

UNIVERSITE DE SAAD DAHLEB DE BLIDA

Faculté des sciences de l'ingénieur
Département de Génie civil

MEMOIRE DE MAGISTER

Spécialité : constructions civiles et industrielles

ETUDE DE LA CARBONATATION DES BETONS A BASE DES CIMENTS ALGERIENS

Par

BOUALLAGA ishak

Devant le jury composé de

M. BENZAIBI	Maître de Conférence. U. de Blida	Président
M. CHEMROUK	Professeur. U.S.T.H.B. Alger	Examineur
S. KENAI	Professeur. U. de Blida	Examineur
A. ATTAR	Maître de Conférence. U. de Blida	Examineur
M.ABED	Professeur. U. de Blida	Rapporteur

Blida. Mai 2007

ملخص

عملية الأكسدة الكربونية بواسطة ثاني أكسيد الكربون هي علة دائمة تؤثر على جميع المواد التي بنيتها الأساسية تتكون من الاسمنت مثل الخرسانة. المناطق المؤكسدة تصبح هشة و PH المحلول الثغري يسقط من قيمته العادية 13 (PH خرسانة غير مؤكسدة) إلى قيمة بجوار 9 (PH خرسانة مؤكسدة). هذه المناطق تفقد قدرتها على حماية الفولاذ من التآكل والمواد الناتجة عن التآكل تؤدي إلى الانتفاخ و تدهور صلابة الخرسانة التي تؤدي بدورها إلى دمار و انهيار البناية.

الهدف من هذا العمل هو دراسة الأكسدة الكربونية لخرسانة البنايات الجزائرية . الدراسة تحتوى على محورين, المحور الأول يركز على تأثير المحيط على الأكسدة الكربونية للمواد الإسمنتية . هذا التأثير الذي قد تجاهله عموما الخبراء أثناء صيانة الأبنية يمثل عامل مهم في التصميم, اختيار المواد, و متانة الأبنية. إذا تقدم على طول هذه المرحلة العلاقة القائمة بين المحيط و الأكسدة الكربونية للمواد الإسمنتية

المحور الثاني في هذه الدراسة هو عددي محض حيث نقدم نموذج رقمي لتنقل ثاني أكسيد الكربون داخل المادة الإسمنتية بحيث أن عمق الأكسدة يستنتج عن طريق تركيز CO_2 داخل العنصر. هذه الأعماق المستنتجة قورنت مع تلك التي أعطية عن طريق تجربة الأكسدة السريعة التي قام بها ببد كيس و رفقائه. نتائج المقارنة تبين أنه من أجل قيم منخفضة للنسبة E/C , النتائج العددية تقترب من النتائج التجريبية (التغير يتراوح بين 1.24 % و 18 %). هذه النتيجة تترجم أهمية دور الرطوبة في التحكم في حركة عملية الأكسدة الكربونية.

RESUME

La carbonatation est une pathologie qui affecte les matériaux à base de ciment tels que les mortiers et les bétons. Les zones carbonatées du matériau deviennent fragiles et le PH de la solution interstitielle chute d'une valeur de 13 (PH du béton sain) à une valeur avoisinant 9 (PH du béton carbonaté).

Ces zones perdent ainsi leur pouvoir de protection des aciers contre la corrosion. Les produits de corrosion engendrent alors un gonflement, donc une dégradation du béton aboutissant à la ruine de la structure.

L'objectif de ce travail est l'étude de la carbonatation des bétons dans les constructions Algériennes. L'étude comportera deux tranches principales ; la première est basée sur l'effet de l'environnement sur la carbonatation du matériau cimentaire. Cette influence qui généralement ignorée par les experts lors de l'entretien des ouvrages, représente un paramètre important dans la conception, le choix des matériaux et la durabilité des constructions. Nous présentons donc au court de cette partie la relation qui existe entre l'environnement et la carbonatation du matériau cimentaire.

La deuxième tranche est purement numérique car nous proposons une modélisation du transport de dioxyde de carbone à l'intérieur du matériau cimentaire. Les cinétiques de la profondeur de carbonatation sont déduites à partir de la concentration de CO_2 à l'intérieur du l'élément.

Ces profondeurs ont été comparées à celles données par l'essai de la carbonatation accélérée de Papadakis et al. Les résultats de simulation montrent que, pour des faibles valeurs du rapport E/C, les résultats numériques se rapproche de celles mesurés dans l'expérimentation (l'écart varie de 1.24% à 18%). Ces résultats traduisent l'importance du rôle du contenu de l'humidité dans les cinétiques de carbonatation.

Abstract

Carbonation is a pathology, which affects materials containing cement such as the mortars and the concretes. The carbonated material becomes fragile and the pH of the interstitial solution falls from a value of 13 (pH of the non-carbonated material) to a value around 9 (pH of the carbonated material). Then, the material loses its capacity to protect the reinforced steel against corrosion. The products of corrosion generate a swelling that induces the materials degradation leading to the ruin of the structure

The objective of this work is the study of the carbonation of the concretes in the Algerian construction. The study will comprise two principal phases, first is based on the effect of the environment on the carbonation of cementing material. This influence, which is generally ignored by the experts during the maintenance of the works, has a significant parameter in the design, choice of materials, and the durability of constructions.

We thus present in this part the relation, which it exists between the environment and the carbonation of cementing materials

The second section is purely numerical because we propose a modeling of the transport of carbon dioxide inside cementing material. The depths of carbonation kinetics are deduced starting from the concentration of CO₂ inside the element. These depths were compared with those given by the test of accelerated carbonation of Papadakis and al.

The results of simulation show that, for the low values of W/C ratio, the numerical results approach with those measured in the experimental one (the variation varies from 1.24% and 18%). These results translate the importance of the role of the contents of moisture in the kinetics of carbonation.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail

A mes parents que dieu les protège

Ma sœur Khadidja, et mes frères

Ma grande mère et toute la famille

A tous mes amis, et particulièrement Omar, Mohamed, et Hichem

Ishak

REMERCIEMENTS

Je voudrais adresser mes sincères remerciements à Monsieur ABED Mohamed docteur à l'université de SAAD DAHLEB de Blida, pour avoir, assuré la direction de cette thèse, ses conseils bienveillants, sa compétence et ses qualités humaines m'ont apporté une aide précieuse pour l'accomplissement de mes recherches.

Ma considération la plus sincère s'adresse à Monsieur MOKKADEM, ancien ingénieur de CTC, Monsieur Chaabane ancien ingénieur de LCTP, et les ingénieurs de CTC Alger et Blida, SPTA, CNEREB. Q'ils trouvent ici l'expression de ma plus profonde gratitude.

Je tiens à exprimer mes vifs remerciements à tous les enseignants du département de Génie civil (université de Blida) pour leurs conseils et leurs aides morales, et particulièrement à tous les docteurs qui ont bien voulu examiner ce travail et faire partie du jury.

Je tiens à remercier Madame FAIZA du département de chimie industrielle (université de Blida), pour l'aide technique qu'elle m'a apporté pour la préparation du produit chimique employé dans l'expérience.

Parmi toutes les personnes qui m'ont aidé à réaliser mes travaux de recherche dans les meilleures conditions, je ne saurai oublier de remercier mes collègues (étudiants de PG).

Je témoigne de la grande confiance et du soutien continu que toute ma famille (Particulièrement ma mère) m'a procuré durant la préparation de ce mémoire.

Liste des Figures

Figure I-1	Schématisation de la protection naturelle de l'armature dans un béton sain	4
Figure I-2	Schéma de la cinétique du comportement des armatures et du béton d'enrobage	5
Figure I-3	Schéma de processus de corrosion	6
Figure I-4	Armature en acier en état critique de corrosion	7
Figure I-5	Coupe théorique d'un mur en béton, principe de la formation de la carbonatation	9
Figure I-6	Mouvement des molécules et la réaction de carbonatation dans le matériau cimentaire	10
Figure I-7	Les couches d'une pâte de ciment après la carbonatation	11
Figure I-8	Photo microscopique de précipitation de CaCO ₃ (couleur gris clair) dans un béton ordinaire exposé en atmosphère riche en CO ₂	11
Figure I-9	L'évolution de la carbonatation et la transformation des cristaux	13
Figure I-10	Chambre hermétique	15
Figure I-11	Diagramme schématique des constituants du système et les étapes de manipulation	16
Figure I-12	L'évolution du Dc en fonction de temps	18
Figure I-13	Mesure de la profondeur de carbonatation détectée par la phénolphthaleine	19
Figure I-14	Schématisation du front de carbonatation après la pulvérisation de phénolphthaleine	20
Figure I-15	Section de spécimen coupée après la carbonatation	20
Figure I-16	Spectre typique du béton	22
Figure I-17	Détermination de la profondeur de carbonatation par le (F-T-IR)	23
Figure I-18	Modèle schématique du front de carbonatation en utilisant l'indicateur phénolphthaleine et l'analyse spectrale	24
Figure I-19	Echantillon du béton courant (B30) carbonaté, visualisé en lumière polarisée avec un microscope optique (agrandissement 25 ×)	25
Figure I-20	Comparaison des résultats de l'ATG et l'ATD d'un béton aéré	25
Figure I-21	Image (MEB) de la portlandite partiellement et totalement carbonatée	26
Figure I-22	Mise en évidence de la carbonatation des CSH par microscope électronique à balayage	27
Figure I-23	Illustration des résultats de la carbonatation par le XRD pour les différentes distances	28
Figure II-1	Evolution des quantités cumulées d'ions OH ⁻ et Ca ²⁺ relâchés d'une pâte de CPA lixiviée par de l'eau puis par une solution carbonatée	31
Figure II-2	L'incrément du densité Δρ des prismes en fonction du temps	32
Figure II-3	Résistance brésilienne en fonction de concentration du CO ₂	33
Figure II-4	Diagramme σ-ε des bétons carbonatés et non carbonatés	35
Figure II-5	Les surfaces constatées dans le diagramme σ-ε pour la détermination des coefficients de fragilité et plasticité]	36
Figure II-6	Diagramme σ-ε moyen de séries en fonction du degré de carbonatation	37
Figure II-7	Comparaison de la dégradation de rigidité	38
Figure II-8	Courbe chargement-déflexion	39
Figure II-9	Changement de longueur en fonction du degré de carbonatation	40

Liste des Figures

Figure II-10	L'incrément du rétrécissement $\Delta\varepsilon$ des prismes en fonction du temps	40
Figure II-11	Cinétique de carbonatation de pâtes de ciment de différents rapports E/C, HR 71,5 %	41
Figure II-12	Variation de profondeur en fonction de la racine carrée du temps Pour différents rapport E/C	42
Figure II-13	Evolution de la profondeur de carbonatation en fonction du type de cure	43
Figure II-14	Profondeur de carbonatation En fonction de la résistance mesurée après 16 ans d'exposition	44
Figure II-15	Relation entre la profondeur de carbonatation et la résistance mécanique	44
Figure II-16	Profondeur de carbonatation naturelle (6mois) en fonction du dosage en ciment pour deux durées de cure différentes	45
Figure II-17	Profondeur de carbonatation en fonction du Dosage en ciment d'après Baron et al	46
Figure II-18	Evolution du constant K et la résistance de compression pour les différentes distances	47
Figure II-19	Schématisation de l'état d'humidité d'un béton en cours de carbonatation	48
Figure II-20	La variation de la profondeur de carbonatation des BHP après 2 ans d'exposition	50
Figure II-21	Résultats théoriques et expérimentaux de la profondeur de Carbonatation des mortiers avec ajouts	51
Figure II-22	Profondeur de carbonatation de BL et BPO Dans une solution de bicarbonate de sodium (0,352M)	52
Figure II-23	Profondeur de carbonatation de BL et BPO Exposé à une atmosphère contient 20%de et 70% HR	52
Figure II-24	Photos microscopique du BL exposé en atmosphère riche en CO ₂	53
Figure II-25	Profondeur de carbonatation des bétons faits à partir de différents ciments, et conservés à 20°C et 65% d'HR pendant trois années	55
Figure II-26	Echantillons du béton recouverts par le mortier (parties inférieurs), non enduits (parties supérieures) pour les différentes concentrations de CO ₂ : 5, 20, et 100 %	57
Figure II-27	Comparaison entre les profondeurs de carbonatation des bétons (enduits et non enduits)	57
Figure III-1	Pont sur oued de Reghaia (ancienne RN 05 au PK 29+900)	60
Figure III-2	Mortier de protection d'un mur (Stade el- harrach)	60
Figure III-3	Solution de phénolphtaleine employer dans l'essai	62
Figure III-4	Photos gouvernent les parties superieures du l'élément poteau	63
Figure III- 5	Echantillons subissent le test de la carbonatation EL-Harrach	64
Figure III-6	test de phénolphtaleine (ouvrage prive), la figure (a) représente l'état de l'échantillon avant le test, (b) après la pulvérisation.	64
Figure III-7	test de phénolphtaleine (villa, Chebli); la figure a gauche illustre l'état de l'échantillon avant le test, Celle de droite montre l'état après le test	64
Figure III-8	Pont sur oued Zitouna , RN 09 au pk 25+00	65
Figure III-9	Stade 1 ^{ier} Novembre El-Harrach	65
Figure III-10	Pont sur Oued Oumazar, Tipaza Pk 15+690	65
Figure III-11	Exemple d'une poutre appartienne à un portique exposé vers le mouvement du soleil, Boulourinne	66

Figure III- 12	Echantillons subissent le test de la détection par la phénolphtaleine, Boulourinne	65
Figure III-13	Pont sur oued Reghaia, RN24 au pk 38+230	67
Figure III-14	Poutre du pont sur oued Bill Braguettz au pk 459, Constantine	68
Figure III-15	Dalle en béton armé exposée dehors, (a) représente la partie supérieure de la dalle, (b) la partie inférieure abritée à l'eau de pluie, ouvrage privé, Boufarik	69
Figure III-16	Le test de la phénolphtaleine appliquer sur un échantillon extrait de cette dalle, la Figure à gauche représente l'état de l'échantillon avant le test, celle de la droite montre l'état après la pulvérisation.	69
Figure III-17	Profil de carbonatation de deux faces du béton (exposée et abritée de l'eau de pluie) en fonction de rapport E/C	70
FigureIV-1	Fonction d'affaiblissement de CO ₂	80
Figure IV-2	Maillage et conditions aux limites pour le calcul de la diffusion de CO ₂	83
Figure IV-3a	La variation de concentration de CO ₂ en fonction de la profondeur après 3 jours (cas du béton A, et 5% de CO ₂)	84
Figure IV-3b	La variation de concentration de CO ₂ en fonction de la profondeur après 7 jours (cas du béton A, et 5% de CO ₂)	85
Figure IV-3c	La variation de concentration de CO ₂ en fonction de la profondeur après 28 jours (cas du béton A, et 5% de CO ₂)	85
Figure IV-3d	La variation de concentration de CO ₂ en fonction de la profondeur après 90 jours (cas du béton A, et 5% de CO ₂)	86
Figure IV-4	Profondeur et profil de CO ₂ après 40.5 mois d'exposition (mortier E/C = 0.5	87
FigureIV-5	Evolution de la profondeur de carbonatation en fonction de temps (cas du béton A, et 5% de concentration de CO ₂)	88
Figure IV-6	Comparaison de la profondeur de carbonatation pour les différents cas de formulation A, B, et C (20% de concentration de CO ₂)	89
Figure IV-7	Comparaison de la profondeur de carbonatation pour les différents cas de concentrations 5, 20, et 50 % CO ₂ (cas du béton A)	89
Figure III-8a	Comparaison des résultats numériques (courbe) et expérimentaux (points) pour l'essai de la carbonatation accélérée, cas de formulation S1 et S2	91
Figure IV-8b	Comparaison des résultats numériques (courbe) et expérimentaux (points) pour l'essai de la carbonatation accélérée, cas de formulation S3 et S4	91
Figure IV-8c	Comparaison des résultats numériques (courbe) et expérimentaux (points) pour l'essai de la carbonatation accélérée, cas de formulation S5 et S6	92
Figure IV-8d	Comparaison des résultats numériques (courbe) et expérimentaux (points) pour l'essai de la carbonatation accélérée, cas de formulation S7 et S8	92

