

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene  
Faculté de Génie Civil.



Thèse présentée pour l'obtention du grade de DOCTEUR en Génie Civil par:

**BADAOUI Azhar**

**Carbonatation du béton armé  
-Approche probabiliste-**

Soutenue publiquement le 13 /11/ 2012 devant le jury composé de:

|     |                    |      |               |                     |
|-----|--------------------|------|---------------|---------------------|
| M.  | M. CHEMROUK        | Prof | USTHB /FGC    | Président           |
| Mme | F. KHARCHI         | Prof | USTHB /FGC    | Directrice de thèse |
| M.  | M. GUENFOUD        | Prof | U. Guelma     | Examineur           |
| M.  | D. BENOUAR         | Prof | USTHB /FGC    | Examineur           |
| M.  | M.N. OUDJIT        | MCA  | USTHB /FGC    | Examineur           |
| M.  | A.N.T. IHADDOUDENE | MCA  | USTHB /FGC    | Examineur           |
| M.  | BADAOUI M'Hammed   | D.R  | CSSI / France | Invité              |

## Remerciements

En tout premier lieu, je tiens à remercier le professeur Mohamed Chemrouk de l'Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene (Alger) d'avoir accepté de présider ce jury.

Je tiens également à remercier les professeurs Mohamed Guenfoud de l'Université de Guelma, Djillali Benouar de l'Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene (Alger) et les Docteurs M.N Oudjit, A.N.T Ihaddoudène de l'Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene (Alger) d'avoir accepté d'examiner ce travail.

Mes sincères remerciements vont à ma directrice de thèse professeur Fattoum Kharchi de l'Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene (Alger), pour sa rigueur scientifique, sa fermeté et ces précieux conseils ont permis à ce travail d'aboutir.

Je suis également reconnaissante au Docteur M'hammed Badaoui de CSSI France, pour m'avoir fait découvrir un aspect probabiliste de la recherche que je ne connaissais pas, pour m'avoir également soutenu, encouragé et rassuré durant les derniers mois de la thèse, contribuant à l'aboutissement de ce travail.

Je tiens à remercier mon mari pour sa compréhension, son attention et son soutien. Merci également à mes parents d'avoir toujours été présent à mes côtés,

Je voudrais aussi exprimer ma reconnaissance envers les personnes qui m'ont aidé et soutenu durant la période de la thèse. Je tiens à remercier pour cela mes amies Saida et Karima de l'USTHB, Mahdia et Mériem de l'ENSTP et les collègues et amis croisés au cours de ces années.

## ملخص

إن الديمومة هي عنصر أساسي لتصميم المنشآت الخرسانية، و تآكل الحديد يعتبر عاملا مؤثرا عليها، لأنه يتسبب في إتلاف الخرسانة المسلحة.

الأسباب الجذرية لتآكل حديد الخرسانة المسلحة هي الكربنة و اختراق الكلور، أو غيرهم من العوامل العدوانية الأخرى.

CO الموجود في الغلاف الجوي عبر مسام<sup>2</sup>كربنة الخرسانة متعلق بانتشار غاز ثاني أكسيد الكربون  $aC(OH)$  التي تعمل كحاجز على الـ pH، عندما يتم<sup>2</sup>الخرسانة، و كذا ا تفكك الهيدرات خصوصا استهلاكها ينخفض الـ pH إلى مادون 9 مؤديا إلى تآكل الحديد، الذي يبقى محميا فقط داخل وسط قاعدي.

الخاصية العشوائية لتغلغل العوامل العدوانية و كذا خصائص المواد أو المنشآت يعطي عددا كبيرا من الشكوك، و دراسة تزايد تدهور المنشآت تتطلب تحليلا احتماليا أخذا بعين الاعتبار الشكوك حول خصائص المواد والمحيط و التدهور الناجم عنهم.

الهدف من هذه الأطروحة هو وضع صياغة احتمالية لتحليل كربنة الخرسانة، مع التركيز على دراسة الحالة العشوائية للعوامل الأكثر تأثيرا على ظاهرة كربنة الخرسانة المسلحة، و إظهار أهمية هذا النهج المستعمل لحساب عمق الكربنة و كذا الوقت اللازم لوصوله إلى الحديد حتى لو تعذر قياسهما مباشرة.

### كلمات مفتاحية:

ديمومة ، كربنة، خرسانة، نهج احتمالي ، أكسيد الكربون، نسبة الماء/الاسمنت، الرطوبة النسبية .

## Résumé

La prise en compte de la durabilité est un point clé pour le dimensionnement des ouvrages en béton. Dans ce sens, la corrosion est un paramètre influent sur la durabilité puisqu'elle détériore le béton. Les causes à l'origine de la corrosion des armatures des ouvrages en béton sont la carbonatation et la pénétration des chlorures, ou d'autres agents agressifs. La carbonatation du béton correspond à la diffusion du  $\text{CO}_2$  de l'atmosphère dans les pores du béton et à la dissolution des hydrates, notamment la portlandite  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , qui joue un rôle de tampon sur le pH. Lorsque la portlandite est consommée, le pH chute à une valeur inférieure à 9. Ceci peut conduire à la corrosion des aciers du béton armé qui ne sont passivés et protégés qu'en milieu fortement basique.

Le caractère aléatoire de la pénétration des agents agressifs et celui des propriétés des matériaux ou des structures introduit de plus un grand nombre d'incertitude. L'étude de l'évolution de la dégradation d'une structure demande donc une analyse qu'il faut développer sur des bases probabilistes et qui permet de tenir compte des incertitudes inhérentes aux caractéristiques des matériaux, à celles de l'environnement et à celles des dégradations qui en résultent.

L'objectif de cette thèse est d'établir une formulation probabiliste permettant l'analyse du processus de carbonatation d'un béton, en se concentrant précisément sur l'étude de l'aspect aléatoire des paramètres les plus influents sur le phénomène de carbonatation du béton armé. De montrer aussi l'intérêt d'une telle approche pour la prise en compte réaliste des incertitudes sur les paramètres du modèle déterministe utilisé pour calculer la profondeur de carbonatation et le temps nécessaire pour que cette profondeur atteigne l'acier, même si ceux-ci ne sont pas directement mesurables

Mots-clefs: Durabilité, carbonatation, béton, approche probabiliste, dioxyde de carbone, eau /ciment, humidité relative.

## **Abstract**

Durability is a key factor for any concrete structural design. Rebars corrosion is induced by carbonation and penetration of chlorides, or others aggressive agents. Concrete carbonation relates to the diffusion of  $\text{CO}_2$  in the atmosphere through the concrete pores and to the dissolution of the hydrates, especially the portlandite, which supplies the reserve of concrete basicity. When portlandite is consumed, the pH value decreases to a value less than 9. This corresponds to the conditions allowing the corrosion of the reinforced bars which are protected only under a high pH level.

A great deal of uncertainty still remains in this subject as a result of the random nature of the infiltration of these aggressive agents as well as the material and structural properties of reinforced concrete. Consequently, in order to determine the degradation of these structures with time, it is necessary to approach the subject from a probabilistic point of view that considers the uncertainties involved with the geometrical dimensions of these structures, with the material characteristics and with the environment and the subsequent deterioration that are induced.

The aim of this thesis is to provide a probabilistic formulation for the analysis of the concrete carbonation process, focusing specifically on the study of the randomness of the most influential parameters on the reinforced concrete carbonation and show the interest of such an approach which tacked into account realistically the uncertainties of the deterministic modeling parameters used to calculate the carbonation depth and the time required for such carbonation to reaches the steel, even though these parameters are not directly measurable.

Keywords: Durability, carbonation, concrete, Probabilistic approach, carbon dioxide, Water /Cement, relative humidity.

# Sommaire

|   |          |
|---|----------|
| Sommaire .....  | i        |
| Notations .....   | vi       |
| Table des figures.....  | viii     |
| Liste des tableaux.....   | xi       |
| <b>Introduction.....</b>  | <b>1</b> |
| <b>Chapitre1: Etat des lieux sur la carbonatation des matériaux cimentaires...4</b> | <b>4</b> |
| 1.1. Introduction .....   | 4        |
| 1.2. Généralités sur le ciment hydraté.....   | 5        |
| 1.2.1. Les constituants des ciments.....  | 5        |
| 1.2.2. L'hydratation du ciment et son mécanisme.....                                | 6        |
| 1.2.3. Les produits d'hydratation.....  | 7        |
| 1.2.3.1. La portlandite (C-H).....  | 7        |
| 1.2.3.2. Les silicates de calcium hydratés (C-S-H).....                             | 7        |
| 1.2.3.3. Les aluminates et sulfo-aluminates de calcium.....                         | 8        |
| 1.2.3.4. Les aluminoferrites.....   | 8        |
| 1.2.3.5. Les réactions pouzzolaniques.....  | 8        |
| 1.3. Généralités sur le dioxyde de carbone.....                                     | 8        |
| 1.3.1. Le dioxyde de carbone dans l'atmosphère.....                                 | 9        |
| 1.3. 2. Le dioxyde de carbone en solution aqueuse .....                             | 10       |
| 1.4. La carbonatation .....   | 10       |
| 1.4.1. Carbonatation des hydrates du béton.....                                     | 11       |
| 1.4.1.1. La Carbonatation de la portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ .....          | 11       |
| 1.4.1.2. La Carbonatation des silicates de calcium hydratés (C-S-H).....            | 12       |
| 1.4.1.3. La carbonatation des autres constituants des matériaux cimentaires.....    | 12       |
| 1.4.2. Paramètres influençant la carbonatation .....                                | 13       |
| 1.4.2.1. Paramètres de formulation.....   | 13       |
| 1.4.2.2. Paramètres liés au milieu environnant.....                                 | 15       |
| 1.4.2.3. Paramètres liés au processus de fabrication.....                           | 17       |

---

|  |           |
|--|-----------|
| 1.4.3. Conséquences de la carbonatation sur les matériaux cimentaires..... | 19        |
| 1.4.3.1. Evolution de la microstructure.....                               | 19        |
| 1.4.3.2. Evolution de la teneur en eau.....                                | 19        |
| 1.4.3. 3. Evolution des performances mécaniques.....                       | 19        |
| 1.4.3. 4. Evolution des propriétés de transfert .....                      | 20        |
| 1.5. La corrosion des armatures liée à la carbonatation.....               | 20        |
| 1.5.1. Corrosion électrolytique du fer.....                                | 20        |
| 1.5.2. Potentiel d'électrode .....   | 23        |
| 1.5.3. Diagramme de Pourbaix .....   | 24        |
| 1.5.4. Rôle du béton.....  | 26        |
| 1.5.5. Etat de l'acier dans le béton .....                                 | 27        |
| 1.5.6. Dépassivation par carbonatation du béton.....                       | 27        |
| 1.6. Conclusions.....  | 29        |
| <b>Chapitre 2: Modélisation de la carbonatation.....</b>                   | <b>30</b> |
| 2.1. Introduction.....   | 30        |
| 2.2. Cinétique de la carbonatation.....                                    | 30        |
| 2.3. Les modèles de carbonatation.....                                     | 31        |
| 2.3.1. Le modèle de BARY et SELIER.....                                    | 32        |
| 2.3.2. Le modèle de Thiéry.....  | 34        |
| 2.3.3. Le modèle Duracrete.....  | 36        |
| 2.3.4. Le modèle de Miragliotta.....                                       | 37        |
| 2.3.5. Le modèle du Task Group 5.1 du CEB.....                             | 38        |
| 2.3.6. Le modèle utilisé par la société Oxand.....                         | 39        |
| 2.3.7. Le modèle de Bakker.....  | 40        |
| 2.3.8. Le modèle Al-Akchar, Baroghel-Bouny et Raharinaivo.....             | 42        |
| 2.3.9. Le modèle de Papadakis, Vayenas et Fardis.....                      | 43        |
| 2.3.10. Le modèle de Ying-Yu et Qui-Dong.....                              | 45        |
| 2.3.11. Le modèle de Saetta, Schrefler et Vitaliani.....                   | 47        |
| 2.4 Conclusions.....   | 48        |
| <b>Chapitre 3. L'approche probabiliste.....</b>                            | <b>50</b> |
| 3.1. Introduction.....   | 50        |

|   |           |
|---|-----------|
| 3.2. Représentation générale des champs aléatoires.....   | 50        |
| 3.2.1. Classification des champs aléatoires.....  | 52        |
| 3.2.1.1. Classification suivant les propriétés statistiques.....  | 52        |
| 3.2.1.2. Champ aléatoire homogène.....  | 53        |
| 3.2.1.3. Champ aléatoire non homogène.....  | 53        |
| 3.2.2. Fonction de corrélation d'un champ aléatoire.....  | 54        |
| 3.3. Simulation d'un champ aléatoire.....   | 54        |
| 3.3.1. Implémentation numérique.....  | 54        |
| 3.3.2. Méthode des simulations de Monte Carlo.....  | 54        |
| 3.4. Densité de probabilité des variables aléatoires.....   | 55        |
| 3.4.1. Principe du maximum d'entropie.....  | 55        |
| 3.4.2. Méthode du maximum d'entropie.....   | 57        |
| 3.4.3. Propriétés de la densité de probabilité déduite de la PME.....   | 60        |
| 3.5. Probabilité de défaillance .....   | 60        |
| 3.5.1. Comparaison entre les simulations déterministes et probabilistes .....                                       | 62        |
| 3.6. Loïs de distribution ou de probabilité.....  | 63        |
| 3.7. Méthodes de justifications de la sécurité.....   | 64        |
| 3.8. Les méthodes d'évaluation des probabilités.....  | 65        |
| 3.8.1. Méthodes probabilistes simplifiées.....  | 65        |
| 3.8.1.1 Espace réduit .....   | 66        |
| 3.8.1.2. Indice de fiabilité .....  | 68        |
| 3.8.2. Méthodes probabilistes .....   | 71        |
| 3.9 Contexte normatif et fiabilité « Norme NA 16002 au service de la durabilité des ouvrages ».....                 | 73        |
| 3.10. Conclusions.....  | 74        |
| <b>Chapitre 4 : Investigation statistique de la carbonatation du béton.....</b>                                     | <b>75</b> |
| 4.1. Introduction.....  | 75        |
| 4.2. Investigation probabiliste de la carbonatation.....  | 75        |
| 4.2.1. Variabilités spatiales du rapport eau /ciment (E/C), d'humidité relative (HR) et du gaz carbonique (Cs)..... | 75        |
| 4.2.2. Implémentation numérique des simulations.....  | 76        |

---

|   |     |
|---|-----|
| 4.3. Application numérique.....   | 77  |
| 4.3.1. Matériaux de l'étude.....  | 77  |
| 4.3.2. Résultats et analyse.....  | 79  |
| 4.4. Conclusions.....   | 84  |
| <b>Chapitre 5: Influence des variabilités du rapport eau/ciment, de l'humidité relative et de la pression du gaz carbonique sur la profondeur de carbonatation du béton armé.</b> ..... | 85  |
| 5.1. Introduction.....  | 85  |
| 5.2. Adaptation du modèle de Duracrete au calcul de la profondeur de carbonatation.....   | 85  |
| 5.3. Application.....   | 88  |
| 5.3.1. Introduction.....  | 88  |
| 5.3.2. Résultats.....   | 88  |
| 5.3.2.1. Statistiques de la profondeur de carbonatation en fonction des variabilités du E/C...88  |     |
| 5.3.2.2 Statistiques de la profondeur de carbonatation en fonction des variabilités du Cs.....94  |     |
| 5.3.2.3 Statistiques de la profondeur de carbonatation en fonction des variabilités du HR...98  |     |
| 5.4. Conclusions.....   | 103 |
| <b>Chapitre 6 : Influence des variabilités du rapport eau/ciment, de l'humidité relative et de la pression du gaz carbonique sur le temps de carbonatation du béton armé.</b> .....     | 105 |
| 6.1 Introduction.....   | 105 |
| 6.2. Application.....   | 105 |
| 6.2.1 Introduction.....   | 105 |
| 6.2.2. Résultats.....   | 106 |
| 6.2.2.1. Statistiques du temps de carbonatation en fonction des variabilités du E/C.....106   |     |
| 6.2.2.2 Statistiques du temps de carbonatation en fonction des variabilités du Cs.....111   |     |
| 6.2.2.3 Statistiques du temps de carbonatation en fonction des variabilités du HR.....115   |     |
| 6.3 Conclusions.....  | 120 |
| <b>Conclusions et perspectives.</b> .....   | 122 |
| <b>Bibliographie</b> .....  | 125 |
| A1. Annexe 1 .....  | 136 |

A2. Annexe 2 .....145  
A3. Annexe 3 .....154

## Notations

|                                  |   |
|----------------------------------|---|
| $\text{CO}_2$                    | : Gaz carbonique  |
| pH                               | : Opposé du logarithme décimal de la concentration en ions $\text{H}_3\text{O}^+$ des solutions |
| $P_{\text{atm}}$                 | : La pression atmosphérique   |
| $\alpha_{\text{CO}_2}$           | : La fraction volumique en $\text{CO}_2$  |
| $R$                              | : La constante des gaz parfaits   |
| $T$                              | : Température absolue   |
| $K$                              | : La constante d'équilibre  |
| E/C                              | : Rapport eau/ciment  |
| HR                               | : Humidité relative   |
| $C_s$                            | : Concentration en $\text{CO}_2$ à la surface du matériau                                       |
| Fe                               | : Métal   |
| $X(t)$                           | : Profondeur de carbonatation $X(t)$ en fonction du temps                                       |
| $D_{\text{CO}_2}$                | : Coefficient de diffusion effectif du $\text{CO}_2$  |
| $K$                              | : Coefficient de transport du béton   |
| $R_{28}$                         | : La résistance à la compression à 28 jours   |
| $C_0$                            | : La concentration en $\text{CO}_2$ du mélange gazeux en contact avec le béton                  |
| $t_{\text{wc}}$                  | : La durée de la cure   |
| $X_c$                            | : La profondeur de carbonatation  |
| $\varepsilon_p$                  | : Porosité totale du béton  |
| $S_a$                            | : Degré de saturation du matériau   |
| $n_{[\text{CO}_2]_{\text{ext}}}$ | : Concentration atmosphérique du $\text{CO}_2$  |
| $D_{\text{eff}}$                 | : Coefficient de diffusion effectif du $\text{CO}_2$ dans le béton                              |
| $a$                              | : Quantité de $\text{CO}_2$ nécessaire à la carbonatation complète du matériau                  |
| $t_0$                            | : Période de référence  |
| $\gamma$                         | : Coefficient d'exposition  |
| $b$                              | : Quantité d'eau évaporable dans un béton   |
| $t_{di}$                         | : Durée de la $i$ ème période de séchage  |
| $Q$                              | : Le coefficient cinétique de carbonatation   |
| $X(x)$                           | : Champ aléatoire homogène  |
| $E[.]_{,\mu_x}$                  | : La valeur moyenne   |
| $\sigma_x$                       | : L'écart type de la fluctuation  |

$\text{Var}[\cdot]$  : Variance  
 $\text{Cov} [J, R(\cdot)]$ : Fonction d'auto- covariance  
 $H_E$ : Entropie  
 $f(\cdot), f_x(\cdot)$ : Distribution de probabilité  
 $\Phi_i$  : Angle aléatoire uniformément distribués sur l'intervalle  $[0, 2\pi]$   
 $\lambda_i$  : Multiplicateur Lagrangien d'ordre  $i$   
 $m_i$  : Moment d'ordre  $i$   
 $G(x)$ : Fonction d'état limite  
 $R$ : Résistance (l'enrobage du béton)  
 $S$ : Sollicitation  
 $P_f$  : La probabilité de défaillance  
 $P_r$  : La fiabilité  
 $\beta$  : Indice de fiabilité d'Hasofer-Lind  
 $P^*$  : Le point ou la défaillance est la plus probable  
 $\alpha_i$  : Le vecteur unitaire  
 $N_{\text{sim}}, N$ : Nombre de simulations  
 $(x, y, z)$  : Directions spatiales  
 $\rho_G$ : Masse volumique des granulats  
 $\rho_w$ : Masse volumique de l'eau :  
 $d$  : Enrobage  
 $T$ : Température:  
 $Cv_{E/C}$ : Le coefficient de variation du rapport eau /ciment  
 $Cv_{RH}$  : Le coefficient de variation de l'humidité relative  
 $Cv_{Cs}$  : Le coefficient de variation de la pression du gaz carbonique  $\text{CO}_2$   
 $\alpha_h$ : Le degré d'hydratation du ciment,  
 $ch$  : La quantité de la portlandite  
 $w$  : Facteur méso-climatique

## Table des figures

### Chapitre 1

Figure 1.1: Concentration en CO<sub>2</sub> en fonction de la fraction volumique de  $\alpha_{CO_2}$  (à 20° C et une pression atmosphérique de 10<sup>5</sup> Pa.) (THIERY, 2005)

Figure 1.2: Mécanisme de carbonatation de Ca (OH)<sub>2</sub> (BADAOUI, 2003)

Figure 1.3: Relation entre épaisseur carbonatée et dosage en ciment (DUVAL, 1992).

Figure 1.4: Influence du rapport E/C sur la carbonatation des pâtes de ciment (BAROGHEL-BOUNY, 1994).

Figure 1.5: Influence du dosage en ciment et du rapport E/C sur la carbonatation des bétons (LOO et al. 1994).

Figure 1.6: Influence de la teneur en dioxyde de carbone sur la carbonatation (HYVERT, 2009).

Figure 1.7: Vitesse de carbonatation en fonction de l'humidité relative (DAKHMOUCHE, 2009).

Figure 1.8: Influence de la cure sur la résistance d'un béton de rapport E/C = 0,5 (BALAYSSAC, 1992).

Figure 1.9: Processus de la corrosion de l'acier dans le béton (BADAOUI, 2003).

Figure 1.10: Diagramme de Pourbaix (Potentiel-pH) relatif au fer en milieu aqueux (Fe-H<sub>2</sub>O) (DEBY, 2008)

### Chapitre 2

Figure 2.1: Influence des cycles d'humidification / séchage sur l'évolution de la profondeur de carbonatation (HYVERT, 2009)

Figure 2.2 : Modélisation des réactions de carbonatation AL-AKCHAR(1998).

Figure 2.3: Représentation des trois zones considérées dans le modèle de Ying-Yu et Qui-Dong (YING-YU et QUI-DONG, 1987).

Figure 2.4: Profondeurs de carbonatation calculées pour différents bétons à base de CEM I à l'aide du modèle développé par Saetta et al.(T = 23 °C, H.R. = 50%, [CO<sub>2</sub>] = 4 %).

### Chapitre 3

Figure 3.1: Modèle de champs aléatoire (DEGROOT et BAECHER, 1993).

Figure. 3.2: Représentation du problème probabiliste (état limite) (DEBY, 2008).

Figure 3.3: Comparaison simulations déterministes et probabilistes (HYVERT, 2009).

Figure. 3.4: Illustration du passage de l'espace physique à l'espace réduit (DEHMOUS, 2007).

Figure.3.5: Transformation d'une loi de distribution en loi normale centrée réduite (DEBY, 2008).

Figure. 3.6: Représentation de l'indice de fiabilité dans l'espace réduit (DEBY, 2008).

Figure. 3.7: Correspondance  $\beta$  et  $P_f$  (DEBY, 2008).

Figure. 3.8: Illustration de la méthode de Monte-Carlo (DEHMOUS, 2007).

## Chapitre 4

Figure 4.1: Profondeur de carbonatation par rapport aux coefficients de  $E/C$ ,  $C_s$  et  $HR$

Figure 4.2: Temps de carbonatation par rapport au coefficient de variation de  $E/C$ ,  $C_s$  et  $HR$ .

Figure 4.3: Fonctions des densités de probabilités de la profondeur de carbonatation par rapport à  $E/C$ ,  $C_s$  et  $HR$ .

Figure 4.4: Fonctions des densités de probabilités du temps carbonatation par rapport à  $E/C$ ,  $C_s$  et  $HR$ .

## Chapitre 5

Figure 5.1: Statistiques de la profondeur de carbonatation par rapport au coefficient de variation de  $E/C$ .

Figure 5.2: Statistiques de la profondeur de carbonatation par rapport au coefficient de variation de  $E/C$ .

Figure 5.3: Statistiques de la profondeur de carbonatation et intervalles de confiance par rapport au coefficient de variation de  $E/C$ .

Figure 5.4: Statistiques de la profondeur de carbonatation par rapport au coefficient de variation de  $C_s$ .

Figure 5.5: Statistiques de la profondeur de carbonatation par rapport au coefficient de variation de  $C_s$

Figure 5.6: Statistiques de la profondeur de carbonatation et intervalles de confiance par rapport au coefficient de variation de  $C_s$ .

Figure 5.7: Statistiques de la profondeur de carbonatation par rapport au coefficient de variation de  $HR$ .

Figure 5.8: Statistiques de la profondeur de carbonatation par rapport au coefficient de variation de  $HR$ .

Figure 5.9 Statistiques de la profondeur de carbonatation et intervalles de confiance par rapport au coefficient de variation de  $HR$

## **Chapitre 6**

Figure 6.1: Statistiques du temps de carbonatation par rapport au coefficient de variation de  $E/C$ .

Figure 6.2: Statistiques du temps de carbonatation par rapport au coefficient de variation de  $E/C$ .

Figure 6.3: Statistiques du temps de carbonatation et intervalles de confiance par rapport au coefficient de variation de  $E/C$ .

Figure 6.4: Statistiques du temps de carbonatation par rapport au coefficient de variation de  $C_s$ .

Figure 6.5: Statistiques du temps de carbonatation par rapport au coefficient de variation de  $C_s$ .

Figure 6.6 Statistiques du temps de carbonatation et intervalles de confiance par rapport au coefficient de variation de  $C_s$ .

Figure 6.7: Statistiques du temps de carbonatation par rapport au coefficient de variation de  $HR$ .

Figure 6.8: Statistiques du temps de carbonatation par rapport au coefficient de variation de  $HR$ .

Figure 6.9: Statistiques du temps de carbonatation et intervalles de confiance par rapport au coefficient de variation de  $HR$ .

## **Annexes**

Figure A.3.1: Représentation graphique du principe des méthodes FORM et STORM

## Liste des tableaux

### Chapitre 2

Tableau 2.1: Modèles empiriques pour la carbonatation du béton (CHAUSSADENT, 1997).

Tableau 2.2: Paramètres d'entrée du modèle de Bary et Sellier (BARY et SELIER, 2004).

Tableau 2.3: Paramètres d'entrée du modèle de Thiéry (HYVERT, 2009).

Tableau 2.4: Paramètres d'entrée du modèle Duracrete (DURACRETE, 2000).

Tableau 2.5: Paramètres d'entrée du modèle de Miragliotta (MIRAGLIOTA, 2000).

Tableau 2.6: Paramètres d'entrée du modèle Task Group 5.1 (CEB, 1997).

Tableau 2.7: Paramètres d'entrée du modèle Oxand (HYVERT, 2009)

Tableau 2.8: Quelques valeurs pour le coefficient d'exposition  $\gamma$  (HYVERT, 2009).

Tableau 2.9: Données d'entrée du modèle de Bakker (BAKKER, 1993)

Tableau 2.10: Données d'entrée du modèle de Papadakis, Vayenas et Fardis (PAPADAKIS, 1991a)

Tableau 2.11: Paramètres d'entrée du modèle de Ying-Yu et Qui-Dong (YING-YU et QUI-DONG, 1987).

Tableau 2.12: Paramètres d'entrée du modèle de Saetta, Schrefler et Vitaliani (SAETTA et al., 1995)

### Chapitre 3

Tableau 3.1: Principales lois de distribution et leurs paramètres représentatifs (SCHNEIDER, 1997).

Tableau 3.2: Classes d'exposition de la norme NA 16002.

### Chapitre 4

Tableau 4.1: Composition chimique du ciment portland CEM I (NA442, 2006).

Tableau 4.2: Composition du béton traditionnel d'usine.

Tableau 4.3: Comparaison entre la composition des bétons de la classe d'exposition XC3 et du béton étudié.

## Chapitre 5

Tableau 5.1: Classes et valeurs moyennes de référence proposées pour la porosité de la pâte (RITA DE CÀSSIA, 2004).

Tableau 5.2: Données d'entrée du modèle (Les paramètres  $D_{eff}$ ,  $\varepsilon$ ,  $k_e$  et  $k_c$  sont calculés à partir des relations empirique exposées au dessus) (DURACRETE, 2000; FIB, 2009).

## Annexes

Tableau A.1.1 : Phases solides et équations d'équilibres utilisées pour les hydrates

Tableau A.1.2: Zonation de la pate de ciment pour le calcul des concentrations dans la solution interstitielle.

Tableau A.2. 1: Annexe NA.5.2.5.2.2 de la norme NF EN 206-1

Tableau A .2.2. Extrait du tableau - Classe d'exposition de la norme NF EN 206-1.

Tableau A .2.3 . Valeurs limites pour la composition et les propriétés du béton en fonction de la classe d'exposition.

Tableau A .2.4. Valeurs de l'enrobage minimal  $C_{min,dur}$  requis vis-à-vis de la durabilité dans le cas des armatures de béton armé conforme à l'EN 10080.

# **Introduction**

# Introduction

## Problématique

La durabilité constitue aujourd'hui l'une des préoccupations essentielles dans la conception, la réalisation ou l'entretien des ouvrages de génie civil. Ainsi est née en Algérie, la nouvelle norme NA 16002 équivalente à la norme Européenne EN 206-1, où il est établi des prescriptions réglementaires de formulation des bétons en fonction de l'agressivité des conditions environnementales définies sous forme de classes d'exposition. Celles relatives aux risques de corrosion des armatures correspondent aux classes liées à la carbonatation, à la présence de chlorures et aux environnements marins.

La carbonatation traduit l'action de la diffusion du  $\text{CO}_2$  dans les pores du béton et les réactions consécutives de dissolution/précipitation avec les hydrates, notamment de la portlandite  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  qui joue un rôle de tampon sur le pH. Lorsque la portlandite est consommée par la réaction de carbonatation, le pH chute à une valeur inférieure à 9, amorçant ainsi la dépassivation des aciers et donc la corrosion.

Le phénomène de carbonatation est très lent, il se produit par la dissolution du  $\text{CO}_2$  dans l'eau contenue dans les pores. Ainsi le rapport eau /ciment, l'humidité relative du milieu environnant et la pression du gaz carboniques à la surface du béton sont les paramètres qui jouent un rôle majeur dans le comportement du béton vis-à-vis de la carbonatation.

Le travail est effectué dans le sens de bétons susceptibles de subir des désordres par la carbonatation. Ceci est souvent le cas des bétons ordinaires anciens confectionnés sans référence à la durabilité, car elle n'était pas intégrée dans les normes.

Pour prédire la durée de vie des ouvrages, une évaluation de la durée de la phase d'initiation de la corrosion est nécessaire. En ce qui concerne la corrosion induite par la carbonatation, il s'agit

de définir le temps nécessaire pour qu'il y ait amorçage de la dépassivation des armatures par l'action du dioxyde de carbone.

Les méthodes déterministes de durabilité utilisent des valeurs fixes comme données d'entrée. Ces valeurs nécessitent la connaissance exacte (déterministe) des caractéristiques du béton et donc un nombre élevé d'échantillons pour les mesurer, conduisant à un coût élevé. De ce fait, la recherche concernant la durabilité d'un béton s'est naturellement orientée vers les méthodes probabilistes, qui peuvent tenir compte de l'aspect aléatoire des caractéristiques du béton et du milieu environnant. En effet, négliger cet aspect aléatoire de ces propriétés peut conduire à une sous-estimation de la sécurité des structures.

### **Objectifs**

Le principal objectif de ce travail est d'établir une « formulation probabiliste » permettant l'analyse du processus de carbonatation d'un béton, en se concentrant précisément sur l'analyse de l'aspect aléatoire du rapport eau / ciment, de l'humidité relative du milieu environnant et de la pression du gaz carbonique à la surface du béton et leurs effets sur la carbonatation.

Cette étude comporte deux aspects: le premier est l'adaptation d'un modèle simple de la carbonatation permettant d'estimer les profondeurs carbonatées pour les pressions partielles de dioxyde de carbone, un modèle qui prend en compte les facteurs liés aux processus de la cure et les conditions environnementales d'exploitation (vie de l'ouvrage), l'autre est l'analyse de l'effet du caractère aléatoire du paramètre de formulation eau/ciment, de l'humidité relative du milieu environnant et de la pression du gaz carbonique de l'environnement extérieur sur la profondeur de carbonatation et le temps nécessaire pour que cette profondeur atteigne l'acier.

### **Plan de travail**

Pour cela, le mémoire est divisé en six chapitres:

Le chapitre 1 est consacré dans un premier temps à la description des hydrates et du dioxyde de carbone. Dans un second temps à la description de la carbonatation des hydrates, les paramètres influents ainsi que les conséquences sur les matériaux cimentaires.

Le chapitre 2 est consacré à la présentation des différents modèles de pénétration des agents agressifs.

Le chapitre 3 traite quelques notions statistiques préliminaires sur les variables aléatoires et les procédures du dimensionnement probabiliste de la durabilité.

Dans le chapitre 4, l'approche probabiliste présentée dans le chapitre 3 est appliquée aux bétons. L'étude probabiliste de la carbonatation des bétons ayant des caractéristiques aléatoires est unidimensionnelle. Les statistiques de la profondeur et du temps de carbonatation sont évaluées à partir de l'étude de 10000 échantillons simulés par la méthode des simulations de Monte Carlo en considérant une distribution log-normale, donnant 10000 valeurs de la profondeur de carbonatation et du temps correspondant en réalisant une étude paramétrique, qui intègre l'influence du coefficient de variation du rapport eau /ciment, de l'humidité relative et de la pression de gaz carbonique  $CO_2$ .

Le chapitre 5 traite l'effet du caractère aléatoire de l'humidité relative, du rapport eau/ciment et de la pression du gaz carbonique sur la profondeur de carbonatation du béton armé. Cette étude se concentre sur l'évaluation de la profondeur de carbonatation  $X_c$  à partir d'une analyse probabiliste basée sur les simulations de Monte Carlo combinées au modèle de Duracrete utilisé ici en tant que méthode déterministe, sous l'hypothèse que l'humidité relative, le rapport eau/ ciment et la pression du gaz carbonique  $CO_2$  à la surface du béton sont des variables aléatoires log-normal. Les statistiques de la profondeur de carbonatation sont obtenues à partir de 10000 échantillons aléatoires simulés.

Dans le chapitre 6, la progression de la carbonatation avec le temps est analysée sous l'hypothèse que l'humidité relative, le rapport eau/ciment et la pression du gaz carbonique  $CO_2$  à la surface du béton sont des variables aléatoires log-normal. L'objectif étant de montrer que la variabilité de ces paramètres peut accélérer ou retarder le processus de carbonatation pour mettre en évidence la nécessité de tenir compte de ces paramètres dans la pratique.

# **Chapitre 1**

**Etat des lieux sur la carbonatation des matériaux  
cimentaires**

## Chapitre 1: Etat des lieux sur la carbonatation des matériaux cimentaires

### 1.1. Introduction

Le béton armé est le matériau de construction le plus répandu dans le génie civil. Néanmoins, la connaissance de sa performance à long terme, et l'impact incertain de l'environnement sur son comportement, rendent difficile une évaluation précise de la durabilité des ouvrages au cours du temps.

Lorsqu'une structure est mise en service, elle est susceptible de dégradations dont l'origine peut être physique, mécanique ou chimique. Les facteurs mécaniques sont surtout les charges excessives et les chocs. Les facteurs physiques sont les températures extrêmes. Les facteurs chimiques sont souvent les plus importants, puisque le béton peut se dégrader par réaction (dissolution, gonflements) des constituants du béton. L'air, l'eau et le sol sont des agents favorisant la migration d'agents polluants dans le béton, en entrant dans les pores du béton et modifiant ainsi ses caractéristiques, en particulier la composition chimique de la solution interstitielle.

Le dioxyde de carbone et les chlorures sont les agents agressifs les plus importants auxquels les ouvrages peuvent être exposés. Ils sont responsables de l'un des principaux mécanismes de dégradation des ouvrages existants: la *corrosion*. Ces phénomènes sont respectivement identifiés par *corrosion due à la pénétration de chlorures* ou *corrosion par carbonatation*.

La carbonatation a pour origine la faible quantité de gaz carbonique contenu dans l'air, elle traduit l'action de la diffusion du  $\text{CO}_2$  dans les pores du béton et les réactions avec les hydrates. Lorsque la portlandite est consommée, le pH chute à une valeur inférieure à 9, amorçant ainsi la corrosion des aciers.

La carbonatation a un aspect bénéfique sur les matériaux cimentaires, les cristaux de la calcite  $\text{CaCO}_3$  qui se forment à partir des hydrates permettent d'augmenter la résistance du béton à la diffusion des agents agressifs.

Ce chapitre est consacré dans un premier temps à la description des ciments hydratés et du dioxyde de carbone, par la suite la description de la carbonatation des hydrates du béton, les paramètres influents ainsi que les conséquences sur les matériaux cimentaires sont présentés.

## 1.2. Généralités sur le ciment hydraté

Les ciments anhydres sont composés de clinker et de gypse. Pour améliorer ses propriétés, des additions telles que les cendres volantes, les laitiers ou la fumée de silice sont ajoutés. Le clinker est obtenu par cuisson à 1450 °C d'un mélange d'argile ou de marne et de calcaire finement broyés.

### 1.2.1. Les constituants des ciments

Les ciments courants ont pour constituant principal le clinker, auquel il peut être ajouté suivant leurs types d'autres constituants: (NA 442, 2006; EN-197-1,2000).

#### ▪ le clinker Portland :

Le clinker Portland est un mélange de matières premières contenant le CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Les principaux constituants du clinker sont les suivants :

- le silicate tricalcique: 3CaO.SiO<sub>2</sub> (C<sub>3</sub>S)
- le silicate bicalcique: 2CaO.SiO<sub>2</sub> (C<sub>2</sub>S)
- l'aluminate tricalcique: 3CaO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (C<sub>3</sub>A)
- l'aluminoferrite tétracalcique: 4CaO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (C<sub>4</sub>AF)

#### ▪ le calcaire :

Le calcaire est composé en grande partie ou entièrement de carbonate de calcium (CaCO<sub>3</sub>).

#### ▪ le laitier granulé de haut fourneau :

Il provient de la fusion du minerai de fer dans un haut fourneau. Il contient de laitier vitreux, et présente des propriétés hydrauliques après avoir subi une activation convenable.

- **les matériaux pouzzolaniques :**

Les matériaux pouzzolaniques sont des substances siliceuses ou silico-alumineuses, ou une combinaison de celles-ci. Lorsqu'ils sont finement broyés, ils réagissent avec l'hydroxyde de calcium dissous en présence d'eau pour former des calciums et d'aluminates de calcium.

- **les cendres volantes :**

Elles sont obtenues par précipitation de particules contenues dans les fumées des chaudières alimentées au charbon pulvérisé. Elles peuvent être de nature siliceuse avec des propriétés pouzzolaniques, ou calcique avec en plus des propriétés hydrauliques.

- **le schiste calciné :**

Le schiste calciné finement broyé contient du clinker (silicate bicalcique et aluminat monocalcique) et les oxydes, il présente des propriétés pouzzolaniques et hydrauliques.

- **la fumée de silice :**

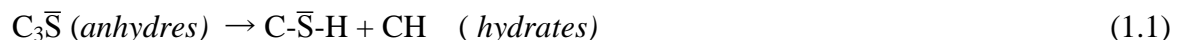
Elle provient de la réduction du quartz par du charbon dans des fours. Elle est formée de particules sphériques de silice amorphe.

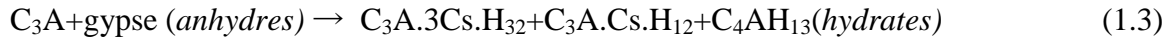
Le sulfate de calcium et les additifs : ce sont des constituants qui sont ajoutés aux autres composants pour améliorer les propriétés physiques des ciments.

### 1.2.2. L'hydratation du ciment et son mécanisme

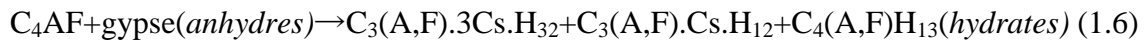
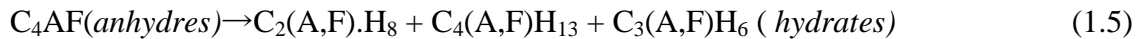
Les silicates de calcium hydratés ( $C-\bar{S}-H$ ), l'hydroxyde de calcium (ou portlandite;  $CH$ ), l'ettringite ( $C_3A.3Cs.H_{32}$ ) et le monosulfoaluminate de calcium hydraté ( $C_3A.Cs.H_{12}$ ) sont les principaux hydrates formés par réaction entre l'eau et les constituants du ciment.

L'hydratation du  $C_3\bar{S}$  et du  $C_3A$  se produit rapidement et n'évolue pratiquement plus après 28 jours :





Le  $C_2S$  et le  $C_4AF$  s'hydratent pendant plusieurs mois :



### 1.2.3. Les produits d'hydratation

#### 1.2.3.1. La portlandite (CH)

L'hydratation du  $C_3\bar{S}$  et du  $C_2\bar{S}$  entraîne la formation de la portlandite ou hydroxyde de calcium  $Ca(OH)_2$ , elle se cristallise sous forme de plaquettes hexagonales entre les grains de ciment partiellement hydratés.

#### 1.2.3.2. Les silicates de calcium hydratés (C-S-H)

Les  $C\text{-}\bar{S}\text{-H}$  sont à l'origine de la résistance mécanique de la pâte de ciment durcie. Elles recouvrent les grains de ciment anhydres et remplissent l'espace intergranulaire. Déjà en 1960 BRUNAUER et GREENBERG, décrivent la réaction d'hydratation du  $C_3S$  par la formule suivante: (DUNSTER, 1989)



Par la suite, il s'est avéré que les formules des  $C\text{-}\bar{S}\text{-H}$  sont cependant variées au sein d'une même pâte de ciment, même si celle apparaissant dans l'équation (1.7) est dominante. (GROVES et al, 1990).

### 1.2.3.3. Les aluminates et sulfo-aluminates de calcium

L'hydratation du  $C_3A$  entraîne la formation d'aluminates de calcium hydratés. En présence de gypse, elle conduit à la formation d'un monosulfoaluminate de calcium hydraté  $C_3A.Cs.H_{12}$ , d'un aluminate de calcium  $C_4AH_{13}$  et d'un trisulfoaluminate de calcium hydraté appelé ettringite  $C_3A.3Cs.H_{32}$ , qui recouvre les grains de ciment anhydres, puis se dissout pour recristalliser sous forme d'aiguilles hexagonales. (KOUZNETSOVA et al, 2003)

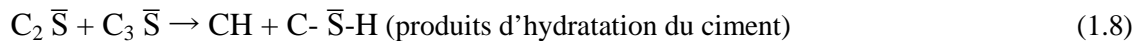
### 1.2.3.4. Les aluminoferrites

L'hydratation du L'aluminoferrite  $C_4AF$  donne les mêmes types d'hydrate que le  $C_3A$ .

### 1.2.3.5. Les réactions pouzzolaniques

Les pouzzolanes sont des matières silico-alumineuses riches en silice et ayant une granulométrie fine, comme les cendres volantes et les laitiers de hauts fourneaux.

Après leur dissolution dans la solution interstitielle des matériaux cimentaires, elles réagissent avec la portlandite pour former des silicates de calcium hydratés insolubles selon les réactions suivantes: (ZHOU et GLASSER, 2000)



## 1.3. Généralités sur le dioxyde de carbone

Les premières réflexions sur le comportement du béton laissaient entendre que la pâte de ciment hydraté dans celui-ci ne réagit pas avec l'aire constituant le milieu ambiant. Néanmoins, il s'est avéré qu'en réalité, le  $CO_2$  contenu dans l'air, réagit avec le ciment hydraté en présence d'humidité.

### 1.3.1. Le dioxyde de carbone dans l'atmosphère

L'action du  $\text{CO}_2$  se manifeste à faibles concentrations telles que l'on retrouve en milieu rural, ou la fraction volumique en  $\text{CO}_2$  est d'environ 0,03%. Dans les grandes villes, le pourcentage moyen est de 0,3% et peut atteindre 1%.

CHAUSSADENT (1997), montre que l'humidité relative influence peu la fraction volumique du  $\text{CO}_2$  dans le mélange gazeux. En l'assimilant à un gaz parfait, sa concentration (en  $\text{mol.L}^{-1}$ ) est donnée par:

$$[\text{CO}_2] = \alpha_{\text{CO}_2} \frac{P_{\text{atm}}}{RT} \quad (1.11)$$

$\alpha_{\text{CO}_2}$  : fraction volumique en  $\text{CO}_2$ ;

$R$  : constante des gaz parfaits ( $8,32 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$ );

$T$  (k) : température absolue;

$P_{\text{atm}}$  (Pa): pression atmosphérique.

La figure 1.1 présente la concentration en  $\text{CO}_2$  en fonction de sa fraction volumique, pour une température de  $20^\circ \text{C}$  et une pression atmosphérique de  $10^5 \text{ Pa}$ .

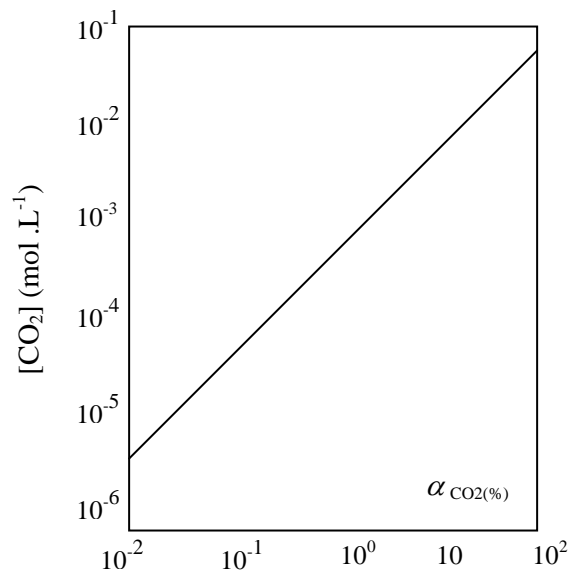


Figure 1.1: Concentration en  $\text{CO}_2$  dans la phase gazeuse en fonction de la fraction volumique de  $\alpha_{\text{CO}_2}$  (à  $20^\circ \text{C}$  et une pression atmosphérique de  $10^5 \text{ Pa}$ .) (CHAUSSADENT, 1999 ; THIERY, 2005)

### 1.3.2. Le dioxyde de carbone en solution aqueuse

Lorsqu'une solution est soumise à une pression partielle de  $\text{CO}_2$ , le gaz se dissout et s'hydrate sous forme d'acide carbonique  $\text{H}_2\text{CO}_3$  selon la réaction suivante :



L'acide carbonique est une molécule instable dans l'eau, elle se comporte comme un diacide  $\text{HCO}_3^-$ . (DANCKWERTS, 1970; THIERY, 2005)



$$K = \frac{[\text{HCO}_3^-] \cdot [\text{H}^+]}{[\text{H}_2\text{CO}_3]} \quad \text{et } K = 6,35 \text{ (constante d'équilibre à } 25 \text{ °C de la réaction (1.13)).}$$



$$K = \frac{[\text{CO}_3^{2-}] \cdot [\text{H}^+]}{[\text{HCO}_3^-]} \quad \text{et } K = 10,33 \text{ (constante d'équilibre à } 25 \text{ °C de la réaction (1.14)).}$$

Les constantes d'équilibre  $K$  augmentent avec la température.

### 1.4. La carbonatation

La carbonatation du béton a pour origine la faible quantité de gaz carbonique contenue dans l'air, qui est en moyenne de 0,03 %.

Cette teneur peut être influencée par des facteurs perturbateurs tels que la température, la pression atmosphérique et le milieu d'exposition. (LAMBERT, 1992).

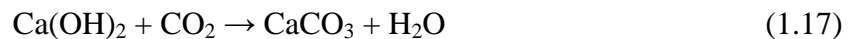
La carbonatation du béton commence par la diffusion du gaz carbonique dans les pores du béton, l'anhydride carbonique se dissout et s'hydrate sous forme d'acide carbonique, qui entre en réaction avec les constituants hydratés du ciment. (COWIE et GLASSER, 1992)

Les réactions de carbonatation sont en général assez lentes. Leur cinétique peut être accélérée en augmentant la concentration en gaz carbonique de l'atmosphère environnant le béton, et en maintenant une humidité relative proche de 65 %, ceci correspond aux conditions de réalisation des essais de carbonatation accélérée. (CHAUSSADENT et al, 2001)

### 1.4.1. Carbonatation des hydrates du béton

#### 1.4.1.1. La Carbonatation de la portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$

La portlandite  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  réagit avec l'acide carbonique pour former la calcite, selon les réactions suivantes: (COWIE et GLASSER, 1992; THIERY, 2005)



La carbonatation de la portlandite s'accompagne globalement d'une libération d'eau de structure.

La figure 1.2 illustre l'intervention combinée des trois phases : gazeuse, aqueuse et solide au cours du processus de carbonatation de la portlandite

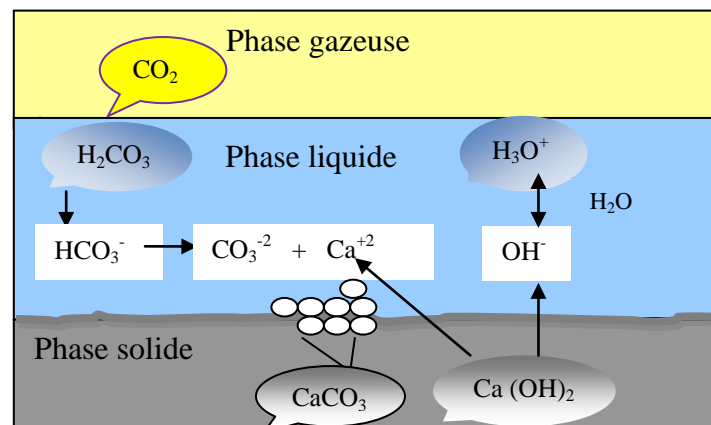


Figure 1.2: Mécanisme de carbonatation de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (BADAOUÏ, 2003)

La transformation du dioxyde de carbone gazeux en ions  $\text{CO}_3^{2-}$  et la dissolution de la portlandite en ions  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{OH}^-$ , conduit à la précipitation de cristaux de calcite autour des grains. (DHEILLY et TUDO, 1996).

Les cristaux de calcite formés ont une porosité faible. Ils vont donc progressivement isoler la portlandite et la chaux restante, réduisant ainsi la réaction de carbonatation (TALAH, 2012).

La portlandite est toujours présente après 80 jours de carbonatation et que l'avancement de la réaction est sensible à la granulométrie des grains. (DÜNSTER et al., 1989).

#### 1.4.1.2. La Carbonatation des silicates de calcium hydratés (C-S-H)

La carbonatation des (C-  $\bar{\text{S}}$ -H) et de CH est simultanée. GROOVES et al. (1990), montrent que la structure des C-  $\bar{\text{S}}$ -H est conservée malgré leur décalcification.

L'attaque chimique des C-  $\bar{\text{S}}$ -H (notés ici  $\text{CaO.SiO}_2.n\text{H}_2\text{O}$ ) par le dioxyde de carbone s'effectue selon la réaction (1.18).



La dégradation des silicates de calcium hydratés s'accompagne d'une perte d'eau de structure, et donne naissance à un matériau siliceux hydraté amorphe (MASSE, 1993).

BIN et al. (1984), montrent que les C-  $\bar{\text{S}}$ -H de rapport C/S plus faible se carbonatent plus rapidement.

#### 1.4.1.3. La carbonatation des autres constituants des matériaux cimentaires

Le  $\text{C}_3\text{A}$  (la célite) s'hydrate avec l'eau pour former des aluminates de calcium hydratés. L'hydratation de  $\text{C}_3\text{A}$  donne de l'ettringite et du monosulfoaluminate de calcium qui sont créés à partir des sulfate présents dans le ciment. (SAUMAN et LASH, 1972; THEIRY, 2005)

Les aluminates de calcium hydratés sont présents sous la forme de trois composés ( $\text{C}_3\text{AH}_6$ ,  $\text{C}_2\text{AH}_8$ ,  $\text{C}_4\text{AH}_{13}$ ) et sont sensibles à la carbonatation. Elles donnent naissance à des carbonates de calcium, un gel d'alumine ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ) et de l'eau. (XIANTUO et al., 1994)

La carbonatation de l'ettringite et du monosulfoaluminate de calcium produit du gypse qui est très soluble dans l'eau. Ainsi, si les produits de carbonatation se trouvent en présence de portlandite et d'eau, il peut reformer de l'ettringite à partir des aluminates et du gypse libéré par la carbonatation. (KOUZNETSOVA et al., 2003)

La carbonatation de ces hydrates et des bases présentes dans la solution interstitielle sous la forme de soude NaOH et de potasse KOH est très rapide au contact du dioxyde de carbone dissous, c'est pourquoi leur carbonatation est généralement négligée dans la modélisation. (THEIRY, 2005)

La dégradation des bases par le dioxyde de carbone s'effectue selon les réactions (1.19) et (1.20).



## 1.4.2. Paramètres influençant la carbonatation

Des travaux effectués dans des laboratoires montrent l'influence des paramètres liés à la formulation de béton, au milieu environnant et au processus de fabrication sur l'intensité de la carbonatation.

La procédure expérimentale si elle doit se faire sur le phénomène naturelle serait longue et lourde. Pour cette raison, la pluparts des études se font avec des techniques accélérées (enceinte de carbonatation). Ceci ne correspond en rien à la réalité, et les résultats sont limités (quelques valeurs pour quelques formulations de béton).

