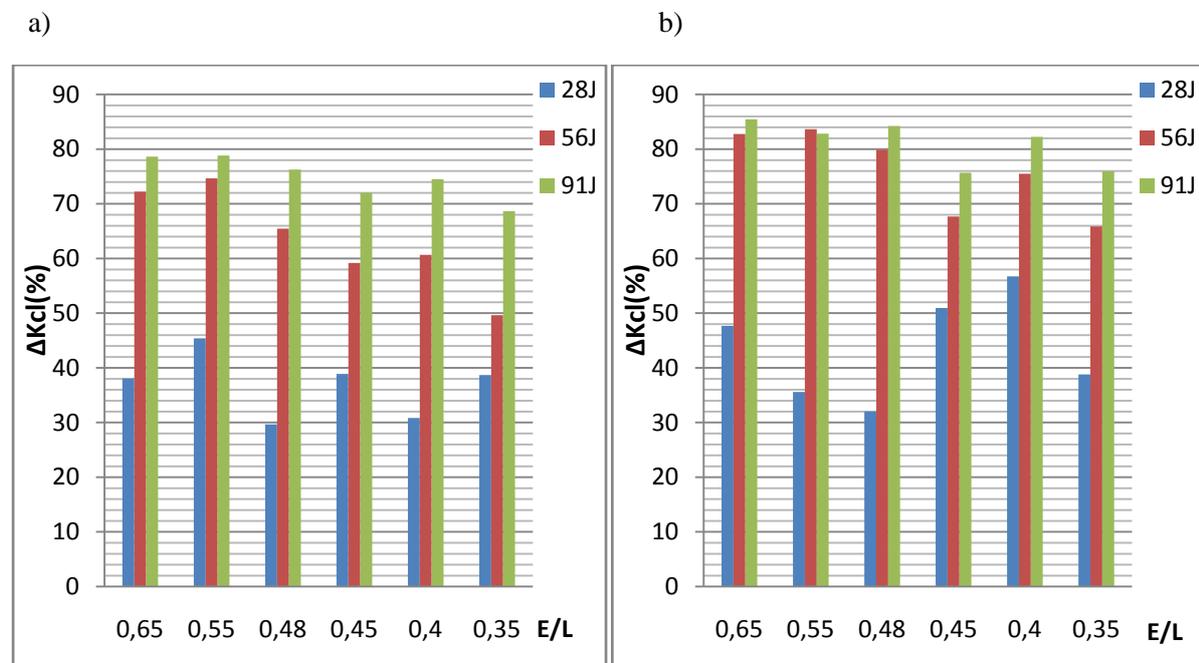


Figure 4-4 : histogrammes de la réduction de la charge du courant à différents âge en fonction de E/L [a) béton contenant 20% de poudre de verre b) béton contenant 30% de poudre de verre]