Liste des Symboles et des abréviations

DOT : Le département de la transportation de FLORIDA
 C_3S : Silicate tricalcique
 C_2S : Silicate bicalcique
 C_3A : Auminate tricalcique
 C_4AF : Alumino- ferrite tetracalcique
 $Ca(OH)_2$: Portlandite
 CSH : Silicates de calcium hydratés
 CO_2 : Dioxyde de carbone
 PH : Caractéristique chimique indique la basicité ou l'acidité de solution
 $CaCO_3$: Calcite
 D_c : Degré de carbonatation
 (x) : Profondeur de carbonatation
 F-T-IR : Méthode spectroscopique infrarouge
 XRD : La diffraction des rayons X
 σ : Contrainte
 ε : Déformation
 C_{fra} : Coefficient de fragilité
 C_{pla} : Coefficient de plasticité
 δ : La déformation de rétrécissement
 K : Coefficient de carbonatation
 E/C : Rapport eau/ ciment
 (BCV) : Béton à la cendre volante
 (BL) : Béton au laitier
 (BC) : Béton au calcaire
 (BPO) : béton portland ordinaire
 HVFA : béton à haute quantité de cendres volantes
 D_c : Coefficient de diffusion
 D_{eff} : Coefficient de diffusion effectif
 V : Taux de carbonatation
 E_0 : Energie d'activation
 g_{env} : Concentration de CO_2
 T_{env} : Température
 h_{env} ; Humidité relative
 m_0 : La réactivité du béton
 ρ_c : La densité de ciment
 ρ_A : La densité d'agrégats
 ρ_E : La densité d'eau
 EF : Eléments finis

Liste des Tableaux

Tableau I-1	Les mesures du signal électrochimique dans un béton carbonaté	7
Tableau I-2	Développement des produits de carbonatation en fonction de la Concentration du CO ₂	12
Tableau I-3	Quantité de CO ₂ analysée par les différentes méthodes	18
Tableau I-4	Comparaison des résultats de la profondeur de carbonatation entre la méthode de phénolphthaleine et la méthode spectroscopique	23
Tableau II-1	Concentration des anions de la pâte de ciment après la carbonatation	30
Tableau II-2	Concentration des cations la pâte de ciment après la carbonatation	30
Tableau II-3	Proportions des mélanges (kg.m ⁻³)	32
Tableau II-4	Résultats de l'absorption d'eau de la pâte de ciment après la carbonatation dans plusieurs atmosphère	32
Tableau II-5	La résistance de compression en fonction des conditions de cure	34
Tableau II-6	Comparaison des caractéristiques de déformation mesurées dans deux environnements (normal et 15 % de CO ₂)	35
Tableau II-7	Valeurs de coefficients de fragilité et plasticité après la carbonatation	37
Tableau II-8	Le coefficient de carbonatation k (mm / ans ^{0.5}) en fonction de la distance à partir de la mer	47
Tableau II-9	Profondeur d carbonatation en (mm) de bétons curés à 65%HR et 20°C	49
Tableau II-10	Profondeur d carbonatation en (mm) des bétons curés à 100%HR et 20°C	49
Tableau II-11	Profondeurs de carbonatation à 90 jours et 1 ans pour les différents dosages en calcaire	55
Tableau II-12	Caractéristiques de ciments testés	55
Tableau II-13	Profondeurs de carbonatation et la porosité totale des mortiers	56
Tableau III-1	Réparation des sinistres en fonction de l'age de la construction	58
Tableau IV-1	Formules empiriques pour la prédiction de l'avancement de la profondeur de carbonatation dans le temps	75
Tableau IV-2	paramètres de l'étude thermique et ses équivalents dans l'étude de la diffusion	76
Tableau IV-3	Paramètres numériques du modèle	81
Tableau IV-4	Caractéristiques physiques des bétons	82
Tableau IV-5	Composition chimique du clinker	82
Tableau IV-6	Masse molaire des anhydres	82
Tableau IV-7	Composition chimique de clinker	90
Tableau IV-8	Proportions du mélange des échantillons du béton	90

Sommaire

Introduction générale	1
 Chapitre I la carbonatation dans les matériaux cimentaires	
I - INTRODUCTION	3
II - PRINCIPAUX COMPOSANTS D'UN MATERIAU CIMENTAIRE.....	3
 III - COMPORTEMENT DES ARMATURES DANS LE BETON	
III- 1 Introduction	4
III- 2 Procédure de corrosion	5
III -3 L'effet de la carbonatation sur le taux de corrosion	7
 IV - MECANISMES REACTIONNELS DE LA CARBONATATION	
IV – 1 Pénétration et diffusion de CO₂ dans le matériau	8
IV – 2 Les réactions chimiques de la carbonatation	8
IV – 3 Minéralogie du béton carbonaté	11
IV – 4 Produits de la réaction de carbonatation	12
 V – METHODES ET DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX D'ETUDE DE LA CARBONATATION	
V – 1 Mode opératoire de la carbonatation	13
V-1-1 introduction	13
V-1-2 appareillage du test accéléré de la carbonatation	14
V-1-2-1 description	14
V-1-2-2 constituants et fonctionnement de l'appareillage	14
V-1-3 procédure de manipulation	16
V – 2 Méthodes de mesure de la profondeur de carbonatation	17
V-2-1 degré de carbonatation	17
V-2-2 méthodes et techniques de mesure	18
V-2-2-1 la détection par la phénolphtaleine	19
V-2-2-2 méthodes modernes de mesure	21
<u>1- introduction</u>	<u>21</u>
<u>2 - méthode spectroscopique infrarouge (F-T-IR)</u>	<u>21</u>
<u>3 - la microscopie optique</u>	<u>24</u>
<u>4 - l'analyse thermogravimétrique</u>	<u>25</u>
<u>5 - l'examen au microscopie électronique à balayage</u>	<u>26</u>
<u>6 - la diffraction des rayons X (XRD)</u>	<u>27</u>

Chapitre II comportement et durabilité des matériaux Cimentaires carbonatés

I – CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES DU MATERIAU CARBONATE

I – 1 Solution interstitielle	29
I – 2 Porosité	31
I – 3 Résistance	33
I – 4 Déformation	34
I – 5 Rigidité	37
I – 6 Rétrécissement	39

II – PARAMETRES INFLUENTS SUR LA CARBONATATION

II -1 Le rapport E/C	41
II -2 La durée et type de cure	42
II -3 Résistance mécanique	43
II -4 Le dosage en ciment	45
II -5 Microclimat	46
II -6 La teneur en eau du matériau	48

III – DURABILITE DES BETONS VIS-A-VIS DE LA CARBONATATION

III -1 Béton à la cendre volante (BCV)	48
III -2 Béton au laitier (BL)	52
III -3 Béton au calcaire (BC)	54
IV - Autres produits anti-carbonatation	56

V – CONCLUSION

Chapitre III Etude d'inventaire et d'expertise

I – GENERALITES	58
II – APERCU SUR LA QUALITE DU BETON PRODUIT EN ALGERIE	58
III - DIAGNOSTIC DES DESORDRES DUS A LA CARBONATATION	59
III - 1 Introduction	59
III - 2 Efflorescence	60
III - 3 Elévation	62
III- 4 Orientation géographique	66
III – 5 L'eau de pluie	68
IV – CONCLUSION	70

Chapitre IV Modélisation de transport de dioxyde de carbone

I – INTRODUCTION	71
II – TRAVAUX DE MODELISATION DE LA CARBONATATION	71
II -1 Modèle de Bakker (1993)	71
II -2 Modèle de Papadakis (1989)	72
II -3 Modèle de Linhua et al (2000)	73
II -4 Autres modèles de carbonatation	75
III – TRANSPORT DE DIOXYDE DE CARBONE PAR DIFFUSION DANS LE RESEAUX POREUX DU BETON	
III -1 Introduction	76
III -2 Equations mathématiques et description du phénomène de carbonatation	76
IV - IMPLANTATION DU MODELE ELEMENTS FINIS	
IV -1 Introduction	79
IV -2 Détermination de paramètres du modèle	80
IV -3 Choix de formulation	81
IV -4 Hypothèses de calcul	82
IV -5 Description du modèle EF et les conditions aux limites	83
V- RESULTATS ET DISCUSSION	
V -1 Analyse des résultats	84
V -2 Validation du modèle	90
VI – CONCLUSION	93

Chapitre V Conclusions générales et recommandations

I- CONCLUSIONS	94
II – RECOMMANDATIONS POUR FUTURS TRAVAUX	96

Introduction générale

Avec l'accroissement du parc des ouvrages (bâtiments et ouvrages d'art) en béton armé, on assiste à une augmentation dans le monde entier de la détérioration des ouvrages en béton même parmi ceux réalisés au cours des années 1970 et 1980.

Cette situation est parfois imputable à l'utilisation de béton de piètre qualité à la disposition incorrecte des aciers (défauts d'enrobage).

Les principaux mécanismes physico-chimiques susceptibles de conduire à la corrosion des armatures sont : la migration des ions chlorures, l'attaque des sulfates, le gel dégel, l'abrasion de la carbonatation. Cette dernière pathologie se manifeste par une succession de mécanismes physico-chimiques tels que : la pénétration de CO_2 dans le matériau et sa diffusion dans les pores, sa réaction avec les produits d'hydratation du ciment principalement la portlandite et la précipitation du carbonate de calcium dans les pores.

Les aciers noyés dans le béton sont initialement protégés par un environnement très basique. Les réactions de carbonatation font diminuer le PH de la solution interstitielle du béton d'une valeur initiale d'environ 13 à 9. Cette chute de PH soumet les armatures au risque de la corrosion par la destruction de la couche protectrice.

La corrosion de l'acier réduit sa capacité portante et le gonflement des produits de corrosion fait éclater l'enrobage. Ceci aboutit à la ruine locale de l'élément de structure, voire à l'effondrement de celle-ci si aucune action de réparation n'est entreprise. Signalons en fin que cette dernière est de réalisation très coûteuse.

Dans ce contexte, et à titre d'exemple, dans la république de chine approximativement 50 % des structures en béton sont dans un état de carbonatation [1]. En suisse environ 15000 m² de béton armé sont susceptibles de subir les méfaits de la carbonatation, il s'agit des façades des bâtiments mais aussi d'autres ouvrages, tels que ponts, châteaux d'eau, réservoirs et stations de pompage [2].

Le département des transports de FLORIDA, USA (DOT) a établie l'une des peu investigations détaillées sur la carbonatation en USA. Il s'agit d'une investigation de 18 ponts construits entre 1939 et 1981 ; l'étude montre que 16 ponts parmi le total ont une profondeur de carbonatation significative avec une moyenne de 10 mm et un maximum d'environ 50 mm.[3].

Ces chiffres monstres de dégradation pourraient être réduits, si les solutions de prévention des causes de dégradation affectant les éléments de construction en béton étaient maîtrisées. Dans cette perspective, beaucoup de travaux de recherche ont été réalisés et plusieurs modèles ont été développés pour prédire le processus de carbonatation dans les matériaux cimentaires.

Introduction générale

Il est à signaler que dans le cas des structures réelles en béton armé, le matériau est exposé à la carbonatation dès son décoffrage ; ce dernier intervenant généralement 24 heures après la mise en œuvre.

Dans cette configuration, on assiste à la concomitance de processus : l'hydratation du matériau, son séchage-humidification (en fonction des cycles des conditions hydriques de l'environnement) et son exposition à la carbonatation.

En Algérie, la durabilité du béton aux agents agressifs était le sujet de plusieurs études. Cependant, une connaissance profonde sur les paramètres affectant un tel processus permettra la définition de la conception du mélange la plus appropriée, et de fournir une durabilité adéquate. En effet la carbonatation du béton a suscité beaucoup moins d'attention en Algérie, et les travaux dans ce contexte sont limités devant un pourcentage de vieillissement très élevé de nos constructions et une situation dangereuse.

Ainsi, l'objectif du présent travail est d'étudier le phénomène de carbonatation et ses causes majeures dans les constructions Algériennes, afin d'aboutir à un modèle numérique qui simule le problème. A cet effet, le manuscrit est structuré comme suit :

Dans le premier chapitre nous présentons une synthèse bibliographique sur la carbonatation des matériaux cimentaires. Les mécanismes de réaction, les caractéristiques physico-chimiques du béton carbonaté, ainsi que les paramètres influant la carbonatation sont détaillés dans cette partie.

Le deuxième chapitre, d'un aspect plus pratique, présente quelques cas d'expertise concernant la carbonatation dans nos constructions. Nous insistons cette fois-ci sur la contribution des paramètres environnementaux sur la dégradation du béton ou la cause est le gaz carbonique.

Nous mettons en évidence le manque des travaux concernant la prise en compte de l'effet de l'environnement et la position géographique de l'ouvrage lors du diagnostic.

Le chapitre 3 traite la modélisation du transport de CO_2 à l'intérieur du matériau poreux. L'équation non linéaire de diffusion de CO_2 est établie à partir de la loi de Fick et le modèle a été résolu numériquement en utilisant le logiciel de simulation ANSYS

Version 5.4.

En effet, grâce à cette modélisation nous pouvons déterminer la concentration de dioxyde de carbone à des endroits donnés de l'élément et aussi pour un temps donné.

Les résultats de simulation sont comparés à ceux de l'expérimentale résultant à partir du l'essai de la carbonatation accélérée où les conditions de l'expérience sont reproduites dans le modèle.

En fin, nous terminons ce manuscrit par les principales conclusions tirées de cette étude, ainsi des recommandations pour les recherches ultérieures.

Chapitre I

La carbonatation dans les matériaux cimentaires

I- INTRODUCTION

Tel que nous l'avons vu en introduction générale, la carbonatation est l'un des phénomènes responsables de la dégradation des éléments de construction en béton armé. Elle se manifeste par une succession de mécanismes très complexe. Une pénétration de CO_2 atmosphérique, sa dissolution et réaction avec les produits hydrates dissous, provoquent une modification de l'assemblage minéralogique de la matrice cimentaire.

Dans ce qui suit, nous rappelons comment se forme un matériau cimentaire et nous décrivons les mécanismes physico-chimiques de la carbonatation, ainsi les conséquences qu'elle engendre. Nous présentons également les principaux travaux effectués dans ce contexte et nous examinons l'influence de chaque paramètre dans la durabilité du matériau cimentaire vis-à-vis de la carbonatation.

II- PRINCIPAUX COMPOSANTS D'UN MATERIAU CIMENTAIRE

Nous désignons par un matériau cimentaire tout mélange contenant du ciment. La forme de base d'un matériau cimentaire est la pâte de ciment, formée uniquement de ciment et d'eau. Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire une poudre fine qui, gâchée avec l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit par suite de réactions chimiques d'hydratation. En fonction de la quantité et de la nature des constituants (additions minérales : laitier de haut fourneau, pouzzolanes, cendres volantes, etc.) mélangés avec le clinker, nous distinguons cinq types de ciment.

Le durcissement de ces ciments est principalement dû à l'hydratation du silicate tricalcique (C_3S), un composant important du clinker. Trois autres composants dont le rôle n'est pas moindre, forment le ciment. Il s'agit de silicate bicalcique (C_2S), de l'aluminate tricalcique (C_3A) et de l'alumino- ferrite tetracalcique (C_4AF).

En présence d'eau, ces constituants forment des hydrates qui précipitent et s'organisent en une structure dotée de hautes résistances mécaniques. Parmi ces hydrates, nous distinguons la chaux hydratée ou portlandite (CH), les silicates de calcium hydratés (CSH), l'ettringite ($\text{C}_6\text{A}\check{\text{S}}_3\text{H}_{32}$) et les monosulfoaluminates ($\text{C}_4\text{ASH}_{12}$). En plus de leur grande sensibilité au CO_2 , les deux premiers hydrates CH et CSH constituent globalement plus de 80 % des hydrates contenus dans une pâte de ciment [4].

C'est pour cette raison que la majorité des travaux de modélisation, ne tiennent compte que de la carbonatation de ces deux hydrates.

A partir d'une pâte de ciment, nous pouvons obtenir du mortier en incorporant du sable ou bien fabriquer du béton en combinant du sable et du gravier. La proportion massique habituellement employée lors de la fabrication des mortiers est une partie de ciment pour 3 parties de sable, tandis que la formulation des bétons reste très diversifiée, dépendant généralement de la résistance mécanique souhaitée.