### 1.4.2.1. Paramètres de formulation

Plusieurs caractéristiques des matériaux cimentaires influencent la cinétique de carbonatation:

- **Le dosage en ciment**

La compacité du matériau s'améliore lorsque le dosage en ciment du matériau est élevé. La figure 1.3 montre une baisse importante des épaisseurs carbonatées mesurées, lorsque la teneur en ciment du béton augmente (PARROTT, 1987; DUVAL, 1992).

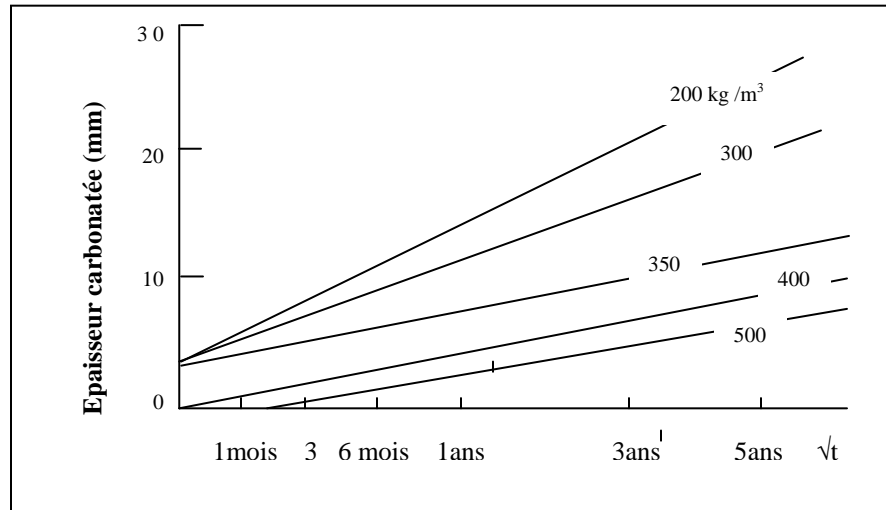


Figure 1.3 : Relation entre épaisseur carbonatée et dosage en ciment (DUVAL, 1992).

#### ▪ Le rapport Eau/Ciment (E/C)

Le rapport E/C joue un rôle majeur dans la carbonatation du béton, il détermine la perméabilité et la diffusivité des espèces gazeuses au sein du béton, la teneur en eau et le degré d'hydratation du matériau. (CHAUSSADENT, 1997 ; HOUST, 1992).

La figure 1.4 montre que plus le rapport E/C est élevé, plus les épaisseurs carbonatées mesurées sur les pâtes de ciment sont importantes.

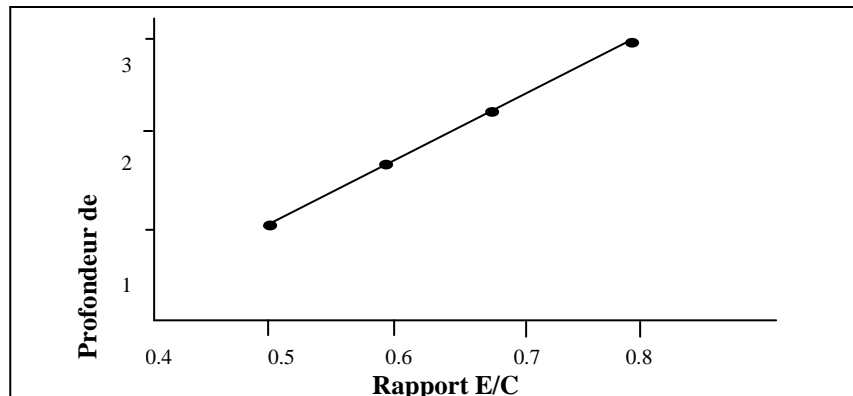


Figure 1.4 : Influence du rapport E/C sur la carbonatation des pâtes de ciment (BAROGHEL-BOUNY, 1994).

LOO et al., (1994), considèrent que le rapport E/C est le paramètre le plus important dans le processus de carbonatation, plus le rapport E/C est élevé, plus la quantité d'eau libre susceptible de s'évaporer est importante. Par évaporation, cette eau laisse des vides qui favorisent la diffusion du dioxyde de carbone à travers le réseau des pores interconnectés.

La progression du front de carbonatation dépend des mouvements du dioxyde de carbone et de l'eau présents dans la texture poreuse. (figure 1.5)

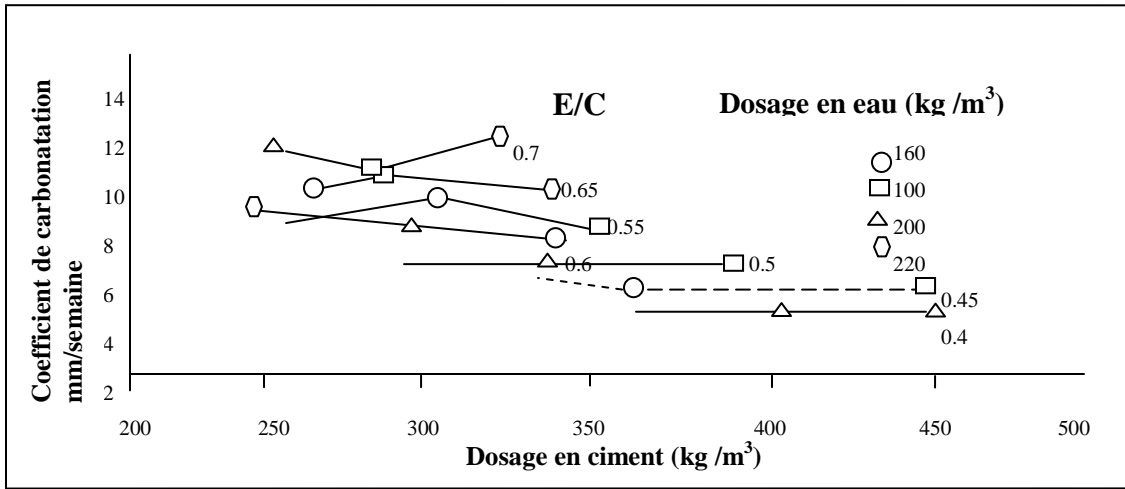


Figure 1.5 : Influence du dosage en ciment et du rapport E/C sur la carbonatation des bétons (LOO et al., 1994).

#### 1.4.2.2. Paramètres liés au milieu environnant

##### ▪ La concentration en dioxyde de carbone

PARROTT (1987), a étudié l'influence de la teneur en dioxyde de carbone sur la carbonatation. Dans les ambiances riches en dioxyde de carbone, les épaisseurs carbonatées mesurées ont tendances à être plus élevées.

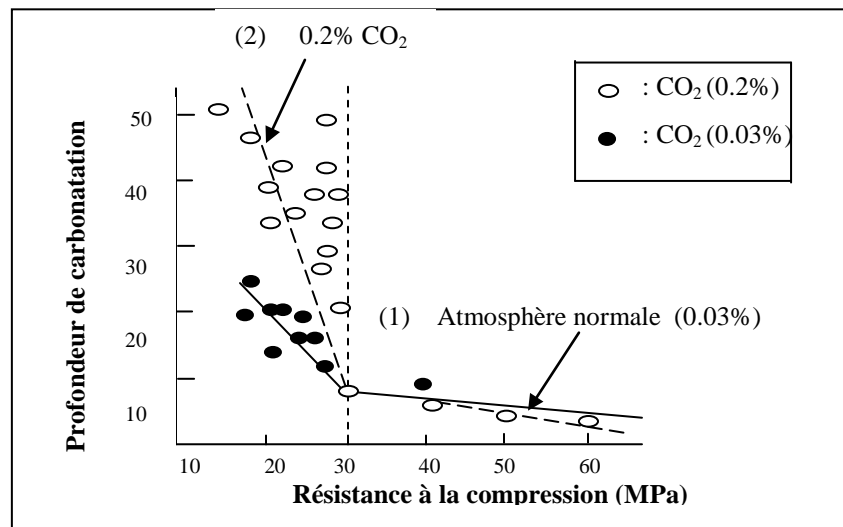


Figure 1.6 : Influence de la teneur en dioxyde de carbone sur la carbonatation (HYVERT, 2009).

### ▪ L'humidité relative

Les essais de carbonatation accélérée à 20°C des bétons traditionnels montrent que la vitesse maximale est obtenue pour une humidité relative comprise entre 50 et 70 % (figure 1.7).

La diffusion du gaz carbonique à travers la structure poreuse du béton est conditionnée par l'état hygroscopique des pores du matériau, et la vitesse de carbonatation du béton dépend principalement de la facilité avec laquelle le dioxyde de carbone pénètre à l'intérieur de la matrice cimentaire. (DAKHMOUCHE, 2009).

Le dioxyde de carbone pénètre par l'intermédiaire de la phase gazeuse lorsque le réseau poreux accessible est désaturé ou par l'intermédiaire de la phase liquide, lorsqu'il y a transfert d'eau chargée en dioxyde de carbone dissous. (CHAUSSADENT, 1997).

Les fortes teneurs en eau correspondent à un degré de saturation élevé des pores, les processus de diffusion du dioxyde de carbone vers la surface des minéraux réactifs sont extrêmement faibles.

Le coefficient de diffusion du dioxyde de carbone en phase liquide est  $10^4$  fois plus faible que sous forme gazeuse (THIERY et al., 2003).

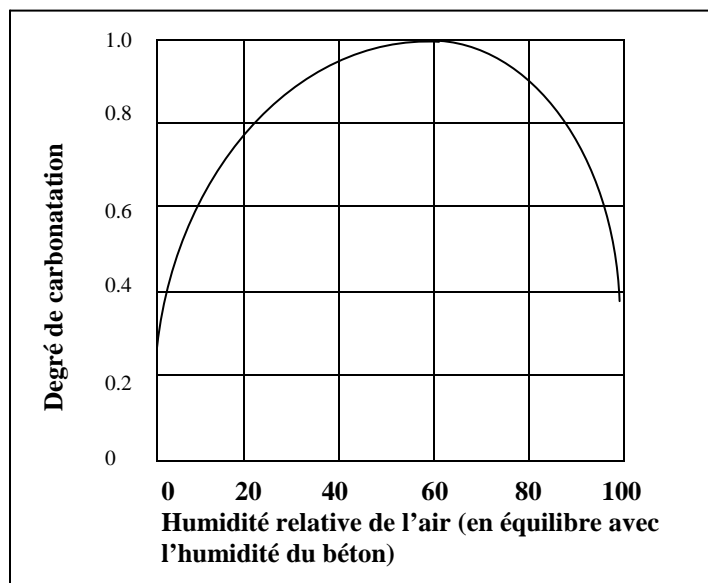


Figure 1.7 : Vitesse de carbonatation en fonction de l'humidité relative (DAKHMOUCHE, 2009).

- **La température**

La température accélère le processus de carbonatation. L'échauffement du matériau favorise le séchage des pores et facilite l'accès du gaz carbonique dans la matrice cimentaire. (RAHMAN et al., 1989), (NEVILLE , 1995).

Cependant, CHAUSSADENT (1997), a constaté que l'augmentation de la température diminue la vitesse de carbonatation des bétons, et que la portlandite se dégrade plus rapidement lorsque la température diminue.

### **1.4.2.3. Paramètres liés au processus de fabrication**

Certains facteurs influençant la carbonatation sont particuliers au domaine de la préfabrication (HYVERT, 2009).

- **La mise en œuvre**

La vibration du béton élimine les vides d'air et lui confère une compacité maximale. Au cours de la vibration, le centre des gros granulats ne peut pas s'approcher près des parois du moule. Les zones proches des parois sont riches en particules fines (SADOUKI, 1987).

SADOUKI (1987) et KREIJGER (1984), ont montré que l'effet de paroi dû aux granulats qui ne peuvent se déplacer que dans des directions parallèles, conditionne en partie la microstructure du béton de peau est à l'origine d'une hétérogénéité de résistance.

- **La cure**

La cure signifie les conditions appliquées aux bétons pour éviter le départ excessive de l'eau qu'ils contiennent. Elle est nécessaire pour obtenir des performances élevées en peau des bétons en maintenant l'eau nécessaire à l'hydratation du ciment, donc la diminution de la taille des pores du béton.

En l'absence de cure, le béton d'enrobage perd rapidement son eau par dessiccation et l'hydratation de cette couche est ralenti. C'est pourquoi, l'effet d'une cure prolongée est

bénéfique pour accroître la résistance du béton à la pénétration d'agents agressifs tels que le dioxyde de carbone et les chlorures. (BARON et al., 1996).

PARROTT (1987), et EWERTSON et al.(1993), précisent qu'une durée de cure comprise entre trois et sept jours est suffisante pour optimiser la texture du matériau.

BALAYSSAC (1992), montre qu'une durée de cure de trois jours maximum en laboratoire serait assez proche de celle appliquée sur chantier.

La figure 1.8 montre un accroissement progressif des résistances mécaniques sur des périodes de cure humide (BALAYSSAC, 1992).

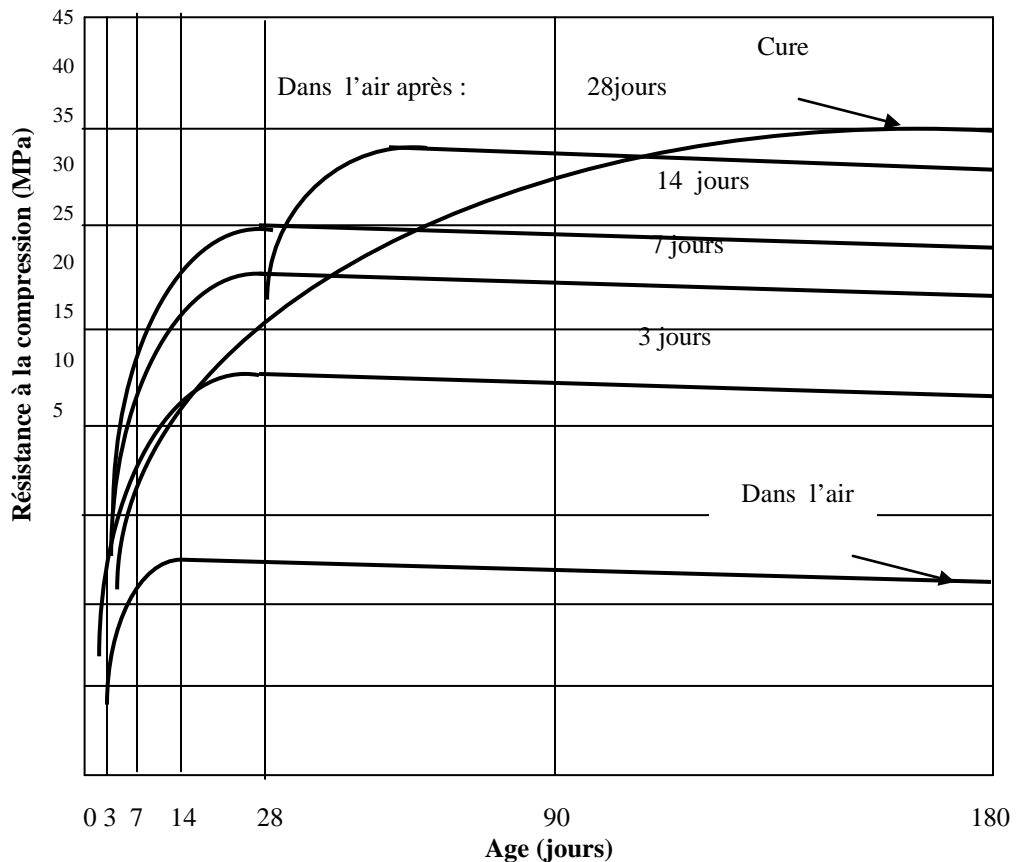


Figure 1.8 : Influence de la cure sur la résistance d'un béton de rapport E/C = 0,5. (BALAYSSAC, 1992).

### **1.4.3. Conséquences de la carbonatation sur les matériaux cimentaires**

Du point de vue du béton seul, on considère que la carbonatation a un effet bénéfique : elle réduit la porosité, améliore les performances mécaniques et limite la pénétration d'agents agressifs; on parle d'un effet dit de « colmatage » des pores.

#### **1.4.3.1. Evolution de la microstructure**

La réaction de la carbonatation de la portlandite entraîne une augmentation de la phase solide. Pour traduire dans les modèles l'effet du colmatage, il faut pouvoir relier la baisse de la porosité à l'évolution de la composition chimique du matériau cimentaire.

La distribution de la taille des pores est fortement modifiée par la carbonatation, les mesures de porosité par porosimétrie au mercure réalisées par BIER et al., (1987), indiquent que le volume des pores de rayon inférieurs à  $0.1\mu\text{m}$  est réduit sur des pâtes de rapport E/C compris entre 0.3 et 0.5.

#### **1.4.3.2. Evolution de la teneur en eau**

La carbonatation induit localement une accumulation d'humidité dans les pores, PIHLAJAVAARA observe sur matériaux carbonatés une augmentation de la teneur en eau évaporable par séchage à  $150^{\circ}\text{C}$  (THEIRY, 2005).

La carbonatation libère une partie de l'eau de structure des hydrates, cette eau peut évidemment participer à la composition de la solution interstitielle et contribuer au transport d'agents agressifs.

#### **1.4.3.3. Evolution des performances mécaniques**

La réduction de la porosité par carbonatation et la calcite qui s'est formée consolide la microstructure, cette calcite est un excellent liant qui assure l'essentiel de la résistance mécanique des bétons.

Pour les bétons conservés dans une atmosphère de dioxyde de carbone, les résistances mécaniques peuvent augmenter de 30% par rapport aux mêmes bétons conservés en atmosphère

exempte de  $\text{CO}_2$ . Cette augmentation de résistance est d'autant plus significatives pour des rapports E/C du matériau plus faibles (HYVERT, 2009; THIERY, 2007).

#### **1.4.3.4. Evolution des propriétés de transfert**

Le coefficient effectif de diffusion au gaz est diminué après la carbonatation de matériau à base de ciment. Il existe des interactions complexes entre les ions en solution et la surface des particules de C-S-H chargées négativement.

Ainsi, une double couche électrique présente à la surface des pores freine la diffusion des anions, le champ d'action de cette double couche est de l'ordre de grandeur du nanomètre ce qui justifie que son action sur la diffusion au gaz dans les pores du béton ne soit pas négligeable. (THIERY, 2005).

### **1.5 . La corrosion des armatures liée à la carbonatation**

#### **1.5.1. Corrosion électrolytique du fer**

L'état métallique n'est pas thermodynamiquement stable, dans des conditions naturelles d'utilisation, contrairement aux oxydes de fer  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  qui sont thermodynamiquement plus stables que le métal Fe. Le risque de corrosion est donc « naturel ».

Le processus de corrosion aqueuse est électrochimique, car il se traduit par une réaction à laquelle des espèces chimiques et des charges électriques prennent part. Il est à la fois réaction chimique et transfert d'électrons (figure 1.9).

La corrosion électrochimique résulte de l'établissement de courants locaux dus à l'existence de piles locales, la réduction cathodique et l'oxydation anodique étant localisées en deux zones distinctes. Il se crée ainsi une différence de potentiel entre ces deux zones (MORIANDE, 2005).

La corrosion correspond à la formation, à partir de l'état métallique, d'ions passant en solution donc à une oxydation. Le plus souvent, un ion en solution est identique à celui existant dans la phase métallique:(RITA DE CASSIA, 2004)

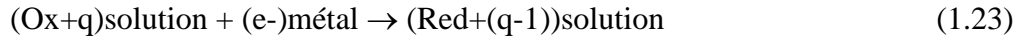


A temp\u00e9rature ambiante, la corrosion des mat\u00e9riaux m\u00e9talliques est exclusivement due \u00e0 l'eau, m\u00eame si d'autres facteurs peuvent intervenir.

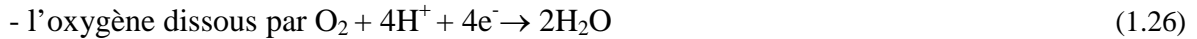
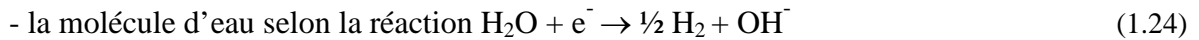
La r\u00e9action anodique correspond \u00e0 la dissolution du fer.



La r\u00e9action (1.21) est n\u00e9cessairement coupl\u00e9e avec une r\u00e9action de r\u00e9duction dite r\u00e9action cathodique, \u00e9liminant les \u00e9lectrons produits:



Les oxydants les plus communs sont :



ou par:



- la valence sup\u00e9rieure d'un ion \u00e0 valences multiples, par exemple



Le processus \u00e9lectrochimique peut s'\u00e9crire sous la forme suivante :



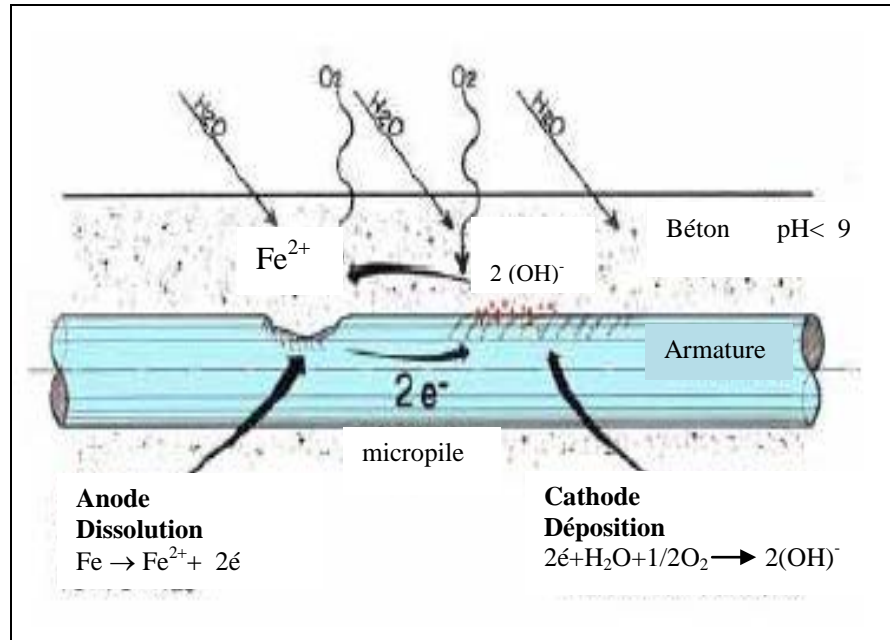


Figure 1.9: Processus de la corrosion de l'acier dans le béton (BADAOUÏ, 2003).

Les produits de réactions anodiques et cathodiques peuvent parfois réagir :



On obtient ainsi un hydroxyde qui recouvre la surface métallique et la protège (réaction de passivation). D'autres anions que  $\text{OH}^-$  comme  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  peuvent réagir et participer à la formation de la couche qui recouvre le métal.

Les réactions (1.26) et (1.30) que l'on rencontre dans le béton armé réagissent selon les équations Suivante:(RAHARINAÏVO, 1998)



Donnant un composé rouille rouge-brun, l'hématite.



Donnant un composé noir, la magnétite.

Si le taux d'oxygène est élevé et le  $\text{pH} > 6$ , alors  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  précipite et est rapidement oxydé et hydrolysé en  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ , à long terme,  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  peut se transformer en goethite par perte d'eau. (MORIANDE, 2005).

Les réactions (1.24) et (1.26) sont caractéristiques du couple Métal/Solution. A l'échelle macroscopique, elles ont lieu simultanément et au même endroit.



### 1.5.2. Potentiel d'électrode:

Un métal est formé d'un réseau d'ions positifs et d'un nuage d'électrons pouvant se déplacer par rapport à ces ions. Lorsque le conducteur électronique (Fe) est en contact avec un conducteur ionique par exemple électrolyte ( $\text{H}_2\text{O}$ ), il constitue une électrode. Les ions superficiels  $\text{Fe}^{2+}$  tendent à passer dans l'eau en abandonnant dans le métal (Fe) deux charges négatives. (HUET, 2005).

Les charges négatives ainsi créées à la surface du métal (Fe) maintiennent les ions à courte distance et il se forme ainsi une couche d'ions positifs parallèles à la surface du métal.

L'interface entre les deux phases représente pour chacune une très forte perturbation dans la distribution locale de leurs charges électriques, dont la densité moyenne locale est normalement nulle (HUET, 2005).

Il s'établit ainsi de part et d'autre de l'interface des charges d'espace non nulles, électronique du côté du métal et ionique du côté de la solution.

En première approximation, la répartition de ces densités de charge électriques de signe opposé peut être considérée comme située dans deux plans parallèles correspondant à un condensateur électrique (double couche d'Helmutz) (BRIANT, 1989; ROZIERE, 2005).

Il existe ainsi entre les deux « plaques » de ce condensateur une différence de potentiel appelée

« potentiel d'électrode » ou « potentiel électrochimique » ou « potentiel du métal » et dans tout l'espace concerné un très fort champ électrique local.

Ce champ électrique et le potentiel d'électrode associé influent naturellement sur les transferts de charge électriques entre les deux phases métal et solution, c'est à dire sur les deux réactions (1.24) et (1.26). En sens inverse, ces transferts modifient les charges d'espace et donc la différence de potentiel du condensateur (KERBOUA, 2007).

Même si les deux réactions (1.24) et (1.26) sont indépendantes, elles engendrent et subissent toutes les deux le même type d'interaction avec les grandeurs électriques potentiel et courant. Elles sont donc bilatéralement couplées par leurs effets électriques.

De même pour la relation entre potentiel et courant (interaction en boucle): le potentiel  $U$  influence le courant  $i$ , comme d'habitude en électricité, et le transfert de charges par le courant qui circule, influence en retour la distribution de ces charges, et donc le potentiel (VERVISCH-FORTUNÉ, 2009).

### 1.5.3. Diagramme de Pourbaix

Lorsqu'on plonge un métal dans une solution contenant les ions métalliques, il existe une différence de potentiel entre le métal et la solution qui est appelée potentiel d'électrode.

Chaque couple oxydo-réducteur ( $\text{Fe}/\text{Fe}^{2+}$ ;  $\text{H}_2\text{O}/\text{H}^+$ ) a un potentiel d'électrode par rapport à une électrode de référence. (RAHARINAIVO, 1998)

Lorsque ces deux couples sont mis enjeu, au bout d'un temps suffisamment important pour qu'un régime stationnaire soit établi, il se crée une différence de potentiel entre l'électrode métallique et la solution appelé potentiel de corrosion.

Le métal a un potentiel qui dépend fortement de son environnement. Certains potentiels d'électrode sont influencés par le pH du milieu environnant. C'est le cas de l'armature dans le béton. Le pH de la solution électrolytique a une forte influence sur le potentiel de l'armature.

Le pH de la solution interstitielle du béton fortement basique joue le rôle de protecteur de l'armature. Si l'on fait varier le pH de la solution interstitielle, le potentiel du système acier/béton va varier et modifier l'état de l'armature.

On trace ainsi le diagramme de Pourbaix.  $E = f(\text{pH})$  à partir des équations d'équilibre donnant le potentiel d'équilibre d'une réaction d'oxydoréduction, issu de l'équation de Nernst (DUVAL, 1992).

De nombreuses réactions d'électrode dont celles conduisant à la formation d'oxydes en milieu aqueux font intervenir les ions  $\text{H}^+$ . Le potentiel  $E$  dépend donc du pH de la solution.

Les diagrammes de Pourbaix (potentiel-pH) permettent de prévoir les réactions de corrosion métallique (figure1.10). Mais en aucun cas, ces prévisions ne font intervenir de considérations cinétiques.

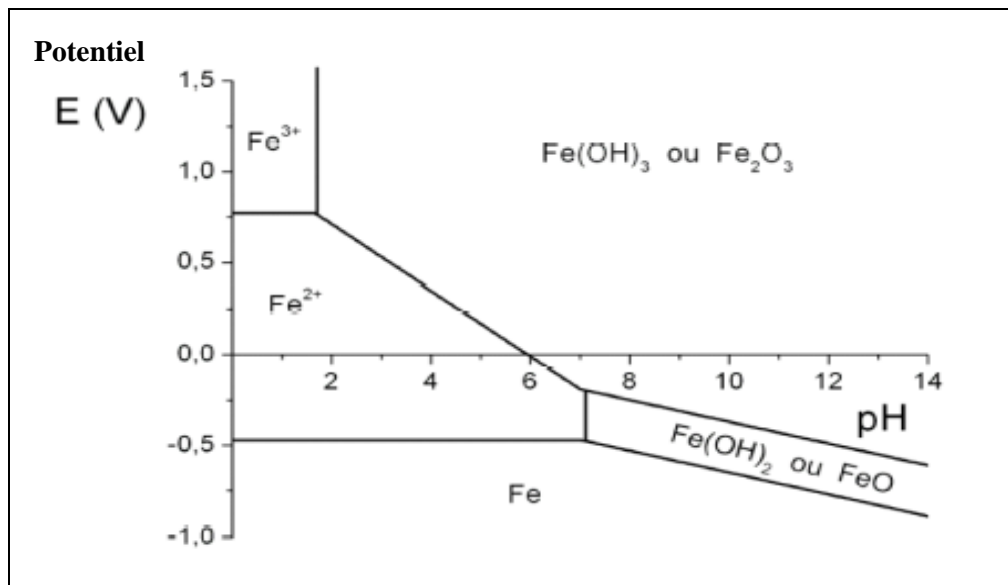


Figure1 .10 : Diagramme de Potentiel-pH simplifié du fer à 25° (DEBY, 2008).

Dans ce diagramme, les zones délimitées par des traits indiquent les couples de valeurs ( $E$ , pH) pour lesquelles une espèce est stable. Il met en évidence plusieurs domaines: (RAHARINAIVO, 1998)

- des zones de corrosion, on est dans une zone de stabilité d'espèces solubles du fer ( $\text{Fe}^{2+}$ ).

- des zones de passivité, on est dans une zone de stabilité d'un de ses oxydes ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ).
- des zones d'immunité, le métal ne réagit pas, on est dans une zone de stabilité du fer (Fe).

#### 1.5.4. Rôle du béton

Le béton protège l'acier de la corrosion d'une part, par la forte alcalinité de sa solution interstitielle (pH élevé de l'ordre de 12,5 à 13), et d'autre part, par son rôle de barrière contre la pénétration d'agents agressifs. (ALMUSALLAM, 2001)

Il est nécessaire de connaître la composition de la solution interstitielle au voisinage de l'acier, dont dépendent les processus électrochimiques, pour comprendre l'influence du milieu sur la corrosion des armatures.

Le béton enrobant l'acier est un matériau poreux constitué de trois phases : solide, liquide et gazeuse. La phase solide est constituée de granulats et de la pâte de ciment, les granulats inactifs en général sur la corrosion des armatures peuvent, par leur présence ralentir la pénétration d'agents agressifs (GARBOCZI, 1998).

Toutefois la présence de liquides dans leurs pores peut influencer sur la cinétique de corrosion. La pâte de ciment poreuse, composée de silicates de calcium hydraté C-S-H (50 à 70% du volume), de portlandite  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  et ettringite joue un rôle important, car la pénétration des agents agressifs se fait à travers les pores.

La phase liquide, se présente sous quatre formes : l'eau liée chimiquement, adsorbée à la surface des C-S-H, interfeuillet et l'eau contenue dans les pores capillaires (NGOC, 2011).

La solution des pores est thermodynamiquement en équilibre avec la phase solide et fortement chargée en ions. Lorsque des agents extérieurs pénètrent, la solution change et engendre des effets sur la matrice cimentaire.

La phase gazeuse contenue dans la porosité connectée favorise la pénétration des agents agressifs vers les aciers. Cette pénétration s'accompagne de l'acidité de la solution et de la dépassivation de l'acier.

#### **1.5.5. Etat de l'acier dans le béton**

L'acier est un alliage passivable, capable de former une couche protectrice, dense, étanche et isolante électriquement, qui s'oppose au passage de ses ions métalliques vers l'électrolyte. Cette passivation est fonction du pouvoir oxydant de l'électrolyte et de la morphologie de la couche formée.

Les propriétés oxydantes de la solution entraînent une réaction entre la barre de fer et la solution électrolytique, qui conduit à la croissance initiale d'adsorbats hydroxylés en surface du métal, ensuite il se forme une couche oxydée continue non poreuse, qui constitue une nouvelle phase homogène.

L'acier se trouve en principe à l'état d'oxydes, de sulfates et de carbonates, il est recouvert d'une couche passive d'oxydes, qui le protègent des agressions extérieures. Dès lors que le milieu environnant change, la stabilité de l'ensemble béton/acier est « modifiée ». La couche passive disparaît et la corrosion peut s'amorcer (KHARCHI et BADAOU, 2003).

#### **1.5.6. Dépassivation par carbonatation du béton**

Le métal à l'état actif subit une attaque uniforme et régulière au pourtour de sa surface. C'est le cas des armatures dans le béton carbonaté qui subissent une dissolution uniforme de la surface métallique après dépassivation de l'armature. Cela résulte de la pénétration du gaz carbonique jusqu'à l'armature.

La combinaison de la portlandite contenue dans le ciment et de l'acide carbonique de l'air forme du calcaire en libérant de l'eau, qui en abaissant le pH élevé de la solution interstitielle (pH = 12,7), va détruire la couche passive environnant l'armature. On dit que les aciers sont dépassivés permettant l'amorçage de la corrosion des armatures.

Les produits de corrosion formés provoquent des décollements aux interfaces acier-béton. Pour un matériau cimentaire à porosité constante, la carbonatation devrait engendrer une expansion volumique du matériau carbonaté de 11% en raison du rapport des volumes molaires de la portlandite et de la calcite (HUET, 2005).

Il a été démontré que le matériau se resature en eau dans la zone réactionnelle en raison de la réduction de porosité couplée à la quantité d'eau relarguée, ayant pour effet de ralentir la pénétration du dioxyde de carbone, et donc de ralentir l'avancement du front de carbonatation (BARY, 2004).

Le taux de carbonatation dépend principalement de l'humidité relative, de la concentration en CO<sub>2</sub> et de la température de l'environnement où le béton est placé (NEVILLE, 2001). L'ordre de grandeur de la profondeur de pénétration du CO<sub>2</sub> est de 20 à 25mm en 50 ans pour un béton de porosité moyenne exposé sous nos climats.

Il a été démontré qu'à partir d'une distance de 25 à 30 mm à l'intérieur du béton, il n'y a plus d'échange gazeux dû aux dépôts de calcaire de la pâte du ciment (GIRARD, 1998). Le pH reste stable autour de 11 et la corrosion ne se manifeste pas.

De même, les bétons immergés ne se carbonatent pas, compte tenu de l'absence d'échanges gazeux (VALLS, 2002).

L'état hydrique du béton influe sur sa perméabilité, la progression du CO<sub>2</sub> dépend de la perméabilité de celui-ci.

Lors de la réalisation d'ouvrage en béton, un seuil de perméabilité est fixé de manière à limiter la pénétration d'agents agressifs comme le CO<sub>2</sub>. Ce seuil dépend de l'exposition de l'ouvrage (état hydrique) (BALAYSSAC, 1998).

On peut mesurer la profondeur de carbonatation de béton grâce à un essai destructif sur un prélèvement en pulvérisant un indicateur coloré, la phénolphthaléine.

La profondeur de carbonatation  $X(t)$  est exprimée en fonction du temps par la loi de Fick suivante:

$$X(t) = K\sqrt{D.t} \quad (1.34)$$

Avec

D: coefficient de diffusion (diffusivité de la carbonatation);

K : facteur tenant compte des caractéristiques du matériau;

t : temps (année);

## 1.6. Conclusions

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, et à leur oxydation qui est contrôlée par le pouvoir inhibant des carbonates, ainsi que par le potentiel redox de la solution.

La pâte de ciment poreuse, composée de silicates de calcium hydraté C-S-H, de portlandite  $\text{Ca(OH)}_2$  et ettringite joue un rôle important, car la pénétration des  $\text{CO}_2$  se fait par les pores.

Le gaz se dissout en acide au contact de la solution interstitielle, cette acidification conduit à la dissolution des hydrates et notamment de la portlandite, abaissant ainsi le pH de la solution à une valeur inférieure à 9, en réduisant la passivation des aciers et permettant l'amorçage de la corrosion des armatures.

Des lois empiriques de la forme de la loi de Fick permettent de suivre l'évolution de la profondeur de carbonatation  $X(t)$  en fonction du temps.

# **Chapitre 2**

## **Modélisation de la carbonatation**

## Chapitre 2: Modélisation de la carbonatation

### 2.1. Introduction

L'objectif de cette partie est de présenter une forme simplifiée de la cinétique de carbonatation, ainsi que les paramètres d'entrée des principaux modèles existants permettant de modéliser la carbonatation d'un matériau cimentaire.

### 2.2. Cinétique de la carbonatation

Les différentes formules de diffusion expriment l'épaisseur du béton carbonatée en fonction de la racine carrée du temps, selon l'expression suivante: (NGOC, 2011)

$$X = X_0 + K \cdot \sqrt{t} \quad (2.1)$$

Avec :

$X$  : épaisseur carbonatée (mm) ;

$t$  : durée d'exposition (années) ;

$X_0$  et  $K$ : coefficients liés aux caractéristiques du matériau et aux conditions environnementales

LOO et al (1994), proposent la relation empirique suivante, afin de modéliser les essais de carbonatation accélérée:

$$K = 300 \cdot (R_{28})^{-1,08} \cdot (C_0)^{0,158} \cdot (e)^{0,012 \cdot T} \cdot (t_{wc})^{-0,126} - 2,98 \quad (2.2)$$

Avec:

$R_{28}$  : résistance à la compression à 28 jours (MPa) ;

$C_0$  : concentration en  $CO_2$  du mélange gazeux en contact avec le béton ( $kg \cdot m^3$ );

$t_{wc}$  : durée de la cure (jours)

$T$  : température ( $^{\circ}C$ ).

L'équation (2.2) exhibe une croissance de la cinétique de carbonatation en fonction de la concentration en dioxyde de carbone, cette expression prend en compte la température et l'effet bénéfique d'une cure prolongée.

La vitesse de carbonatation des bétons croit avec la porosité, tandis qu'une augmentation des performances mécaniques du matériau engendre une décroissance des cinétiques de carbonatation. (POTTER, 1987; PENTI, 1992)

Deux relations empiriques entre la constante  $K$  et  $R_{28}$ , pour des expositions du matériau en milieu naturel, sont présentées dans le tableau suivant:

| Auteurs  | $K$ (mm.an <sup>-1/2</sup> )  |
|----------|---|
| Smolczyk | $7(10 \frac{E}{C} \frac{1}{\sqrt{R_{28}}} - 0.175)$                   |
| Wierig   | $84.62 \frac{E}{C} \frac{1}{\sqrt{R_{28}}} - 0.64 \frac{E}{C} - 1.63$ |

Tableau 2.1 Modèles empiriques pour la carbonatation du béton (CHAUSSADENT, 1997).

### 2.3. Les modèles de carbonatation

Les modèles suivants reposent sur la loi de transport macroscopique de Fick en milieu poreux, ils se caractérisent par leurs domaines de validité, leurs hypothèses sur les conditions initiales et aux états limites, ainsi que les paramètres d'entrée et de sortie.

- le modèle de Bary et Sellier ;
- le modèle de Thiéry ;
- le modèle Duracrete ;
- le modèle de Miragliotta ;

- le modèle du Task Group 5.0 du Comité Euro-international du Béton (CEB) ;
- le modèle Oxand ;
- le modèle de Bakker ;
- le modèle de Al-Akchar, Baroghel-Bouny et Raharinaivo ;
- le modèle de Papadakis, Vayenas et Fardis ;
- le modèle de Ying-Yu et Qui-Dong ;
- le modèle de Saetta, Schrefler et Vitaliani ;

### **2.3.1. Le modèle de BARY et SELLIER**

BARY et SELLIER (2004), ont établie un modèle qui repose sur l'hypothèse que le béton est composé d'une phase liquide, une phase solide et une autre gazeuse, entre lesquelles des réactions de dissolution, solidification et vaporisation se produisent.

Ce modèle prend en compte: la diffusion du dioxyde de carbone dans la texture du matériau et la dissolution progressive des hydrates de la pâte de ciment, la migration des ions calcium dans la phase liquide et la formation de calcite par réaction entre les ions de calcium et le CO<sub>2</sub> dissous, l'augmentation de la porosité par décalcification et la diminution de la porosité par formation de calcite.

La modélisation de la matrice cimentaire est inspirée des travaux d'ADENOT(1992), elle repose sur la conservation de la masse de calcium, de l'eau et celle du carbone, et sur une délimitation de la zone de la pâte de ciment qui apparaît au cours de la carbonatation et de la décalcification.

La pression partielle du dioxyde de carbone dans la phase gazeuse et celle à l'interface, corrigée par la fraction volumique de l'espace poreux connecté occupé par l'eau, la quantité de dioxyde de carbone solubilisée dans la solution interstitielle est déterminée par le degré de saturation de la porosité connectée et le coefficient de transfert de masse.

De plus, la quantité de calcite créée est fonction de la teneur en calcium de la solution interstitielle, de la porosité et de l'état de saturation du béton.

Le tableau 2.2 identifie les paramètres d'entrée du modèle de Bary et Sellier :

| Paramètre   | Détermination du paramètre  | Intérêt du paramètre  |
|---|---|---|
| Variables caractérisant l'état du milieu: Concentration en calcium et en CO <sub>2</sub> de la solution interstitielle, degré de saturation   | Dosage de la solution interstitielle  | Prise en compte des réactions chimiques et de la saturation du matériau                             |
| Constituants de la phase solide initiale : Teneur en portlandite, en C-S-H de rapport C/S=1.65, en monosulfoaluminate de calcium, en ettringite et en hexahydrate (C <sub>3</sub> AH <sub>6</sub> ) | Calculés d'après les données chimiques du ciment anhydre. La masse volumique moyenne des anhydres est calculée à partir des masses volumiques élémentaires des anhydres.                  | Les différentes phases de la matrice cimentaires sont considérées                                   |
| Porosité totale   | Calculée d'après le volume des phases solides des hydrates ( <i>annexe 1</i> )  | Prise en compte de l'état initial du matériau et de sa modification microstructurale                |
| Equilibres chimiques considérés : Précipitation de calcite, dissolution du CO <sub>2</sub> dans la solution interstitielle, décalcification des hydrates  |   | Décalcification de la portlandite prise à part de la décalcification des autres hydrates            |
| Concentrations des espèces chimiques de la solution interstitielle (autres que calcium et CO <sub>2</sub> )   | Calculées à l'aide des constantes d'équilibre ( <i>annexe 1</i> ), de l'équation de dissociation de l'eau et en respectant la condition d'électroneutralité de la solution interstitielle | Les alcalins n'interviennent que par l'intermédiaire de l'équation d'électroneutralité              |
| Solubilité du CO <sub>2</sub> dans la solution interstitielle   |   | Prend en compte l'état de saturation du matériau : séchage et désaturation de la surface d'échange. |

Tableau 2.2 : Paramètres d'entrée du modèle de Bary et Sellier (BARY et SELLIER, 2004).

En ce qui concerne les mécanismes physico-chimiques de pénétration du gaz carbonique dans la matrice cimentaire et les réactions entre le CO<sub>2</sub> dissous et les hydrates, le présent modèle s'avère robuste. Néanmoins, les difficultés de dosage de la solution interstitielle et de la zonation de la partie carbonatée du béton limite l'application de ce modèle.

### 2.3.2. Le modèle de Thiéry

A l'instar du modèle de Bary et Sellier, le modèle de THIERY (2005), est de type numérique. Il permet d'obtenir plusieurs profils tel que: la teneur en carbonates de calcium, la teneur en hydrates, en plus de la prédiction de la profondeur de carbonatation.

La diffusion du  $\text{CO}_2$  dans la matrice cimentaire, et les agents chimiques qui déterminent la quantité de matière carbonatable dans le matériau, conditionnent la variation de la microstructure de la matrice cimentaire au cours de la carbonatation, le colmatage des pores dus à la cristallisation de calcite, le changement d'état hydrique du matériau au cours de la carbonatation ainsi que l'évolution de la composition chimique et minéralogique du matériau.

La cinétique de la carbonatation est conditionnée par les propriétés de transfert qui sont intégrés dans le modèle par l'utilisation de variables qui décrivent la diffusion du  $\text{CO}_2$ , la nature de la matière carbonatable, les cinétiques chimiques et le colmatage des pores.

Le choix des paramètres d'entrée a été établie afin de reproduire avec pertinence les indicateurs de durabilité préconisés par l'AFGC (2004), a savoir: la porosité, la quantité de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  et C-S-H, la perméabilité à l'eau et le coefficient de diffusion ionique et la courbe de sorption-désorption du matériau.

Les variables principales sont obtenues en fixant des conditions initiales et aux limites correspondantes, par combinaison des différentes équations. La concentration en  $\text{CO}_2$ , l'humidité relative qui fixe le taux de saturation du matériau sont liées à l'environnement extérieur.

Après comparaison entre les résultats du modèle numérique avec ceux d'essais de carbonatation accélérée, et des mesures de carbonatation naturelle de structures exposées dans un environnement connu, le présent modèle a été validé.

Ce modèle décrit avec précision la carbonatation en prenant en compte celle des C-S-H. De plus il propose une description assez détaillée du phénomène de carbonatation pour permettre la simulation du pH.

La particularité de ce modèle réside dans sa prise en compte des effets cinétiques liés à la non-instantanéité des réactions chimiques.

Les paramètres d'entrée du modèle sont présentés dans le tableau ci-dessous.

| Physique considérée   | Paramètres d'entrée permettent de modéliser la physique   | Intérêt de la physique   |
|---|---|--|
| Mécanismes physicochimique de carbonatation :<br>Cinétique de dissociation du $H_2CO_3$<br>Cinétique de dissolution de $Ca(OH)_2$<br>Carbonatation de $Ca(OH)_2$<br>Carbonatation des C-S-H                           | Constantes d'équilibre des réactions chimiques et de leurs différentes étapes, taux d'avancement de ces réactions Pour la dissolution de $Ca(OH)_2$ :<br>transport et diffusion de $Ca^{2+}$ et $OH^-$ au travers de la calcite qui précipite sur le cristal de $Ca(OH)_2$ en cours de dissolution.<br>Rayon moyen du cristal de $Ca(OH)_2$ . | Prend en compte le passage du $CO_2$ en solution, dissolution de la portlandite et précipitation de la calcite. Prise en compte de la carbonatation des C-S-H  |
| Evolution de la porosité :<br>Porosité totale Distribution des tailles de Pores   | Contenus molaires et volumes des phases solides : $n_{Ca(OH)_2}$ , $n_{CaCO_3}$ , $n_{C-S-H}$ , $n_{CaCO_3C-S-H}$<br>Porosité du matériau   | Accessibilité des sites réactionnels, colmatage des pores  |
| Evolution de l'état hydrique :<br>Libération d'eau lors de la réaction de carbonatation<br>Echanges avec l'extérieur  | Constantes d'équilibre des réactions de carbonatation et concentration des Espèces<br>Taux de saturation<br>Pression capillaire   | En relation avec l'évolution de la porosité Cycles humidification/séchage pris en compte: influence de l'environnement   |
| Transfert de matière :<br>Transport du $CO_2$ en phase gazeuse et aqueuse<br>Transport de l'eau liquide<br>Transport des ions en solution   | Concentration en $CO_2$ de la phase gazeuse $[CO_2]$ , diffusivité du $CO_2$ gazeux. Perméabilité intrinsèque à l'eau liquide du matériau<br>Porosité du matériau<br>Taux de saturation<br>Fraction volumique d'eau liquide<br>Coefficient de diffusion ionique des différentes espèces   | Couplage de la carbonatation et des Transferts Influence du milieu extérieur considérée<br>Modélise mieux la carbonatation naturelle lors de laquelle le transfert ionique est possible pour un matériau totalement saturé |
| Conservation de la matière :<br>$CO_2$ en phase gazeuse Espèces en solution : $H_2CO_3$ , $HCO_3^-$ , $CO_3^{2-}$ , $OH^-$ , $H^+$ , $H_2O$ Phases solides : $Ca(OH)_2$ , $CaCO_3$ , C-S-H, C-S-H carbonatés, $SiO_2$ | Concentration en $CO_2$ de la phase gazeuse $[CO_2]$ concentration des espèces chimiques en solution : $[H_2CO_3]$ , $[HCO_3^-]$ , $[CO_3^{2-}]$ , $[OH^-]$ , $[H^+]$<br>Contenus molaires des phases solides : $n_{Ca(OH)_2}$ , $n_{CaCO_3}$ , $n_{C-S-H}$ , $n_{CaCO_3C-S-H}$   | Interactions chimiques entre les espèces présentes   |

Tableau 2.3 : Paramètres d'entrée du modèle de Thiéry (THIERY, 2005)

### 2.3.3. Le modèle Duracrete

Le modèle de DURACRETE (2000), propose deux expressions permettant le calcul de la profondeur de carbonatation, et le temps nécessaire pour que le front de carbonatation parvienne jusqu'à l'armature.

La profondeur de carbonatation  $X_c$  (m) utilisant les paramètres du tableau (2.4), pour une période de référence  $t_0$  est exprimée selon la relation suivante:

$$X_c = \sqrt{2k_e k_c (k_t D_{ACC,O} + \varepsilon_t) C_s T \left( \frac{t_0}{T} \right)^w} \quad (2.3)$$

Où

$D_{ACC,O}$ : coefficient de diffusion normé du  $CO_2$  déterminé d'une carbonatation accélérée réalisé dans des conditions précises (DARTS, 2004)

$K_t$ : facteur de test-référence

$\varepsilon_t$ : porosité du béton carbonaté

Le coefficient de diffusion normé en condition naturelle  $D_{NAC,O} = k_t D_{ACC,O} + \varepsilon_t$ . En absence de mesure de  $D_{ACC,O}$ ,  $D_{NAC,O}$  peut s'écrire

$$D_{NAC,O} = \frac{D_{eff}}{a} \quad (2.4)$$

Le temps nécessaire  $T_1$  pour que le front de carbonatation parvienne jusqu'à l'armature est exprimée par :

$$T_1 = \left[ \frac{ad^2}{2k_e k_c D_{eff} C_s t_0^{2w}} \right]^{\frac{1}{1-2w}} \quad (2.5)$$

L'utilisation de ce modèle est plus répandue, puisque il intègre de nombreux paramètres, dont les conditions environnementales. Il est adaptable au plusieurs matériaux cimentaires.

Le tableau 2.4 identifie les paramètres d'entrée de ce modèle.

| Paramètre        | Définition  | Détermination du Paramètre  | Intérêt du paramètre  |
|------------------|---|---|---|
| d                | Epaisseur d'enrobage (m)  | Fixée   | Prise en compte de l'épaisseur d'enrobage   |
| D <sub>eff</sub> | Coefficient de diffusion effectif du CO <sub>2</sub> dans le béton (m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ) | Calculé par une relation empirique ( <i>annexe 1</i> )  | Prise en compte de l'évolution de la microstructure du béton avec la carbonatation, des conditions extérieures, de la compacité et de la cure du matériau |
| A                | Quantité de CO <sub>2</sub> pour une carbonatation complète du matériau (kg.m <sup>-3</sup> )         | Calculée par une relation empirique ( <i>annexe 1</i> )   | Prise en compte de la nature du ciment, la teneur en CaO et le degré d'avancement des réactions d'hydratation   |
| C <sub>s</sub>   | Concentration en CO <sub>2</sub> à la surface du béton (mol.m <sup>-3</sup> )                         | Fixée   | Prise en compte des conditions extérieures (teneur en CO <sub>2</sub> )   |
| K <sub>e</sub>   | Paramètre tenant compte des conditions climatiques, en particulier le taux moyen d'humidité du béton  | Calculé à partir d'une équation ( <i>annexe 1</i> )   | Prise en compte des conditions extérieures (humidité relative)  |
| K <sub>c</sub>   | Paramètre tenant compte des conditions de cure du béton   | Données bibliographiques (Base de données de retour d'expérience) ( <i>annexe 1</i> )                                   | Prise en compte de la cure du béton   |
| W                | facteur méso-climatique   | Calculé d'après les conditions extérieures (humidité relative, cycle humidification/séchage) et la porosité du matériau | Prise en compte de la porosité du béton et des conditions extérieures   |

Tableau 2.4 : Paramètres d'entrée du modèle Duracrete (DURACRETE, 2000).

### 2.3.4. Le modèle de Miragliotta

MIRAGLIOTTA (2000), modélise le front de carbonatation en tenant compte simultanément des cinétiques des réactions de carbonatation et d'hydratation du ciment.

La profondeur de carbonatation X (m) en fonction du temps de carbonatation t (s) est modélisée par la relation ci-dessous:

$$X = \sqrt{\frac{2\varepsilon_p(1-Sa)D_{CO_2}[n_{CO_2}]_{ext}\tau}{(1-\varepsilon_p).([CH] + 3[C3S] + 2[C2S] + 4[C4S] + 5[C3A])}} \sqrt{t} \quad (2.6)$$

Le modèle a été validé par des essais de carbonatation accélérée, il nécessite la connaissance de la porosité du matériau et sa formulation, la composition chimique du ciment ainsi que la teneur en CO<sub>2</sub> de l'atmosphère.

Le modèle de MIRAGLIOTTA permet de quantifier la porosité, la profondeur de carbonatation, les concentrations des anhydres et des hydrates. Les données d'entrée les informations suivantes (tableau 2.5) :

| Paramètre        | Définition   | Détermination du paramètre                           | Intérêt du paramètre   |
|------------------|--|--|--|
| $\varepsilon_p$  | Porosité totale du béton   | Expérimentale  | Prise en compte des conditions initiales du matériau (microstructure)                |
| $S_a$            | Degré de saturation du matériau  | Expérimentale  | Prise en compte des conditions initiales du matériau (microstructure) et extérieures |
| $D_{CO_2}$       | Coefficient de diffusion effectif du CO <sub>2</sub> (m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> )    | Expérimentale  | Prise en compte des conditions initiales du matériau (microstructure)                |
| $n [CO_2]_{ext}$ | Concentration atmosphérique du CO <sub>2</sub> (mol.m <sup>-3</sup> )                      | Fixée  | Prise en compte des conditions extérieures (teneur en CO <sub>2</sub> )              |
| [constituant]    | Concentration en anhydres ou hydrates (CH, C-S-H, C <sub>3</sub> S) (mol.m <sup>-3</sup> ) | Calculée d'après la composition du matériau ou dosée | Prise en compte des conditions initiales du matériau (composition)                   |

Tableau 2.5 : Paramètres d'entrée du modèle de Miragliotta (MIRAGLIOTTA, 2000).

