



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Civil et d'Hydraulique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Travaux publics
Voies et Ouvrages d'Art (VOA)

Réf. : V 01 . 2018

Présenté et soutenu par :
Boubaker OUAREKH

Le : lundi 25 juin 2018

Recherche bibliographique sur l'effet de la carbonatation sur la durabilité des bétons

Jury :

| | | | | |
|-----|---------------------|-----|----------------------|------------|
| Pr. | Abdelhamid GUETTALA | Pr | Université de Biskra | Rapporteur |
| Dr. | Sadok FEIA | MCB | Université de Biskra | Président |
| Dr. | Nabil HOUHOU | MCA | Université de Biskra | Examineur |

Remerciements

Tout d'abord, je remercie le Dieu, mon créateur qui ma donné la santé et les forces et la volonté et le courage d'entamer et de terminer ce mémoire.

*J'adresse le grand remerciement à mon encadreur Pr.**Abdelhamid GUETTALA** qui a proposé le thème de ce mémoire, pour ses conseils et pour la qualité de son encadrement exceptionnel, pour sa patience et sa vigueur.*

Je dédie ce modeste travail à :

A mon exemple éternel, mon soutien moral et source de joie et de bonheur, celui qui s'est toujours sacrifié pour me voir réussir, que dieu te garde dans son vaste paradis, à toi mon père.

A la lumière de mes jours, la source de mes efforts, la flamme de mon cœur, ma vie et mon bonheur ; maman que je l'adore.

*Aux personnes dont j'ai bien aimé la présence dans ce jour, à mes frères **BELGACEM** et **MOHAMED** et mes sœurs **KHAOULA** , **CHOUBAILA** , **KARIMA**, **ZOUHOUR** et **SABRINE**, qui m'adresse au ciel les vœux, je dédie ce travail dont le grand plaisir leurs revient en premier lieu pour leurs conseils, aides, et encouragements.*

A mon oncle et ma grand-mère et ma tante, que dieu les bénisses

Aux personnes qui m'ont toujours aidé et encouragé, qui étaient toujours dans mes côtés, et qui m'ont accompagnaient durant mon chemin d'études supérieures, mes aimables amis, collègues d'étude, et frères de cœur :

SOUHAIL, ZAKARIA, RACHID, AMINE, CHERIF et HAMZA.

A tous mes très chers amis que je considère comme une deuxième famille.

RESUME

Le béton armé est le matériau de construction le plus répandu dans le monde.

Le processus de corrosion est un phénomène électrochimique qui se produit au sein du béton. Il a lieu à la suite de la carbonatation du béton d'enrobage et/ou de la pénétration des ions chlorures. Et pour améliorer la durabilité des ouvrages en béton armé, il est donc nécessaire d'allonger la période d'amorçage de la corrosion en utilisant des bétons peu perméables et un enrobage suffisant.

La carbonatation est une pathologie qui affecte les matériaux à base de ciment tels que les bétons et les mortiers. Les zones carbonatées du matériau deviennent fragiles et perdent ainsi leur pouvoir de protection des aciers contre la corrosion. Les produits de corrosion engendrent alors une dégradation du béton pouvant aboutir à la ruine de la structure.

La carbonatation du béton est un facteur important vis-à-vis de la durabilité des ouvrages. Son action, par abaissement du pH de la phase liquide interstitielle, peut en effet entraîner une corrosion des aciers dans le béton armé.

Cette mémoire bibliographique a pour objectifs de regrouper toutes les informations nécessaires à la compréhension des mécanismes de carbonatation du béton et d'apporter un éclairage nouveau sur les paramètres utiles, et propose quelques dispositions pour s'en prémunir.

ملخص

الخرسانة المسلحة هي أكثر مواد البناء المستخدمة على نطاق واسع في العالم.

عملية التآكل هي ظاهرة كهروكيميائية تحدث داخل الخرسانة. يحدث ذلك نتيجة لكربنة خرسانة حماية حديد التسليح و/أو اختراق أيونات الكلوريد. ولتحسين متانة الهياكل الخرسانية المسلحة من الضروري بالتالي تمديد فترة التآكل باستخدام خرسانة منخفضة النفاذية وخرسانة حماية حديد التسليح كافية.

كربنة الخرسانة هو علم الأمراض الذي يؤثر على المواد الأسمنتية مثل الخرسانة والهاون. تصبح مناطق الكربنة من المادة هشة وبالتالي تفقد قوتها الوقائية لحديد التسليح ضد التآكل. و يتسبب التآكل في تدهور الخرسانة التي يمكن أن تؤدي إلى تدمير الهيكل.

تعتبر كربنة الخرسانة عاملاً مهماً في استمرارية الهياكل. لكن يمكن أن يؤدي عملها في الواقع إلى تآكل حديد التسليح في الخرسانة المسلحة من خلال خفض درجة الحموضة في المرحلة السائلة الخالي.

تهدف هذه الأطروحة الببليوغرافية إلى جمع كل المعلومات اللازمة لفهم آليات كربنة الخرسانة وإلقاء نظرة جديدة على العوامل المفيدة والمؤثرة، وتقتراح بعض الطرق للوقاية من هذه الظاهرة.

Sommaire

| | |
|----------------------------|-----|
| Sommaire..... | I |
| Table des figures..... | V |
| Table des tableaux..... | VII |
| Introduction générale..... | 1 |

Chapitre 01 Etude Bibliographique sur la carbonatation et corrosion

| | |
|--|----|
| 1 Le Béton..... | 5 |
| 1.1 Définition | 5 |
| 1.2 Les constituants du béton..... | 5 |
| 1.2.1 Ciment..... | 6 |
| 1.2.1.1 Composition de ciment..... | 6 |
| 1.2.1.2 Différents types de ciment..... | 7 |
| 1.2.2 Additions minérales..... | 7 |
| 1.2.3 Granulat..... | 7 |
| 1.2.4 Eau de gâchage..... | 7 |
| 1.2.5 Adjuvants..... | 8 |
| 1.3 Principe de la formulation | 8 |
| 1.4 Impact environnemental des bétons..... | 9 |
| 1.4.1 Émissions de CO ₂ des bétons..... | 9 |
| 1.4.1.1 Exemple d'un produit en béton..... | 9 |
| 1.4.1.2 Principale source d'émissions de CO ₂ des bétons..... | 9 |
| 1.4.1.3 Réduction des émissions de CO ₂ des bétons | 10 |
| 1.5 Conclusion..... | 12 |
| 2 Carbonatation du béton..... | 13 |
| 2.1 Introduction..... | 13 |
| 2.2 Définition..... | 14 |
| 2.3 Quelques généralités sur le dioxyde de carbone..... | 16 |
| 2.3.1 Données physico-chimiques pour le gaz carbonique..... | 16 |
| 2.3.2 Le dioxyde de carbone dans l'atmosphère..... | 17 |
| 2.3.3 Le gaz carbonique en phase aqueuse..... | 18 |
| 2.3.3.1 Diffusion du CO ₂ dans le béton et sa dissolution dans la solution interstitielle..... | 18 |
| 2.3.3.2 Effet de la température sur la dissolution du dioxyde de carbone..... | 18 |
| 2.4 Durabilité des bétons : phénomène de carbonatation du béton | 19 |

| | |
|--|----|
| 2.5 Mécanismes de la carbonatation du béton..... | 20 |
| 2.6 Carbonatation des constituants du béton | 21 |
| 2.6.1 Carbonatation de la Portlandite..... | 21 |
| 2.6.2 Carbonatation des autres hydrates des bétons..... | 21 |
| 2.7 Carbonatation du béton contenant des additions minérales..... | 22 |
| 2.7.1 Bétons contenant des cendres volantes..... | 22 |
| 2.7.2 Bétons contenant du laitier de haut-fourneau..... | 23 |
| 2.7.3 Analyse..... | 23 |
| 3 Corrosion des armatures dans le béton armé..... | 24 |
| 3.1 Définition de la corrosion..... | 24 |
| 3.2 Contexte de la dégradation des armatures | 25 |
| 3.3 Aspects normatifs..... | 26 |
| 3.4 Les phases de corrosion (incubation et propagation) | 28 |
| 3.5 Conséquences des désordres provoqués par la corrosion des armatures..... | 29 |
| 3.5.1 L'aspect du parement de l'ouvrage..... | 29 |
| 3.5.2 La sécurité vis-à-vis des usagers..... | 29 |
| 3.5.3 La stabilité de l'ouvrage..... | 30 |
| 3.6 Investigation de la corrosion in situ..... | 31 |
| 3.7 Les mesures de prévention | 31 |
| 3.7.1 Formulation..... | 31 |
| 3.7.2 Mise en œuvre..... | 31 |
| 3.7.3 Barres recouvertes d'époxy..... | 32 |
| 3.7.4 Barres galvanisées à chaud..... | 33 |
| 3.7.5 Barres en acier galvanisé..... | 33 |
| 3.7.6 Inhibiteurs de corrosion..... | 33 |
| 3.7.7 Protection cathodique..... | 33 |
| 3.7.8 Reconstitution de l'enrobage..... | 34 |
| 3.8 Conclusion..... | 35 |

Chapitre 02 Les paramètres influençant et les conséquences de la carbonatation

| | |
|---|----|
| 1 Introduction..... | 37 |
| 2 Principaux paramètres influençant la carbonatation du béton | 38 |
| 2.1 Paramètres intrinsèques aux bétons..... | 38 |
| 2.1.1 Rapport eau/ciment (E/C) | 38 |

| | | |
|-------|--|----|
| 2.1.2 | Le dosage et la nature du ciment..... | 40 |
| 2.1.3 | Additions minérales | 41 |
| 2.1.4 | Résistance à la compression..... | 43 |
| 2.1.5 | la teneur en gaz carbonique dans l'air..... | 44 |
| 2.1.6 | Degré de saturation des pores en eau liquide | 46 |
| 2.2 | Paramètres extrinsèques aux béton..... | 47 |
| 2.2.1 | Cure..... | 47 |
| 2.2.2 | Humidité relative..... | 48 |
| 2.2.3 | Concentration en CO ₂ | 50 |
| 2.2.4 | Température | 50 |
| 3 | Possibilité de ralentir la progression de la carbonatation du béton..... | 52 |
| 4 | Principales conséquences de la carbonatation | 52 |
| 4.1 | Evolution de la microstructure | 52 |
| 4.2 | Diminution du pH et amorçage de la corrosion..... | 54 |
| 4.3 | Modification de la porosité..... | 54 |
| 4.4 | Retrait de carbonatation..... | 55 |
| 4.5 | Modification des propriétés mécaniques | 55 |
| 4.6 | Modification des propriétés de transfert..... | 56 |
| 4.7 | Modification de la teneur en eau | 56 |
| 4.8 | Les fissurations..... | 56 |
| 5 | Techniques d'investigation..... | 57 |
| 6 | Conclusion | 57 |

Chapitre 03 Essai de carbonatation accélérée et méthodes d'assainissement et actions préventives

| | | |
|---------|--|----|
| 1 | Méthodes de caractérisation expérimentale de la carbonatation..... | 60 |
| 1.1 | Analyse thermogravimétrique « ATG » | 61 |
| 1.2 | Microscopie électronique à balayage « MEB »..... | 62 |
| 1.3 | Gammadensimétrie..... | 62 |
| 1.4 | Diffraction des rayons X « DRX » | 62 |
| 1.5 | Résonance magnétique nucléaire « RMN » | 62 |
| 2 | Essai de carbonatation accélérée en laboratoire..... | 63 |
| 2.1 | METHODOLOGIE EXPERIMENTALE | 63 |
| 2.1.1 | Matériaux..... | 63 |
| 2.1.1.1 | Ciments..... | 63 |
| 2.1.1.2 | Eau..... | 64 |
| 2.1.1.3 | Sable..... | 64 |
| 2.1.1.4 | Pierre concassée..... | 64 |
| 2.1.2 | Méthodes d'essais et compositions des bétons..... | 65 |

| | |
|---|----|
| 2.1.3 Essai de carbonatation accélérée en laboratoire..... | 66 |
| 2.1.3.1 Détection de la profondeur de carbonatation par la phénolphthaléine..... | 67 |
| 2.1.4 Absorption initiale d'eau des bétons après carbonatation accélérée..... | 68 |
| 2.1.4.1 La détermination du coefficient d'absorption d'eau initiale | 68 |
| 2.2 RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS | 70 |
| 2.2.1 Influence du rapport E/C et du type de ciment sur la profondeur de carbonatation accélérée..... | 70 |
| 2.2.2 Influence du rapport E/C et type de ciment sur l'absorption initiale des bétons | 71 |
| 2.2.3 Résistance à la compression..... | 72 |
| 2.2.3.1 Influence de la carbonatation sur la résistance à la compression à 2 mois | 72 |
| 2.3 Remarques..... | 75 |
| 3 Méthodes d'assainissement et actions préventives :..... | 76 |
| 3.1 Carbonatation avec éclats et armatures apparentes.. | 76 |
| 3.2 Carbonatation sans ou avec très peu de dégâts..... | 77 |
| 3.3 Actions préventives..... | 77 |
| 3.4 Mesures de Prévention Préconisées Par Les normes..... | 77 |
| 3.4.1 Dosage minimum en ciment et rapport eau-ciment maximum | 78 |
| 3.4.2 Enrobage Des armatures... | 79 |
| 3.4.3 Cure Du béton frais..... | 80 |
| 4 Conclusion..... | 81 |
| Conclusions générales..... | 82 |
| Références Bibliographiques..... | 83 |

Table des figures

| | |
|---|----|
| Figure 1.1 : Modèle conceptuel de la corrosion des aciers dans le béton..... | 3 |
| Figure 1.2 : Les constituants du béton..... | 5 |
| Figure 1.3 : Composition des ciments..... | 6 |
| Figure 1.4 : Impact environnemental des composants du béton [Habert et Roussel , 2008]... | 10 |
| Figure 1.5 : émissions directes de CO ₂ par tonne de ciment [Rompaey , 2006]..... | 11 |
| Figure 1.6 : L'état de corrosion des armatures (par carbonatation) sur une poutre d'auvent en béton armé..... | 13 |
| Figure 1.7 : Coupe théorique d'un mur en béton..... | 14 |
| Figure 1.8: Exemples de corrosion par carbonatation..... | 15 |
| Figure 1.9 : Provenance du CO ₂ | 16 |
| Figure 1.10 :Augmentation de la concentration du CO ₂ dans l'atmosphère à l'échelle..... | 17 |
| Figure 1.11 : Solubilité du CO ₂ dans l'eau en fonction de la température et sous la pression atmosphérique (PCO ₂ = 105 Pa)..... | 19 |
| Figure 1.12: Mécanisme de carbonatation du béton..... | 20 |
| Figure 1.13 : Exemples de détériorations dues à la corrosion des poteaux en béton armé ,dans une bâtisse à Mascara (Photo A.Bensafir)..... | 25 |
| Figure 1.14 : Schéma de la cinétique du comportement des armatures et du béton d'enrobage..... | 27 |
| Figure 1.15 : Délamination dues à la corrosion dans une dalle en béton armé..... | 27 |
| Figure 1.16 : Délamination de la face d'une chevêtre d'un pont en béton armé..... | 28 |
| Figure 1.17: Schéma de dégradation des armatures au cours du temps, d'après Tuutti (1982)..... | 29 |
| Figure 1.18 : Conséquence de la corrosion..... | 31 |
| Figure 1.19 :Mauvais positionnement d'une barre d'armature dans une marche d'escalier..... | 32 |
| Figure 2.1 : Evolution de la carbonatation en fonction du rapport E/C, d'après..... | 38 |
| Figure 2.3 : Evolution de la carbonatation en fonction du rapport E/C pour des conditions de cure différentes..... | 39 |
| Figure 2.4 : Relation entre l'épaisseur carbonatée et le dosage en ciment..... | 41 |
| Figure 2.5 : Influence du pourcentage de fumées de silice sur le pH de solutions interstitielles extraites de pâtes de ciment Portland..... | 42 |
| Figure 2.6 : Evolution de la profondeur carbonatée (en mm) d'un béton à base de CEM I (20°C, 65% HR) en fonction du temps et de la concentration en dioxyde de carbone..... | 45 |

| | |
|--|---------|
| Figure 2.7: Profondeur de carbonatation en fonction du temps pour un béton curé pendant 0, 1, 3, 5, 7 et 28 jours..... | 47 |
| Figure 2.8 : Influence de la cure sur la profondeur carbonatée..... | 48 |
| Figure 2.9 :Degré de carbonatation, à 20°C, en fonction de l'HR mesurés par différents auteurs..... | 49 |
| Figure 2.10 : Influence de l'humidité relative sur la profondeur de carbonatation..... | 50 |
| Figure 2.11 : Influence de la température et de l'humidité relative sur la formation de rouille pour des armatures dans du mortier carbonaté..... | 51 |
| Figure 2.12 : Diagramme de Tuutti modifié : (1) dépassivation des armatures, (2) apparition des fissures,(3) éclatement du béton en parement et (4) ruine [Barogbel-bouny,2005]..... | 54 |
| Figure 3.1 : Essai de carbonatation accélérée..... | 60 |
| Figure 3.2 : Mesure de la profondeur de carbonatation détectée par la phénolphtaléine..... | 61 |
| Figure 3.3 : Courbe granulométrie de la pierre concassée..... | 64 |
| Figure 3.4 : Eprouvettes (10×10×10) cm ³ dans l'enceintes de carbonatation en conditions accélérées..... | 66 |
| Figure 3.5 : Test à la phénolphtaléine et mesure du front de carbonatation..... | 67 |
| Figure 3.6 : Mise en évidence des fronts de carbonatation visualisés suite à la pulvérisation à la phénophtaléine des 03 types de bétons (étuvage , air , eau) en carbonatation accélérée..... | 68 |
| Figure 3.7 : Echantillons de différents bétons soumis à l'essai d'absorption capillaire et le dispositif expérimental (AFNOR)..... | 69 |
| Figure 3.8 (1) et 3.8 (2) : Evolution de la profondeur de carbonatation accélérée avec le temps pour différents type de durcissement et de rapport E/C..... | 71 |
| Figure 3.9 : Effet du rapport E/C et type du ciment sur l'absorption initiale des bétons pour les différents âges..... | 72 |
| Figure 3.10 : (a, b, c et d) : L'effet de la carbonatation sur la variation de la résistance à la compression en fonction du rapport E/C pour les différents bétons élaborés..... | 73 ; 74 |

Table des tableaux

| | |
|--|----|
| Tableau 1.1 : constituants du béton..... | 5 |
| Tableau 1.2 : Conclusion de la corrosion..... | 35 |
| Tableau 2.1 : Profondeurs de carbonatation déduites de la relation précédente en fonction du temps d'exposition pour diverses valeurs de la résistance à la compression. Les valeurs qui figurent entre parenthèses sont obtenues avec l'équation : $e = 125 \exp(-0,05fc^{28})$ | 43 |
| Tableau 2.2 : Volume molaire de la portlandite, la calcite, la vatérite et l'aragonite..... | 53 |
| Tableau 2.3 : Conclusion de la carbonatation..... | 57 |
| Tableau 3.1: Compositions chimiques des ciments..... | 63 |
| Tableau 3.2: Compositions minéralogiques des ciments (%)..... | 63 |
| Tableau 3.3: Propriétés physiques des ciments (%)..... | 63 |
| Tableau 3.4: Compositions des bétons (kg/m ³)..... | 65 |
| Tableau 3.5 : Coefficients d'absorption d'eaux initiales A_{bi} obtenus pour la totalité des échantillons..... | 69 |
| Tableau 3.6 : Classes d'exposition associées à la corrosion par carbonatation..... | 78 |
| Tableau 3.7 : Exigences de durabilité vis-à-vis de la carbonatation associées aux classes d'exposition..... | 78 |
| Tableau 3.8 : Valeurs d'enrobage minimales $C_{min,dur}$ (en mm) requises pour assurer la durabilité du béton armé..... | 79 |
| Tableau 3.9 : Classes de cure..... | 80 |

Introduction générale

La corrosion de l'acier constitue une préoccupation majeure dans la conception, la réalisation et l'entretien des ouvrages de génie civil en béton. Pour la plupart des ouvrages, exposés en milieu atmosphérique, c'est la pénétration du dioxyde de carbone qui conduit à la dépassement des armatures et à l'amorçage de la corrosion. Dans le cas d'ouvrages routiers comme les tunnels et les revêtements en béton armé continu, les parkings souterrains, la concentration plus forte en dioxyde de carbone peut se combiner à une humidité plus importante. Pour les structures situées en environnement marin, l'effet des chlorures s'ajoute à celui du dioxyde de carbone.

Les exigences relatives à la durabilité sont définies dans les normes et recommandations de conception des produits telles que l'EN 206-1, l'EN 13369, les guides de l'AFGC, et de conception des ouvrages telles que les Eurocodes structuraux, le Life Design Code de la FIB et le projet Duracrete. De façon normative elles s'appuient sur des conditions d'exposition, des dosages minimaux en liant, des critères de composition et d'enrobage des armatures. Les recommandations d'une part ajoutent des valeurs cibles pour les propriétés de transfert, d'autre part introduisent plus explicitement des états limites de durabilité, limités à la pénétration des agents agressifs.

Le béton armé consiste en une association dans laquelle l'élément résistant à la compression (le béton) protège contre la corrosion l'élément résistant à la traction (l'acier). En protectrice d'oxydes au niveau de la surface de l'acier. Cet aspect physico-chimique de la protection est complété par la barrière physique que constitue le béton d'enrobage entre l'acier et le milieu extérieur.

On constate cependant que statistiquement, un certain pourcentage des ouvrages construits en béton armé souffre de problèmes de corrosion des armatures. Ces problèmes, s'ils sont détectés trop tard, raccourcissent la durée de vie de l'ouvrage de manière antiéconomique.

Les deux principaux processus, mis en jeu dans la destruction de l'autoprotection induite par les caractéristiques initial du couple acier-béton, sont la carbonatation du béton la pénétration des chlorures.

Les mécanismes de corrosion sont toutefois différents : La carbonatation, et l'abaissement du pH qui en découle, conduit à une corrosion uniforme de l'acier alors que la présence d'ions

chlorure entraîne une corrosion de l'acier par piqûres. Les conséquences seront, elles aussi, différentes : dans le premier cas l'accumulation de produits de corrosion détruira mécaniquement le béton d'enrobage (par éclatement dû au volume des produits de corrosion jusqu'à 14 fois plus important que celui de l'acier d'origine) alors que pour la corrosion par piqûres, c'est la perte de la résistance mécanique de l'acier qui sera en cause.

Dans tous les cas il existe deux étapes (figure 1.1) : Une première, appelée phase d'initiation, qui correspond au temps nécessaire à l'apparition d'une corrosion depuis la mise en œuvre de l'ouvrage. La seconde est définie par la durée de la période de propagation de cette corrosion qui conduira à la ruine totale de l'ouvrage.

La détection d'une corrosion des aciers sur un ouvrage en béton armé intervient bien souvent au cours de la phase de propagation, au moment où les destructions sont visibles (couleurs brunes dues aux rouilles, gonflement et rupture du béton d'enrobage), c'est-à-dire tardivement. Il devient alors très difficile de réparer tant sur le plan technique que financier. C'est pourquoi, il s'avère indispensable de prévoir par des modélisations les effets à long terme des processus de carbonatation et de pénétration des chlorures. Cette prévision, outre la définition des échéances auxquelles des vérifications sur ouvrage s'imposeront, permettra d'ajuster la formulation adéquate du béton en fonction des paramètres utiles qu'il reste à déterminer.

échéances auxquelles des vérifications sur ouvrage s'imposeront, permettra d'ajuster la formulation adéquate du béton en fonction des paramètres utiles qu'il reste à déterminer.