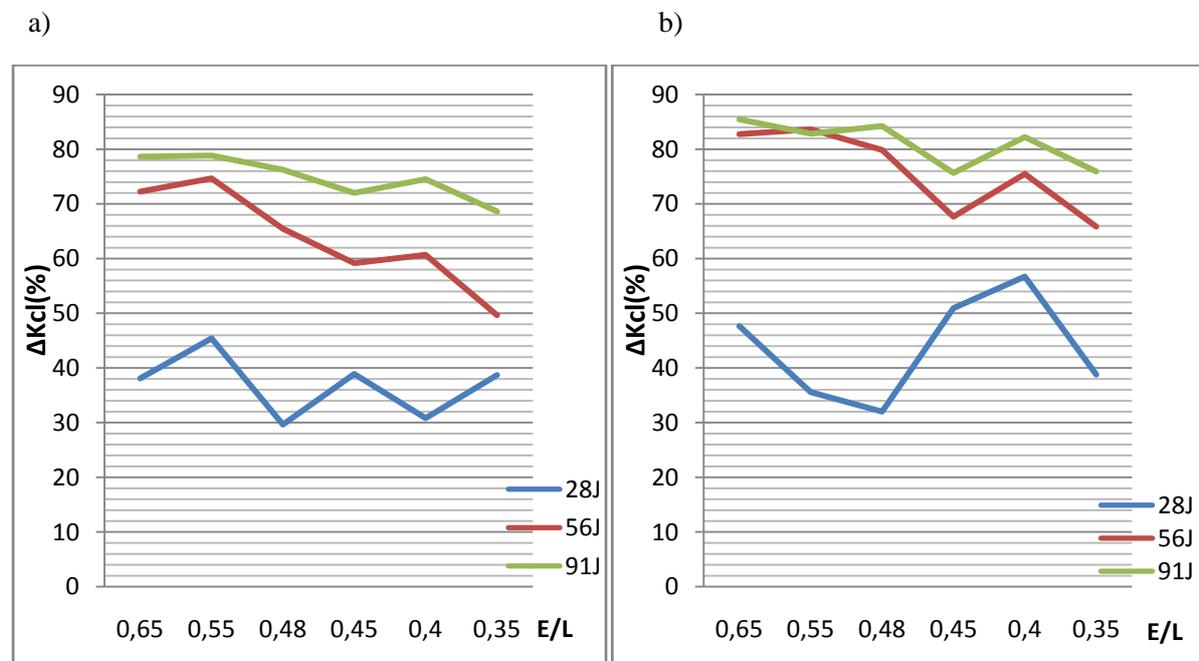


Figure 4-5 : Courbes de la réduction de la charge du courant à différents âge en fonction de E/L [a) béton contenant 20% de poudre de verre b) béton contenant 30% de poudre de verre]

4.5. Observations et interprétations de la réduction de la pénétrabilité des ions chlorures en fonction du rapport E/L

La réduction de la pénétrabilité des bétons incorporant 20 ou 30% de poudre de verre croît avec le rapport E/L quel que soit l'âge des bétons.

À 28 jours la réduction de la pénétrabilité des ions chlorures est comprise entre 29 et 57%. La faible réduction de la pénétrabilité des ions chlorures est due la lente hydratation de la poudre de verre, par conséquent le réseau poreux est un peu modifié, et la poudre de verre libère moins d'alcalis.

Entre 56 et 91 jours la réduction de la pénétrabilité est importante et elle peut atteindre 85% (pour un béton contenant 30% de PV et $E/L=0.65$). on peut expliquer cette réduction par le fait que la cinétique de la réaction de la poudre de verre devient importante après 56 jours, par conséquent la porosité et l'inter-connectivité des pores décroît d'une part et la poudre de verre libère plus d'alcalis dans la solution interstitielle d'autre part.

L'augmentation importante de la réduction de la pénétrabilité avec le rapport E/L s'explique par le fait que la poudre de verre s'hydrate lentement, et pour développer tous ses potentiels elle nécessite assez d'eau.

L'augmentation importante de la réduction de la pénétrabilité avec le taux d'incorporation s'explique par le fait qu'un béton de même microstructure peut montrer une augmentation des résistances à la pénétration des ions chlore si la conductivité de la solution interstitielle est grande. Les 30 % de poudre de verre incorporées dans le ciment libèrent plus d'ion alcalin dans la solution aqueuse que les 20% de poudre de verre substitué, par conséquent la conductivité de la solution interstitielle est plus grande dans le béton avec 30% PV.

4.6. Conclusion

Grâce à la composition chimique de la poudre de verre et son caractère pouzzolanique, la poudre de verre ajoutée aux bétons induit l'augmentation de la résistance à la pénétration des ions chlorures. Cette augmentation est due essentiellement à la modification du réseau poreux qui devient moins connecté grâce à la réaction pouzzolanique, et à l'augmentation de la conductivité de la solution interstitielle grâce à la libération des ions alcalis.

Conclusion générale
et
Recommandations

Conclusion générale

Compte tenu que l'utilisation du verre mixte contenant plusieurs couleurs pour la fabrication de nouveaux verres n'est actuellement pas économiquement viable il est devenu primordial de rechercher d'autres débouchés que le stockage ou l'enfouissement en décharges. L'une des applications envisageables est sa valorisation dans la fabrication des ciments et des bétons.