### 2.3.5. Le modèle du Task Group 5.1 du CEB

Le groupe de travail TG 5.1 du CEB (1997), modélise le processus de carbonatation par l'équation (2.7), donnant la profondeur de carbonatation  $X_c$  (m) en fonction du temps  $t$  (s) d'exposition :

$$X_c(t) = \sqrt{\frac{2k_1 k_2 D_{eff} C_s}{a}} \sqrt{t} \left( \frac{t_0}{t} \right)^n \quad (2.7)$$

Ce modèle tient compte des conditions environnementales et de cure du matériau.

| Paramètre | Définition   | Détermination du Paramètre  | Intérêt du paramètre  |
|-----------|--|---|---|
| $D_{eff}$ | Coefficient de diffusion effectif du CO <sub>2</sub> dans le béton (m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> )  | Expérimentale. Défini pour une compacité, une cure et en fonction des conditions environnementales.   | Prise en compte des conditions initiales, du processus de fabrication du matériau et des conditions extérieures |
| a         | Quantité de CO <sub>2</sub> nécessaire à la carbonatation complète du matériau (kg.m <sup>-3</sup> )   | Calculé d'après la teneur en CaO du ciment, la teneur en ciment du béton et son degré d'hydratation ( <i>annexe 1</i> )                                       | Prise en compte de la composition du matériau   |
| $C_s$     | Concentration en CO <sub>2</sub> à la surface du matériau (kg CO <sub>2</sub> .m <sup>-3</sup> )   | Fixée   | Prise en compte des conditions extérieures (teneur en CO <sub>2</sub> )   |
| $k_1$     | Paramètre permettant de prendre en compte les conditions de cure du béton Prise en compte de la cure du matériau et des conditions extérieures | Pour le milieu extérieur le produit $k_1.k_2$ est pris égal à 0,5. Pour l'intérieur, le produit $k_1.k_2$ varie de 1 (cure de bonne qualité) à 2 (sans cure). | Prise en compte de la cure du matériau et des conditions extérieures (humidité relative)                        |
| $k_2$     | Paramètre permettant de prendre en compte les conditions climatiques du béton (en particulier le taux de saturation moyen)                     |   |   |
| n         | Paramètre permettant de prendre en compte l'orientation et la localisation de la structure de béton  | n = 0 en intérieur. n varie de 0,1 (abrité) à 0,4 (non abrité) en extérieur   | Prise en compte des conditions climatiques à la surface du béton  |
| $t_0$     | Période de référence   | Fixée (prise égale à un an)   |   |

Tableau 2.6 : Paramètres d'entrée du modèle Task Group 5.1 (CEB, 1997).

### 2.3.6. Le modèle utilisé par la société Oxand

Le modèle Oxand considère que, la réaction du gaz carbonique avec les hydrates de la pâte divise le béton en zone non carbonatée et une autre carbonatée.

La profondeur de la carbonatation,  $X_c$  (m) en fonction du temps  $t$  (années) est donnée par la relation suivante:

$$X_c = \gamma.f(HR).k.\sqrt{t} \quad (2.8)$$

Les paramètres  $k$ ,  $HR$  et  $\gamma$  sont représentés sur le tableau 2.7:

| Paramètre | Définition  | Détermination du paramètre  | Intérêt du paramètre   |
|-----------|---|---|--|
| k         | Coefficient de transport du béton ( $m.an^{-0,5}$ )                                       | Calculé sur la base de résultats expérimentaux de $R_{c28}$ d'après une relation empirique ( <i>annexe 1</i> ). Considéré constant dans le temps. | Prise en compte de la classe de béton et du type de ciment. Intéressant car $R_{c28}$ est une donnée toujours connue |
| HR.       | Humidité relative supposée en équilibre avec le béton, sur la profondeur de carbonatation | Calculée sur la base de données issue de la littérature ( <i>annexe 1</i> ), $f(HR.)$ représente un facteur lié à l'humidité relative             | Prise en compte des conditions extérieures (humidité relative)   |
| $\gamma$  | Coefficient d'exposition  | Valeurs obtenues par une analyse inverse de données in-situ, par exemple par des mesures de profondeur de carbonatation avec la phénolphthaléine. | Prise en compte des conditions extérieures (teneur en $CO_2$ , humidité relative)                                    |

Tableau 2.7 : Paramètres d'entrée du modèle Oxand (HYVERT, 2009)

Les valeurs de base issues de retours d'expérience (tableau 2.8) peuvent être utilisées dans le cas où le coefficient  $\gamma$  n'est pas déductible des mesures de profondeur de carbonatation.

| Type d'ouvrage   | Coefficient d'exposition $\gamma$ |
|--|-----------------------------------|
| Structures soumises à des concentrations de $CO_2$ élevées | 1,5                               |
| Structures particulièrement exposées à la pluie            | 0,9                               |
| Structures abritées  | 1,2                               |

Tableau 2.8 : Quelques valeurs pour le coefficient d'exposition  $\gamma$  (HYVERT, 2009).

### 2.3.7. Le modèle de Bakker

Le modèle de BAKKER (1993), prend en compte les cycles de mouillage et de séchage de bétons exposés en milieu naturel. Il permet de déterminer le degré de carbonatation d'un béton soumis à des conditions climatiques variables dans le temps. Ce modèle calcule le front de carbonatation  $X_c$  (m) selon les relations suivantes :

$$X_c = A \sum_{i=1}^n \sqrt{\left(t_{di} - \left[\frac{X_{ci} - 1}{b}\right]^2\right)} \quad (2.9)$$

Avec :

A (m): paramètre décrivant l'évolution de la profondeur de carbonatation:

$$A = \sqrt{\frac{2D_c(C_1 - C_2)}{a}} \quad (2.10)$$

B (m): paramètre décrivant le front de séchage B (m) par :

$$B = \sqrt{\frac{2D_v(C_3 - C_4)}{b}} \quad (2.11)$$

Le tableau 2.9 donne les données d'entrée du modèle de Bakker

| Paramètre                       | Définition  | Détermination du paramètre  | Intérêt du paramètre   |
|---------------------------------|---|---|--|
| D <sub>c</sub>                  | Coefficient de diffusion effectif de CO <sub>2</sub> dans le béton (m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> )   | Mesuré par essais accélérés (migration) ou calculé d'après la porosité du béton   |  |
| C <sub>1</sub> – C <sub>2</sub> | Différence de concentration en CO <sub>2</sub> entre le milieu extérieur et le béton (kg.m <sup>-3</sup> )                                      |   | Prise en compte des conditions extérieures (teneur en CO <sub>2</sub> )  |
| A                               | Quantité de substance pouvant se carbonater dans un béton (kg.m <sup>-3</sup> )   | Calculé d'après la teneur en ciment et le type de ciment ( <i>annexe 1</i> )  | Prise en compte de la nature du béton ,nature ciment, E/C,...)   |
| D <sub>v</sub>                  | Coefficient de diffusion effectif de la vapeur d'eau dans un béton (m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> )   | Calculé d'après la porosité du béton ( <i>annexe 1</i> )  | Prise en compte du réseau poreux du béton  |
| C <sub>3</sub> – C <sub>4</sub> | Différence de concentration en vapeur d'eau entre le milieu extérieur et le front d'évaporation du béton (kg H <sub>2</sub> O.m <sup>-3</sup> ) |   | Prise en compte des conditions extérieures (humidité relative)   |
| B                               | Quantité d'eau évaporable dans un béton (kg.m <sup>-3</sup> )   | Évalué en utilisant la teneur en eau et en ciment du béton, le degré d'hydratation, la quantité d'eau contenue dans les micropores et dans les pores capillaires( <i>annexe 1</i> ) | Prise en compte de la teneur en ciment, de la porosité (conditions initiales) et du taux de saturation (condition extérieure) du béton |
| T <sub>di</sub>                 | Durée de la i <sup>ème</sup> période de séchage (années)  |   | Prise en compte des conditions extérieures par la durée du séchage   |
| X <sub>ci</sub>                 | Profondeur de carbonatation après la (i-1) <sup>ème</sup> période d'humidification  |   | Prise en compte des conditions extérieures par les cycles d'humidification/séchage.  |

Tableau 2.9 Données d'entrée du modèle de Bakker (BAKKER, 1993)

Le calcul de la profondeur de carbonatation s'effectue après  $n$  cycles d'humidification/séchage, et l'âge du béton pris en compte est le temps d'exposition du matériau auquel on soustrait la somme des périodes d'humification/ séchage. (figure 2.1).

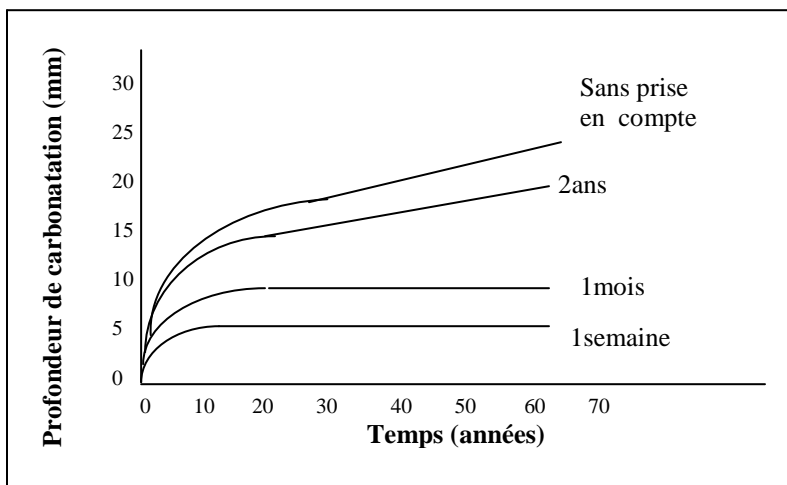


Figure 2.1 : Influence des cycles d'humidification / séchage sur l'évolution de la profondeur de carbonatation (HYVERT, 2009)

### 2.3.8. Le modèle Al-Akchar, Baroghel-Bouny et Raharinaivo

Le modèle AKCHAR et al. (1998), prend en compte la diminution de la diffusivité du matériau en fonction de sa profondeur de carbonatation, suite à la modification de la microstructure par formation de calcite.

Il limite les interactions chimiques à la seule réaction entre le dioxyde de carbone dissous et les ions de calcium, qui résultent de la dissolution de la portlandite et des C-S-H de la matrice cimentaire.

Ce modèle considère que le processus de carbonatation ne peut se produire que lorsque la teneur en dioxyde de carbone en phase aqueuse atteint une valeur de l'ordre de  $10^{-8}$  mol.m<sup>-3</sup>, et que la zone carbonatée dans le béton est calculée à partir de la détermination du pH de la solution interstitielle.

Sur la figure 2.2 est montrée l'influence de la prise en compte de la réaction chimique, en séparant l'évolution du front de carbonatation suivant le type de processus de diffusion: sans réaction chimique, ou avec réaction chimique fixant le dioxyde de carbone étant plus proche des ciments de type CEM I.

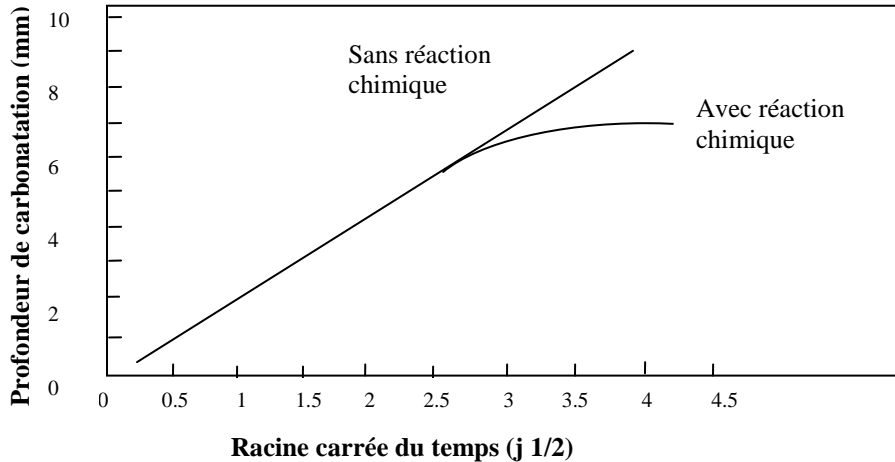


Figure 2.2 : Modélisation des réactions de carbonatation (AL-AKCHAR, 1998).

### 2.3.9. Le modèle de Papadakis, Vayenas et Fardis

PAPADAKIS et al. (1991a, 1991b), modélisent l'évolution de la carbonatation des bétons, en tenant compte de la phase liquide des pores et des réactions chimiques avec les hydrates de la matrice cimentaires.

Ce modèle tient compte de: la diffusion du  $\text{CO}_2$  dans la phase aqueuse des pores du béton et la diffusion des ions de calcium dans l'eau interstitielle suite à la dissolution de la portlandite, la réaction entre le  $\text{CO}_2$  dissous et le calcium lixivié, les silicates de calcium hydratés ( $\text{C-S-H}$ ) et anhydres ( $\text{C}_2\text{S}$  et  $\text{C}_3\text{S}$ ) et la réduction de la porosité du matériau au cours de l'hydratation et de la carbonatation.

Papadakis et al. proposent l'expression suivante pour calculer la profondeur de carbonatation  $X(\text{mm})$  en fonction du temps (s):

$$X = \sqrt{\frac{2Dc[C]}{[CH] + 3[CSH] + 3[C_3S] + 2[C_2S]}} \sqrt{t} \quad (2.12)$$

Ce modèle suppose que la quantité de CO<sub>2</sub> dissout dans la solution interstitielle de la matrice cimentaire est inférieure à la quantité de matière carbonatable (Ca(OH)<sub>2</sub>, C-S-H, C<sub>2</sub>S et C<sub>3</sub>S), et que l'humidité relative de l'air ambiant et le degré de saturation en eau des pores, ne sont pas pris en compte. L'évolution de la microstructure pendant la carbonatation n'est pas non plus modélisée.

Les paramètres d'entrée de ce modèle sont détaillés dans le tableau suivant.

| Paramètre | Définition  | Détermination du paramètre  | Intérêt du paramètre  |
|-----------|---|---|---|
| [C]       | Concentration en CO <sub>2</sub> dans la phase gazeuse au contact du béton (mol.m <sup>-3</sup> )   | Expérimentale   | Prend en compte des conditions extérieures  |
| [composé] | Concentration initiale des hydrates (CH, C-S-H) et des anhydres (C <sub>2</sub> S, C <sub>3</sub> S) dans le béton (mol.m <sup>-3</sup> ) | Obtenu par relation empirique en fonction de la composition du ciment, du rapport E/C, de la cure et de l'avancement des réactions d'hydratation  | Prend en compte la nature du ciment, la formulation du béton et l'hydratation du ciment   |
| Dc        | Coefficient de diffusion effectif du CO <sub>2</sub> dans le béton carbonaté (m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> )                           | Obtenu par relation empirique ( <i>annexe 1</i> ) en fonction de la porosité, du degré de saturation des pores, fonction lui-même de l'humidité relative et de la distribution porosimétrique | Prend en compte la saturation des pores en fonction des conditions extérieures d'humidité et de la porosité du béton (conditions initiales) |

Tableau 2.10 : Données d'entrée du modèle de Papadakis, Vayenas et Fardis (PAPADAKIS, 1991a)

Ce modèle a été validé par comparaison avec des résultats expérimentaux obtenus au cours d'essais de carbonatation accélérée sur différentes formulations de béton.

### 2.3.10. Le modèle de Ying-Yu et Qui-Dong

YING-YU et QUI-DONG (1987), ont étudié la carbonatation naturelle et accélérée d'éprouvettes de mortier et de béton, en supposant que la progression du front de carbonatation s'effectue dans un matériau homogène avant carbonatation, et que le matériau peut être schématisé en trois zones différentes: la zone carbonatée, la zone en cours de carbonatation et la zone non carbonatée (figure 2.3).

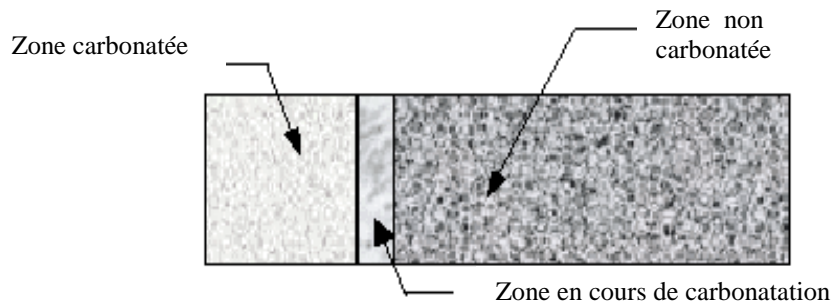


Figure 2.3 : Représentation des trois zones considérées dans le modèle de Ying-Yu et Qui-Dong (YING-YU et QUI-DONG, 1987).

La carbonatation est fonction à la fois des conditions initiales du béton, définies par la masse volumique et le coefficient de diffusion, ainsi que des conditions extérieures, tel que la pression partielle de  $\text{CO}_2$  au contact du matériau.

La profondeur de carbonatation  $\xi$  (m) et le coefficient cinétique  $Q$  ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1/2}$ ) sont défini selon les relations suivantes:

$$\xi = a' + Q.t^{1/2} \quad (2.13)$$

$$Q = \left[ \frac{2 \cdot a_1 \cdot C_1}{K \cdot P} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.14)$$

L'inconvénient de ce modèle est qu'il se limite à la pénétration du  $CO_2$  sans tenir compte de la complexité des réactions chimiques entre les hydrates et la phase liquide. Il a été validé par des comparaisons entre les profondeurs de carbonatation mesurées sur des éprouvettes de mortier soumises à un essai accéléré ( $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ , HR. = 52 %,  $[CO_2] = 20 \%$ ), et les prévisions du modèle.

Les paramètres d'entrée utiles au modèle sont donc :

| Paramètre | Définition   | Détermination du paramètre  | Intérêt du paramètre   |
|-----------|--|---|--|
| $a'$      | Paramètre empirique  | $a' < 1 \text{ m}$ . Les auteurs ne précisent pas la méthodologie utilisée pour le quantifier | Prend en compte les erreurs liées aux expérimentations et à la durée de l'essai accéléré |
| K         | Quantité de $CO_2$ absorbée ( $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ )                        | Expérimentale   | Prend en compte de la microstructure du matériau   |
| P         | Masse volumique ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )                                      | Détermination expérimentale   | Prend en compte de la microstructure du matériau   |
| $C_1$     | Pression partielle de $CO_2$ dans la phase gazeuse au contact (Pa)                       | Fixée   | Prend en compte des conditions extérieures   |
| $a_1$     | Coefficient de diffusion du $CO_2$ dans le matériau ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ) | Calculé par une relation empirique d'après la porosité du béton ( <i>annexe 1</i> )           | Prend en compte de la porosité du matériau (condition initiale)                          |

Tableau 2.11 : Paramètres d'entrée du modèle de Ying-Yu et Qui-Dong

(YING-YU et QUI-DONG, 1987).

### 2.3.11. Le modèle de Saetta, Schrefler et Vitaliani :

Le modèle de SAETTA et al. (1995), considère la carbonatation de la portlandite seule .Il néglige les autres espèces chimiques présentes dans le béton.

La vitesse de formation de la calcite au cours de la dissolution de la portlandite peut s'écrire comme suit:

$$V = \alpha_1 \cdot f_1(HR) \cdot f_2(C) \cdot f_3(CH) \cdot f_4(T) \quad (2.15)$$

Ces paramètres sont présentés dans le tableau suivant

| Paramètre  | Définition   | Détermination du paramètre                                | Intérêt du paramètre  |
|------------|--|---|---|
| $\alpha_1$ | Paramètre adimensionnel tenant compte des caractéristiques du béton : E/C, composition, taux d'hydratation et conditions de cure | Utilisation de données de la littérature                  | Prise en compte des conditions initiales du matériau (E/C, composition, taux d'hydratation,...)                                     |
| HR.        | Humidité relative  | Fixée   | Prise en compte des conditions extérieures (humidité relative)  |
| C          | Concentration en CO <sub>2</sub> (mol.m <sup>-3</sup> )  | Fixée   | Prise en compte des conditions extérieures (teneur en CO <sub>2</sub> )   |
| (CH)       | Concentration en portlandite (mol.m <sup>-3</sup> )  | Calculée d'après la teneur en ciment et le type de ciment | Prend en compte le taux d'avancement des réactions de carbonatation et les conditions initiales du matériau (teneur en portlandite) |
| T          | Température extérieure (K)   | Fixée   | Prise en compte des conditions extérieures (température)  |

Tableau 2.12 : Paramètres d'entrée du modèle de Saetta, Schrefler et Vitaliani (SAETTA et al., 1995)

La figure 2.4 illustre les profondeurs de carbonatation calculées pour différents bétons à base de CEM I à l'aide du modèle ( $T = 23\text{ °C}$ , H.R. = 50%,  $[\text{CO}_2] = 4\%$ ).

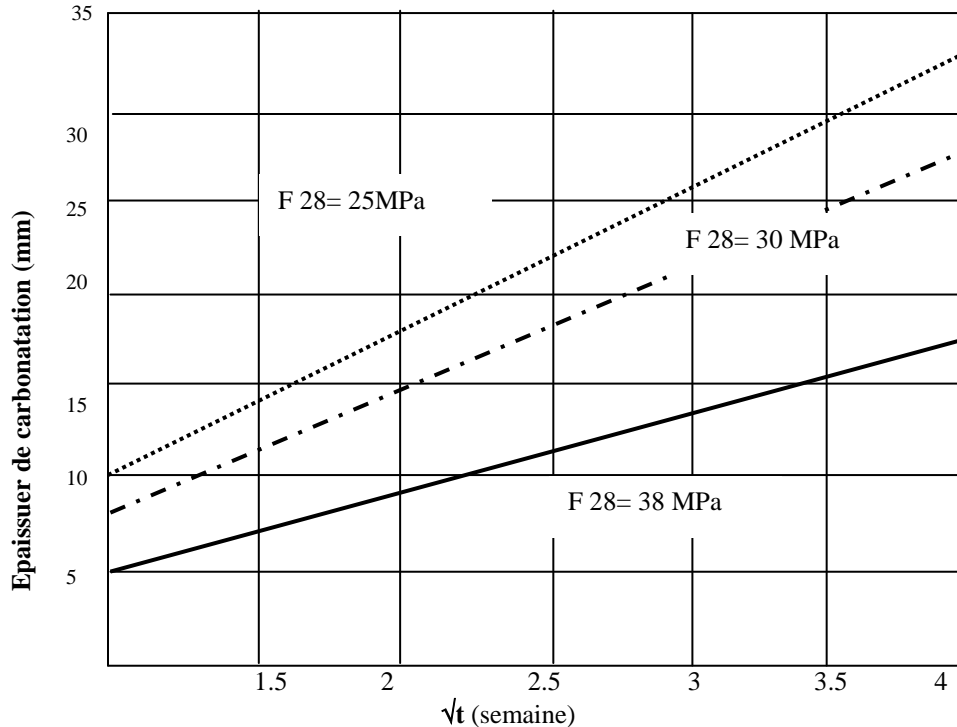


Figure 2.4 : Profondeurs de carbonatation calculées pour différents bétons à base de CEM I à l'aide du modèle développé par SAETTA et al. (1995). ( $T = 23\text{ °C}$ , H.R. = 50%,  $[\text{CO}_2] = 4\%$ ).

Ce modèle permet de simuler la carbonatation dans les angles des structures à proximité desquels sont disposées les armatures, par la prise en compte du phénomène dans un champ bidimensionnel.

## 2.4 Conclusions

Dans ce chapitre, les modèles de calcul reposant sur la loi de transport macroscopique de Fick en milieu poreux sont analysés.

Chaque modèle présente des avantages et des inconvénients liés aux hypothèses et aux paramètres d'entrées du modèle, et le choix de ces modèles se justifie par la simplicité dans l'obtention des paramètres concernés.

D'autres modèles plus complexes décrivant la diffusion du gaz carbonique à l'intérieur du béton sont proposés dans la littérature. Néanmoins, ils restent encore sans validation expérimentale et présentent certains paramètres difficiles à déterminer expérimentalement.

# **Chapitre 3**

## **L'approche probabiliste**

## Chapitre 3: L'approche probabiliste

### 3.1. Introduction

La durée de vie des ouvrages en béton est estimée des modèles de pénétration des oxydes de carbones, de la mesure du coefficient de diffusion et de la profondeur de la carbonatation.

Les modèles de durabilités actuelles, utilisent généralement des valeurs déterministes des données physiques pour les paramètres d'entrée. Le résultat obtenu, par exemple le front de pénétration des oxydes de carbones, est, par conséquent, déterministe. Cependant, ces modèles ne tiennent pas compte de la variabilité des paramètres physiques.

De ce fait, la recherche concernant la durabilité d'un béton s'est naturellement orientée vers les techniques probabilistes, qui peuvent tenir compte de l'aspect aléatoire des caractéristiques du béton et du milieu environnant. En effet, négliger cet aspect aléatoire de ces propriétés peut conduire à une sous-estimation de la sécurité des structures.

Afin de se prémunir une durabilité des ouvrages en béton, les normes ont tendance à recourir de plus en plus aux modèles probabilistes; Sachant que les milieux les plus éminents sont ceux pour lesquels la carbonatation ou la présence de chlorures est déterminante. (NGOC, 2011)

Comment prendre en compte l'incertain dans un processus prédictif ? Dans ce développement, nous allons revenir sur quelques notions statistiques préliminaires sur les variables aléatoires, puis définir le problème de base permettant de répondre à la question posée. Enfin, la méthode la plus appropriée au problème de durabilité sera détaillée.

### 3.2. Représentation générale des champs aléatoires

Un champ aléatoire homogène  $X(x)$ , où  $x$  est la variable espace, est caractérisé par les paramètres suivants (figure 3.1):

- la valeur moyenne  $\mu_x(X)$

- l'écart type de la fluctuation  $\sigma_x(X)$ , qui mesure le degré de déviation de la valeur actuelle  $X(x)$  par rapport à la valeur moyenne  $\mu_x(X)$ .

- l'ordre de fluctuation,  $\delta_u$ , qui mesure la distance dans laquelle  $X(x)$  montre une corrélation relativement grande d'un point à autre.

De faibles valeurs de  $\delta_u$ , impliquent une fluctuation rapide autour de la moyenne, alors que de larges valeurs de ce paramètre suggèrent une variation lente. La variation  $X(x)$  peut être représentée comme suit (DEGROOT et BAECHER, 1993).

$$X(x) = \mu_x(x) + \varepsilon(x) \quad (3.1)$$

Où  $\varepsilon(x)$  représente la fluctuation autour de la moyenne.

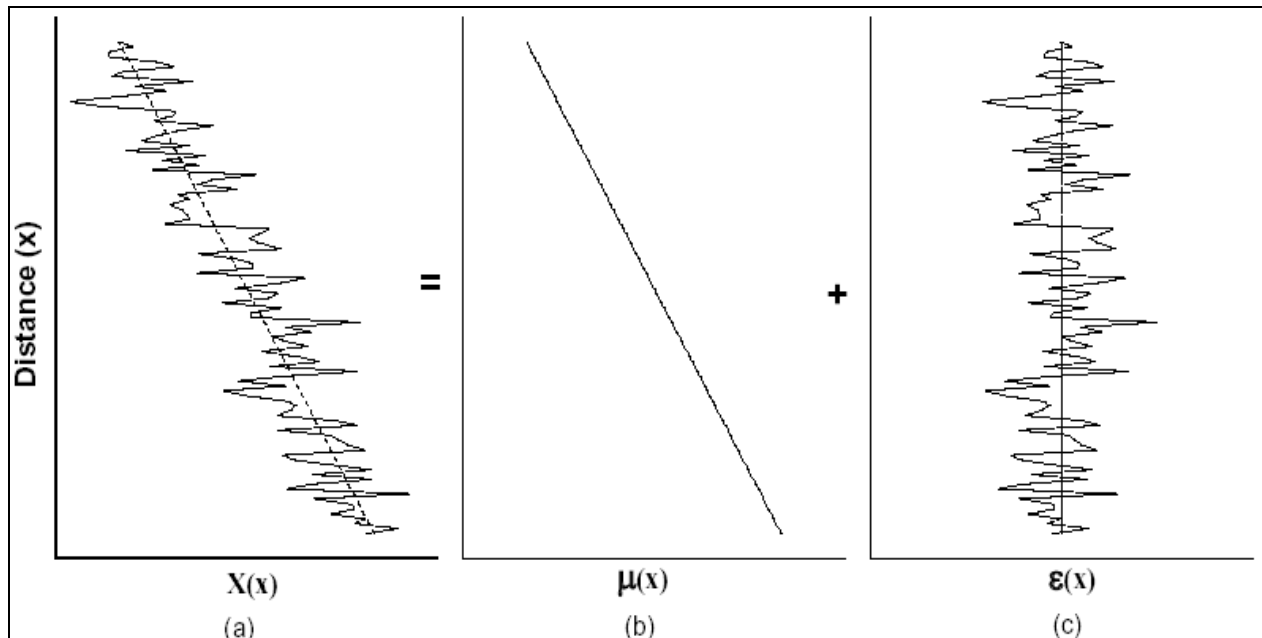


Figure 3.1 Modèle de champs aléatoire (DEGROOT et BAECHER, 1993; BADAOU, 2008).

### 3.2.1. Classification des champs aléatoires

Les champs aléatoires ont été classés sur la base des propriétés statistiques ou de la dimension du champ (VANMARCKE, 1983).

#### 3.2.1.1 Classification suivant les propriétés statistiques

Les propriétés statistiques sont des valeurs représentatives d'un champ sur la base d'un ensemble de réalisations.

La moyenne, la variance et l'auto-covariance ou la fonction de corrélation sont les propriétés statistiques les plus importantes: (PAUL et GARVEY, 1999)

La moyenne est la mesure de la tendance

$$E[X] = \mu_x \quad (3.2)$$

La variance est une mesure du décalage moyen par rapport à la tendance

$$Var[X] = E[(X - \mu_x)^2] = Var[\varepsilon(x)] = \sigma_x^2 \quad (3.3)$$

L'auto-covariance ou la fonction de corrélation décrivent les dépendances moyennes des valeurs du champ aléatoire en deux positions différentes.

$$\left\{ \begin{array}{l} Cov(X_i, X_j) = E[(X_i - \mu_{x_i})(X_j - \mu_{x_j})] \\ r(X_i, X_j) = Cov(X_i, X_j) / \sigma_{x_i} \sigma_{x_j} \end{array} \right. \quad (3.4)$$

Avec:

$E[.]$ : la moyenne ;

$Var[.]$ : la variance ;

$Cov[.]$ : la fonction d'auto-covariance ;

$r(.)$  : la fonction de corrélation ou l'auto- corrélation.

Les propriétés statistiques à un point donné dans le champ sont décrites par les équations 3.2 et 3.3, elles sont communément appelées “propriétés de point”. Alors que pour représenter les moments croisés entre deux points dans le champ on utilise ce qu'on appelle “propriétés croisées entre points”. Ces deux propriétés sont utilisés pour classer un champ comme soit homogène ou non homogène (voir les équations 3.4). (BADAOU, 2008)

### 3.2.1.2 Champ aléatoire homogène

Un champ aléatoire est dit homogène lorsque les valeurs statistiques de point sont constantes et les valeurs statistiques croisées entre points dépendent uniquement de la distance entre les points. (PAUL et GARVEY, 1999)

$$\begin{cases} E[X] = \mu_x \\ \text{Var}[X] = \sigma^2 \\ \text{Cov}(X_i, X_j) = \sigma^2 r(\xi) \end{cases} \quad (3.5)$$

$\xi$  : distance entre les deux points  $X_i$  et  $X_j$ .

Un champ est dit isotrope lorsque les propriétés croisées entre points, l'auto-covariance et la fonction de corrélation sont fonction de la valeur absolue de la distance des points,

$$\text{Cov}(X_i, X_j) = \sigma^2 r(|\xi|) \quad (3.6)$$

### 3.2.1.3. Champ aléatoire non homogène

Un champ aléatoire est dit non homogène lorsque les valeurs des propriétés statistiques de point ou croisées entre points dépendent de la position, elles sont données par: (PAUL et GARVEY, 1999; BADAOU, 2008)

$$\begin{aligned} E[X] &= E[X(x)] = \mu_x \\ \text{Var}[X] &= E[\{X(x) - \mu(x)\}^2] = \sigma^2(x) \\ \text{Cov}(\{X(x_i) - \mu(x_i)\}, \{X(x_j) - \mu(x_j)\}) &= \sigma^2 r(x_i, x_j) \end{aligned} \quad (3.7)$$

Un champ aléatoire non homogène peut être décomposé en une série de champ homogène : unidimensionnel, bidimensionnel, tridimensionnel et espace-temps.

### **3.2.2. Fonction de corrélation d'un champ aléatoire**

La fonction de corrélation est une mesure de la similitude entre les valeurs du champ en deux positions. Elle indique que les valeurs d'un champ à deux points rapprochés sont susceptibles d'être semblables, alors que les valeurs pour des points éloignés sont susceptibles d'être indépendantes.

## **3.3. Simulation d'un champ aléatoire**

### **3.3.1. Implémentation numérique**

Dans ce paragraphe, nous cherchons une manière de créer des distributions pour modéliser des données multi-variables aléatoires et corrélées. On peut construire une distribution multi-variable en indiquant des distributions uni-variables marginales, et puis choisir une structure de corrélation entre les variables.

### **3.3.2. Méthode des simulations de Monte Carlo**

Les simulations de Monte Carlo sont très utilisées dans plusieurs domaines scientifiques et sont considérées comme une méthode efficace pour les analyses concernant les milieux aléatoires (SHINOZUKA, 1972b; BADAoui, 2008).

Elles conviennent pour les cas impliquant plusieurs variables aléatoires corrélées qui sont numériquement coûteuses.

Les simulations Monte Carlo utilisent un nombre très important d'échantillons pour approcher convenablement la distribution de probabilité de la fonction étudiée. La détermination des caractéristiques stochastiques passe par le calcul d'un grand nombre de réalisations du phénomène étudié. C'est un outil mathématique capable de résoudre des problèmes qui n'ont pas de solution analytique.

SHINOZUKA et JAN (1972) ont appliqué les simulations Monte Carlo en mécanique des structures. SHINOZUKA (1974) a employé la transformée rapide de Fourier (FFT) pour une implémentation efficace de la simulation.

SHINOZUKA et LENOE (1976) ont combiné les simulations de Monte Carlo avec les éléments finis pour simuler des milieux aléatoires dans l'analyse une plaque à géométrie et matériau aléatoires. (SHINOZUKA, 1987a) a utilisé par la suite la méthode pour l'étude statique et dynamique des structures ayant des caractéristiques aléatoires des matériaux.

Le choix des distributions de probabilité pour les données aléatoires d'entrée est souvent direct, mais décider quelles dépendances devraient exister entre les entrées peut ne pas l'être, et les données d'entrée d'une simulation devraient refléter ce qui est connu de la dépendance parmi les quantités réelles à modéliser. Dans le cas où on n'a pas d'information sur la dépendance dans la simulation, il est utile d'expérimenter différentes possibilités afin de déterminer la sensibilité du modèle.

Certaines distributions multi-variables standard peuvent modéliser seulement des types très limités de corrélation. Un choix simple qui peut mener à de fausses conclusions est de réaliser des entrées indépendantes. Ces entrées peuvent être modélisées comme des variables aléatoires suivant une loi Log-normale. (BADAOU, 2008).

### **3.4. Densité de probabilité des variables aléatoires**

Choisir une distribution de probabilité d'une variable aléatoire  $X$  dépend de la nature de la connaissance disponible à propos de cette variable.

Un ensemble d'observations directes sur  $X$  par le maximum de vraisemblance (MLE) ; et un ensemble de valeurs prévues par le principe du maximum d'entropie (PME).

#### **3.4.1. Principe du maximum d'entropie**

Le choix d'une distribution de probabilité adéquate est d'une importance fondamentale dans divers domaines d'application. Le problème principal est d'établir des règles régissant le

choix d'une distribution appropriée. L'estimation de fonctions de densité de probabilité à partir d'un ensemble de réalisations requiert un grand nombre d'échantillons, qui varie de façon exponentielle par rapport à la dimension du vecteur de représentation.

Le principe du maximum d'entropie (PME) guide le choix pour le développement de distributions de probabilité capables de décrire les systèmes pour lesquels l'information suffisante est disponible.

La notion d'entropie est la mesure de la quantité d'information dans les réalisations d'une variable aléatoire, elle est utilisée dans différents domaines de façons multiples.

En 1948, SHANNON a introduit la notion d'entropie comme la moyenne de la quantité d'information apportée par les réalisations d'une variable aléatoire, donc comme une mesure de l'incertitude. JAYNES a introduit en 1951, le principe du maximum d'entropie pour la détermination d'une loi de probabilité à une variable aléatoire lorsque la connaissance sur cette variable est incomplète (BADAoui, 2008).

La probabilité d'un événement  $A \in S$  est interprétée comme une mesure de l'incertitude sur l'occurrence d'un événement à partir d'une expérience réalisée. Cette mesure ne se limite à un seul pour un événement particulier, mais pour n'importe quel événement  $A_i$  d'une partition (ou une partie) de  $S$  est notée  $H_E(A)$  et appelée "entropie". Elle est de la forme (PAPOULIS, 1991; VOLPE, 2000)

$$H_E = -K \sum_{i=1}^N P_i \ln(P_i) \quad (3.8)$$

Avec :

Ln: logarithme Népérien

$K$  : constante positive. Dans ce qui suit  $K = 1$ .

La définition de l'entropie peut être étendue au cas d'une variable aléatoire continue avec une fonction de densité de probabilité  $f(x)$  par SHANNON (BADAoui, 2008)

$$H_E(x) = - \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \ln[f(x)] dx = -E[\ln(f(x))] \quad (3.9)$$

L'entropie de SHANNON est la mesure de la quantité d'incertitude, et sa distribution liée à un évènement aléatoire. C'est une mesure d'incertitude de la distribution de probabilité déterminée uniquement par certaines règles élémentaires de cohérence logique.

L'incertitude sur les événements  $A_i$  de la partition  $U$ , mesuré par l'entropie  $H_E$  est associée aux problèmes incluant la détermination des distributions inconnues. Dans ce cas, l'information disponible est sous forme de valeurs moyennes et la solution est basée sur le principe de l'entropie maximale.(BADAOU, 2008)

### 3.4.2. Méthode du maximum d'entropie

Lorsqu'on doit attribuer une loi de probabilité à une variable  $X$ , sur laquelle on a une information partielle, il est préférable de choisir la loi d'entropie maximale parmi toutes les lois compatibles avec cette information. Le raisonnement intuitif conduisant à cette expression est que plus un évènement est rare, plus grand est le gain d'information de sa réalisation. L'utilisation du logarithme rend additif le gain total d'information obtenu par la réalisation de plusieurs évènements indépendants (MOHAMMED-DJAFARI, 1994).

Le principe qui permet de déterminer la distribution de probabilité à partir de l'entropie a été introduite en 1957 par JAYNES et a reçu le nom du principe de l'entropie maximum (BADAOU, 2008).

Considérons une variable aléatoire discrète  $X$  qui peut prendre des valeurs  $x = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  avec une distribution de probabilité  $f(x)$ . La meilleure estimation  $\hat{\Phi}$  d'une fonction  $\Phi(x)$  au sens du minimum de l'erreur quadratique moyenne est :

$$\hat{\Phi} = E[\Phi] = \int_{-\infty}^{+\infty} \Phi(x) f(x) dx \quad (3.10)$$

Comment choisir  $f(x)$  pour que l'on ait  $\widehat{\Phi} = E[\Phi]$ ? La réponse est qu'il existe, en général, plusieurs distributions qui satisfont cette contrainte.

Le principe du maximum d'entropie nous permet alors de choisir une solution. Si on ne connaît pas la fonction de densité de probabilité d'une variable aléatoire  $X$ , définie dans le domaine  $]0, \infty]$ , dont les  $N$  premiers moments associés à une série de fonctions  $g_i(x)$  ( $i = 1..N$ ), sont connus. (PAUL et GARVEY, 1999)

$$\begin{cases} J_0 = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) dx = 1 \\ J_i = E[g_i(x)] = \int_{-\infty}^{+\infty} g_i(x) f(x) dx \end{cases} \quad (3.11)$$

Ces équations sont des conditions appliquées à la fonction  $f(x)$  et sont appelées "contraintes".

Il existe une infinité de lois  $f(x)$  qui satisfont ces contraintes, la meilleure étant celle qui maximise l'entropie. Dans chaque problème, ces données  $J_i$  ( $i = 1..N$ ) peuvent avoir des interprétations physiques. Il s'agit d'ajuster la distribution de probabilité  $f(x)$  aux données.

Le principe du maximum d'entropie permet de choisir, parmi les solutions possibles, celle qui a l'entropie maximale, c'est-à-dire la loi qui satisfait toutes les contraintes et qui est la moins compromettante vis-à-vis de toute autre information non connue.

Le principe du maximum d'entropie permet de déterminer la fonction de densité de probabilité  $f(x)$  qui non seulement reproduit les statistiques observées, mais aussi n'introduit aucune autre information dans  $f(x)$ , c'est la distribution la plus neutre qui reproduit les statistiques.

Pour estimer les densités de probabilité on cherche à maximiser l'entropie qui représente l'information disponible et les statistiques des caractéristiques observées.

Les lois de probabilité usuelles sont classées par familles dépendant d'un ou de plusieurs paramètres. Elles offrent le maximum d'entropie, donc le moins d'information, sous certaines contraintes. La loi normale d'entropie maximale est parmi toutes les lois possibles ayant même moyenne et même écart type. La distribution exponentielle est celle d'entropie maximale parmi celles ayant la même moyenne.

Pour maximiser l'entropie introduisons les multiplicateurs de Lagrangiens (VOLPE, 2000), ce qui conduit à l'équation suivante d'Euler-Lagrange:

$$\left\{ \frac{\partial}{\partial f} - \frac{d}{dx} \frac{\partial}{\partial \left(\frac{df}{dx}\right)} \right\} [-f \ln(f) + \lambda_o f + \sum_{i=1}^N \lambda_i g_i(x) f] = 0 \quad (3.12)$$

Où les paramètres  $\lambda$  sont les multiplicateurs Lagrangiens.

Ceci conduit à l'équation de la fonction de densité de probabilité suivante, qui permet de maximiser l'entropie

$$f(x) = \exp[-(\lambda_o + \sum_{i=1}^N \lambda_i g_i(x))] \quad (3.13)$$

Cette fonction peut se simplifier en considérant les moments appropriés, qui correspondent aux fonctions  $g_i(x)$  puissance de  $x$ , donc les moments d'ordre  $i$  centrés sur 0.

$$g_i(x) = x^i \quad (3.14)$$

La fonction  $f(x)$  peut ainsi être donnée par l'expression

$$f(x) = e^{-\Phi(x)} \quad (3.15)$$

Où  $\Phi(x)$  est un polynôme de degré  $N$  à coefficients réels  $\lambda_i$ , donné par l'expression suivante

$$\Phi(x) = \lambda_0 + \lambda_1 x + \lambda_2 x^2 + \dots + \lambda_N x^N = \lambda_0 + \sum_{i=1}^N \lambda_i x^i \quad (3.16)$$

### 3.4.3. Propriétés de la densité de probabilité déduite de la PME

Pour éviter d'avoir des valeurs négatives de la fonction  $f(x)$ , l'ordre le plus élevé du polynôme  $\Phi(x)$  doit être pair ( $N = 2M$ ), et le coefficient correspondant doit être positif ( $\lambda_N > 0$ ). Ceci implique que les valeurs des moments ( $m_1, m_2, \dots, m_N$ ) sont physiquement réalistes.

VOLPE (2000) et VOLPE et BAGANOFF (2003) ont montré qu'il existe une relation linéaire entre les paramètres de la fonction  $f(x)$  de l'entropie maximum et ses moments. Il a été observé que la solution générée par les équations correspondantes à  $j = 0, 1, 2, \dots, N-1$  donne des paramètres acceptables si le nombre de paramètre  $\lambda_i$  est fini, ce qui nécessite des informations sur les  $2N-2$  premiers moments.

GUPTA (2005) observe, que pour des variables strictement positives, une fonction de densité de probabilité plus acceptable est obtenue pour  $j = 1, 2, 3, \dots, N$ , nécessitant la connaissance des ( $2N-1$ ) premiers moments selon le système suivant :

$$\begin{pmatrix} m_1 & 2m_2 & 3m_3 & \cdot & \cdot & \cdot & Nm_N \\ m_2 & 2m_3 & 3m_4 & \cdot & \cdot & \cdot & Nm_{N-1} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ m_N & 2m_{N+1} & 3m_{N+2} & \cdot & \cdot & \cdot & Nm_{2N-1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \lambda_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 2m_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ Nm_{N-1} \end{pmatrix} \quad (3.17)$$

Et le coefficient  $\lambda_0$  vérifie l'expression suivante

$$e^{\lambda_0} = \int_{-\infty}^{+\infty} \exp[-\sum_{i=1}^N \lambda_i x^i] dx \quad (3.18)$$

### 3.5. Probabilité de défaillance

Le risque de dégradation du béton est évalué maintenant sous la forme d'une probabilité, et les paramètres influents associées au problème sont considérés maintenant comme des variables

aléatoires. L'approche probabiliste est plus riche mais il peut conduire à de nombreuses difficultés car il faut, dans un premier temps, identifier les sources d'incertitudes, et dans un deuxième temps, leur attribuer une distribution statistique, ce qui est peu aisé.

Le but est de déterminer la probabilité qu'un évènement indésirable se produise sur une période bien définie, qui est en général l'état limite. (LEPORATI, 1977; DEHMOUS, 2007). L'atteinte de cet état limite qui définit la ruine est conditionnée par le caractère aléatoire d'une variable de « résistance »  $R$  qui représente l'enrobage du béton, et d'une variable de « sollicitation »  $S$  qui est la profondeur de pénétration des agents agressifs. Le problème consiste ainsi à estimer que les résistances soient supérieures aux sollicitations. (LEMAIRE, 2008) (DITLEVSEN et MADSEN, 1996).

Sur la figure 3.2, est représenté le domaine de ruine d'une structure et son complémentaire le domaine de sûreté. La surface d'état limite ou de défaillance représente la frontière entre ces deux domaines. Elle est exprimée par une fonction déterministe d'état limite  $G(X)$  définie dans l'espace des variables aléatoires.

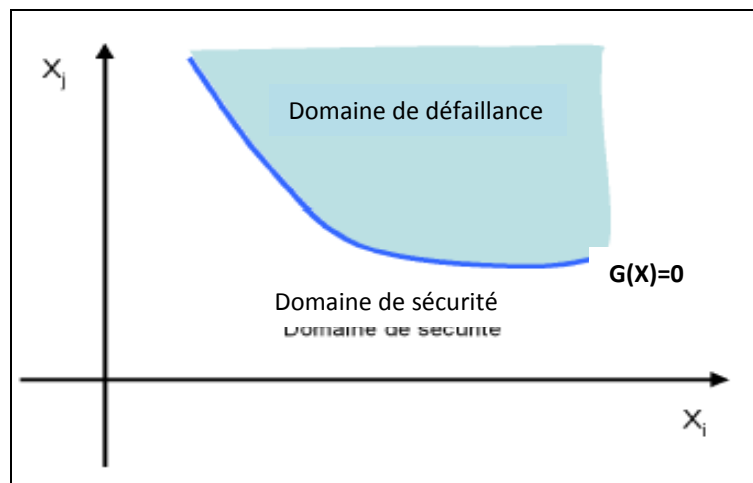


Figure. 3.2 Représentation du problème probabiliste (état limite) (DEBY, 2008).

L'équation de défaillance d'une structure s'écrit:

$$G(X) = R - S \quad (3.19)$$

L'équation  $G(X) = 0$  représente la surface d'état limite. Le domaine de sécurité est caractérisé par  $G(X) > 0$ , et le domaine de défaillance par  $G(X) \leq 0$ .

La probabilité de défaillance  $P_f$  et la fiabilité  $P_r$ , pour  $n$  variables aléatoires sont définie par:  
(LEMAIRE et CHATEAUNEUF, 2005)

$$P_f = P[G(X) \leq 0] = \int_{G(X) \leq 0} f_x(x) dx_1 \dots dx_n \quad (3.20)$$

$$P_r = 1 - P_f = P[G(X) > 0] = \int_{G(X) > 0} f_x(x) dx_1 \dots dx_n \quad (3.21)$$

Dans le domaine de la construction, la justification du dimensionnement probabiliste se fait par une fonction de probabilité cible  $P_{f \text{ cible}}$ , de faible valeurs ( $10^{-1}$  à  $10^{-4}$ ) avec un risque de défaillance acceptable. Et  $P_f$  doit vérifier donc la condition suivante: (BAROTH et al., 2011)

$$P_f = P[R \leq S] \leq P_{f \text{ cible}} \quad (3.22)$$

### 3.5.1. Comparaison entre deux simulations probabilistes et une déterministe:

L'approche déterministe donne une date fixe à partir de laquelle l'état limite est dépassé. Pour traduire le risque d'excéder cet état limite, on a recours aux techniques probabiliste, qui prennent en compte la variabilité des différents paramètres par l'intermédiaire de leurs valeurs moyenne et leur écart-type.

L'approche probabiliste nécessite l'analyse des incertitudes sur les dimensions de l'ouvrage, sur les propriétés de résistance des matériaux utilisés, sur l'action des milieux environnants et sur les modèles de calcul.

Sur la figure 3.3, sont superposées les valeurs déterminées par une approche déterministe et ceux correspondant à deux simulations probabilistes pour deux écart-types différents:  $\sigma_1$  et  $\sigma_2$ , ( $\sigma_2$

$>\sigma_1$ ). On observe que la courbe de la probabilité de défaillance est aplatis pour l'écart type le plus grand ( $\sigma_2$ ), traduisant la méconnaissance des phénomènes et donc un risque de voir se produire la défaillance plus tôt dans le temps.

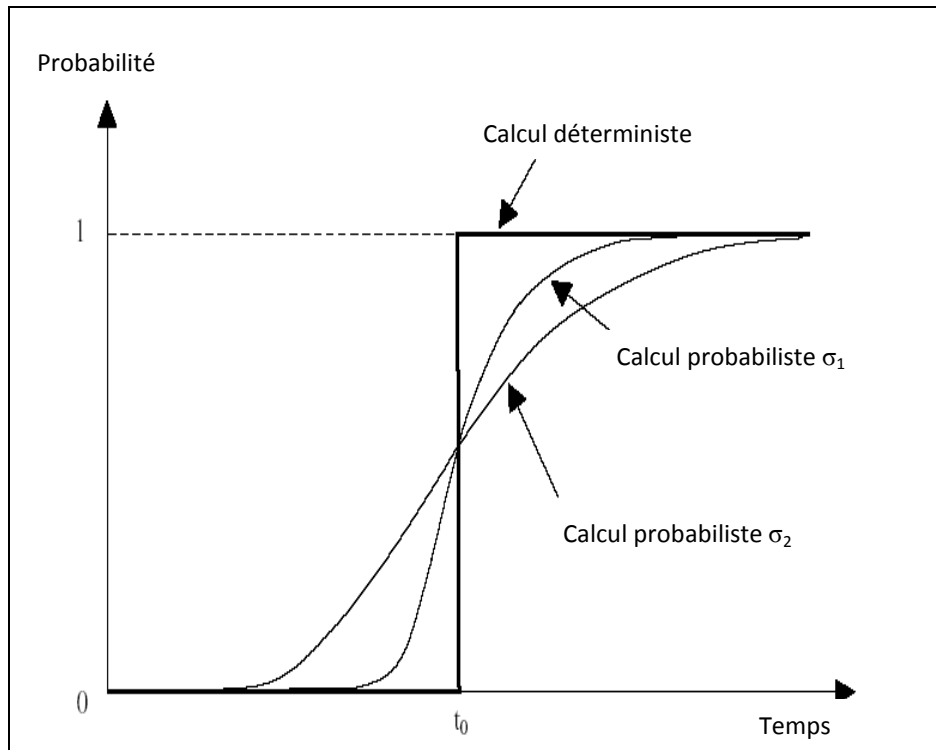


Figure 3.3 : Comparaison simulations déterministes et probabilistes (HYVERT, 2009)

### 3. 6. Lois de distribution ou de probabilité

Plusieurs expressions mathématiques peuvent définir la densité de probabilité  $f(x)$  d'une variable scalaire :

$F_X(x) = \text{Prob}(X \leq x)$  est l'intégrale sur  $]-\infty, x]$ , ou sur  $[a, x]$  si le domaine est borné inférieurement par  $a$ , de la densité de probabilité, avec  $0 \leq f_X(x) \leq 1$ ,

Les lois de probabilités usuelles pour les applications de génie civil sont les suivantes:

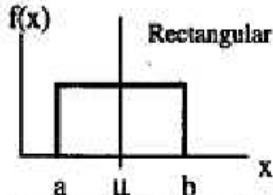
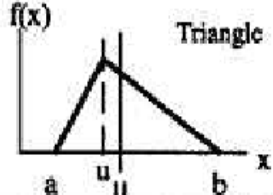
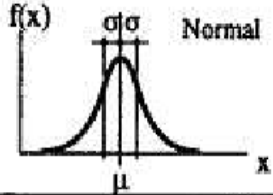
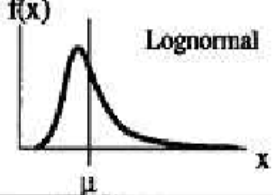
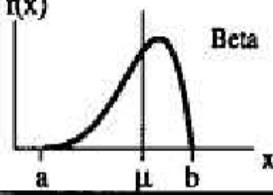
|  |   |  |   |
|--|---|--|---|
|  <p>Rectangular</p> | $-\infty < a < b < +\infty$<br>$\mu = \frac{a+b}{2}$<br>$\sigma = \frac{b-a}{\sqrt{12}}$  | $a \leq x \leq b$<br>$f(x) = \frac{1}{b-a}$<br>$F(x) = \frac{x-a}{b-a}$  |   |
|  <p>Triangle</p>    | $-\infty < a < b < +\infty$<br>$\mu = \frac{1}{3}(a+b+u)$<br>$\sigma = \sqrt{\frac{1}{18}(a^2+b^2+u^2-ab-au-bu)}$                               | $a \leq x \leq u$<br>$f(x) = \frac{2}{b-a} \left( \frac{x-a}{u-a} \right)$<br>$F(x) = \frac{x^2-2ax+a^2}{(b-a)(u-a)}$  | $u \leq x \leq b$<br>$f(x) = \frac{2}{b-a} \left( \frac{b-x}{b-u} \right)$<br>$F(x) = 1 - \frac{x^2-2bx+b^2}{(b-a)(b-u)}$ |
|  <p>Normal</p>      | $-\infty < \mu < +\infty$ $\sigma > 0$<br>$\mu$<br>$\sigma$   | $f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right)$<br>$F(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right) dx$               |   |
|  <p>Lognormal</p>  | $\lambda, \zeta$<br>$\mu = \exp\left(\lambda + \frac{\zeta^2}{2}\right)$<br>$\sigma = \mu \sqrt{\exp(\zeta^2) - 1}$                             | $f(x) = \frac{1}{\zeta x \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \lambda}{\zeta}\right)^2\right)$<br>$F(x) = \int_0^x \frac{1}{\zeta x \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \lambda}{\zeta}\right)^2\right) dx$ |   |
|  <p>Beta</p>      | $-\infty < a < b < +\infty$ $r, s \geq 1$<br>$\mu = a + (b-a) \cdot \frac{r}{r+s}$<br>$\sigma = \frac{b-a}{r+s} \sqrt{\frac{r \cdot s}{r+s+1}}$ | $f(x) = \frac{\Gamma(r+s)}{\Gamma(r) \cdot \Gamma(s)} \cdot \frac{(x-a)^{r-1} (b-x)^{s-1}}{(b-a)^{r+s-1}}$<br>$F(x) = \frac{\Gamma(r+s)}{\Gamma(r) \cdot \Gamma(s)} \cdot \int_a^x \frac{(u-a)^{r-1} (b-u)^{s-1}}{(b-a)^{r+s-1}} du$             |   |

Tableau 3.1 : Principales lois de distribution et leurs paramètres représentatifs (SCHNEIDER, 1997).