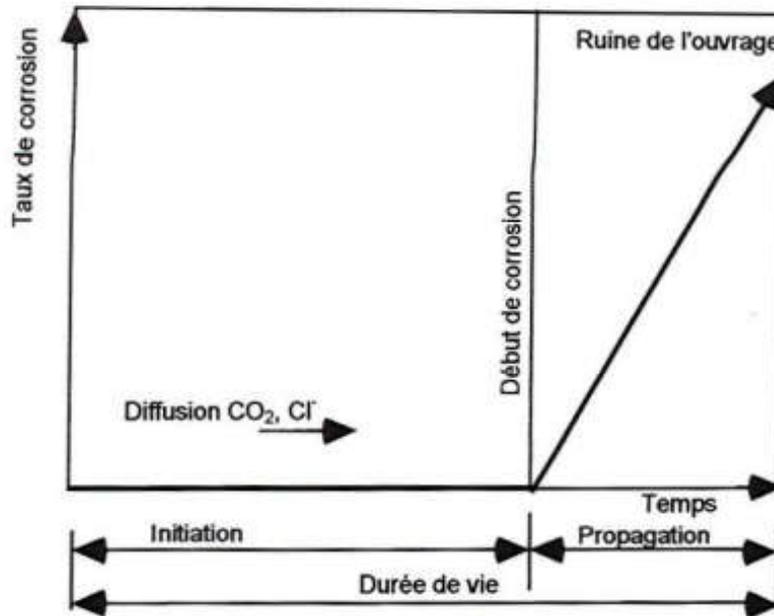


Figure 1.1 : Modèle conceptuel de la corrosion des aciers dans le béton

Comme la phase d'initiation va dépendre en premier lieu des lois de diffusion dans le béton d'enrobage, les processus moteurs (carbonatation, diffusion des chlorures) et les conséquences (corrosion) seront influencée par différents paramètres :

- intensité des agressions extérieures ;
- protection non contre les agressions extérieures;
- enrobage faible ;
- porosité du béton fonction de la teneur en ciment, du rapport eau sur ciment , de la puissance de vibration du béton frais , de la cure du béton, etc .

de plus, le béton d'enrobage peut subir depuis l'extérieur des modifications par abrasion, par attaque chimique (acides, sulfates, nitrates, etc), par pénétration d'eau , par gel-dégel, etc. Ces modifications, chimique ou texturales , vont , suivant les cas, amplifier ou freiner les processus de carbonatation et de pénétration des ions chlorure.

Dans cette synthèse bibliographique, nous allons uniquement traiter la carbonatation du béton. Nous évoquerons les sources extérieures initiatrices, les réactions chimique avec le matériau béton, l'influence de divers paramètres ainsi que la modélisation des mécanismes de carbonatation.

Chapitre 01

Etude Bibliographique sur la carbonatation et corrosion

1 Le Béton

1.1 Définition

Le béton est un matériau composite aggloméré constitué de granulats durs de diverses dimensions collés entre eux par un liant. Dans les bétons courants, les granulats sont des grains de pierre, sable, gravier, cailloux et le liant est un ciment, généralement, un ciment portland. Les composants sont très différents : leur masse volumique vont, dans les bétons courants de 1 (eau) à 3 (ciment) t/m^3 . Si le type de liant utilisé n'est pas un ciment, on parle alors, selon le liant utilisé, de béton de résine, de béton d'hydrocarboné, de béton d'argile, etc. Dans le béton où une très grande compacité est recherchée (béton HP par exemple), la dimension des éléments les plus fins peut descendre en dessous de 0,1 mm (fillers, fumée de silice). [1]

De même les granulats très légers ont des masses volumiques inférieures à 100 kg/m^3 . Ordre de grandeur des proportions des constituants d'un béton courant, présentés dans le tableau ci-dessous.

| Constituants | Eau | Air | Ciment | Granulats |
|--------------|---------|-------|--------|-----------|
| Volume(%) | 14 - 22 | 1 - 6 | 7 - 14 | 60 - 78 |
| Poids (%) | 5 - 9 | / | 9 - 18 | 63 - 85 |

Tableau 1.1 : constituants du béton[1]

1.2 Les constituants du béton

Les bétons sont constitués de ciment, de granulats et d'eau. Ils peuvent éventuellement contenir des additions minérales et des adjuvants. [1] [2]

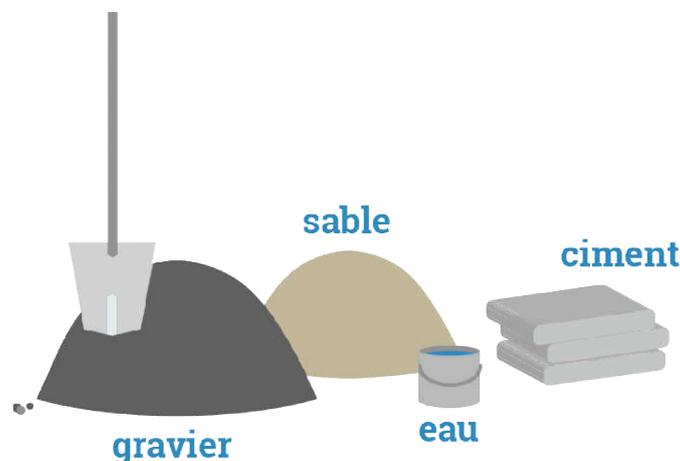


Figure 1.2 : Les constituants du béton

1.2.1 Ciment

Le ciment est un matériau généralement composé d'argile et de calcaire. Parmi les composants du béton, le ciment est l'un des plus importants. Le ciment est ce matériau qui a pour rôle de lier les différents constituants du béton entre eux. Le ciment confère également au béton certaines caractéristiques essentielles telles que sa résistance.

1.2.1.1 Composition de ciment

La composition classique du ciment est de 80 % de calcaire et 20 % d'argile. Les deux éléments sont broyés, cuits à très haute température, puis le résultat (clinker) est à nouveau broyé. Lors du broyage du clinker, des ajouts peuvent être faits pour optimiser les caractéristiques de prise et les caractéristiques mécaniques du ciment (et par conséquent les caractéristiques du béton lorsque le ciment est utilisé dans sa fabrication). On distingue ainsi 5 types de ciments, selon les constituants utilisés et leurs proportions.

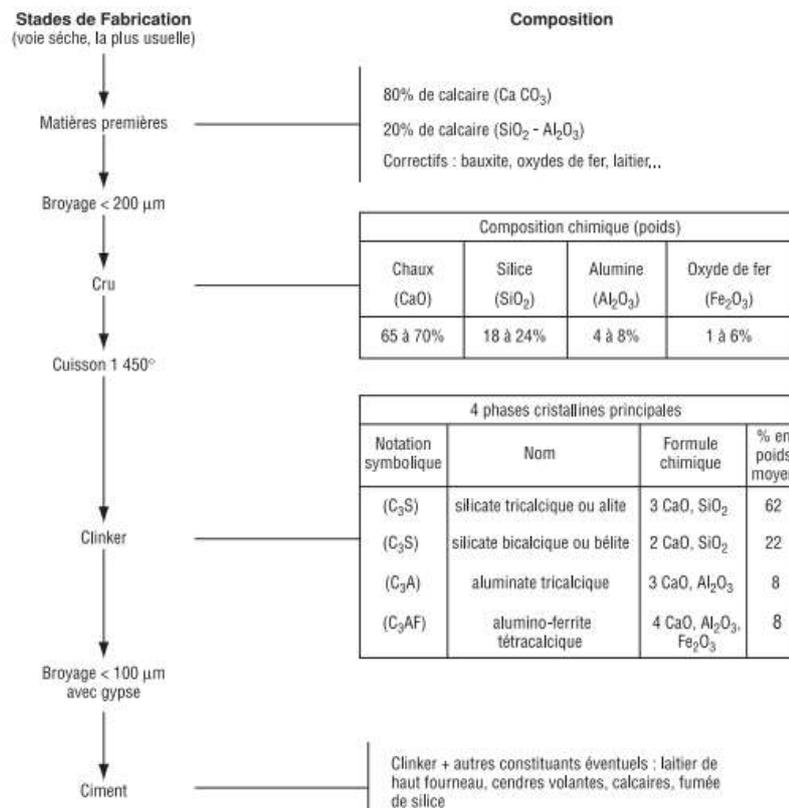


Figure 1.3 : Composition des ciments

1.2.1.2 Différents types de ciment

- Ciment Portland Artificiel (CEM I)
- Ciment Portland Composé (CEM II)
- Ciment de Haut-Fourneau (CEM III)
- Ciment Pouzzolanique (CEM IV)
- Ciment Composé (CEM V)

1.2.2 Additions minérales

Les additions minérales sont des poudres utilisées dans le ciment ou directement dans le béton, en substitution partielle du ciment ou en complément, afin d'améliorer certaines propriétés du béton ou pour lui conférer des propriétés particulières. Elles sont aussi employées pour des raisons économiques, comme les cendres volantes qui sont des résidus de la combustion du charbon pulvérisé dans les centrales thermiques.

Les additions minérales peuvent être des cendres volantes, des fumées de silice, des laitiers de haut-fourneau, des additions calcaires ou des additions siliceuses.

Deux additions minérales sont utilisées dans ce travail : les cendres volantes et les laitiers de haut-fourneau. [2]

1.2.3 Granulat

On appelle « granulats » les matériaux inertes, graviers ou cailloux qui entrent dans la composition des bétons : c'est l'ensemble des grains compris entre 0 et 125mm dont l'origine peut être naturelle, artificielle ou provenant du recyclage des matériaux qui sont quelque fois encore appelés « agrégats » Cependant, cette appellation est abandonnée depuis fort longtemps ; certains persistent à l'utiliser ; l'appellation « agrégats » vicilusage tout à fait impropre, agrégats ; réunion de substances diverses formant un tout non homogène. Les granulats sont classés en plusieurs catégories avec des spécifications particulières pour chacune d'elles. [1]

1.2.4 Eau de gâchage

Les caractéristiques de l'eau de gâchage sont normalisées par la norme NF P 18-303 DE 1941. Une prochaine norme (dont le numéro pourrait être EN1008), en cours de préparation, précisera les critères d'évaluation retenus pour de son aptitude à être utilisée pour la confiance des bétons.

L'ancienne norme étant très sommaire, les indications qui suivent donnent des précisions sur les critères qui pourraient être retenus, pour définir la qualité d'une eau et les valeurs limitées à respecter suivant les types du béton à confectionner.

Pour convenir à la confection du béton, les eaux ne doivent contenir ni :

Composés qui risquent d'attaquer chimiquement le ciment, les granulats ou les armatures, ni particules en suspension dont la quantité pourrait modifier ses qualités originales. La norme P18-303 limite, à cet effet, le pourcentage de matières en suspension à 2 ou 5g/l et la teneur en sels dissous à 15 ou 30mg/l suivant la nature du béton, précontraint ou non armé. [1]

1.2.5 Adjuvants

Les adjuvants sont classés en trois grandes catégories [NF EN 934-2, 2002] :

1. Adjuvants modifiant l'ouvrabilité du béton (plastifiants réducteurs d'eau, super plastifiants).
2. Adjuvants modifiant les cinétiques de prise et de durcissement (accélérateurs de prise, accélérateurs de durcissement, retardateurs de prise) .
3. Adjuvants modifiant certaines propriétés du béton (entraîneurs d'air, générateurs de gaz, hydrofuges de masse, etc.). [2]

1.3 Principe de la formulation

L'objectif de la formulation est de déterminer les proportions de chaque constituant permettant d'obtenir le béton le plus économique et respectant le cahier des charges (critères en termes de performances mécaniques, physiques et de durabilité) tant à l'état frais qu'à l'état durci.

Formuler un béton consiste à résoudre un système composé de « n » équations à « n » inconnues que sont, par exemple, les volumes des constituants pour 1 m³ de béton. Le problème peut aussi s'écrire sur les masses des constituants dans la mesure où leurs masses volumiques sont connues.

Une première équation peut être écrite en donnant la somme des volumes des constituants égale à 1 m³. Les équations restantes sont obtenues à partir du cahier des charges (affaissement, f_{c28} , etc.) et/ou des critères de la norme NF EN 206-1 [NF EN 206-1, 2004].

Diverses méthodes de formulation existent, elles présentent des différences dans la stratégie adoptée pour aborder le problème [Dreux, 1982 ; Baron et al., 1996 ; de Larrard, 2000]. [2]

1.4 Impact environnemental des bétons

1.4.1 Émissions de CO₂ des bétons

1.4.1.1 Exemple d'un produit en béton

Une donnée d'inventaire de cycle de vie d'un produit en béton relative aux émissions de CO₂ est présentée dans ce paragraphe. Elle est extraite d'une déclaration environnementale élaborée à partir de données fournies par le Syndicat National du Béton Prêt à l'Emploi.

L'unité fonctionnelle consiste à assurer la fonction d'un mur porteur pour un bâtiment de type « R+4 ou plus » sur 1 m² de paroi, d'épaisseur 15 cm, pendant une annuité, tout en assurant une isolation acoustique (53 dB) et une isolation thermique (0,075 m² K/W). Le mur est en béton prêt à l'emploi, de classe d'exposition XF 1, de classe de résistance C 25/30, fabriqué selon la norme NF EN 206-1 avec un ciment Portland composé CEM II. La durée de vie typique est de 100 ans.

Il ressort de l'inventaire de cycle de vie que 45 kg équivalent CO₂ sont émis durant toute la durée de vie typique. Les émissions directement associées au matériau béton sont réparties comme suit : 68 % lors de la production, 25 % lors de la mise en œuvre, 2 % lors du transport et 5 % lors de la fin de vie.

À l'étape de production du béton, les principales sources d'émissions de CO₂ sont : 88 % lors de la production du ciment, 6 % lors de la production des granulats et 6 % lors du transport amont. [2]

1.4.1.2 Principale source d'émissions de CO₂ des bétons

Le précédent exemple montre que c'est la fabrication du ciment qui est la principale source d'émissions de CO₂ liées au matériau béton.

D'autres analyses de cycle de vie de structures en béton trouvent qu'environ 85 % des émissions de CO₂ proviennent de la production du ciment.

Ces résultats sont confirmés par ceux dont font état Flower et Sanjayan, Habert et Roussel ainsi que Collins, qui ont abouti à la conclusion que parmi les différents composants du béton, le ciment représente la source principale d'émissions de CO₂ et d'impacts environnementaux en général (Figure 1.4).

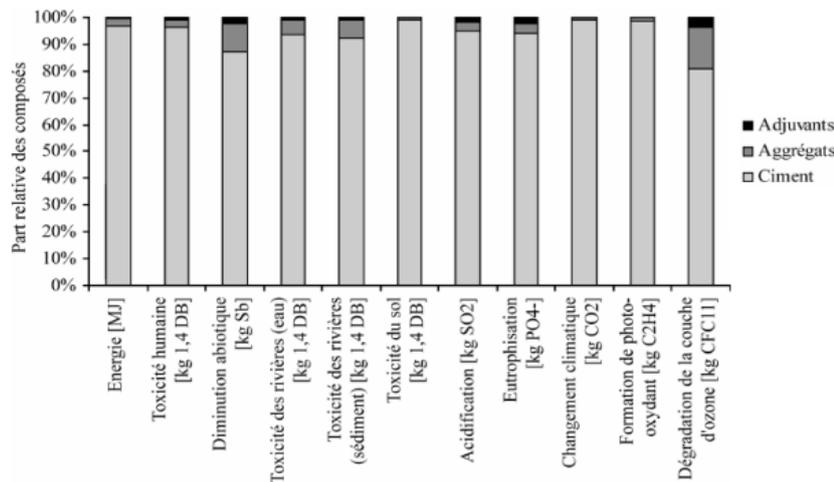


Figure 1.4 : Impact environnemental des composants du béton.[2]

La part importante du ciment dans les émissions de CO₂ du béton s'explique par les fortes émissions liées à sa production en cimenterie. En effet, la quantité de CO₂ émise lors de la fabrication du ciment correspond en moyenne mondiale à 810 kg de CO₂ émis par tonne de clinker.

Ces émissions de CO₂ proviennent pour environ 30 % des combustibles brûlés pour la cuisson et environ 70 % de la décarbonatation du calcaire qui intervient lors de la transformation des matières premières du clinker en ses phases constitutives. [2]

1.4.1.3 Réduction des émissions de CO₂ des bétons

Par conséquent, le ciment apparaît comme un paramètre clé pour réduire les émissions de CO₂, et plus généralement l'impact sur l'environnement du béton. Deux solutions peuvent alors être adoptées :

- **En cimenteries**

En améliorant les performances des procédés de cuisson, l'industrie cimentière européenne a atteint le niveau de 600 kg de CO₂ par tonne de ciment.

En ajoutant des additions minérales au clinker : fillers calcaires, ajouts pouzzolaniques (fumées de silice, cendres volantes, schistes calcinés) ou ajouts potentiellement hydrauliques (laitiers de haut-fourneau), les différents types de ciment sont obtenus. En moyenne, ces ciments avec ajouts pourraient réduire les émissions mondiales dues au clinker d'environ 21%.

Le graphique de la Figure 06 conforte le chiffre avancé par Hendriks et al.. En effet, cet histogramme présente une comparaison des émissions de CO₂ théoriques lors de la fabrication de différents types de ciment. La teneur massique en laitier dans chaque type de ciment augmente de 0 pour un ciment CEM I 52.5 N à plus de 81 % pour un ciment CEM III/C.

La figure montre clairement que la quantité de CO₂ émise diminue en augmentant la teneur en laitier dans le ciment. Néanmoins, cette solution est restée peu efficace en France dans la mesure où le clinker représente encore plus de 80 % des 18 millions de tonnes de ciments produites en 2010.

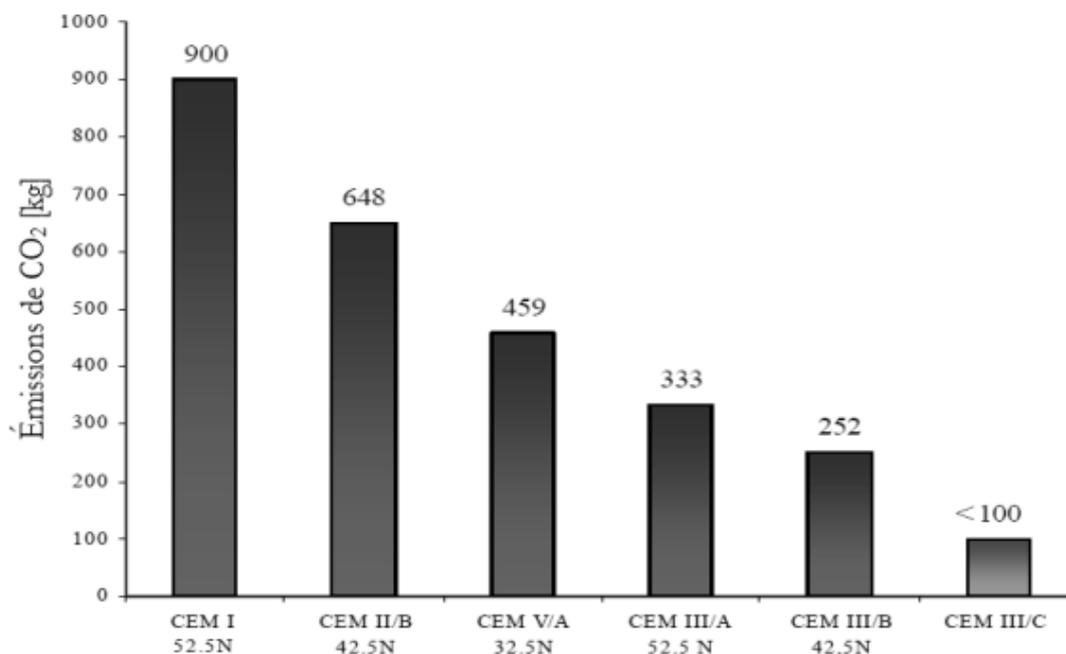


Figure 1.5 : émissions directes de CO₂ par tonne de ciment [2]

– **En centrales à béton**

Une autre solution pour réduire les émissions de CO₂ du béton peut être adoptée directement en centrales à béton. Elle consiste à réduire le dosage en ciment du béton en remplaçant une partie du ciment par des additions minérales durant le malaxage. Ainsi Rosković et Bjegović ont montré qu'il était possible de réduire les émissions de CO₂ de 24,6 % avec 25 % de substitution du ciment par des cendres volantes et de 29 % avec 30 % de substitution par du laitier de haut-fourneau.

Flower et Sanjayan ont trouvé que les émissions de CO₂ pouvaient diminuer de 13 à 15 % avec une substitution de 25 % par des cendres volantes et de 22 % avec 40 % de remplacement par du laitier de haut-fourneau. Collins a conclu à une possible réduction des émissions de 19 % avec un remplacement de 20 % par des cendres volantes, de 29 % avec 35 % de substitution par du laitier de hautfourneau et de 55 % avec 65 % de remplacement par du laitier de haut-fourneau. [2]

1.5 Conclusion

Optimiser le matériau béton d'un point de vue environnemental, en substituant une partie de son ciment par des additions minérales, s'avère nécessaire à la lumière de l'information primordiale tirée de ce chapitre, qu'est le fait que parmi les constituants du béton, le ciment représente la principale source d'impacts environnementaux.

Cette démarche est autorisée par la norme NF EN 206-1 à travers le concept de performance équivalente du béton. Un principe selon lequel le béton peut être formulé avec une forte teneur en addition minérale, sous réserve de prouver qu'il a une équivalence de performances avec celle d'un béton de référence, et notamment en termes de durabilité.

L'équivalence de performances peut alors être vérifiée vis-à-vis de la carbonatation, la plus répandue et la principale sollicitation environnementale des matériaux cimentaires. Ce processus de carbonatation est abordé dans le chapitre suivant.

2 Carbonatation du béton

2.1 Introduction

Dès le début de l'emploi du « béton moderne » au siècle passé, on a été confronté à des problèmes de durabilité: dégradation par certaines eaux naturelles, eau de mer, sels, gel. Cependant, à l'exception de cas particuliers bien connus, on a longtemps pensé que le béton était un matériau pratiquement indestructible. Ce n'est que récemment, vingt à trente ans, qu'on s'est préoccupé des problèmes de durabilité. Des examens soigneux de ponts et d'autres structures qui devaient être démolis et remplacés par de nouvelles constructions, ont montré assez clairement que, à cause de la corrosion, la durée de vie d'une structure était considérablement plus courte que celle prévue initialement. De plus, les structures en béton sont devenues de plus en plus minces et sont souvent exposées à des conditions climatiques sévères (structures en mer) et aux environnements pollués des zones industrielles. La durabilité du béton armé ou non, dans des conditions climatiques normales et extrêmes, est donc devenue un sujet d'intérêt majeur et, par conséquent, un domaine de recherche largement exploré.

La carbonatation du béton est une réaction qui est pratiquement sans conséquence pour le béton lui-même. Par contre, quand il contient des armatures il n'en est plus de même. L'acier, qui est protégé dans le béton non carbonaté, peut subir la corrosion lorsque le béton se carbonate. De nombreux facteurs jouent un rôle dans ce cas qualité du béton, couverture des armatures, présence de chlorures, humidité, température, pollution, etc. [3]



Figure 1.6 : L'état de corrosion des armatures (par carbonatation) sur une poutre d'auvent en béton armé. [4]

Dans cet article, nous décrivons le processus de carbonatation du béton de corrosion de l'acier d'armature et de l'influence de la carbonatation sur corrosion. De plus, les précautions à prendre et les méthodes de réparation seront également décrites.