L'utilisation de la poudre de verre comme un ajout cimentaire dans le béton est très bénéfique. Actuellement, ce matériau de substitution partielle a d'excellentes performances comparativement à celle du béton au ciment tout seul. La disponibilité de cet ajout cimentaire présente un grand avantage quand à leur utilisation dans le béton. De ce fait, le béton peut devenir moins onéreux, plus résistant et de plus en plus durable et écologique.

Ce travail avait pour but de montrer la possibilité d'utiliser la poudre de verre finement broyé comme ajout cimentaire dans le but de trouver un béton durable. L'étude s'est basée sur la durabilité de ces bétons via plusieurs paramètres et spécifiquement via la pénétrabilité des ions chlorures.

Les résultats obtenus au cours de ce travail mènent aux conclusions suivantes :

- 1.** L'utilisation de la poudre de verre comme ajouts diminue considérablement la pénétrabilité des ions chlorures.
- 2.** La poudre de verre augmente la conductivité de la solution interstitielle : la poudre de verre libère des ions d'alcalis dans la solution interstitielle.
- 3.** La résistance à la pénétration des ions chlorures augmente avec l'augmentation du taux d'incorporation : une quantité de la poudre de verre élevée entraîne une diminution de la porosité et des quantités élevées des ions d'alcalis libérées dans la solution interstitielle.
- 4.** En augmentant le rapport E/L la résistance à la pénétration des ions chlorures augmente : la poudre de verre nécessite beaucoup d'eau pour s'hydrater complètement.

Conclusion générale et Recommandations

5. La poudre de verre assure une bonne protection des armatures vis-à-vis de la corrosion.
6. La masse volumique des bétons avec poudre de verre, est sensiblement élevée par rapport à celle du béton de référence, suite à la densification de la matrice, obtenue par l'ajout de particules très fines.

Recommandations et perspectives :

Le béton avec poudre de verre est considéré comme un matériau nouveau, plusieurs recherches sont en cours. Nous recommandons ainsi les étudiants de poursuivre et d'approfondir les recherches sur :

- L'influence du changement climatique sur la durabilité des bétons avec poudre de verre
- L'influence des autres facteurs tel que les sulfates et les réaction alcali-granulat sur la durabilité des bétons avec poudre de verre
- Etude de la durabilité des bétons tertiaire (poudre de verre+ ciment CPJ)

Ajouter à cela, un respect de la composition chimique et minéralogique du ciment par l'industrie cimentaire ne sera que bénéfique pour assurer la compatibilité ciment/ajout.

A la lumière des résultats obtenus, nous souhaitons aussi que l'état algérien participe à la valorisation de la gestion des déchets notamment les déchets de verre non recyclable.

La gestion des déchets est devenue un impératif économique, sociétal et environnemental nécessitant une réelle prise en charge d'urgence. Elle peut contribuer significativement à l'augmentation du niveau d'emploi, elle est même capable d'absorber un grand nombre de chômeurs et s'ouvrir sur un nouveau monde industriel.