La proportion de l'eau par rapport au ciment (les deux ingrédients qui forment la pâte de ciment) est d'une importance primordiale.

La quantité d'eau nécessaire dans un mélange normal est toujours très supérieure à celle qui est nécessaire pour l'hydratation du ciment pour qu'il atteigne sa forme finale dans le béton.

Le sable et les graviers sont communément désignés par granulats ou agrégats, formant un ensemble de grains minéraux de dimensions comprises entre 0 et 25 mm. La nature des roches (siliceuses, calcaires, etc.) est responsable des propriétés intrinsèques (résistance, porosité, réactivité) des granulats ; par compte les caractéristiques géométriques (granularité, forme) et de propreté sont fonction du processus d'élaboration (concassage, broyage, lavage, etc.).

III – COMPORTEMENT DES ARMATURES DANS LE BETON

III- 1 Introduction

Quand l'acier est enfoncé en béton dense de bonne qualité, il est entouré par une matrice du ciment hydratée contenant une solution basique, avec une valeur typique de PH dans la gamme 13-14.

Dans cet environnement alcalin, l'acier est normalement protégé contre la corrosion par un film d'oxyde qui agit en tant que barrière à la dissolution anodique du métal. Cependant, la carbonatation du béton, ramène la valeur de PH initialement élevée à un niveau auquel le bidon passif du film décompose, permettant à l'acier de corroder à des degrés déterminé principalement par la conductivité électrolytique du métal Figure I-1 [5]

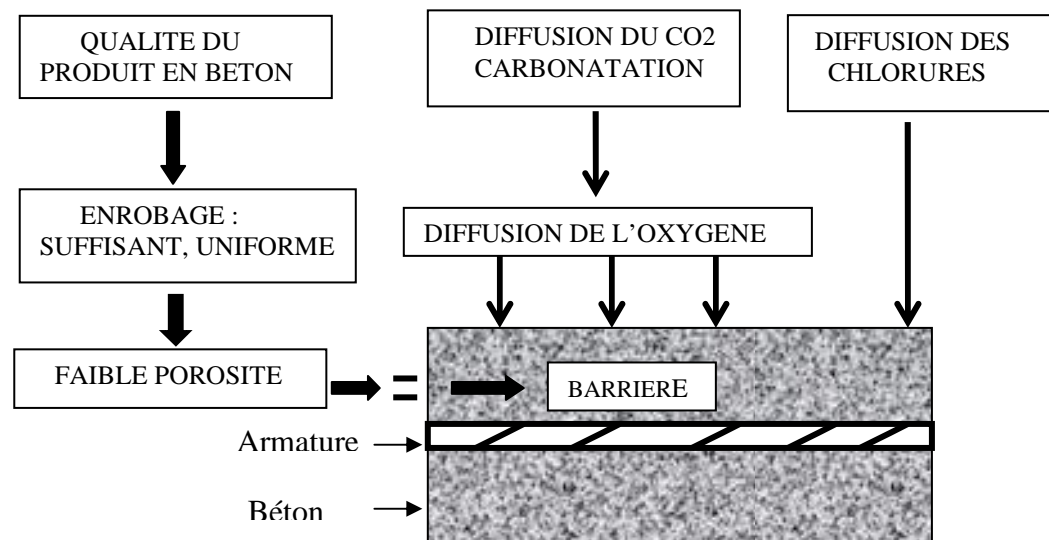


Figure I-1 Schématisation de la protection naturelle de l'armature dans un béton sain (Baron et Ollivier, 1992) [5]

D'après Tuutti, le processus de corrosion d'une armature enrobée passe par deux phases : d'abord une phase d'amorçage, en suite une phase de développement de corrosion Figure I-2 [6] (Le point A correspond à la dépassivation de l'acier, le point B correspond à la fissuration et t_A le temps d'amorçage).

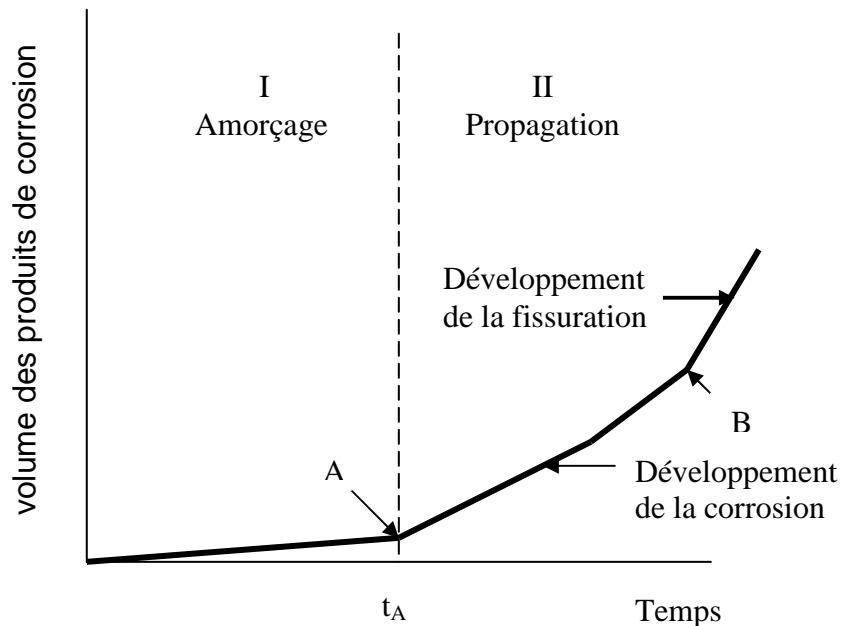


Figure I-2 Schéma de la cinétique du comportement des armatures et du béton d'enrobage[6]

III- 2 Procédure de corrosion

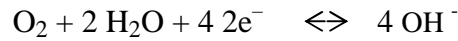
L'armature se corrode suivant un mécanisme électrochimique très complexe, ce mécanisme se caractérise par la formation d'un produit intermédiaire (rouille verte) dont la composition $[\text{FeII}4 \text{Fe}^{\text{III}}_2 (\text{OH})_2]^{2+} \cdot [\text{CO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}]^{2-}$; les produits finaux sont ceux de la rouille classique [lépidacrocite (γ -FeOOH), la goethite (α - FeOOH), magnétite (FeO₄) [7]. En le simplifiant fort, on peut le décrire comme suit :

Lorsqu'on place de l'acier dans une solution aqueuse, une réaction d'équilibre s'installe :

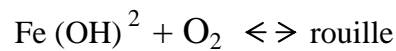
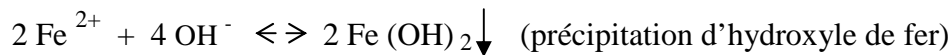


Des atomes de fer entrent dans la solution sous forme d'ions de fer Fe^{2+} , à cet endroit des électrons négatifs (2e^-) se dégagent. L'acier garde une charge négative et attire les ions de fer positifs. Un équilibre dynamique s'installe entre le nombre d'ions de fer qui sont précipités et ceux qui sont en solution.

Cet équilibre est rompu en présence d'oxygène dissous dans le milieu aqueux. En effet l'oxygène est transformé en hydroxyle (OH^-) et utilise à cette fin les électrons qui se libèrent lorsque le fer entre en solution



Les hydroxyles réagissent avec les ions de fer et forment l'hydroxyle de fer ($\text{Fe}(\text{OH})_2$) qui se précipite et se transforme, par réaction avec l'oxygène, en oxyde de fer (rouille).



Un courant se crée entre l'anode (endroit où le fer entre en solution) et la cathode (l'endroit où l'oxygène est transformé). Les électrons se déplacent dans l'acier vers la cathode. Dans le milieu aqueux, les ions de fer se déplacent vers la cathode et les hydroxyles vers l'anode. Sur ce sujet, ils se rencontrent et réagissent entre eux ; c'est le phénomène illustré en Figure I-3 [8]

L'anode et la cathode sont tellement proches qu'elles forment un « micro-cellule », lors de processus de corrosion, la surface de l'acier présente une quantité innombrable de micro-cellule. Le volume occupé par la rouille est plusieurs fois supérieur à celui occupé par l'acier, une barre d'armature qui rouille dans le béton repousse pour ainsi dire l'enrobage et le béton se fissurera ou s'écaillera. En parallèle la rouille entraîne une diminution de la section des barres et par voie de conséquence, une diminution de la capacité portante de la construction en béton Figure I-4 [9].

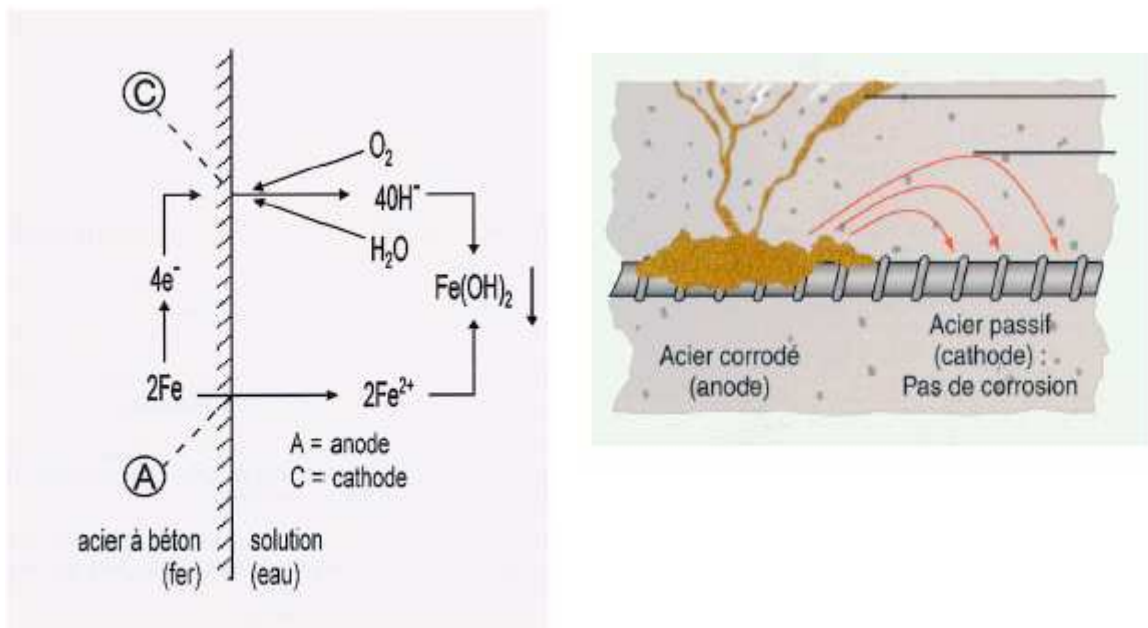


Figure I-3 Schéma de processus de corrosion [8]



Figure I-4 Armature en acier en état critique de corrosion [9]

III-3 L'effet de la carbonatation sur le taux de corrosion

Le taux de corrosion dans le béton armé en état normal est inférieur à $1 \mu\text{m}$ par ans, cette valeur garde la possibilité de corroder l'armature moins de 10 %. Cependant ce degré change sa valeur dans le cas du béton carbonaté, et tend à augmenter ; ce qui conduit à un taux de corrosion très remarquable.

L'étude menée par Chang et al [10], sur deux compositions du béton montre clairement l'augmentation de cette caractéristique lorsque le béton est carbonaté (0.589 et 2.917 correspondent aux relevés du potentiel -380 et -880 mV respectivement), dont la possibilité de corrosion atteint 90 % dans ces conditions Tableau I-1

Remarque

Une technique électrochimique souvent utilisée par les ingénieurs pour évaluer le degré de corrosion des ouvrages est représentée en annexe.

échantillons	E/C = 0.5		E/C = 0.6	
	Contrôle	carbonaté	Contrôle	carbonaté
OCP (mV, SCE)	-80	-380	-88	-880
Probabilité de corrosion (%)	< 10	> 90	< 10	> 90
Distance entre le front de carbonatation et l'acier (cm)	4.40	1.80 (partiellement carbonaté)	4.40	0 (complètement carbonaté)
Courant de la densité de corrosion ($0.1 \mu\text{A cm}^{-2}$)	0.038	0.589	0.081	2.917
Taux de corrosion (μm par ans)	0.45	7.07	0.97	34.95
Condition de corrosion	Condition passive	Corrosion modérée	Condition passive	Taux de corrosion élevé

Tableau I-1 Les mesures du signal électrochimique dans un béton carbonaté [10]

IV - MECANISMES REACTIONNELS DE LA CARBONATATION**IV –1 Pénétration et diffusion de CO₂ dans le matériau**

Après leur décoffrage, s'ils sont exposés à l'air libre, les matériaux à base de ciment perdent progressivement une partie de l'eau de gâchage (l'eau libre). Des canalicules, des pores ouverts plus ou moins remplis d'eau se forment, par où l'air atmosphérique pourra pénétrer. Entrant dans la composition de l'air qui pénètre dans le matériau, le CO₂ atmosphérique varie d'une concentration moyenne de 0.03 % dans un air non pollué à une concentration de 0.1 % et par fois peut atteindre 1 % dans les grandes villes et les zones industrielles. Cette variation dépend de la température, la pression, et le milieu (agglomération, industries,...).

Dans ces conditions le CO₂ atmosphérique diffuse dans l'espace poreux des matériaux cimentaires. Cette pénétration dépend en premier lieu de la perméabilité du matériau aux gaz.

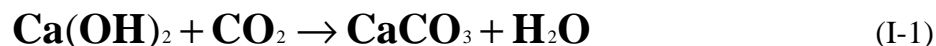
La porosité quant à elle caractérise la diffusion du dioxyde de carbone dans le matériau, sous forme gazeuse ou liquide, après sa dissolution dans la solution interstitielle des pores.

IV – 2 Les réactions chimiques de la carbonatation

La carbonatation des matériaux cimentaires est une réaction de neutralisation par le gaz carbonique. Tous les composés hydratés et anhydres sont sensibles à la carbonatation et la portlandite réagit très facilement.

En général, la solution poreuse du béton contient essentiellement des hydroxydes de potassium et de sodium. La solubilité de Ca (OH)₂ est fortement diminuée lorsque la concentration des ions hydroxydes augmente : pour une concentration de 0,5 mol/l d'ion hydroxyle, la concentration d'ion Ca²⁺ a été calculée par Longuet [11] est vaut 1.10⁻⁵ mol/l

Tenant compte des réactions chimiques élémentaires de dissolution de la portlandite et du CO₂, la réaction de carbonatation de la portlandite se réduit à une seule réaction chimique :



En le simplifiant encore, et d'après les auteurs, le procédé de la carbonatation passe par les étapes suivantes :

- Dissolution de Ca (OH)₂.
- Dissolution du. CO₂
- Réaction d'ion hydroxyle OH⁻ avec l'oxyde de carbone dissous pour former HCO₃.
- Réaction de HCO₃ et OH⁻ pour produire CO₃⁻ et l'eau.
- Réaction de CO₃²⁻ et Ca²⁺ pour former CaCO₃ (solide), produit peu soluble (100 fois moins que le Ca (OH)₂)[12].