2.2 Définition :

Le dioxyde de carbone (CO_2) présent dans l'air pénètre sous forme gazeuse dans le béton par le réseau poreux ou fissural. En présence d'eau (qui existe au moins dans les pores les plus petits), il provoque une réaction chimique avec la pâte de ciment hydratée, dite de carbonatation. Cette réaction transforme les produits d'hydratation, notamment la portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ et les C-S-H en carbonates de calcium CaCO_3 . Ce processus, nommé carbonatation, engendre la réduction du pH de la solution interstitielle du matériau d'une valeur avoisinant 13 à environ 9. Non protégées par le milieu initialement très basique, les armatures s'exposent à la corrosion qui provoque des désordres dans la construction par gonflement et fissuration. Cette carbonatation a pour conséquence une modification lente de la structure du matériau et un changement de son comportement.[5]

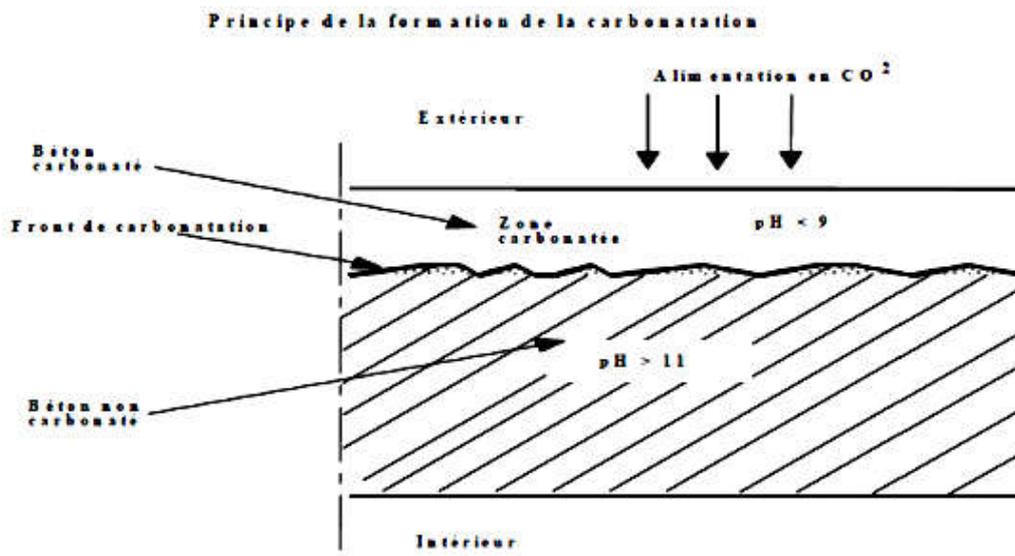


Figure 1.7 : Coupe théorique d'un mur en béton.[6]

La carbonatation est à l'origine de deux principaux effets qui s'avèrent antagonistes :

- elle est bénéfique en améliorant la résistance mécanique et la résistance aux eaux agressives,

- elle est néfaste en réduisant la protection chimique des armatures.



Figure 1.8: Exemples de corrosion par carbonatation[5]

La carbonatation des bétons est ainsi un phénomène incontournable participant au cycle du calcium à la surface de notre planète. La véritable question, dans ce cadre, n'est alors pas de savoir si un matériau cimentaire va ou non se carbonater, mais sur quelle échelle de temps il va le faire et quelles en seront les conséquences. Il est alors possible de distinguer deux échelles de temps fondamentales.

La première échelle de temps concerne la durée de vie du matériau cimentaire dans l'ouvrage construit ou le bâtiment en service. Cette échelle de temps est de l'ordre d'une centaine d'années. Pendant cette durée, le matériau se carbonate sous l'effet, en général, du CO₂ atmosphérique.

Les conséquences de cette carbonatation, comme nous allons le voir plus loin, sont variées et leurs prédictions sont complexes.

Dans cette phase, les ingénieurs sont particulièrement attentifs aux modifications chimiques liées à la carbonatation de la composition de l'eau située dans la porosité du matériau. Si ces

modifications dépassent certaines limites, une corrosion des armatures dans le cas d'un béton armé ou un développement de microorganismes dans le cas d'un enduit de façade peuvent être favorisés.[7]

2.3 Quelques généralités sur le dioxyde de carbone

Le dioxyde de carbone est produit par différents processus : la combustion du charbon et des hydrocarbures, la fermentation des liquides et la respiration des êtres vivants. On le trouve en faible proportion dans l'atmosphère, il est assimilé par les plantes qui, à leur tour, produisent de l'oxygène par photosynthèse (cf. Figure 1.8).

Le CO₂ gazeux a une odeur légèrement irritante, il est incolore et plus lourd que l'air. Il gèle à -78,5°C pour former de la neige carbonique. En solution aqueuse, il forme de l'acide carbonique, qui est trop instable pour pouvoir être isolé facilement.[5]

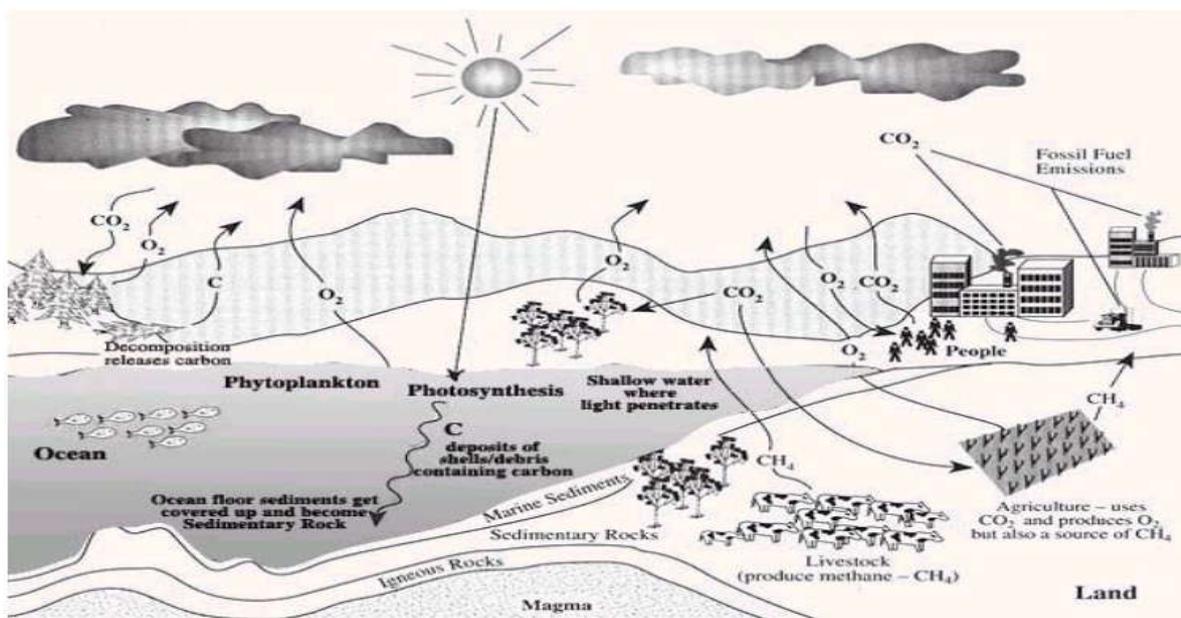


Figure 1.9 : Provenance du CO₂ [5]

2.3.1 Données physico-chimiques pour le gaz carbonique

Le diamètre moléculaire du CO₂ gazeux est de 0,426 nm, son libre parcours moyen sous une pression de 10⁵ Pa et à 0 °C est de 63 nm.

Le coefficient de diffusion du dioxyde de carbone dans l'air et sous une pression de 10⁵ Pa est de 1,39.10⁻⁵ m².s⁻¹ à 0 °C et de 1,60.10⁻⁵ m².s⁻¹ à 20 °C.

Sa viscosité dynamique dans les mêmes conditions est respectivement égale à 1,39 et à 1,48 Pa.s.[8]

2.3.2 Le dioxyde de carbone dans l'atmosphère

La concentration du CO₂ dans l'atmosphère est un facteur principal qui agit sur la vitesse de carbonatation du béton. Elle favorise la carbonatation et par suite la corrosion des armatures dans le béton.

En milieu rural, la fraction volumique en CO₂ est d'environ 0,03%. Dans un local mal ventilé, ce pourcentage peut atteindre 1% ; dans les grandes villes, le pourcentage moyen est de 0,3% et peut atteindre 1% [Thiery, 2005 ; Chang et al., 2004]. La paroi des tunnels routiers est un exemple de béton soumis à une concentration élevée de CO₂.

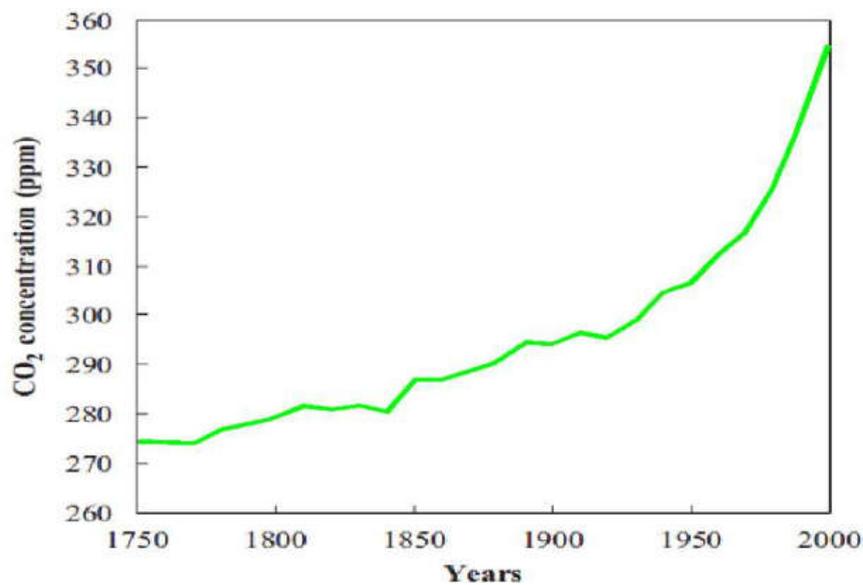


Figure 1.10 : Augmentation de la concentration du CO₂ dans l'atmosphère à l'échelle mondiale [4]

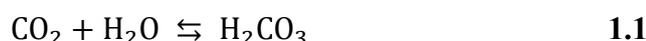
Le réchauffement de la planète est dû à l'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre, tel que le CO₂ : il s'agit d'un des problèmes environnementaux les plus critiques pour le 21ème siècle. La concentration de CO₂ dans la couche atmosphérique a augmenté constamment depuis la révolution industrielle (Figure 1.10). Depuis 1950 elle augmente de 0,5 % par année sur une échelle globale, et particulièrement dans les zones urbaines. Il est probable que le changement climatique ait ainsi dans le futur une incidence sur la carbonatation des structures en béton. [4]

2.3.3 Le gaz carbonique en phase aqueuse

2.3.3.1 Diffusion du CO₂ dans le béton et sa dissolution dans la solution interstitielle

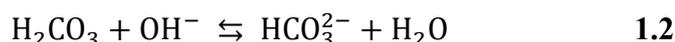
Sous l'effet d'un gradient de concentration, le dioxyde de carbone atmosphérique diffuse dans le réseau poral du béton et se dissout dans la solution interstitielle. Selon le pH de la solution interstitielle, le CO₂ en solution peut prendre différentes formes [Pascal, 1968 ; Valsaraj, 199]:

1. Il se forme de l'acide carbonique si $\text{pH} < 4$

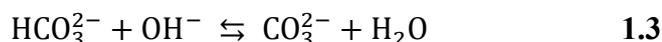


Dans l'eau, à pH élevé, l'acide carbonique H₂CO₃ se comporte comme un diacide faible instable dont la dissociation a lieu en deux phases désignées par les réactions suivantes :

2. Il se forme de l'ion bicarbonate si $6 < \text{pH} < 10,5$



3. Il se forme de l'ion carbonate si $\text{pH} > 10,5$



A chacune de ces deux réactions de dissociation (1. 2) et (1. 3) correspond une acidité de l'acide carbonique H₂CO₃. A l'équilibre, ces deux acidités ont des domaines de prédominance disjoints : à 20°C, pour un pH supérieur à 10,3 c'est l'ion CO₃²⁻ qui prédomine et pour un pH compris entre 6,3 et 10,3 c'est l'ion HCO₃²⁻.

Cette dernière configuration prédomine dans le cas de bétons sains, avant toute attaque chimique.[5][2]

2.3.3.2 Effet de la température sur la dissolution du dioxyde de carbone

La solubilité du gaz carbonique dans l'eau sous la pression atmosphérique ($\text{pCO}_2=105$) décroît rapidement avec la température et peut s'exprimer selon Chaussadent suivant la relation empirique (avec T en degré Kelvin) [5]

$$S \text{ (mol.l}^{-1}\text{)} = 5,283.10^{-6} e^{(2608,2/T)}$$

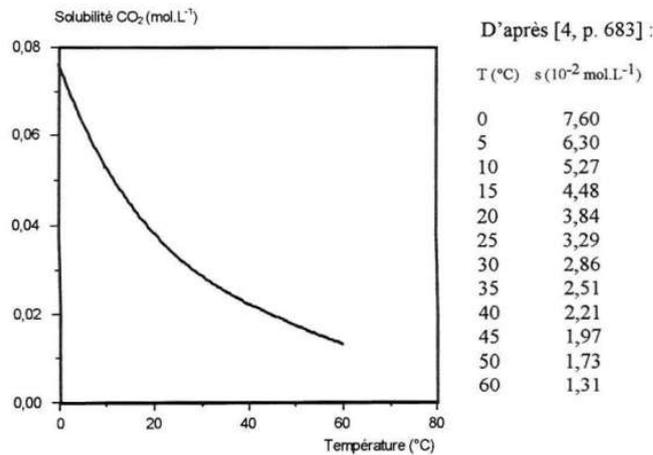


Figure 1.11 : Solubilité du CO₂ dans l'eau en fonction de la température et sous la pression atmosphérique ($P_{CO_2} = 10^5 Pa$).[8]

La solubilité du gaz carbonique étant l'étape initiale du processus global de carbonatation du béton, la vitesse de carbonatation sera donc plus importante en hiver qu'en été

2.4 Durabilité des bétons : phénomène de carbonatation du béton

La norme NF X 50-501 [NF X 50-501, 1982] définit la durabilité comme l'aptitude d'une entité à accomplir une fonction dans des conditions données d'utilisation et de maintenance, jusqu'à ce qu'un état-limite soit atteint.

Selon la norme NF EN 206-1, la durée de vie d'un béton est la période durant laquelle son comportement dans la structure demeurera à un niveau compatible avec les exigences de performance de la structure si celle-ci est correctement entretenue.

Les qualités du béton en compression, alliées à la bonne résistance des armatures à la traction, ont fait du béton armé un matériau de prédilection. Mais au cours de son utilisation, celui-ci connaît plus ou moins rapidement des altérations. Le point faible du béton armé en environnement agressif est son armature dont la corrosion constitue un danger potentiel pour la conservation et la stabilité des ouvrages. L'armature enrobée de béton bénéficie naturellement d'une haute protection contre la corrosion. En effet, le caractère fortement basique de ce milieu ($pH \approx 12$ à 13) est à l'origine de la formation d'un film protecteur

enveloppant l'armature : la couche passivante. Cependant certains agents agressifs peuvent traverser le béton d'enrobage et dépassiver l'armature. La carbonatation du béton par le dioxyde de carbone atmosphérique CO_2 est l'une des principales causes de ce phénomène.[2]

2.5 Mécanismes de la carbonatation du béton

La carbonatation des bétons est la réaction de neutralisation des bases présentes dans le ciment hydraté, essentiellement la Portlandite et les CSH, par le dioxyde de carbone naturellement présent dans l'air à raison d'environ 0,035 % en volume.

Le processus de carbonatation peut être succinctement décrit comme suit : le dioxyde de carbone atmosphérique diffuse dans le béton sous forme gazeuse, se dissout dans la solution interstitielle et réagit avec les hydrates de la pâte de ciment, notamment la Portlandite, pour former des carbonates de calcium CaCO_3 qui existent à l'état solide sous trois formes cristallines différentes : la calcite, l'aragonite et la vaterite. Cette réaction s'accompagne d'une diminution du pH de la solution interstitielle à une valeur inférieure à 9, dépassivant ainsi les aciers dans le cas du béton armé ou précontraint et favorisant, par conséquent, leur corrosion.

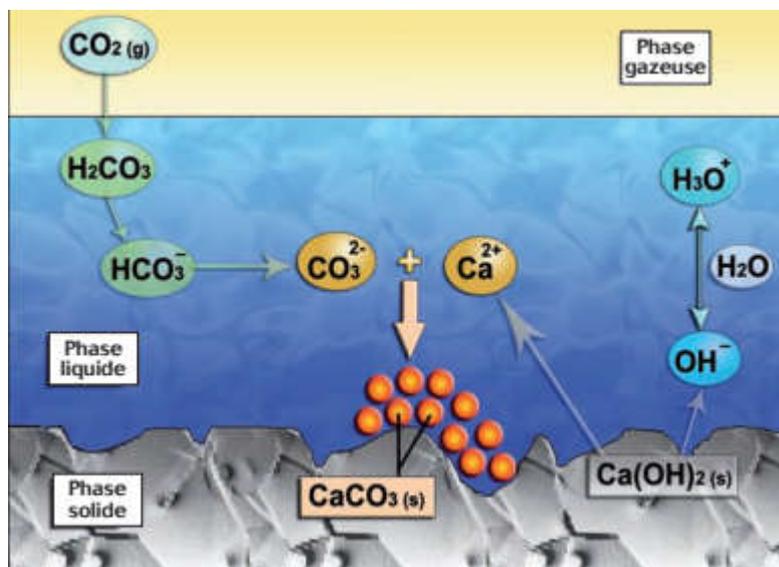


Figure 1.12: Mécanisme de carbonatation du béton [5]

2.6 Carbonatation des constituants du béton

La carbonatation est un processus physico-chimique complexe qui met en jeu des réactants et réactifs à l'état gazeux (CO_2 , H_2O), dissous (CO_2 , OH^- , etc...) et solides (les composés anhydres et hydratés du béton).[5]

2.6.1 Carbonatation de la Portlandite

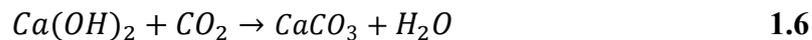
Parallèlement à la réaction (1.3) où les ions hydroxyle (OH^-) sont consommés, les ions carbonate (CO_3^{2-}) réagissent avec les ions calcium (Ca^{2+}), naturellement présents du fait de la dissolution partielle de la Portlandite (équilibre chimique), selon la réaction [2] :



Ceci crée un déséquilibre chimique qui favorise la dissolution de la Portlandite :



Le mécanisme de carbonatation de la Portlandite est souvent simplifié en écrivant :



2.6.2 Carbonatation des autres hydrates des bétons

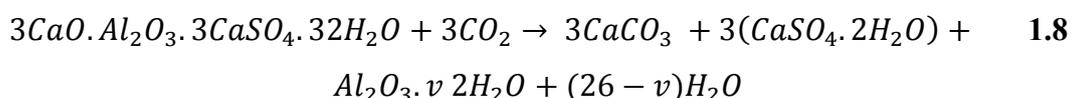
La Portlandite est l'hydrate qui se carbonate le plus rapidement. Toutefois, les autres produits d'hydratation réagissent aussi en présence de CO_2 .

Les silicates de calcium hydratés (CSH) se carbonatent selon la réaction suivante :



avec : C = CaO ; S = SiO₂ et H = H₂O.

La carbonatation du monosulfoaluminate de calcium (AFm) produit du gypse. La décomposition par carbonatation du trisulfoaluminate de calcium (AFt) forme de l'acalcite, du gypse et un gel d'alumine suivant la réaction :



De par leur faible présence dans les bétons, la carbonatation de ces hydrates est souvent négligée.[2]

2.7 Carbonatation du béton contenant des additions minérales

Dans les paragraphes suivants, sont présentés quelques résultats de travaux expérimentaux sur la carbonatation du béton aux cendres volantes et au laitier de haut-fourneau. [2]

2.7.1 Bétons contenant des cendres volantes

Selon les travaux de Thomas et Matthews, bien que des bétons à 15 et 30 % de substitution massique du ciment Portland par des cendres volantes se carbonatent relativement plus que des bétons au ciment Portland de mêmes résistances, la différence est très mineure. En revanche, elle est plus importante lorsque les bétons contiennent 50 % de cendres volantes ; ces essais de carbonatation ayant été menés en conditions aussi bien naturelles qu'accéléérées.[2]

D'après Khan et Lynsdale, la profondeur de carbonatation naturelle, mesurée sur des bétons de 2 ans, augmente linéairement avec l'augmentation du taux de substitution massique du ciment Portland par des cendres volantes. Pour chaque augmentation de 10 % du taux de substitution, la profondeur de carbonatation augmente d'environ 0,3 mm. Atiş [Atiş, 2003] montre qu'un béton à 70 % de substitution massique du ciment Portland par des cendres volantes se carbonate, en conditions accélérées, plus qu'un béton au seul ciment Portland. Toutefois, à uniquement 50 % de substitution, l'effet opposé se produit ou bien les deux bétons ont des profondeurs de carbonatation comparables.

Selon Sisomphon et Franke, des bétons à 25 et 50 % de substitution massique du ciment Portland par des cendres volantes se carbonatent, en conditions accélérées et naturelles, plus qu'un béton au ciment Portland. Les auteurs montrent aussi que la différence est plus importante dans le cas de 50 % de cendres volantes.

D'autres travaux concluent que la résistance à la carbonatation est d'autant plus faible que le taux de substitution du ciment Portland par des cendres volantes est plus élevé.

2.7.2 Bétons contenant du laitier de haut-fourneau

Litvan et Mayer montrent que des bétons à base de ciment au laitier de haut-fourneau se carbonatent, après dix-huit années d'exposition en conditions naturelles, d'environ 70 % plus que des bétons au ciment Portland.

Selon Osborne, des bétons à 70 et 80 % de substitution massique du ciment Portland par du laitier de haut-fourneau se carbonatent, en conditions naturelles, beaucoup plus que des bétons au seul ciment Portland. L'auteur conclut dans d'autres de ses travaux que des bétons à 50 % de substitution du ciment Portland par du laitier de haut-fourneau montrent la même résistance à la carbonatation naturelle que des bétons au ciment Portland.

Thomas et al. sont arrivés à la même conclusion qu'Osborne concernant des bétons à 50 % de substitution par du laitier de haut-fourneau.

Sisomphon et Franke trouvent qu'un béton à base de ciment au laitier de haut-fourneau (CEM III/B) se carbonate, en conditions accélérées et naturelles, d'environ 65 % plus que des bétons au ciment Portland.

D'après Bouikni et al. des bétons à 65 % de substitution massique du ciment Portland par du laitier de haut-fourneau se carbonatent, en conditions naturelles, entre 15 et 30 % plus que des bétons à 50 % de substitution.

2.7.3 Analyse

Il ressort de cette synthèse de résultats de travaux sur la carbonatation des bétons aux cendres volantes et au laitier de haut-fourneau, que ces deux additions minérales diminuent la résistance des bétons à la carbonatation. Toutefois, les taux de substitution à partir desquels leur effet devient significatif diffèrent selon les auteurs.

Ces bétons ont une faible teneur en clinker dans la mesure où une partie de leur ciment est remplacée par des cendres volantes ou du laitier de haut-fourneau. Par conséquent, ils ont une faible quantité de Portlandite.

Sachant que la cinétique de carbonatation est plus importante lorsque la quantité de Portlandite (principal produit carbonatable) présente est plus faible, la cinétique de carbonatation est donc accélérée en présence de cendres volantes et de laitier de haut fourneau.

De surcroît, les bétons incorporant des cendres volantes ont une plus faible teneur en Portlandite car celle-ci réagit avec la silice contenue dans les cendres volantes, de sorte qu'une plus petite quantité de CO_2 est nécessaire pour consommer toute la Portlandite en produisant du CaCO_3 . Cependant, la réaction pouzzolanique (un bon mûrissement est nécessaire afin que cette réaction se produise) densifie la structure de sorte que la diffusivité est réduite et que la cinétique carbonatation s'en trouve ralentie.

3 Corrosion des armatures dans le béton armé

3.1 Définition de la corrosion

Le béton, du fait de sa forte alcalinité, apporte aux armatures une excellente protection face à la corrosion. Dans ces conditions de pH, l'acier est protégé grâce à la formation d'un film extrêmement mince et adhérent appelé film passif pouvant être constitué de divers oxydes.