Références Bibliographiques

1. BENSALFIR.S.Mécanismes d'altérations des matériaux cimentaires soumis aux milieux fortement agressifs(mémoire d'ingénieur d'état).Université de Mascara 2010.pp1-3.
2. Ployaert, Ir C. DURABILITE DES BETON PAR LA MAITRISE DE L'ABSORPTION D'EAU. BRUXELLES : febelcem, NOVEMBRE 2009.
3. www.civil.usherbrooke.ca/cours/gci714/PDF/Chap2_1.pdf. www.civil.usherbrooke.ca. [En ligne]
4. Nehdi, M. Mécanismes de transfert de masse dans le béton comme critère de durabilité: application in situ aux bétons de barrage. s.l. : Université de Sherbrooke, 1993.
5. Torrent, R. J. et Jornet, A. The Quality of the 'Covercrete' of Low-, Medium- and High- Strength Concretes. Proceeding of the Second International Conference on Durability of Concrete, ACI SP-126, Montreal, 1991, V.M. Malhotra Editor, pp. 1147-116.
6. Nagataki et Ujike 1986 Air permeability of concrete mixed with fly ash and condensed silica fume, ACI SP-91, p. 1049-1068.
7. GCI 714 - Durabilité et réparations du béton. s.l. : Université de Sherbrooke.
8. Armaghani, J. M.; Romano, D. C. et Larsen, T. J. Strength and Durability of Concrete in Florida. Proceeding of the Second International Conference on Durability of Concrete, Supplementary Papers, Montreal, 1991, V.M. Malhotra Editor, pp. 723-748.
9. PERRATON, D.; AÏTCIN, P.C. AND VÉZINA, D(1988) Permeabilities of silica fume concrete. ACI Special publication SP-108, Detroit, pp. 63-84.
10. Guide de prescription des ciments pour des constructions durables ,CIM béton,p. 57-64.
11. HIHAOUI Ramdane : Durabilité des matériaux cimentaires vis-à-vis d'un environnement chimiquement agressif (Mémoire de Magister- USTMB d'Oran -2008.
12. KERBOUCHE : Influence des ajouts minéraux sur les résistances mécaniques et la durabilité des mortiers (Mémoire de Magister- l'ENSET d'Oran-2009.
13. Richard Gagné : GCI 714 - Durabilité et réparations du béton : Cours de génie civil (Université de Sherbrooke).
14. Azddine KAROUIE : Utilisation des cendres volantes pour la prévention des désordres dus à l'alcali-réaction (Ecole HASSANIA des Travaux publics - Maroc).
15. RECOMMANDATION N°T1-96 aux maîtres d'ouvrage publics relative aux études pour la construction ou la réparation des ouvrages de stockage et de transport de l'eau-NOTE N°3.
16. ZEROUB Hamid,Valorisation du verre dans l'élaboration de béton durable (Approche expérimentale),15 /02/2012,UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA - BOUMERDES FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR.

17. AMARNI L. Durabilité des éléments en Béton Armé en milieu agressif : Corrosion des Armatures (mémoire de magister) . Université Mouloud Mammeri de TIZI-OUZOU 2012.pp 23.
18. NDZANA AKONGO Grégoire & TCHOUMI Samuel : Réhabilitation des ouvrages en béton armé dégradés par la corrosion des armatures (Diplôme des Professeurs des lycées d'Enseignement Technique 2ème grade -Université de Douala).
19. - <http://doc.lerm.fr/attaque-de-la-matrice-cimentaire-par-les-chlorures/#sthash.sUDhaEw4.dpuf>.
20. Byforts K., "Chloride-initiated reinforcement corrosion (chloride binding) CBI.
21. Van Muylder J., Vansathler L., Winand R. and Pourbaix M., "Electrochemical.
22. Page C.L., Lambert P., Vassie P.R.W., Investigations of reinforcement corrosion.
23. Pettersson K. dans Dhir R.K., Jones M.R. , (Eds.). Concrete 2000, vol. 1, E&FN.
24. POWERS T.C., COPELAND L.E., HAYES J.C., MANN H.M., 1954,.
25. FRANCY O., 1998, « Modélisation de la pénétration des ions chlorures dans les.
26. NILSSON L.O., POULSEN E., SANDBERG P., SORENSEN H.E.,.
27. GREGG S.J., 1961, The surface chemistry of solids, 2nd edition, Ed. Chapman &.
28. SCHWARZ N,DUBOIS M,NEITHALATH N. Electrical conductivity based characterization of plain and coarse glass powder modified cement pastes. Department of Civil and Environmental Engineering, Clarkson University.2007.
29. TAMAoust.A LEghreib M. Etude du béton à la poudre de verre(mémoire d'ingeniorat) ENP.2015 .
30. N. Schwarz, H. Cam, Nar Neithalath. Influence of a fine glass powder on the durability characteristics of concrete and its comparison to fly ash. Cem Concrete Res 2008.
31. Abbas, M. Carcassès, J.P. Ollivier. The importance of gas permeability in addition to the compressive strength of concrete. Magazine of Concrete Research, 52 (1), 2000.
32. Powers, T.C., Copeland, L.E., Hayes, J.C. et Mann, H.M. 1954 Permeability of Portland cement paste, Journal of American Concrete Institute, Vol. 51, N°. 3, p. 285-298.
33. Whiting, D. 1988 Permeability of selected concretes, Permeability of concrete, ACI SP-108, p. 195-222.
34. HAUSMANN D.A. - «Steel corrosion in concrete: how does it occur?» Materials protection, vol. 4, 11, 1967, p. 19-23.
35. Dr. Ir. P. Boeraeve : Cours de Béton armé.
36. Saida BOUALLEG : Effet des milieux agressifs sur les caractéristiques de durabilité des bétons et des matrices cimentaires (Mémoire de Magister- Université Mohamed Boudiaf de M'sila-2004).
37. - <http://doc.lerm.fr/attaque-de-la-matrice-cimentaire-par-les-chlorures/#sthash.sUDhaEw4.dpuf>.