### 3.7. Méthodes de justifications de la sécurité

Les méthodes existantes de justification de la fiabilité sont les suivantes (MADSEN et al., 1986):

- **Les méthodes déterministes :**

Les résistances et les sollicitations ont des valeurs fixes, et la sécurité des ouvrages est couverte par un facteur de sécurité global.

- **Les méthodes semi-probabilistes :**

Les coefficients de sécurité sont déterminés en tenant compte des incertitudes sur les valeurs des données des modèles structuraux et aussi des valeurs représentatives des actions.

Ces méthodes sont utilisées dans les codes de calcul réglementaires.

- **Les méthodes probabilistes simplifiées:**

Elles correspondent aux analyses probabilistes introduisant l'indice de fiabilité. Les méthodes FORM (First Order Reliability Method) et SORM (Second Order Reliability Method) décrite ci-dessus sont adoptées pour calculer une probabilité de défaillance approchée.

Ces méthodes permettent d'évaluer les coefficients partiels de sécurité.

- **Les méthodes probabilistes:**

Elles sont purement probabilistes, la probabilité de défaillance est déterminée de façon exacte en calculant une intégrale multiple sur le domaine de défaillance.

Les variables aléatoires sont caractérisées par leur loi de distributions conjointes. Dans tous les cas, ces méthodes ont recours à des méthodes de type Monte-Carlo.

### **3.8. Les méthodes d'évaluation des probabilités**

#### **3.8.1. Méthodes probabilistes simplifiées**

Ces méthodes reposent sur le calcul de l'indice de fiabilité d'Hasofer-Lind. Ce sont les méthodes FORM (First Order Reliability Method) et SORM (Second Order Reliability Method) (*annexe 3*). Et la probabilité de défaillance est évaluée d'une manière approchée.

Les variables sont stochastiquement indépendantes et suivent une loi normale centrée réduite. Le passage de l'espace où les variables suivent des lois quelconques sont corrélées à l'espace standardisé est direct pour des variables normales et log-normales. (Duprat, 2007)

La détermination de la probabilité d'occurrence la plus forte de la surface d'état limite est basée sur le calcul de la valeur de l'indice de fiabilité  $\beta$ , qui représente la distance euclidienne entre l'origine du repère et le point de la surface d'état limite le plus proche. (Duprat et Sellier, 2006; Mullard et Stewart, 2004)

### 3.8.1.1 Espace réduit

Le principe des méthodes probabilistes simplifiées nécessitent de travailler dans un espace probabiliste réduit, qui transforme toutes les variables aléatoires en lois normales centrées réduites et indépendantes représenté par le vecteur  $\vec{U}$  et l'origine du repère est centrée sur les valeurs moyennes des variables réduites (figure 3.4).

La transformation  $T$  ( $\vec{U} = T(\vec{X})$ ) du vecteur  $\vec{X}$  de l'espace au vecteur  $\vec{U}$  de l'espace réduit est nécessaire pour la détermination de l'indice de fiabilité. Elle est comme suit: (DEHMOUS, 2007).

$$u_i = \Phi^{-1}[F_{X_i}(x_i)] \quad (3.23)$$

Où  $\Phi$  est la fonction de répartition de la loi normale centrée réduite qui est décrite dans la partie précédente.

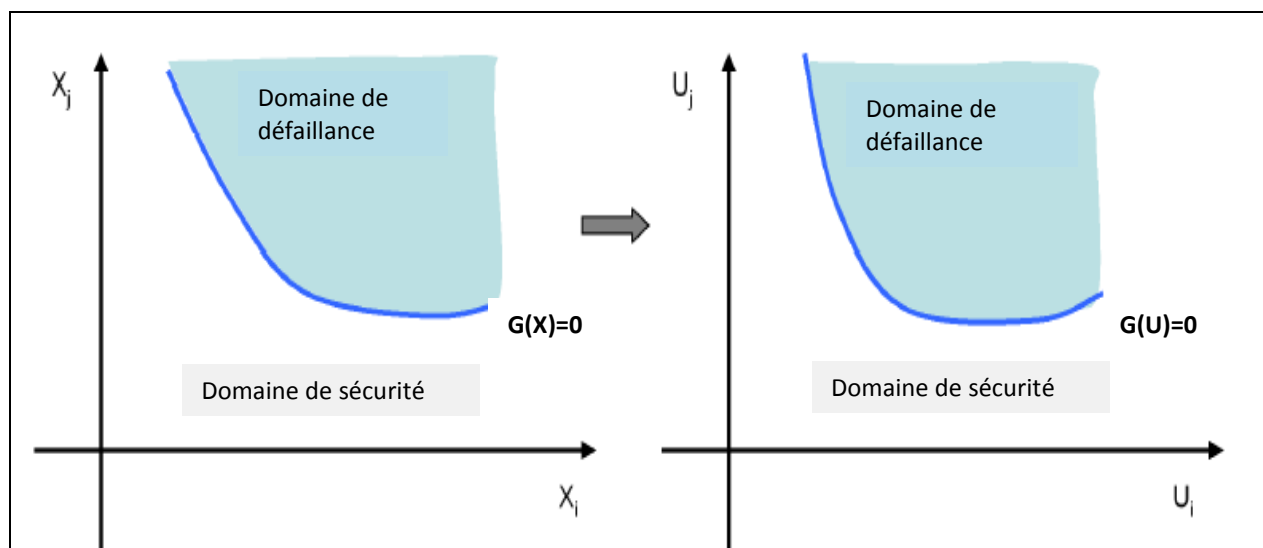


Figure. 3.4 Illustration du passage de l'espace physique à l'espace réduit (DEHMOUS, 2007).

La transformation probabiliste d'une variable aléatoire normale de moyenne  $\mu$  et d'écart-type  $\sigma$ , s'écrit:

$$x = \mu + \sigma \cdot u \quad (3.24)$$

Pour une loi log-normale de moyenne  $\mu$  et d'écart-type  $\sigma$ , la transformation est elle aussi connue et se traduit par : (DEBY, 2008)

$$x = \frac{\mu}{\sqrt{1 + \frac{\sigma^2}{\mu^2}}} \exp\left[u \sqrt{\ln\left(1 + \frac{\sigma^2}{\mu^2}\right)}\right] \quad (3.25)$$

La figure 3.5 permet la transformation de chaque valeur de  $x_i$ , en  $u_i$  associée.

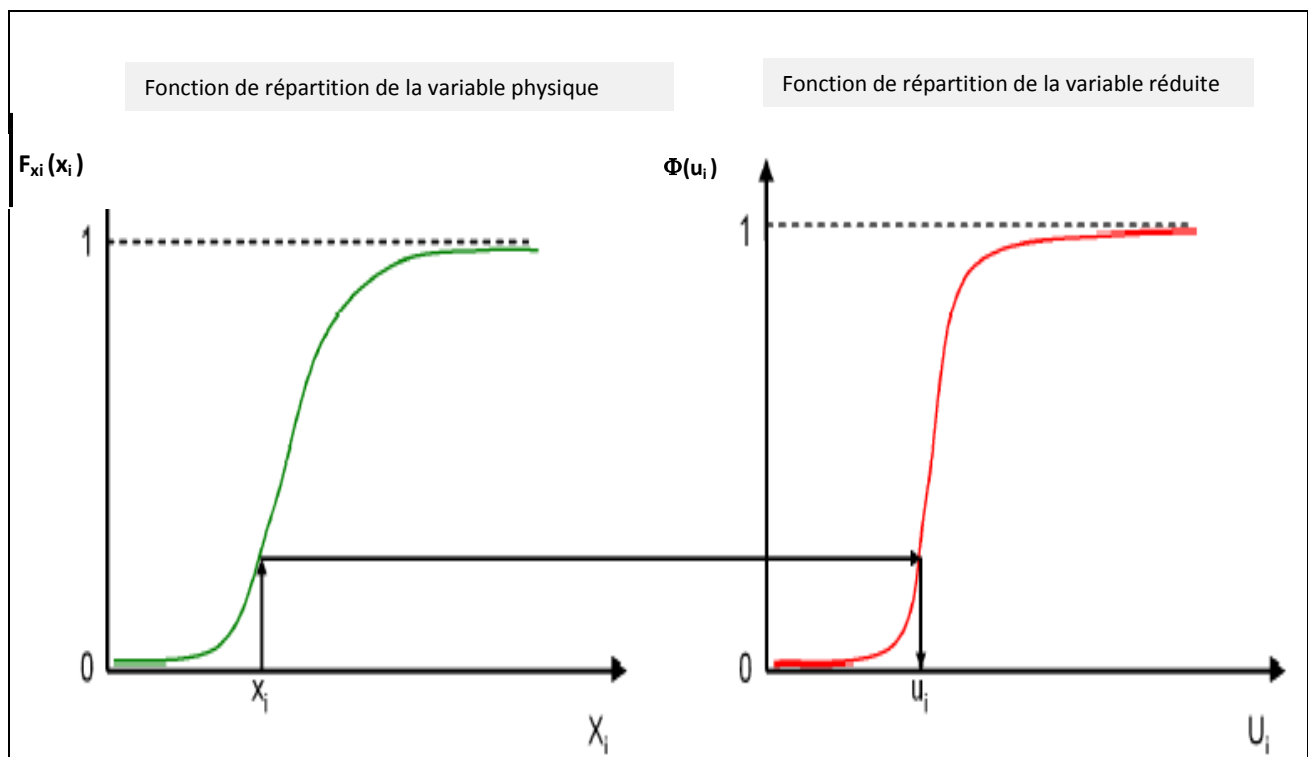


Figure. 3.5 Transformation d'une loi de distribution en loi normale centrée réduite (DEBY, 2008).

Néanmoins, si les variables sont dépendantes, une transformation préliminaire de Rosenblatt, qui exprime la répartition d'une variable conditionnellement aux autres est ajoutée, pour les rendre indépendantes, (équation 3.26). (HYVERT, 2009)

$$\begin{cases} u_i = \phi^{-1}[Fz_i(x_i)] \\ Fz_i(x_i) = FX_i(x_i / x_1, \dots, x_{i-1}) \end{cases} \quad (3.26)$$

Dans le cas où la densité de probabilité conjointe n'est pas connue, des transformations plus complexes de Nataf sont utilisées (HYVERT, 2009). La transformation des variables aléatoires en variables intermédiaires normales est réalisée selon la relation (3.26), qui vont être décorrélées pour les rendre indépendantes.

### 3.8.1.2. Indice de fiabilité

L'indice de fiabilité est un paramètre probant représentant ces approches, mieux que la probabilité de défaillance ; Ces dernières sont des quantités généralement très faibles et difficiles à prévoir. L'outil le plus approprié pour la détermination de l'indice de fiabilité d'Hasofer-Lind noté  $\beta$ , est l'algorithme de Rackwitz et Fiessler, il est basé sur la méthode du gradient projeté (LEMAIRE, 1992).

Lorsque le gradient de la fonction d'état limite n'est pas déterminé avec précision, ou pour des formes particulières de surface d'état limite, l'algorithme de Rackwitz et Fiessler ne garantit pas d'obtenir le minimum global en termes de distance. (NGUYEN, 2007).

Les méthodes SORM et FORM, permettent d'évaluer l'incidence d'une variable donnée sur la fiabilité. L'indice de fiabilité  $\beta$  permet également de mieux comparer la sécurité de deux cas simulés, il est défini comme étant la distance minimale de l'origine de l'espace réduit à un point de la surface d'état limite dit point de conception et noté  $P^*$ . Ce point correspond à la défaillance la plus probable, et à la densité de probabilité conjointe la plus forte.

Pour un indice de fiabilité faible, les coordonnées de  $P^*$  sont proches des valeurs moyennes, et la probabilité de défaillance est importante. En revanche, pour un indice de fiabilité élevé correspond à une probabilité de défaillance faible, les coordonnées du point de conception sont éloignées des valeurs moyennes des lois de distribution (figure 3.6).

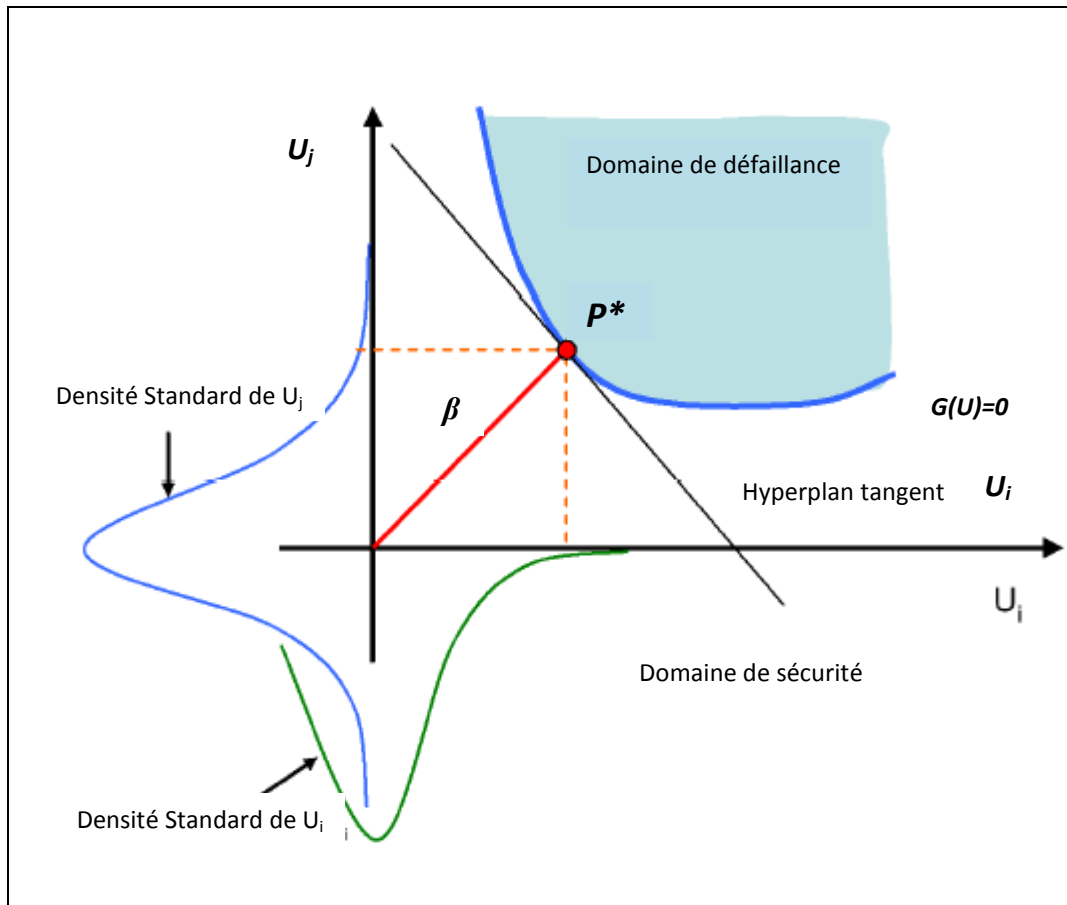


Figure. 3.6 Représentation de l'indice de fiabilité dans l'espace réduit (NGOC, 2011; DEBY, 2008).

Une probabilité de défaillance conventionnelle est associée à l'indice de fiabilité selon la fonction de répartition de loi normale suivante: (BAROTH et al., 2011).

(3.27)

$$P_f = \Phi(-\beta)$$

La correspondance est donnée sur la figure 3.7.

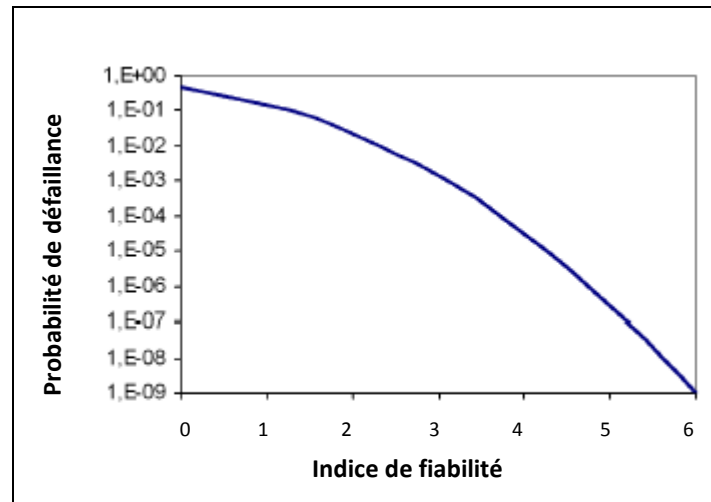


Figure. 3.7 Correspondance  $\beta$  et  $P_f$  (DEBY, 2008).

Une approximation linéaire de la surface d'état limite est procédée par la méthode FORM, qui utilise dans les calculs une probabilité conventionnelle et non pas la probabilité de défaillance, qui est aussi approximé. Ceci correspond au cas d'une surface d'état limite concave par rapport au domaine de défaillance,  $P_f$  est surestimée, tandis que si la surface est convexe,  $P_f$  est sous-estimée (figure 3.6).

La connaissance de l'indice de fiabilité  $\beta$  dans l'espace réduit des variables aléatoires, permet de calculer la probabilité de défaillance  $P_f$  et de se renseigner aussi sur le niveau de sécurité. La détermination de  $\beta$ , nécessite la recherche de la distance minimum entre l'origine du repère et la courbe d'état limite  $L_u$ : (NGUYEN, 2007)

$$\beta = \min(\vec{U}^T \vec{U})^{\frac{1}{2}}, \vec{U} \in L_u \quad (3.28)$$

La méthode couramment utilisée permettant de converger vers  $P^*$  associé à  $\beta$ , est basée sur l'algorithme de Rackwitz-Fiessler, qui est facile à utiliser, et qui donne de bons résultats. Cette méthode permet d'obtenir le point de défaillance le plus probable par itérations successives,  $k$ , lorsque la précision  $\epsilon_b$  voulue sur l'indice de fiabilité est obtenue, selon l'expression suivante: (NGUYEN, 2007 ; MAYNADIER, 2003)

(3.29)

$$|\beta_{k+1} - \beta_k| = \varepsilon_b$$

Avec :

$\beta_{k+1}$  : la norme du vecteur des variables aléatoires dans l'espace réduit  $U_{k+1}$  déduit de  $U_k$  par l'itération suivante :

$$\vec{U}_{k+1} = (\vec{U}^T \vec{\alpha}_k + \frac{G(\vec{U}_k)}{\|\nabla G(\vec{U}_k)\|}) \vec{\alpha}_k \quad (3.30)$$

$\vec{\alpha}_k$  : vecteur unitaire normal à la surface définie par:  $G(\vec{U}) = G(\vec{U}_k)$ , parallèle au gradient de la fonction d'état limite  $\nabla G(\vec{U}_k)$  :

$$\vec{\alpha}_k = -\frac{\nabla G(\vec{U}_k)}{\|\nabla G(\vec{U}_k)\|} \quad (3.31)$$

Le calcul du gradient se fait en premier lieu dans l'espace physique, pour revenir ensuite dans l'espace réduit par les transformations probabilistes. Tandis que la fonction d'état limite est définie dans l'espace physique seule.

L'utilisation de l'indice de fiabilité est convenable à l'étude de l'influence d'une variable, puisque les probabilités de défaillance sont des grandeurs très faibles et difficiles à comparer (de  $10^{-4}$  à  $10^{-8}$ ). De ce fait, la détermination de l'indice  $\beta$ , est basée sur l'évaluation de  $P_f$  par des méthodes probabilistes, utilisant des tirages conditionnés au voisinage de  $P^*$  (SELLIER, 1995),

### 3.8.2. Méthodes probabilistes:

Les méthodes probabilistes sont utilisées dans le cas où, une détermination plus précise de la probabilité de défaillance est exigée. Elles sont basée sur le calcul de l'intégrale (3.20), à l'aide des simulations de Monte Carlo, et par un tirage pseudo-aléatoires des variables, qui permet

d'estimer la probabilité de défaillance pour chaque réalisation de  $\mathbf{X}$ . Lorsque le nombre de simulations  $N_{sim}$  devient infini, Le résultat devient exact (figure 3.8): (PAUL et GARVEY, 1999)

$$P_f \approx \frac{N[G(\mathbf{X}) \leq 0]}{N_{Sim}} \quad (3.32)$$

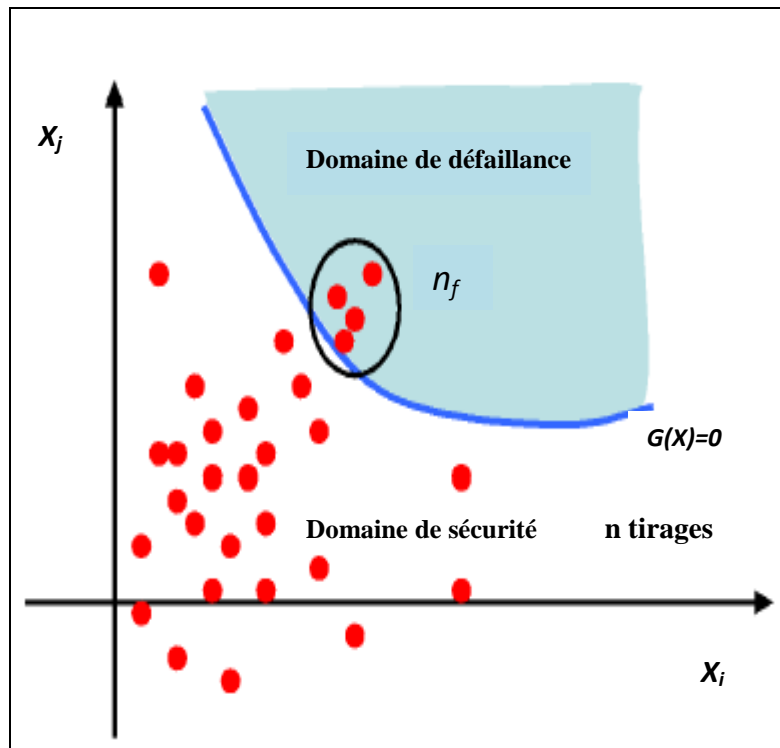


Figure. 3.8 Illustration de la méthode de Monte-Carlo (DEHMOUS, 2007).

La méthode de Monte Carlo est facile à implémenter, elle ne pose pas de contraintes sur les lois des variables aléatoires. L'inconvénient de cette méthode est qu'elle converge lentement, et présente une variance importante si le nombre de simulations n'est pas assez grand. De plus, une réalisation de  $3/P_f$  simulations, permettent d'obtenir un niveau de confiance de 95% sur  $P_f$ , soit par exemple 30000 simulations pour  $P_f = 10^{-4}$ .

Pour limiter le domaine balayé par les tirages de la méthode de Monte-Carlo, une concentration des tirages autour du point de défaillance le plus probable doit être réalisé, ce qui permet de réduire le coût numériques des estimations de  $P_f$ , qui est de l'ordre de  $10^{-5}$  à  $10^{-6}$ .

### 3.9. Contexte normatif et fiabilité « Norme NA 16002 au service de la durabilité des ouvrages »

Cette norme est relative à la fabrication de béton prêt à l'emploi fabriqué en usine. Elle impose des règles strictes à respecter pour la pérennité des ouvrages. Ces règles concernent la durabilité des bétons en fonction du milieu environnant.

La norme algérienne NA16002 (2004) est équivalente à la norme française des produits préfabriqués de structure EN 206-1, permettant d'optimiser la durabilité des ouvrages.

La norme NA 16002 définit six classes d'exposition à partir de l'agressivité de l'environnement vis-à-vis des armatures en béton. Ces classes d'exposition sont détaillées dans le tableau 3.2 suivant :

| Désignation de la classe | Classes d'exposition en fonction des conditions de l'environnement |
|--------------------------|--|
| X0                       | Aucun risque de corrosion, ni d'attaque                            |
| XC                       | Corrosion induite par carbonatation (XC1 à XC4)                    |
| XD                       | Corrosion induite par les chlorures (XD1 à XD3)                    |
| XS                       | Corrosion induite par les chlorures dans l'eau de mer (XS1 à XS3)  |
| XF                       | Attaque gel /dégel (XF1 à XF4)                                     |
| XA                       | Attaque chimique (XA1 à XA3)                                       |

Tableau 3.2 : Classes d'exposition de la norme NA 16002.

Les structures en béton peuvent être soumises simultanément à plusieurs types d'action environnementale, et l'identification des caractéristiques de l'environnement, permet de connaître

le type d'agression auquel sera soumis le béton. Dans ce cas, il est nécessaire de combiner les exigences de plusieurs classes d'exposition.

Des dispositions constructives relatives à l'enrobage des armatures doivent être respectées, pour satisfaire les exigences de durabilité pendant toute la durée d'utilisation de l'ouvrage.

Pour cela, la classe de résistance du béton, la nature des armatures et leurs positionnements, la durée de service attendue et la classe d'exposition dans laquelle se trouve l'ouvrage doivent être prise en compte. Et l'enrobage minimal permet de garantir la bonne transmission des forces d'adhérence, la protection de l'acier contre la corrosion (durabilité) et une résistance au feu convenable.

### **3.10. Conclusions**

L'application et la représentativité des méthodes probabilistes ainsi que la qualité des résultats générés sont grandement influencé par la modélisation de l'incertain.

Actuellement les calculs des probabilités de défaillances sont basées sur les méthodes probabilistes simplifiées de type FORM, qui permettent d'évaluer ces probabilité à partir de l'indice de fiabilité, pour des temps de calcul modérés. Cet indice est suffisant pour estimer la probabilité, et mettre en évidence l'importance de la variable aléatoire.

La méthode de Monte-Carlo utilisée par les approches purement probabilistes est facile à implémenter, elle ne pose pas de contraintes sur les lois des variables aléatoires. L'inconvénient de cette méthode est qu'elle converge lentement, et présente une variance importante si le nombre de simulations n'est pas assez grand. Cette approche est appropriée dans le cas où l'on voudrait approcher le niveau de risque de façon précise.

Le calcul de l'indice de fiabilité  $\beta$  est susceptible d'induire des erreurs si l'algorithme converge vers un minimum local, et l'utilisation des différentes méthodes permet de comparer les résultats afin d'optimiser la durabilité des ouvrages en béton armé, les normes incitent l'utilisation de l'approche probabiliste simplifié, pour justifier le choix de la conception.

# **Chapitre 4**

## **Investigation statistique de la carbonatation du béton**

## Chapitre 4: Investigation statistique de la carbonatation du béton

### 4.1 Introduction

Le présent chapitre concerne l'étude probabiliste de la carbonatation unidirectionnelle des bétons ayant des caractéristiques aléatoires. C'est une application de la théorie probabiliste présentée dans le chapitre 3 aux bétons. La variabilité spatiale des propriétés du béton est considérée uniquement dans la direction verticale.

Dans cette étude, les statistiques correspondant à la profondeur de carbonatation et au temps nécessaire pour que cette profondeur atteigne l'acier sont étudiés, en réalisant une étude paramétrique qui intègre l'influence des coefficients de variation du rapport eau/ciment, de l'humidité relative et du gaz carbonique sur la profondeur et le temps de carbonatation, modélisés ici comme des variables aléatoires indépendantes strictement positives permettant d'analyser de grandes variabilités du milieu, en adoptant une distribution log-normale.

### 4.2. Investigation probabiliste de la carbonatation

#### 4.2.1 Variabilités du rapport eau /ciment ( $E/C$ ), d'humidité relative ( $HR$ ) et du gaz carbonique ( $C_s$ )

La variation des propriétés mécaniques du béton peut être caractérisée en détail, mais seulement si un grand nombre de données est disponible. Dans la pratique, le nombre d'essais indispensables excède de beaucoup ce qui serait nécessaire. De ce fait, apparaît le besoin de simulations numériques pour obtenir des données nécessaires à l'étude. Ainsi, la variabilité des propriétés de béton est décomposée en un terme déterministe, et une composante aléatoire décrivant la variabilité autour de ce terme (VANMARCKE, 1983; FENTON, 1990).

Dans la présente étude, les paramètres choisies sont le rapport eau /ciment, l'humidité relative et le gaz carbonique. Ces paramètres sont modélisés comme des champs aléatoires définis par leurs moments d'ordre 1 et 2, qui sont respectivement la moyenne et la variance, supposés déterminées à partir des échantillons in situ. Le rapport eau /ciment, l'humidité relative et le gaz

carbonique sont supposés suivre des distributions log- normales, parce que cette distribution convient pour des variables aléatoires strictement non négatives. En outre, réaliser des simulations en considérant une distribution normale, peut conduire à des valeurs négatives des propriétés considérées de béton pour de grandes valeurs du coefficient de variation. La distribution log- normale a une relation simple avec la distribution normale, ce qui est important en cas de simulation pour l'analyse de milieux hétérogènes avec de larges variabilités (NOUR et al., 2002). Parce qu'en pratique il n'y a pas d'information concernant la dépendance entre les propriétés du béton, l'indépendance statistique entre le rapport eau / ciment, l'humidité relative et le gaz carbonique sera supposée.

Les paramètres de la distribution log-normal de  $E/C$ ,  $HR$  et  $Cs$  sont donnés par

$$\sigma_{\ln HR}^2 = \ln\left(1 + \frac{\sigma_{HR}^2}{\mu_{HR}^2}\right) \quad \text{et} \quad \mu_{\ln HR} = \ln(\mu_{HR}) - \frac{1}{2}\sigma_{\ln HR}^2 \quad (4.1)$$

$$\sigma_{\ln E/C}^2 = \ln\left(1 + \frac{\sigma_{E/C}^2}{\mu_{E/C}^2}\right) \quad \text{et} \quad \mu_{\ln E/C} = \ln(\mu_{E/C}) - \frac{1}{2}\sigma_{\ln E/C}^2 \quad (4.2)$$

$$\sigma_{\ln Cs}^2 = \ln\left(1 + \frac{\sigma_{Cs}^2}{\mu_{Cs}^2}\right) \quad \text{et} \quad \mu_{\ln Cs} = \ln(\mu_{Cs}) - \frac{1}{2}\sigma_{\ln Cs}^2 \quad (4.3)$$

Où  $(\mu_{HR}, \sigma_{HR}^2)$ ,  $(\mu_{E/C}, \sigma_{E/C}^2)$  et  $(\mu_{Cs}, \sigma_{Cs}^2)$  sont respectivement, la moyenne et la variance du rapport eau /ciment, l'humidité relative et le gaz carbonique.

#### 4.2.2 Implémentation numérique des simulations

Les champs aléatoires pour le rapport eau /ciment, l'humidité relative et le gaz carbonique sont générés en utilisant la méthode de la simulation de Monte Carlo. Cette méthode consiste en :

- la simulation d'un certain nombre de réalisations probabilistes des paramètres cités;
- le calcul de la profondeur de carbonatation et du temps correspondant, via un calcul déterministe pour chaque réalisation;
- le traitement statistique des résultats obtenus;

L'aspect unidimensionnel du problème est supposé, impliquant que sa composante verticale est prépondérante. Ainsi, seule est considérée la variabilité spatiale des paramètres qui influence sur le béton dans la direction  $z$ . Dans le plan ( $x$ -  $y$ ), les propriétés du béton sont supposés invariants, interprétés comme une moyenne sur ce plan ou ayant une longueur de corrélation infinie (BADAOU, 2008). Ainsi, nous traitons de l'analyse probabiliste de la carbonatation avec des paramètres stochastiques des données de béton obtenus par des simulations numériques, en utilisant une méthode numérique déterministe permettant d'obtenir la profondeur et le temps de carbonatation pour chaque réalisation.

### 4.3 Application numérique

Dans cette section, nous analysons en utilisant la procédure décrite ci- dessus, la carbonatation dans un milieu hétérogène, ainsi la variabilité spatiale vis- à- vis du rapport eau /ciment, d'humidité relative et du gaz carbonique est considérée uniquement dans la direction verticale.

#### 4.3.1 Matériaux de l'étude

Les caractéristiques du béton considéré sont :

- Un ciment portland CEM I 52.5 R, d'une composition chimique représentée sur le tableau 4.1

| SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO    | K <sub>2</sub> O | Na <sub>2</sub> O | SO <sub>3</sub> | MgO  |
|------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------|------------------|-------------------|-----------------|------|
| 22%              | 5.02%                          | 2.94%                          | 64.36% | 0.47%            | 0.26%             | 1.94%           | 2.07 |

Tableau4.1 : Composition chimique du ciment portland CEM I 52.5 R.

- Un enrobage :  $d=3cm$
- Un rapport Granulats/Ciment= 5
- Un rapport Eau /Ciment=0.5

La composition du béton traditionnel d'usine étudié est donnée dans le tableau 4.2 :

| Paramètre                              | Valeur                 |
|--|------------------------|
| Ciment                                 | 365 Kg/m <sup>3</sup>  |
| Granulats                              | 1850 Kg/m <sup>3</sup> |
| Eau                                    | 182 Kg/m <sup>3</sup>  |
| Cure thermique (refroidissement libre) | 6H à 60°C              |
| Durée de cure                          | 1 jour                 |

Tableau 4.2 : Composition du béton traditionnel.

On considère que ce béton est situé à l'intérieur d'un bâtiment où le taux d'humidité de l'air ambiant est moyen ou élevé. Il est donc soumis à la classe d'exposition XC3, dont les valeurs numériques pour les paramètres de composition sont identiques à celles de la classe XF1 (NA 16002, 2004; EN 206-1, 2004). Le tableau 4.3 montre ces différentes valeurs et les valeurs prises dans notre étude.

| Paramètres de composition                        | bétons de la classe d'exposition XC3 | béton étudié               |
|--|--------------------------------------|----------------------------|
| Rapport Eau / (Liant équivalent)                 | 0.6 (maximal)                        | 0.5                        |
| Classe de résistance                             | C25/30 (minimal)                     | 35MPa (résistance moyenne) |
| Teneur en liant équivalent (Kg /m <sup>3</sup> ) | 280(minimal)                         | 365                        |

Tableau 4.3: Comparaison entre la composition des bétons de la classe d'exposition XC3 et du béton étudié.

Le béton contient des armatures, il fait partie de la classe structurale S4 donnée par la norme française EN10080 (2005). Cette classe est utilisée pour une durée de vie conventionnelle de 50 ans pour les ouvrages de génie civil et les bâtiments.

Pour cette classe structurale S4 et la classe d'exposition XC3, l'enrobage minimal ( $C_{\min}$ , dur) est égal à 25 mm (EN10080, 2005). Par ailleurs, la valeur moyenne de l'enrobage nominal est donnée par l'équation (4.4) :

$$C_{\text{nom}} = C_{\text{min}} + \Delta C_{\text{dev}} \quad (4.4)$$

Avec:

$\Delta C_{dev}$  : est l'écart type de l'enrobage, sa marge est :  $0 \text{ mm} \leq \Delta C_{dev} \leq 10 \text{ mm}$  (HYVERT et al., 2008)

On prend  $\Delta C_{dev}$  égal à 5 mm et la valeur moyenne de l'enrobage nominal est donc égale à 30 mm.

### 4.3.2 Résultats et analyse

Le modèle déterministe simplifié issu du projet européen Duracrete (DURACRETE, 2000) et du code modèle de la FIB (FIB, 2006), est choisi pour le calcul de la profondeur de la carbonatation  $X_c$ , et le temps nécessaire  $T_I$  pour que le front de carbonatation parvienne jusqu'à l'armature via des simulations de Monte Carlo.

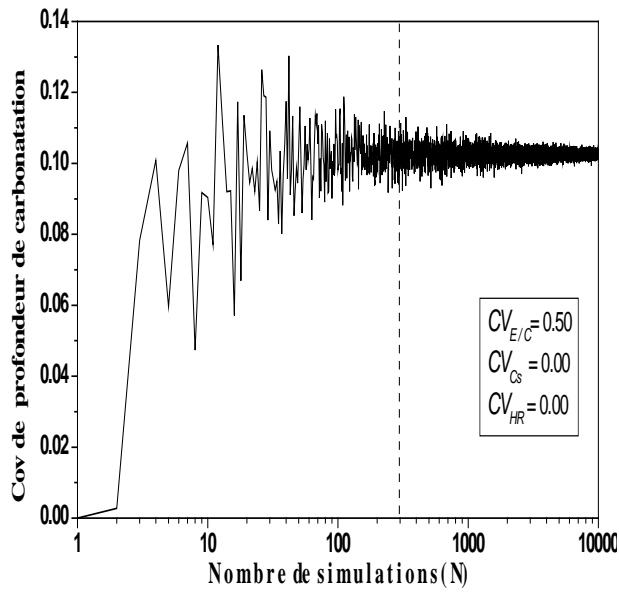
Les paramètres considérés comme aléatoires avec une distribution log-normale sont :

- Le rapport eau /ciment ( $E/C$ ) avec une valeur moyenne  $\mu_{E/C}=0.5$
- L'humidité relative ( $HR$ ) avec une valeur moyenne  $\mu_{HR}=0.65$
- La pression du gaz carbonique avec une valeur moyenne ( $C_s$ )  $\mu_{C_s}=0.61 \text{ Kg/m}^3$

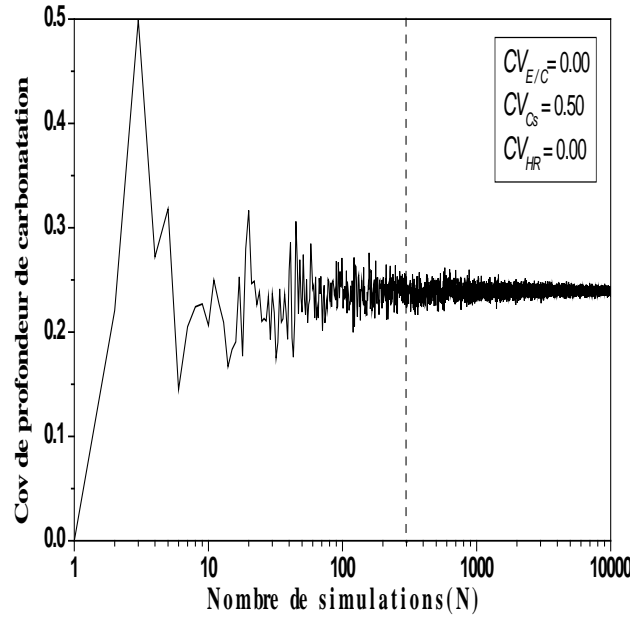
Il est indiqué dans la littérature que l'intervalle de la variabilité du rapport eau /ciment ( $Cv_{E/C}$ ) varie de zéro à 0.5, le coefficient de variation de l'humidité relative ( $Cv_{HR}$ ) est entre zéro et 0.1. Ainsi, le coefficient de variation de la pression du gaz carbonique  $\text{CO}_2$  ( $Cv_{C_s}$ ) varie aussi de zéro à 0.5 (FIB, 2006; CHOUDHURY, 2002; THOFT-CHRISTENSEN, 2000)

Il est important de noter que les statistiques (moyenne  $\mu$  et écart type  $\sigma$ ) de la profondeur et du temps de carbonatation sont évaluées à partir de l'étude de 10000 échantillons simulés, donnant 10000 valeurs de la profondeur de carbonatation et du temps correspondant, en réalisant une étude paramétrique, qui intègre l'influence du coefficient de variation du rapport eau /ciment, de l'humidité relative et de la pression de gaz carbonique  $\text{CO}_2$ .

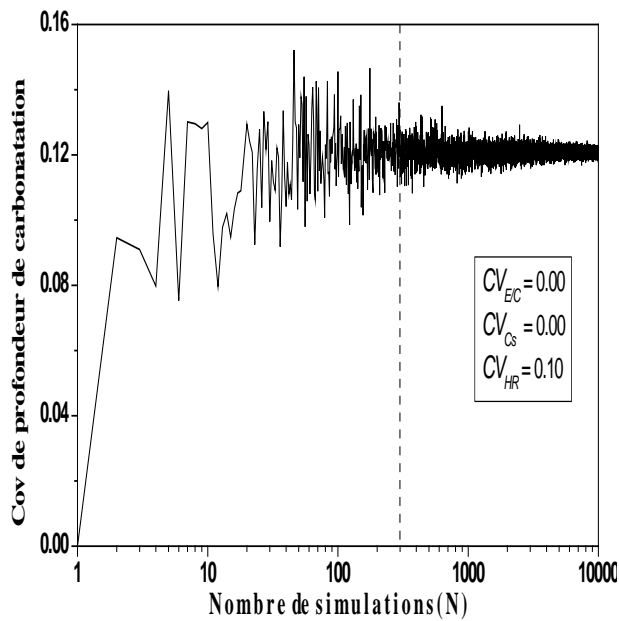
Les Figures 4.1 et 4.2 montrent les profondeurs de carbonatation simulées, ainsi que les temps correspondants par rapport aux coefficients de  $E/C$ ,  $C_s$  et  $HR$ .



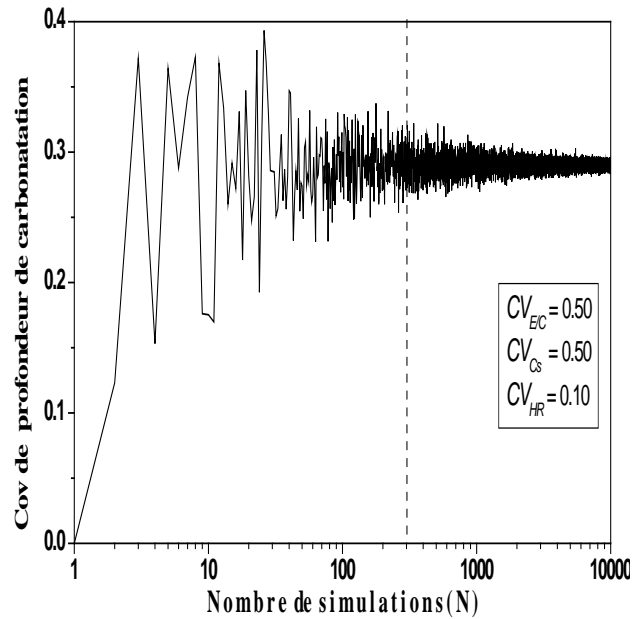
(a). Profondeur de carbonatation par rapport au coefficient de variation de  $E/C$ .



(b). Profondeur de carbonatation par rapport au coefficient de variation de  $C_s$ .

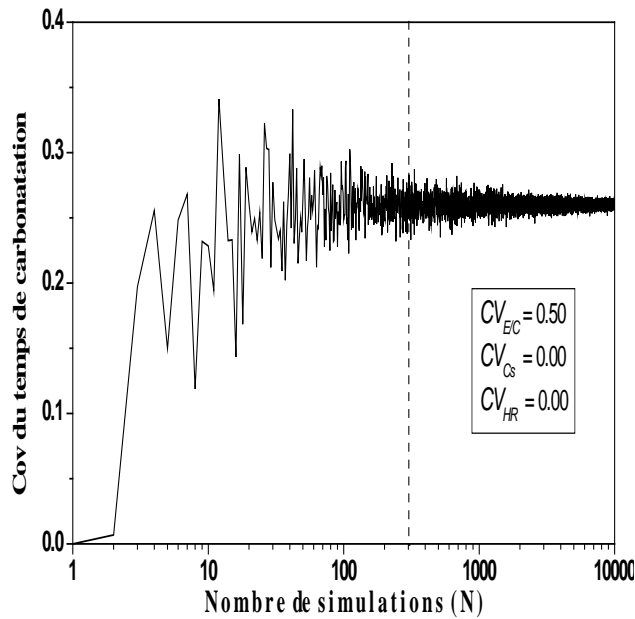


(c). Profondeur de carbonatation par rapport au coefficient de variation de  $HR$ .

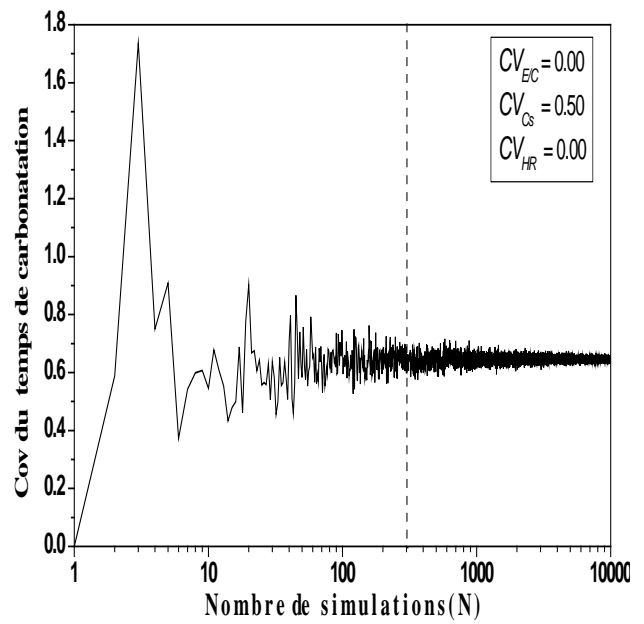


(d). Profondeur de carbonatation par rapport au coefficient de variation de  $E/C$ ,  $C_s$  et  $HR$ .

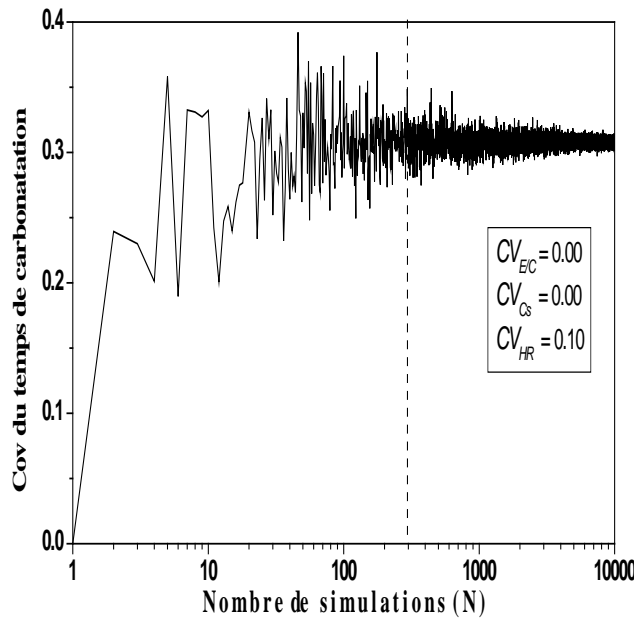
Figure 4.1. Profondeur de carbonatation par rapport aux coefficients de  $E/C$ ,  $C_s$  et  $HR$



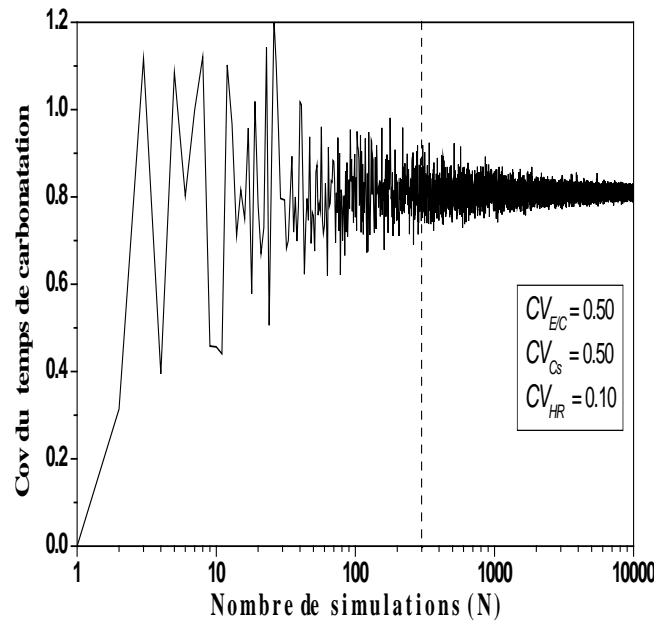
(a). Temps de carbonatation par rapport au coefficient de variation de  $E/C$ .



(b). Temps de carbonatation par rapport au coefficient de variation de  $C_s$ .



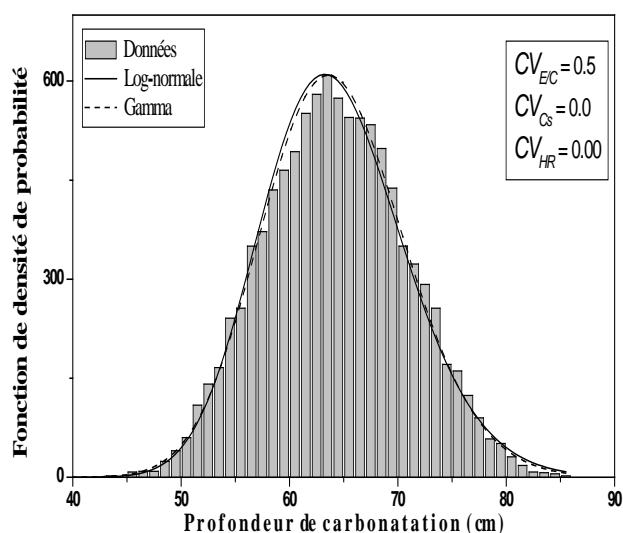
(c). Temps de carbonatation par rapport au coefficient de variation de  $HR$ .



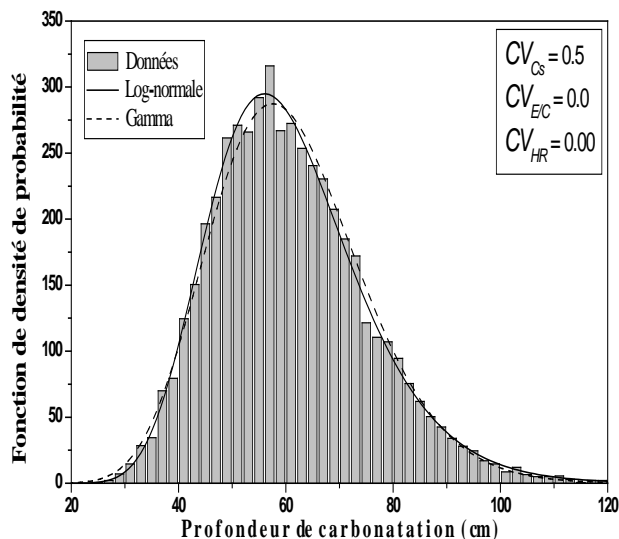
(d). Temps de carbonatation par rapport au coefficient de variation de  $E/C$ ,  $C_s$  et  $HR$ .

Figure.4.2 Temps de carbonatation par rapport au coefficient de variation de  $E/C$ ,  $C_s$  et  $HR$ .