La Figure I-5 illustre une coupe théorique d'un mur en béton, principe de la formation de carbonatation [2]

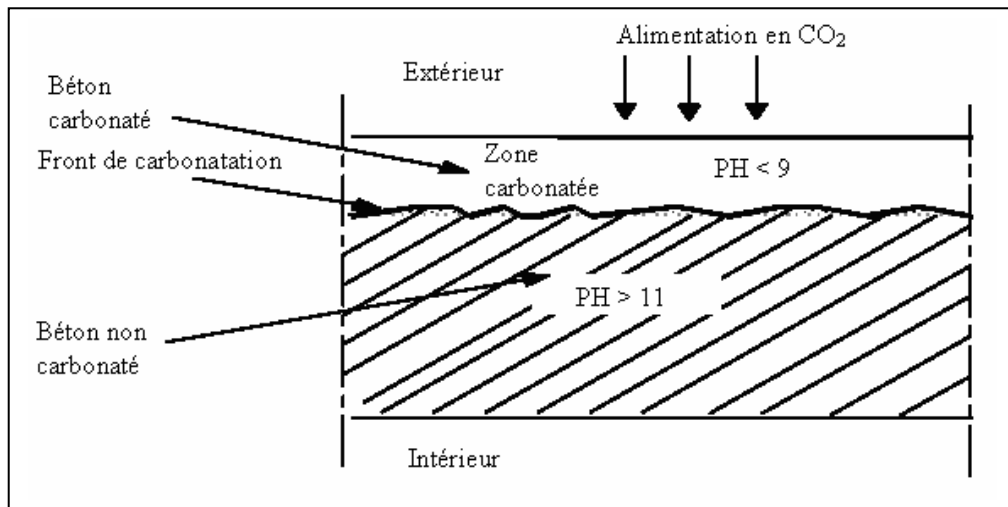
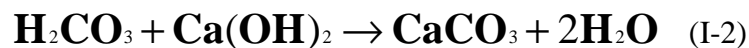


Figure I-5 Coupe théorique d'un mur en béton, principe de la formation de la carbonatation [2]

La carbonatation du matériau cimentaire peut être manifestée dans un système ouvert saturé (en eau). En effet, l'eau chargée de gaz carbonique donne naissance à un acide faible (H_2CO_3), qui contient des ions carbonates, espace chimiquement très réactive en présence de ciment hydraté. Les phénomènes qui se produisant dans cet environnement sont :

- la pénétration des ions HCO_3^{3-} par diffusion et leurs conversions en ions CO_3^{2-}
- précipitation de calcite dans la porosité
- la décalcification lente de la pâte de ciment.



Le produit déduit de la réaction est très sensible dans l'eau (soluble), et le béton dans ce cas est très sensible au lessivage [12].

la Figure I-6 montre le mouvement des molécules et la réaction de carbonatation dans le matériau cimentaire[13].

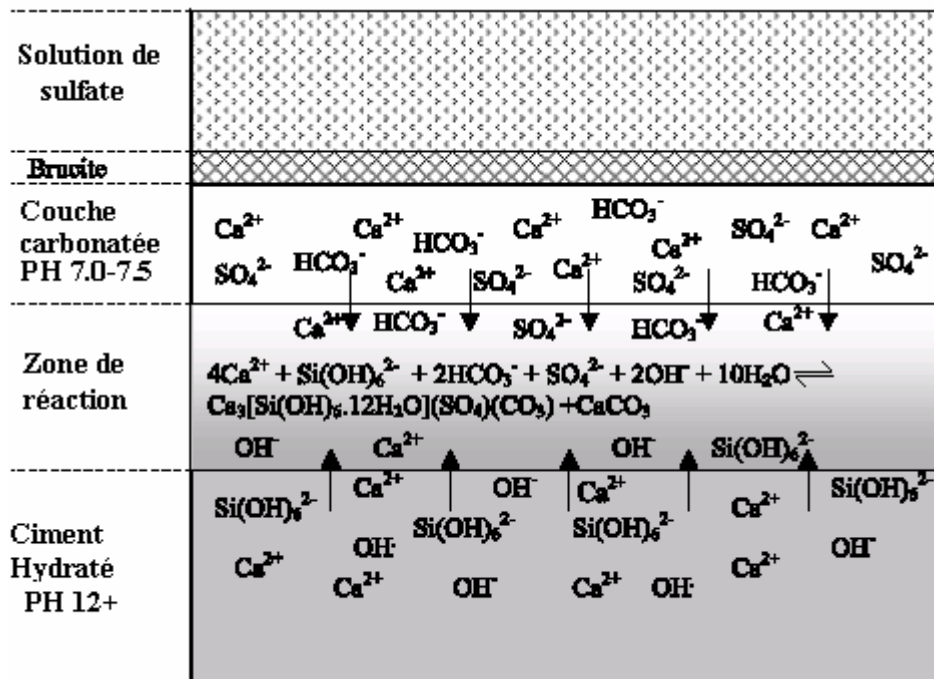
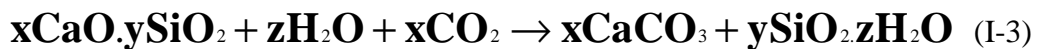
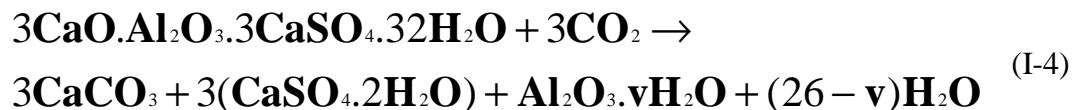


Figure I- 6 Mouvement des molécules et la réaction de carbonatation dans le matériau cimentaire [13]

Les constituants anhydres principalement les silicates C_3S et C_2S , ne se carbonatent que s'il y'a suffisamment d'eau libre dans les pores. Généralement, la carbonatation des silicates se fait en concomitance avec leur hydratation. Cette phase de couplage de l'hydratation avec la carbonatation constitue l'unique possibilité de carbonatation des silicates. La réaction chimique à retenir est :



Les autres composés hydratés (l'étringite et les sulfoaluminates de calcium) sont également sensibles au dioxyde de carbone. D'après Nishikawa [14], l'étringite se décompose par carbonatation formant de la calcite, du gypse et un gel alumine.



IV – 3 Minéralogie du béton carbonaté

La minéralogie et la texture sont également modifiées par la précipitation de carbonates de calcium : la partie dégradée se caractérise par une surface principalement constituée de calcite, une couche dense contenant de la calcite, une zone très poreuse riche en ettringite puis une zone de transition moins poreuse contenant de l'ettringite et de la porthlandite précédant le cœur sain. Figure I-7 [15].

La Figure I-8 représente une photo microscopique de la précipitation de CaCO_3 .

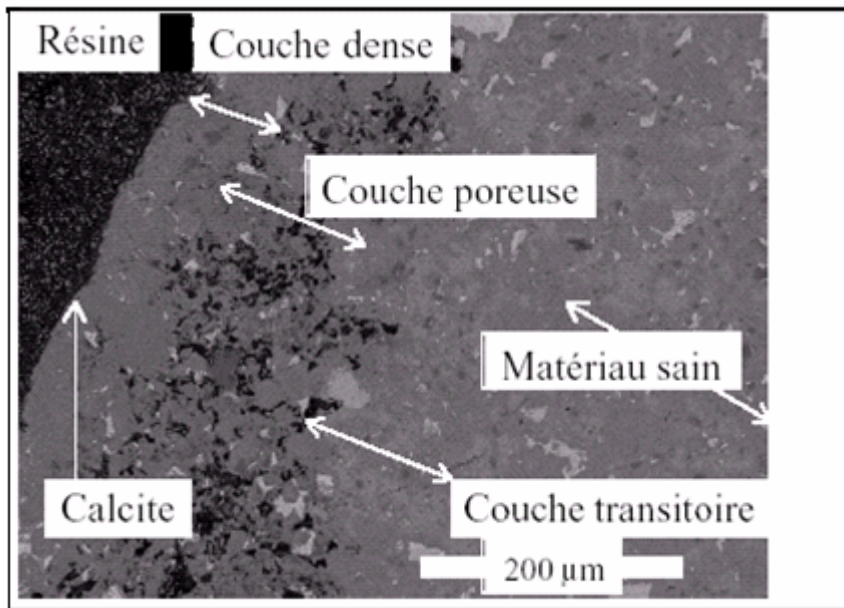


Figure I-7 Les couches d'une pâte de ciment après la carbonatation [15]

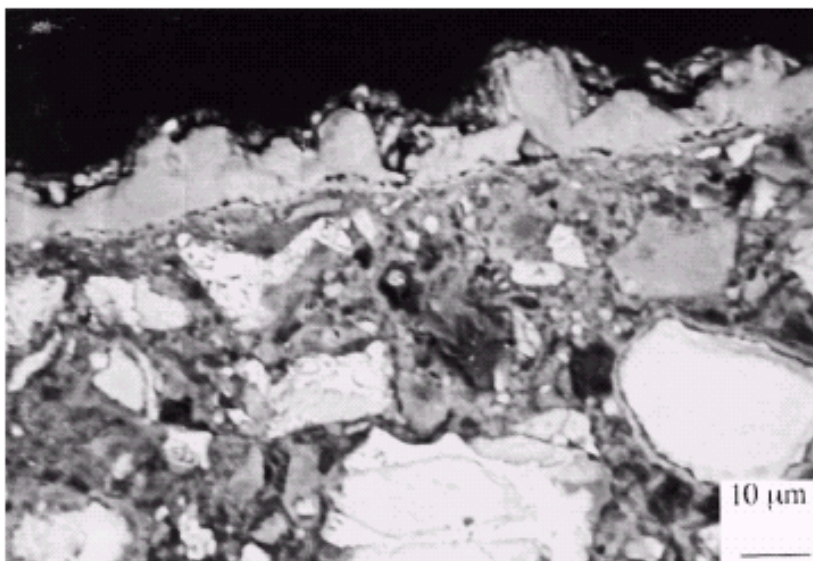


Figure I-8 Photo microscopique de précipitation de CaCO_3 (couleur gris clair) dans un béton ordinaire exposé en atmosphère riche en CO_2 [16]

IV – 4 Produits de la réaction de carbonatation

Toutes les réactions citées précédemment produisent des différentes variantes de carbonates de calcium (argonite, valérite, calcite), qui évoluent vers la forme unique 'calcite'. Cette variété de produits dépend essentiellement de la concentration de CO₂ en atmosphère Tableau I-2 [17].

L'augmentation de la quantité de ces produits est suivie généralement par une diminution de la quantités des éléments constitutifs de la pâte de ciment hydraté, comme nous montre la Figure I-9 [18]. Nous remarquons donc, une augmentation de calcite, vaterite, etc., et en parallèle une diminution de Tobermorite 11A° (6CaO.6SiO₂.5H₂O) qui disparaît complètement après 50 jours de traitement.

Saturation en eau salée	Concentration de CO ₂ (%)	Intensité de formation des produits			
		calcite	vaterite	aragonite	portlandite
Na Cl	100	VS	M	W	W
NaNO ₂	100	VS	M	ND	ND
NH ₄ NO ₃	100	VS	M	ND	ND
Mg (NO ₃) ₂ .6H ₂ O	100	VS	M	W	ND
NaCr ₂ O ₇ .2H ₂ O	100	VS	M	ND	ND
Na Cl	5	VS	M	ND	ND
NaNO ₂	5	VS	W	ND	ND
NH ₄ NO ₃	5	VS	W	ND	W
Mg (NO ₃) ₂ .6H ₂ O	5	VS	M	W	M/S
NaCr ₂ O ₇ .2H ₂ O	5	VS	M	W	M
Na Cl	0.03	S	M	M	S
NaNO ₂	0.03	VS	M	M	M
NH ₄ NO ₃	0.03	VS	W	M	M
Mg (NO ₃) ₂ .6H ₂ O	0.03	S/M	M	M	S
NaCr ₂ O ₇ .2H ₂ O	0.03	S	M	M	M

Clés
VS : plus forte ; S : forte ; M : moyenne ; W : faible ; ND : non détectable

Tableau I-2 Développement des produits de carbonatation en fonction de la concentration du CO₂ [17]

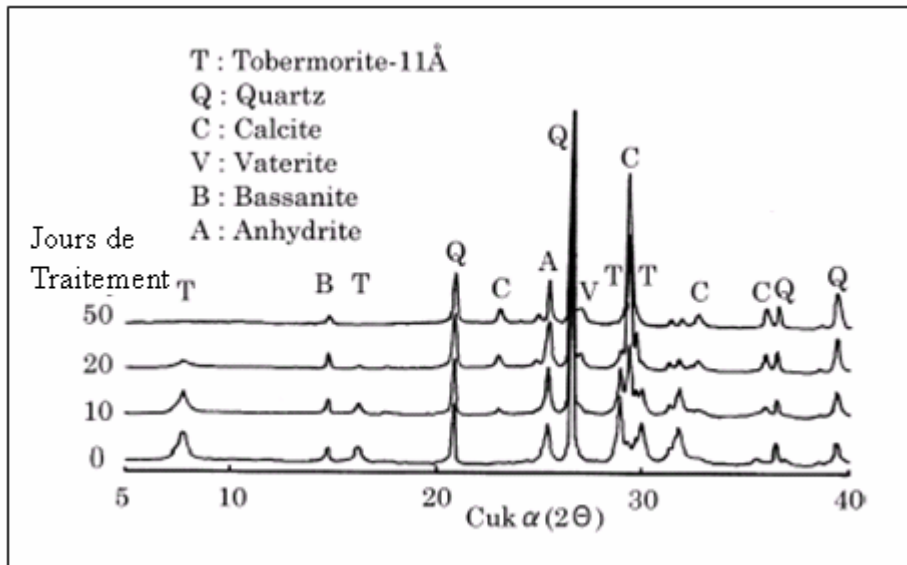


Figure I-9 L'évolution de la carbonatation et la transformation des cristaux [18]

V - METHODES ET DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX D'ETUDE DE LA CARBONATATION

V -1 Mode opératoire de la carbonatation

V- 1-1 Introduction

Il est clair que le processus de carbonatation aura lieu après un certain temps, ce qui nécessite pour l'étudier un dispositif expérimental convenable, qui permettra d'accélérer le phénomène et le faire manipuler à court terme.

En réalité il n'existe pas un test standard de la carbonatation ; deux genres du test sont utilisés pour obtenir des résultats pendant plusieurs mois :

- le premier test est simple et moins coûteux ; il consiste à simuler l'environnement agressif par l'immersion du béton dans une solution contenant des ions de carbonates désignée sous le nom de l'eau carbonatée (environ 0.352 M de NaHCO_3).
- Le deuxième est un peu compliqué vu le nombre de matériels qu'il doit être fournis ; il nécessite donc un appareillage bien contrôlé afin d'assurer un environnement riche en CO_2 . En faite, nous donnons dans ce qui suit la description et le fonctionnement de cet appareillage.

Chapitre I

la carbonatation dans les matériaux cimentaires

V- 1-2 Appareillage du test accéléré de la carbonatation

V-1-2-1 Description

L'appareillage du test accéléré de carbonatation est construit de sorte que le béton examiné soit exposé à un environnement dont quatre variables sont contrôlées : la température, la concentration de CO₂, l'humidité relative HR et la pression.

Sur la base de pression fournie dans le système, on peut distinguer deux types de test [10]

- Carbonatation avec pression normale : la pression de gaz est 1 atmo, et la concentration de CO₂ varie de 0.03% (similaire à un environnement atmosphérique normal) à 50 %.
- Carbonatation avec pression élevée : la pression fournie est 15 atmo et la concentration de CO₂ est 100 %.

V-1-2-2 Constituants et fonctionnement de l'appareillage

Le test accéléré de la carbonatation est composé essentiellement de :

- Un réservoir d'expérience qui est généralement une chambre hermétique. La construction des murs (de la chambre) se compose de deux feuilles d'acier inoxydable avec une couche d'isolation de polystyrène de 50 mm d'épaisseur au milieu Figure I-10. L'avant de la chambre est retirable, cela permet une manipulation confortable des échantillons.
- Une source de gaz de CO₂, celle-ci est assurée par deux manières :
 - 1- soit par un cylindre industriel standard contenant (5% CO₂ et 20 % O₂).
 - 2- Soit par un récipient de pression livré commercialement avec un volume de 0.04 m³ et une pression de 5 MPa sert comme source de CO₂, et le mélange de CO₂ et d'air est effectué dans un autre récipient avec un volume de 0.3 m³ et une pression jusqu'à 1 MPa.
- Le gaz mélangé ou celui fourni par le cylindre est transporté par des pipes vers la chambre, et vidanger encore dans les pipes par des trous dans le plafond de la chambre.
- Des ventilateurs sont mis à l'intérieur du récipient et dans la chambre, pour fixer une concentration constante de CO₂, qui est plus lourde que l'air. La concentration de CO₂ est enregistrée par les tubes de détection avec l'exactitude de 0.5.
- L'humidité relative HR du système est maintenue par déshumidificateur (déhumidifier), qui se compose d'une unité de refroidissement.

- Un temporisateur (timer) est également employé pour contrôler tout le système, le temporisateur branche tout le système pendant une durée choisie, et le faire coupé avec la même période sans interruption. Ceci garde l'humidité relative constante dans le système.
- Un régulateur de pression (pressure regulator) contrôle la pression de système.