En présence d'eau et d'oxygène, ce film est détruit par différents agents tels que les chlorures, les sulfates et le gaz carbonique. Le métal est alors dépassivé et la corrosion devient possible avec formation de nouveaux oxydes, dont le volume au moins deux fois supérieur (jusqu'à six fois supérieur pour certains oxydes) à celui du fer initial entraînera des fissurations du béton qui accéléreront le processus de corrosion en facilitant la diffusion de l'oxygène et des espèces corrosives.[6]

La corrosion des armatures est issue d'un processus électrochimique qui ne peut se produire que si certaines conditions sont réunies. En effet pour qu'un acier se corrode, il doit y avoir simultanément :

- un électrolyte ayant une conductivité ionique non négligeable ;
- une quantité suffisante d'oxygène accédant à la zone cathodique ;
- la présence d'un agent agressif (comme les ions chlorures).



a) Fissuration



b) Éclatement localisé



c) Corrosion d'armature.

Figure 1.13 : Exemples de détériorations dues à la corrosion des poteaux en béton armé, dans une bâtisse à Mascara (Photo A.Bensafir)[6]

3.2 Contexte de la dégradation des armatures

Le béton armé est un matériau de construction qui associe le béton avec des armatures métalliques, le béton d'enrobage fournissant une barrière physique et une protection chimique due à son alcalinité. A la surface d'un acier enrobé par la pâte de ciment hydratée, il se forme un film passif formé d'une solution solide de magnétite Fe_3O_4 ou d'un film γFe_2O_3 à structure bien fermée d'épaisseur 10^{-3} à 10^{-1} μm qui protège l'acier. Cette protection est efficace pour une forte valeur du pH ($pH > 13$).

Le maintien de cette passivation est conditionné par un pH suffisamment élevé de la solution interstitielle en contact avec la couche passivée. Lorsqu'un front de pH plus faible atteint les alentours de la surface des armatures, la couche protectrice disparaît et la corrosion peut se produire, à condition que l'oxygène et l'humidité nécessaires à la corrosion soient présents. Pour cette raison, il est important de connaître la profondeur de carbonatation et plus particulièrement de savoir si le front de carbonatation atteint la surface des aciers enrobés.[5]

3.3 Aspects normatifs

Toutes les dispositions, décrites dans la première partie, dont l'effet est de limiter la porosité du béton, contribuent à la durabilité du système béton-armatures. Les règles concernant la cure humide du béton ont une importance toute particulière puisque les quelques centimètres du béton d'enrobage sont très sensibles aux effets de la dessiccation.

Les autres dispositions, directement liées à la corrosion des armatures, concernent la limitation de la teneur en ions chlore, la fixation d'une épaisseur d'enrobage minimale, la limitation de l'ouverture des fissures du béton armé.[9]

❖ Epaisseur minimale d'enrobage

Les codes de calcul fixent une épaisseur minimale d'enrobage qui dépend de la classe d'environnement à laquelle l'ouvrage sera exposé (BAEL, Eurocode 2). Les épaisseurs minimales d'enrobage prescrites dans différents pays industrialisés sont représentées sur la figure 1.14. Les variations sensibles des valeurs prescrites s'expliquent, en partie, par les différences entre les climats de ces pays.

L'épaisseur minimale d'enrobage des armatures pour le béton armé, prescrite par la réglementation, est liée à la sévérité du milieu d'exposition caractérisé par son niveau d'agressivité (N₁, N₂, N₃, N₄ ou N₅) et varie d'un pays à l'autre de façon souvent disparate. Le passage d'un niveau d'agressivité à un niveau supérieur ne s'accompagne pas toujours d'une modification de l'épaisseur d'enrobage.[9]

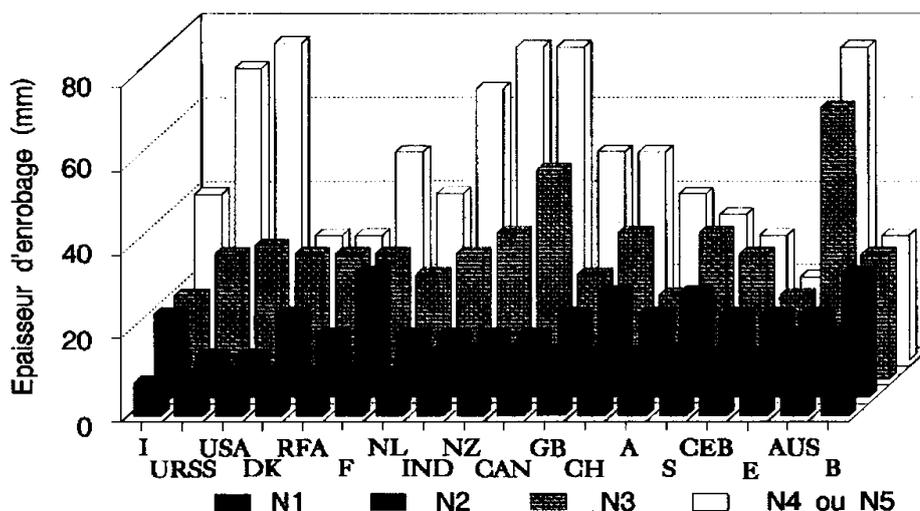


Figure 1.14 : Schéma de la cinétique du comportement des armatures et du béton d'enrobage[9]

Les codes de calcul donnent des règles pour limiter l'ouverture des fissures du béton armé. Les règles du BAEL 91 dépendent de l'agressivité du milieu et du caractère plus ou moins préjudiciable de la fissuration (peu nuisible, préjudiciable, très préjudiciable).

- Les dommages dus à la corrosion se manifestent par des expansions qui conduisent à la formation de fissures qui provoquent éventuellement le décollement du couvert de béton (l'enrobage) (Figure 1.15 et 1.16). [9]



Figure 1.15 : Délamination dues à la corrosion dans une dalle en béton armé [9]

- En plus de la disparition du couvert de béton, des dommages structuraux de la structure peuvent survenir en raison de la perte d'adhérence des barres et de la diminution de leur diamètre effectif (perte de capacité en traction).
- Le béton est un milieu très alcalin ($\text{pH}=13$) et constitue un environnement relativement agréable pour les aciers d'armature.
- Sous ce niveau de pH, les aciers d'armature ne se corrodent pas car ils sont recouverts d'un film passif formé d'une solution solide de $\text{Fe}_3\text{O}_4 - \text{Fe}_2\text{O}_3 \gamma$ dont l'épaisseur est de 10^{-3} à $10^{-1} \mu\text{m}$.



Figure 1.16 : Délamination de la face d'une chevêtre d'un pont en béton armé.

- La corrosion des aciers d'armature peut débuter si le film passif est détruit ou si le pH de la solution interstitielle devient trop faible (< 12).

3.4 Les phases de corrosion (incubation et propagation)

Les manifestations visibles de la corrosion d'un ouvrage (tâches de rouilles, fissurations, armatures apparentes corrodées, éclatements de béton) sont les conséquences de réactions chimiques endogènes qui ont commencé bien avant que les désordres ne soient apparents. On distingue schématiquement et successivement deux phases dans le développement de la corrosion (cf. Figure 1.17).[5]

- **Période d'amorçage** : dite aussi période dormante, d'incubation ou d'initiation, durant laquelle la stabilité du système constitué par l'armature métallique noyée dans la matrice cimentaire du béton décroît progressivement et durant laquelle se créent les conditions favorables au développement de la corrosion. L'amorçage de la corrosion peut être provoqué par la carbonatation du béton d'enrobage.

- **Période de propagation** : c'est une période durant laquelle on observe, en premier lieu, la formation de produits issus de la corrosion de l'armature. Les phénomènes électrochimiques de corrosion conduisent à la formation d'oxydes et d'hydroxydes de volumes supérieurs à celui de l'acier sain. Ces produits entraînent des contraintes qui peuvent provoquer une fissuration parallèle aux aciers qui diminue l'adhérence acier/béton, ainsi que l'éclatement du

béton d'enrobage (formation d'épaufrures). Les désordres créés nuisent à l'aspect esthétique des ouvrages, mais contribuent aussi à affaiblir les résistances mécaniques. La corrosion conduit aussi à une diminution de la section des armatures, généralement homogène dans le cas de la carbonatation. On considère généralement que la capacité fonctionnelle de l'ouvrage est entamée dès la destruction du béton d'enrobage, même si la réduction de la section des armatures ne contribue pas encore à produire des défauts structurels.[5]

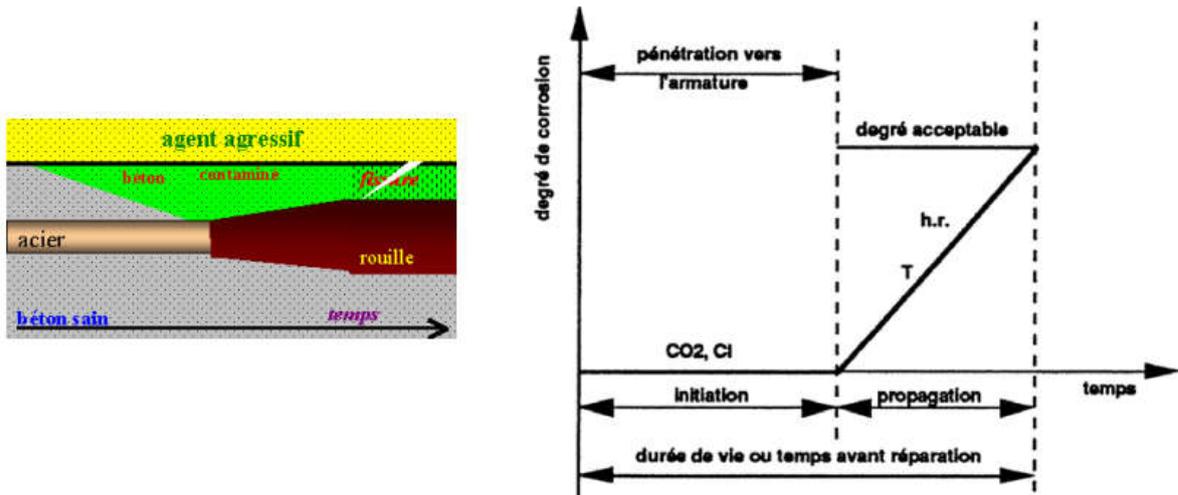


Figure 1.17: Schéma de dégradation des armatures au cours du temps[5]

3.5 Conséquences des désordres provoqués par la corrosion des armatures :

3.5.1 L'aspect du parement de l'ouvrage

Les efflorescences et les tâches de rouille qui sont la conséquence de la pénétration d'agents agressifs dans l'enrobage du béton, altèrent l'aspect de l'ouvrage. Parfois, ce point est considéré comme étant de peu d'importance par le gestionnaire des ouvrages mais par contre ce sont les fissurations et les fracturations du béton qui commencent à inquiéter le gestionnaire car des éclats de béton peuvent se produire.[6]

3.5.2 La sécurité vis-à-vis des usagers

Les éclats de béton présentent un risque pour les personnes qui circulent près de l'ouvrage ou l'exploitent. Leur prévention et leur élimination doivent par conséquent être traitées avec grand soin.

3.5.3 La stabilité de l'ouvrage

Des essais effectués sur des éprouvettes ont permis d'estimer les valeurs des forces d'adhérence pour des éléments en béton dont les armatures sont corrodées. Il est apparu que ni la qualité du béton ni le rapport enrobage/diamètre d'armature n'influent sur la force résiduelle d'adhérence, même si l'enrobage est fissuré par la corrosion de l'armature sans qu'il ne soit détruit par éclatement.[6]



Un dosage en ciment élevé diminue la profondeur de carbonatation

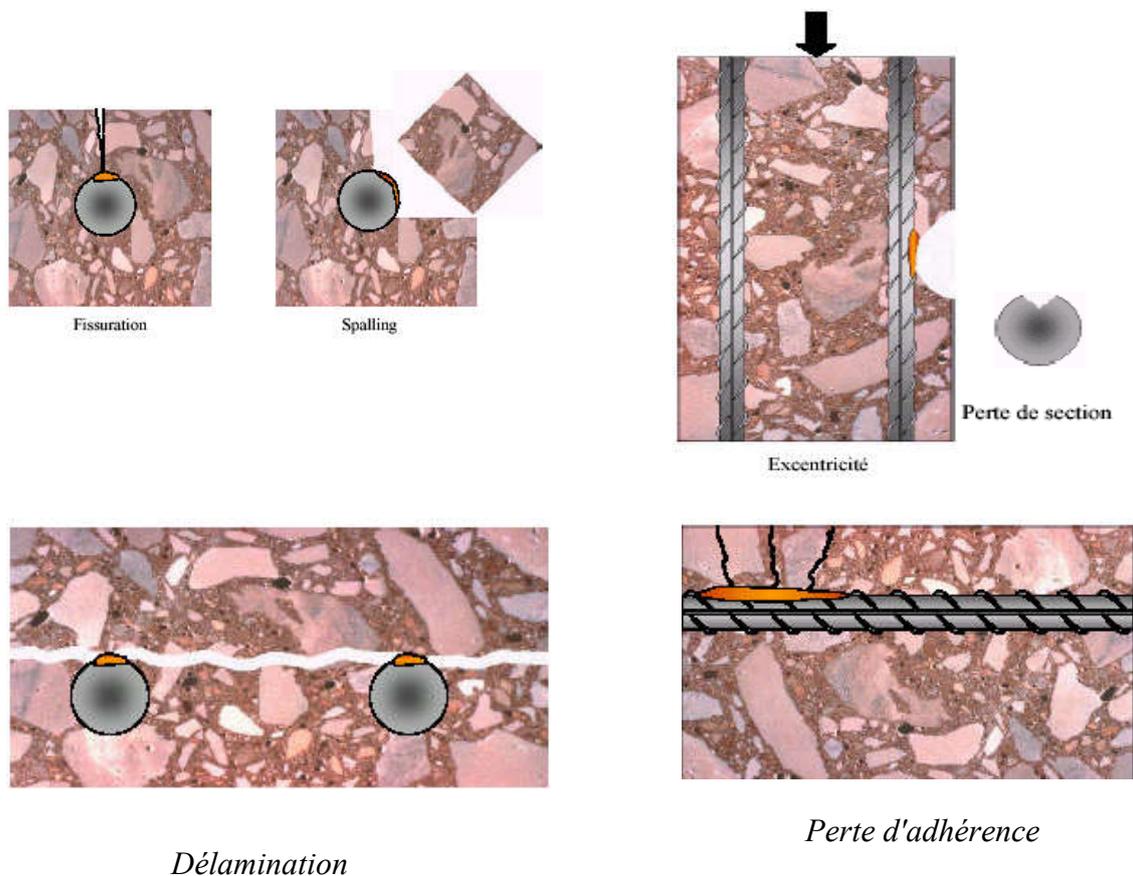


Figure 1.18 : Conséquence de la corrosion[9]

3.6 Investigation de la corrosion in situ

Une investigation type se compose d'une série de tests différents suivie d'une phase d'analyse permettant le choix de la stratégie optimale de réparation. La réalisation du même genre de tests est également un moyen de contrôle de qualité pour les ouvrages récents. Le programme des investigations est établi en tenant compte des contraintes et impératifs suivants [6] :

- l'importance de la structure ;
- la nature, la gravité et l'intensité des phénomènes, la sécurité des personnes ;
- les délais et les coûts ;
- l'accessibilité ;
- l'environnement, etc.

3.7 Les mesures de prévention

3.7.1 Formulation

- Il faut minimiser la perméabilité en augmentant la compacité de la pâte
- Utiliser en rapport E/C approprié
- Utiliser des ajouts minéraux (attention à la cure !)[9]

3.7.2 Mise en œuvre

- Prévoir une cure soignée.
- Éviter les accumulations d'eau par un système de drainage approprié et bien entretenu ou en prévoyant une géométrie qui favorise l'écoulement de l'eau.
- Respecter les épaisseurs de recouvrement prescrites.
- Utiliser une bonne méthode de mise en place pour bien densifier le béton au voisinage des armatures.
- Attention à la disposition des barres au voisinage des angles pour éviter que la pénétration des agents agressifs s'effectue selon les deux directions (Figure 1.19).[9]

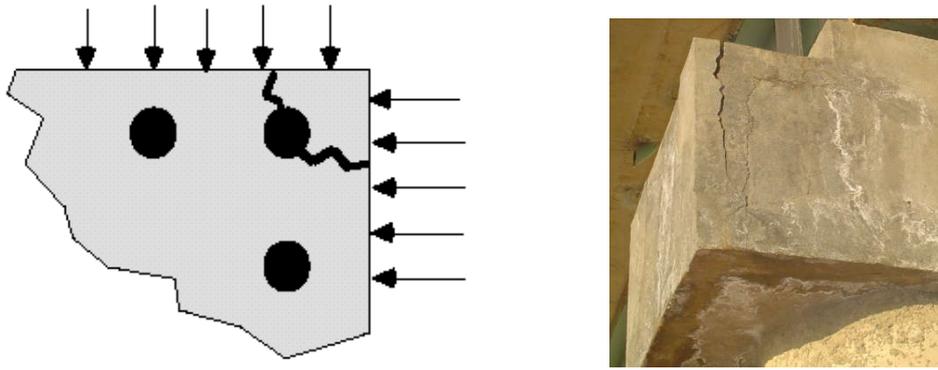


Figure 1.19 : Mauvais positionnement d'une barre d'armature dans une marche d'escalier.

3.7.3 Barres recouvertes d'époxy

- Les enduits d'époxy offrent une protection supplémentaire contre la corrosion seulement si la couche d'époxy est suffisamment épaisse et si elle est exempte de défauts de surface.
- Il faut utiliser des supports et des attaches non métalliques !.
- Le degré de protection dépend du type d'enduit (époxy liquide, époxy en poudre). Les époxy en poudres (appliqués en usine) donne généralement de meilleurs résultats.
- En général, on signale que la protection supplémentaire est marginale pour des épaisseurs de moins de 200 μm .
- Le degré de protection supplémentaire est marginal si le recouvrement d'époxy est endommagé avant, pendant ou après la mise en place du béton.
- Dans le cas d'une réparation, il est très important de faire une bonne préparation de la surface avant l'application de l'époxy liquide sur les barres.
- Attention à la manutention des barres.
- Défauts de surface dus aux chocs, abrasion, flexion des tiges, pliage, attaches,
- On doit inspecter les barres et réparer les défauts de surface.
- Un béton bien formulé pour minimiser la perméabilité (E/C faible, fumée de silice, cendres volantes) est souvent un moyen bien plus simple et plus économique d'obtenir une bonne protection contre la corrosion des armatures.[9]

3.7.4 Barres galvanisées à chaud

- La galvanisation à chaud permet de déposer une couche de zinc à la surface des barres. Au contact de la solution interstitielle, il se forme un composé insoluble d'hydroxyzincate de calcium qui protège bien contre la carbonatation et l'action des ions chlore.
- Le revêtement de zinc doit être suffisamment épais afin d'éviter la présence d'une couche intermédiaire d'alliage Zn-Fe qui est moins protectrice.

Dans une même structure ou partie de structure, il faut éviter d'utiliser en même temps des barres galvanisées et non galvanisée (ou: boulons, ancrages, etc).[9]

3.7.5 Barres en acier galvanisé

- Ces barres offrent une très bonne protection contre la corrosion.
- Leur coût est cependant très élevé.[9]

3.7.6 Inhibiteurs de corrosion

Ce sont des composés chimiques ajoutés en faible concentration au milieu cimentaire ralentissant, ou stoppant, le processus de corrosion. Ces produits ont pour fonction de pénétrer l'enrobage du béton, d'abaisser la vitesse de corrosion de l'acier sans altérer ce dernier.

Ils doivent être stables et compatibles avec le milieu cimentaire et ne pas être toxiques. On distingue les inhibiteurs anodiques (diminution du courant sur la partie anodique du métal), les inhibiteurs cathodiques (augmentation de la surtension cathodique) et les inhibiteurs mixtes.

Actuellement, l'efficacité de ces produits est de l'ordre d'une dizaine d'années.[10]

3.7.7 Protection cathodique

La protection cathodique des armatures permet de ralentir, voire d'arrêter, la corrosion. Elle consiste à abaisser le potentiel électrochimique de l'armature jusqu'à une valeur seuil, dite « potentiel de protection », qui est telle que la vitesse de corrosion de l'acier devient négligeable.

Le principe de la protection cathodique consiste à polariser l'armature dans le béton à l'aide d'une anode placée de façon permanente sur le parement, ou parfois dans l'enrobage. Le courant de polarisation, qui circule de l'anode vers l'armature, se situe entre 2 et 50 mA/m² de surface d'armature. Il existe deux techniques de protection cathodique :

- **par courant imposé** : un générateur électrique est placé entre l'anode et l'armature,
- **par anode sacrificielle (courant galvanique)** : l'anode, en alliage correctement sélectionné, est directement reliée à l'armature.

Une installation de protection cathodique est efficace tant que les éléments les moins durables que sont les électrodes de références et l'anode, sont fonctionnels. Ces éléments sont facilement remplaçables et, dans le cas d'une électrode de titane, la durée de vie peut atteindre 20 ans.[10]

3.7.8 Reconstitution de l'enrobage

Elle permet de réparer et d'arrêter la progression des dégradations d'un parement. Après élimination des zones dégradées, remplacement des armatures trop corrodées et protection directe des armatures, si l'enrobage reconstitué est trop faible par rapport aux normes actuelles, un béton de réfection est appliqué. Celui-ci devra montrer une bonne adhérence avec les matériaux en place.[10]

- ❖ Il existe aujourd'hui un large éventail de techniques permettant de prolonger la durée de vie des ouvrages dégradés. Le choix de la technique repose sur des aspects technico-économiques liés à la structure et nécessite une étude au cas par cas de manière à optimiser les coûts.

3.8 Conclusion

Le tableau suivant conclue la corrosion :

| La corrosion | | | | |
|---|--------------------------|--|--|---|
| Causes(Sources et origines) | Substances concernées | Mécanisme | Conséquences | Préventions et solutions |
| -Carbonatation (CO ₂); -Les ions chlorures . | L'acier (les armatures). | En présence d'eau et d'O ₂ , le film passif est détruit par différents agents (Cl..). La corrosion commence avec formation de nouveaux oxydes, dont le volume est supérieur à celui du fer initial entrânera des fissurations du béton. | -La diminution de la section utile ; - La fissuration du béton d'enrobage ; -La perte d'adhérence. | -Un bon dimensionnement ; -la reconstitution de l'enrobage ; -Utilisation des inhibiteurs de corrosion ; -la protection cathodique...ect |

Tableau 1.2 : Conclusion de la corrosion

Chapitre 02

Les paramètres influençant et les conséquences de la carbonatation

1 Introduction

La carbonatation du béton est un phénomène lent. La vitesse dépend de nombreux facteurs tels que: compacité, dosage en ciment, type de ciment, teneur en eau du béton, degré d'hydratation du ciment, concentration en gaz carbonique de l'air, humidité relative de l'air, température. Plus la teneur gaz carbonique de l'air est élevée, plus la vitesse de carbonatation est élevée.

Les facteurs qui influencent la carbonatation et la corrosion de l'acier sont relativement nombreux et complexes.

L'influence mutuelle de ces différents facteurs ne peut pas être explicitée de simple.

Les conséquences de la carbonatation du béton et de la présence de chlorures sont fréquemment la cause de dégradations importantes de structures en béton et en béton armé.

La carbonatation est un phénomène inévitable, mais qui peut être fortement atténué par des mesures préventives relativement simples: recouvrement en béton suffisant des armatures, protection des structures particulièrement vulnérables.

Dès que les armatures ont atteint un degré de corrosion inacceptable pour la sécurité, il faut soit détruire la structure soit la réparer. Des méthodes de réparation sûres et durables peuvent être exécutées. Toutefois, le prix de tels travaux peut être très élevé et parfois disproportionné par rapport au prix de l'élément de structure dégradé. Un exemple assez fréquent est celui des parapets de balcon et des pare-soleil en béton des bâtiments

2 Principaux paramètres influençant la carbonatation du béton

La cinétique de carbonatation des bétons est influencée par une multitude de paramètres liés aux caractéristiques des bétons et à leur milieu environnant.