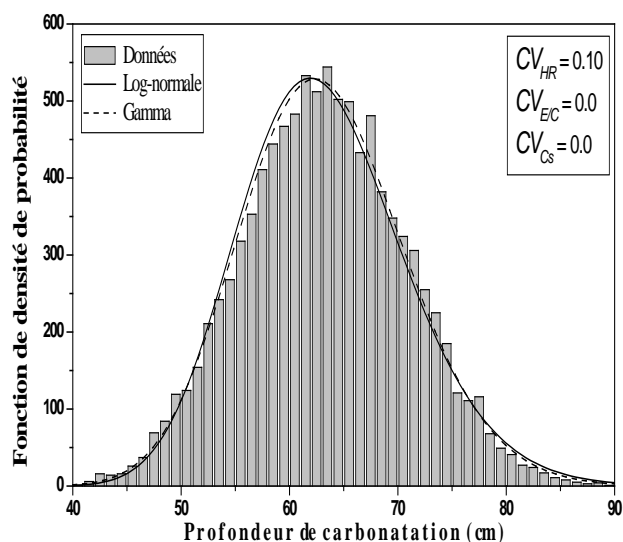
Dans le but de déterminer les statistiques, comme illustré par les Figures 4.3 et 4.4, des histogrammes correspondants aux cas de la profondeur de carbonatation et du temps nécessaire pour que le front de carbonatation parvienne jusqu'à l'armature sont tracés.



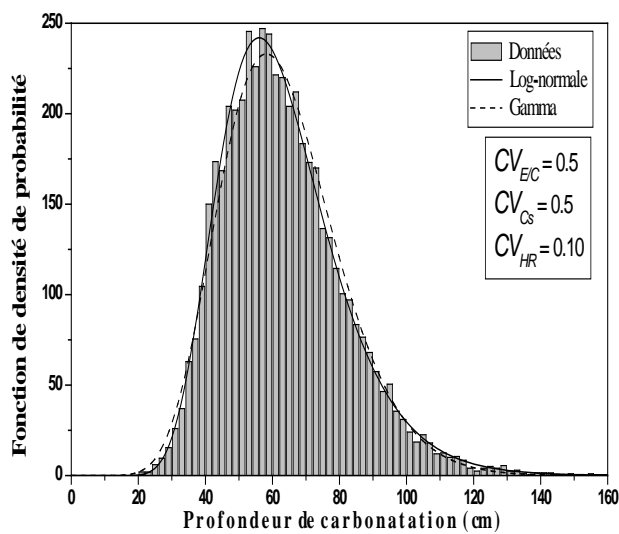
(a). Fonction de densité de probabilité de la profondeur de carbonatation par rapport à  $E/C$ .



(b). Fonction de densité de probabilité de la profondeur de carbonatation par rapport à  $C_s$

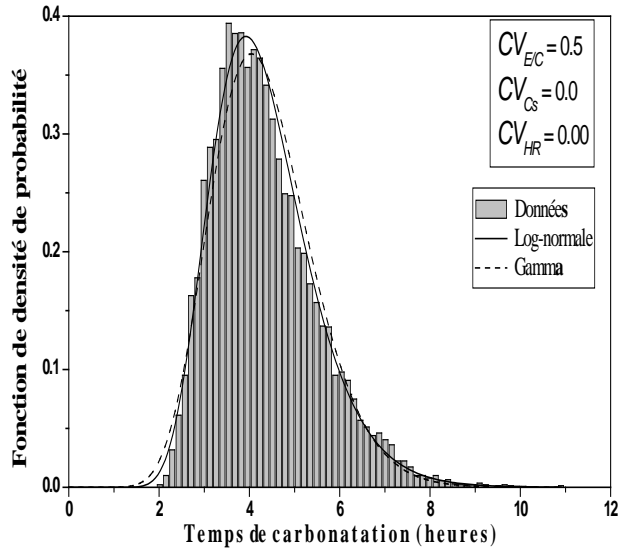


(c). Fonction de densité de probabilité de la profondeur de carbonatation par rapport à  $HR$ .

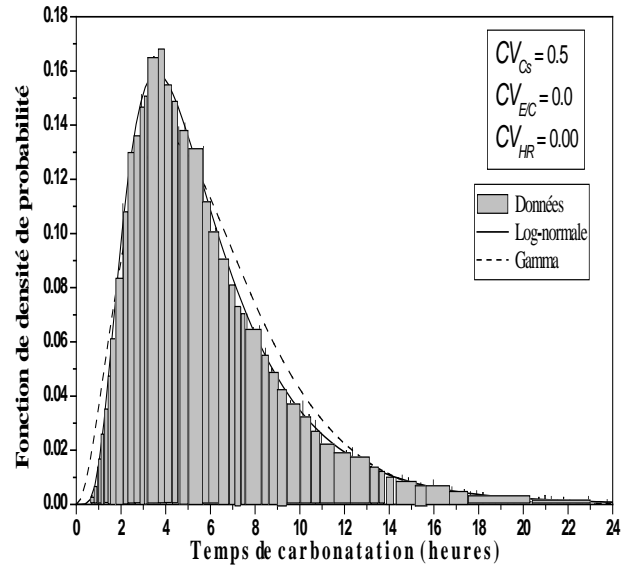


(d). Fonction de densité de probabilité de la profondeur de carbonatation par rapport à  $E/C$ ,  $HR$  et  $C_s$ .

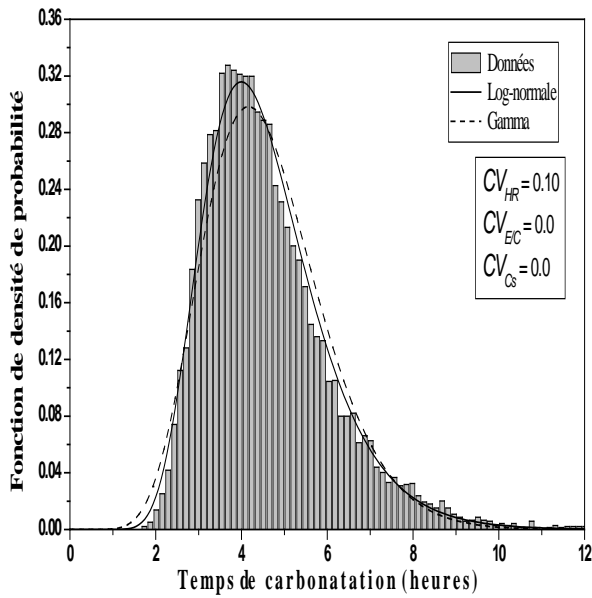
Figure 4.3: Fonctions des densités de probabilités de la profondeur de carbonatation par rapport à  $E/C$ ,  $C_s$  et  $HR$ .



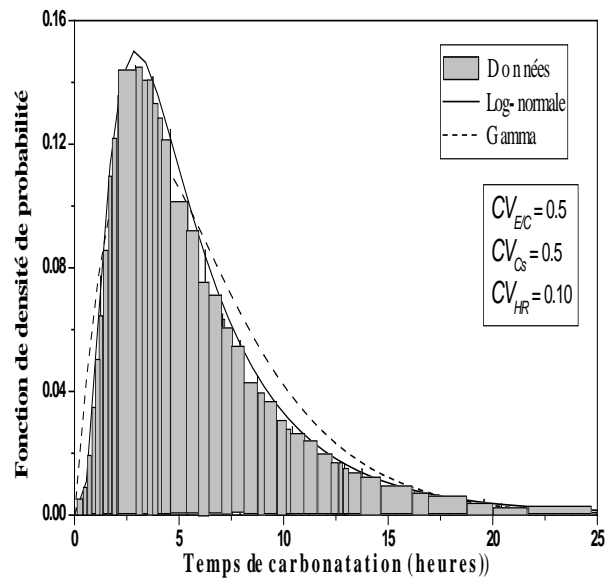
(a). Fonction de densité de probabilité du temps de carbonatation par rapport à  $E/C$ .



(b). Fonction de densité de probabilité du temps de carbonatation par rapport à  $C_s$ .



(c). Fonction de densité de probabilité du temps de carbonatation par rapport à  $HR$ .



(d). Fonction de densité de probabilité du temps de carbonatation par rapport à  $E/C$ ,  $HR$  et  $C_s$

Figure 4.4: Fonctions des densités de probabilités du temps carbonatation par rapport à  $E/C$ ,  $C_s$  et  $HR$ .

La forme des histogrammes suggère une distribution Log-normale qui est adoptée dans cette étude. Sur l'histogramme, sont superposées les valeurs déterminées dans la présente étude et ceux correspondant à la distribution Log- normale et la distribution Gamma (BADAoui et al, 2012).

#### 4.4 Conclusions

Dans ce chapitre, la carbonatation unidirectionnelle des bétons hétérogènes aléatoires est analysée. Les propriétés considérées sont le rapport eau/ciment, l'humidité relative et le gaz carbonique, modélisés comme variables aléatoires indépendantes.

Les statistiques (moyenne  $\mu$  et écart type  $\sigma$ ) de la profondeur et du temps de carbonatation sont évaluées à partir de l'étude de 10000 échantillons simulés, donnant 10000 valeurs de la profondeur de carbonatation et du temps correspondant, en réalisant une étude paramétrique, qui intègre l'influence du coefficient de variation du rapport eau /ciment, de l'humidité relative et de la pression de gaz carbonique  $CO_2$ . Ensuite les histogrammes correspondants aux cas de la profondeur de carbonatation et du temps nécessaire pour que le front de carbonatation parvienne jusqu'à l'armature sont tracés. Sur les histogrammes, sont superposées les valeurs déterminées dans la présente étude et ceux correspondant à la distribution Log- normale et la distribution Gamma. La forme des histogrammes suggère une distribution Log- normale qui est adoptée dans cette étude.

## **Chapitre 5**

**Influence des variabilités du rapport eau/ciment, de l'humidité relative et de la pression du gaz carbonique sur la profondeur de carbonatation du béton armé.**

## **Chapitre 5 : Influence des variabilités du rapport eau/ciment, de l'humidité relative et de la pression du gaz carbonique sur la profondeur de carbonatation du béton armé.**

### **5.1 Introduction**

La carbonatation du béton commence à sa surface et pénètre jusqu'à une certaine épaisseur connue sous le terme de profondeur de carbonatation. Lorsque cette profondeur atteint les armatures, la corrosion peut commencer.

L'objectif de ce chapitre est de montrer l'effet du caractère aléatoire du rapport eau/ciment, de l'humidité relative, et de la pression du gaz carbonique sur la profondeur de carbonatation du béton armé  $X_c$ , à partir d'une analyse probabiliste basée sur les simulations de Monte Carlo, combinées au modèle déterministe de Duracrete.

Les statistiques, i.e. la moyenne, l'écart type et l'intervalle de confiance sont obtenus à partir de 10000 échantillons aléatoires simulés, en réalisant une étude paramétrique. Celle-ci intègre l'influence du coefficient de variation du rapport eau /ciment ( $Cv_{E/C}$ ), de l'humidité relative ( $Cv_{HR}$ ) et de la pression du gaz carbonique  $CO_2$  ( $Cv_{Cs}$ ) sur la profondeur de carbonatation pour une période d'un an.

### **5.2 Adaptation du modèle de Duracrete au calcul de la profondeur de carbonatation**

On considère que le béton est situé à l'intérieur d'un bâtiment où le taux d'humidité de l'air ambiant est moyen ou élevé. Il est donc soumis à la classe d'exposition XC3, dont les valeurs numériques pour les paramètres de composition sont identiques à celles de la classe XF1 (NA 16002, 2004; EN 206-1, 2004).

Plusieurs expressions ont été proposées pour traduire le temps nécessaire à l'initiation de la corrosion des armatures selon un processus de dégradation dû à la carbonatation de la matrice cimentaire. Pour évoluer vers l'approche probabiliste, nous avons choisi le modèle déterministe de Duracrete qui calcule une valeur de profondeur de carbonatation  $X_c$  pour une

durée d'exposition donnée ( $t$ ) et le temps nécessaire  $T_1$  pour que le front de carbonatation parvienne jusqu'à l'armature selon les relations suivantes:

$$X_c = \sqrt{2k_e k_c (k_t D_{ACC,O} + \varepsilon_t) C_s T \left(\frac{t_0}{T}\right)^w} \quad (5.1)$$

$$T_1 = \left[ \frac{ad^2}{2k_e k_c D_{eff} C_s t_0^{2w}} \right]^{\frac{1}{1-2w}} \quad (5.2)$$

Avec :

- $K_e$  : paramètre tenant compte des conditions climatiques (facteur d'environnement)

$$k_e = \left( \frac{1 - HR_{abs}^5}{1 - HR_{lab}^5} \right)^{2.5} \quad (HR_{lab}=65\%, HR_{abs}=75\%) \quad (5.3)$$

- $K_c$  : paramètre tenant compte des conditions de cure du béton

$$k_c = \left( \frac{t_c}{7} \right)^{-0.56} \quad (t_c \text{ est la durée de cure}) \quad (5.4)$$

- $K_t$  : facteur de test-référence
- $\varepsilon_t$  : porosité du béton carbonaté
- $C_s$  : la pression de  $CO_2$  a la surface du béton
- $T$  : échéance considérée (1année)
- $t_0$  : période de référence (28j)
- $t_c$  : la durée de cure (1j)
- $w$  : facteur méso-climatique (0,1)
- $d$  : l'enrobage (3cm)
- $D_{ACC,O}$  : coefficient de diffusion normé du  $CO_2$  (rapporté à la quantité de matériau carbonatable et mesuré à une échéance  $t_0$ ), il doit être déterminé à partir d'un test de carbonatation accélérée réalisé dans des conditions précises (DARTS, 2004). On déduit alors le coefficient de diffusion normé en condition naturelle  $D_{NAC,O} = k_t D_{ACC,O} + \varepsilon_t$ .

En absence de mesure de  $D_{ACC,O}$ ,  $D_{NAC,O}$  peut s'écrire

$$D_{NAC,O} = \frac{D_{eff}}{a} \quad (5.5)$$

- $D_{eff}$  : coefficient de diffusion effectif du  $CO_2$  (à 20° et HR=65%)

$$D_{eff} = 1.64 \cdot 10^{-6} \varepsilon_c^{1.8} (1 - HR)^{2.3} \quad (5.6)$$

- $a$  : la quantité de matériau carbonatée

$$a = \beta_{ch} ch \alpha_h M_{CO_2} / M_{CaO} \quad (5.7)$$

Où  $M_{CO_2}$  et  $M_{CaO}$  les masses molaires du gaz carbonique et de la calcite,  $\alpha_h$  le degré d'hydratation du ciment,  $ch$  est la quantité de la portlandite et  $\beta_{ch}$  traduit la part relative de la portlandite susceptible de réagir, pour la composition du béton proposée,  $\alpha_h = 80\%$   $\beta_{ch} = 85\%$  (DARTS, 2004).

- $\varepsilon_c$  : la porosité de la pâte du ciment durci dépendant de la composition du béton

$$\varepsilon_c = \varepsilon \frac{1 + \left(\frac{E}{C}\right) \left(\frac{\rho_c}{\rho_e}\right) + \left(\frac{G}{C}\right) \left(\frac{\rho_c}{\rho_G}\right)}{1 + \left(\frac{E}{C}\right) \left(\frac{\rho_c}{\rho_e}\right)} \quad (5.8)$$

- $\varepsilon$  : la porosité mesurée sur un échantillon de béton;
- $\rho_c$  : la densité du ciment;
- $\rho_e$  : la densité de l'eau;
- $\rho_G$  : la densité des granulats;

$\varepsilon_c$  est définie dans chaque classe à partir de simulations de Monte Carlo en utilisant les caractéristiques du béton étudié (équation 5.8). Les résultats correspondants à chaque classe de porosité du béton sont présentés dans le tableau 5.1 (RITA DE CÀSSIA, 2004).

| <b>Risque de dégradation des armatures<br/>basé sur la porosité de la pâte</b> | <b>Faible</b> | <b>Moyen</b> | <b>Elevé</b> |
|--|---------------|--------------|--------------|
| $\varepsilon_c$ (%)  | 20            | 40           | 53           |

Tableau 5.1. Classes et valeurs moyennes de référence proposées pour la porosité de la pâte (RITA DE CÀSSIA, 2004).

Le modèle simple de Duracrete intègre ainsi des paramètres relatifs à la fabrication du béton, aux conditions d'exécution (cure) et aux conditions environnementales. Il est par conséquent adaptable à un large panel de matériaux cimentaires qui se distinguent par des compositions de matrices cimentaires différentes, conditionnées par la nature du ciment, le type des additions éventuelles et le rapport  $E/C$ . De plus, sa simplicité permet de le coupler avec un algorithme probabiliste.

## 5.3 Application

### 5.3.1 Introduction

Dans cette section notre analyse utilise la procédure décrite ci dessus pour étudier l'effet du caractère aléatoire du rapport eau/ciment, d'humidité relative et de la pression du gaz carbonique sur la profondeur de carbonatation.

L'aspect unidimensionnel du problème étant supposé, ainsi la variabilité spatiale des paramètres est considérée uniquement dans la direction verticale.

Les valeurs des différents paramètres de cette application figurent dans le tableau 5.2.

| Paramètres         | $\mu$ (moyenne)       | CV (coefficient de variation) | loi de distribution |
|--------------------|-----------------------|-------------------------------|---------------------|
| $d$ (cm)           | 3                     | -                             | Déterministe        |
| $Deff$ ( $m^2/s$ ) | $3.92 \cdot 10^{-12}$ |                               | Déterministe        |
| $a$ ( $kg/m^3$ )   | 65.2                  | -                             | Déterministe        |
| $Ke$               | 0.69                  | -                             | Déterministe        |
| $Kc$               | 3                     | -                             | Déterministe        |
| $t_0$ (année)      | 0.0767                | -                             | Déterministe        |
| $C$ ( $kg/m^3$ )   | 6.1                   | 0.0- 0.5                      | log-normal          |
| $E/C$              | 0.5                   | 0.0- 0.5                      | log-normal          |
| $HR$               | 0.65                  | 0.0 - 0.1                     | log-normal          |
| $W$                | 0.1                   | -                             | Déterministe        |
| $\varepsilon_c$    | 0.53                  | -                             | Déterministe        |

Tableau 5.2: Données d'entrée du modèle (Les paramètres  $Deff$ ,  $\varepsilon$ ,  $ke$  et  $kc$  sont calculés à partir des relations empirique exposées au dessus). (DURACRETE, 2000; FIB, 2009)

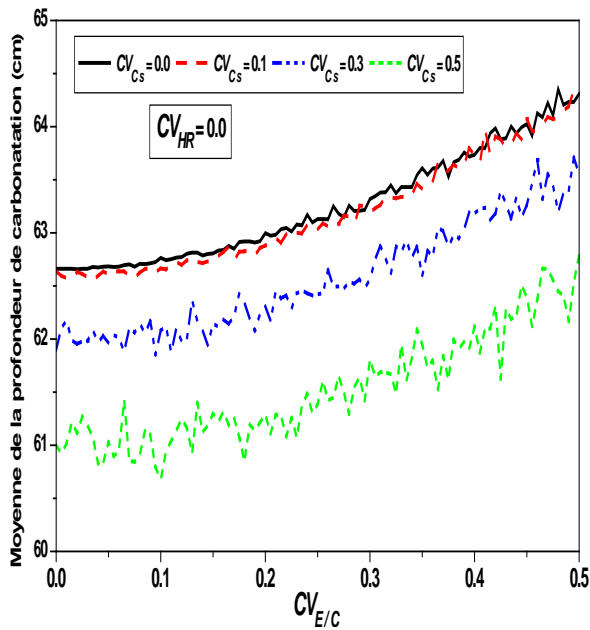
### 5.3.2. Résultats

#### 5.3.2.1. Statistiques de la profondeur de carbonatation en fonction des variabilités du E/C

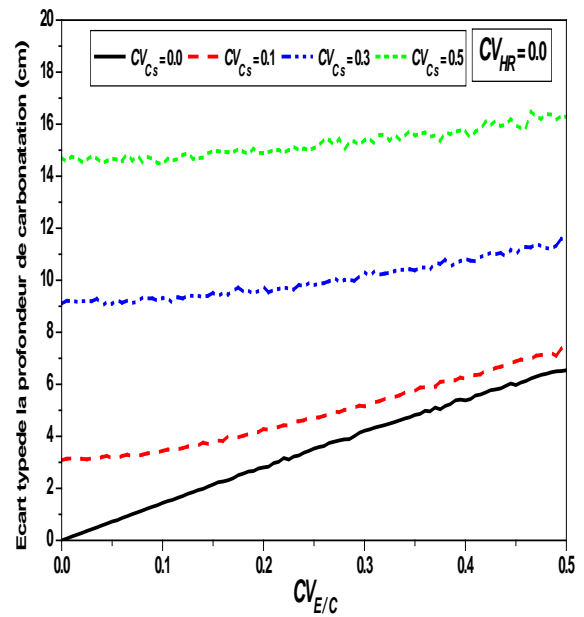
Les figures 5.1 et 5.2 représentent les statistiques de la profondeur de carbonatation en fonction des variabilités du rapport eau/ciment.

Les figures 5.1.a, 5.1.c, expriment la variation de la moyenne de la profondeur de la carbonatation avec le coefficient de variation du rapport eau/ciment ( $CV_{E/C}$ ), pour un

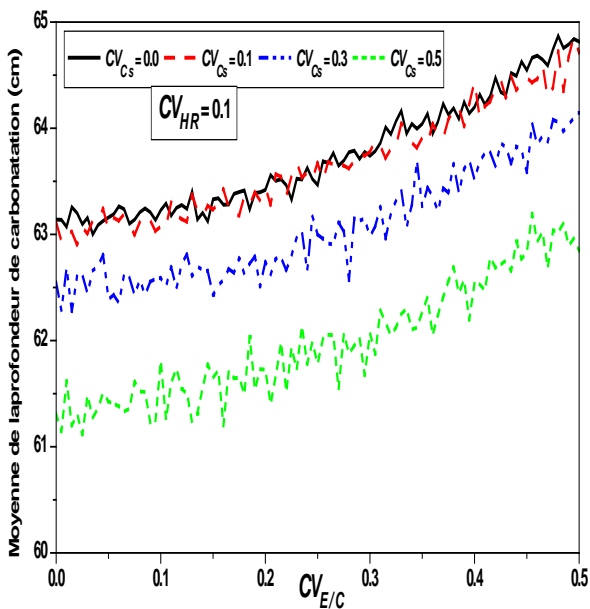
coefficient de variation de l'humidité relative  $CV_{HR} = 0.0$  et  $CV_{HR} = 0.1$ , en variant le coefficient de variation de la pression du gaz carbonique  $CV_{Cs}$  de 0 à 0.5.



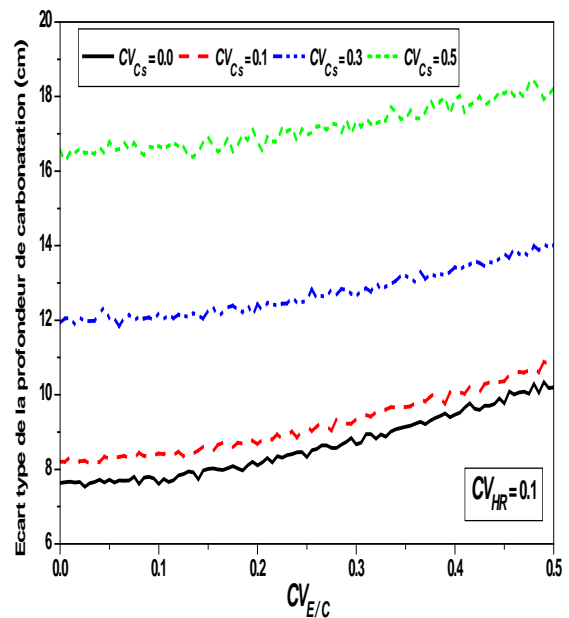
(a). Moyenne de la profondeur de carbonatation par rapport au coefficient de variation de  $E/C$ .



(b). Ecart type de la profondeur de carbonatation par rapport au coefficient de variation de  $E/C$ .



(c). Moyenne de la profondeur de carbonatation par rapport au coefficient de variation de  $E/C$ .



(d). Ecart type de la profondeur de carbonatation par rapport au coefficient de variation de  $E/C$ .

Figure 5.1: Statistiques de la profondeur de carbonatation par rapport au coefficient de variation de  $E/C$ .

Ces figures montrent que, pour toutes les valeurs du coefficient de variation de  $E/C$  ( $Cv_{E/C}$ ), une augmentation de la moyenne de la profondeur de carbonatation est observée lorsque le coefficient de la pression du gaz carbonique ( $Cv_{Cs}$ ) diminue.

D'autre part, l'augmentation du coefficient de variation de l'humidité relative influence de manière significative la variation de la profondeur de carbonatation qu'à mesure que  $Cv_{E/C}$  augmente.

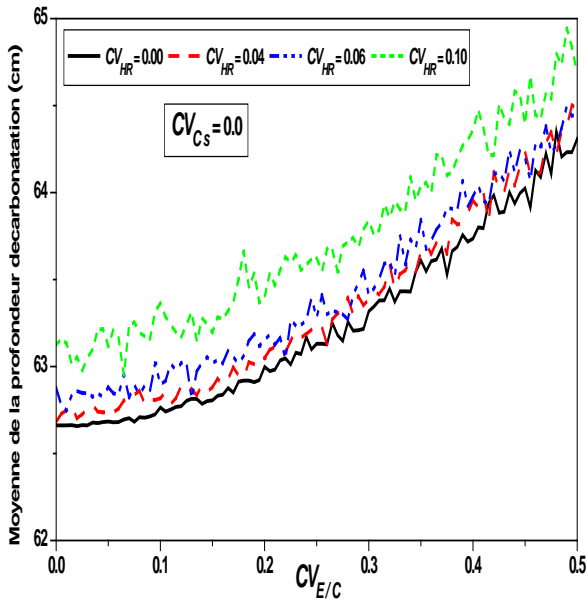
Les figures 5.1.b, 5.1.d montrent que, dans tous les cas, l'écart type diminue avec la diminution du coefficient de la pression du gaz carbonique  $Cv_{Cs}$ .

Ces résultats indiquent que la variabilité de la concentration  $Cs$  du gaz carbonique à la surface du béton est négligeable, sa valeur moyenne suffit de représenter son effet sur la profondeur de carbonatation, il est donc considéré comme paramètre déterministe ce qui permet de réduire le temps de calcul lors d'un traitement probabiliste.

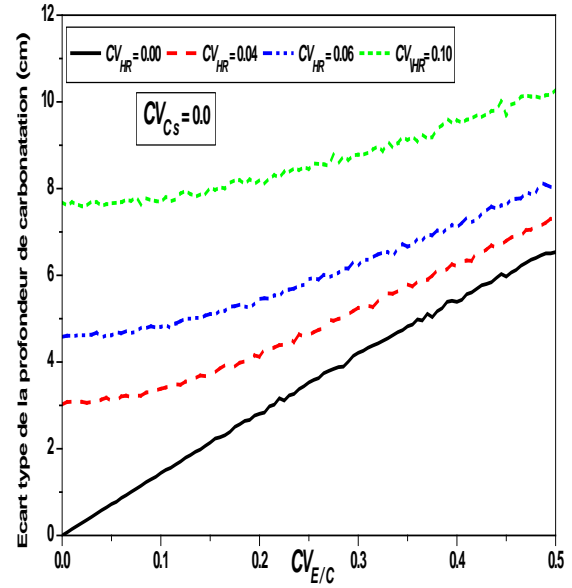
Dans les figures 5.2.a, 5.2.c est exposé la variation de la moyenne de la profondeur de la carbonatation par rapport au coefficient de variation de  $E/C$  pour  $Cv_{Cs} = 0.0$  et  $Cv_{Cs} = 0.5$ , le coefficient de variation de l'humidité relative  $Cv_{HR}$  variant de 0.0 à 0.1.

On observe qu'à mesure que le coefficient de la pression du gaz carbonique  $Cv_{Cs}$  augmente, la dispersion des courbes  $Cv_{HR}$  devient moins importante, et la moyenne de la profondeur de carbonatation devient plus petite. D'autre part, l'augmentation du coefficient de variation de l'humidité relative influence de manière significative la variation de la profondeur de carbonatation.

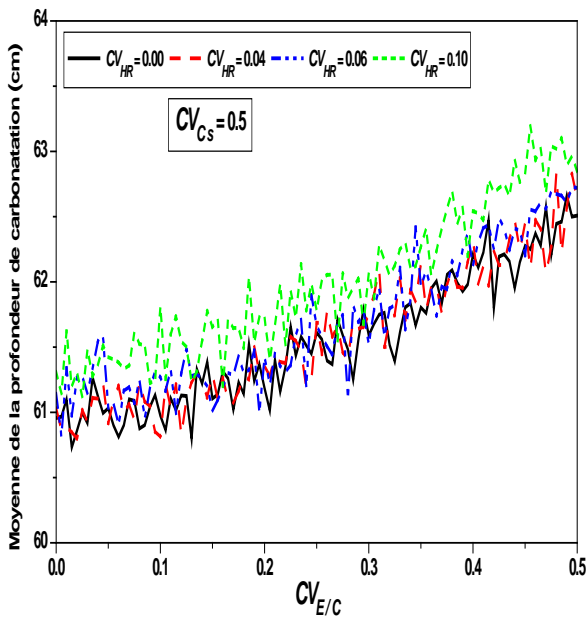
Les figures 5.2.b, 5.2.d expriment la variation de l'écart type de la profondeur de la carbonatation avec le coefficient de variation du rapport eau/ciment. Les courbes sont dispersées et l'écart type est important pour les valeurs élevées de  $Cv_{HR}$ .



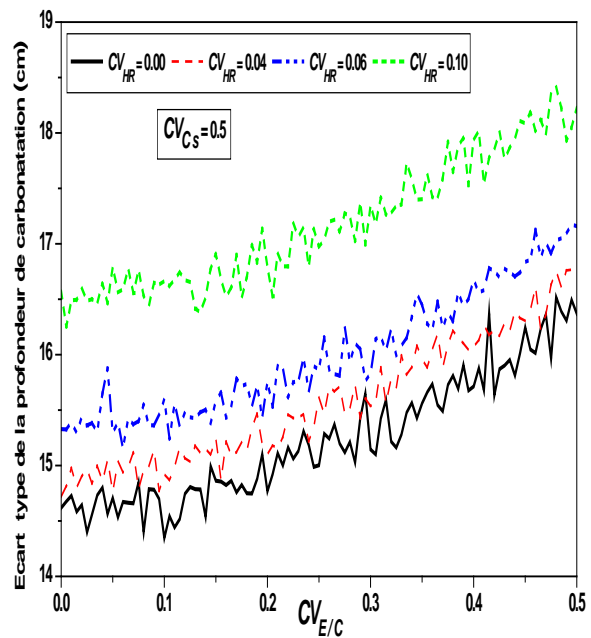
(a). Moyenne de la profondeur de carbonatation par rapport au coefficient de variation de  $E/C$ .



(b). Ecart type de la profondeur de carbonatation par rapport au coefficient de variation de  $E/C$ .



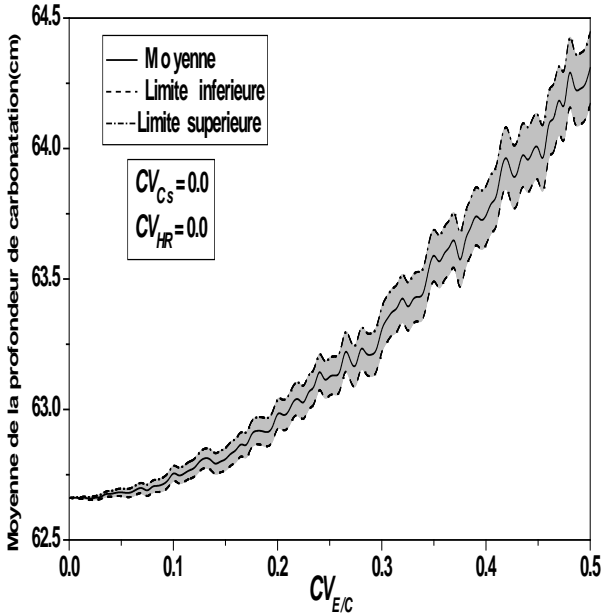
(c). Moyenne de la profondeur de carbonatation par rapport au coefficient de variation de  $E/C$ .



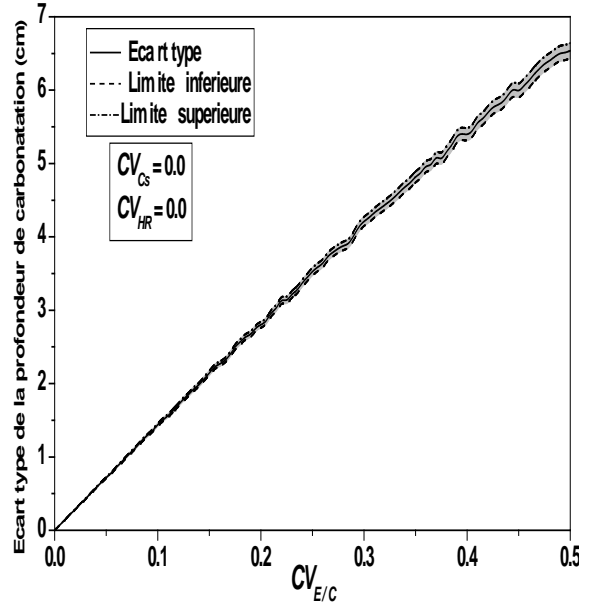
(d). Ecart type de la profondeur de carbonatation par rapport au coefficient de variation de  $E/C$ .

Figure 5.2: Statistiques de la profondeur de carbonatation par rapport au coefficient de variation de  $E/C$ .

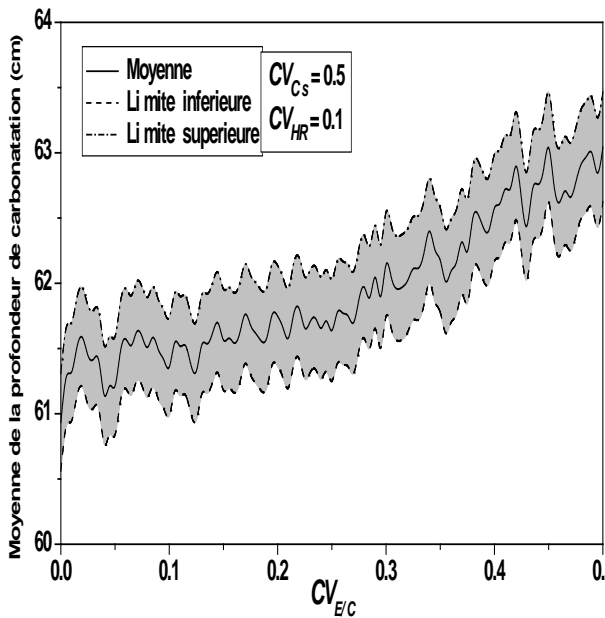
La figure 5.3 illustre l'intervalle de confiance de la moyenne et de l'écart type de la profondeur de carbonatation par rapport au coefficient de variation de  $E/C$ . L'intervalle de confiance mesure l'imprécision sur les estimations issues de l'échantillon.



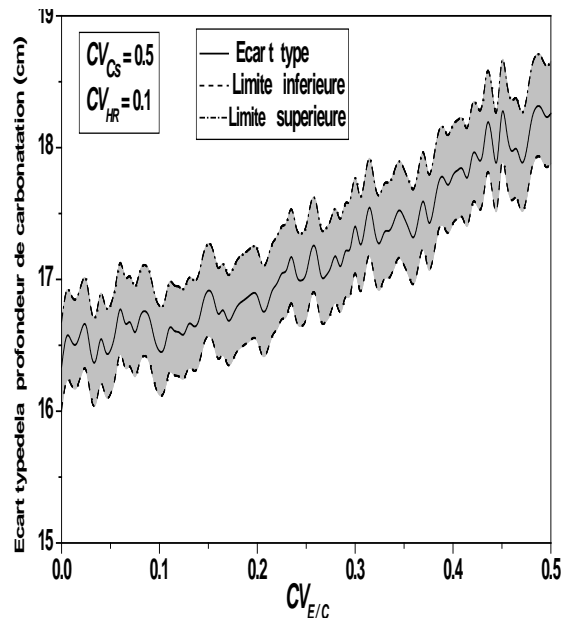
(a). Moyenne de la profondeur de carbonatation par rapport au coefficient de variation de  $E/C$ .



(b). Ecart type de la profondeur de carbonatation par rapport au coefficient de variation de  $E/C$ .



(c). Moyenne de la profondeur de carbonatation par rapport au coefficient de variation de  $E/C$ .



(d). Ecart type de la profondeur de carbonatation par rapport au coefficient de variation de  $E/C$ .

Figure 5.3 Statistiques de la profondeur de carbonatation et intervalles de confiance par rapport au coefficient de variation de  $E/C$ .

Pour une distribution log-normale de  $E/C$ , et des statistiques (moyenne et écart type, ainsi que l'intervalle de confiance à 95%) de la profondeur de carbonatation par rapport au coefficient de variation de  $E/C$  ( $Cv_{E/C}$ ), il est montré que la valeur moyenne de la profondeur de carbonatation est constante pour des valeurs inférieures de  $Cv_{E/C}$ .

Pour les valeurs supérieures de  $Cv_{E/C}$ , et pour le cas de  $Cv_{Cs} = Cv_{HR} = 0.0$ , une augmentation de la profondeur de carbonatation de 2.73% par an (de 62.54 à 64.25 cm) est observée (figure 5.3.a). Cette augmentation est de 3,28% par an (de 61 à 63 cm) pour le cas de  $Cv_{Cs} = 0.5$  et  $Cv_{HR} = 0.1$  (figure 5.3.c) (BADAoui et al., 2012).

On remarque également une augmentation uniforme de l'écart type, indique que la variabilité de  $E/C$  a un effet significatif sur la moyenne de la profondeur de carbonatation et elle influe fortement sa dispersion.

En effet, L'accroissement du rapport  $E/C$  implique une progression du front de carbonatation qui résulte principalement des mouvements de dioxyde de carbone et l'eau présente dans la texture poreuse. Plus  $E/C$  est élevé, plus la quantité d'eau libre susceptible de s'évaporer est importante. Commencant par le séchage ou l'évaporation, l'eau laisse des vides qui facilitent la diffusion du dioxyde de carbone à travers le réseau de pores interconnectés.

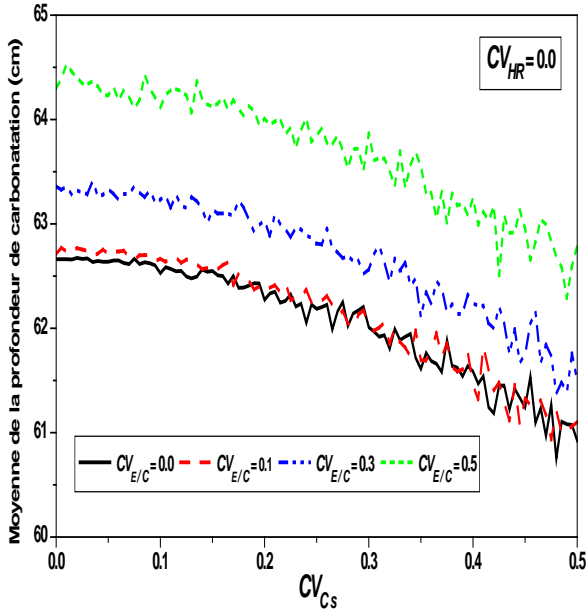
La cinétique de carbonatation est également affectée par la taille des pores, la profondeur de carbonatation a tendance à augmenter lorsque la porosité du béton augmente. Les mesures de porosité au mercure (diamètre moyen des pores) réalisées après la carbonatation montrent que, les produits solides de carbonatation remplissent certains pores, et en tenant compte de la répartition des volumes poreux (et pas seulement le diamètre moyen des pores) suggère que, la carbonatation modifie de façon complexe la structure des pores de la pâte dans le béton avec atténuation de certains modes poreux et création de nouveaux modes, et l'étude statistique de la distribution en taille des pores devient trop complexe (BAROGHEL-BOUNY, 1994).

En outre, si la corrélation entre la profondeur de carbonatation et la porosité n'est pas toujours évidente, la carbonatation est également dépendante de la composition chimique du béton et notamment la quantité des hydrates disponible.

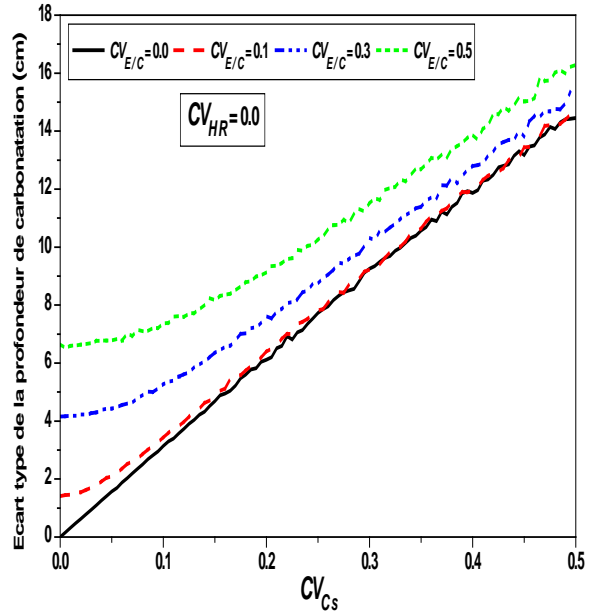
Ces résultats indiquent que l'incertitude sur  $E/C$  est parmi les paramètres qui devraient être incorporés dans n'importe quelle investigation stochastique en béton.

**5.3.2.2. Statistiques de la profondeur de carbonatation en fonction des variabilités du  $C_s$**

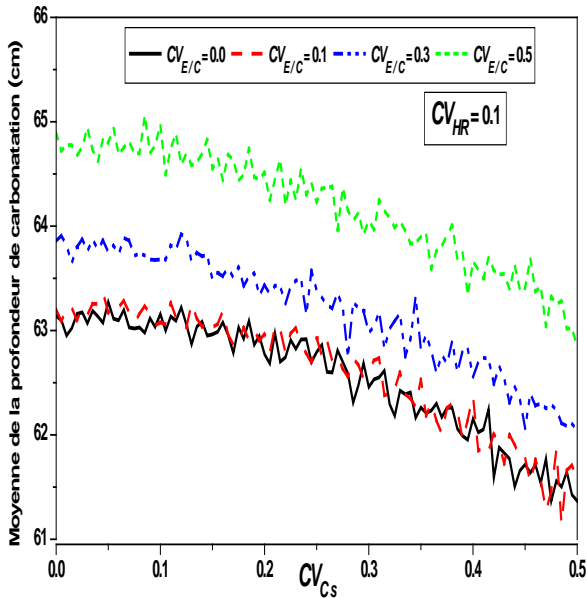
Les figures 5.4 et 5.5 représentent les statistiques de la profondeur de carbonatation en fonction des variabilités de la pression du gaz carbonique  $C_s$ .



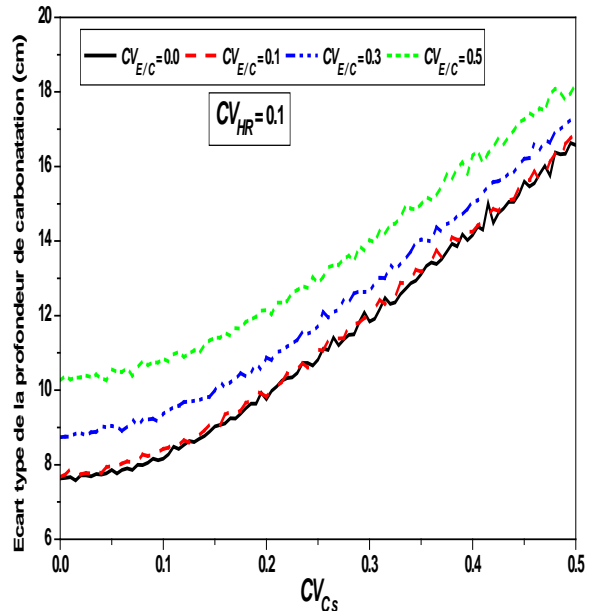
(a). Moyenne de la profondeur de carbonatation par rapport au coefficient de variation de  $C_s$ .



(b). Ecart type de la profondeur de carbonatation par rapport au coefficient de variation de  $C_s$ .



(c). Moyenne de la profondeur de carbonatation par rapport au coefficient de variation de  $C_s$ .



(d). Ecart type de la profondeur de carbonatation par rapport au coefficient de variation de  $C_s$ .

Figure 5.4: Statistiques de la profondeur de carbonatation par rapport au coefficient de variation de  $C_s$ .

Les figures 5.4.a, 5.4.c, expriment la variation de la moyenne de la profondeur de la carbonatation avec le coefficient de variation de la pression de l'oxyde de carbone  $C_s$  pour  $Cv_{HR} = 0.0$  et  $Cv_{HR} = 0.1$ , en variant le coefficient de variation du E/C ( $Cv_{E/C}$ ) de 0 à 0,5.

On observe que les courbes des valeurs moyennes de la profondeur de carbonatation sont confondues pour les faibles valeurs de  $Cv_{E/C}$  ( $Cv_{E/C} = 0.0$  et  $Cv_{E/C} = 0.1$ ), la dispersion devient importante qu'à mesure que  $Cv_{E/C}$  augmente, indiquant que la variabilité du rapport E/C a un impact plus important sur la profondeur de carbonatation.

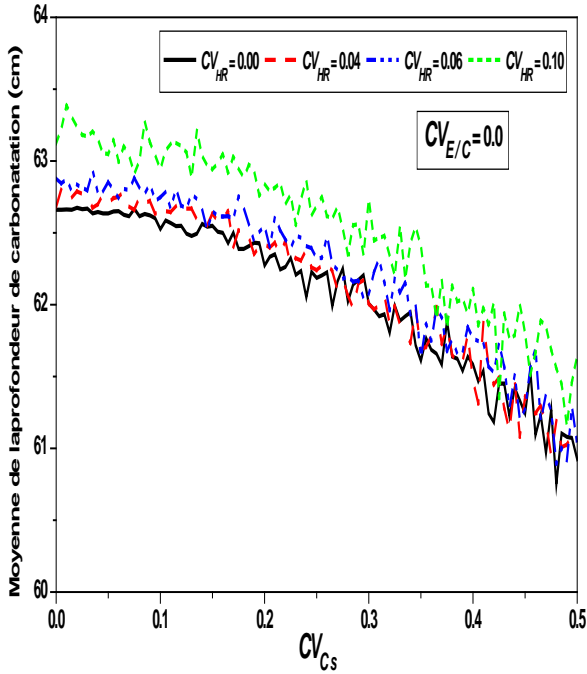
D'autre part, lorsque le coefficient de variation de la pression du gaz carbonique  $Cv_{C_s}$  augmente et pour toutes les valeurs de  $Cv_{E/C}$ , on observe une atténuation de la moyenne de la profondeur de carbonatation. Ce résultat concorde à celui donné par les figures 5.1 et 5.2.

Dans les figures 5.4.b, 5.4.d, l'écart type est moins important pour les valeurs faibles de  $Cv_{C_s}$ , il est égale à zéro pour  $Cv_{C_s} = Cv_{HR} = 0.0$ , il augmente de manière significative avec  $Cv_{E/C}$  et  $Cv_{HR}$ . Ceci indique que l'incertitude sur la l'humidité relative et le rapport eau /ciment est parmi les paramètres qui devraient être incorporés dans n'importe quelle investigation stochastique.

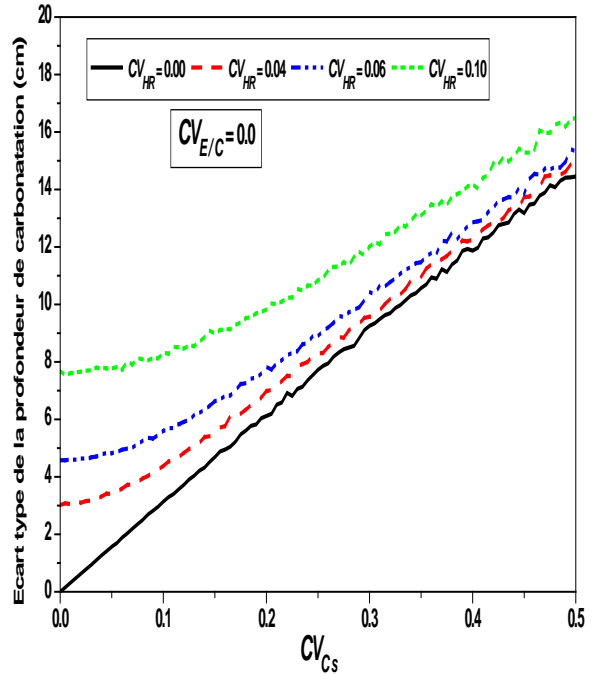
Dans les figures 5.5.a, 5.5.c est exposé la variation de la moyenne de la profondeur de la carbonatation par rapport au coefficient de variation de  $C_s$  pour  $Cv_{E/C} = 0.0$  et  $Cv_{E/C} = 0.5$ , le coefficient de variation de l'humidité relative  $Cv_{HR}$  variant de 0.0 à 0.1.

On observe que les courbes de la moyenne de la profondeur carbonatation sont confondues pour les valeurs de  $Cv_{HR} \leq 0.06$ , la dispersion devient importante pour  $Cv_{HR} = 0.1$ , qu'à mesure que  $Cv_{E/C}$  augmente, l'influence du facteur  $Cv_{HR}$  sur la profondeur de carbonatation est faible pour des valeurs déterministes du rapport eau /ciment. La valeur de la moyenne de la profondeur de carbonatation augmente de manière significative avec  $Cv_{HR}$  et  $Cv_{E/C}$ .

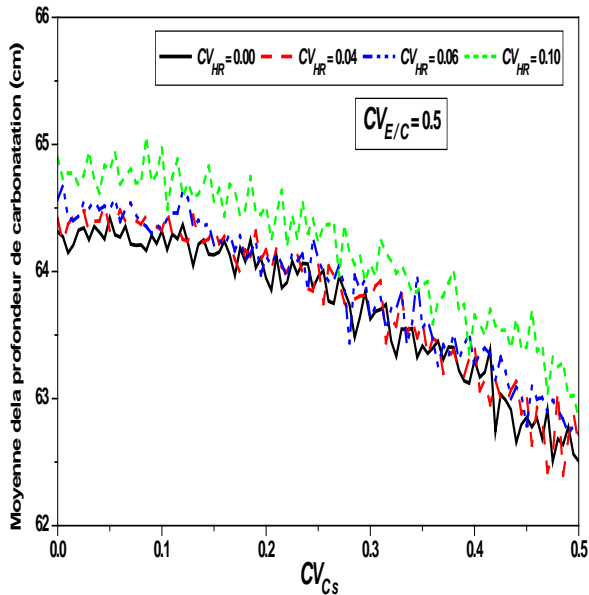
L'écart type de la profondeur de la carbonatation par rapport au coefficient de variation de  $C_s$  est exprimé sur les figures 5.5.b, 5.5.d. Nous remarquons que pour  $CV_{C_s} = CV_{E/C} = 0.0$ , l'écart type il est égale à zéro, il augmente de manière significative avec  $CV_{E/C}$  et  $CV_{C_s}$ .



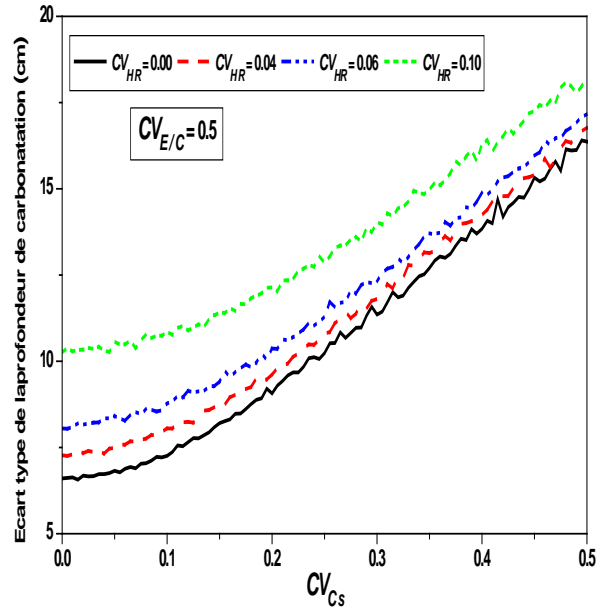
(a). Moyenne de la profondeur de carbonatation par rapport au coefficient de variation  $C_s$ .



(b). Ecart type de la profondeur de carbonatation par rapport au coefficient de variation  $C_s$ .



(c). Moyenne de la profondeur de carbonatation par rapport au coefficient de variation  $C_s$ .

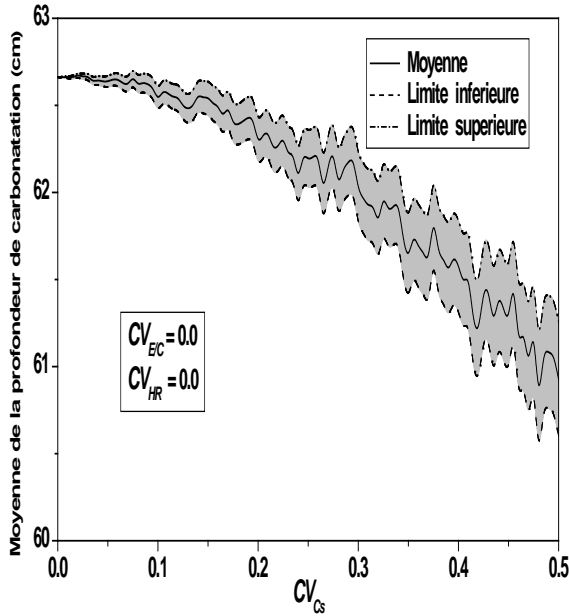


(d). Ecart type de la profondeur de carbonatation par rapport au coefficient de variation  $C_s$ .