La Figure I-11 représente un diagramme schématique des constituants du système et son fonctionnement[20]. Il reste à noter que la performance du système peut être jugée selon les dispositifs utilisés, par exemple :

- l'utilisation d'un dispositif électronique sophistiqué pour mesurer l'humidité relative et la température dans le système.
- L'utilisation d'une pompe d'une capacité plus élevée de sorte qu'elle fonctionne correctement pendant une durée plus longue sans surchauffer quand la pression appliquée est importante.

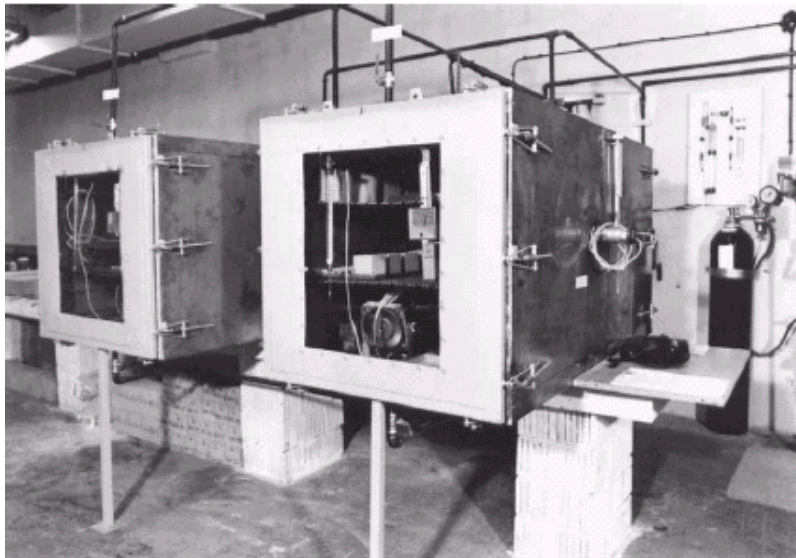


Figure I-10 Chambre hermétique [19]

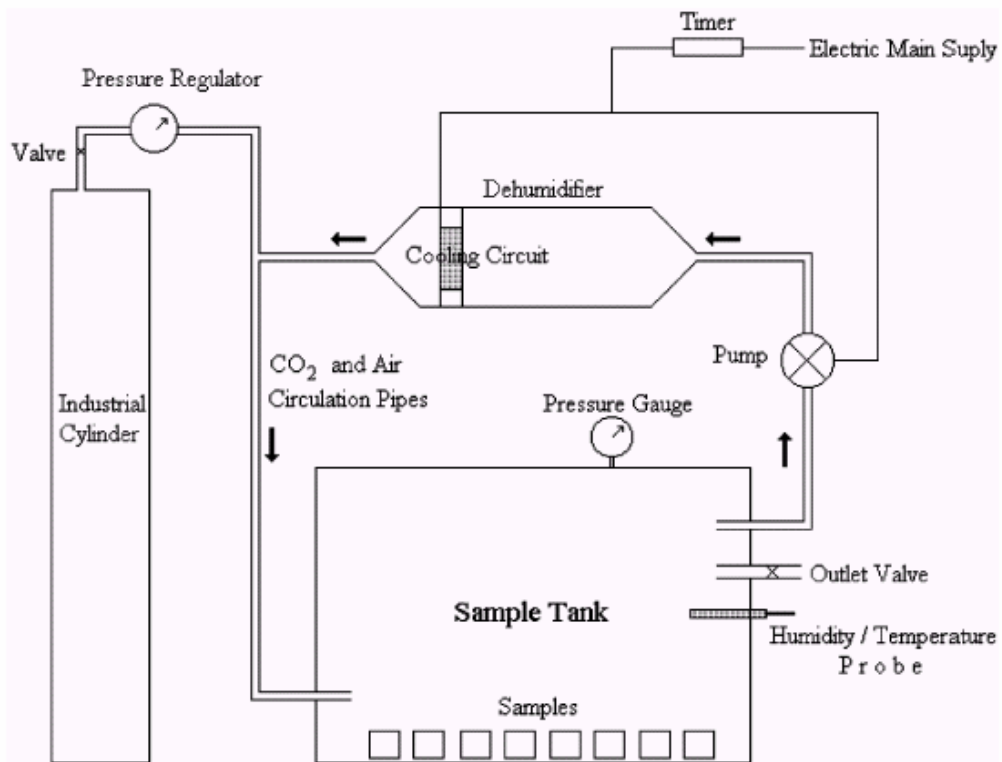


Figure I-11 Diagramme schématique des constituants du système et les étapes de manipulation [20]

V-1-3 Procédure de manipulation

Nous voulons par exemple assurer une concentration du CO₂ proche de 5 % dans l'essai de la carbonatation accélérée, la procédure à suivre pour réaliser cette concentration passe par 5 étapes qui sont :

- 1- commencer avec un appareillage rempli d'air ambiant.
- 2- Exercer avec un mélange aride de CO₂, en mettant en marche la pompe (2.5 % CO₂) à 1 bar au dessus d'ambiant, puis mettre en circulation le vent (de faible pression à l'ambiant).
- 3- Répéter l'étape 2 en donnant 3.75 % de CO₂.
- 4- Répéter l'étape 2 en donnant 4.375 % de CO₂.
- 5- Presser approximativement 4.70 % de CO₂ à 1 bar au dessus de l'ambiant.

V-2 Méthodes de mesure de la profondeur de carbonatation**V-2-1 Degré de carbonatation**

On appelle degré de carbonatation D_c , l'augmentation de la profondeur de carbonatation en fonction du temps (volume du béton altéré par l'effet du CO_2 en fonction du temps).

D'autres définitions de ce paramètre, peuvent être trouvées dans la littérature, par exemple Matsushita et autres [18], ont indiqué l'augmentation de la densité en bloc comme critère de la carbonatation. Cependant, il ne pourrait pas décrire le degré de carbonatation avec cette augmentation, parce que la quantité d'eau adsorbée a pu avoir changée pendant la carbonatation.

La détermination de D_c exige l'estimation de la quantité de CO_2 et $\text{Ca}(\text{OH})_2$ combinée. Il y a plusieurs méthodes d'analyses pour évaluer ces quantités dans le matériau cimentaire telles que : l'analyse thermogravimétrie TG-DTA (la quantité de CO_2 est mesurée comme perte de poids pendant le chauffage de 600 à 800 °C correspondant à la décomposition de CaCO_3), l'analyse chimique en utilisant l'acide chlorhydrique et la méthodes IR spectrale etc... Tableau I- 3 [18].

Plusieurs chercheurs comme Dapkus, Strankevisius, Iwasak [18] et d'autres ont proposé le degré de carbonatation sous la formule suivante :

$$D_c (\%) = [(C - C_0) / (C_{\max} - C_0)] \times 100 \quad (1)$$

Avec C , C_0 et C_{\max} sont la quantité de CO_2 dans l'échantillon carbonaté, non carbonaté, et au maximum de carbonatation respectivement ; la valeur de C_{\max} et C_0 est évaluée approximativement par Dapkus et Strankevisius[18] ($C_{\max} = 16\%$ et $C_0 = 2\%$). En effet, la formule de D_c peut prendre une autre forme indépendamment de C_0 , comme celle donnée par Sun et al (eq (2)) :

$$D_c (\%) = [C / C_{\max}] \times 100 \quad (2)$$

En outre, les compositions chimiques du béton confectionné dans le monde sont différentes en raison de la variété de proportions du mélange, et par conséquent il est précis et approprié d'après Funiaki et al [18] de définir le degré de carbonatation par le rapport molaire entre le CaCO_3 formé et le montant total de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ pour rivaliser avec les divers travaux de recherche. De cette façon le D_c reprendra la même formule comme celle donnée par l'eq (1) avec C_{\max} : est la quantité théorique de CO_2 requise pour combiner avec tout le $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dans l'échantillon pour former CaCO_3 .

La Figure I-12 montre l'évolution de D_c en fonction du temps, on remarque que le degré de carbonatation D_c atteint la saturation (approximativement 60%) après 35 ans sous une concentration de CO_2 égale à 3 %

Jours de traitement	Quantité de CO_2 (wt.%)		
	TG-DTA	IR spectrale	Analyse chimique utilisant l'acide chlorhydrique
0 (non carbonaté)	0.91	2.64	1.78
10	4.93	7.70	6.98
20	9.38	12.5	12.0
50	11.8	15.8	15.9

Tableau I-3 Quantité de CO_2 analysée par les différentes méthodes [18]

TG-DTA : l'analyse thermogravimétrie (voir page 25)

IR spectrale : analyse spectrale (voir page 21)

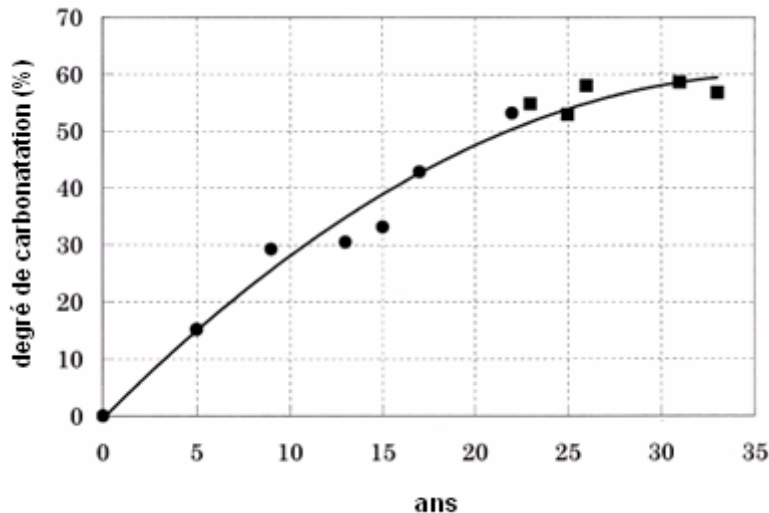


Figure I-12 L'évolution du D_c en fonction du temps [18]

V-2-2 Méthodes et techniques de mesure

La profondeur de carbonatation (x) est habituellement mesurée par la pulvérisation d'un indicateur du PH qui désire le changement de couleur dans certains intervalles. En effet, la propagation de la carbonatation est plus complexe que généralement assumée et ne peut pas être amplement décrite par une simple méthode.

Des techniques très avancées telles que : la diffraction des rayons X, la méthode thermogravimétrie, la méthode spectrale et l'analyse chimique traditionnelle ont été employées par les chercheurs pour évaluer quantitativement l'accès du CO_2 à l'intérieur du matériau cimentaire.

V-2 -2-1 La détection par la phénolphthaleine

Cette méthode directe, rapide à mettre en œuvre et très économique, permet de distinguer à l'aide d'une solution de phénolphthaleine répandue sur une fracture fraîche du matériau, la partie saine de la partie carbonatée.

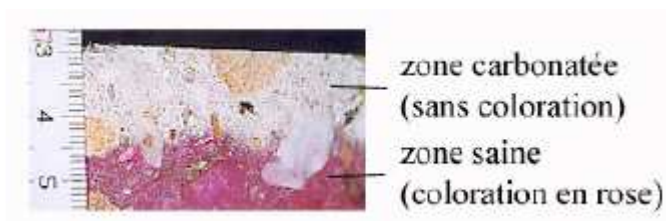
La méthode est basée donc sur l'observation pour déterminer le front de carbonatation : la colorisation rose représente la zone non carbonatée dont le PH est supérieur à 9 dénotant la présence de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, et la partie incolore (sans couleur) correspond à la zone carbonatée Figure I-13.

Le meilleur indicateur pour un contraste maximum de colorisation est la solution de phénolphthaleine produite par l'alcool et l'eau : habituellement 1 g d'indicateur dans 100 ml d'alcool éthylique /eau (50/50 de mélange), ou bien plus d'alcool que l'eau [3].

La Figure I-14 représente une schématisation du front de carbonatation après la pulvérisation de la phénolphthaleine.



Figure I-13 Mesure de la profondeur de carbonatation détectée par la phénolphthaleine



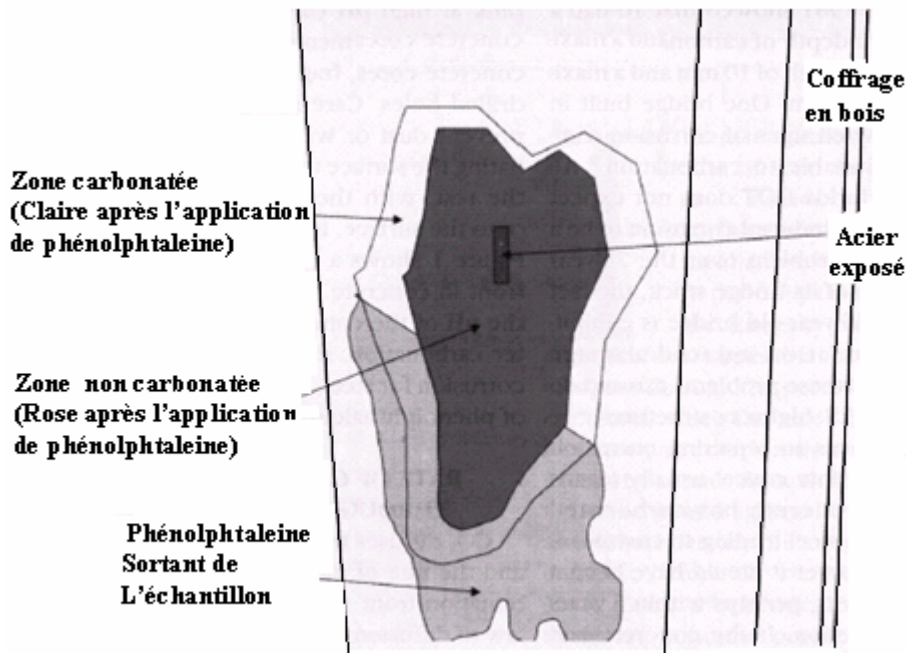


Figure I-14 Schématisation du front de carbonatation après la pulvérisation De phénolphthaléine [3]

Finalement, cette technique a l'avantage de pouvoir révéler une ligne d'équi-PH (PH autour de 9) traduisant ainsi la baisse significative du PH, facteur en relation directe avec la stabilité physico-chimique des armatures et donc les risques de corrosion.

Note

Pour les échantillons cubiques, la profondeur moyenne de carbonatation est mesurée sur deux point perpendiculaires à trois faces du cube cassé, la 4^{ème} face est ignorée, parce qu'elle représente généralement le béton sain du l'élément Figure I-15[20].

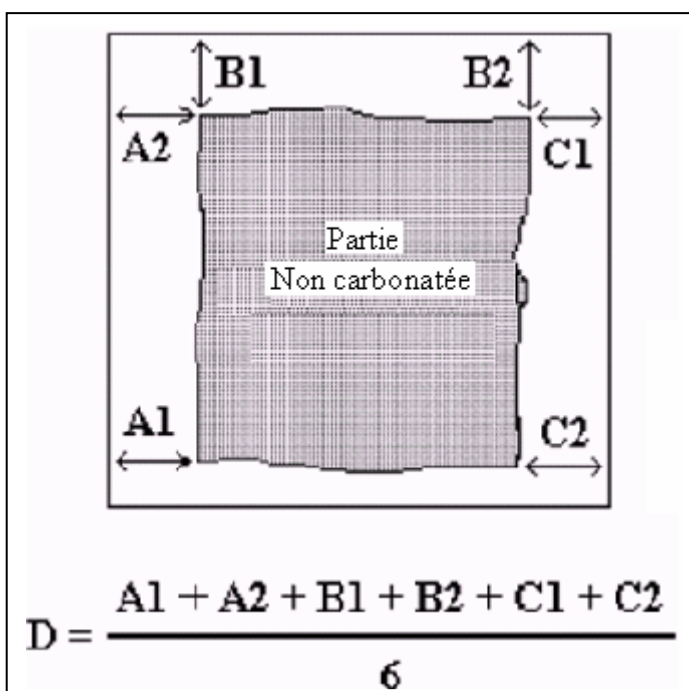


Figure I-15 Section de spécimen en béton coupée après la carbonatation [20]

V-2 -2-2 Méthodes modernes de mesure

1- Introduction

Beaucoup de bétons de moyenne consistance où mal compacter et les bétons sous terrain exposés aux carbonates dissous dans l'eau ne montrent pas clairement le front de carbonatation par la méthode traditionnelle de phénolphtaleine.