2.1 Paramètres intrinsèques aux bétons

2.1.1 Rapport eau/ciment (E/C)

Plus le rapport E/C est élevé et plus la profondeur carbonatée est importante. Cette tendance s'explique par l'accroissement de la porosité du béton et du coefficient de diffusion du CO_2 avec le rapport E/C. L'eau en excès crée des vides (porosité capillaire généralement percolante) favorisant la diffusion du CO_2 .

Toutes les études réalisées pour déterminer l'influence du rapport E/C sur la cinétique de carbonatation s'accordent à conclure que plus ce rapport est bas, plus la vitesse de carbonatation est faible. En effet, la porosité d'un béton dépend en grande partie du rapport E/C. Plus il est élevé, plus la quantité d'eau libre évaporable est grande. En s'évaporant, cette eau laisse des vides qui favorisent la diffusion du CO_2 . [2]

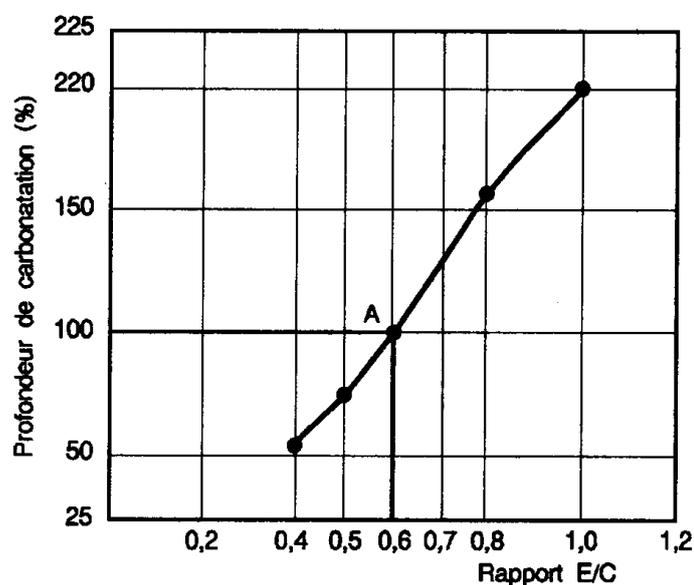


Figure 2.1 : Evolution de la carbonatation en fonction du rapport E/C [5]

Eprouvettes de mortier conservées 7 jours en atmosphère saturée, puis à l'air à 20 °C et 50 % HR pendant 2 ans et demi. La profondeur de carbonatation mesurée à un rapport E/C donné est exprimée en pourcentage de la valeur obtenue en A pour un rapport E/C de 0,6. La

profondeur de carbonatation croît de façon sensiblement linéaire avec le rapport E/C. Elle fait plus que doubler lorsque le rapport E/C passe de 0,6 à 1,0 [9]

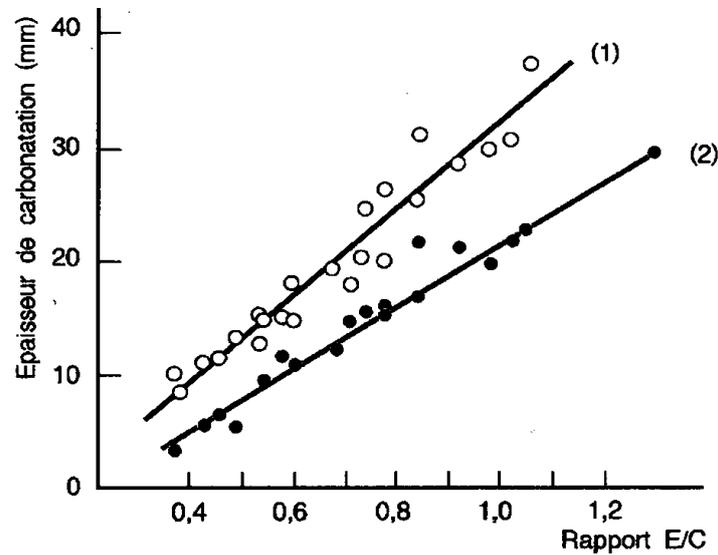


Figure 2.3 : Evolution de la carbonatation en fonction du rapport E/C pour des conditions de cure différentes [9]

Eprouvettes de CPA conservées 24 heures en moule puis 6 ans dans l'air (courbe 1), ou bien 24 heures en moule, puis 27 jours dans l'eau et enfin 6 ans dans l'air (courbe 2). Conditions de conservation:

20 C et 50 % HR. La profondeur de carbonatation est réduite lorsque le béton jeune est conservé suffisamment longtemps dans l'eau avant d'être exposé au milieu ambiant.

2.1.2 Le dosage et la nature du ciment

Un dosage en ciment élevé diminue la profondeur de carbonatation car il réduit la porosité du béton, améliore sa compacité et augmente la quantité de produits carbonatables. [2]

Duval observe une diminution des épaisseurs carbonatées lorsque la teneur en ciment augmente. Deux explications concomitantes à la diminution de la vitesse de carbonatation sont relevées dans la littérature :

- D'une part, la quantité de chaux à carbonater par unité de volume augmente avec le dosage en ciment. La durée de carbonatation est alors plus longue, la vitesse de carbonatation diminue. A noter que l'amplitude et la profondeur de carbonatation diminue également.
- D'autre part, la compacité du matériau a tendance à augmenter avec le dosage en ciment. La diminution de la quantité d'eau de gâchage, induite par un dosage en ciment plus important, réduit la porosité du ciment, freinant alors la pénétration du CO_2 dans le réseau poreux. Par conséquent, la vitesse de carbonatation diminue.

D'autre part, la compacité du matériau a tendance à augmenter avec le dosage en ciment. La diminution de la quantité d'eau de gâchage, induite par un dosage en ciment plus important, réduit la porosité du ciment, freinant alors la pénétration du CO_2 dans le réseau poreux. Par conséquent, la vitesse de carbonatation diminue.

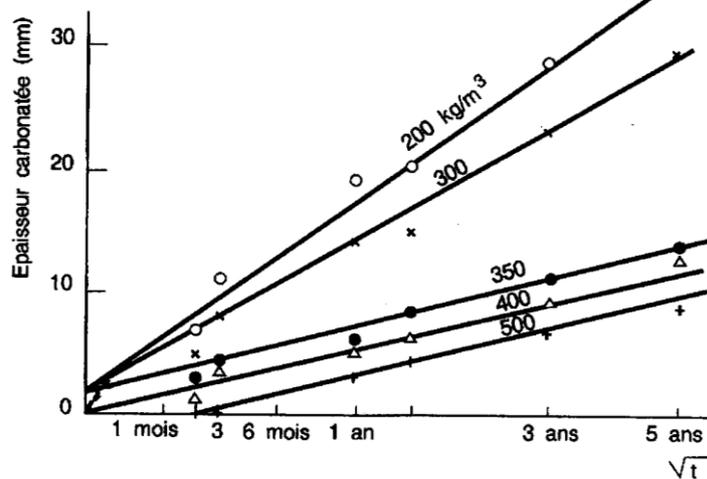


Figure 2.4 : Relation entre l'épaisseur carbonatée et le dosage en ciment[9]

Eprouvettes 7x7x28 cm de béton préparé avec du CPA et des granulats 0/20 mm, de même maniabilité, conservées à 20 C et 50 % HR pendant 5 ans. Les courbes 1 à 5 correspondent à des dosages en ciment respectifs de 200, 300, 350, 400 et 500 kg/m³. Pour des bétons fabriqués à même maniabilité, l'épaisseur carbonatée est d'autant plus faible que le dosage en ciment est plus élevé. [9]

2.1.3 Additions minérales

Des travaux réalisés sur divers matériaux cimentaires, avec des protocoles expérimentaux différents, montrent que la présence dans le ciment (ciments avec ajouts) ou le béton de cendres volantes, La fumée de silice, laitiers de haut-fourneau ou pouzzolanes augmente la profondeur carbonatée.[2]

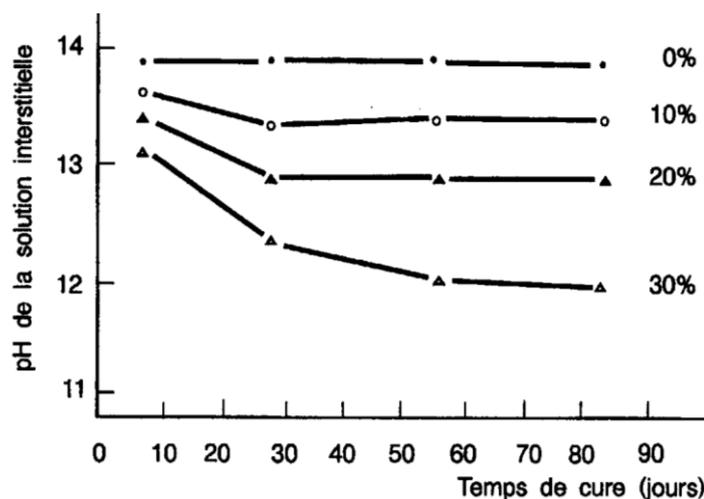


Figure 2.5 : Influence du pourcentage de fumées de silice sur le pH de solutions interstitielles extraites de pâtes de ciment Portland[9]

▪ Les cendres volantes et le laitier de haut-fourneau

En conditions de carbonatation atmosphérique, la profondeur de carbonatation augmente avec le taux de substitution du ciment Portland par des cendres volantes. D'après Khan & Lynsdale, qui ont réalisé des essais en carbonatation naturelle (2 ans, $20^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ et $65 \pm 5\%$ d'HR), pour chaque augmentation de 10% du taux de substitution, la profondeur carbonatée augmente d'une épaisseur de l'ordre de 0,3 mm. Pour Parrott, qui a conduit des essais en carbonatation naturelle (18 mois à 20°C et 60% d'HR), la substitution d'une partie du clinker avec 19% ou plus de calcaire ou de laitier de haut fourneau augmente la profondeur de carbonatation.

Par ailleurs, Ati montre qu'à 50% de substitution, l'effet contraire se manifeste. Les profondeurs de carbonatation entre ciment Portland et ciment composé (taux de substitution par des cendres volantes de 50%) sont alors comparables. Ces travaux vont également à l'encontre des résultats de Sisomphon et Franke pour qui des bétons à 25% et 50% de substitution de cendres volantes se carbonatent, en conditions accélérées ou naturelles, plus rapidement qu'un béton au ciment Portland. Ainsi, les valeurs des taux de substitution à partir desquelles l'effet du laitier de haut fourneau devient significatif restent controversées.

▪ La fumée de silice

D'après Khan & Lynsdale, la fumée de silice ne modifie pas significativement la profondeur de carbonatation. D'autres résultats, dont ceux de Richardson et al., tendent vers une diminution de la profondeur carbonatée avec l'ajout de fumées de silice. Les résultats de Cabrera & Claisse tendent également vers cette conclusion. D'après ces derniers, la fumée de silice peut être utilisée pour rendre le matériau pratiquement imperméable à l'oxygène. Dans ce cas, la diffusion du CO₂ serait ralentie. Au contraire, les résultats de Yamato et al. montrent une augmentation de la profondeur carbonatée avec l'ajout de fumées de silice. A la vue de ces résultats, l'effet de l'ajout de fumées de silice reste, à ce jour, très controversé. De manière générale, les travaux de la littérature montrent tous clairement que les ajouts pouzzolaniques diminuent la résistance à la carbonatation. La raison de ce phénomène est simple : en substituant une partie du clinker par des pouzzolanes, la teneur en portlandite diminue, ce qui a pour effet d'abaisser le pouvoir tampon de la solution interstitielle, et ce malgré la baisse du coefficient de diffusion du CO₂.

Ces additions minérales génèrent des bétons à faible teneur en Portlandite (produit carbonatable). Toutefois, elles permettent de diminuer la porosité et l'effet négatif peut être annulé.

2.1.4 Résistance à la compression

La profondeur de carbonatation diminue lorsque la résistance en compression à 28 jours s'accroît. Cependant, deux bétons de même résistance mécanique peuvent avoir deux rapports E/C distincts et donc deux comportements différents vis-à-vis de la carbonatation. [2]

| Temps d'exposition (années) | Profondeur de carbonatation (mm) | | |
|-----------------------------------|----------------------------------|---------------|---------------|
| | fc28 = 25 MPa | fc28 = 35 MPa | fc28 = 50 MPa |
| 2 | 9 | 5 | 2 |
| 5 | 15 | 9 | 3 |
| 10 | 21 | 12 | 4 |
| 20 | 29 | 17 | 6 |
| 30 | 37 (36) | 21 (21) | 8 (10) |
| 50 | 48 | 28 | 10 |

Tableau 2.1 : Profondeurs de carbonatation déduites en fonction du temps d'exposition pour diverses valeurs de la résistance à la compression. Les valeurs qui figurent entre parenthèses sont obtenues avec l'équation : $e = 125 \exp(-0,05fc28)$. [9]

2.1.5 la teneur en gaz carbonique dans l'air

La profondeur de carbonatation diminue avec la diminution de la perméabilité [2]

- Cinétique de la carbonatation

La pénétration du CO₂ et sa réaction avec les hydrates de la pâte divise le béton en deux : une zone carbonatée et une zone non carbonatée. Malgré la complexité des phénomènes, on admet généralement que l'épaisseur de la zone carbonatée $x(t)$, à un instant t de la vie d'un ouvrage, peut se représenter par la relation suivante [10]

$$x(t) = x_0 + k\sqrt{t} \quad 2.1$$

avec x_0 : épaisseur carbonatée initiale

k : constante prenant en compte, à la fois la composition du béton (rapport E/C, dosage et nature du liant...), et les conditions d'environnement (humidité relative, température, pression,...).

La relation (2.1) est celle que l'on obtient théoriquement en faisant l'hypothèse que les cinétiques des réactions chimiques liées à la carbonatation sont infiniment plus rapides que la diffusion du CO₂ gazeux à travers la matrice cimentaire, qui est supposée ne pas évoluer au cours du temps. La diffusion du CO₂ devient alors l'étape limitante et l'évolution de la carbonatation du matériau est régie par ce seul processus (diffusion « pure »). [10]

L'impact de la teneur en CO₂ sur la profondeur carbonatée mesurée par pulvérisation de phénolphthaléine sur des échantillons de béton (non préconditionnés) à base de CEM I est représenté sur la Figure 2.6 . La tendance observée est confirmée par Hyvert et al. sur une plus large gamme de pression partielle de CO₂ (comprise entre 0,03% et 50%)

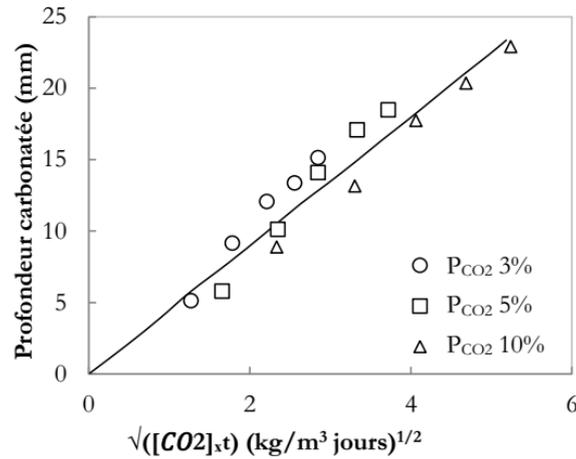


Figure 2.6 : Evolution de la profondeur carbonatée (en mm) d'un béton à base de CEM I (20°C, 65% HR) en fonction du temps et de la concentration en dioxyde de carbone

- Représentativité des essais de carbonatation accélérée

Si les résultats de la littérature s'accordent sur la tendance précédente, ils sont contradictoires lorsqu'il s'agit de décrire l'impact de la teneur en CO_2 sur le degré de carbonatation. Or la cohérence de données acquises au cours d'essais de carbonatation accélérée dépend de leur représentativité vis-à-vis de la réalité. Plusieurs auteurs se sont attelés à la comparaison des évolutions minéralogiques et microstructurales des matériaux cimentaires consécutivement à leur carbonatation à différents teneurs en CO_2 .

Par exemple, Hyvert et al. montrent, via des analyses DRX, sur une gamme de teneur en CO_2 allant de 0,03% (conditions atmosphérique) à 50% (conditions accélérées), que la portlandite a totalement disparue dans la zone carbonatée. Parrott et Killoh confirment ce résultat. Au contraire, d'après Thiéry, de la portlandite résiduelle subsiste dans une pâte de ciment carbonatée à 50% de CO_2 . Ce résultat peut être corrélé avec ceux de Groves et al., pour qui la présence d'une gangue de carbonate se formant autour des grains de portlandite, inhiberait leur dissolution. Les résultats de Castellote et al. rapportent, quant à eux, la présence de portlandite résiduelle uniquement dans le cas de la carbonatation atmosphérique ($P_{CO_2} \approx 0,03\%$) ; la portlandite serait complètement carbonatée dans le cas d'essais accélérés ($P_{CO_2} > 3\%$). Anstice et al. confirment par DRX, que le degré de carbonatation dépend directement de la concentration en CO_2 .

Les résultats d'Hyvert et al. et de Castellote et al. s'accordent sur la dépendance du taux de carbonatation des C-S-H avec la P_{CO_2} . En effet, il semble que le degré de carbonatation des

C-S-H augmente avec la teneur en CO_2 (au-delà de 3%). Les essais de carbonatation accélérée, conduits traditionnellement à 50% de CO_2 , sont à l'origine de l'apparition de fissures. Il semble également que les modifications minéralogiques induites au niveau des C-S-H ne soient plus représentatives des évolutions minéralogiques identifiées en carbonatation naturelle.

Pour des teneurs en CO_2 de l'ordre de 3%, un gel de C-S-H avec un rapport C/S quasi-identique à celui mesuré en carbonatation naturelle subsiste. Tandis que pour une teneur en CO_2 supérieure à 3%, le gel de C-S-H a complètement disparu (décalcification forte et polymérisation des chaînes de silicates). Groves et al. confirment ces résultats en mettant en évidence la présence d'un gel siliceux amorphe à base de calcium à l'issue d'essais de carbonatation accélérée réalisés avec du CO_2 pur. Par ailleurs, ces mêmes auteurs stipulent qu'en conditions de carbonatation atmosphérique ($P_{\text{CO}_2} \approx 0,04\%$), les C-S-H continueraient à se polymériser mais, sans former de gel de silice. La formation de C-S-H décalcifiés, induite par la carbonatation, est corrélée à la diminution du rapport molaire C/S, résultat notamment mis en évidence par Kobayashi et al.

A noter que l'augmentation de la teneur en carbonates de calcium avec la P_{CO_2} semble liée à la carbonatation des C-S-H. Il est intéressant de noter qu'à 50% de CO_2 , des phénomènes de fissuration ont été observés.

Malgré le manque de données relatives à l'évaluation de la représentativité des essais de carbonatation accélérée, les auteurs préconisent l'emploi d'une teneur en CO_2 n'excédant pas 3%.

2.1.6 Degré de saturation des pores en eau liquide

Si le béton est totalement saturé en eau liquide, la diffusion du CO_2 n'est possible qu'à travers la solution interstitielle, ceci freine considérablement la progression de la carbonatation dans la mesure où les coefficients de diffusion du CO_2 dans l'air et dans l'eau sont respectivement de l'ordre de $10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ et $10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$. En revanche, si le degré de saturation est trop faible, la dissolution du CO_2 est fortement limitée et la cinétique de carbonatation des hydrates est alors ralentie. [2]

2.2 Paramètres extrinsèques aux béton

2.2.1 Cure

La cure a pour but de maintenir des conditions de température et d'humidité propices à une meilleure hydratation du ciment. Cette hydratation rendra le béton plus compact, donc moins perméable en peau au gaz carbonique. Le séchage trop rapide du béton est à l'origine d'un retrait de dessiccation de surface, provoquant des fissurations et donc des chemins d'infiltration privilégiés du dioxyde de carbone .

La durée de cure influe sur les cinétiques de carbonatation. Fattuhi compare la carbonatation de bétons curés durant 1, 3, 5, 7 et 28 jours dans l'eau à 23°C (cf. Figure 2.7), ils présentent respectivement un taux de carbonatation de 66, 53, 42, 39 et 17 % par rapport aux mêmes échantillons conservés dans l'air (HR variant entre 22 % et 63 %). Ceci est dû à une porosité plus élevée du béton conservé dans l'air parce qu'après démoulage et en l'absence de cure, le béton proche de la surface (béton d'enrobage) perd rapidement son eau par dessiccation et l'hydratation associée à cette couche ralentit. Le degré d'hydratation est alors plus faible. Loo et al. concluent que l'amélioration de la résistance due à la cure est le facteur prépondérant pour diminuer le taux de carbonatation.

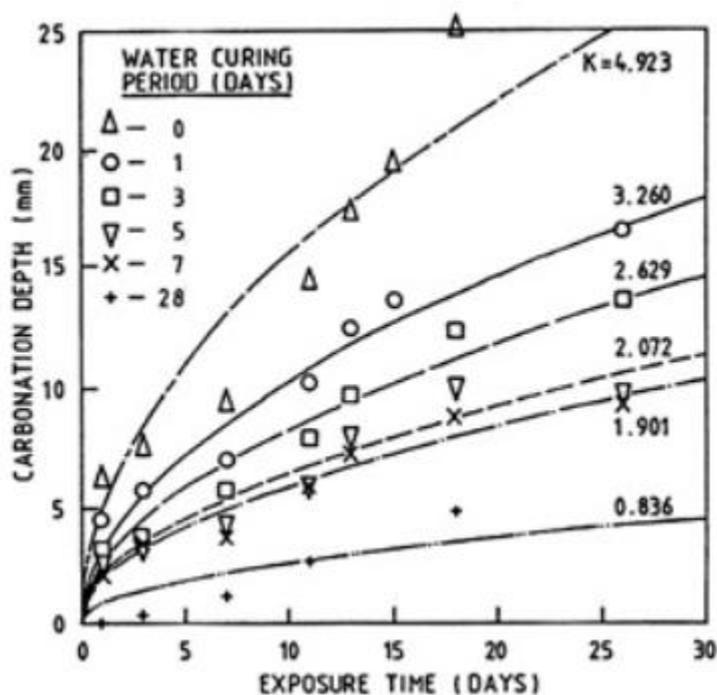


Figure 2.7: Profondeur de carbonatation en fonction du temps pour un béton curé pendant 0, 1, 3, 5, 7 et 28 jours [9]

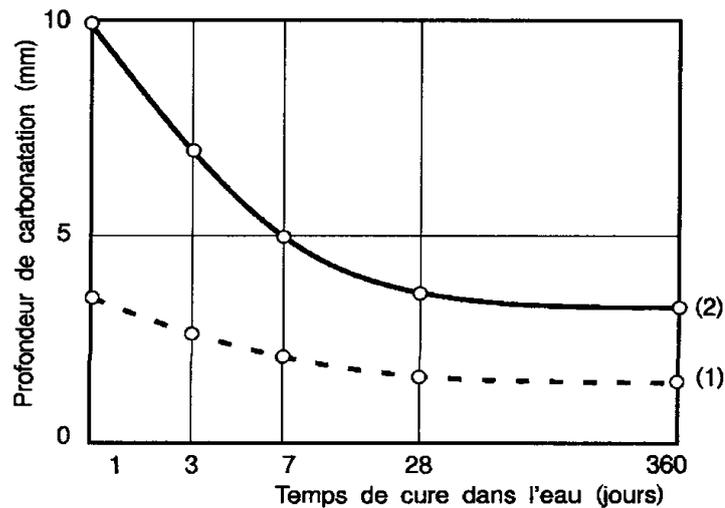


Figure 2.8 : Influence de la cure sur la profondeur carbonatée[9]

Eprouvettes de béton confectionnées avec un ciment Portland renfermant 12 % de C3A (courbe 1) et un ciment à 70 % de laitier (courbe 2), conservées après une cure dans l'eau, pendant un an à l'air, à l'abri de la pluie. Une cure humide prolongée limite la profondeur de carbonatation. L'effet est particulièrement sensible pour les premiers jours de conservation.[9]

2.2.2 Humidité relative

La vitesse de carbonatation est considérablement influencée par l'humidité relative du milieu environnant [Verbeck, 1958 ; Wierig, 1984 ; Bakker, 1988 ; De Ceukelaire et Van Nieuwenburg, 1993 ; Van Balen et Van Gemert, 1994 ; Saetta et al., 1995 ; Roy et al., 1999].