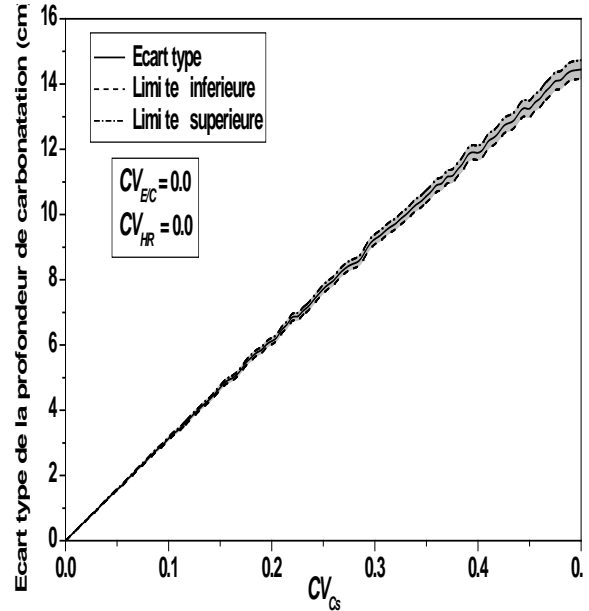
Figure 5.5: Statistiques de la profondeur de carbonatation par rapport au coefficient de variation de  $C_s$ .

D'autre part, lorsque le coefficient de variation de l'humidité  $CV_{HR}$  augmente, et pour toutes les valeurs de  $CV_{Cs}$ , on observe une augmentation de l'écart type de la profondeur de carbonatation, qu'à mesure que  $CV_{E/C}$  augmente.

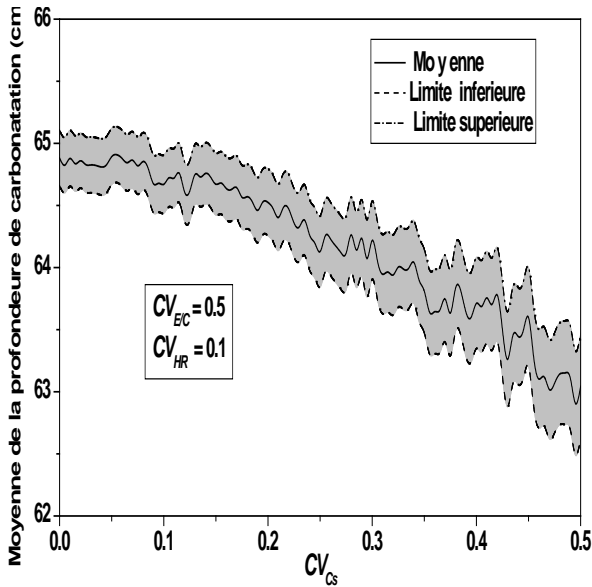
La figure 5.6 montre l'intervalle de confiance de la moyenne et de l'écart type de profondeur de carbonatation par rapport au coefficient de variation de  $Cs$ .



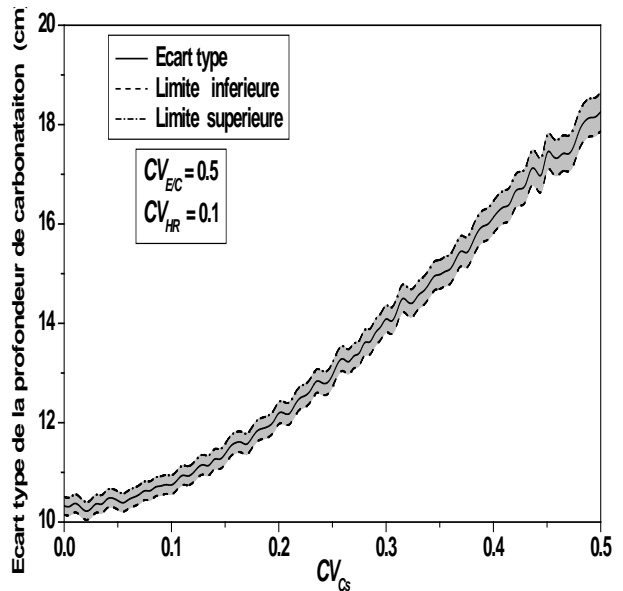
(a). Moyenne de la profondeur de carbonatation par rapport au coefficient de variation de  $Cs$ .



(b). Ecart type de la profondeur de carbonatation par rapport au coefficient de variation de  $Cs$ .



(c). Moyenne de la profondeur de carbonatation par rapport au coefficient de variation de  $Cs$ .



(d). Ecart type de la profondeur de carbonatation par rapport au coefficient de variation de  $Cs$ .

Figure 5.6: Statistiques de la profondeur de carbonatation et intervalles de confiance par rapport au coefficient de variation de  $Cs$

Variant  $Cv_{Cs}$  entre 0.0 à 0.5, pour des valeurs des coefficients de variation du E/C ( $Cv_{E/C} = 0.5$  et  $Cv_{HR} = 0.1$ ), conduit à une réduction de la profondeur de carbonatation de 3,02% (de 64.9 à 63 cm) (figure 5.6.c).

Pour des valeurs déterministes du rapport E/C et de l'humidité relative ( $Cv_{E/C} = Cv_{HR} = 0.0$ ) et pour des valeurs de  $Cv_{Cs}$  qui varie entre 0.0 à 0.5 la réduction de la profondeur de carbonatation est de 2.78%

Une légère augmentation est observée pour l'écart type et l'intervalle de confiance reste constant pour les moyennes et écart-type indiquant que la variabilité de la concentration de  $CO_2$  n'affecte pas la précision de l'écart type.

La variabilité de la pression  $Cs$  du gaz carbonique à la surface du béton est négligeable, sa valeur moyenne suffit à représenter son effet,  $Cs$  est considéré comme déterministe et la quantité de carbonate de calcium est composée de deux parties :

- le calcium de (CH),  $(C_3A.3Cs.H_{32})$  et  $(C_3A.Cs.H_{12})$  est carbonaté quelle que soit la pression de  $CO_2$ .
- les hydrates de silicate de calcium (C-S□H): La quantité de carbonate dépend du degré d'hydratation du ciment et du coefficient effectif de diffusion du  $CO_2$  dans la zone de carbonate.

### 5.3.2.3 Statistiques de la profondeur de carbonatation en fonction des variabilités du HR

Les figures 5.7 et 5.8 représentent les statistiques de la profondeur de carbonatation en fonction des variabilités de l'humidité relative HR.

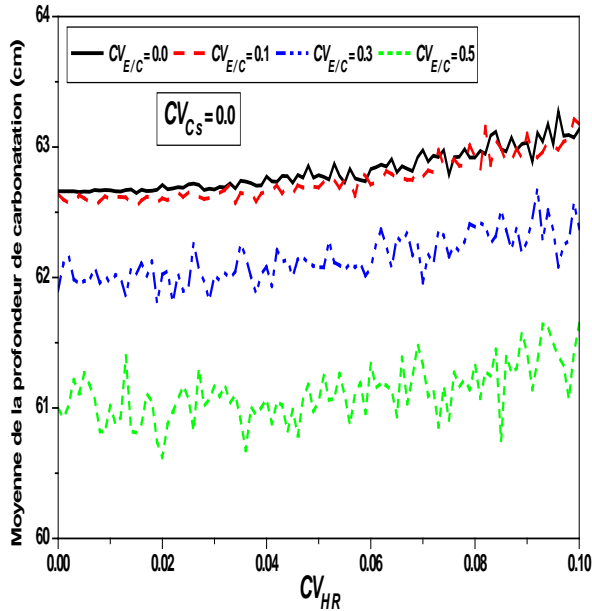
Les figures 5.7.a, 5.7.c, expriment la variation de la moyenne de la profondeur de la carbonatation avec le coefficient de variation de l'humidité relative pour  $Cv_{Cs} = 0.0$  et  $Cv_{Cs} = 0.5$ , en variant  $Cv_{E/C}$  de 0 à 0.5.

On observe que les courbes des valeurs moyennes de la profondeur de carbonatation sont dispersées pour des valeurs de  $Cv_{E/C} > 0.1$ . La moyenne de la profondeur de carbonatation devient plus petite pour toutes les valeurs des coefficients de variation  $Cv_{HR}$  et  $Cv_{Cs}$  qu'à mesure que  $Cv_{E/C}$  augmente.

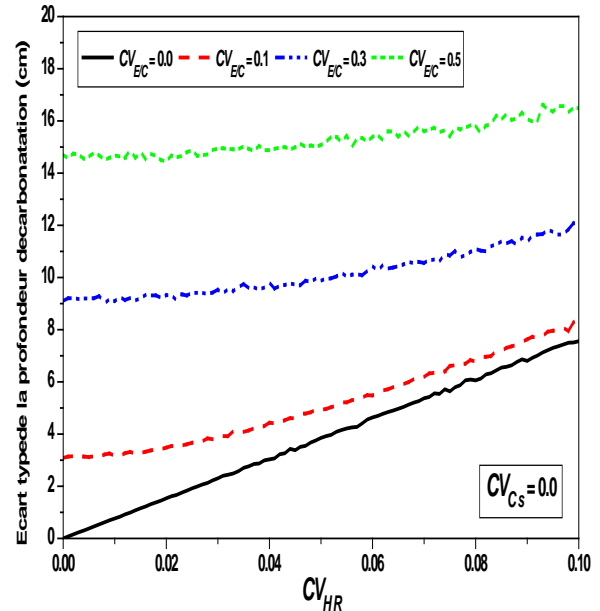
La diffusion du gaz carbonique  $CO_2$  dans le béton est liée à la structure poreuse du béton et à la phase liquide dans les pores. Cette phase liquide est importante pour faire passer le  $CO_2$  en solution. D'autre part, lorsque le coefficient de variation de l'humidité relative  $Cv_{HR}$

augmente, la diffusion des ions du gaz carbonique devient difficile puisque tous les pores sont remplis d'eau et la carbonatation sera limitée.

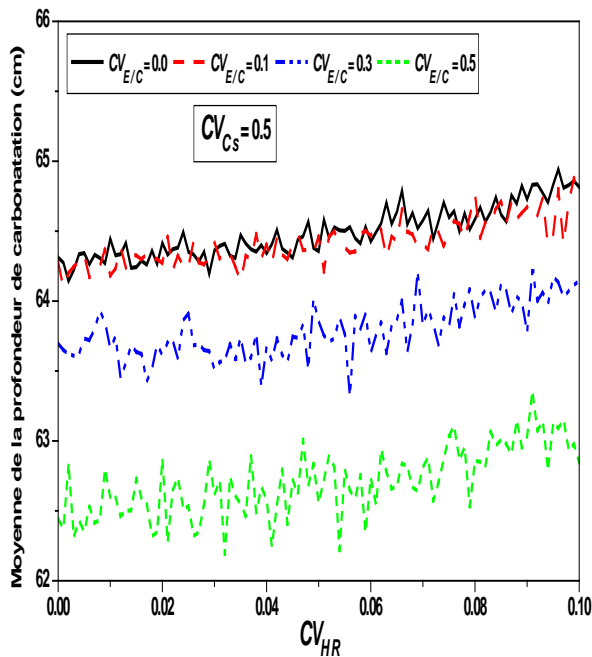
Dans les figures 5.7.b, 5.7.d est exposé la variation de l'écart type, nous remarquons que pour  $Cv_{Cs} = Cv_{E/C} = 0.0$ , l'écart type il est égale à zéro, il augmente de manière significative avec  $Cv_{E/C}$  et  $Cv_{Cs}$ .



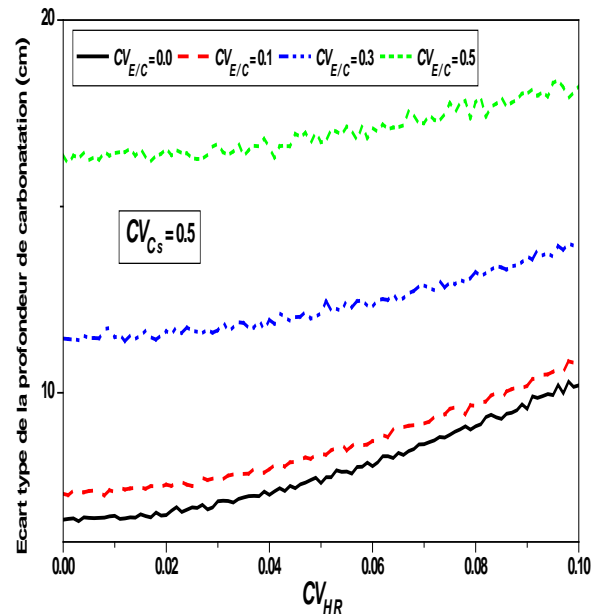
(a). Moyenne de la profondeur de carbonatation par rapport au coefficient de variation  $HR$ .



(b). Ecart type de la profondeur de carbonatation par rapport au coefficient de variation de  $HR$ .



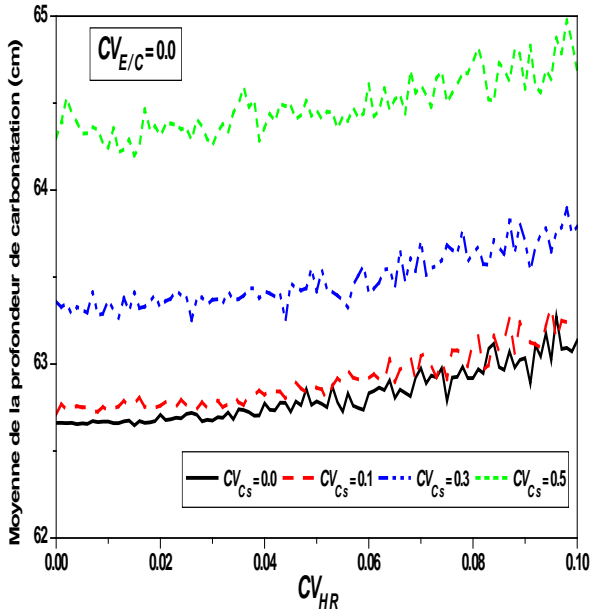
(c). Moyenne de la profondeur de carbonatation par rapport au coefficient de variation  $HR$ .



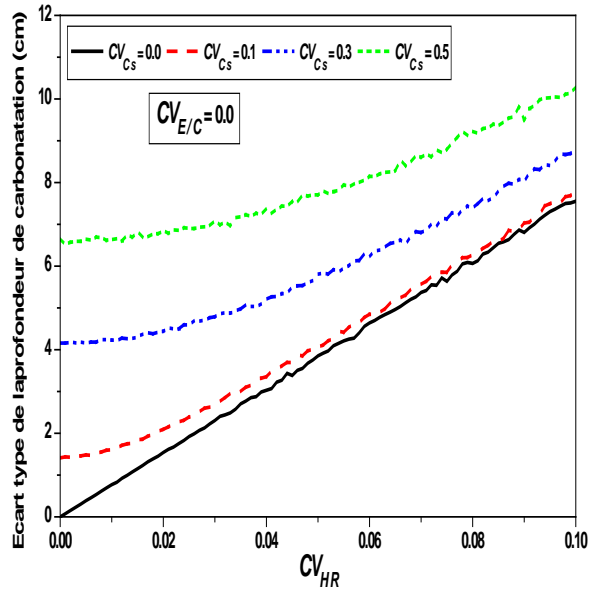
(d). Ecart type de la profondeur de carbonatation par rapport au coefficient de variation de  $HR$ .

Figure 5.7: Statistiques de la profondeur de carbonatation par rapport au coefficient de variation de  $HR$ .

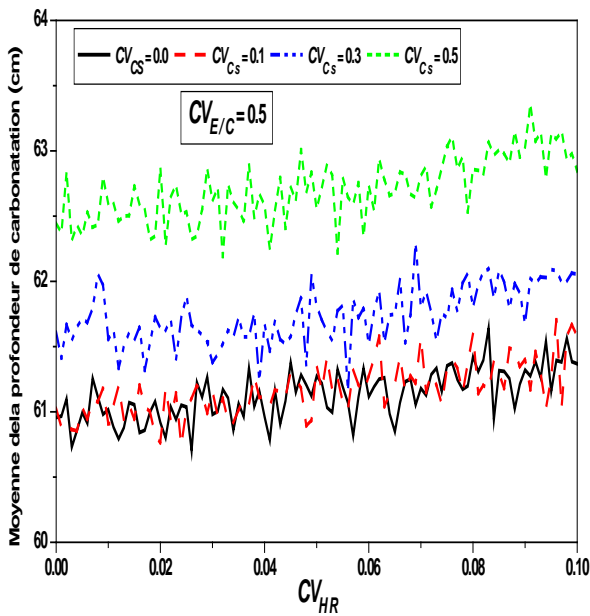
Les figures 5.8.a, 5.8.c, expriment la variation de la moyenne de la profondeur de la carbonatation avec le coefficient de variation de l'humidité relative pour  $CV_{E/C} = 0,0$  et  $CV_{E/C} = 0,5$ , en variant  $CV_{C_s}$  de zéro à 0.5



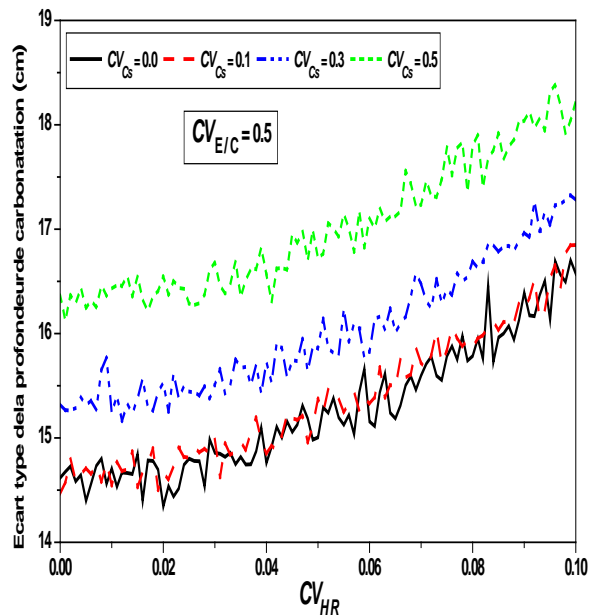
(a). Moyenne de la profondeur de carbonatation par rapport au coefficient de variation  $HR$ .



(b). Ecart type de la profondeur de carbonatation par rapport au coefficient de variation de  $HR$ .



(c). Moyenne de la profondeur de carbonatation par rapport au coefficient de variation  $HR$ .



(d). Ecart type de la profondeur de carbonatation par rapport au coefficient de variation de  $HR$ .

Figure 5.8: Statistiques de la profondeur de carbonatation par rapport au coefficient de variation de  $HR$ .

On observe que la moyenne de la profondeur de carbonatation augmente lorsque le coefficient de variation de la pression du gaz carbonique  $Cv_{Cs}$  augmente, cette augmentation est observée pour toutes les valeurs de  $Cv_{HR}$ , elle est plus importante pour  $Cv_{E/C} = 0.0$  que pour  $Cv_{E/C} = 0.5$ . En effet, pour une variabilité importante du rapport  $E/C$ , l'accroissement du coefficient de variation de l'humidité relative  $Cv_{HR}$  limite la diffusion du gaz carbonique  $CO_2$  dans les pores du béton. Ces résultats montrent que la diffusion du dioxyde de carbone atmosphérique à travers la structure poreuse du béton dépend de l'état hygroscopique des pores du matériau. (BADAoui et al., 2012).

L'écart type de la profondeur de la carbonatation par rapport au coefficient de variation de  $HR$  est exprimé sur les figures 5.8.b, 5.8.d. Nous remarquons que l'écart type augmente de manière significative avec  $Cv_{E/C}$  et  $Cv_{HR}$ .

La figure 5.9 montre l'intervalle de confiance de la moyenne et de l'écart type de profondeur de carbonatation par rapport au coefficient de variation de  $HR$ .

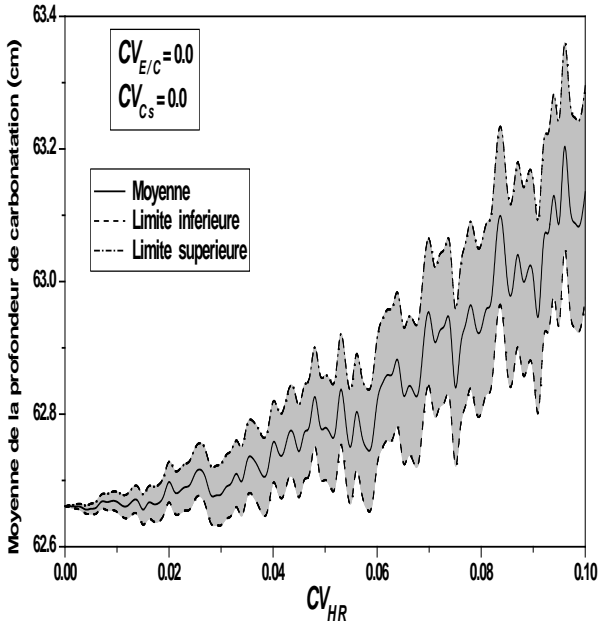
Pour des valeurs de  $Cv_{HR}$  allant jusqu'à 0.025 et pour  $Cv_{E/C} = 0.0$ , les moyennes demeurent constantes mais pour des valeurs plus importantes une augmentation importante se produit (figure 5.9.a). L'écart type augmente aussi de manière significative avec  $Cv_{HR}$  et l'intervalle de confiance prend des valeurs élevées (figure 5.9.b).

Pour des valeurs de  $Cv_{HR}$  allant de 0.0 à 0.1 et un  $Cv_{E/C} = 0.5$ , une stabilisation de la valeur moyenne est observée sur la figure 5.9.c. L'intervalle de confiance est sensiblement constant, ce qui indique que pour les grandes valeurs du  $Cv_{HR}$  correspondant à des humidités relatives supérieures à 70%, la structure d'un matériau poreux est saturée d'eau, le processus de diffusion du dioxyde de carbone à la surface des réactifs minéraux est extrêmement faible. Le coefficient de diffusion du dioxyde de carbone en phase liquide est de  $10^4$  fois plus faible que sous forme gazeuse (CHAUSSADENT, 1997).

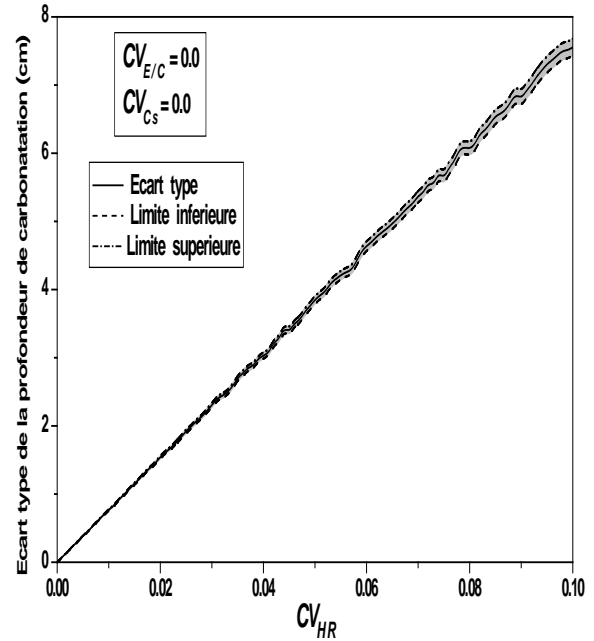
Selon CHAUSSADENT (1997), deux types de pénétration du dioxyde de carbone peuvent exister:

- à travers la phase liquide avec un transfert d'eau chargée en dioxyde de carbone dissous ou lorsque l'eau est déjà présente dans la phase aqueuse par diffusion ;
- à travers la phase gazeuse lorsque le réseau poreux accessible est désaturé.

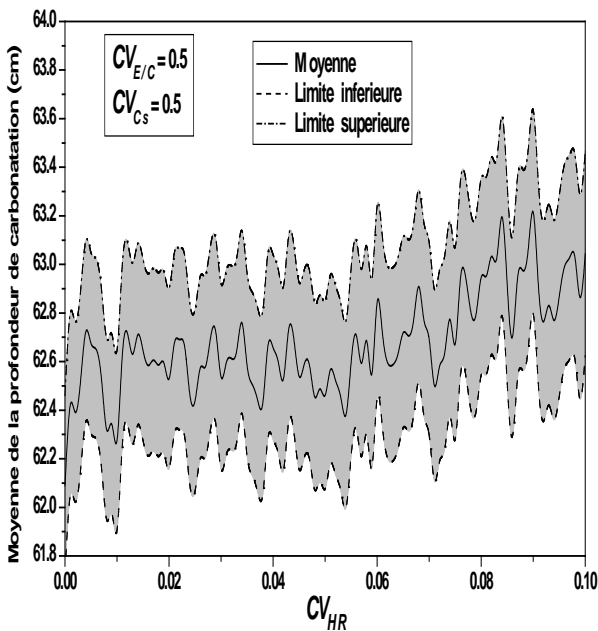
La vitesse de carbonatation à 20 ° C pour le béton traditionnel est obtenue pour une humidité relative entre 50% et 70%. Pour de faibles valeurs d'humidité relative (en dessous de 50%), la quantité d'eau est insuffisante pour dissoudre le dioxyde de carbone. Pour les grandes valeurs (> 70%), la structure d'un matériau poreux est saturée d'eau et la diffusion de CO<sub>2</sub> est faible.



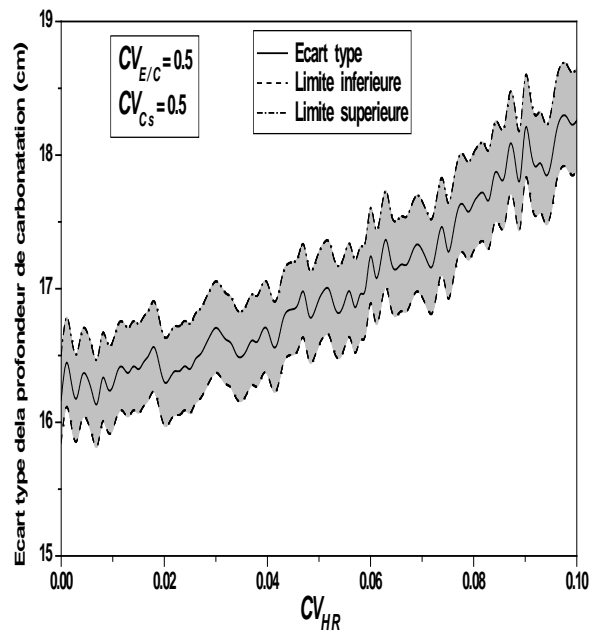
(a). Moyenne de la profondeur de carbonatation par rapport au coefficient de variation  $HR$ .



(b). Ecart type de la profondeur de carbonatation par rapport au coefficient de variation de  $HR$ .



(c). Moyenne de la profondeur de carbonatation par rapport au coefficient de variation  $HR$ .



(b). Ecart type de la profondeur de carbonatation par rapport au coefficient de variation de  $HR$ .

Figure 5.9 Statistiques de la profondeur de carbonatation et intervalles de confiance par rapport au coefficient de variation de  $HR$ .

## 5.4. Conclusions

Cette étude traite l'effet du caractère aléatoire du rapport eau /ciment, de l'humidité relative et de la pression du gaz carbonique sur la profondeur de carbonatation du béton armé. L'analyse est effectuée par l'intermédiaire de simulations Monte Carlo combinées au modèle de Duracrete sous l'hypothèse que l'humidité relative, le rapport eau/ciment et la pression du gaz carbonique  $CO_2$  à la surface du béton sont des variables aléatoires log-normal.

L'étude paramétrique réalisée prouve que pour toutes les valeurs de la variabilité du rapport eau/ciment et de l'humidité relative, la profondeur de carbonatation diminue avec l'augmentation du coefficient de variation du gaz carbonique  $CO_2$ . Ce qui signifie que le processus de la carbonatation est plus lent dans le milieu simulé.

L'effet de la variabilité de la concentration du gaz carbonique sur la profondeur de carbonatation est faible, sa valeur moyenne suffit de représenter son effet. Le calcium de (CH), de  $(C_3A.3Cs.H_{32})$  et de  $(C_3A.Cs.H_{12})$  est carbonaté quelle que soit la pression de  $CO_2$ . La quantité de carbonate des hydrates de silicate de calcium (C-S-H) dépend du degré d'hydratation du ciment et du coefficient effectif de diffusion du  $CO_2$  dans la zone de carbonate.

La pression du gaz carbonique  $C_s$  peut être considérée comme déterministe dans la détermination de la profondeur de carbonatation, ça permet de réduire le temps de calcul lors d'un traitement probabiliste.

D'autre part, la variabilité du rapport eau/ciment influence principalement la dispersion de la profondeur de carbonatation. L'accroissement du rapport  $E/C$ , implique une progression du front de carbonatation, qui résulte principalement des mouvements de dioxyde de carbone, et l'eau présente dans la texture poreuse. Par évaporation, cette eau laisse des vides qui facilitent la diffusion du dioxyde de carbone à travers le réseau de pores interconnectés. La cinétique de carbonatation est également affectée par la taille des pores, la profondeur de carbonatation a tendance à augmenter lorsque la porosité du béton augmente.

Pour les grandes valeurs du coefficient de variation de l'humidité relative  $Cv_{HR}$  correspondant à des humidités relatives supérieures à 70%, et une augmentation du coefficient de variation du rapport eau/ciment, la structure d'un matériau poreux est saturée d'eau, le processus de diffusion du dioxyde de carbone à la surface des réactifs minéraux est

extrêmement faible. Le coefficient de diffusion du dioxyde de carbone en phase liquide est plus faible que sous forme gazeuse.

L'intervalle de confiance pour la moyenne et l'écart-type augmente dans le cas où un seul paramètre est considéré comme une variable aléatoire. Il est sensiblement constant avec des valeurs importantes dans le cas où les trois paramètres sont considérés comme des variables aléatoires. Nous pouvons conclure que l'hétérogénéité des trois paramètres agit en opposition.

Le calcul de la profondeur carbonatée d'un béton à 30 ans par une approche probabiliste, avec une prise en compte des incertitudes des paramètres  $E/C$ ,  $HR$  et  $C_s$ , a donné une valeur de  $X_c = 29.52 \text{ mm}$  (une augmentation de la profondeur de carbonatation de 3.28% par an est remarquée sur la figure 5.3.c). Le calcul déterministe de cette profondeur a donné une valeur de  $X_c = 20.84 \text{ mm}$ . La profondeur de carbonatation calculée par une approche probabiliste est plus importante que celle calculée par une approche déterministe.

L'analyse effectuée dans cette étude met en évidence l'importance de la prise en compte de l'incertitude concernant l'humidité relative et le rapport eau/ciment dans n'importe quelle investigation stochastique de béton. En effet, ces facteurs induisent des variations de la profondeur de carbonatation qui ne sont pas prises en compte par les modèles déterministes de calcul.

## **Chapitre 6**

**Influence des variabilités du rapport eau/ciment, de l'humidité relative et de la pression du gaz carbonique sur le temps de carbonatation du béton armé.**

## **Chapitre 6 : Influence des variabilités du rapport eau/ciment, de l'humidité relative et de la pression du gaz carbonique sur le temps de carbonatation du béton armé.**

### **6.1. Introduction**

Le taux de carbonatation peut être déterminé à partir des essais au laboratoire, et la progression de dépassement avec le temps peut être calculée. Le temps de carbonatation ( $T_1$ ) est le temps nécessaire pour que la profondeur de carbonatation atteigne l'acier, c'est à dire le moment du début de corrosion. Cela correspond au cas où la profondeur de carbonatation est égale à l'enrobage de béton ( $d$ ).

Ce chapitre traite l'effet du caractère aléatoire du rapport eau /ciment, de l'humidité relative et de la pression du gaz carbonique sur le temps de la carbonatation du béton armé. L'objectif étant de montrer que la variabilité de ces paramètres peut accélérer ou retarder le processus de carbonatation pour mettre en évidence la nécessité de tenir en compte de ces paramètres dans la pratique.

Les statistiques de la moyenne, de l'écart type et de l'intervalle de confiance sont obtenues à partir de 10000 échantillons aléatoires simulés par la méthode de Monte Carlo, en étudiant l'influence du coefficient de variation de l'humidité relative ( $Cv_{HR}$ ), du rapport eau sur ciment ( $Cv_{E/C}$ ) et de la pression du gaz carbonique  $CO_2$  ( $Cv_{Cs}$ ) sur le temps de carbonatation pour une période d'un an.

### **6.2. Application**

#### **6.2.1 Introduction**

Pour évoluer vers l'approche probabiliste, nous avons utilisé le modèle déterministe de Duracrete qui a été présenté dans la chapitre précédent, qui calcul le temps nécessaire  $T_1$  pour que le front de carbonatation parvienne jusqu'à l'armature selon la relation (5.2)

10000 échantillons indépendants avec une distribution log-normale sont générés. La procédure numérique déterministe est appliquée à chaque simulation individuelle, fournissant ainsi 10000 valeurs de temps de carbonatation. Enfin, les statistiques, i.e. la moyenne et l'écart type, ainsi que l'intervalle de confiance pour les résultats sont calculés afin d'étudier l'effet probabiliste de l'incertitude du rapport eau / ciment, d'humidité relative et de la pression du gaz carbonique sur le temps de carbonatation du béton armé.

Les valeurs des différents paramètres de cette application figurent dans le tableau 5.1 du chapitre précédent.

## 6.2.2. Résultats

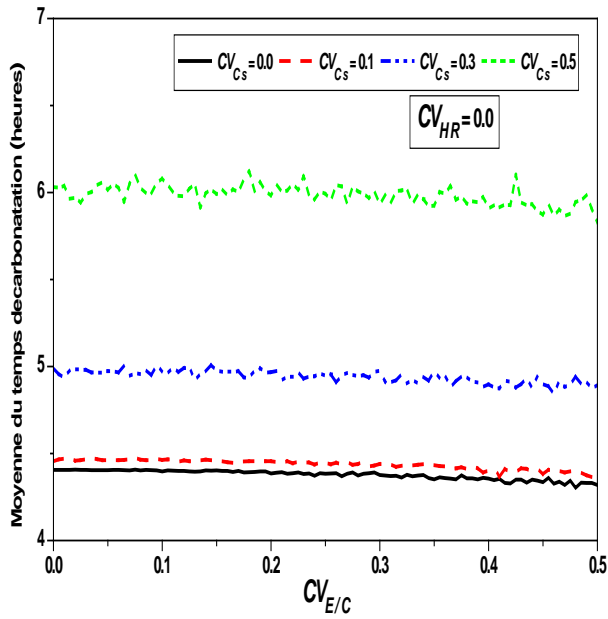
### 6.2.2.1. Statistiques du temps de carbonatation en fonction des variabilités du $E/C$

Les figures 6.1 et 6.2 représentent les statistiques du temps de carbonatation en fonction des variabilités du rapport eau /ciment.

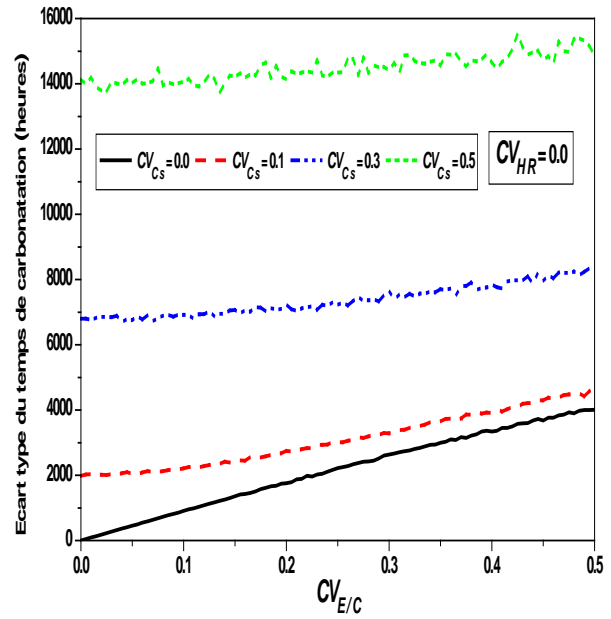
Les figures 6.1.a, 6.1.c, expriment la variation de la moyenne du temps de carbonatation avec le coefficient de variation du rapport eau /ciment pour  $Cv_{HR} = 0.0$  et  $Cv_{HR} = 0.1$ , en variant le coefficient de variation de la pression du gaz carbonique  $Cv_{Cs}$  de 0 à 0,5.

Nous observons que, quelle que soit la variabilité du rapport eau /ciment, à mesure que le coefficient de variation de la pression d'oxyde de carbone  $Cv_{Cs}$  augmente, la moyenne du temps de carbonatation augmente. Ce qui cause un retard du processus de carbonatation.

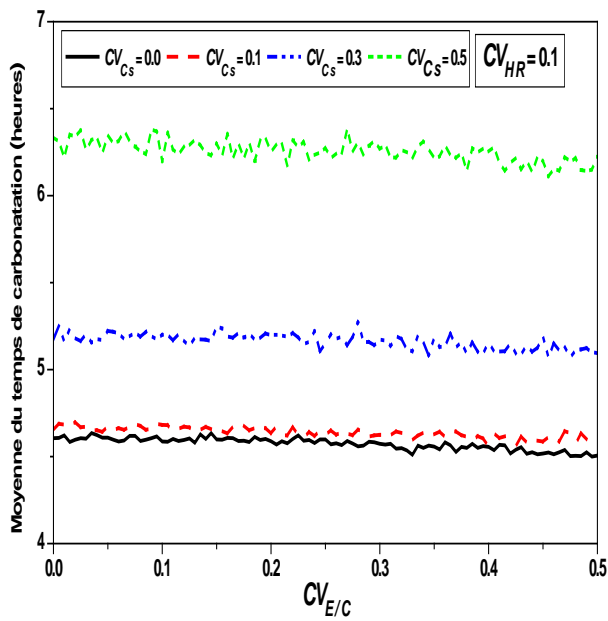
Nous constatons aussi que les courbes de la moyenne du temps de carbonatation et de l'écart type représentées sur les figures 6.1.b, 6.1.d sont indépendantes du coefficient de variation  $Cv_{E/C}$ . En effet, le rapport eau /ciment et la perméabilité du béton à la diffusion de l'oxyde de carbone contrôle la vitesse avec laquelle la carbonatation atteint l'armature.



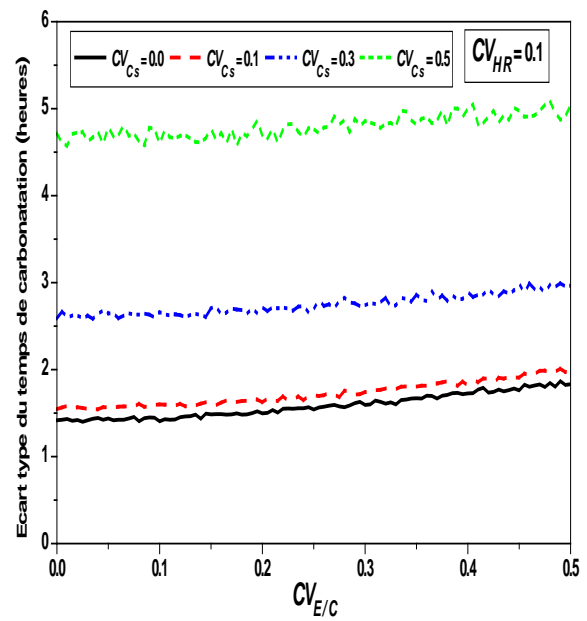
(a). Moyenne du temps de carbonatation par rapport au coefficient de variation de  $E/C$ .



(b). Ecart type du temps de carbonatation par rapport au coefficient de variation de  $E/C$ .



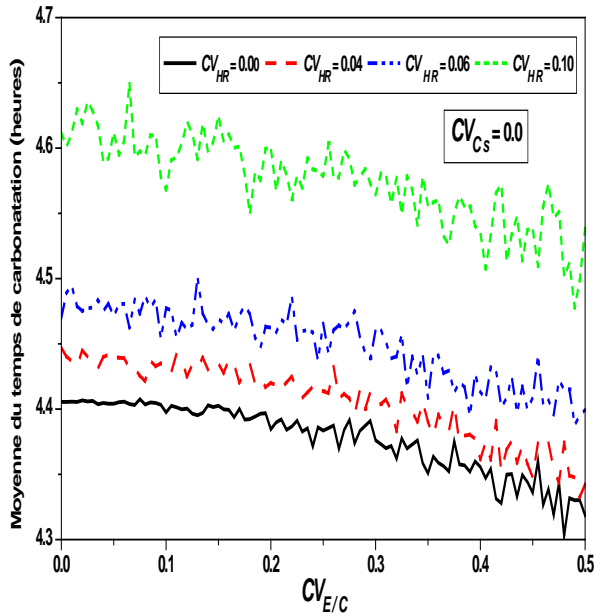
(c). Moyenne du temps de carbonatation par rapport au coefficient de variation de  $E/C$ .



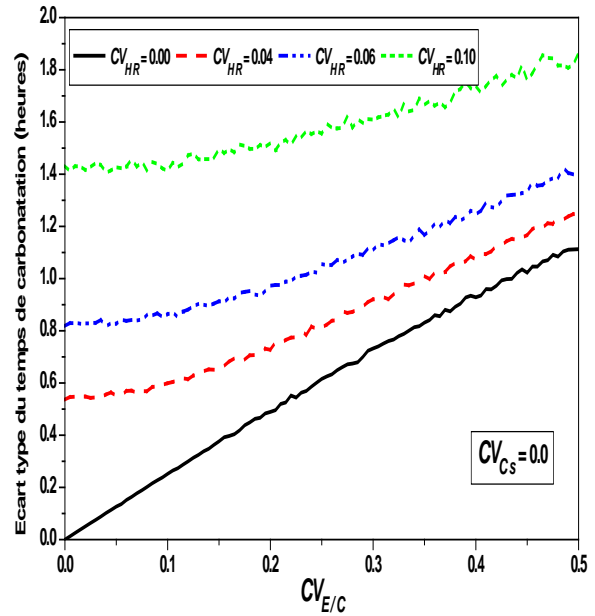
(d). Ecart type du temps de carbonatation par rapport au coefficient de variation de  $E/C$ .

Figure 6.1: Statistiques du temps de carbonatation par rapport au coefficient de variation de  $E/C$ .

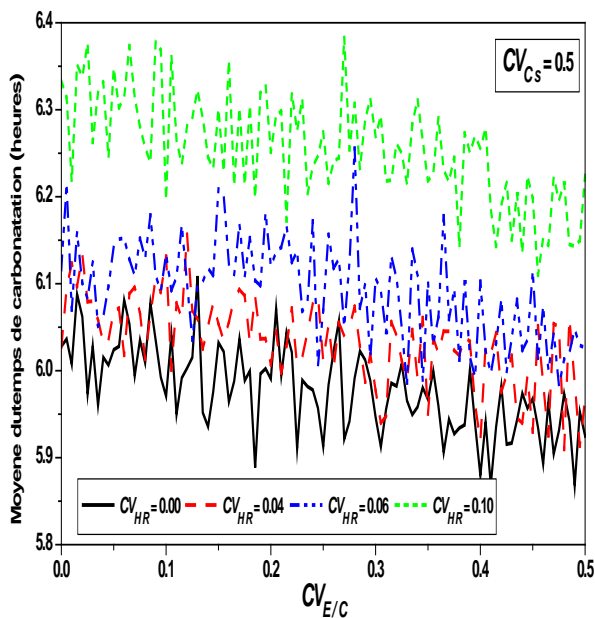
Dans les figures 6.2.a, 6.2.c est exposé la variation de la moyenne du temps de carbonatation par rapport au coefficient de variation de  $E/C$  pour  $Cv_{Cs} = 0.0$  et  $Cv_{Cs} = 0.5$ ,  $Cv_{HR}$  variant de 0.0 à 0.1.



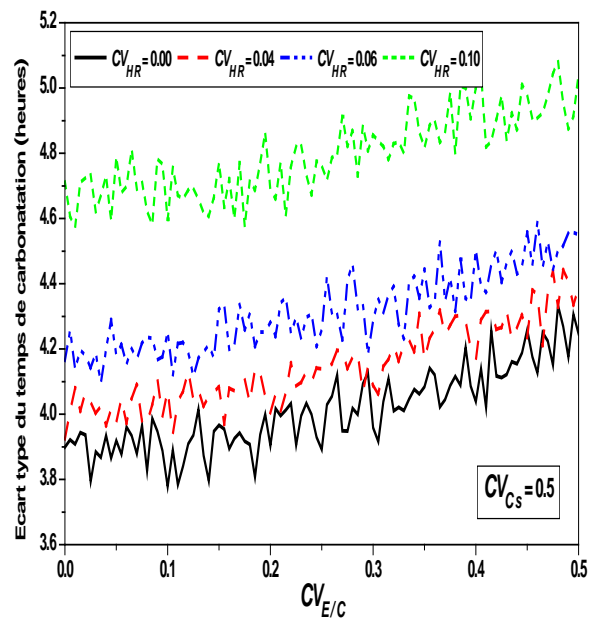
(a). Moyenne du temps de carbonatation par rapport au coefficient de variation de  $E/C$ .



(b). Ecart type du temps de carbonatation par rapport au coefficient de variation de  $E/C$ .



(c). Moyenne du temps de carbonatation par rapport au coefficient de variation de  $E/C$ .



(d). Ecart type du temps de carbonatation par rapport au coefficient de variation de  $E/C$ .

Figure 6.2: Statistiques du temps de carbonatation par rapport au coefficient de variation de  $E/C$ .

On observe que la moyenne du temps de carbonatation augmente lorsque le coefficient de variation de l'humidité relative  $Cv_{HR}$  augmente, elle est plus importante pour  $Cv_{Cs} = 0.5$  que pour  $Cv_{Cs} = 0.0$ . D'autre part, lorsque  $Cv_{E/C}$  augmente et pour toutes les valeurs de  $Cv_{Cs}$  et  $Cv_{HR}$ , on observe une atténuation de la moyenne du temps de carbonatation.

Nous pouvons conclure que le processus de carbonatation nécessite un temps plus long pour des grandes valeurs du coefficient de variation de l'humidité relative qu'à mesure que  $Cv_{E/C}$  diminue, la phase liquide dans les pores est importante pour permettre la diffusivité des oxydes de carbones à travers les pores.

L'écart type du temps de carbonatation par rapport au coefficient de variation de  $E/C$  est exprimé sur les figures 6.2.b, 6.2.d. Nous remarquons que, lorsque  $Cv_{E/C}$ ,  $Cv_{Cs}$  et  $Cv_{HR}$  augmentent l'écart type augmente de manière significative, indiquant que la diffusion des  $CO_2$  depuis l'extérieur vers le cœur du béton nécessite un temps plus long.

La figure 6.3 montre l'intervalle de confiance de la moyenne et de l'écart type du temps de carbonatation par rapport au coefficient de variation de  $E/C$ .

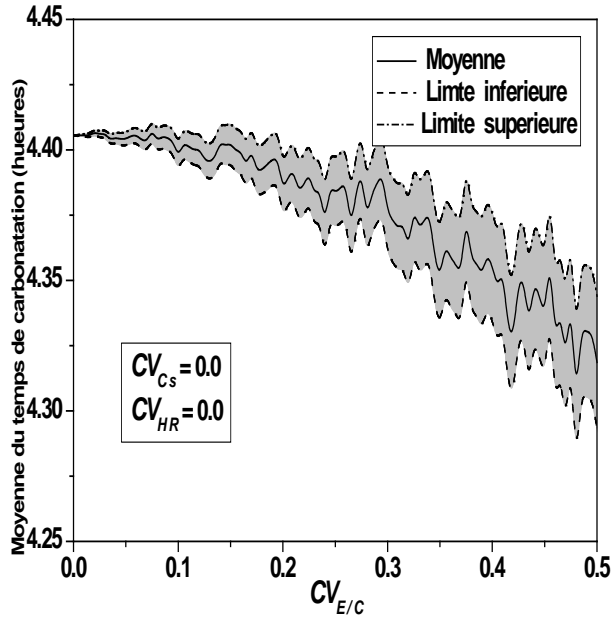
Comme le coefficient de variation  $Cv_{E/C}$  varie de 0 à 0.5, des diminutions de la valeur moyenne du temps de carbonatation de 3,22% et 1.96% sont observées respectivement sur les figures 6.3.a et 6.3.c.

Ces résultats indiquent que la prise en compte de l'incertitude concernant l'humidité relative, le rapport  $E/C$  et la pression du gaz  $Cs$  instantanément accélère le processus de carbonatation.

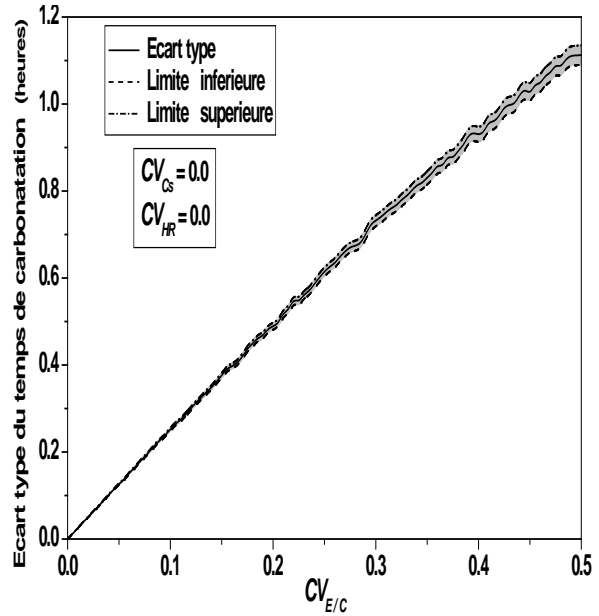
Les intervalles de confiance de la moyenne et l'écart type représentés sur les figures 6.3.c, 6.3.d sont importants et constants, indiquant que la variabilité du rapport eau /ciment affecte le temps de carbonatation avec un faible effet sur la valeur moyenne.

La vitesse de carbonatation du béton dépend principalement de la pénétration du dioxyde de carbone à l'intérieur de la matrice cimentaire. En effet, la diffusion du dioxyde de carbone à travers la structure poreuse du béton est déterminée par le rapport eau ciment et la porosité. Plus le coefficient de variation du rapport  $E/C$  est grand, plus la quantité d'eau libre qui peut

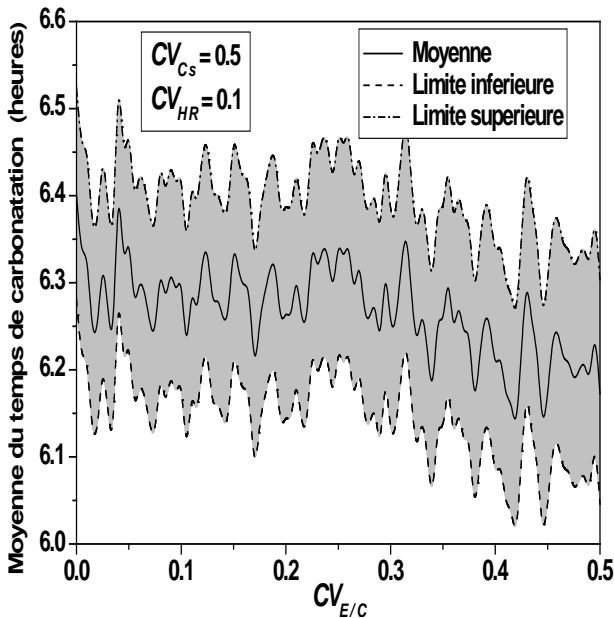
s'évaporer est importante. Par évaporation, l'eau laisse des vides et favorise la diffusion du dioxyde de carbone à travers le réseau poreux, pour une porosité importante, la quantité de dioxyde de carbone libéré dans les pores est importante et le temps nécessaire de carbonatation devient court.



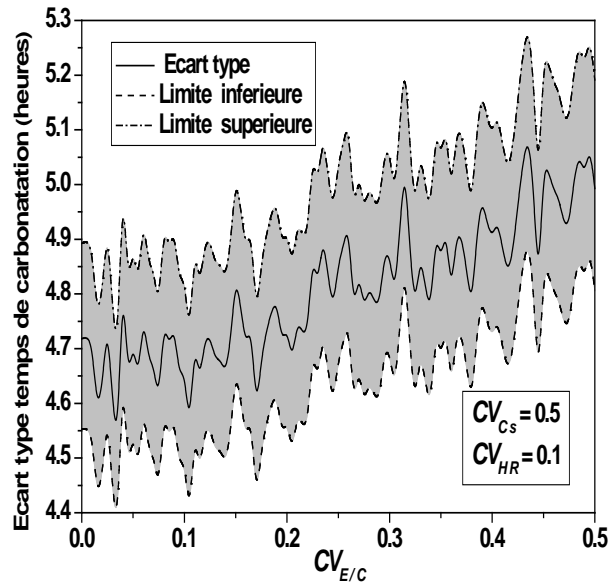
(a). Moyenne du temps de carbonatation par rapport au coefficient de variation de  $E/C$ .



(b). Ecart type du temps de carbonatation par rapport au coefficient de variation de  $E/C$ .



(c). Moyenne du temps de carbonatation par rapport au coefficient de variation de  $E/C$ .

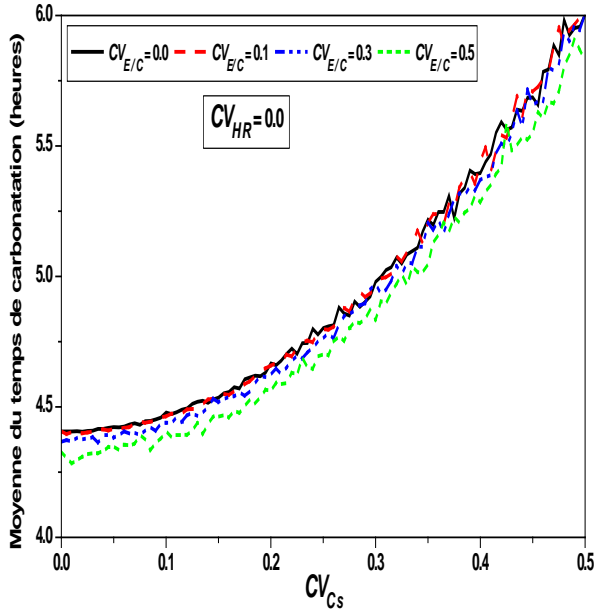


(d). Ecart type du temps de carbonatation par rapport au coefficient de variation de  $E/C$ .