Les causes principales de cette difficulté de mesure sont généralement :

- présence des agrégats obscurément colorés mène à une illusion visuelle dans la méthode d'indicateur, et occasionne des difficultés en différenciant les changements de couleur.
- Une profondeur de carbonatation jusqu'à une exactitude de 0.5 mm peut être identifié par l'œil nu.
- Dans la théorie, il existe une zone partiellement carbonatée ou la valeur de PH n'est pas facilement détectée en utilisant la phénolphtaleine.
- Le CO₂ pourrait réagir à des profondeurs beaucoup plus profondes que celles indiquées par l'indicateur.

Après avoir cité les inconvénients de la méthode de détection par la phénolphtaleine, il nous semble que cette méthode qui est basée sur le jugement visuel de la frontière de couleur ne donne pas un résultat cohérent en terme de profondeur(x), et par conséquent peut avoir sous-estimé le degré de carbonatation D_c .

Cette situation a obligé les chercheurs d'utiliser d'autres méthodes beaucoup plus précisées pour la mesure de la profondeur de carbonatation.

2 - Méthode spectroscopique infrarouge (F-T-IR)

La méthode spectroscopique infrarouge [fourier-transform-infrared-spectroscopy], est l'une des méthodes modernes préconisées par les experts. Cette méthode offre la possibilité de mesurer la profondeur de carbonatation avec une précision appréciable et elle représente un outil scientifique très puissant qui sert à maîtriser les incertitudes des résultats obtenus par la méthode d'analytique conventionnelle.

Le principe de cette approche consiste à faire passer une lumière infrarouge IR à l'intérieur de l'échantillon. Chaque groupe fonctionnel résonne par ces caractéristiques fréquentielles d'absorption dans la région infrarouge du spectre électromagnétique et par conséquent nous pouvons déterminer la structure des groupes fonctionnels qui accumulent les molécules. En effet, l'intensité de la lumière IR a une tendance de diminuer avec l'absorption d'un groupe fonctionnel (l'absorption représente le rapport de l'intensité IR avant et après que le spectre traverse l'échantillon).

Un spectre peut être obtenu en traçant l'absorption contre chaque longueur d'onde. Théoriquement le spectre sert comme empreinte digitale de la métallisation qui semble être utile pour l'identification et le contrôle de la qualité des produits chimiques.

En effet, le spectre IR du béton n'est pas simple en raison de la nature complexe de ce matériau ; un grand nombre de caractéristiques crêtes peuvent être trouvées tandis que quelques crêtes qui représentent quelques groupes fonctionnels peuvent être recouverts [21] Figure I-16

Une fois appliqué le spectre du béton sur l'échantillon examiné, la méthode spectroscopique détecte les changements liés à la présence de $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Des changements de l'amplitude du spectre sont également notés pour le C-S-H qui subit des transformations de phase et des changements morphologiques.

La carbonatation représente la transformation des liaisons $\text{C}=\text{O}$ du CO_2 en liaisons $\text{C}-\text{O}$ du (CaCO_3). Bien que les carbonates organiques ont la même unité structurale que les carbonates minéraux, les trois liaisons de $\text{C}-\text{O}$ dans le carbonate minéral sont arrangées dans un modèle planaire triangulaire. Ainsi, qu'une étude de crête caractéristique du groupe fonctionnel $\text{C}-\text{O}$ dans la gamme du numéro d'onde $1400-1510 \text{ cm}^{-1}$ peut identifier la carbonatation dans une composition du béton complexe. Il est à noter aussi qu'un pic fondamental (background) représente la barrière qui sépare la partie non carbonatée et la zone carbonatée Figure I-17.

En fin, pour bien saisir l'importance de cette méthode, en se référant à l'étude menée par Lo et Lee [21]. Les résultats du travail montrent le prolongement de la profondeur de carbonatation (environ 1.5 mm) à l'intérieur de l'échantillon lorsqu'on passe de la méthode d'indicateur vers la méthode spectrale Tableau I-4.

Cet écart de profondeur est dû principalement à la détection de CaCO_3 où le PH est supérieur à 9 (méthode spectrale : à partir d'un intervalle entre 8.5 et 12.5 ; la phénolphthaleine à $\text{PH}=9$). Cette augmentation de quantité de CaCO_3 conduit à modifier la position de front de carbonatation c'est à dire faire le déplacer vers l'intérieur Figure I-18 [21]

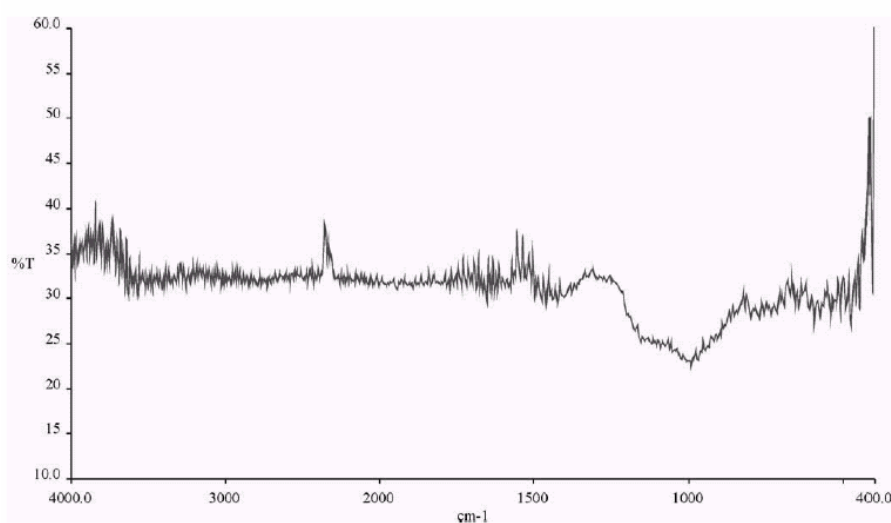


Figure I-16 Spectre typique du béton [21]

Chapitre I

la carbonatation dans les matériaux cimentaires

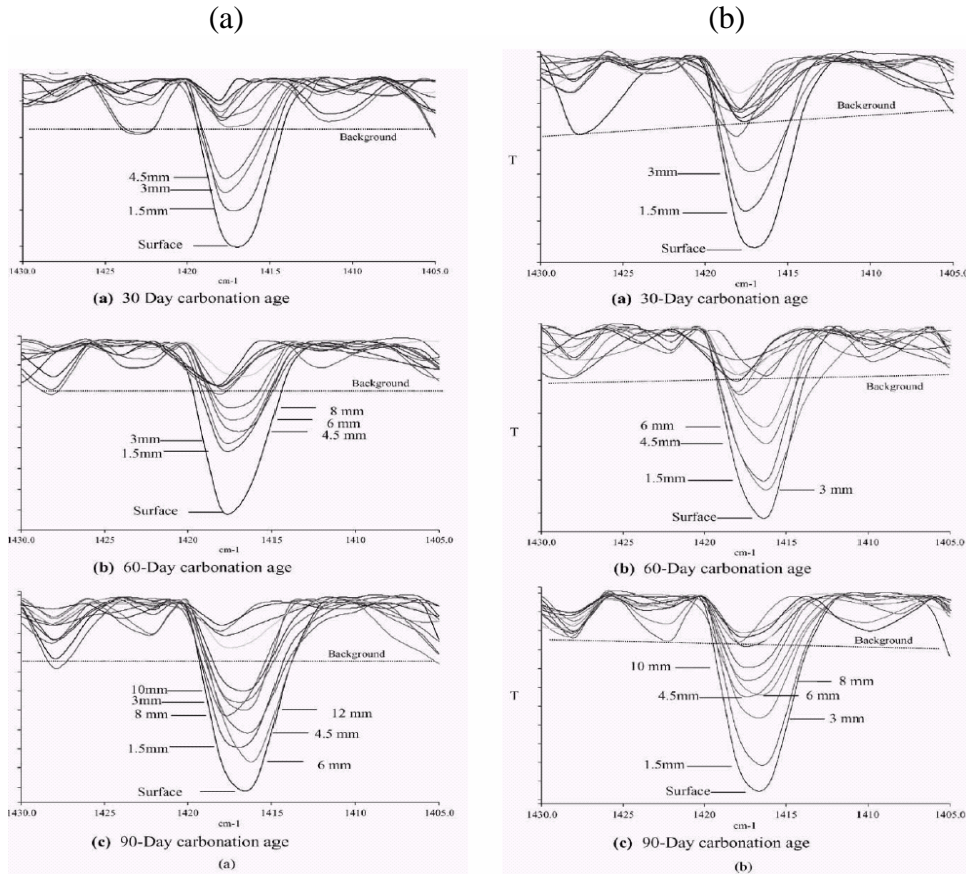


Figure I-17 Détermination de la profondeur de carbonatation par le (F-T-IR) [21]

(a) : béton curé en air E/C = 0,54

(b) : béton curé en eau E/C = 0,54

Mélange (E/C)	Type de cure	Résistance (MPa)	Profondeur de carbonatation (mm) Phénolphtaleine P, spectre infrarouge (I), age (mois)			Carbonatation relative P, (I), age (mois)			Degré de carbonatation après 3 mois (P), (I)	Augmentation (%)
			1	2	3	1	2	3		
A (0.38)	Air	66	1 (1.5)	3.5 (4.5)	5 (6)				10.0 (12.1)	21
	Eau	78	0.5 (1)	1.5 (3)	3 (4.5)	50.0 (66.7)	42.9 (66.7)	60.0 (75.0)	6.0 (9.1)	
B (0.46)	Air	44	1.5 (3)	4 (6)	7 (8)				14.1 (16.1)	14.2
	Eau	63	1 (1.5)	2.5 (4.5)	5 (6)	66.7 (50.0)	62.5 (75.0)	71.4 (75.0)	10.0 (12.1)	
C (0.54)	Air	35	3 (4.5)	5.5 (8)	10 (12)				20.1 (24.2)	20.4
			1.5 (3)	4 (6)	8.5 (10)	50.00 (66.7)	72.7 (75.0)	85.0 (83.3)	17.1 (20.1)	
	Eau	54				55.6 (61.1)	59.4 (72.2)	72.0 (77.8)	12.8 (15.6)	17.5
			moyenne							23.9

Tableau I-4 Comparaison des résultats de la profondeur de carbonatation entre la méthode de phénolphtaleine et la méthode spectroscopique [21]

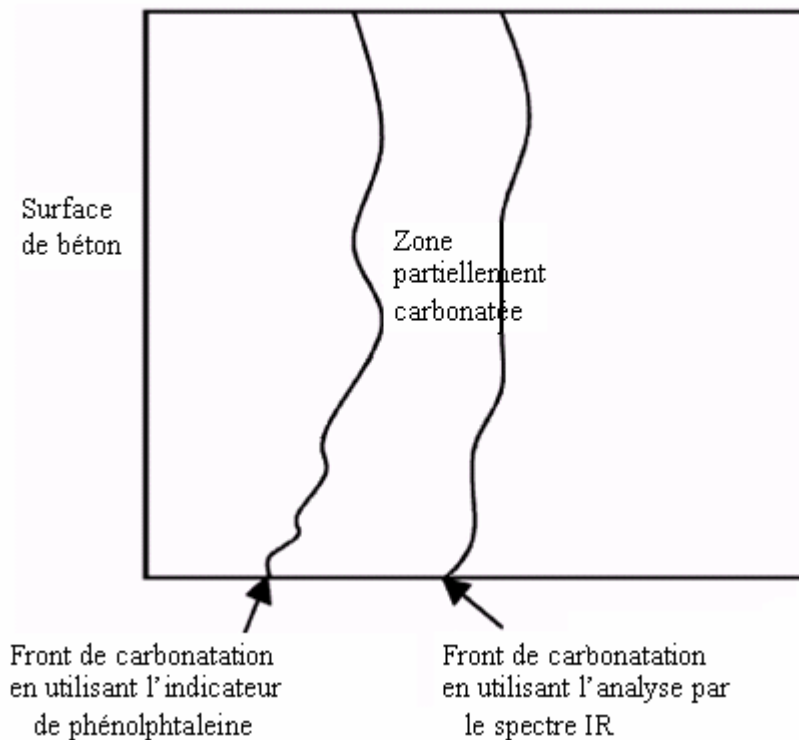


Figure I-18 Modèle schématique du front de carbonatation en utilisant l'indicateur phénolphthaleine et l'analyse spectrale [21]

3 - La microscopie optique

Cette technique est très utilisée en pétrographie par les géologues pour déterminer la minéralogie et la structure des roches. Pour le suivi de la carbonatation, son utilisation peut se révéler très instructive quant à la connaissance de la nature des granulats (minéralogie, état d'altération, régularité de composition, etc.) mais elle peut également fournir des renseignements intéressants sur la constitution de la pâte de ciment.

Son principe consiste à observer des lames très minces (de l'ordre de 30 μm pour que la lumière polarisée puisse passer à travers l'échantillon) de matériau cimentaire avec un microscope optique en lumière transmise polarisée afin de caractériser la formation de certains minéraux [14].

Dans les images visualisées par le microscope optique (Figure I-19), la colorisation des minéraux dépend de leur biréfringence, de leur épaisseur et de leur orientation. Cette caractéristique permet de repérer dans un matériau cimentaire carbonaté la calcite sous forme de microcristaux (partie claire sur l'image). L'épaisseur de cette calcite, révélant l'avancé du front de carbonatation, est mesurée à l'aide d'un micromètre situé au niveau de l'oculaire du microscope.

L'avantage de cette technique, comparée à l'utilisation de phénolphthaleine, c'est qu'elle quantifie avec plus de précision l'avancé du front au niveau de la zone en cours de carbonatation.

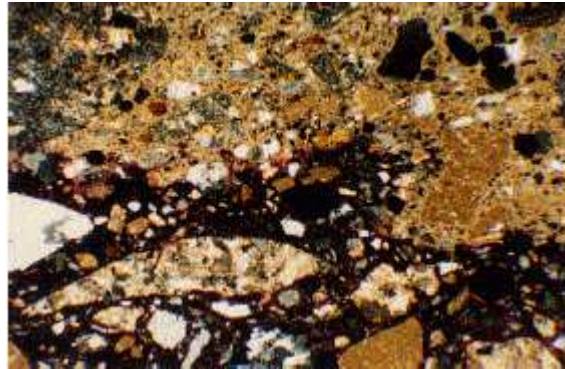


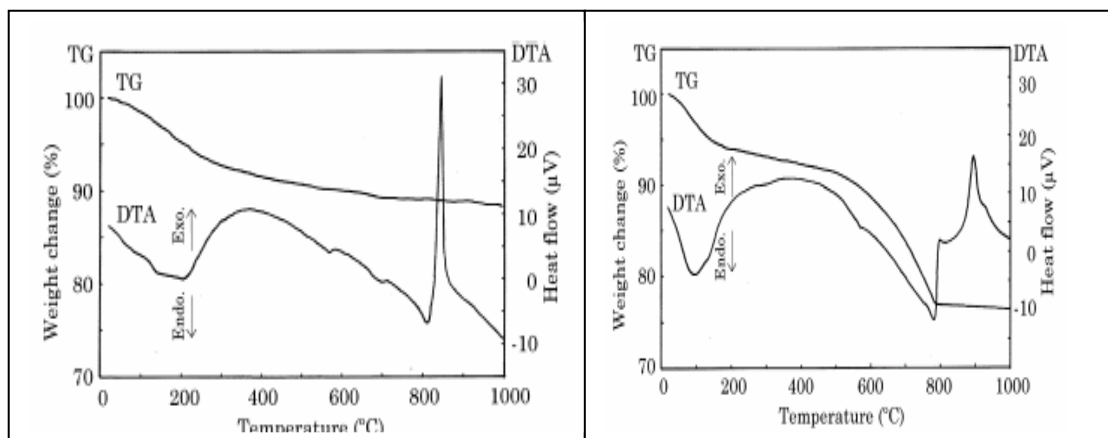
Figure I-19 Echantillon du béton courant (B30) carbonaté, visualisé en lumière polarisée avec un microscope optique (agrandissement $25\times$) [14]. La région carbonaté apparaît en clair, la région saine est plus foncée.