Pour que la carbonatation soit maximale, l'humidité relative doit être suffisamment faible pour qu'une phase gazeuse connectée permette la diffusion du CO_2 gazeux et suffisamment élevée pour que la réaction de carbonatation proprement dite puisse avoir lieu en phase aqueuse [AFGC, 2004].

Selon les bétons, il est souvent admis que la vitesse de carbonatation est maximale entre 50 et 70 % d'humidité relative. En dessous de 50 % et au-dessus de 90 à 95 % la vitesse est très faible ou nulle [Houst, 1992]. [2]

Il est fréquemment montré que l'humidité relative (HR) de l'air avec lequel le matériau cimentaire est en équilibre, impacte fortement la cinétique de carbonatation . L'optimum d'HR relevé sur la Figure 2.8 traduit :

- un chemin désaturé percolant dans les pores pour permettre au CO₂ de pénétrer dans le réseau poreux (par diffusion).
- une phase liquide suffisante pour permettre la solubilisation du CO₂ et par conséquent les réactions de carbonatation.

La vitesse maximale de carbonatation à 20°C pour les bétons traditionnels est obtenue pour une humidité relative comprise entre 40 et 60 %. Ces conditions optimales sont définies pour un béton durci où les transferts hydriques à l'intérieur du matériau sont en équilibre avec l'hygrométrie extérieure . Par ailleurs, en comparant plusieurs résultats de la littérature , on relève des vitesses de carbonatation maximales pour des optimums d'HR différents (Figure 2.9).

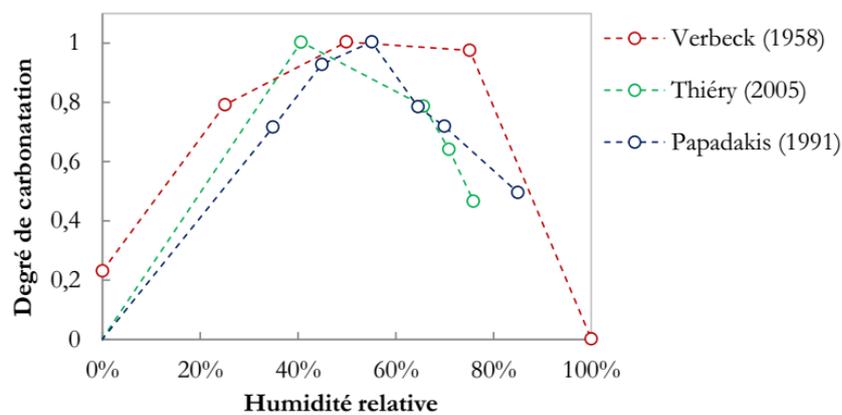


figure 2.9 : Degré de carbonatation, à 20°C, en fonction de l'HR mesurés par différents auteurs

Les écarts observés sur la Figure 2.9 entre les résultats de la littérature proviennent des modes opératoires qui diffèrent d'une étude à l'autre. Les échantillons propres à chaque auteur (rapports E/C différents) n'ont pas été soumis aux mêmes conditions environnementales (taux de CO₂, température et HR), ni aux mêmes durées d'exposition, ... Par conséquent, les degrés de saturation varient d'un matériau à l'autre.

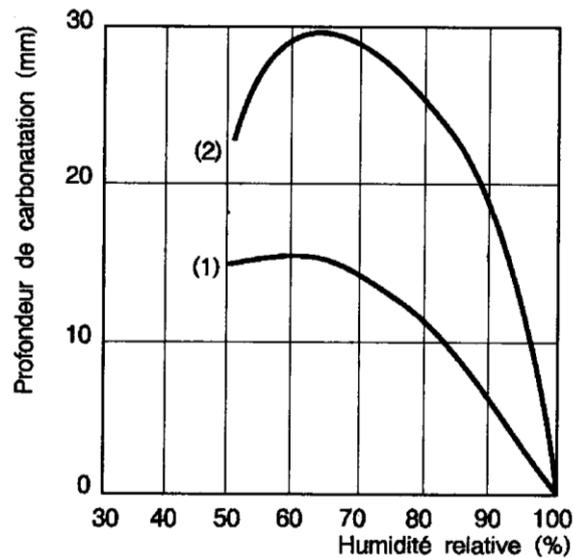


Figure 2.10 : Influence de l'humidité relative sur la profondeur de carbonatation[9]

Bétons confectionnés avec des rapports E/C de 0,6 (courbe 1) et 0,8 (courbe 2) et conservés 16 ans à 20 C. La profondeur de carbonatation passe par un maximum pour une humidité relative comprise entre 40 et 80 % et diminue rapidement à partir de 80 % pour quasiment s'annuler à la saturation. [9]

- Dans les environnements secs, la quantité d'eau est insuffisante pour dissoudre de CO₂.
- Dans les environnements très humides, le béton est saturé, ce qui ralentie considérablement la diffusion du CO₂.

2.2.3 Concentration en CO₂

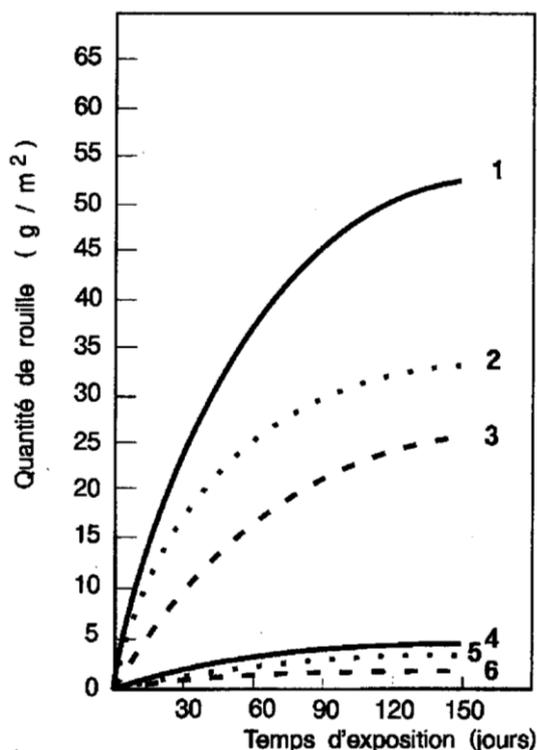
Des études montrent qu'une augmentation de la concentration en CO₂ accroît la vitesse de carbonatation. En fournissant du CO₂ en quantités continuellement suffisantes, les produits carbonatés à une profondeur donnée se carbonatent rapidement et se consomment donc d'autant. Ainsi, le front de carbonatation avance plus vite. [2]

2.2.4 Température

L'augmentation de température a deux effets opposés sur la vitesse de carbonatation : d'une part, elle accélère les réactions chimiques, favorise le séchage des pores et ainsi l'accès du CO₂ dans le réseau poral. D'autre part, elle diminue la solubilité du CO₂ et réduit sa concentration dans la phase gazeuse. [2]

Selon Chaussadent , l'élévation de la température induit une baisse de la vitesse de carbonatation des bétons. Pour cela, il s'appuie sur la solubilité du dioxyde de carbone dans l'eau et sur les travaux de Dheilley & Tudo .Ces derniers montrent, à partir d'essais menés à

20°C et 40°C, sur de la poudre de portlandite que celle-ci se dégrade plus rapidement lorsque la température diminue, mettant alors en évidence l'effet de la solubilité rétrograde des réactifs (réactions de surface). Au contraire, plusieurs auteurs constatent une thermoactivation du processus de carbonatation. Une augmentation de température favorise le séchage des pores, facilitant la diffusion du CO₂ gazeux au sein du réseau poreux. La température impacte le transport d'eau, en diminuant notamment le degré de saturation du matériau. Les travaux récents de Drouet ont permis de montrer, à partir d'essais conduits à 20, 50 et 80°C sur des échantillons de CEM I, que la thermoactivation du transport est le facteur prédominant dans l'effet de la température vis-à-vis de la solubilité rétrograde des réactifs. Cette conclusion n'est cependant pas applicable aux ciments composés (CEM V et mélange Bas-pH) où les profondeurs carbonatées maximales sont mesurées pour une température médiane de 50°C. L'auteur en conclut alors qu'il existe une température de carbonatation optimale et qu'il est probable qu'au-delà d'une certaine température, la diminution de la solubilité des hydrates est telle que leur solubilité rétrograde devient le facteur limitant.



Les six courbes correspondent à des températures et à des hygrométries différentes: [2]

1: 40 0C,85% HR
2: 30 0C,85% HR
3: 20 0C,85% HR

4: 40 0C,55% HR
5: 30 0C,55% HR
6: 20 0C,55% HR

Figure 2.11 : Influence de la température et de l'humidité relative sur la formation de rouille pour des armatures dans du mortier carbonaté[9].

3 Possibilité de ralentir la progression de la carbonatation du béton

On peut ralentir la progression de la carbonatation en: [6]

- Augmentant le dosage en ciment ;
- Diminuant le rapport E/C ;
- Augmentant le temps de cure ;
- Augmentant la résistance à la compression.

L'incorporation de fortes teneurs en cendres volantes (> 30%) et en laitiers (>50%) peuvent accélérer significativement la vitesse de carbonatation du béton. Dans ce cas, une cure humide prolongée est de rigueur. [6]

4 Principales conséquences de la carbonatation

La principale conséquence de la carbonatation est l'amorce d'un phénomène de corrosion des armatures du béton armé ou précontraint lorsque le front de carbonatation est au moins égal à leur profondeur d'enrobage. Les désordres associés correspondent alors pour l'essentiel à des fissures et à des épaufrures (expulsion du béton d'enrobage) consécutives aux gonflements provoqués par la formation d'oxydes et hydroxydes de fer sur les armatures. Ces dernières peuvent alors montrer des diminutions de section importantes ou, au stade ultime, des ruptures ayant des conséquences graves sur la capacité portante des éléments de structure.

Une conséquence secondaire du phénomène de carbonatation correspond à une densification de la zone carbonatée par rapport au béton sain. Cette densification, qui ne revêt aucun caractère pathologique, peut, dans certaines conditions, conduire à une diminution relative de 10 à 15 % de la porosité de la zone carbonatée, formant ainsi une barrière diffusionnelle limitant les phénomènes de transfert. [6]

4.1 Evolution de la microstructure

La carbonatation n'est pas nocive pour le béton dans un premier temps mais protège le béton en modifiant sa structure poreuse. La distribution des tailles de pores s'en trouve modifiée et on enregistre une réduction du volume poreux et de la surface spécifique du matériau. Le CaCO_3 formé obture certains pores, donc la porosité totale diminue et le mode poreux des capillaires est déplacé vers les plus grands rayons (la porosité capillaire augmente). Les plus gros pores ne semblent pas être affectés, mais le volume des plus petits est réduit d'un facteur 2.[5]

Au niveau des modifications de la texture poreuse, il faut signaler que la réaction de carbonatation de la portlandite entraîne une augmentation du volume de la phase solide. Le Tableau 3.2 fournit d'ailleurs les valeurs de volume molaire de la portlandite à comparer avec celles des trois formes de calcites. Thiery (2003) montre que la porosité du béton après carbonatation, mesurée par intrusion du mercure ou par gammadensimétrie, diminue. Ce phénomène est le résultat du bilan volumique positif de la carbonatation. Par exemple, la différence des volumes molaires entre CaCO_3 et Ca(OH)_2 varie entre 1 cm^3/mol pour l'aragonite et 5 cm^3/mol pour la vatérite. Elle passe de 12 à 16 cm^3/mol entre un C-S-H sain et un C-S-H carbonaté, ce qui représente plus de 30% d'augmentation. Les carbonates occupent donc une partie des vides capillaires initiaux. Ceci est à corrélérer avec la diminution globale de porosité observée après carbonatation.

La répartition des volumes poreux est en outre modifiée au cours de la carbonatation. Ying, Ngal, Miragliota et Thiery enregistrent après carbonatation accélérée une diminution significative de l'amplitude du mode poreux principal entre 30 et 60 nm. Pour les bétons à fort E/C (égal à 0,7), on observe en plus la création d'un nouveau mode vers les plus gros pores (entre 120 nm et 180 nm). D'après Thiery, pour les bétons à E/C plus modéré (inférieur à 0,7), aucun nouveau mode poreux n'est observé, seulement un comblement de la porosité autour du mode poreux principal.

En ce qui concerne les ciments Portland purs (CEM I), des mesures de porosimétrie au mercure réalisées par Pihlajavaara et Bier et al. indiquent que le volume des pores de rayon inférieur à 0,1 μm est réduit pour des pâtes de rapport E/C compris entre 0,3 et 0,5. La porosité d'une pâte de ciment CEM I à E/C = 0,3 chute de 31,6 % à 25,6 % après 32 mois de carbonatation naturelle. [5]

| <i>Cristaux</i> | <i>Volume molaire ($\text{cm}^3.\text{mol}^{-1}$)</i> |
|--------------------|--|
| <i>Portlandite</i> | 33 |
| <i>Calcite</i> | 35 |
| <i>Vatérite</i> | 38 |
| <i>Aragonite</i> | 34 |

Tableau 2.2 : Volume molaire de la portlandite, la calcite, la vatérite et l'aragonite[5]

4.2 Diminution du pH et amorçage de la corrosion

La principale conséquence de la carbonatation est évidemment la baisse du pH due à la dissolution de la Portlandite dans la solution interstitielle. Cette diminution de pH détruit la couche passivante et amorce ainsi la corrosion des armatures du béton armé ou précontraint lorsque le pH chute à une valeur d'environ 9 à leur profondeur d'enrobage.

Le modèle conceptuel de corrosion par carbonatation (ou pénétration des chlorures) des aciers dans le béton armé (Figure 2.12) montre que les processus liés à la corrosion se développent selon deux périodes. Dans le cas de la carbonatation, il est possible de résumer : [2]

- Période d'incubation, elle correspond à la phase où le CO₂ transite dans le béton et où des processus physico-chimiques à l'origine de la corrosion des armatures peuvent avoir lieu à l'échelle microscopique, mais où aucune dégradation n'est encore visible à l'échelle macroscopique d'observation. Elle peut donc être définie comme le temps requis pour que les aciers soient dépassivés par la carbonatation ;
- Période de propagation, la phase où la corrosion s'amorce et des dégradations se développent.

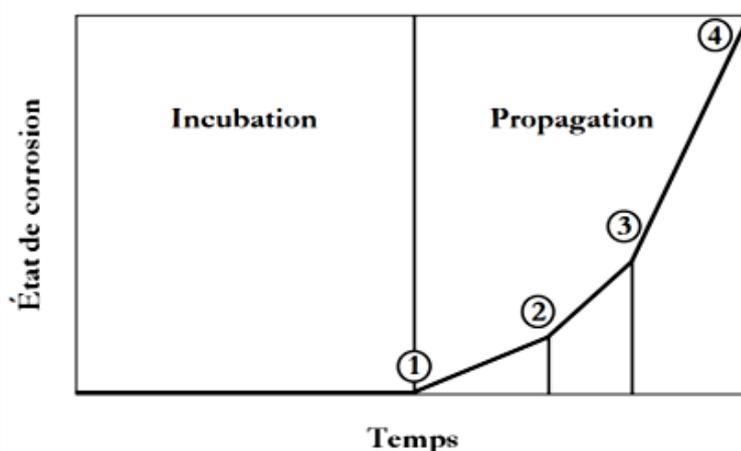


figure 2.12 : Diagramme de Tuutti modifié : (1) dépassivation des armatures, (2) apparition des fissures, (3) éclatement du béton en parement et (4) ruine]. [2]

4.3 Modification de la porosité

La réaction de carbonatation des hydrates entraîne une augmentation du volume de la phase solide. Cette augmentation, de 3 à 19 % selon que le produit de réaction est de l'aragonite ou

de la vatérite, se traduit par une notable réduction de porosité modifiant ainsi la distribution des tailles de pores. [2]

4.4 Retrait de carbonatation

Bien que la carbonatation entraîne une augmentation du volume de la phase solide, celle-ci induit un retrait et non un gonflement.

Powers émet l'hypothèse selon laquelle ce retrait est dû à la dissolution des cristaux de Portlandite alors que ceux-ci sont soumis à des contraintes de compression, ce qui provoque une contraction dimensionnelle.

Hunt et Tomes indiquent que c'est la diminution de la quantité d'eau chimiquement liée, faisant partie des CSH, qui provoque un retrait du matériau. Selon Swenson et Sereda, le retrait de carbonatation ne serait pas uniquement dû à la carbonatation de la Portlandite, mais s'expliquerait également par la déshydratation et par la polymérisation du gel de silice formé après carbonatation des CSH. [2]

4.5 Modification des propriétés mécaniques

Les microcristaux de carbonate de calcium qui se forment à partir de la carbonatation des hydrates colmatent en partie les pores du béton et augmentent ses résistances mécaniques. En effet, il est bien connu que le CaCO_3 qui se forme par carbonatation de la Portlandite est un excellent liant. C'est lui qui d'ailleurs assure l'essentiel de la résistance mécanique des mortiers de chaux.

La résistance à la compression et à la flexion de bétons au ciment CEM I conservés dans une atmosphère de CO_2 peut augmenter au maximum jusqu'à 30 % par rapport aux mêmes bétons conservés en atmosphère exempte de CO_2 .

La résistance à la compression et à la flexion de mortiers modifiés polymères augmente d'environ 48 % après 5 jours de carbonatation accélérée.

La résistance à la traction est également augmentée par la carbonatation, notamment dans le cas de mortiers médiocres et relativement poreux. Cette augmentation est marquée par un accroissement du module d'Young.

En revanche, la résistance mécanique après carbonatation diminue lorsque la teneur en clinker des ciments est inférieure à 40 %. [2]

4.6 Modification des propriétés de transfert

La réaction de carbonatation diminue le coefficient de diffusion effectif des gaz, toutefois la carbonatation naturelle ne semble pas affecter la perméabilité au gaz ni la perméabilité à l'eau liquide. [2]

4.7 Modification de la teneur en eau

La réaction de carbonatation libère de l'eau de structure dans la solution interstitielle. Cette eau libérée, qui augmente la teneur en eau évaporable dans le réseau poral du béton, peut participer à la composition de la solution interstitielle et contribuer au transport d'agents agressifs. Elle peut aussi augmenter le degré de saturation et ralentir ainsi la progression de la carbonatation.

4.8 Les fissurations

L'état de fissuration du béton évolue lui aussi au cours du temps du fait des cycles thermiques ainsi que des sollicitations mécaniques, statiques ou dynamiques, subies par les ouvrages.

L'influence de l'état de fissuration n'est pas simple : lorsqu'une fissure débouche perpendiculairement à la surface d'une armature, le dioxyde de carbone et l'eau peuvent y parvenir, provoquer sa dépassivation et amorcer sa corrosion. Cependant, l'accumulation de carbonate de calcium sur les parois de la fissure, tend à colmater celle-ci et permet une réalcalinisation de l'électrolyte en contact avec l'acier, par diffusion d'espèces alcalines (KOH, NaOH, CH) en provenance du béton. La formation de calcite par dégradation de la portlandite peut avoir un effet bénéfique sur les fissurations du béton d'enrobage. Medgyesi [60] souligne à ce sujet que seules les fissures présentant une ouverture supérieure à 0,2 mm sont nocives pour la stabilité des armatures. Pour des fissures d'ouvertures inférieures, le dépôt de carbonate à leur surface est suffisant pour empêcher le contact eau et oxygène avec les aciers, celui-ci jouant le rôle d'un film protecteur. [5]

5 Techniques d'investigation

Les différentes techniques d'investigation sont: [6]

- l'observation visuelle directe ;
- le prélèvement d'échantillons (carottes ou éclats) ;
- la détermination de l'âge du béton ;
- mesure du pH par contact avec des réactifs,
- la mesure électrique afin de localiser les armatures et d'en déterminer leur diamètre et la distance du front de carbonatation.

6 Conclusion

Plusieurs études ont démontré que la migration du dioxyde de carbone à travers la texture poreuse du béton est significativement réduite lorsque la compacité du béton d'enrobage est augmentée. La porosité totale du béton et la distribution de la taille des pores sont les paramètres déterminants pour la diffusivité du CO₂.

L'augmentation de la compacité est obtenue en particulier en réduisant le rapport E/C. Ce rapport conditionne la perméabilité du béton, donc l'interconnexion du réseau poreux et par conséquent, la vitesse ainsi que la possibilité de diffusion des gaz dans le béton. La diminution du rapport E/C permet donc d'accroître la résistance du béton à la carbonatation. Une cure prolongée permet d'augmenter la résistance du béton à la pénétration du CO₂ en améliorant les propriétés de surface du béton.

La cinétique de carbonatation croît en fonction de la concentration en dioxyde de carbone.

Elle diminue lorsque les performances mécaniques du béton augmentent et est fortement influencée par l'humidité relative du milieu environnant.

L'utilisation d'un CEM I ralentit la vitesse de carbonatation par rapport aux ciments composés.

L'influence de la température sur la vitesse de carbonatation des bétons est incertaine du fait que plusieurs processus antagonistes sont susceptibles d'opérer simultanément.

Carbonatation de bétons adjuvantés à base de ressources locales

La carbonatation ne se produit pratiquement pas dans un béton totalement sec ou complètement saturé en eau. Elle est maximale pour des humidités relatives de l'ordre de 66 %, valeurs courantes dans les climats tempérés.

Chapitre 03

Essai de carbonatation accélérée et méthodes d'assainissement et actions préventives

1 Méthodes de caractérisation expérimentale de la carbonatation

L'essai de carbonatation des bétons peut être effectué selon deux modes d'exposition :

- **Carbonatation naturelle**

Bien qu'il soit très long, cet essai reflète davantage la réalité car il consiste à conserver des échantillons directement à l'air libre, en salle ou in situ. [2]

- **Carbonatation accélérée**

Une station de carbonatation, à teneur en dioxyde de carbone et humidité contrôlées, permet la carbonatation accélérée de matériaux à base de ciment. La chute du pH entraînée par la carbonatation peut être détectée par un indicateur pH-métrique (phénolphtaléine). La quantité de dioxyde de carbone fixée par la matrice cimentaire au cours de la carbonatation peut être suivie par gammadensimétrie via le gain de masse volumique induit. Ce dernier essai non destructif permet un suivi de la carbonatation des bétons en temps (cinétique) et en espace (profil). [6]

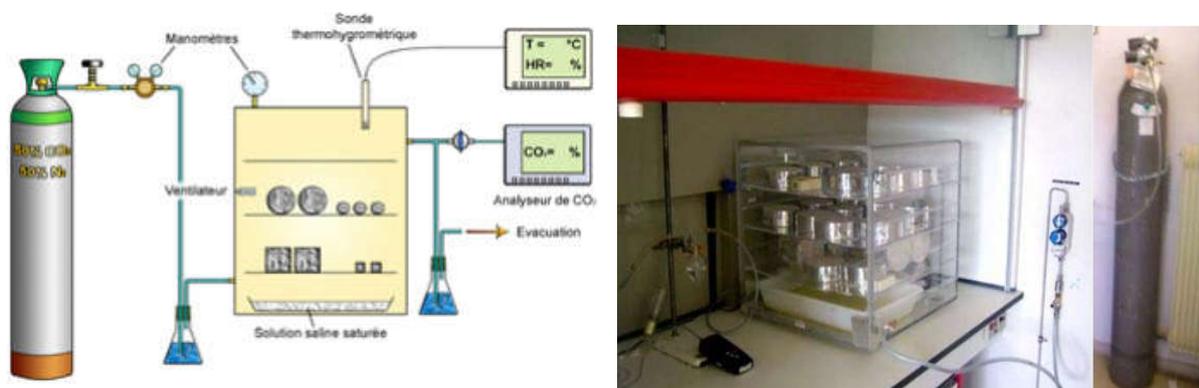


Figure 3.1 : Essai de carbonatation accélérée[6]

Détection par pulvérisation à la phénolphtaléine

La plus répandue des techniques utilisées pour quantifier la cinétique de carbonatation est la détection d'une limite en deçà de laquelle le pH avoisine 9 appelée front de carbonatation détecté par le virage coloré de la phénolphtaléine.