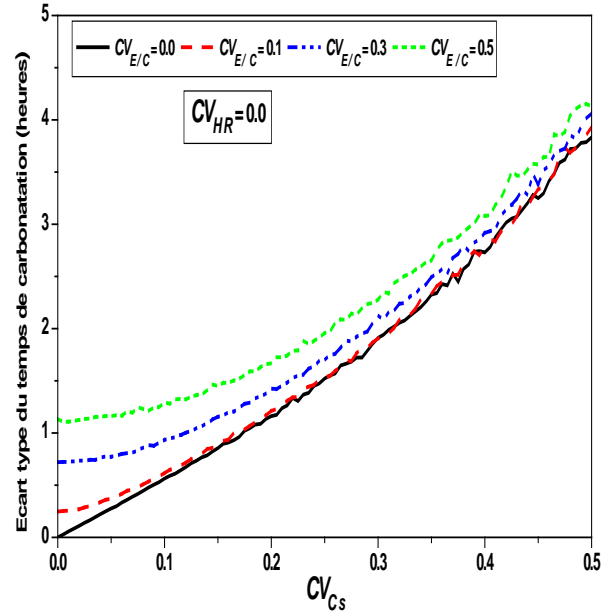
Figure 6.3 Statistiques du temps de carbonatation et intervalles de confiance par rapport au coefficient de variation de  $E/C$ .

6.2.2.2 Statistiques du temps de carbonatation en fonction des variabilités du  $C_s$

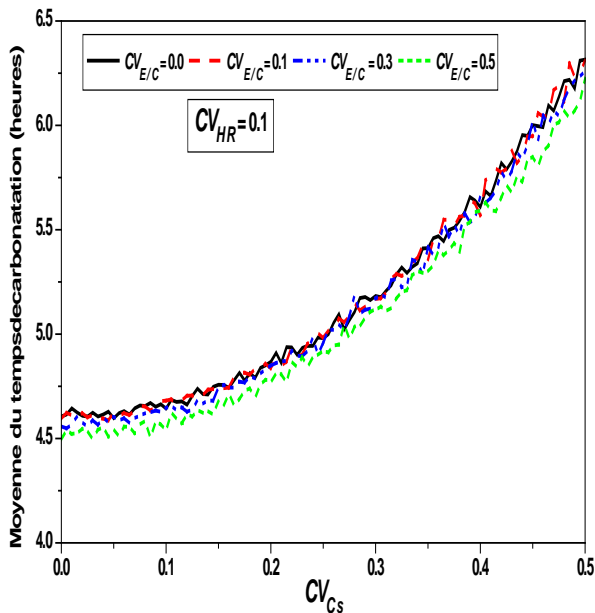
Les figures 6.4 et 6.5 représentent les statistiques du temps de carbonatation en fonction des variabilités de la pression du gaz carbonique  $C_s$ .



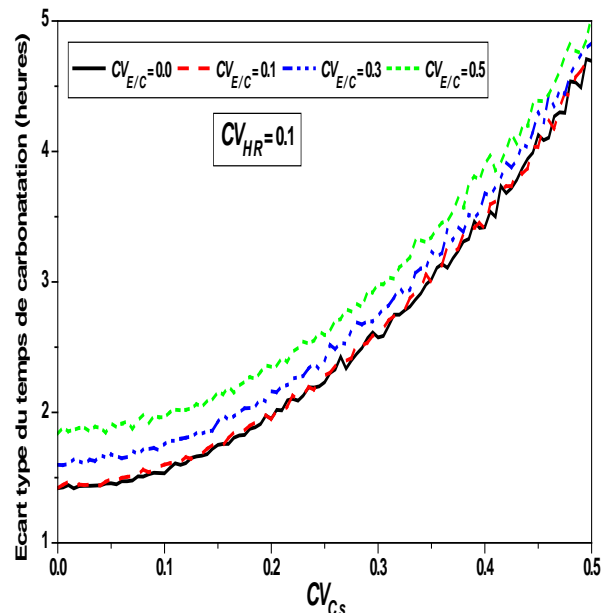
(a). Moyenne du temps de carbonatation par rapport au coefficient de variation de  $C_s$ .



(b). Ecart type du temps de carbonatation par rapport au coefficient de variation de  $C_s$ .



(c). Moyenne du temps de carbonatation par rapport au coefficient de variation de  $C_s$ .



(d). Ecart type du temps de carbonatation par rapport au coefficient de variation de  $C_s$ .

Figure 6.4: Statistiques du temps de carbonatation par rapport au coefficient de variation de  $C_s$ .

Les figures 6.4.a, 6.4.c, expriment la variation de la moyenne du temps de carbonatation avec le coefficient de variation de la pression de l'oxyde de carbone  $Cv_{HR}$  pour  $Cv_{HR} = 0.0$  et  $Cv_{HR} = 0.1$ , en variant  $Cv_{E/C}$  de 0 à 0.5. On observe que les courbes des valeurs moyennes du temps de carbonatation sont confondues pour toutes les valeurs de  $Cv_{E/C}$ , et les valeurs moyennes augmentent lorsque  $Cv_{HR}$  augmente, indiquant que l'incertitude sur l'humidité relative a un impact plus important sur le temps de carbonatation.

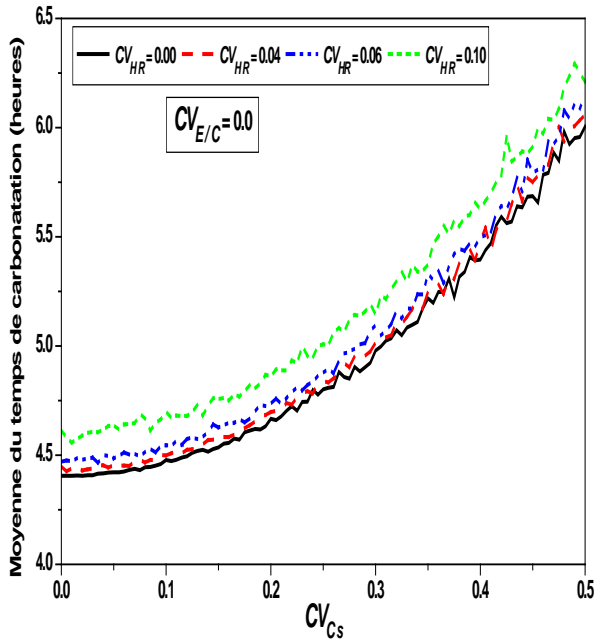
D'autre part, lorsque le coefficient de variation de la pression du gaz carbonique  $Cv_{Cs}$  augmente, le temps de carbonatation augmente entraînant un retard dans le processus de carbonatation.

L'écart type du temps de carbonatation par rapport au coefficient de variation de  $Cs$  est exprimé sur les figures 6.4.b, 6.4.d. Nous remarquons que les courbes des écarts types sont légèrement dispersées et la valeur de l'écart type augmente lorsque  $Cv_{Cs}$  et  $Cv_{HR}$  augmentent. La diffusion des  $CO_2$  dépend de l'humidité relative et de son incertitude. L'eau est un élément indispensable à la réaction de carbonatation, il est nécessaire d'avoir une certaine quantité d'eau pour dissoudre le gaz carbonique, elle doit être limitée pour faciliter son accès à la surface solide, et par conséquent la carbonatation aura lieu rapidement.

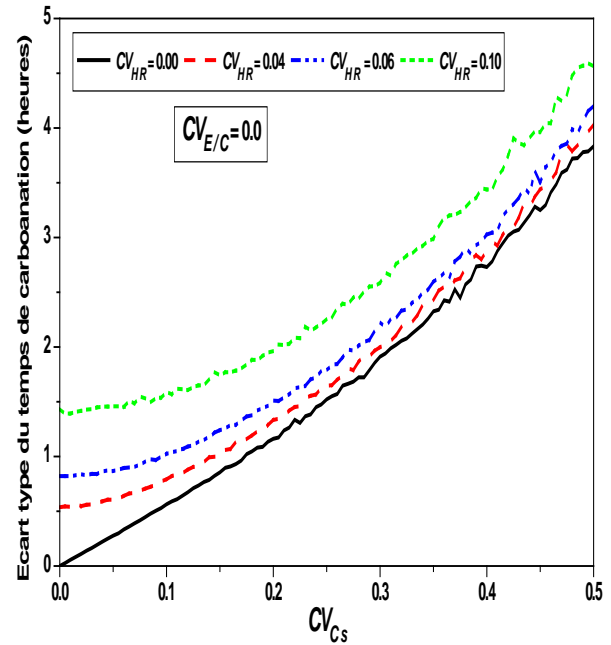
Dans les figures 6.5.a, 6.5.c est exposé la variation de la moyenne du temps de carbonatation par rapport au coefficient de variation de  $Cs$  pour  $Cv_{E/C} = 0.0$  et  $Cv_{E/C} = 0.5$ ,  $Cv_{HR}$  variant de 0.0 à 0.1. On observe qu'à mesure que  $Cv_{Cs}$  et  $Cv_{HR}$  augmentent, la moyenne du temps de carbonatation augmente. En outre, on remarque que les courbes obtenus pour  $Cv_{E/C} = 0.0$  et  $Cv_{E/C} = 0.5$  sont semblables, le temps correspondant à une profondeur de carbonatation allant jusqu'à l'armature dépend du coefficient de diffusion effectif du gaz carbonique  $D_{eff}$  qui en relation linéaire avec  $E/C$  et  $HR$  (équations 5.2, 5.5 et 5.6).

La carbonatation du béton a un impact sur le coefficient de diffusion effective, ce coefficient est diminué après la carbonatation, et l'interaction entre les ions de dioxyde de carbone et la surface de silicate de calcium d'hydrates (C-S□H) chargés négativement forme une double couche électrique sur la surface des pores et ralentit la diffusion de  $CO_2$  (GARRAULT-GAUFFINET, 1998).

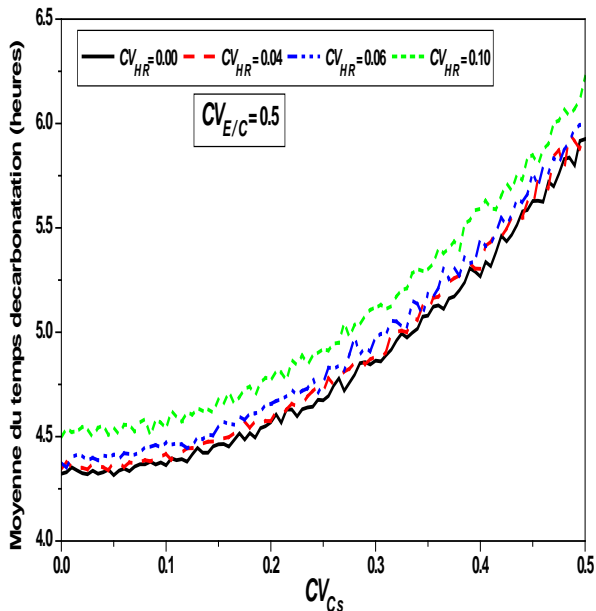
Les figures 6.5.b, 6.5.d expriment la variation de l'écart type du temps de carbonatation avec le coefficient de variation du  $C_s$ . L'écart type augmente lorsque  $CV_{C_s}$  et  $CV_{HR}$  augmentent pour  $CV_{E/C} = 0.0$  et  $CV_{E/C} = 0.5$ .



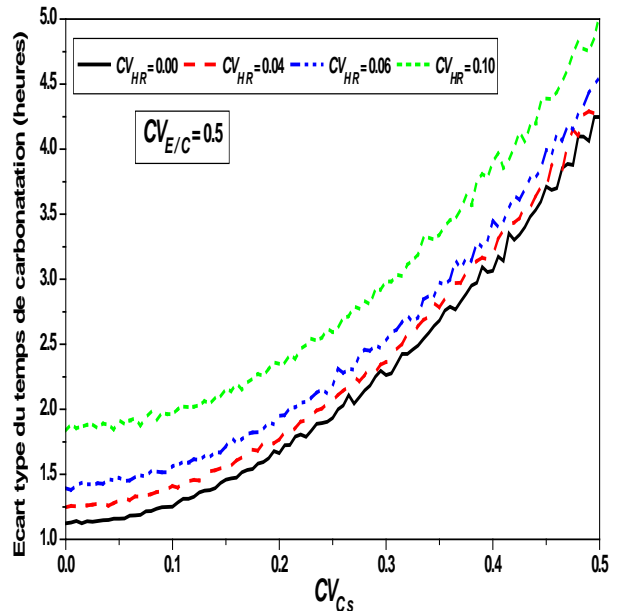
(a). Moyenne du temps de carbonatation par rapport au coefficient de variation de  $C_s$ .



(b). Ecart type du temps de carbonatation par rapport au coefficient de variation de  $C_s$ .



(c). Moyenne du temps de carbonatation par rapport au coefficient de variation de  $C_s$ .

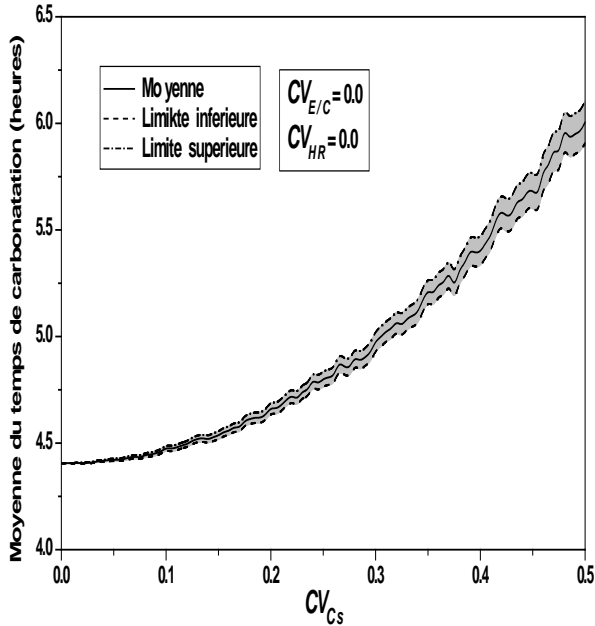


(d). Ecart type du temps de carbonatation par rapport au coefficient de variation de  $C_s$ .

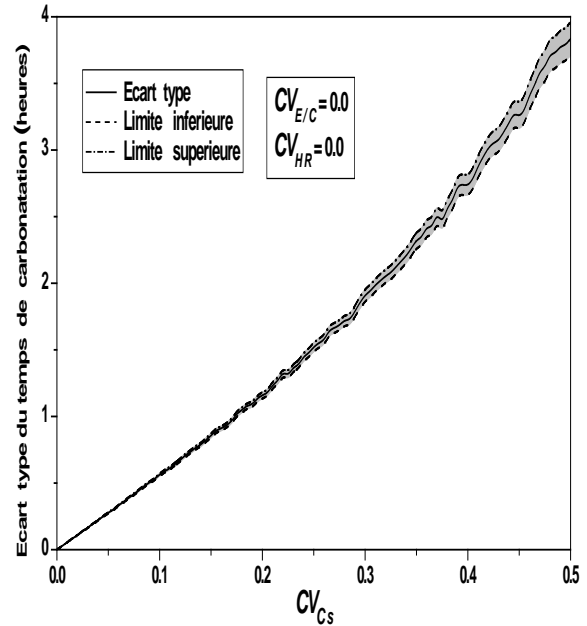
Figure 6.5: Statistiques du temps de carbonatation par rapport au coefficient de variation de  $C_s$ .

Ces résultats indiquent que le rapport eau/ciment contrôle la vitesse avec laquelle la carbonatation atteint l'armature.

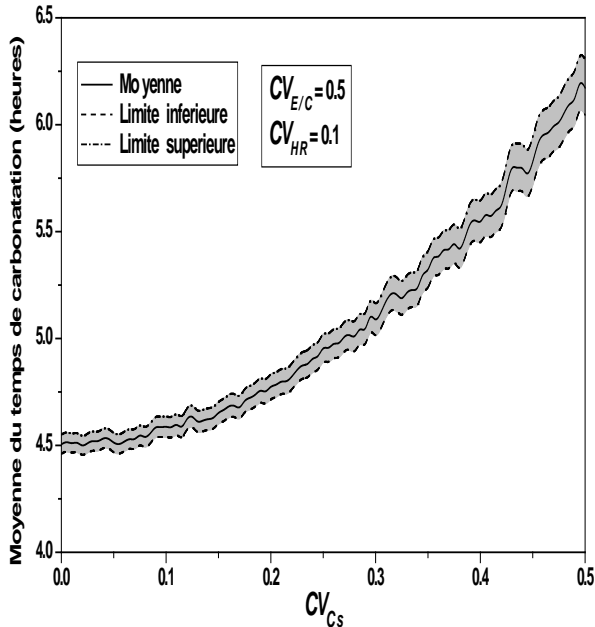
La figure 6.6 montre l'intervalle de confiance de la moyenne et de l'écart type du temps de carbonatation par rapport au coefficient de variation de  $C_s$ .



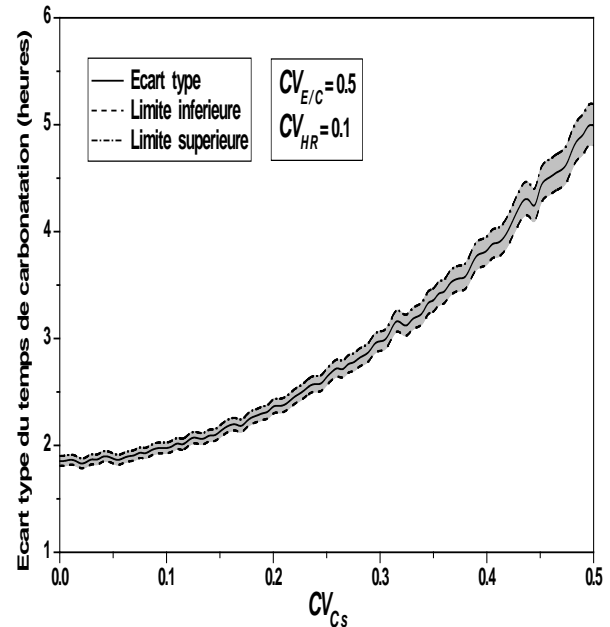
(a). Moyenne du temps de carbonatation par rapport au coefficient de variation de  $C_s$ .



(b). Ecart type du temps de carbonatation par rapport au coefficient de variation de  $C_s$ .



(c). Moyenne du temps de carbonatation par rapport au coefficient de variation de  $C_s$ .



(d). Ecart type du temps de carbonatation par rapport au coefficient de variation de  $C_s$ .

Figure 6.6 Statistiques du temps de carbonatation et intervalles de confiance par rapport au coefficient de variation de  $C_s$ .

Dans les figures 6.6.a, 6.6.c est exposé la variation de la moyenne du temps de carbonatation par rapport au coefficient de variation  $C_s$ .

La valeur moyenne du temps de carbonatation augmente de 4,51 à 6,17 heures (37%), ce qui indique que l'incertitude sur la concentration de  $CO_2$  entraîne un retard dans le processus de carbonatation. La réaction de l'hydrate de béton avec du dioxyde de carbone induit la production d'eau, plus la quantité de dioxyde de carbone libérée dans les pores est plus grande, plus la quantité d'eau formée lors de la carbonatation est importante, cette formation va également perturber le processus et augmenter le temps de carbonatation.

On remarque aussi sur les figures 6.6.b, 6.6.d une augmentation importante de l'écart-type avec une courbe parabolique lorsque le coefficient de variation de la pression du gaz carbonique  $C_{v_{C_s}}$  augmente.

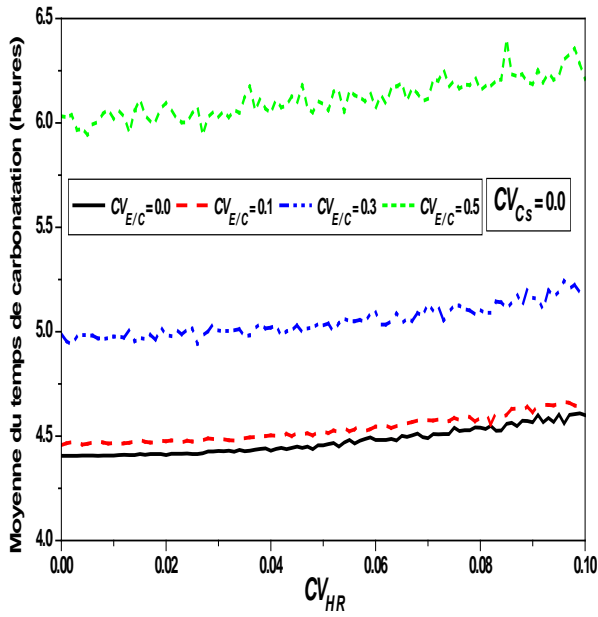
### 6.2.2.3 Statistiques du temps de carbonatation en fonction des variabilités du $HR$

Les figures 6.7 et 6.8 représentent les statistiques du temps de carbonatation en fonction des variabilités de l'humidité relative  $HR$ .

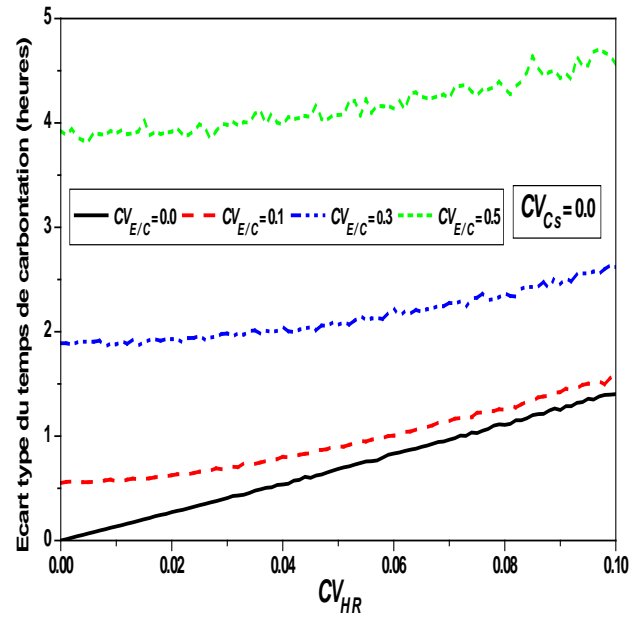
Les figures 6.7.a, 6.7.c et 6.7.b, 6.7.d, expriment respectivement la variation de la moyenne et l'écart type du temps de carbonatation avec le coefficient de variation de l'humidité relative pour  $C_{v_{C_s}} = 0.0$  et  $C_{v_{C_s}} = 0.5$ , en variant  $C_{v_{E/C}}$  de 0 à 0.5.

Ces figures montrent que pour les valeurs de  $C_{v_{E/C}} > 0.1$ , les courbes des valeurs moyennes et des écarts types du temps de carbonatation sont dispersées. Le temps de carbonatation augmente, qu'à mesure que  $C_{v_{HR}}$  et  $C_{v_{E/C}}$  augmentent.

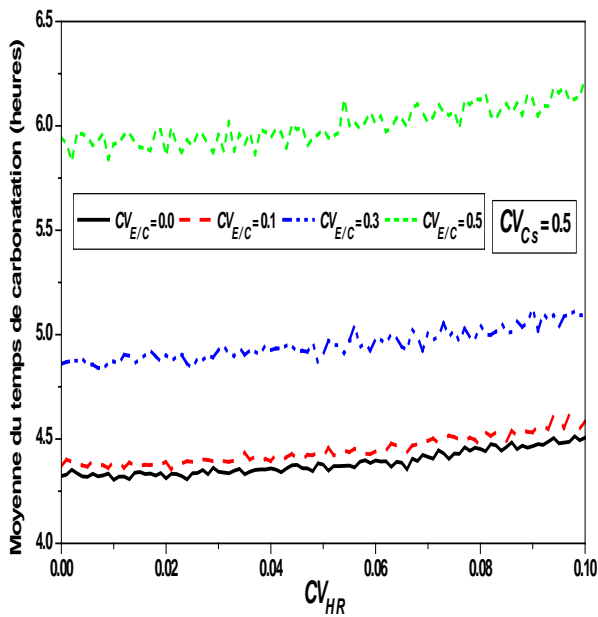
D'autre part, nous constatons aussi que le processus de carbonatation est indépendant du coefficient de variation  $C_{v_{C_s}}$ . Ce résultat indique que la variabilité de la pression du gaz carbonique pour des valeurs importantes des  $C_{v_{HR}}$  et  $C_{v_{E/C}}$  qui correspondent à un réseau poreux saturé d'eau, n'influence pas la cinétique de la carbonatation, sa valeur moyenne suffit de représenter son effet.



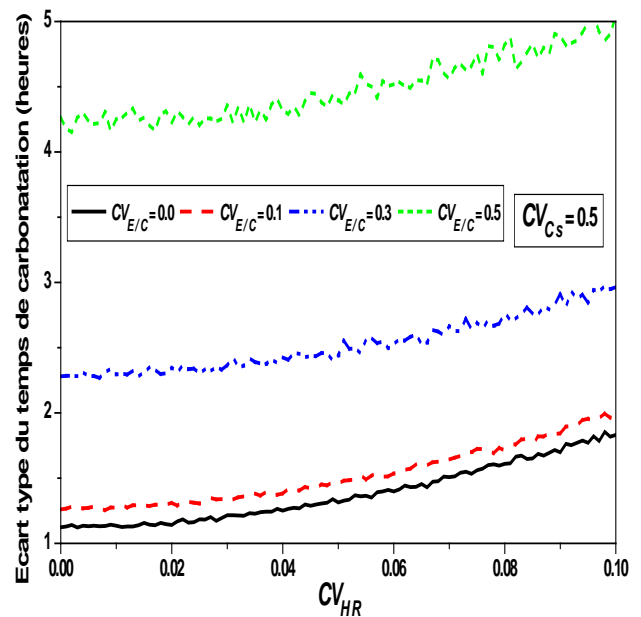
(a). Moyenne du temps de carbonatation par rapport au coefficient de variation de  $HR$ .



(b). Ecart type du temps de carbonatation par rapport au coefficient de variation de  $HR$ .



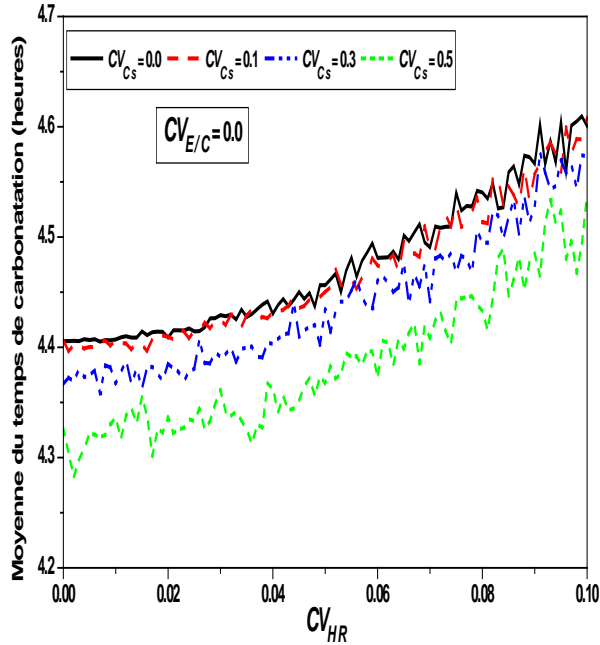
(c). Moyenne du temps de carbonatation par rapport au coefficient de variation de  $HR$ .



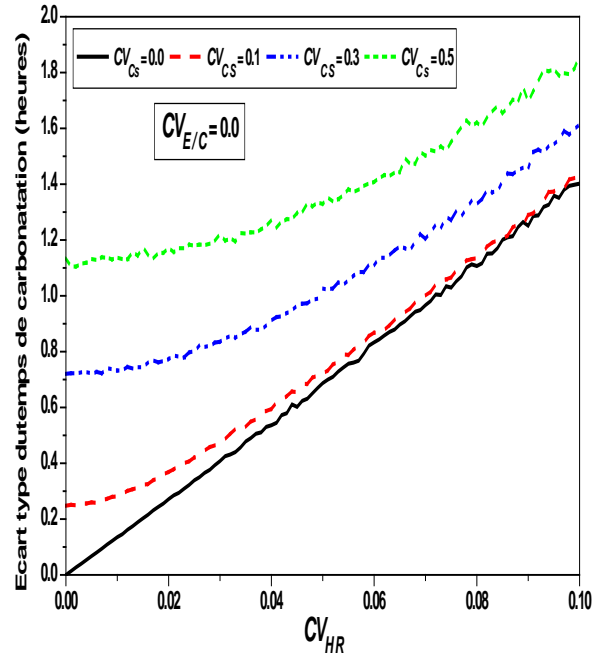
(d). Ecart type du temps de carbonatation par rapport au coefficient de variation de  $HR$ .

Figure 6.7: Statistiques du temps de carbonatation par rapport au coefficient de variation de  $HR$ .

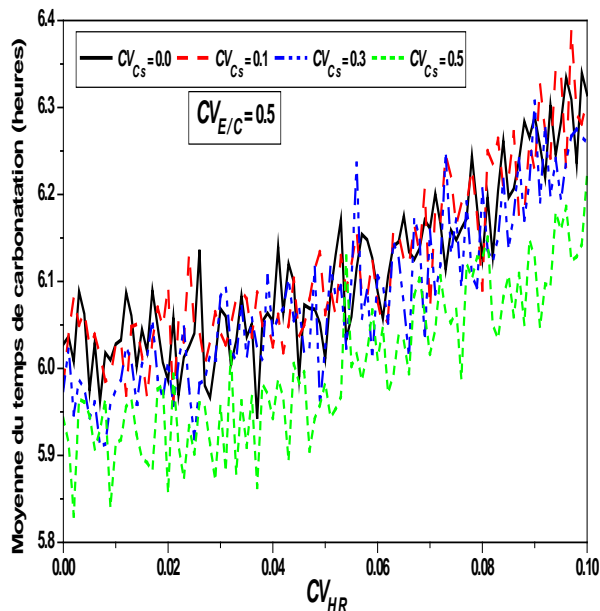
Dans les figures 6.8.a, 6.8.c est exposé la variation de la moyenne du temps de carbonatation par rapport au coefficient de variation de  $HR$  pour  $Cv_{E/C} = 0.0$  et  $Cv_{E/C} = 0.5$ ,  $Cv_{Cs}$  variant de 0.0 à 0.5.



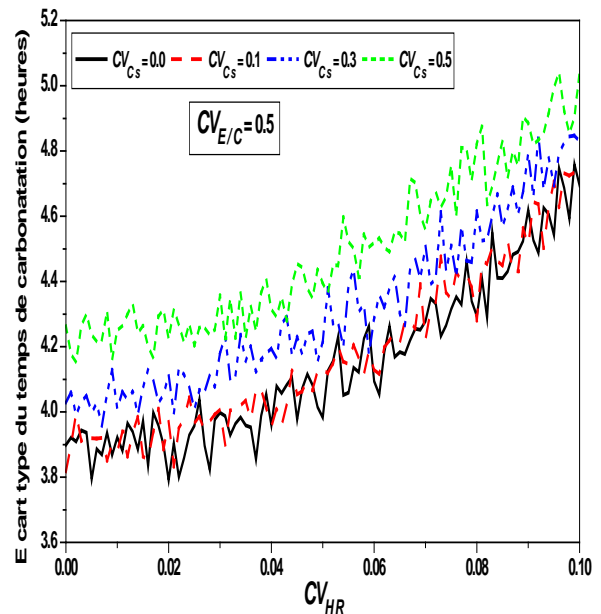
(a). Moyenne du temps de carbonatation par rapport au coefficient de variation de  $HR$ .



(b). Ecart type du temps de carbonatation par rapport au coefficient de variation de  $HR$ .



(c). Moyenne du temps de carbonatation par rapport au coefficient de variation de  $HR$ .



(d). Ecart type du temps de carbonatation par rapport au coefficient de variation de  $HR$ .

Figure 6.8: Statistiques du temps de carbonatation par rapport au coefficient de variation de  $HR$ .

Ces figures montrent que pour toutes les valeurs des coefficient de variation de l'humidité relative  $Cv_{HR}$ , une augmentation de la moyenne du temps de carbonatation est observée lorsque le coefficient  $Cv_{Cs}$  diminue.

Nous observons qu'à mesure que les coefficients de variation de l'humidité relative  $Cv_{HR}$  et du rapport eau/ciment  $Cv_{E/C}$  augmentent, le temps de carbonatation augmente aussi.

Les figures 6.8.b et 6.8.d montrent que, dans tous les cas, l'écart type diminue avec la diminution du coefficient  $Cv_{Cs}$ , indiquant que l'incertitude sur la pression  $Cs$  de l'oxyde de carbone influence très peu le temps de carbonatation.

La figure 6.9 montre l'intervalle de confiance de la moyenne et de l'écart type du temps de carbonatation par rapport au coefficient de variation de  $HR$ .

Comme les simulations Monte Carlo ont généré des échantillons avec des valeurs larges et que le coefficient  $Cv_{HR}$  varie de 0,0 à 0,1, la moyenne du temps de carbonatation augmente de 6 à 6,20 heures (3,33%), avec une valeur importante de son intervalle de confiance, comme montré dans la figure 6.9.c

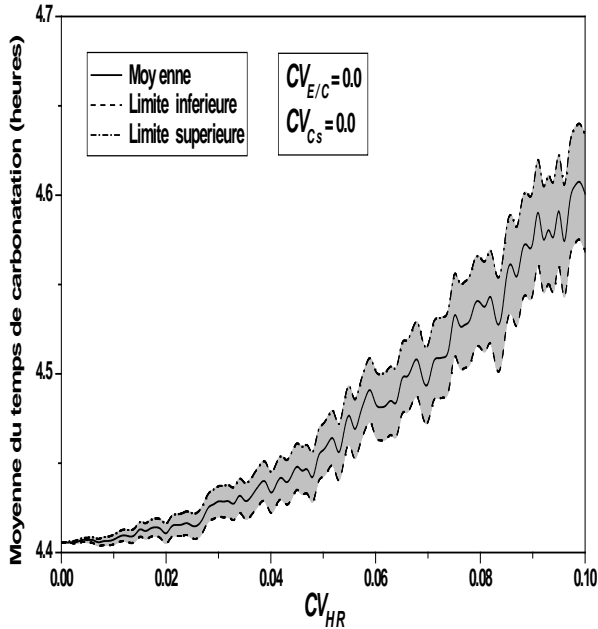
La courbe de l'écart-type exprimée sur la figure 6.9.d montre une forte augmentation avec une variation linéaire. Son intervalle de confiance est constant indiquant que la variabilité de l'humidité relative affecte le temps de carbonatation.

L'effet des grandes valeurs de l'humidité relative est prépondérant par rapport aux petites valeurs. La variabilité des  $HR$  entraîne un retard dans le processus de carbonatation c'est à dire une augmentation du temps carbonatation.

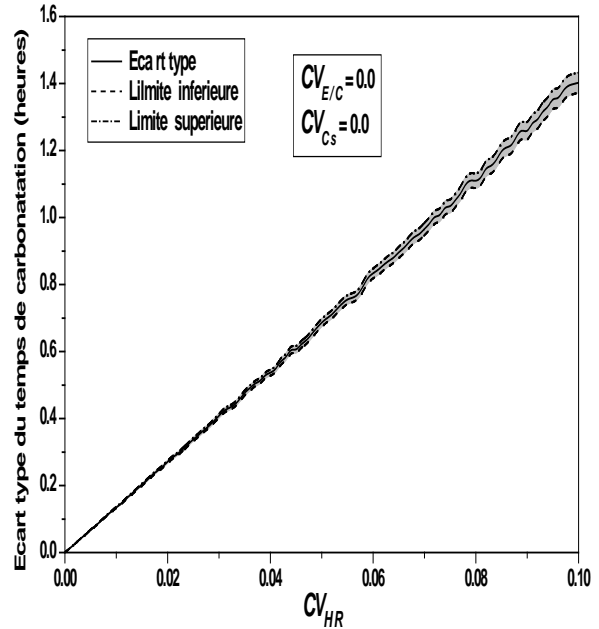
Les valeurs élevées du coefficient de variation de l'humidité relative  $Cv_{HR}$ , correspondent à un degré élevé de saturation des pores, et les processus de diffusion du dioxyde de carbone pour les minéraux de surface réactive deviennent extrêmement faibles, les mécanismes de réaction associée sont indisponibles.

Une remarque peut être faite ici, l'effet couplé de l'incertitude des trois paramètres stabilise le

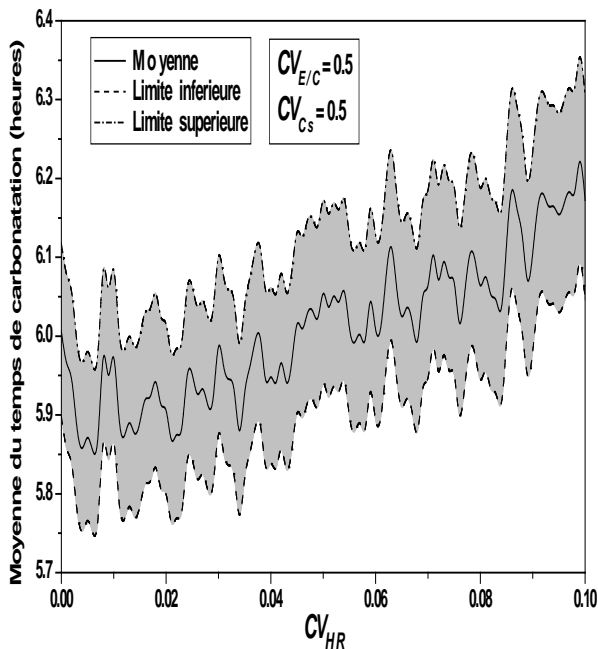
temps de carbonatation, voir figures 6.3.c, 6.3.d, 6.6.c, 6.6.d, 6.9.c et 6.9.d, indiquant que les paramètres aléatoires agissent dans l'opposition.



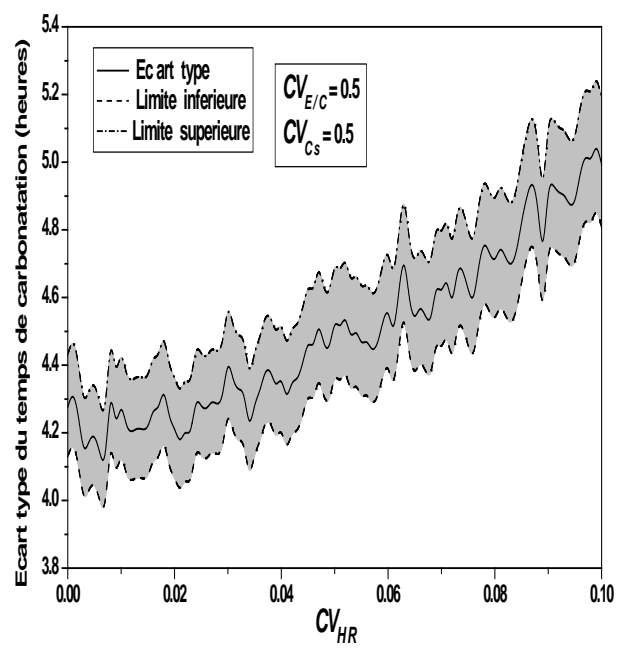
(a). Moyenne du temps de carbonatation par rapport au coefficient de variation de  $HR$ .



(d). Ecart type du temps de carbonatation par rapport au coefficient de variation de  $HR$ .



(c). Moyenne du temps de carbonatation par rapport au coefficient de variation de  $HR$ .



(d). Ecart type du temps de carbonatation par rapport au coefficient de variation de  $HR$ .

Figure 6.9: Statistiques du temps de carbonatation et intervalles de confiance par rapport au coefficient de variation de  $HR$ .

### 6.3. Conclusions

Dans ce chapitre, le temps nécessaire pour que le front de carbonatation parvienne jusqu'à l'armature d'un béton aléatoire est analysé. Les propriétés considérées sont l'humidité relative, le rapport eau/ciment et la pression du gaz carbonique, modélisés comme des variables aléatoires indépendantes. Ces propriétés sont obtenues en adoptant une distribution log-normale, qui permet d'analyser leur grande variabilité. Ainsi, les statistiques concernant le temps de carbonatation correspondant sont évaluées en utilisant des simulations de Monte Carlo combinées avec le modèle déterministe de Duracrete.

L'étude paramétrique réalisée prouve que, lorsque le coefficient de variation de la pression du gaz carbonique  $Cv_{C_s}$  augmente, le temps de carbonatation augmente entraînant un retard dans le processus de carbonatation. Ce résultat indique que la réaction des hydrates de béton avec du dioxyde de carbone induit la production d'eau. Plus la quantité de dioxyde de carbone libéré dans les pores est grande, plus la quantité d'eau formée lors de la carbonatation est importante, ce qui retarde le processus et augmente le temps de carbonatation.

La carbonatation du béton a un impact sur le coefficient de diffusion effective, ce coefficient est diminué après la carbonatation. L'interaction entre les ions de dioxyde de carbone et la surface de silicate de calcium d'hydrates (C-S-H) chargés négativement forme une double couche électrique sur la surface des pores et ralentit la diffusion de  $CO_2$ .

Les intervalles de confiance de la moyenne et l'écart types par rapport au coefficient de variation de  $E/C$  sont importants et constants, indiquant que la variabilité du rapport eau /ciment affecte le temps de carbonatation.

La vitesse de carbonatation du béton dépend de la diffusion du dioxyde de carbone à travers la sa structure poreuse, qui est déterminée par le rapport eau /ciment et la porosité. Pour les grandes valeurs des coefficients de variation du rapport  $E/C$ , la quantité d'eau évaporée laisse des vides et favorise la diffusion du  $CO_2$  à travers le réseau poreux. Pour une porosité importante, la quantité de dioxyde de carbone libéré dans les pores est importante et le temps nécessaire de carbonatation devient court. Nous pouvons conclure que, le rapport

eau /ciment et la perméabilité du béton à la diffusion du l'oxyde de carbone contrôle la vitesse avec laquelle la carbonatation atteint l'armature.

Pour des valeurs importantes du coefficient de variation de l'humidité relative, une augmentation du temps de carbonatation se produit avec un intervalle de confiance constant. Les valeurs élevées du coefficient de variation de l'humidité relative correspondent à un degré élevé de saturation des pores. Les processus de diffusion du dioxyde de carbone pour les minéraux de surface réactive deviennent extrêmement faibles et les mécanismes de réaction associée sont indisponibles.

Nous pouvons conclure de l'étude du temps de carbonatation que la diffusion des  $CO_2$  dépend de l'humidité relative et de son incertitude. L'eau est un élément indispensable à la réaction de carbonatation. Il est nécessaire d'avoir une certaine quantité d'eau pour dissoudre le gaz carbonique, elle doit être limitée pour faciliter son accès à la surface solide, et par conséquent la carbonatation aura lieu rapidement.

D'autre part, le processus de carbonatation est indépendant du coefficient de variation  $Cv_{Cs}$ . Ce résultat indique que la variabilité de la pression du gaz carbonique pour des valeurs importantes des  $Cv_{HR}$  et  $Cv_{E/C}$  qui correspondent à un réseau poreux saturé d'eau, n'influence pas la cinétique de la carbonatation, sa valeur moyenne suffit de représenter son effet.

En effet, le temps nécessaire pour que le front de carbonatation parvienne jusqu'à l'armature d'un béton dépend du coefficient de diffusion effectif du  $CO_2$ ,  $D_{eff}$ , qui est en relation linéaire avec  $E/C$  et  $HR$ . D'où l'importance de la prise en compte de l'effet couplé de l'incertitude de ces paramètres, qui stabilise le temps de carbonatation en agissant dans l'opposition dans n'importe quelle investigation stochastique de béton.

## **Conclusions et perspectives**

## Conclusions et perspectives

La carbonatation naturelle du béton peut conduire à l'amorçage et au développement de la corrosion des armatures. Cependant, les normes, les recommandations et les règles de l'art permettent d'assurer la qualité du béton et contribuent à sa durabilité.

L'étude de l'influence du caractère aléatoire du rapport  $E/C$ , de l'humidité relative, et de la pression du gaz carbonique sur la carbonatation du béton armé, prouve que :

✓ Le processus de carbonatation est indépendant du coefficient de variation de la pression du gaz carbonique ( $CV_{Cs}$ ). La variabilité de  $C_s$  pour des valeurs importantes des  $CV_{HR}$  et  $CV_{E/C}$  correspondent à un réseau poreux saturé d'eau, n'influence pas la cinétique de la carbonatation, sa valeur moyenne suffit de représenter son effet. Il est donc considéré comme déterministe dans le calcul de la profondeur de carbonatation et du temps correspondant.

✓ Pour les grandes valeurs du coefficient de variation de l'humidité relative ( $CV_{HR}$ ) correspondant à des  $HR > 65\%$ , et un accroissement du  $CV_{E/C}$ , la structure d'un matériau poreux est saturée d'eau. Le processus de diffusion du  $CO_2$  à la surface des réactifs minéraux est extrêmement faible. Le coefficient de diffusion effectif du  $CO_2$  ( $D_{eff}$ ) en phase liquide est plus faible que sous forme gazeuse.

✓ Le calcium de  $(CH)$ , de  $(C_3A.3Cs.H_{32})$  et de  $(C_3A.Cs.H_{12})$  est carbonaté quelle que soit la pression de  $CO_2$ . La quantité de carbonate des  $(C-S\text{□}H)$  dépend du degré d'hydratation du ciment et du ( $D_{eff}$ ) dans la zone de carbonate.

✓ La carbonatation du béton a un impact sur le  $D_{eff}$ , ce coefficient est diminué après la carbonatation. L'interaction entre les ions de  $CO_2$  et la surface des  $(C-S\text{□}H)$  chargés négativement forme une double couche électrique sur la surface des pores, et ralentit la diffusion de  $CO_2$ .

✓ La variabilité du rapport  $E/C$  a une grande influence sur les statistiques de la profondeur de carbonatation. L'accroissement du coefficient de variation du rapport  $E/C$  implique une progression du front de carbonatation, qui résulte principalement des mouvements de  $CO_2$  et de l'eau présente dans la texture poreuse.

✓ La cinétique de carbonatation est également affectée par la taille des pores. La profondeur de carbonatation a tendance à augmenter lorsque la porosité du béton augmente.

✓ La réaction des hydrates de béton avec du  $CO_2$  induit la production d'eau. Plus la quantité de  $CO_2$  libéré dans les pores est grande, plus la quantité d'eau formée lors de la carbonatation est importante, ce qui retarde le processus et augmente le temps de carbonatation.

✓ La diffusion du  $CO_2$  à travers la structure poreuse du béton est déterminée par le rapport  $E/C$  et la porosité. Plus le  $CV_{E/C}$  est grand, plus la quantité d'eau libre qui peut s'évaporer est importante. Pour une porosité importante, la quantité de  $CO_2$  libéré dans les pores est importante, et le temps de carbonatation  $T_1$  devient court.

✓ La diffusion du  $CO_2$  dépend de l'humidité relative et de son incertitude. L'eau est élément indispensable à la réaction de carbonatation. Il est nécessaire d'avoir une certaine quantité d'eau pour dissoudre le  $CO_2$ , elle doit être limitée pour faciliter son accès à la surface solide, et par conséquent la carbonatation aura lieu rapidement.

✓ Pour des valeurs importantes du coefficient de variation de l'humidité relative  $CV_{HR}$ , une augmentation du temps de carbonatation  $T_1$  se produit avec un intervalle de confiance constant. Les valeurs élevées du  $CV_{HR}$  correspondent à un degré élevé de saturation des pores. Les processus de diffusion du  $CO_2$  pour les minéraux de surface réactive deviennent extrêmement faibles et les mécanismes de réaction associée sont indisponibles.

✓ Le temps de carbonatation dépend du coefficient de diffusion effectif du  $CO_2$  ( $D_{eff}$ ), qui est en relation linéaire avec le rapport  $E/C$  et l'humidité relative.

Ainsi, cette analyse a mis en évidence l'importance de la prise en compte des variabilités du rapport eau/ciment et de l'humidité relative du milieu environnant, spécialement à cause de leurs effets sur la cinétique de la carbonatation du béton dans n'importe quelle investigation stochastique de béton.

Une perspective immédiate à ce travail, consiste à;

- intégrer dans les modèles de carbonatation les effets de la température, de façon à simuler des vitesses de carbonatation en environnements thermiques différents de celui des essais de laboratoires (20 °C).
- analyser l'influence des adjuvants et des additions, ainsi que les conditions de cures sur le phénomène de carbonatation par une approche probabilistes.

# **Bibliographie**

## Bibliographie

**ADENOT F.** Durabilité du béton: Caractérisation et modélisation des processus physiques et chimiques de dégradation du ciment. *Thèse de Doctorat de l'Université d'Orléans*, 1992.

**AFGC (Groupe de travail).** Conception des bétons pour une durée de vie donnée des ouvrages – Indicateurs de durabilité, *Conception des bétons pour une durée de vie donnée des ouvrages : Maîtrise de la durabilité vis-à-vis de la corrosion des armatures et de l'alcali réaction*. AFGC, Bagnoux, 2004; 30-41.

**AL-AKCHAR N, BAROGHEL-BOUNY V, RAHARINAIVO A.** Propagation du front de carbonatation dans les pâtes de ciment. *1<sup>ère</sup> Rencontre Internationale Science des Matériaux et Propriétés des Béton*, Toulouse, 1998; 247-255.

**ALMUSALLAM A.A.** Effect of degree of corrosion on the properties of reinforcing steel bars. *Construction and Building Materials, Vol.15*, 2001; 361-368.

**BADAOUI A.** Sur la corrosion du béton armé. *Thèse de Magister de l'Université de Houari Boumedienne*, Alger, 2003.

**BADAOUI A, BADAOUI M, KHARCHI F.** Carbonic gas randomness effect on reinforced concrete carbonation. *Engineering*, 2012; 4: 6-10.

**BADAOUI A, BADAOUI M, KHARCHI F.** Effect of the randomness of the relative humidity on the phenomenon of carbonation of the reinforced concrete. *Advanced Materials Research*, 2012; 340:181-183.

**BADAOUI M, BERRAH M.K, MEBARKI A.** Soil Height Randomness Influence on Seismic Response: case of an Algiers site. *Computers and Geotechnics*, 2009; 36(1-2): 102-112.

**BADAoui M, BERRAH M.K, MEBARKI A.** Depth to bedrock randomness effect on the design spectra in the city of Algiers (Algeria). *Engineering Structures*, 2010; 32(2): 590-599.

**BADAoui M.** Influence de l'hétérogénéité géologique et mécanique sur la réponse des sols multicouches. *Thèse de Doctorat de l'école Nationale Polytechniques d'Algérie et de l'école Doctorale Matériaux Ouvrages Durabilité Environnement Structure Polytechniques (ED MODE), Université Paris-Est, Marne –La-Valée, France, 2008.*

**BAKKER R.F.M.** Model to calculate the rate of carbonation resistance of concrete under different climatic conditions. *Rapport du CEMIJ by Laboratorium, Ijmuiden, Pays-bas, 1993; 6.*

**BALAYSSAC J.P.** Relation entre performances mécaniques, microstructure et durabilité des bétons. *Thèse de Doctorat de l'Institut Nationale des Sciences Appliquée de Toulouse, 1992.*

**BALAYSSAC J.P, DETRICHE C.H, DIAFAT N.** Influence de la durée de cure humide sur la durabilité du béton de peau. *RILEM, Matériaux et Constructions, 1998: 31(209).*

**BAROGHEL-BOUNY V.** Caractérisation des pâtes de ciment et des bétons, méthodes, analyse et interprétations. *Laboratoire Centrale des Ponts et Chaussée, France, 1994.*

**BARON J, OLLIVIER J.P.** Les bétons, bases et données pour leur formulation. *Publication ATHIL, Eyrolles, 1996 ; 552.*

**BAROTH J, SCHOEFS F, BREYSSE D.** Fiabilité des ouvrages, *Hermès-Lavoisier, 2011 ; ISBN 978-2-7462-3144-3.*

**BARY B, SELIER A.** Coupled moisture-carbon dioxide-calcium transfer model for carbonation of concrete. *Cement and Concrete Research, 2004; 34: 1859-1872.*

**BIER T.A, KROPP J, HILSDORF H.K.** Carbonation and realcalinisation of concrete and hydrated cement paste. *MASODurability of construction materials, 1987: 927-934.*

**BIN G, PARONG M, GUOBIN W.** Carbonation of hydrated calcium silicates. *Chinese Journal of silicates sciences, 1984: 12.*

**BRIANT J.** Phénomènes d'interface, agents de surface : principe et modes d'action. *Ecole Nationale Supérieure du Pétrole et des moteurs. Editions Technique, France, 1989.*

**CEB.** New approach to durability design: an example for a carbonation induced corrosion .*CEB, Bulletin, 1997; 238.*

**CHAUSSADENT T.** Etat des lieux et réflexions sur la carbonatation du béton armé .*Rapport du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (Paris), Thème de recherche OA9, 1997: 64.*

**CHAUSSADENT T, BAROGHEL-BOUY V, RAFAI N, AMMOUCHE A et HORNAIN H.** Influence du rapport E/C sur l'hydratation, la microstructure et les déformations endogènes de pâtes de ciments durcies. *Revue Française de Génie Civil, 2001; 5(2/3): 217-230.*

**CHOUDHURY M.A.** et al. Reliability analysis of a buried concrete target under missile impact. *International Journal of Impact Engineering, 2002; 27(8): 791-806.*

**COWIE J, GLASSER FP.** The reaction between cement and natural waters containing dissolved carbon dioxide. *Advances in Cement Research, 1992; 4(15): 119-134.*

**DAKHAMOUCHE F.** Carbonatation de bétons adjuvantes à base de ressources locales algériennes. *Thèse de Doctorat de l'Université de Mentouri, Constantine, Algérie, 2009.*

**DANCKWERTS PV.** Gas-Liquid Reaction. McGraw-Hill Book Company, NewYork, 1970.

**DEHMOUS H.** Fiabilité et micromécanique des matériaux composites -Application à la passerelle de Laroin, *Institut National Polytechnique de Toulouse, 2007*

**DARTS.** Durable and Reliable Tunnel Structures: Data, Deterioration modeling. *European Commission, Growths 2000, Contract GIRD-CT-2000-00467, Project GrD1-25633, 2004.*

**DEBY F.** Approche probabiliste de la durabilité des bétons en environnement marin. *Thèse de Doctorat de l'Université de Toulouse, 2008.*

**DEGROOT DJ, BAECHEER GB.** Estimating autocovariance of in-situ soil properties. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1993; 119(1): 147–166.