4 - L'analyse thermogravimétrie

L'analyse thermogravimétrie se divise en deux méthodes l'ATG et l'ATD, dont le facteur commun est la chauffe du matériau. En ATG (analyse thermique gravimétrique) la perte de masse d'un échantillon est suivie en continue lors d'une montée linéaire ($10^{\circ}\text{C}\cdot\text{mn}^{-1}$) de sa température depuis celle de l'ambiance jusqu'à 1100°C que l'échantillon subit pendant tout l'essai. En ATD (analyse thermique différentielle), c'est la différence de température entre l'échantillon testé est un échantillon de référence, chimiquement inerte, qui est mesurée. Pour la mesure du degré de carbonatation c'est plutôt l'ATG qui est souvent utilisée [14].

Les quantités de portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) et de calcite (CaCO_3) sont respectivement calculées, sur les courbes de suivi de masse en fonction de la température, en détectant :

- la perte d'eau vers 550°C , résultant de la réaction de dissolution de portlandite.
- La perte de dioxyde de carbone au dessus de 650°C , résultant de la décomposition de calcite.



(a) béton aéré non carbonaté

(b) béton aéré carbonaté pendant 50 jours
($[\text{CO}_2] = 3\%$)

Figure I- 20 Comparaison des résultats de l'ATG et l'ATD d'un béton aéré [18]

L'une des difficultés de cette technique reste l'interprétation des résultats c'est-à-dire la distinction entre l'eau et le dioxyde de carbone perdus pendant l'essai. Fumiaki et al [18], proposent de comptabiliser la perte de poids revenant au dioxyde de carbone, produit lors de la décomposition de la calcite, dans la plage de température (600-800 °C) et ceci afin d'exclure celle revenant au CO₂ non encore réagi (absorbé sur la surface des pores ou dessous dans la solution interstitielle). Les mêmes auteurs estiment qu'en ATD, la détection de la quantité de CaCO₃ est obtenue en mesurant la chute du flux de chaleur entre 700 et 780 °C.

5 - L'examen au microscope électronique à balayage

Le microscope électronique à balayage (MEB) peut être utilisé pour détecter la carbonatation dans les matériaux cimentaires. Pour une tension donnée de l'appareil (15 à 20 kV) et avec un grossissement d'environ 1000 fois, il est possible de caractériser sur des fractures fraîches de matériau, la formation de carbonates de calcium. La technique permet de visualiser la carbonatation de portlandite (Figure I-21) et celle des autres hydrates, en particulier les silicates de calcium hydratés (CSH) (Figure I-22) et l'étringite.

Selon le grossissement choisi (entre 300 et 1500 ×), la visualisation permet d'observer un changement de microstructure (Figure I-22 et I-23), ou le carbonate de calcium apparaît sous forme grenue sur les hydrates superficiellement carbonatés, ou sous forme de floccules sur les régions complètement carbonatées.

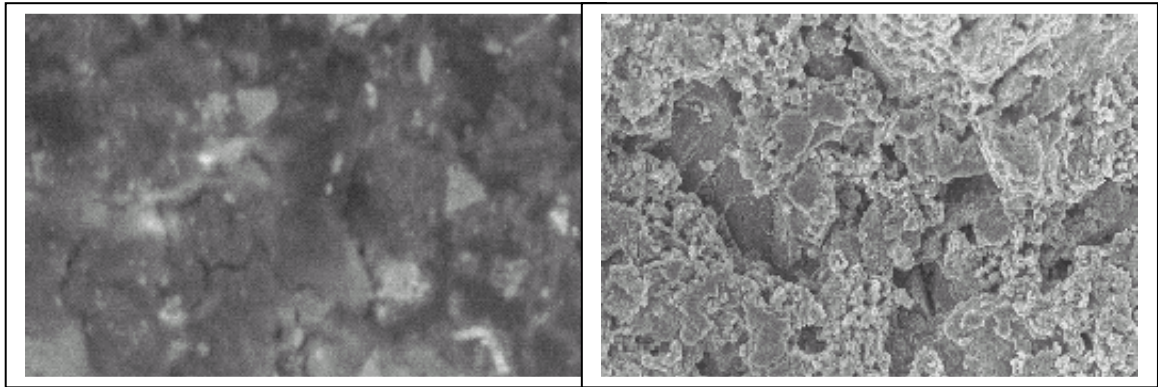


(a) carbonatation superficielle de la Portlandite (agrandissement 500 ×)



(b) carbonatation totale de la portlandite (agrandissement 500 ×)

Figure I-21 Image (MEB) de la portlandite partiellement et totalement carbonatée.



(a) visualisation avec (MEB) du CSH non Carbonaté (agrandissement 1000 ×) (b) visualisation avec (MEB) de l'aspect du CSH carbonaté (agrandissement 1000 ×)

Figure I-22 Mise en évidence de la carbonatation des CSH par microscope électronique à balayage [14]

6 - La Diffraction des rayons X (XRD)

Cette méthode semi quantitative permet de détecter dans un matériau cimentaire, la portlandite et la présence de composés carbonatés. Son avantage réside dans le fait qu'elle permet de distinguer les trois formes possibles du carbonate de calcium (calcite, vaterite, et aragonite). Ces formes se distinguent principalement par leurs raies de diffraction d'intensités de réflexion diverses, selon la structure cristalline rencontrée par le faisceau d'atomes appliqué sur la surface à analyser [14].

En effet, l'expérience a montré que le XRD donne une valeur de profondeur de carbonatation nettement supérieure à celle donnée par la méthode phénolphthaleinne qui peut être doublée par fois. Pour des échantillons ($E/C=0.6$) soumis au test de carbonatation accéléré sous une pression normale pendant 21 jours, la profondeur (x) mesurée à l'aide de la méthode conventionnelle est autour de 1.6 cm. Par compte l'analyse effectuée par le XRD montre toujours l'existence de $CaCO_3$ dans les endroits profonds de 2.5 et 3.0 cm à partir de la surface [10], Figure I-23

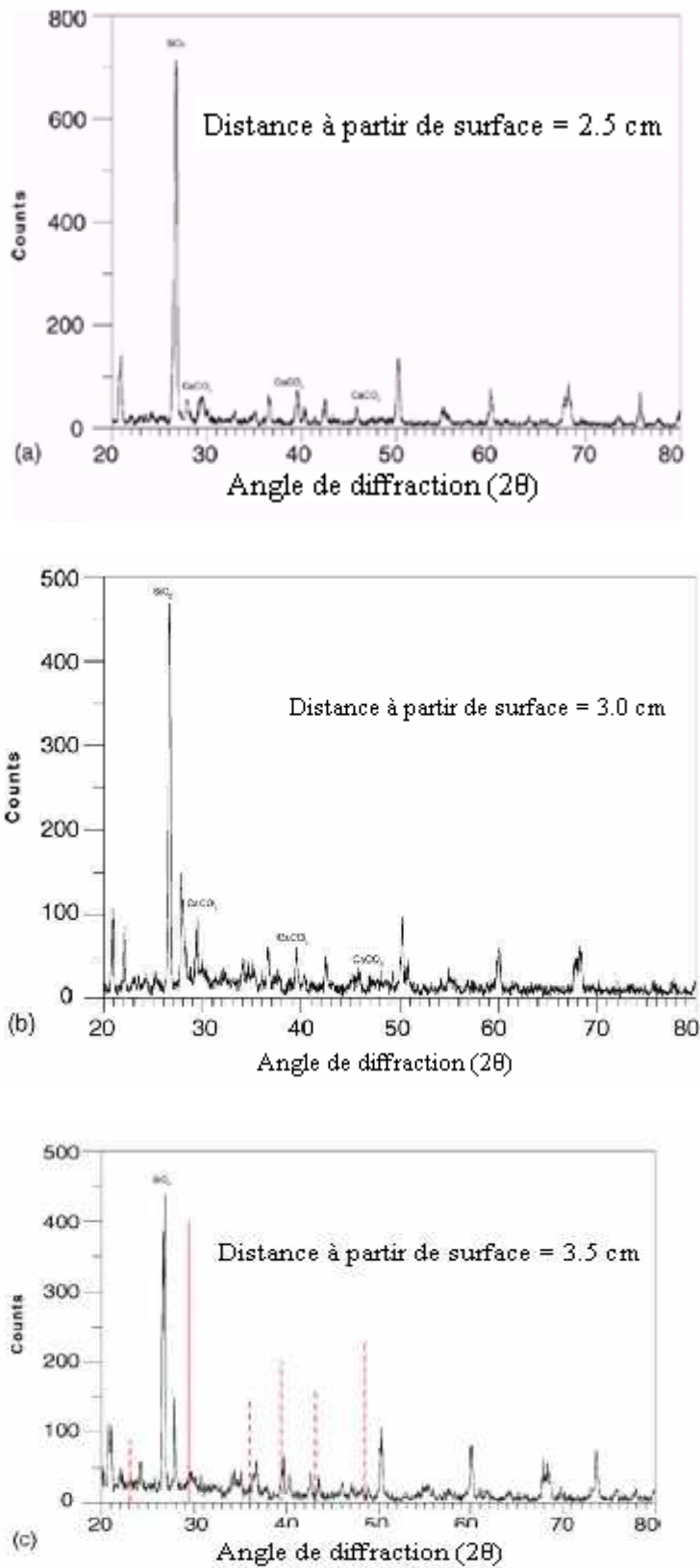


Figure I-23 Illustration des résultats de la carbonatation par le XRD pour les différentes distances [10]

Chapitre II

Comportement et durabilité des matériaux cimentaires carbonatés

Chapitre II comportement et durabilité des matériaux cimentaires carbonatés

I – CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES DU MATERIAU CARBONATE

La mention au sujet du changement des propriétés physico-chimiques du matériau cimentaire dû à la carbonatation n'est pas ainsi fréquente. En effet, cette dernière pourrait être essentielle pour le diagnostic des structures en béton où l'interprétation des paramètres mesurés est nécessaire.

Dans cette section, nous présentons quelques propriétés physico-chimiques du matériau cimentaire carbonaté tels que : la solution interstitielle, la porosité, déformation..., etc. Nous rappelons que d'autres paramètres comme la résistivité, la sorptivité,... ne sont pas détaillés ici et qu'ils peuvent aussi subir des changements dus à la carbonatation.

I-1 Solution interstitielle

L'analyse de la solution interstitielle (poreuse) exprimée de la pâte de ciment non carbonatée avait indiqué que le liquide contient principalement des hydroxydes de potassium et sodium (la valeur du PH est environ 13.49 correspond à une concentration de OH^- : 307 m mol/l). Cependant, dans le cas du béton carbonaté, cette quantité ne dépasse pas 1 m mol/l et seulement une petite fraction de tous les ions Na et K dans la pâte de ciment pourrait être maintenue en solution après la carbonatation (la concentration de carbonates et bicarbonates était également baissée) [17], Tableaux II-1 et II-2.

Un autre dispositif intéressant des résultats montrés dans le Tableau II-1, c'est la variation de la concentration d'ion chlorure (Cl^-) dans la solution interstitielle. On remarque donc, qu'une proportion plus élevée de Cl^- présente comme impureté dans le ciment est déchargée dans la solution quand la carbonatation est effectuée. Ce résultat confirme que la carbonatation induit la décomposition de chlorure attaché dans la phase solide telle que les hydrates chlor-aluminate de calcium.

En fin, cette pauvreté de OH^- dans la solution poreuse et la faible quantité de Na et K, explique bien la capacité du phénomène à modifier la cinétique de relâchement des éléments constitutifs de la matrice cimentaire.

Ce résultat a été confirmé par Bescop et al [15] d'où : à PH = 8.5 le flux de calcium lixivié dans une eau carbonatée (2.5 moles de NaHCO_3) est 40 fois moins plus faible qu'en eau pure et le flux d'hydroxydes est quant à lui 25 fois plus faible Figure II-1

Chapitre II **comportement et durabilité des matériaux cimentaires carbonatés**

Saturation en Eau salée	Concentration De CO ₂ (%)	pH	OH ⁻	Cl ⁻	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻
NaCl	100	7.4	3×10 ⁻⁴	20.5	-	-	16.7	-	5.4
NaNO ₂	100	7.2	2×10 ⁻⁴	16.3	123.7	33.7	12.6	-	15.8
NH ₄ NO ₃	100	9.6	4×10 ⁻²	11.4	-	-	15.3	0.9	4.4
Mg(NO ₃) ₇ .6H ₂ O	100	7.4	3×10 ⁻⁴	23.4	-	-	18.0	-	5.8
Na ₂ Cr ₂ O ₇ .2H ₂ O	100	7.1	1×10 ⁻⁴	23.4	-	-	20.3	-	6.9
NaCl	5	8.7	5×10 ⁻³	13.1	-	-	19.7	-	2.8
NaNO ₂	5	10.4	0.3	10.8	22.3	0.4	19.3	1.5	0.8
NH ₄ NO ₃	5	9.9	0.1	12.0	-	-	24.1	0.5	1.3
Mg(NO ₃) ₇ .6H ₂ O	5	10.9	0.8	7.5	-	-	2.0	9.8	3.1
Na ₂ Cr ₂ O ₇ .2H ₂ O	5	10.8	0.6	11.2	-	-	6.9	8.2	2.1
NaCl	0.03	10.7	0.5	4.1	-	-	1.2	7.6	3.0
NaNO ₂	0.03	10.6	0.4	8.0	15.8	0.3	11.4	7.6	3.8
NH ₄ NO ₃	0.03	10.6	0.4	7.5	-	-	10.9	6.5	3.3
Mg(NO ₃) ₇ .6H ₂ O	0.03	10.9	0.8	8.4	-	-	1.9	8.0	2.0
Na ₂ Cr ₂ O ₇ .2H ₂ O	0.03	10.7	0.5	8.9	-	-	5.0	6.1	2.4

Tableau II-1 Concentration des anions de la pâte de ciment après la carbonatation [17]

Saturation en Eau salée	Concentration De CO ₂ (%)	NH ₄ ⁺	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
NaCl	100	-	3.8	9.9	0.9	20.8
NaNO ₂	100	-	4.0	12.4	8.4	78.5
NH ₄ NO ₃	100	-	1.7	5.5	-	20.3
Mg(NO ₃) ₇ .6H ₂ O	100	-	5.2	11.4	1.0	22.1
Na ₂ Cr ₂ O ₇ .2H ₂ O	100	-	9.9	16.5	2.0	19.6
NaCl	5	-	3.9	8.9	-	22.3
NaNO ₂	5	-	6.8	19.2	-	26.9
NH ₄ NO ₃	5	-	6.5	16.0	-	22.9
Mg(NO ₃) ₇ .6H ₂ O	5	-	0.3	0.6	-	19.1
Na ₂ Cr ₂ O ₇ .2H ₂ O	5	-	0.5	1.2	-	25.0
NaCl	0.03	-	3.0	14.5	-	12.3
NaNO ₂	0.03	-	4.1	13.9	-	26.4
NH ₄ NO ₃	0.03	-	3.5	13.2	-	18.2
Mg(NO ₃) ₇ .6H ₂ O	0.03	-	3.1	26.4	-	7.1
Na ₂ Cr ₂ O ₇ .2H ₂ O	0.03	-	0.7	1.1	-	23.1

Tableau II-2 Concentration des cations de la pâte de ciment après la carbonatation [17]

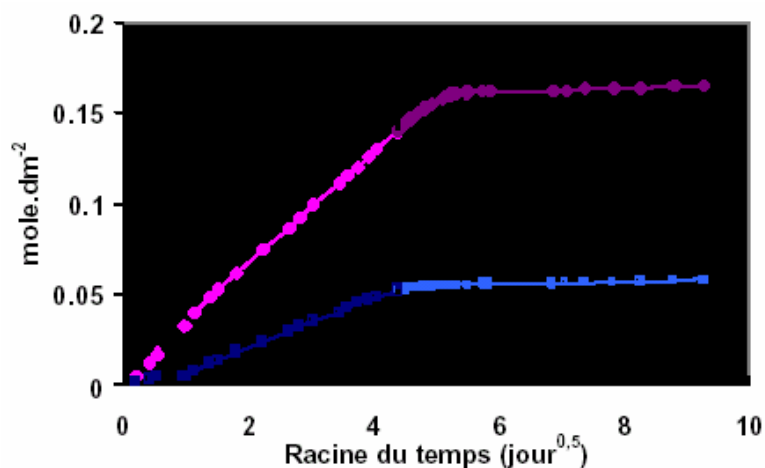


Figure II-1 Evolution des quantités cumulées d'ions OH^- et Ca^{2+} relâchés d'une pâte de CPA lixiviée par de l'eau puis par une solution carbonatée (NaHCO_3) [15]

I-2 Porosité

La robustesse du béton aux agents agressifs au cours de leur service est contrôlée au départ par sa consistance qui introduit la densité et la porosité. En effet, la porosité du béton est une caractéristique physique qui dépend de dosage du ciment, de la forme des agrégats et de sa mise en œuvre (compactage).