Cette dernière est répandue sur un échantillon fraîchement fendu, la partie non carbonatée se colore alors en rose tandis que la partie carbonatée reste incolore (Figure 3.2). [2]

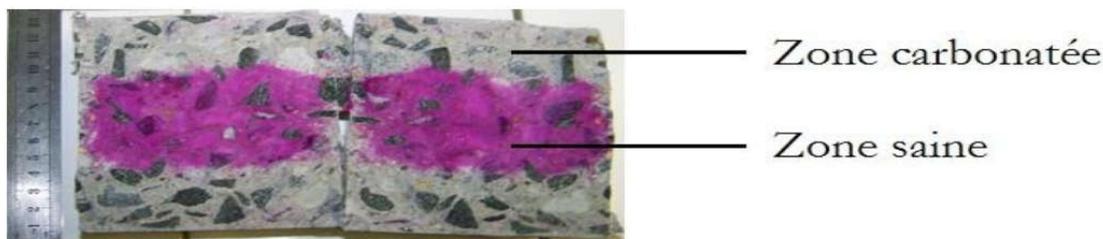


Figure 3.2 : Mesure de la profondeur de carbonatation détectée par la phénolphtaléine.

L'avantage de cette technique est qu'elle révèle une ligne d'équi-pH (pH autour de 9) correspondant à la valeur limite de pH en dessous de laquelle il y a risque de corrosion. En revanche, elle présente un inconvénient majeur qui consiste en le fait que la corrosion des armatures peut démarrer à un pH supérieur à 9. En effet, sachant que la dépassement des armatures peut se produire pour un pH égal à 11,4, il est probable que la zone où il y a risque de corrosion soit plus profonde dans le matériau que le front relevé par la phénolphtaléine (pH = 9 à ± 1 unité pH près).

1.1 Analyse thermogravimétrique « ATG »

L'analyse thermogravimétrique permet d'enregistrer en continu des variations de masse d'un échantillon lors d'une montée de sa température depuis celle de l'ambiance jusqu'à environ 1200 °C. Ces variations de masse correspondent, entre autres, à la déshydroxylation des hydrates et à la décomposition de la calcite.

A partir des courbes de suivi de masse en fonction de la température, les hydrates, essentiellement la Portlandite, sont quantifiés dans la plage de température correspondant à leur déshydroxylation. De la même manière, la calcite et notamment celle formée par carbonatation, est quantifiée dans sa plage de température de décomposition.

En revanche, la difficulté de l'ATG reste la détermination de ces intervalles de température qui varient selon les auteurs. De surcroît, dans le cas de bétons comportant des granulats calcaires, il est difficile de différencier le carbonate de calcium formé par carbonatation de celui apporté par les granulats.

L'ATG peut être couplée à une analyse chimique dans le but de doser la fraction de ciment réellement présente dans l'échantillon, et pouvoir ainsi quantifier les différents éléments

notamment les hydrates pour un volume élémentaire représentatif de matériau et ce, indépendamment de la ségrégation de la phase cimentaire, ainsi que de l'état hydrique et de carbonatation. [2]

1.2 Microscopie électronique à balayage « MEB »

La microscopie électronique à balayage permet de visualiser la carbonatation des hydrates où le changement de microstructure est mis en évidence. Le carbonate de calcium apparaît sous forme grenue sur les hydrates superficiellement carbonatés et sous forme de floccules sur les régions complètement carbonatées. [2]

1.3 Gammadensimétrie

La gammadensimétrie est une méthode non destructive fondée sur l'absorption par la matière des rayons γ émis par une source radioactive de ^{137}Cs . Lorsque la carbonatation progresse dans un béton, elle induit localement une augmentation significative de masse volumique reliée à la quantité de CO_2 fixée sur la matrice cimentaire. [2]

1.4 Diffraction des rayons X « DRX »

La diffraction des rayons X permet, en plus de la mesure des proportions des hydrates et des carbonates de calcium formés par carbonatation, la caractérisation des variétés cristallographiques d'un même minéral, telles les trois formes de carbonate de calcium (calcite, vaterite et aragonite) où chaque type a une intensité de réflexion propre à sa structure cristalline. Toutefois, cette technique ne permet pas d'identifier les composés semi-cristallins ou amorphes. [2]

1.5 Résonance magnétique nucléaire « RMN »

La résonance magnétique nucléaire permet de suivre les modifications structurales des silicates par la résonance magnétique de l'élément chimique ^{29}Si suite à l'application d'un champ magnétique dans l'échantillon à tester. Comme les CSH contiennent une proportion de silice (SiO_2), leur formation ainsi que leur carbonatation sont suivies grâce à cette technique. [2]

2 Essai de carbonatation accélérée en laboratoire [11]

2.1 METHODOLOGIE EXPERIMENTALE

On présente les matériaux utilisés, les méthodes d'essai, les compositions des bétons, la préparation des échantillons et les tests effectués.

2.1.1 Matériaux

2.1.1.1 Ciments

Deux ciments du même clinker sont utilisés: un ciment portland (CEM I) classe 42.5 MPa et un ciment portland composé (CEM II/B) classe 42.5 MPa avec 35% de fillers calcaires. Le clinker est de l'usine de ciment de M'sila. Les compositions chimiques et minéralogiques des ciments utilisés sont données aux tableaux 3.1 et 3.2. La composition minéralogique des ciments potentiels est calculée selon la formule empirique de Bogue. Les propriétés physiques des ciments sont présentées dans le tableau 3.1

| Ciment | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | CaO | MgO | SO ₃ | Na ₂ O | K ₂ O | Cl | LOI |
|----------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|------|-----------------|-------------------|------------------|------|------|
| CEM I 42.5 | 21.36 | 4.98 | 3.63 | 65.86 | 2.06 | 0.93 | 0.08 | 0.77 | 0.02 | 2.48 |
| CEM II/B 42.5 | 17.49 | 4.51 | 3.02 | 62.78 | 2.15 | 2.38 | 0.05 | 0.64 | 0.02 | 8.10 |

Tableau 3.1: Compositions chimiques des ciments

| Type de ciment | C ₃ S | C ₂ S | C ₃ A | C ₄ AF |
|----------------------|------------------|------------------|------------------|-------------------|
| CEM I 42.5 | 61.54 | 14.83 | 7.04 | 11.05 |
| CEM II/B 42.5 | 55.41 | 13.65 | 2.25 | 14.83 |

Tableau 3.2: Compositions minéralogiques des ciments (%)

| Type de ciment | CEM I 42.5 | CEM II/B 42.5 |
|---|------------|---------------|
| Densité apparente (kg/m³) | 1130 | 1030 |
| Densité absolue (kg/m³) | 3100 | 3060 |
| Finesse (cm²/g) | 3917 | 3242 |

Tableau 3.3: Propriétés physiques des ciments (%)

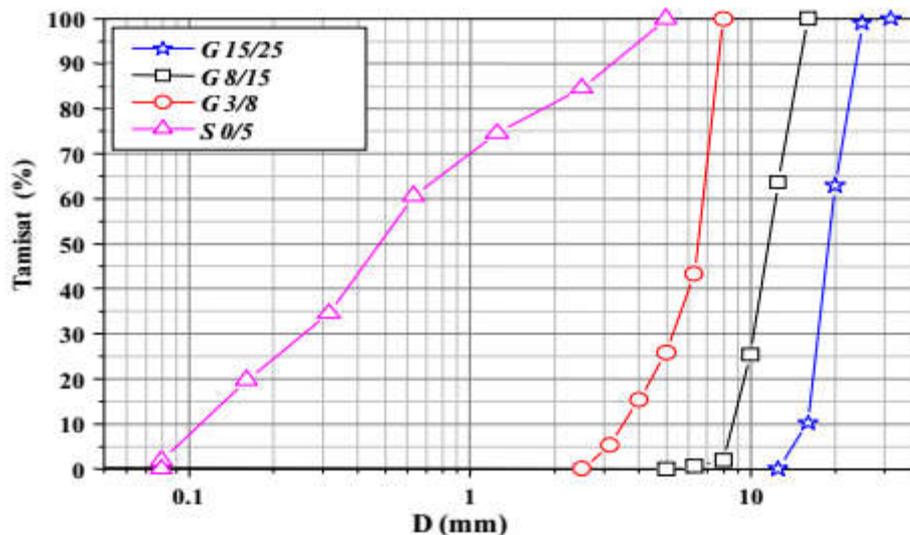
2.1.1.2 Eau

L'eau utilisé est l'eau potable, distribuée par le réseau du service publique de la ville de Biskra qui ne contient que peu de sulfate, et ayant une température de $20 \pm 2^\circ$. Sa qualité et ses caractéristiques sont conformes aux exigences de la norme NFP 18-404.

2.1.1.3 Sable

Le sable utilisé (0/5 mm) est de la région de Biskra (rivière Oued-Djedi).

Densité apparente = 1697 kg/m^3 , densité spécifique = 2600 kg/m^3 , module de finesse = 2,82 (sable convient pour une maniabilité satisfaisante et présente un risque limité à la ségrégation), son équivalent de sable = 80.10 (sable argileux de propreté acceptable pour les bétons de qualité courante). La courbe granulométrique du sable est donnée dans la figure 3.3.



2.1.2 Méthodes d'essais et compositions des bétons

Un programme expérimental a été réalisé pour étudier en parallèle l'effet du rapport eau/ciment (0.4, 0.5 et 0.6), l'influence du type de ciment et des méthodes d'étuvage (durcissement à l'eau, le durcissement à l'air, l'étuvage à 45 °C) sur l'effet de la carbonatation accélérée puis l'absorption capillaire de ces bétons qui sont des indicateurs de durabilité. L'optimisation de la formulation du béton basé sur plusieurs critères qui sont souvent un compromis entre : la maniabilité, la résistance, la durabilité et l'économie.

L'obtention des caractéristiques requises pour le béton passe impérativement par l'adoption de sa formulation aux exigences appropriées à l'ouvrage et à son environnement.

On a choisi la méthode de B. Scramtaiv dont la maniabilité est telle que l'affaissement au cône est de 7 cm. Les compositions des bétons sont présentées dans le tableau 3.4.

| Béton | Eau (l) | Ciment (kg) | Sable (0/5) | Gravier | | | E/C |
|---------------------|------------|----------------|----------------|---------|------|-------|-----|
| | | | | 3/8 | 8/15 | 15/25 | |
| B1 : CEM I 42.5 | 190 | 475.00 | 533 | | | | 0.4 |
| | 190 | 380.00 | 613 | | | | 0.5 |
| | 190 | 316.66 | 666 | | | | 0.6 |
| B2 : CEM II 42.5 | 200 | 500.00 | 490 | 143 | 126 | 909 | 0.4 |
| | 200 | 400.00 | 575 | | | | 0.5 |
| | 200 | 333.33 | 640 | | | | 0.6 |

Tableau 3.4: Compositions des bétons (kg/m^3)

Nous avons confectionné des bétons à partir de six formulations différentes de rapports E/C variant de 0.4 à 0.6, des éprouvettes cubiques ($10 \times 10 \times 10$) cm³ ont été confectionnées :

- ✓ Une série d'éprouvettes : confectionnées, moulées et conservées au laboratoire mise dans l'enceinte d'étuvage à 45 °C et H.R. > 80% pour être retirées dans 8 heures et laissées 3 jours à l'air libre.

- ✓ Une série d'éprouvettes mises dans l'eau pour une maturation de 28 jours.
- ✓ Une série d'éprouvettes mises à l'air libre (28 jours) (H.R. = 65% ± 5%)

Ensuite on prépare les éprouvettes pour l'essai de carbonatation.

2.1.3 Essai de carbonatation accélérée en laboratoire

Les essais de carbonatation ont été conduits selon deux protocoles différents en vue de comparer leurs résultats respectifs et analyser la pertinence de l'essai accéléré.

Le principe de l'essai de carbonatation accélérée est qu'après une durée de 28 jours de conservation, consiste à soumettre des échantillons de bétons une fois l'équilibre des échantillons atteint dans l'enceinte climatique à une forte teneur en dioxyde de carbone (50 % CO₂ et 50 % d'air) et à une humidité relative d'environ 66 % dans une enceinte de carbonatation que nous avons mise en place durant cette étude. De très nombreuses études ont montré qu'un échantillon en équilibre avec une humidité relative comprise entre 50 et 70 % présentait un développement optimal de carbonatation, la température est de 20 ± 2°C à l'intérieur de l'enceinte (figure 3.4).

Ensuite les échantillons de bétons sont retirés de l'enceinte et pesés. A partir du fendage des éprouvettes, la profondeur de carbonatation est mesurée sur des fractures fraîches à l'aide d'un indicateur coloré de pH.



Figure 3.4 : Eprouvettes (10 × 10 × 10) cm³ dans l'enceintes de carbonatation en conditions accélérées

2.1.3.1 Détection de la profondeur de carbonatation par la phénolphthaléine

Pour évaluer la profondeur de carbonatation, nous avons utilisé principalement le test à la phénolphthaléine. Il consiste à pulvériser une solution de phénolphthaléine (1% dans l'éthanol) sur une fracture fraîche réalisée perpendiculairement à la surface soumise à la carbonatation par essai de fendage selon les recommandations A.F.G.C et A.F.R.E.M ,comme le montre la figure 3.5



Figure 3.5 : Test à la phénolphthaléine et mesure du front de carbonatation

Après quelques minutes, la profondeur de carbonatation est mesurée, pour chaque face, selon le mode opératoire d'AFPC-AFREM . L'épaisseur carbonatée se caractérise par le changement de couleur de l'indicateur qui vire au rose foncé dans la zone non carbonatée et incolore dans la zone carbonatée.

L'épaisseur de la couche carbonatée x est régie par l'équation (3.1) en fonction du temps t et de A constante empirique prenant en compte la composition du béton et les conditions d'exposition selon (Parrott L. J., 1993).

$$x = A \times \sqrt{t} \quad 3.1$$

Nous avons regroupé tous les résultats des tests à la phénolphthaléine et de la mesure des fronts de carbonatation des différents bétons à différentes échéances dans la figure 3.6



Figure 3.6 : Mise en évidence des fronts de carbonatation visualisés suite à la pulvérisation à la phénophtaléine des 03 types de bétons (étuvage , air , eau) en carbonatation accélérée

2.1.4 Absorption initiale d'eau des bétons après carbonatation accélérée

La série expérimentale qui va suivre, réalisée selon la recommandation (AFPC), va mettre en évidence l'évolution de l'absorption d'eau sur les mêmes mélanges. L'absorption d'eau dans un milieu poreux est induite par le phénomène d'absorption capillaire au travers de la macroporosité ouverte, porosité dite « capillaire ».

2.1.4.1 La détermination du coefficient d'absorption d'eau initiale

Dans le but d'étudier l'absorption d'eau initiale des bétons après carbonatation, Nous avons adopté un essai généralement appliqué à des terres cuites et des pierres calcaires conformément à la norme NF P10-502 (AFNOR). Chaque série comprend trois échantillons cubiques de 10 cm de côté. Une face d'about de l'échantillon est placée au contact d'une nappe d'eau à 1 cm de profondeur et la quantité d'eau absorbée est évaluée en mesurant la variation de masse de l'échantillon (figure 3.7). La seule précaution à prendre consiste à éliminer la pellicule d'eau retenue à la face inférieure de l'échantillon, avant chaque pesée, à l'aide d'un papier absorbant suivant l'étude de Castel. La quantité d'eau absorbée au bout d'une heure par unité de surface est retenue comme grandeur représentative selon Hall , Schonlin et al. Parrott L. J. , Balayssac et al., Lucija Hanzic et al. et M. Rabehi et al. de volume des plus gros capillaires présents dans la zone de peau, ces capillaires étant les plus efficaces. Les faces latérales sont imperméabilisées à l'aide d'un film plastique (un ruban plastique adhésive) qui force l'eau à adopter un cheminement uniaxial et éviter l'évaporation

par ces mêmes faces. Mezghiche a déterminé que la masse d'eau absorbée est déterminée par des pesées successives des éprouvettes. Les essais sont réalisés dans les conditions de laboratoire ($T = 20 \pm 2^\circ\text{C}$ et $\text{HR} = 45 \pm 10 \%$).

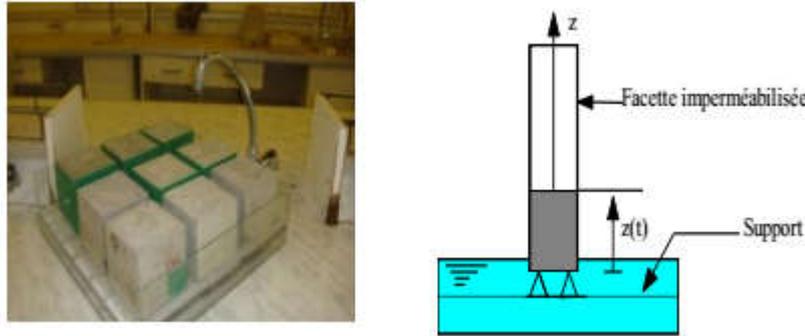


Figure 3.7 : Echantillons de différents bétons soumis à l'essai d'absorption capillaire et le dispositif expérimental (AFNOR)

Le coefficient d'absorption d'eau initial paraît être un bon indicateur de la durabilité du béton, puisqu'il caractérise les plus gros capillaires d'après Parrott L. J. Balayssac et al. Lucija Hanzic et alet M. Rabehi et al. Ce coefficient d'absorption d'eau initial après un temps de succion d'une heure sera noté A_{bi} ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1/2}$). Les coefficients d'absorption d'eaux initiales obtenues pour la totalité des échantillons sont résumés dans le tableau 3.5.

| Type Béton | Béton étuvé | Béton non étuvé | Béton durci à l'eau |
|------------|-------------|-----------------|---------------------|
| A40 | 0.76 | 0.94 | 0.32 |
| A50 | 0.87 | 1.06 | 0.37 |
| A60 | 1.09 | 1.31 | 0.54 |
| B40 | 0.85 | 1.02 | 0.45 |
| B50 | 0.95 | 1.15 | 0.52 |
| B60 | 1.22 | 1.42 | 0.72 |

Tableau 3.5 : Coefficients d'absorption d'eaux initiales A_{bi} obtenus pour la totalité des échantillons

2.2 RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS

2.2.1 Influence du rapport E/C et du type de ciment sur la profondeur de carbonatation accélérée

Les figures 3.8 (1) et 3.8 (2) présentent les résultats de variation de la profondeur de carbonatation à l'âge de 28 jours des différents bétons, en fonction du rapport E/C qui est une fonction croissante du rapport E/C. Autrement dit le rapport E/C croît avec la profondeur de carbonatation.

Ce profondeur est maximale pour les bétons ordinaires non étuvés pour un rapport eau/ciment de 0.6 de qui a un effet remarquable sur les cinétiques de carbonatation en réduisant environ le double des profondeurs de carbonatation atteintes dans le cas de la conservation «eau» et ceci pour les 02 types de ciments et les bétons de la conservation « Eau » sont plus résistants à la carbonatation accélérée que ceux exposés directement à l'air libre après démoulage.

En effet, contrairement à une conservation à l'air libre, une maturation sous eau favorise l'hydratation et conduit ainsi à des bétons moins poreux et ayant plus de produits carbonatés donc plus résistants à la carbonatation d'après Atis; Fattuhi ; Loo et al., et Sickert .

La vitesse de carbonatation est censée augmenter en augmentant le rapport eau/liant dit par Sulapha et al. ; Song et al. en diminuant le dosage en liant d'après Duval . Cependant, aucune corrélation n'est observée en comparant les profondeurs de carbonatation accélérée des bétons étudiés à leurs rapports eau/liant et à leurs quantités de liant (figures 3.8 (1) et 3.8 (2)).

A titre d'exemple la diminution du rapport E/C de 0.6 à 0.5 pour un béton B2 (à base du ciment CEM II/B 42.5) soumis à une cure de 28 jours diminue la profondeur de carbonatation d'environ 23.80 %. Cette diminution est de l'ordre de 18.80 % ceci en diminuant le rapport E/C de 0.5 à 0.4.

De plus, on remarque clairement une diminution de la profondeur de carbonatation pour le béton B2 (cure de 28 jours) de l'ordre de 10 % par rapport au béton B1 (cure de 28 jours) d'après Haque . Ceci signifie que la profondeur carbonatée dépend du dosage en clinker, les résultats obtenus de la carbonatation accélérée à 28 jours pour les différents modes de conservations, sont illustrés sur les figures 3.8 (1) et 3.8 (2).

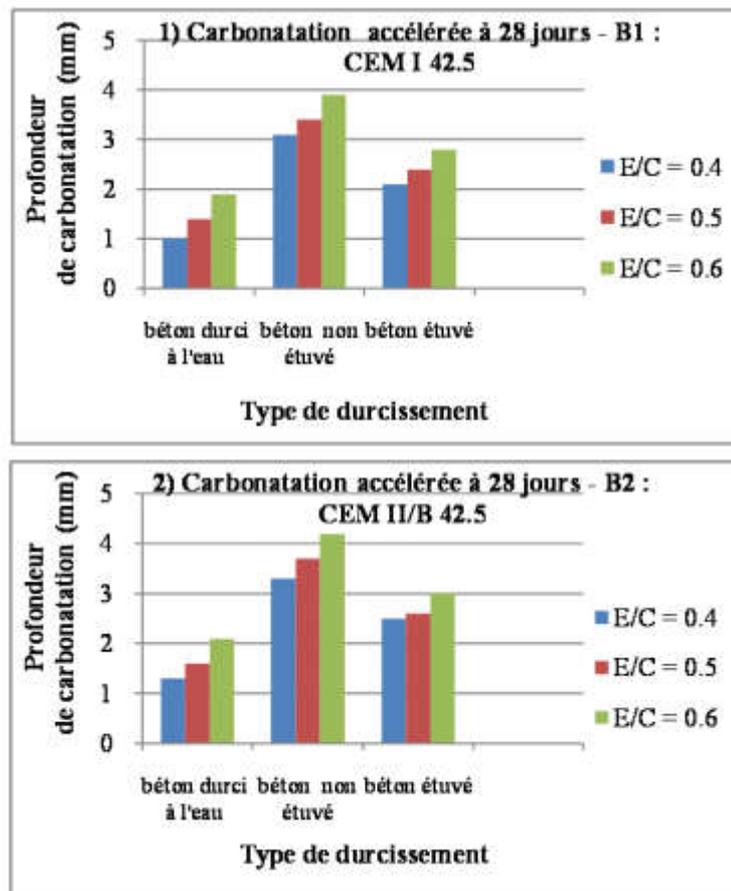


Figure 3.8 (1) et 3.8 (2) : Evolution de la profondeur de carbonatation accélérée avec le temps pour différents type de durcissement et de rapport E/C

2.2.2 Influence du rapport E/C et type de ciment sur l'absorption initiale des bétons

La figure 3.9 rassemble les résultats de la cinétique d'absorption exprimée en terme de masse d'eau absorbée par unité de surface en fonction de la racine carrée du temps des différents types de bétons. Ces résultats mettent en évidence que l'absorption initiale (pendant une heure) est une fonction croissante du rapport E/C. Autrement dit, plus le rapport eau/ciment augmente, plus le taux d'absorption initiale augmente. A titre d'exemple la diminution du rapport E/C de 0.6 à 0.5 pour un béton à base du ciment CEM II/B 42.5 soumis à une cure de 28 jours diminue le taux d'absorption d'eau d'environ 11.73 %. Cette diminution est de l'ordre de 21.70 % en diminue le rapport E/C de 0.5 à 0.4. De plus, on remarque clairement une diminution de taux d'absorption pour le béton B2 (cure 28 jours) d'ordre 8.07 % par rapport au béton B1 (cure 28 jours). Ceci signifie que la qualité du béton est la première

condition d'une bonne durabilité. Puisque les CEM II/B 42.5 aux calcaires produisent un peu les mêmes hydrates que les CEM I /42.5, l'important pour la qualité d'un béton n'est pas la quantité de ciment en soi, mais plutôt la quantité d'hydrates.