**DHEILLY R.M, TUDO J.** Etude du système CaO – H<sub>2</sub>O – CO<sub>2</sub> pour un stockage optimal de la chaux, *Ciments, Bétons, Plâtres, Chaux*, 1996; 820 : 161-164.

**DITLEVSEN O, MADSEN H. O.** Structural reliability methods. J. Wiley & Sons, 1996

**DUNSTER A.M.** An investigation of the carbonation of the cement paste using trimethylsilylation. *Advances in Cement Research*, 1989; 2(7): 99-106.

**DUPRAT F.** Reliability of RC beams under chloride-ingress. *Construction and Building Materials*, 2007; 21: 1605–1616.

**DUPRAT F ,SELLIER A.** Probabilistic approach to corrosion risk due to carbonation via an adaptive response surface metho. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 2006; 21: 207-216.

**DURACRETE.** Quantification statistique des variables à l'état limite. *Contract BRPR-CT95-0132, Projet BE95-1347, EU-Brite EuRam III*, 2000.

**DUVAL R.** La durabilité des armatures et du béton d'enrobage. *La durabilité des bétons, nnCollection de l'ATHIL Presses des Ponts et Chaussées*, Paris, 1992;173-226.

**EN 206-1.** Béton - partie 1 : spécifications, performance, production et conformité. *Association Française de Normalisation*, 2004.

**EN-197-1.** Ciments – Partie 1 : Composition, spécifications et critères et conformité des ciments courants, 2000.

**EN 10080.** Acier pour armature du béton. *Association Française de Normalisation*, 2005.

**EWERTSON C, PETERSSON P.E.** The influence of curing conditions on the permeability and durability of concrete. Results from a field exposure test. *Cement and Concrete Research*, 1993; 23(3): 683-692.

**FENTON GA.** Simulation and analysis of random fields. Ph.D. thesis, Princeton University, 1990.

**FIB.** Model Code for service life design, Task Group 5.6, February 2006.

**FIB.** Model Code for service life design, Task Group 5.6, 2009.

**GARBOCZI, BENTZ.** Multiscale analytical of concrete. *Numerical theory of the diffusivity of concrete*, 1998; 77-88.

**GARRAULT-GAUFFINET S.** Direct observation of the growth of calcium silicate hydrate on alite and silica surfaces by atomic force microscopy . *Compte rendu de l'Académie des Sciences de Paris*, 1998; 327(4): 231-236.

**GIRARD C.** La carbonatation du Béton Armé. *Division ST-Technical Facilities Management, CERN, workshop*, Genève, Suisse, 1998.

**GROVES G.W, RODWAY D .I, RICHARDSON I.G.** The carbonation of hardened cement pastes. *Advances in Cement Research*, 1990; 3: 117-125.

**GUPTA S, MANOHAR CS.** Probability distribution of extremes of Von Mises stress in randomly vibrating structures. *Journal of Vibration and Acoustics*, 2005; 127(6): 547-555.

**HOUST Y.F.** Diffusion de gaz, carbonatation et retrait de la pâte de ciment durcie. *Thèse de Doctorat de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausann*, 1992.

**HUET B.** Comportement à la corrosion des armatures dans un béton carbonaté. Influence de la chimie de la solution interstitielle et d'une barrière de transport. *Thèse INSA Lyon*, 2005.

**HYVERT N, DELLIER A, DUPRAT F.** L'intérêt de l'approche probabiliste pour l'optimisation de la durabilité des produits en béton. *26<sup>ème</sup> rencontres universitaires de génie civil*, Nancy, 2008.

**HYVERT N.** Application de l'approche probabiliste à la durabilité des produits préfabriqués en béton. *Thèse de Doctorat Université de Toulouse*, 2009.

**KHARCHI F, BADAOUI A.** Reinforced concrete in arid and aggressive conditions. *CANMET/ACI International conference Thessalonica Greece*, 2003.

**KERBOUA N.** Mesure de la corrosion des aciers dans le béton armé- Etude bibliographique et exemple pratique. *Thèse de Magister de l'Université de Houari Boumedienne, Alger*, 2007.

**KOUZNETSOVA T, IVASCHENKOS S, SAMCHENKO S.** Stability of ettringite under carbonate corrosion at hydration of sulpho-aluminate. *In 11<sup>th</sup> international congress on the chemistry of cement (ICCC)*, Durban (Afrique du sud), 2003; 2061-2076.

**KREIJGER P.C.** The skin of concrete – Composition and Properties. *Materials and Structures*, 1984; 17(100): 275-283.

**LAMBERT G.** Les gaz à effet de serre. *La Recherche*, 1992; 23(243): 550-556.

**LEMAIRE M.** Evaluation des indices de fiabilité associés à des modèles de mécanique des structures. *Revue Française de Mécanique*, 1992; 145-154.

**LEMAIRE M.** Conception fiable des structures. *Journées Fiabilité des Matériaux et des Structures*, Nantes, 2008.

**LEMAIRE M, CHATEAUNEUF A.** Fiabilité des structures". *Ed. Hermes-Lavoisier*, 2005; ISBN 2-7462-1057-6.

**LEPORATI E.** The assessment of structural safety. A comparative statistical study of the evolution and use of level 3, level 2, and level 1 methods. *Research Study Press*.1977.

**LOO Y.M, CHIN M.S, TAM C.T, ONG K.C.G. A.** Carbonation prediction model for accelerated carbonation testing of concrete. *Magazine of Concrete*, 1994; 46(168): 191-200.

**MADSEN H. O, KRENK S, LIND N. C.** Methods of structural safety. *Prentice – Hall*, 1986.

**MASSE S.** Synthèse hydrothermale d'hydrates et silicates tricalciques. Analyse structurale en phase solide. Etude comparative avec les ciments utilisés pour chemiser les puits de pétrole. *Thèse de Doctorat de l'université Pierre et Marie Curie, France, 1993.*

**MAYNADIER J.** Approches statistiques et fiabilistes en dynamique des structures. *Thèse de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, 2003.*

**MIRAGLIOTTA R.** Modélisation des processus physico-chimiques de la carbonatation des bétons préfabriqués – Prise en compte des effets de paroi. *Thèse de Doctorat de l'Université de la Rochelle, 2000.*

**MOHAMMED-DJAFARI A.** Maximum d'entropie et problèmes inverses en imagerie. *Traitement du Signal, 1994 : 87-116.*

**MORIANDE.** Electrochimie. *Editions Dunod, 2005.*

**MULLARD J, STEWART M.** Reliability based service life prediction of corrosion affected concrete structures. *Journal of Structural Engineering 2004; 130: 1570–1577.*

**NA 16002.** Béton: spécifications, performance, production et conformité, 2004.

**NA 442.** *Ciments – Partie: Composition, spécifications et critères et conformité des ciments courant, 2006*

**NEVILLE A.** Properties of concrete. *Fourth and Final edition, Ed. John Wiley and Sons, New York, 1995; 844.*

**NEVILLE A.** Consideration of durability of concrete structures: past, present and future. *Materials and structures, 2001; 34:114-118.*

**NGOC T. V.** Contribution à l'étude de la corrosion par carbonatation du béton armé: approche expérimentale et probabiliste. *Thèse de doctorat, INSA Toulouse, France, 2011.*

**NGUYEN X.S.** Algorithmes probabilistes appliquées à la durabilité et à la mécanique des ouvrages de Génie Civil. *Thèse de doctorat, INSA Toulouse, France, 2007.*

**NOUR A, SLIMANI A, LAOUAMI N.** Foundation settlement statistics via finite element analysis. *Journal Computers and Geotechnics*, 2002; 29(8): 641-672.

**PAPADAKIS V.G, VAYENAS C.G, FARDIS M.N.** Fundamental modelling and experimental investigation of concrete carbonation . *ACI Materials Journal*, 1991a; 88(4): 363-373.

**PAPADAKIS V.G, VAYENAS C.G, FARDIS M.N.** Experimental investigation and mathematical modelling of the concrete carbonation problem. *Chemical Engineering Science*, 1991b; 46: 1333-1338.

**PAPOULIS A.** Probability, random variables, and stochastic processes. *McGraw-Hill*, 1991.

**PARROTT L.J.** A review of carbonation in reinforced concrete. *Cement and Concrete Association*, 1987; 41.

**PAUL R, GARVEY P R.** Probability methods for cost uncertainty analysis. *Marcel Dekker, INC*, 1999; *New York Basel*.

**PENTI M.** Carbonation of reinforced concrete façade panels – A field investigation. *Nordic Concrete Research*, 1992; 1(11): 110-122.

**POTTER R., HO D.** Quality of cover concrete and its influence of durability. *Concrete Durability ACI SP-100*, éd. Katarine & Bryant Mather, 1987; 11: 423-467.

**RAHMAN A.A, GLASSER F.P.** Comparative studies of the carbonation of hydrated Cements. *Advances in Cement Research*, 1989; 2(6): 49-54.

**RAHARINAIVO A.** La corrosion et la protection des aciers dans le béton. *Ed. Presse de l'École Nationale des Ponts et Chaussées*, 1998.

**RITA DE CÀSSIA S.** Contribution à l'analyse probabiliste de la performance des ponts en béton armé. *Thèse de Doctorat de l'Ecole Nationale des Pontset Chaussées, France, 2004.*

**ROZIERE E, TURCRY P, LOUKILI A.** Etude des bétons soumis au risque de carbonatation par le concept d'équivalence de performances. *24<sup>èmes</sup> Rencontres Universitaires de Génie Civil, La Grande Motte. 2005.*

**SADOUKI H.** L'effet de paroi : son influence sur les propriétés du béton superficiel. *Chronique des Matériaux de Construction, 1987; 11-15.*

**SAETTA A.V, SCHREFLER B.A, VITALINI R.V.** 2-D model for carbonation and moisture / heat flow in porous materials. *Cement and Concrete Research, 1995; 25(8): 1703-1712.*

**SAUMAN Z, LASH V.** Long term carbonation of the phases  $3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.6\text{H}_2\text{O}$  and  $3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{SiO}_2.4\text{H}_2\text{O}$ . *Cement and Concrete Research, 1972; 2(4):453- 446.*

**SCHNEIDER J.** Introduction to Safety and Reliability of Structures *Structural Engineering Documents 5, Ed. Iabse, 1997.*

**SELLIER A.** Modélisations probabilistes du comportement de matériaux et de structures en génie civil. *Thèse de doctorat, ENS Cachan, Université Paris VI, France, 1995*

**SHINOZUKA M.** Monte Carlo solution of structural dynamics. *Technical report No. 19, department of Civil Engineering and Engineering Mechanics, Columbia University, New York, 1972b.*

**SHINOZUKA M, Jan CM.** Digital Simulation of Random Processes and it Applications. *Journal of Sound and Vibration, 1972; 25(1): 111–128.*

**SHINOZUKA M.** Digital simulation of random processes in engineering mechanics with the aid of FFT techniques. *Stochastic Problems in Mechanics, Edited by Ariaratnan ST and Leipholtz HHE, University of Waterloo Press, Waterloo, 1974.*

**SHINOZUKA M, LENOE E** .A probabilistic model for spatial distribution of material properties. *Eng. Fracture Mechanics*, 1976; 8: 217-227.

**SHINOZUKA M**. Structural response variability. *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, 1987a; 13(EM6):825-842.

**TALAH A**. Corrosion des BHP à base de pouzzolane. *Thèse de Doctorat de l'Université de Houari Boumedienne, Alger*, 2012

**THIERY M**. Exemple d'application du modèle de carbonatation in situ. *BLPC*, 2007 ; 270-271.

**THIERY M**. Modélisation de la carbonatation atmosphérique des bétons – Prise en compte des effets cinétiques et de l'état hydrique. *Thèse de Doctorat de l'Ecole Nationale des Pontset Chaussées*, France, 2005.

**THIERY, VILAIN, PLATRET**. 3Effect of carbonation on density, microstructure and liquid water saturation concrete. *Proc. 9th Eng. Conf. On Advances in cement and concrete*, USA, 2003 ;481-490.

**THOFT-CHRISTENSEN P**. Modelling of deterioration of reinforced concrete structures, Reliability and optimization of structures systems. *Proceedings of the ninths IFIP WG 7.5 working conference on reliability and optimization of structural systems*, 2000; 15-25.

**VALLS S, VASQUEZ E**. Accelerated carbonation of sewage sludge cement- sand mortars and its environmental impact"; Article; 2002.

**VANMARCKE E**. Random fields: analysis and synthesis. *MIT Press, Cambridge, Massachusetts*,1983.

**VERVISCH-FORTUNÉ I**. Sensibilité de la technique d'émission acoustique à la corrosion des armatures dans le béton. *Thèse de Doctorat Université de Toulouse*, 2009.

**VOLPE EV**. Closure relations as determined by the maximum entropy method and near equilibrium conditions. *PhD Thesis. Stanford University*, 2000.

**VOLPE EV, BAGANOFF D.** Maximum entropy pdfs and the moment problem under near-Gaussian conditions. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 2003; 18(1): 17-29.

**XIANTUO C, RUIZHEN Z, XIAORONG G.** Kinetic study of ettringite carbonation reaction. *Cement and concrete research*, 1994; 24(7): 1383-1389.

**YING-YU L, QUI-DONG W.** The mechanism of carbonation of mortars and the dependence of carbonation on pore structure. *ACI-SP 100, Concrete Durability*, 1987; 1915-1943.

**ZHOU Q, GLASSER FP.** Kinetics and mechanism of the carbonation of ettringite. *Advances in Cement Research*, 2000; 12(3): 131-136.

## Annexe 1

### Données complémentaires sur les modèles de Carbonatation

#### A1.1 Le modèle de Ying-Yu et Qui-Dong

Le coefficient de diffusion  $a_1$  (m<sup>2</sup>/s) est quantifié à partir d'une mesure de la porosité  $E_c$  (%) du matériau suivant la relation empirique :

$$\ln(a_1) = 105,66.E_c - 0,877 \quad (\text{A.1.1})$$

#### A1.2 Le modèle de Papadakis, Vayenas et Fardis

Le coefficient de diffusion effectif est obtenu par la relation empirique :

$$D_{\alpha C}^e = 1,64 \cdot 10^{-6} \cdot \varepsilon_p^{1,8} \cdot \left(1 - \frac{\text{H.R.}}{100}\right)^{2,2} \quad (\text{A.1.2})$$

Avec

- H.R. : humidité relative dans un béton (%) ;
- $\varepsilon_p$  : porosité du béton (%).

#### A1.3 Le modèle de Al-Akchar, Baroghel-Bouny et Raharinaivo

La pénétration du CO<sub>2</sub> dans la matrice cimentaire est décrite par les lois de diffusion de Fick avec une diffusivité du dioxyde de carbone  $D$  (m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>) qui varie avec la profondeur du matériau par rapport à la surface exposée  $x$  (m).

La réaction chimique avec la portlandite est modélisée en supposant que la quantité,  $C$  de CO<sub>2</sub> qui diffuse, est diminuée avec une cinétique de réaction  $g$  (mol.m<sup>-3</sup>.s<sup>-1</sup>) :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial D}{\partial x} \cdot \frac{\partial C}{\partial x} - \gamma \quad (\text{A.1.3})$$

La vitesse  $\gamma$  de  $\text{CO}_2$  réagissant avec la matrice cimentaire correspond à la combinaison des différentes vitesses des réactions chimiques élémentaires successives entre le  $\text{CO}_2$  et les espèces contenant l'élément calcium :

$$\gamma = K_{\text{OH}} \cdot [\text{OH}^-] \cdot C \quad (\text{A.1.4})$$

Avec :

- $K_{\text{OH}}$  : coefficient pris égal à  $8500 \text{ l.mol}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  ;
- $[\text{OH}^-]$  : concentration molaire en hydroxydes dans une pâte de ciment ( $\text{mol.m}^{-3}$ ) ;
- $C$  : concentration molaire en  $\text{CO}_2$  de la phase gazeuse au contact d'une pâte de ciment ( $\text{mol.m}^{-3}$ ).

Les grandeurs  $[\text{OH}^-]$  et  $C$  sont reliées par les constantes d'équilibre des réactions élémentaires (ki) :

$$k_1 \mu^4 + k_2 \mu^3 + k_3 C^3 \cdot \mu^2 - (k_4 C^2 + k_5) \cdot \mu - 2k_6 \mu^2 = 0 \quad (\text{A.1.5})$$

Avec :

- $k_1 = 2,53 \cdot 10^{15}$  ;
- $k_2 = 1$  ;
- $k_3 = 7,11 \cdot 10^4$  ;
- $k_4 = 1 \cdot 10^{-14}$  ;
- $k_5 = 6,95 \cdot 10^{-23}$  ;
- $k_6 = 3,47 \cdot 10^{-24}$ .

La concentration en  $\text{CO}_2$  est défini dans le temps et l'espace par une résolution numérique par différence finie et éléments finis.

#### A1.4 Le modèle de Bakker

Le paramètre  $b$  (kg/m<sup>3</sup>) est évalué en utilisant la relation suivante :

$$b = w - 0,25 \cdot c \cdot D_H - 0,15 \cdot c \cdot D_H \cdot D_{gel} - w \cdot D_H \cdot D_{cap} \quad (\text{A.1.6})$$

Avec :

- $w$  : teneur en eau du béton (kg.m<sup>-3</sup>) ;
- $c$  : teneur en ciment du béton (kg.m<sup>-3</sup>) ;
- $D_H$  : degré d'hydratation (%) ;
- $D_{gel}$  : quantité d'eau contenue dans les micropores (%) ;
- $D_{cap}$  : quantité d'eau contenue dans les pores capillaires (%).

Après  $n$  cycles d'humidification/séchage, la profondeur de carbonatation suit une loi du type :

$$x_c(n) = A \cdot \sqrt{t_{eff}(n)} \quad (\text{A.1.7})$$

Où  $t_{eff}(n)$  (années) est le temps effectif de carbonatation tel que :

$$t_{eff}(n) = \sum_{i=1}^n t_d(i) - \left( \frac{x_c(i-1)}{b} \right)^2 \quad (\text{A.1.8})$$

Avec :

- $t_d$  : durée de la  $i$ ème période de séchage (années);

- $\left( \frac{x_c(i-1)}{b} \right)^2$  : durée nécessaire au  $i$ ème séchage pour que le front de séchage atteigne le front de carbonatation, correspondant au  $(i-1)$ ème cycle (années).

### A1.5 Le modèle Oxand

Dans le modèle Oxand, le coefficient de transport du béton  $k$  (m/an<sup>0,5</sup>) est calculé par :

$$k = \sqrt{365} \cdot \left( \frac{1}{2,1 \cdot \sqrt{Rc_{28}}} - 0,06 \right) \quad (\text{A.1.9})$$

Avec :

$Rc_{28}$  la résistance mécanique en compression du béton à 28 jours (Pa).

L'influence de l'humidité relative H.R. est exprimée par :

$$f(\text{H.R.}) = -3,5833 \cdot \text{H.R.}^2 + 3,4833 \cdot \text{H.R.} + 0,2 \quad (\text{A.1.10})$$

### A1.6 Le modèle du Task Group 5.1 du CEB

Le coefficient  $a$  (kg.CO<sub>2</sub>.m<sup>-3</sup>) représentant la quantité de CO<sub>2</sub> nécessaire pour une carbonatation du matériau est calculée d'après la relation :

$$a = 0,75 \cdot C \cdot c \cdot \text{DH} \cdot \frac{M_{\text{CO}_2}}{M_{\text{CaO}}} \quad (\text{A.1.11})$$

Avec :

- $C$  : teneur en CaO du ciment (kg.m<sup>-3</sup>) ;
- $c$  le dosage en ciment du béton (kg.m<sup>-3</sup>) ;
- $\text{DH}$  : degrés d'hydratation du ciment ;
- $M_x$  : masse molaire d constituant  $x$  (g.mol<sup>-1</sup>) ;

### A1.7 Le modèle Duracrete

Le coefficient de diffusion effectif du dioxyde de carbone,  $D_{\text{eff},0}$ , est calculé par la relation :

$$D_{\text{eff},0} = k_t \cdot D \quad (\text{A.1.12})$$

Avec :

- $k_t$  : paramètre prenant en compte l'évolution du matériau

- D : coefficient de diffusion effectif du CO<sub>2</sub> (m<sup>2</sup>.s-1).

Le paramètre  $k_e$  prend en considération l'influence du niveau d'humidité sur le coefficient de diffusion:

$$k_e = \left( \frac{1 - \left( \frac{\text{H.R.}_{\text{réelle}}}{100} \right)^{f_e}}{1 - \left( \frac{\text{H.R.}_{\text{réf}}}{100} \right)^{f_e}} \right)^{g_e} \quad (\text{A.1.13})$$

Avec :

- H.R.réelle : humidité relative du milieu (%) ;
- H.R.réf : humidité relative de référence (%) ;
- $f_e$  : exposant (-) ;
- $g_e$  : exposant (-).

L'humidité relative de référence (H.R.réf) est déterminée à partir des conditions optimales (65 %)

Les exposants  $f_e$  et  $g_e$  ont été déterminés au moyen d'un lissage des courbes obtenues à partir des données réelles issues d'essais.

L'étude DARTS a permis ainsi d'obtenir les valeurs suivantes :

- $g_e$  (-) : paramètre constant de valeur égale à 2,5 ;
- $f_e$  (-) : paramètre constant de valeur égale à 5,0.

Le paramètre  $k_c$  prend en compte l'influence de la cure sur la carbonatation des matériaux.

L'étude

DARTS obtient, à partir d'un calcul statistique, l'équation A.14 pour ce paramètre :

$$k_c = \left( \frac{t_c}{7} \right)^{b_c} \quad (\text{A.1.14})$$

Avec :

- $t_c$  : durée de la cure (jours) ;
- $b_c$  : exposant de la régression linéaire (-). Sa valeur moyenne est égale à -0,567.

### A1.8 Le modèle de Bary et Sellier

La formation de la calcite doivent être apportés à la solution interstitielle par dissolution des phases solides ou par diffusion.

$$\frac{\partial(\varphi \cdot Sr \cdot [Ca^{2+}])}{\partial t} = (\varphi_{Ca})_{diffusion} + (\varphi_{Ca})_{solide} - \varphi \cdot Sr \cdot N_{CaCO_3} \quad (\text{A.1.15})$$

L'équation de la conservation de la masse d'eau s'exprime de la manière suivante :

$$\rho_l \cdot \varphi \cdot \frac{\partial Sr}{\partial t} + k_{sl} \cdot \left[ \rho_l \cdot Sr \cdot \frac{\partial V_d}{\partial Ca} - M_{H_2O} \cdot \frac{\partial \omega_{IS}}{\partial Ca} \right] \cdot \frac{\partial Ca}{\partial t} - \rho_l \cdot Sr \cdot V_{CaCO_3} \cdot \varphi \cdot Sr \cdot N_{CaCO_3} + \text{div}[k_l \cdot k_{rl} \cdot p_c \cdot \text{grad}(Sr)] = \quad (\text{A.1.16})$$

Avec :

- $f$  : porosité connectée ;
- $k_{sl}$  : fonction décrivant l'influence du degré de saturation du matériau sur les processus réactionnels ;
- $k_l$  : paramètre, fonction du taux de saturation du matériau ;
- $k_{rl}$  : fonction permettant de traduire l'impact du taux de saturation du matériau sur la valeur de la porosité totale ;
- $p_l$  : masse d'eau par unité de volume ;
- $V_d$  : fraction volumique des hydrates décalcifiés ;
- $w_s$  : teneur en eau des phases solides ;
- $p_C$  : pression partielle de  $CO_2$  en phase gazeuse.

L'équation de conservation de la masse de CO<sub>2</sub> s'exprime de la manière suivante :

$$(1-Sr) \cdot p_c \cdot k_{si} \cdot \frac{\partial V_d}{\partial C_a} \cdot \frac{\partial C_a}{\partial t} + \varphi \cdot (1-Sr) \cdot \frac{\partial p_c}{\partial t} - \varphi \cdot p_c \cdot \frac{\partial Sr}{\partial t} + \varphi \cdot Sr \cdot N \cdot [RT - (1-Sr) \cdot p_c \cdot V_{caCO_2}] - \text{div}(f \cdot D_c \cdot \text{grad} p_c) = 0 \quad (\text{A.1.17})$$

Avec :

- D<sub>c</sub> : coefficient de diffusion du CO<sub>2</sub> (m<sup>2</sup>.s-1) ;
- f : facteur de résistance traduisant la tortuosité ;
- p<sub>c</sub> : pression partielle de CO<sub>2</sub> (Pa).

La porosité totale f du matériau est évaluée par la relation suivante :

$$\phi = 1 - (V_{CH} + V_{C-S-H} + V_{AFm} + V_{AR}) \quad (\text{A.1.18})$$

Les quantités des phases composant la matrice cimentaire sont calculées d'après les équations d'équilibre (*tableau A.1*), les phases aux composants élémentaires du ciment anhydre, supposant que l'hydratation du ciment soit complète

| Phase solide en présence | Équation d'équilibre utilisée   |
|--------------------------|---|
| Portlandite              | $\log(Ca^{2+}) + 2\log(OH^-) = -5.15$   |
| CSH(1,65)                | $1.65 \log(Ca^{2+}) + \log(H_2SiO_4^{2-}) + 1.3 \log(OH^-) = -11.7$             |
| CSH(1,45)                | $1.45 \log(Ca^{2+}) + \log(H_2SiO_4^{2-}) + 0.9 \log(OH^-) = -10.6$             |
| CSH(0,90)                | $0.90 \log(Ca^{2+}) + \log(H_2SiO_4^{2-}) - 0.2 \log(OH^-) = -7.3$              |
| CSH(0,85)                | $0.85 \log(Ca^{2+}) + \log(H_2SiO_4^{2-}) - 0.3 \log(OH^-) = -6.9$              |
| Ettringite               | $6 \log(Ca^{2+}) + 3 \log(SO_4^{2-}) + 2 \log(Al(OH)_4^-) + 4 \log(OH^-) = -42$ |
| Monosulfoaluminate       | $4 \log(Ca^{2+}) + \log(SO_4^{2-}) + 2 \log(Al(OH)_4^-) + 4 \log(OH^-) = -27$   |
| Hexahydrate              | $3 \log(Ca^{2+}) + 2 \log(Al(OH)_4^-) + 4 \log(OH^-) = -22.9$                   |
| Al(OH) <sub>3</sub>      | $\log(Al(OH)_4^-) - \log(OH^-) = -1.4$  |

Tableau A.1.1 Phases solides et équations d'équilibres utilisées pour les hydrates.

Le nombre de moles de CO<sub>2</sub> passant en solution par unité de temps et par unité de volume de solution interstitielle s'exprime par la relation suivante :

$$\varphi_{CO_2} = k_{gl}(Sr) \cdot (p_{CO_2^g} - p_{CO_2^l}) \quad (A.1.19)$$

Avec :

- Sr : fraction volumique de l'espace poreux connecté, occupé par l'eau, fonction du degré de saturation de la porosité connectée ;

-  $k_{gl}(Sr)$  : coefficient de transfert de masse ;

-  $p_{CO_2^g}$

- la pression de CO<sub>2</sub> dans la phase gazeuse en équilibre avec la solution interstitielle du béton (Pa)

-  $p_{CO_2^l}$  : pression de CO<sub>2</sub> à l'interface (Pa).

(A.1.20)

:

La zone « 0 » correspond au matériau sain et la zone « 5 » au matériau totalement carbonaté où la pression partielle  $p_{CO_2}$  est égale à celle de l'atmosphère, soit 32 Pa. Les zones 1 à 4 sont des zones décalcifiées (plus ou moins avancées) et carbonatées (présence de calcite).

$$N_{CaCO_3} = \alpha \cdot \phi_{CO_2} \cdot [Ca^{2+}] \quad (A.20)$$

La zonation de la pâte de ciment est modélisée comme présentée dans le tableau A.2.

| Zone 5                                       | Zone 4  | Zone 3  | Zone 2  | Zone 1  | Zone 0  |
|--|---|---|---|---|---|
| Phases solides en présence                   |   |   |   |   |   |
| Calcite                                      | Calcite                                       | Calcite                                       | Calcite                                       | Calcite                                       |   |
|  | CSH(0,90)                                     | CSH(1,45)                                     | CSH(1,65)                                     | CH  | CH  |
|  | CSH(0,85)                                     | CSH(0,90)                                     | CSH(1,45)                                     | CSH(1,65)                                     | CSH(1,65)                                     |
|  |   | Ett   | Ett   | Ett   | Ett   |
|  | Al(OH) <sub>3</sub>                           | Al(OH) <sub>3</sub>                           | Mono  | Mono  | Mono  |
| Espèces de base en solution interstitielle   |   |   |   |   |   |
| Ca <sup>2+</sup>                             | Ca <sup>2+</sup>                              | Ca <sup>2+</sup>                              | Ca <sup>2+</sup>                              | Ca <sup>2+</sup>                              | Ca <sup>2+</sup>                              |
| OH <sup>-</sup>                              | OH <sup>-</sup>                               | OH <sup>-</sup>                               | OH <sup>-</sup>                               | OH <sup>-</sup>                               | OH <sup>-</sup>                               |
| H <sub>3</sub> O <sup>+</sup>                | H <sub>3</sub> O <sup>+</sup>                 | H <sub>3</sub> O <sup>+</sup>                 | H <sub>3</sub> O <sup>+</sup>                 | H <sub>3</sub> O <sup>+</sup>                 | H <sub>3</sub> O <sup>+</sup>                 |
|  | Al(OH) <sub>4</sub> <sup>-</sup>              | Al(OH) <sub>4</sub> <sup>-</sup>              | Al(OH) <sub>4</sub> <sup>-</sup>              | Al(OH) <sub>4</sub> <sup>-</sup>              | Al(OH) <sub>4</sub> <sup>-</sup>              |
|  |   | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>                 | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>                 | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>                 | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>                 |
|  | H <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | H <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | H <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | H <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | H <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> |
| CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>                | CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>                 | CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>                 | CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>                 | CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>                 |   |
| Espèces complexes en solution interstitielle |   |   |   |   |   |
|  | Ca(OH) <sup>+</sup>                           | Ca(OH) <sup>+</sup>                           | Ca(OH) <sup>+</sup>                           | Ca(OH) <sup>+</sup>                           | Ca(OH) <sup>+</sup>                           |
|  |   | CaSO <sub>4</sub> <sup>0</sup>                | CaSO <sub>4</sub> <sup>0</sup>                | CaSO <sub>4</sub> <sup>0</sup>                | CaSO <sub>4</sub> <sup>0</sup>                |
| CO <sub>2</sub> <sup>0</sup>                 | CO <sub>2</sub> <sup>0</sup>                  | CO <sub>2</sub> <sup>0</sup>                  | CO <sub>2</sub> <sup>0</sup>                  | CO <sub>2</sub> <sup>0</sup>                  |   |
| H <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> <sup>0</sup>  | H <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> <sup>0</sup>   | H <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> <sup>0</sup>   | H <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> <sup>0</sup>   | H <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> <sup>0</sup>   |   |
| HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>                | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>                 | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>                 | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>                 | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>                 |   |
| Espèce de base dans la phase aérée           |   |   |   |   |   |
| CO <sub>2</sub>                              | CO <sub>2</sub>                               | CO <sub>2</sub>                               | CO <sub>2</sub>                               | CO <sub>2</sub>                               |   |

**Tableau A.2 :** Zonation de la pâte de ciment pour le calcul des concentrations dans la solution interstitielle.

## Annexe 2

### La durabilité des bétons dans les normes NA 16002 et NF EN 206-1

#### A2.I. La norme NA 16002 .BÉTON: spécifications, performances, production et conformité

La norme **NA 16002** s'applique aux bétons de structure qu'ils soient des bétons prêts à l'emploi ou des bétons réalisés sur chantier par l'utilisateur du béton, destinés aux bâtiments et aux ouvrages de génie civil.

Elle spécifie les exigences applicables aux constituants du béton, aux propriétés du béton frais et durci et à leur vérification, aux limitations imposées à la composition du béton, à la spécification du béton, à la livraison du béton frais, aux procédures de contrôle de production, aux critères de conformité et à l'évaluation de la conformité.

Cette norme ne s'applique pas aux bétons qui ne sont pas structuraux (béton de remplissage, béton de calage pour les bordures de trottoir, béton de propreté...) ainsi qu'à des bétons spéciaux tels que les bétons aérés, les bétons mousses, les bétons caverneux, les bétons réfractaires, les bétons réalisés avec des granulats non minéraux ou les bétons de masse volumique inférieure à 800kg/m<sup>3</sup>.

##### A.2.I.1 Classification des bétons:

###### - Classes d'exposition en fonction des actions dues à l'environnement

Ces actions dues à l'environnement sont réparties en classes d'exposition.

Le béton peut être soumis à plusieurs actions; dans ce cas, les conditions environnementales auxquelles il est soumis, peuvent nécessiter d'être exprimées sous la forme de combinaison de classes d'exposition.

- **Aucun risque de corrosion ni d'attaque, X0** : Béton non armé et sans pièces métalliques noyées : toutes les expositions sauf en cas de gel/dégel, d'abrasion et d'attaques chimiques.

Pour le béton armé ou avec des pièces métalliques noyées : Très sec

**-Corrosion induite par carbonatation** : Béton contenant des armatures ou des pièces métalliques noyées est exposé à l'air et à l'humidité, les différentes classes d'exposition sont classifiées comme suit : *XC1*, *XC2*, *XC3* et *XC4*.

**-Corrosion induite par les chlorures, ayant une origine autre que marine** : Béton contenant des armatures ou des pièces métalliques noyées est soumis au contact d'une eau ayant une origine autre que marine, contenant des chlorures, y compris des sels de déverglaçage, les différentes classes d'exposition sont classées comme suit : *XD1*, *XD2* et *XD3*.

**- Corrosion induite par les chlorures présents dans l'eau de mer** : Béton contenant une armature ou des pièces métalliques noyées est soumis au contact des chlorures présents dans l'eau de mer ou à l'action de l'air véhiculant du sel marin, les différentes classes d'exposition sont : *XS1*, *XS2* et *XS3*

**-Attaque gel/dégel avec ou sans agent de déverglaçage** : Béton est soumis à une attaque significative due à des cycles de gel/dégel alors qu'il est mouillé, les différentes classes d'exposition sont : *XF1*, *XF2*, *XF3* et *XF4*

**-Attaques chimiques** : Béton est exposé aux attaques chimiques, se produisant dans les sols naturels, les eaux de surface, les eaux souterraines, les classes d'exposition sont : *XA1*, *XA2* et *XA3*.

## **A2.I.2. Exigences relatives au béton et méthodes de vérification**

### **- Exigences de base relatives aux constituants**

Les constituants ne doivent pas contenir de substances nocives en quantités telles qu'elles puissent avoir un effet préjudiciable sur la durabilité du béton ou induire une corrosion des armatures, ils doivent être aptes à l'emploi pour l'utilisation envisagée du béton.

-Ciment : conforme à la norme NA 442

- Granulats : conforme aux normes NA 5113 ou NA 5122
- Eau de gâchage : conforme à la norme 1966
- Additions (y compris les fillers minéraux et les pigments)
- Les fillers conformes à la NA 5113 ;
- Les pigments conformes à La NA 5139 ;
- Les cendres volantes conformes à la NA 5100;
- Les fumées de silice conformes à la NA 5137.

### **-Exigences de base pour la composition du béton (constituants)**

La composition du béton et les constituants des bétons à propriétés spécifiées ou à composition prescrite doivent être choisis de manière à satisfaire aux exigences spécifiées pour le béton frais et durci, y compris la consistance, la masse volumique, la résistance, la durabilité, la protection contre la corrosion des pièces en acier noyées, tout en tenant compte du procédé de production et de la méthode choisie pour l'exécution des ouvrages en béton.

Lorsque ce n'est pas précisé dans la spécification, le producteur doit sélectionner les types et les classes de constituants parmi ceux dont l'aptitude à l'emploi est établie pour les conditions d'environnement spécifiées.

### **-Exigences liées aux classes d'exposition**

Pour que le béton résiste aux agressions environnementales, les exigences sont souvent données en termes de valeurs limites pour la composition du béton et de propriétés définies du béton; alternativement les exigences peuvent résulter de méthodes de conception performantielles.

Les exigences relatives à chaque classe d'exposition doivent être spécifiées en termes de :

- . Type et classes de constituants permis ;
  - . Rapport maximal eau/ciment ;
  - . Dosage minimal en ciment ;
  - . Résistance minimale à la compression du béton (facultatif) ;
- le cas échéant :
- . Teneur minimale en air dans le béton.

### **A2.I.3 Spécification du béton**

Le prescripteur du béton doit s'assurer que toutes les exigences pertinentes pour obtenir les propriétés nécessaires du béton, sont incluses dans la spécification donnée au producteur. Le prescripteur doit également prescrire toutes les exigences sur les propriétés du béton qui sont nécessaires au transport après livraison, à la mise en place, au compactage, à la cure ou à tout autre traitement ultérieur. La spécification doit, si nécessaire, inclure toutes les exigences particulières, par exemple pour obtenir un aspect architectonique.

#### **- Spécification des bétons à propriétés spécifiées**

La spécification doit comprendre :

- a) Exigence de conformité à la NA 16002;
- b) Classe de résistance à la compression ;
- c) Classe d'exposition ;
- d) Dimension maximale nominale des granulats ;
- e) Classe de teneur en chlorures.
- f) Pour le béton léger :
- g) Classe de masse volumique ou masse volumique cible ;

Pour le béton lourd :

- h) Masse volumique cible ;

De plus dans le cas du béton prêt à l'emploi et du béton de chantier ;

- i) La classe de consistance ou, dans des cas particuliers, la valeur cible de consistance.

#### **-Spécification des bétons à composition prescrite**

La spécification doit comprendre :

- a) L'exigence de conformité à la NA 16002 ;
- b) Le dosage en ciment ;
- c) Le type de ciment et sa classe de résistance ;
- d) Soit le rapport eau/ciment soit la consistance, en termes de classe ou, dans certains cas, de valeur cible ;
- e) Le type, la catégorie et la teneur maximale en chlorures de granulats ; en cas de béton léger ou de béton lourd, la masse volumique maximale ou minimale des granulats selon le cas ;

- f) La dimension maximale nominale des granulats, et toute limitation de leurs fuseaux granulaires
- g) Le type et la quantité des adjuvants ou additions, le cas échéant ;
- h) En cas d'utilisation d'adjuvants ou d'additions, l'indication de l'origine de ces constituants et celle du ciment qui se substitue aux caractéristiques pour celles qui ne sont pas définissables par d'autres moyens.

### **-Spécification des bétons à composition prescrite dans une norme**

Les bétons à composition prescrite dans une norme doivent être spécifiés en citant :

- . La norme valide sur le lieu d'utilisation du béton donnant les exigences pertinentes ;
- . La désignation du béton selon cette norme.

Les bétons à composition prescrite dans une norme ne doivent être utilisés que pour :

- . Des bétons de masse volumique normale pour des structures armées ou non ;
- . Des classes de résistances pour le calcul  $\leq C 16/20$ , sauf si une classe C 20/25 est autorisée par les dispositions valides sur le lieu d'utilisation du béton ;
- . Les classes d'exposition X0 et XC1, sauf si les dispositions valides sur le lieu d'utilisation du béton en permettent d'autres.

## **A2.II. La norme NF EN 206-1**

La durabilité du matériau béton dans son environnement est présentée comme une préoccupation majeure de la norme et une des raisons de son évolution. Les environnements sont redéfinis et pour chacun de ces environnements ou « expositions », l'obligation de moyens et l'obligation de résultats sont présentés comme deux alternatives (NF EN 206-1).

Autrement dit, les exigences relatives aux performances du béton ne se superposent pas à celles relatives à sa composition, mais peuvent les remplacer, pour une même durabilité visée.

### **-L'approche traditionnelle ou prescriptive**

La norme EN 206-1, « Valeurs limites pour la composition du béton ». Elles portent principalement sur :

- les propriétés des constituants
- le rapport maximal eau/ciment

- le dosage minimal en ciment

Les valeurs limites sont données dans l'annexe – normative – NA.F de la norme NF EN 206-1, sous forme de deux tableaux

*- NA.F.1, Valeurs limites applicables en France pour la composition et les propriétés du béton en fonction de la classe d'exposition,*

*- NA.F.2, Valeurs limites applicables en France pour la composition et les propriétés du béton des produits en béton préfabriqués en usine en fonction de la classe d'exposition.*

Les tableaux NA.F.1, le tableau NA.F.2 s'appliquant aux éléments en béton préfabriqués. Les valeurs limites données prennent en compte une durée de vie d'au moins 50 ans pour la structure.

Les valeurs limites du rapport maximal E/C et du dosage minimal en ciment sont adaptées pour une utilisation de CEM I, type de ciment constitué d'au moins 95 % de clinker Portland (selon la norme NF EN 197-1).

**NA.5.2.5.2.2 Concept du coefficient  $k$  pour les additions prises en compte**

L'aptitude générale à l'emploi pour des bétons dont le lieu d'utilisation est la France, est établie pour les valeurs suivantes du coefficient  $k$  données dans le Tableau NA.3.

**Tableau NA.3 — Valeurs du coefficient  $k$** 

| Dénomination de l'addition                              | Valeur du coefficient $k$ | Conditions supplémentaires à remplir  |
|---|---------------------------|---|
| <b>Additions de type II</b>                             |                           |   |
| Cendres volantes pour béton                             | 0,60                      | Si $i_{28} \geq 0,83$ et $i_{90} \geq 0,95$   |
|   | 0,50                      | Si $i_{28} \geq 0,80$ et $i_{90} \geq 0,90$   |
|   | 0,40                      | Si $i_{28} \geq 0,75$ et $i_{90} \geq 0,85$   |
| Fumées de silice  | 2,00                      | Si dans les expositions XA<br>$E / C \leq 0,45$ et $C \geq 295 \text{ kg/m}^3$  |
|   | 1,00                      | Si dans les expositions différentes de XA<br>$E / C \leq 0,45$ et $C \geq 280 \text{ kg/m}^3$<br>Dans les autres cas ou sur prescription particulière |
| Laitiers vitrifiés moulus de haut-fourneau, de classe B | 0,90                      | $h_{3/7} \geq 0,70$<br>$h_{3/28} \geq 0,85$   |

(à suivre)

**Tableau NA.3 — Valeurs du coefficient  $k$  (fin)**

| Dénomination de l'addition  | Valeur du coefficient $k$ | Conditions supplémentaires à remplir |
|---|---------------------------|--------------------------------------|
| <b>Additions de type I</b>  |                           |                                      |
| Additions calcaires   | 0,25                      | $i_{28} \geq 0,71$                   |
| Additions siliceuses de classe A  | 0,25                      | $i_{28} \geq 0,71$                   |
| <b>Toutes additions</b>   |                           |                                      |
| Pour les quantités d'additions dépassant les valeurs indiquées au Tableau NA.F.1 ou au Tableau NA.F.2 et pour les autres ciments ou les autres additions que celles mentionnées dans NA.5.2.5.2.1 | 0,00                      |                                      |
| NOTE $i_{28}$ , $i_{90}$ , $h_{3/28}$ et $h_{3/7}$ sont des indices d'activité ou de pouvoir hydraulique déterminés selon les normes d'essais de l'addition considérée.                           |                           |                                      |

### -Les classes d'exposition

Une des principales évolutions de la norme est la définition de classes d'exposition. Chaque ensemble de classes est défini en fonction de l'origine du risque :

X0 : absence de risque de corrosion ou d'attaque

XC : risque de corrosion par carbonatation

XD : risque de corrosion par les chlorures autres que ceux de l'eau de mer

XS : risque de corrosion par les chlorures de l'eau de mer

XF : attaque par le gel-dégel

XA : attaques d'origines chimiques

Les classes sont définies par des indices, selon des niveaux de risque croissants. Selon ces définitions des classes, un environnement donné peut correspondre à plusieurs classes d'exposition, par exemple XC (carbonatation) et XD (chlorures issus de sels de déverglaçage). A l'inverse, une même classe d'exposition peut correspondre à plusieurs actions environnementales et mécanismes de dégradation, par exemple la classe XF2 : Attaque gel/dégel, saturation modérée en eau avec agents de déverglaçage.

|            |   |   |
|------------|---|---|
| <i>XD3</i> | Alternance d'humidité et de séchage                   | Éléments de ponts exposés à des projections contenant des chlorures.<br>Chaussées.<br>Dalles de parc de stationnement de véhicules. |
| <i>XF2</i> | Saturation modérée en eau avec agents de déverglaçage | Surfaces verticales de bétons des ouvrages routiers exposées au gel et à l'air véhiculant des agents de déverglaçage.               |

Tableau A .2.2. Extrait du tableau - Classes d'exposition de la norme NF EN 206-1.

**Tableau NA.F.1 — Valeurs limites applicables en France pour la composition et les propriétés du béton en fonction de la classe d'exposition**

|   | Classes d'exposition                   |                                     |   |   |  |   |        |        |   |        |                      |                     |                   |                      |                      |                                       |                    |                    |        |        |
|---|--|-------------------------------------|---|---|--|---|--------|--------|---|--------|----------------------|---------------------|-------------------|----------------------|----------------------|---------------------------------------|--------------------|--------------------|--------|--------|
|   | Aucun risque de corrosion ou d'attaque | Corrosion induite par carbonatation |   |   |  | Corrosion induite par les chlorures               |        |        |   |        |                      | Attaque gel / dégel |                   |                      |                      | Environnements chimiquement agressifs |                    |                    |        |        |
|   |  | Eau de mer                          |   | Chlorures autres que l'eau de mer                 |  |   |        |        |   |        |                      |                     |                   |                      |                      |                                       |                    |                    |        |        |
|   | X0                                     | XC1                                 | XC2   | XC3   | XC4  | XS1   | XS2    | XS3    | XD1   | XD2    | XD3 <sup>a) m)</sup> | XF1 <sup>b)</sup>   | XF2 <sup>b)</sup> | XF3 <sup>b) c)</sup> | XF4 <sup>b) c)</sup> | XA1                                   | XA2                | XA3                |        |        |
| Rapport $E_{c,fl}$ /liant éq maximal <sup>d)</sup>    | —                                      | 0,65                                | Valeurs numériques identiques à XC1 <sup>f)</sup> | Valeurs numériques identiques à XF1 <sup>f)</sup> | Valeurs numériques identiques à XF1 <sup>f) g)</sup> | Valeurs numériques identiques à XS2 <sup>f)</sup> | 0,55   | 0,50   | Valeurs numériques identiques à XF1 <sup>f)</sup> | 0,55   | 0,50                 | 0,60                | 0,55              | 0,55                 | 0,45                 | 0,55                                  | 0,50               | 0,45               |        |        |
| Classe de résistance minimale                         | —                                      | C20/25                              |   |   |  |   | C30/37 | C36/45 |   | C30/37 | C35/45               | C25/30              | C25/30            | C30/37               | C30/37               | C30/37                                | C30/37             | C30/37             | C35/45 | C40/50 |
| Teneur mini en liant éq ( $kg/m^3$ ) <sup>d) e)</sup> | 150                                    | 260 <sup>h)</sup>                   |   |   |  |   | 330    | 350    |   | 330    | 350                  | 280 <sup>h)</sup>   | 300               | 315                  | 340                  | 330                                   | 350                | 385                |        |        |
| Teneur minimale en air (%)                            | —                                      | —                                   |   |   |  |   | —      | —      |   | —      | —                    | 4 <sup>i)</sup>     | 4 <sup>i)</sup>   | 4 <sup>i)</sup>      | —                    | —                                     | —                  |                    |        |        |
| Rapport maximal A/(A+C)                               | Cendres volantes                       | 0,30                                |   |   |  |   | 0,30   | 0,15   |   | 0,15   | 0,15                 | 0,15                | 0,30              | 0,30                 | 0,30                 | 0,15 <sup>j)</sup>                    | 0,30 <sup>k)</sup> | 0,30 <sup>k)</sup> | 0,00   |        |
|   | Fumées de silice                       | 0,10                                |   |   |  |   | 0,10   | 0,10   |   | 0,10   | 0,10                 | 0,10                | 0,10              | 0,10                 | 0,10                 | 0,10                                  | 0,10               | 0,10               |        |        |
|   | Laitier moulu                          | 0,30                                |   |   |  |   | 0,30   | 0,15   |   | 0,15   | 0,15                 | 0,15                | 0,30              | 0,30                 | 0,30                 | 0,15                                  | 0,30 <sup>k)</sup> | 0,30 <sup>k)</sup> | 0,00   |        |
|   | Addition calcaire                      | 0,25                                |   |   |  |   | 0,25   | 0,05   |   | 0,05   | 0,05                 | 0,05                | 0,25              | 0,25                 | 0,25                 | 0,05                                  | 0,00               | 0,00               | 0,00   |        |
|   | Addition siliceuse                     | 0,20                                |   |   |  |   | 0,20   | 0,15   |   | 0,15   | 0,15                 | 0,15                | 0,20              | 0,20                 | 0,20                 | 0,05                                  | 0,00               | 0,00               | 0,00   |        |
| Nature du ciment                                      | —                                      | —                                   |   |   |  |   | —      | —      |   | —      | —                    | —                   | —                 | —                    | —                    | m)                                    | n)                 | n)                 | n)     |        |

Tableau A .2.3 . Valeurs limites pour la composition et les propriétés du béton en fonction de la classe d'exposition.

**Exigence environnementale pour  $c_{min,dur}$  (mm)**

| Classe Structurale | Classe d'exposition selon Tableau 4.1 |     |           |     |           |           |           |
|--------------------|---------------------------------------|-----|-----------|-----|-----------|-----------|-----------|
|                    | X0                                    | XC1 | XC2 / XC3 | XC4 | XD1 / XS1 | XD2 / XS2 | XD3 / XS3 |
| S1                 | 10                                    | 10  | 10        | 15  | 20        | 25        | 30        |
| S2                 | 10                                    | 10  | 15        | 20  | 25        | 30        | 35        |
| S3                 | 10                                    | 10  | 20        | 25  | 30        | 35        | 40        |
| S4                 | 10                                    | 15  | 25        | 30  | 35        | 40        | 45        |
| S5                 | 15                                    | 20  | 30        | 35  | 40        | 45        | 50        |
| S6                 | 20                                    | 25  | 35        | 40  | 45        | 50        | 55        |

Tableau A .2.4. Valeurs de l'enrobage minimal  $C_{min,dur}$  requis vis-à-vis de la durabilité dans le cas des armatures de béton armé conforme à l'EN 10080.

## Annexe 3

### Méthode de niveau II : FORM et SORM

#### A.3.1 Méthode FORM (first order reliability method)

La surface d'état limite est approchée au point de défaillance le plus probable par un hyperplan tangent (figure A.3.1) :

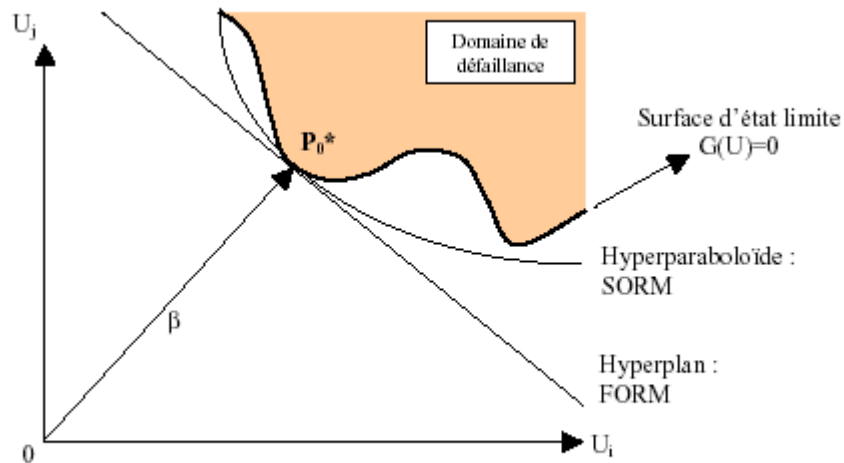


Figure A.3.1 Représentation graphique du principe des méthodes FORM et SORM

La probabilité de défaillance  $P_f$  est :

$$P_f = \Phi(-\beta) \quad (\text{A.3.1})$$

#### - A.3.2 Méthode SORM (second order reliability method)

La surface d'état limite est approchée par un hyperparaboloïde passant par le point de défaillance le plus probable et ayant les mêmes courbures principales en ce point.

La probabilité de défaillance  $P_f$  s'écrit pour cette approximation :

$$P_f \approx \Phi(-\beta) \prod_{i=1}^n (1 - k_i \beta)^{-1/2} \quad (\text{A.3.2})$$