38. Mahmoud ISMAIL : Etude des transferts et de leurs interactions avec la cicatrisation dans les fissures pour prolonger la durée de service des infrastructures (ponts, centrales nucléaires)(Thèse de doctorat -France -2006).
39. GREGG S.J., 1961, The surface chemistry of solids, 2nd edition, Ed. Chapman &.
40. NILSSON L.O., POULSEN E., SANDBERG P., SORENSEN H.E.,.
41. François R., Francy O., Caré S., Baroghel-Bouny V., Lovera P., Richet C. (2001).
42. Baroghel-Bouny V. et al. (2004), Conception des bétons pour une durée de vie.
43. Basheer L., Kropp J., Cleland D. J. (2001) Assessment of the durability of concrete.

Annexe A : Résultats des essais de pénétrabilité des ions chlorures accéléré

Tableau A1 : Pénétrabilité des ions chlorure des bétons en fonction du rapport E/L à 28 jours

E/L	Pénétrabilité des ions chlorure des bétons à 28 jours (coulomb)		
	Témoin	20% PV	30% PV
0.65	6547	4054	3426
0.55	6032	3293	3886
0.48	4364	3070	2967
0.45	4481	2738	2199
0.40	4149	2870	1796
0.35	3130	1919	1916

Tableau A2 : Pénétrabilité des ions chlorure des bétons en fonction du rapport E/L à 56 jours

E/L	Pénétrabilité des ions chlorure des bétons à 56 jours (coulomb)		
	Témoin	20% PV	30% PV
0.65	6014	1670	1037
0.55	4943	1253	809
0.48	3785	1308	762
0.45	2919	1192	944
0.40	2969	1168	728
0.35	2079	1047	710

Tableau A3 : Pénétrabilité des ions chlorure des bétons en fonction du rapport E/L à 91 jours

E/L	Pénétrabilité des ions chlorure des bétons à 91 jours (coulomb)		
	Témoin	20%PV	30%PV
0.65	5532	1183	805
0.55	3920	830	673
0.48	3376	802	533
0.45	2379	666	579
0.40	2397	611	426
0.35	1740	546	419

Tableau A4 : La réduction de la pénétrabilité des ions chlorures du béton avec 20%PV en fonction du rapport E/L

E/L	La réduction de la pénétrabilité des ions chlorures du béton avec 20% PV (en %)		
	28 jours	56 jours	91 jours
0.65	38.08	72.23	78.61
0.55	45.41	74.65	78.83
0.48	29.65	65.44	76.24
0.45	38.90	59.16	72.01
0.40	30.83	60.66	74.51
0.35	38.69	49.64	68.62

Tableau A5 : La réduction de la pénétrabilité des ions chlorures du béton avec 30%PV en fonction du rapport E/L

E/L	La réduction de la pénétrabilité des ions chlorures du béton avec 30% PV (en %)		
	28 jours	56 jours	91 jours
0.65	47.67	82.76	85.45
0.55	35.58	83.63	82.83
0.48	32.01	79.87	84.21
0.45	50.93	67.66	75.66
0.40	56.71	75.48	82.23
0.35	38.79	65.85	75.92