De plus l'expérience nous a montré que la carbonatation conduit à un colmatage de la microstructure qui rend le béton moins perméable aux agents agressifs.

La figure 3.8 montre l'absorption initiale des bétons subits à la carbonatation pendant 28 jours pour les 02 types de ciments.

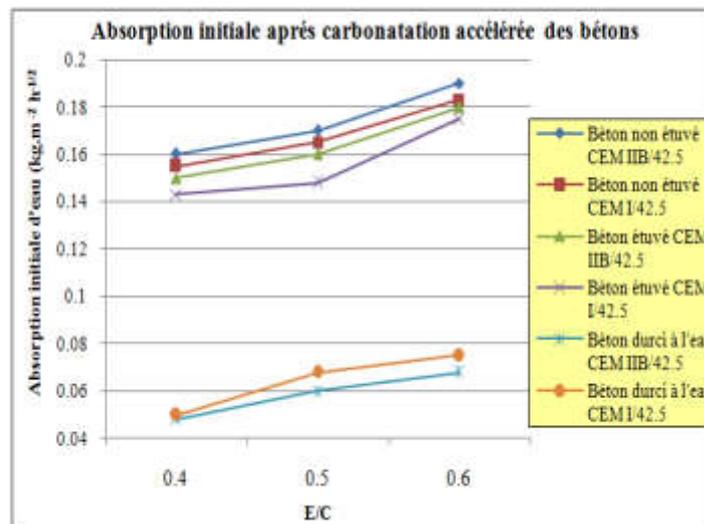


Figure 3.9 : Effet du rapport E/C et type du ciment sur l'absorption initiale des bétons pour les différents âges

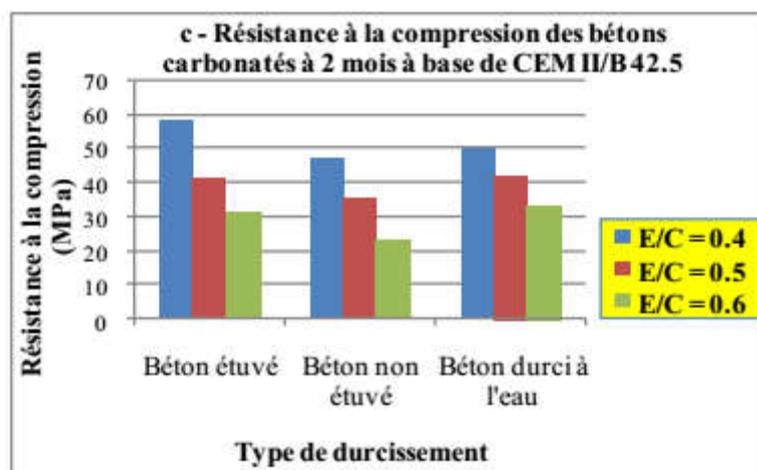
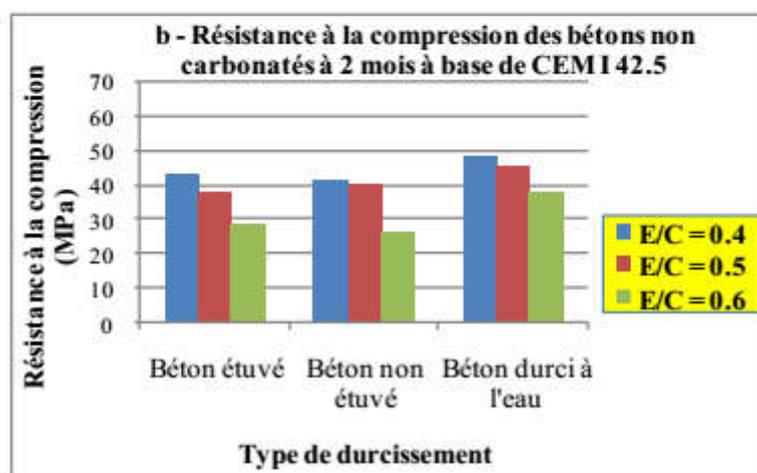
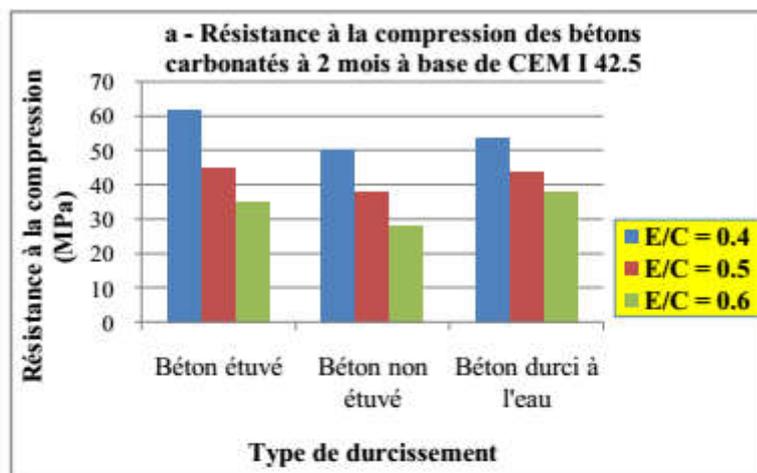
2.2.3 Résistance à la compression

La résistance à la compression est exprimée par le pouvoir du béton à résister à la destruction sous l'action des contraintes dues à la charge de compression. Après séchage en étuve à 105°C jusqu'à masse constante. Un état sec selon la recommandation de Rilem est tel que l'erreur relative entre deux pesées séparées de 24 heures après séchage à 105°C n'excède pas 1 %. Dans cette partie, il s'agit des essais de compression sur des éprouvettes cubiques de (10×10×10) cm³, chaque série comprend trois échantillons selon Mezghiche.

2.2.3.1 Influence de la carbonatation sur la résistance à la compression à 2 mois

Les éprouvettes sont conservées dans l'ambiance du laboratoire après la durée de cure. Les résultats de cet essai sont rassemblés dans la figure 3.10 ci-dessous qui présente l'effet de la

carbonatation sur la variation de la résistance de compression en fonction du rapport E/C pour les différents bétons étudiés.



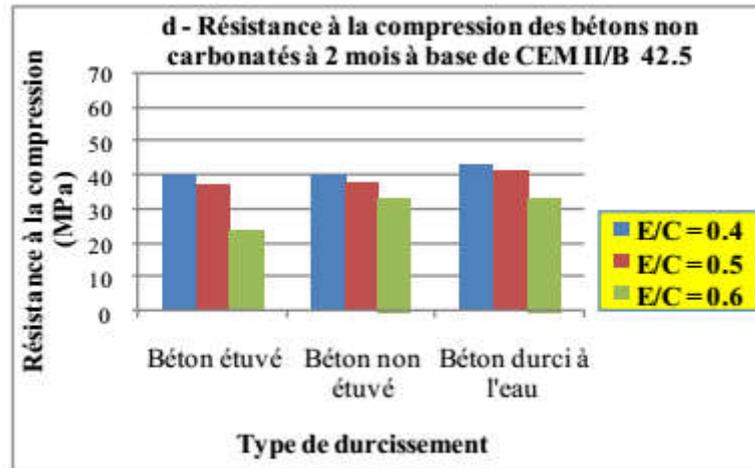


Figure 3.10 : (a, b, c et d) : L'effet de la carbonatation sur la variation de la résistance à la compression en fonction du rapport E/C pour les différents bétons élaborés.

On remarque d'après les figures 3.10-a et 3.10-c pour les deux types de ciment que la carbonatation a permis d'accroître la résistance mécanique des bétons après 2 mois de carbonatation, ceci est expliqué par l'effet de la calcite CaCO_3 qui a tendance à augmenter la compacité du béton en raison du colmatage des pores dans la zone du béton de peau d'après MIRAGLIOTTA. La tendance générale de diminution des profondeurs de carbonatation accélérée des bétons étudiés avec l'augmentation de leurs résistances en compression à 28 jours est en accord avec la littérature de Nischer et (Parrott, 1987), notamment dans le cas de la cure « Eau » (Figure 3.10 (a, b, c et d)).

A titre d'exemple pour le béton :

- B1 étuvé non (carbonaté), une augmentation d'environ 44 % par rapport au B1 étuvé (carbonaté) avec $E/C = 0.4$, une augmentation d'environ 15 % avec $E/C = 0.5$ et de 25 % pour $E/C = 0.6$.

Une comparaison entre les différents bétons, sains et carbonatés est illustrée sur la figure 3.10 (a, b, c et d).

Nous observons à partir de la figure que les distributions des pores à l'état sain et à l'état carbonaté sont proches et ont presque les mêmes allures avec un léger déplacement vers les

plus gros pores pour le cas carbonaté. Cette absence de différence est due à la très faible carbonatation du béton B1 et à $E/C = 0,40$.

2.3 Remarques

La distribution en taille de pores des bétons carbonatée est très serrée pour le faible rapport $E/C : 0.4$ et il s'élargit pour les rapports $E/C : 0.5$ et 0.6 .

Les mesures de porosité des bétons carbonatés indiquent que la carbonatation affecte principalement les pores de petites dimensions. La réduction de cette porosité traduit l'occupation des interstices par les cristaux de carbonate de calcium formés durant la carbonatation. Elle est due au fait que les volumes de ces cristaux de calcite excèdent ceux des hydrates à partir desquels ils se forment et par conséquent, occasionnent une diminution de la porosité. La porosité concernée correspond au mode poral principal, c'est-à-dire à la porosité inter-hydrates.

Ce dernier se déplace vers les plus gros diamètres, ce qui signifie que la carbonatation ouvre cette porosité, certainement par dissolution de la portlandite initialement présente dans cette porosité.

Par contre, les pores dont les diamètres varient entre 3 nm et 23 nm tendent à augmenter au cours de la carbonatation accélérée, ce qui signifie que dans la partie la plus fine du mode principal, la précipitation de la calcite génère une porosité beaucoup plus fine.

Ainsi, la carbonatation se traduit à la fois par une baisse de la porosité inter-hydrates, son décalage vers les plus gros pores et l'augmentation de la porosité la plus fine.

La carbonatation du béton est une des causes de dégradation des ouvrages en béton armé dans la mesure où elle conduit à la dépassivation des armatures pour les bétons armés et à leur oxydation, la caractérisation des effets néfastes de la carbonatation sur la microstructure et les propriétés de transfert du béton, constitue une étape clé pour l'étude de sa durabilité.

Ces résultats montrent que plus le dosage en ciment diminue, par conséquent sa résistance et plus grande est la profondeur de carbonatation.

Le taux important des fines a donc une influence directe sur la carbonatation. Nos résultats rejoignent ceux de Ngala qui ont trouvés que l'effet de la carbonatation s'accélère d'une façon significative lorsque les additions sont très fines.

De plus, toutes choses égales par ailleurs, la profondeur de carbonatation augmente quand E/C croît. En effet, plus ce rapport est élevé et plus la quantité d'eau libre susceptible d'être évaporée est grande. Cette eau, en partant, laisse des vides qui favorisent, d'une part le mouvement de l'eau libre situé plus profondément dans le matériau et, d'autre part, la pénétration et la diffusion du gaz carbonique.

Quantifier l'influence de la carbonatation sur la perméabilité et la porosité sur des bétons de différentes résistances et caractéristiques microstructurales. Ceci implique d'une part de mesurer ces paramètres sur éprouvettes carbonatées et non carbonatées et d'autre part d'exploiter les résultats pour mener une analyse approfondie de la relation entre la carbonatation et les paramètres de transfert et de microstructure.

Tous les résultats recueillis lors de cette étude sont utiles, d'une part, à mieux caractériser la carbonatation comme une cause d'altération physico-chimique et d'autre part avoir une idée sur l'amélioration des propriétés microstructurales et de transfert du béton vis-à-vis de la durabilité et la durée de vie des ouvrages.

3 Méthodes d'assainissement et actions préventives :

3.1 Carbonatation avec éclats et armatures apparentes

Les diverses étapes de restauration sont énumérées ci-après: [6]

- Lavage, bouchardage, hydrodémolition du béton afin de détacher toutes les parties non solidaires de l'ensemble.
- Décapage par sablage des armatures, couper celles très corrodées.
- Protection des fers par un revêtement alcalin.
- Réalisation de l'adhérence à la structure par l'emploi de mortiers de résine.
- Application d'un enduit de finition micro-perméable et éventuellement d'une peinture micro-poreuse.

3.2 Carbonatation sans ou avec très peu de dégâts

Il est possible de ré-alcaniser le béton et donc de recréer un environnement fortement basique autour des armatures, par infiltration de substances alcalines. Cette solution respecte les caractéristiques esthétiques et géométriques initiales de l'ouvrage. Cette technique consiste en l'application contre la surface à traiter d'un "manteau" composé d'une pâte cellulosique, imbibée d'une solution alcaline, installée contre un treillis métallique.

Une circulation électrique est mise en place entre l'armature du béton et le "manteau". En deux à trois semaines, la solution alcaline est passée dans le béton. Le milieu est à nouveau non corrosif. Il convient ensuite de laver la surface et d'y appliquer une peinture micro-poreuse.

Cette méthode n'est toutefois utilisée que lorsque les effets de la carbonatation sont minimes, elle est plutôt considérée comme prophylactique (préventif ou protecteur). [6]

3.3 Actions préventives

Assurer une distance de 30 mm entre les armatures et les faces du béton. Les dernières normes en la matière le stipule très clairement.

Pour des ouvrages particuliers en milieux très exposés, il est possible d'utiliser des armatures zinguées, revêtues de composés époxydiques ou en acier inoxydable. [6]

3.4 Mesures de Prévention Préconisées Par Les normes

Plusieurs normes ont établi des prescriptions en vue de prévenir la corrosion induite par la carbonatation; ainsi:

- la norme NBN EN 206-1 [4] et son supplément belge, la NBN B 15-001 [1], proposent un dosage minimum en ciment et un rapport eau-ciment maximum quant à l'Eurocode 2, il exige un enrobage minimum des armatures
- enfin, le projet de norme européenne prEN 13670 [14] et la norme NBN EN 13369 [10] recommandent une durée de cure minimale.

On peut éventuellement appliquer un revêtement de protection conforme à la norme NBN

EN 1504-2. Celui-ci n'est toutefois nécessaire que lorsque la composition du béton ou l'enrobage des armatures ne sont pas adéquats. [12]

3.4.1 Dosage minimum en ciment et rapport eau-ciment maximum

La norme NBN EN 206-1 considère qu'un ouvrage en béton est durable s'il résiste de manière satisfaisante, tout au long de sa durée d'utilisation, à l'environnement auquel il est exposé. Elle définit plusieurs classes d'exposition en fonction des actions dues à l'environnement.

Les actions liées à la corrosion induite par la carbonatation correspondent aux classes XC1 à XC4, qui s'appliquent aux ouvrages en béton renfermant des armatures ou des pièces métalliques, exposés à l'air et à l'humidité (tableau 3.6) [12]

| Classe | Environnement | Exemples informatifs |
|--------|-------------------------------|--|
| XC1 | Sec ou humide en permanence | Béton à l'intérieur de bâtiments où le taux d'humidité de l'air ambiant est faible. Béton submergé en permanence dans de l'eau. |
| XC2 | Humide, rarement sec | Surfaces de béton soumises au contact prolongé de l'eau. Un grand nombre de fondations. |
| XC3 | Moyennement humide | Béton à l'intérieur de bâtiments où le taux d'humidité de l'air ambiant est moyen ou élevé. Béton extérieur abrité de la pluie. |
| XC4 | Alternativement humide et sec | Surfaces soumises au contact de l'eau, mais n'entrant pas dans la classe d'exposition XC2. |

Tableau 3.6 : Classes d'exposition associées à la corrosion par carbonatation

A chacune de ces classes, la norme NBN B 15-001 associe des types de béton caractérisés par un dosage minimum en ciment C_{min} et un rapport eau-ciment maximum E/C_{max} tableau 3.7

| Paramètre | Classe XC1 | Classe XC2 | Classe XC3 | Classe XC4 |
|--------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | Béton T(0,65) | Béton T(0,60) | Béton T(0,55) | Béton T(0,50) |
| C_{min} (kg/m ³) | 260 | 280 | 300 | 320 |
| E/C_{max} | 0,65 | 0,60 | 0,55 | 0,50 |

Tableau 3.7 : Exigences de durabilité vis-à-vis de la carbonatation associées aux classes d'exposition. [12]

Selon la norme NBN EN 206-1, le concepteur de l'ouvrage doit considérer l'ensemble des

mécanismes potentiels de dégradation. Pour simplifier le travail du prescripteur, la norme NBN B 15-001 a défini des classes d'environnement applicables aux conditions couramment rencontrées en Belgique. Cette classification tient compte à la fois de la carbonatation et des autres mécanismes de dégradation tels que le gel, la pénétration de chlorures, etc.

3.4.2 Enrobage Des armatures

La norme NBN EN 1992-1-1 prescrit des valeurs minimales d'enrobage ($c_{min,dur}$) pour les ouvrages en béton armé en fonction de la classe structurale, des classes d'exposition et des classes d'environnement (tableau 3.8). En Belgique, la classe S4 est la classe structurale recommandée pour les ouvrages d'une durée d'utilisation de 50 ans. [12]

| Classe structurale | Classes d'exposition et classes d'environnement (*) | | | | | |
|--------------------|---|----------|-----|----------|----------|----------|
| | XC1 | XC2, XC3 | XC4 | XD1, XS1 | XD2, XS2 | XD3, XS3 |
| | E1 | EE1, EE2 | EE3 | ES2 | ES1, ES3 | EE4, ES4 |
| S1 | 10 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 |
| S2 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 |
| S3 | 10 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 |
| S4 | 15 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 |
| S5 | 20 | 30 | 35 | 40 | 45 | 50 |
| S6 | 25 | 35 | 40 | 45 | 50 | 55 |

Tableau 3.8 : Valeurs d'enrobage minimales $C_{min,dur}$ (en mm) requises pour assurer la durabilité du béton armé.

(*) : pour un béton armé situé dans un environnement chimiquement agressif (XA et EA), il y a lieu de considérer la valeur la plus élevée de $C_{min,dur}$ indiquée dans les autres classes d'exposition et d'environnement.

3.4.3 Cure Du béton frais

La cure consiste à prendre des mesures de protection en vue de réduire l'évaporation d'eau à la surface du béton ou de préserver son taux d'humidité.

Des recommandations ont été formulées à ce sujet dans le projet de norme européenne prEN 13670 ainsi que dans la norme NBN EN 13369. En ce qui concerne le béton coulé in situ, le projet de norme prEN 13670 a défini plusieurs classes de cure. Celles-ci correspondent à une durée de cure de 12 heures ou au temps nécessaire pour atteindre une résistance donnée en compression (voir tableau 3.8, p. 3.9). La classe de cure doit être spécifiée dans les prescriptions relatives à l'exécution. [12]

| Classes de cure | Pourcentage de la valeur spécifiée pour la résistance caractéristique à la compression à 28 jours |
|-------------------------------|---|
| Classe 1 – 12 heures min. (*) | – |
| Classe 2 | 35 % |
| Classe 3 | 50 % |
| Classe 4 | 70 % |

Tableau 3.9 : Classes de cure.

(*) : A condition que la prise n'excède pas 5 heures et que la température à la surface du béton soit égale ou supérieure à 5 °C.

Les prescriptions applicables aux produits préfabriqués sont énoncées dans la norme NBN EN 13369.

4 Conclusion

Du point de vue de la durabilité des structures en béton armé, la carbonatation a deux effets. L'un est positif : la diminution de la porosité, qui s'accompagne d'une augmentation de la résistance mécanique et de la résistivité électrique. L'autre est négatif : la baisse du pH de la solution interstitielle conduisant à la dépassivation de l'acier.

Pour améliorer la durabilité des ouvrages en béton armé, il est donc nécessaire d'allonger la période d'amorçage de la corrosion en utilisant des bétons peu perméables et un enrobage suffisant.

Conclusions générales

L'examen des ouvrages affectés par une détérioration du béton d'enrobage recouvrant les armatures révèle que les dommages résultent presque toujours d'une épaisseur d'enrobage trop mince et/ou d'un béton défectueux, poreux et peu résistant .

La carbonatation du béton est une réaction qui est pratiquement sans conséquence pour le béton lui-même. Par contre, quand il contient des armatures il n'en est plus de même. L'acier, qui est protégé dans le béton non carbonaté, peut subir la corrosion lorsque le béton carbonate.

Le mécanisme carbonatation des bétons est la réaction de neutralisation des bases présentes dans le ciment hydraté, essentiellement la Portlandite et les CSH, avec le dioxyde de carbone naturellement présent dans l'air.

De nombreux paramètres influençant ce phénomène, rapport E/C, le dosage et la nature du ciment, cure, résistance à la compression, humidité relative, température,, etc.

La corrosion des armatures du béton armé est aujourd'hui la pathologie qui coûte le plus cher à la collectivité . Les paramètres dégagés lors des observations et des études montrent que la durabilité des armatures passe, en premier lieu, par la réalisation d'un béton compact et d'une épaisseur d'enrobage adaptée.

Les approches modernes ne se basent plus uniquement sur la simple résistance à la compression comme indicateur de durabilité , mais sur des approches où les caractéristiques du matériau sont définies en fonction d'une durée de vie inscrite dans un environnement donné (normes Eurocodes, approche performantiell).

Les progrès réalisés dans la modélisation numérique et la prise en compte des incertitudes, dans les approches fiabilistes notamment, permettent de calculer des durées de vie par rapport à des états limites donnés (initiation de la corrosion, perte d'un pourcentage de section d'acier). La requalification mécanique de l'ouvrage permet alors de définir la maintenance adéquate (réparation, confortement, remplacement). Afin d'éviter des interventions lourdes, il est toujours préférable d'identifier les désordres le plus tôt possible par des inspections bien ciblées.

Références Bibliographiques

- [1] Nadir HACHEMI ; Adel BOUSSA . mémoire de master. « Influence des différentes granulométries du sable sur le comportement mécanique du béton ». UNIVERSITE DE M'HAMED BOUGARA –BOUMERDES. 2017
- [2] Akli YOUNSI. Thèse de Doctorat. « Carbonatation de bétons à forts taux de substitution du ciment par des additions minérales ». Université de La Rochelle.2011
- [3] Y.HOUST. CHANTIERS/SUISSE, VOL15, 6/84 PAGES 569-574. «Carbonatation du béton et corrosion des armatures ». Laboratoire des matériaux de construction (LMC) de l'EPF de Lausanne, suisse
- [4] Ngoc Tru VU. Thèse de Doctorat. «Contribution à l'étude de la corrosion par carbonatation du béton armé : approche expérimentale et probabiliste ». l'Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse. 2011
- [5] Fatima-Zohra DAKHMOUCHE CHABIL. Thèse de Doctorat. « CARBONATATION DE BETONS ADJUVANTES A BASE DE RESSOURCES LOCALES ALGERIENNES ». Université Mentouri de Constantine. 2009
- [6] Soumaya Amina BENSALFIR. Thèse d'ingénieur. «Mécanismes d'altérations des matériaux cimentaires soumis aux milieux fortement agressifs ». Université de Mascara-Algérie. 2010
- [7] Solutions béton. Page 2. 2012
- [8] Thierry CHAUSSADENT. « Etat des lieux et réflexions sur la carbonatation du béton armé ». Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris. 1999
- [9] Abdelhamid GUETTALA. Cours Pathologie « Corrosion ». Université Mohamed khider – Biskra.
- [10] Bruno CAPRA. Article. «Corrosion des structures en béton armé ». Date de publication : 2014
- [11] B. K. BEN AMMAR, M. MELLAS, B. MEZGHICHE. Essai de en laboratoire. «CARACTERISATION DES BETONS D'ENROBAGE POUR LES BETONS DE PREFABRICATION SOUMIS A LA CARBONATATION ». Laboratoire de Recherche en Génie Civil, Université de Biskra. 2017
- [12] Les Dossiers du CSTC – N° 3/2007 – Cahier n° 2 – page 1 ; 2 ; 3. « Corrosion des armatures induite par la carbonatation du béton : comment s'en prémunir ? ». Belgique. 2007