Les travaux de Jerga [19] sur quatre séries du béton distingués par leur dosage (Tableau II-3), montrent que le béton provoqué par la carbonatation se caractérise par une augmentation de densité et une réduction de 5 – 12 % de la porosité Figure II-2. Encore de le même contexte, les résultats de Anstice et al [17] prouvent qu'il avait une augmentation apparente du volume de densité et diminution associé de toute la porosité de la pâte de ciment après la carbonatation Tableau II-4 [17].

Ces changements peuvent être explicables en terme du degré de carbonatation croissant qui dépend de la concentration de CO_2 et qui cause une densification marquée du matériau. En effet, comme il a été mentionné avant, les carbonates de calcium ont une solubilité très faible et peuvent précipiter à l'intérieur des pores réduisant aussi la porosité et formant une barrière au progrès de l'avant de carbonatation.

Chapitre II comportement et durabilité des matériaux cimentaires carbonatés

	Séries				
	A	B	C	2H	
Agréments de Fleuve	0-1 mm	540	576	624	540
	1-2 mm	170	181	196	170
	2-4 mm	235	250	271	235
	4-8 mm	335	357	387	335
	8-16 mm	400	426	462	400
Ciment portland PCI 42.5 ²	400	280	200	280	
E/C	0.47	0.6	0.8	0.6	
Contenu d'air (%)	3.5	-	-	3.2	

Tableau II-3 Proportions des mélanges (kg.m⁻³) [19]

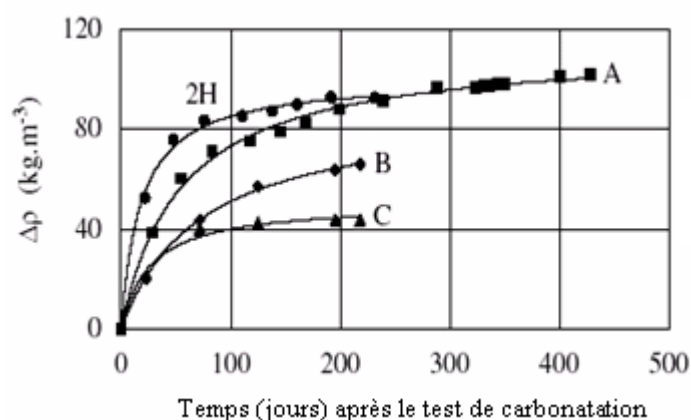


Figure II-2 L'incrément du densité $\Delta\rho$ des prismes en fonction du temps [19]

Saturation en Eau salée	Concentration De CO ₂ (%)	Volumétrie de densité (g/cm ³)	Porosité capillaire (%)	Porosité totale (%)
NaCl	100	1.992	22.15	38.21
NaNO ₂	100	1.996	22.17	38.19
NH ₄ NO ₃	100	1.993	22.87	38.67
Mg(NO ₃) ₇ .6H ₂ O	100	1.992	23.07	39.17
Na ₂ Cr ₂ O ₇ .2H ₂ O	100	1.993	22.94	39.69
NaCl	5	1.984	15.58	39.62
NaNO ₂	5	1.982	16.02	41.54
NH ₄ NO ₃	5	1.990	16.75	41.21
Mg(NO ₃) ₇ .6H ₂ O	5	1.982	15.81	41.19
Na ₂ Cr ₂ O ₇ .2H ₂ O	5	1.985	15.29	41.05
NaCl	0.03	1.960	4.11	43.35
NaNO ₂	0.03	1.968	11.03	43.64
NH ₄ NO ₃	0.03	1.960	16.15	45.31
Mg(NO ₃) ₇ .6H ₂ O	0.03	1.960	3.54	44.16
Na ₂ Cr ₂ O ₇ .2H ₂ O	0.03	1.963	3.72	44.27

Tableau II-4 Résultats de l'absorption d'eau de la pâte de ciment après la carbonatation dans plusieurs atmosphères [17]

Chapitre II comportement et durabilité des matériaux cimentaires carbonatés

Séries	Echantillons (dimensions en mm)	Age (jours)	Nombre des echan	Résistance (MPa)	Cf de v (%)	Conditions de Cure (temps en jours)
A	Cubes 150 ³	28	6	46.12	2.72	MC
	Cubes 100 ³	545	3	47.70	3.51	NCC (28-545)
		545	3	78.38	15.70	ECC (117-545)
	Prisms 100×100×100	545	3	49.07	4.02	NCC (28-545)
		545	3	75.54	5.60	ECC (117-545)
B	Cubes 150 ³	28	3	36.08	4.30	MC
	Cubes 100 ³	393	11	44.94	5.54	NCC (175-393)
		393	16	69.08	7.40	ECC (175-393)
	Prisms 100×100×100	393	6	42.06	3.21	NCC (175-393)
		393	6	52.88	6.33	ECC (175-393)
	C	Cubes 150 ³	28	3	24.40	2.20
Cubes 100 ³		359	6	33.88	4.96	NCC (141-359)
		359	6	45.53	6.20	ECC (141-359)
Prisms 100×100×100		359	4	28.34	0.86	NCC (141-359)
		359	6	32.92	3.38	ECC (141-359)
2H	Cubes 150 ³	7	3	32.23	5.90	MC (0-2),CHD(3-7)
	Cubes 100 ³	240	6	33.17	6.78	NCC (8-240)
		240	9	63.61	4.20	ECC (8-240)
	Prisms 100×100×100	240	6	27.95	8.84	NCC (8-240)
		240	6	51.93	5.18	ECC (8-240)

Tableau II-5 La résistance de compression en fonction des conditions de cure [19]

MC : cure humide ; NCC : concentration normale de CO₂ dans la chambre ; ECC rehausser la concentration de CO₂ dans la chambre

I-4 Déformation

En comparant avec la résistance de compression, l'augmentation du module l'élasticité due à la carbonatation n'est pas très intensive, et la déformation correspondant au pic de chargement tend à augmenter simultanément avec la résistance Tableau II-6. En effet la microstructure et la composition chimique du béton ont été changés après la carbonatation, donc le diagramme σ - ϵ du béton carbonaté doit être forcément différent au celui non carbonaté Figure II-4 [19] (les échantillons carbonatés ont montrés des valeurs plus élevées de déformation par comparaison à ceux non carbonatés).

Chapitre II comportement et durabilité des matériaux cimentaires carbonatés

Séries		Environnement normal		15 % de concentration de CO ₂	
		Moyenne	Cf de .v (%)	Moyenne	Cf de .v (%)
A	E _c (GPa)	30.78	1.19	36.60	2.07
	ε _{cl} (%)	-1.839	3.46	-2.109	6.18
B	E _c (GPa)	30.57	7.93	33.51	6.08
	ε _{cl} (%)	-1.679	5.66	-1.707	8.21
C	E _c (GPa)	32.14	1.79	30.86	7.67
	ε _{cl} (%)	-1.279	1.22	-1.353	4.61
2H	E _c (GPa)	30.02	4.25	34.76	
	ε _{cl} (%)	-1.409	13.01	-1.829	8.95

Tableau II-6 Comparaison des caractéristiques de déformation mesurées dans deux environnements (normal et 15 % de CO₂) [19]

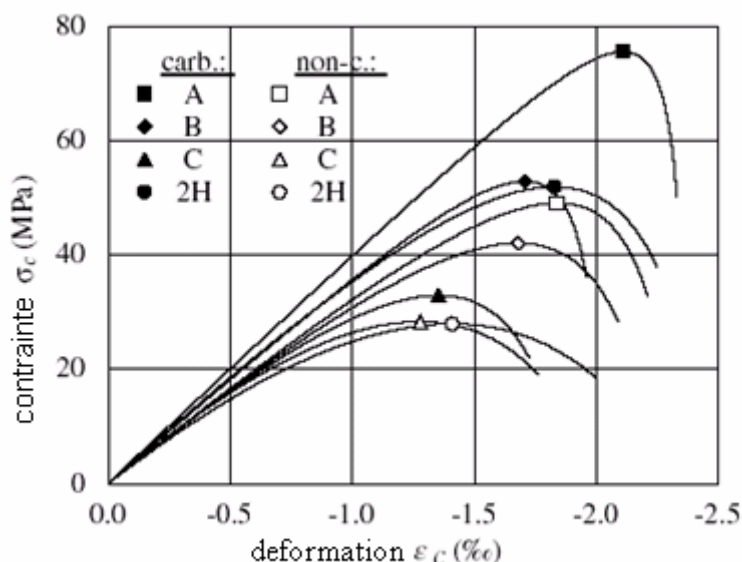


Figure II-4 Diagramme σ - ϵ des bétons carbonatés et non carbonatés [19]

La branche croissante du diagramme σ - ϵ a pu être caractérisée par le coefficient de fragilité et de plasticité, aussi bien. Le coefficient de fragilité exprime la linéarité de la branche et le coefficient de plasticité se ramollir le béton

Le point G sur le diagramme σ - ϵ (Figure II-5), correspond à l'effort de compression maximal, et l'abscisse OJ est la tangente du diagramme au point O.

Le coefficient de fragilité est défini alors comme :

$$C_{\text{fra}} = \frac{ODJ}{OFG}$$

Où le numérateur est la surface de triangle ODJ, le dénominateur représente la surface de secteur OFG dans le diagramme. Ces deux surfaces représentent l'énergie d'absorption du matériau avec une élasticité idéale et avec un comportement réel jusqu'à l'effort de compression maximal respectivement. Si la branche ascendante du diagramme s'approche à la tangente OJ, le coefficient C_{fra} se rapproche de 1.

Chapitre II comportement et durabilité des matériaux cimentaires carbonatés

Concernant maintenant le coefficient de plasticité, ce dernier est donné par la forme suivante :

$$C_{\text{pla}} = \frac{\text{OFG}}{\text{OFGK}}$$

OFG : la surface du secteur dans le diagramme.

OFGK : la surface de rectangle.

Il est évident que le coefficient de plasticité du béton soit supérieur à 0.5 et plus petit que 1, il serait possible également de remplacer le dénominateur OFGK par OFGJ [19]

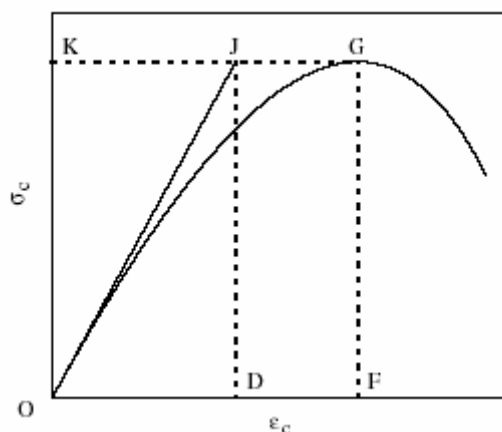


Figure II-5 Les surfaces constatées dans le diagramme σ - ϵ pour la détermination des coefficients de fragilité et plasticité [19]

En se basant donc sur ses définitions, et en faisant une comparaison avec les résultats expérimentaux (Tableau II-7), on peut conclure que les échantillons carbonatés sont caractérisés par une fragilité élevée et une plasticité réduite. Rappelons que la branche descendante du diagramme contrainte-déformation exhibe une rupture fragile du béton carbonaté.

Tous ces changements de la forme du diagramme cité précédemment dépendent essentiellement au degré de carbonatation. Une étude faite par Xiao et al [1], sur 3 séries de béton C20, C30 et C40 dont chaque série comporte 9 prismes distingués par le degré de carbonatation (3 non carbonatés avec $\alpha = 0\%$, 3 carbonatés avec $\alpha = 30\%$, et les trois derniers avec $\alpha = 45\%$). Les résultats montrent que la résistance est augmentée approximativement de 60% après la carbonatation et la plage des déformations ultimes est réduite quand le béton est carbonaté d'où sa ductilité est diminuée Figure II-6

Chapitre II comportement et durabilité des matériaux cimentaires carbonatés

Séries	Environnement normal		15 % de concentration de CO ₂	
	Moyenne	Cf de .v (%)	Moyenne	Cf de .v (%)
A cf de fragilité	0.682	2.26	0.818	3.51
cf de plasticité	0.577	0.69	0.544	1.26
B cf de fragilité	0.636	8.94	0.755	8.38
cf de plasticité	0.590	2.53	0.560	2.76
C cf de fragilité	0.499	2.55	0.605	12.88
cf de plasticité	0.628	0.62	0.598	3.49
2H cf de fragilité	0.476	6.62	0.634	10.20
cf de plasticité	0.635	1.50	0.590	2.86

Tableau II-7 Valeurs de coefficients de fragilité et plasticité après la carbonatation [19]

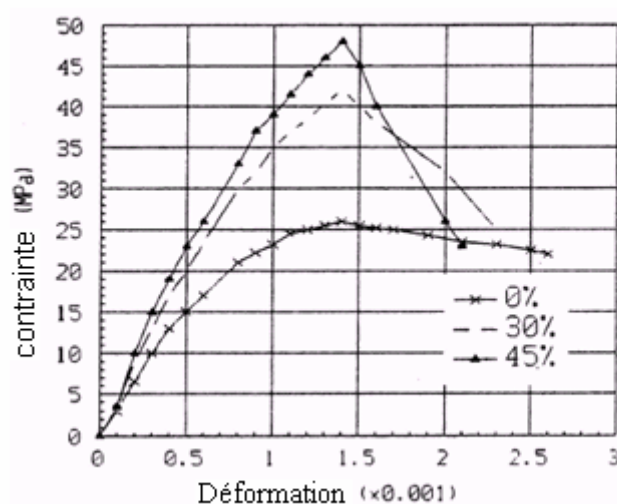


Figure II-6 Diagramme σ - ϵ moyen de séries en fonction du degré de carbonatation [1]

I-5 rigidité

Concernant la rigidité, la carbonatation présente un effet défavorable sur les constructions vis-à-vis de leurs résistances au séisme. L'expérience a montré que la carbonatation change complètement le schéma de rupture des éléments.

Le travail réalisé par Xiao et al [1], sur le comportement des éléments structuraux affectés par la carbonatation confirme ce résultat (le mode opératoire comporte 4 spécimens : deux ont subi la carbonatation accélérée dont la résistance moyenne 38,79 MPa, les deux autres sont curés dans un environnement naturel pendant 28 jours ou la résistance vaut 30,71 MPa ; le chargement est assuré par une force axiale et une force latérale activée par le déplacement contrôlé).

Chapitre II comportement et durabilité des matériaux cimentaires carbonatés

Dans le cas où l'élément concerné est le poteau, nous remarquons que la capacité de cisaillement après la carbonatation est améliorée, alors que la capacité de déformation latérale tend à diminuer Figure II-7. La raison de ces modifications se projette directement sur l'interface acier/béton qui a souffert des changements dramatiques durant la carbonatation qui affectent donc les propriétés du béton armé telle que l'adhérence.

Bien que la rigidité du poteau carbonaté ait été augmentée progressivement, sa teneur après la charge maximale est dégradée plus rapidement comparé avec le cas du béton non carbonaté. Ceci illustre exactement le phénomène d'accroissement de la réponse du poteau au cours du séisme, tandis que la capacité de dissipation de l'énergie sera réduite.

Concernant maintenant les poutres, la supposition « la section plane avant le chargement reste plane après le chargement », est toujours valable pour les poutres carbonatées. La seule différence se présente au niveau de sa capacité ultime de fléchir qui tend à augmenter, alors que la déflexion ultime est diminuée par rapport au béton non carbonaté Figure II-8[1]. Il nous semble que les nouveaux cristaux ainsi formés durant la carbonatation sont les responsables de ce changement du comportement physique des poutres carbonatées.

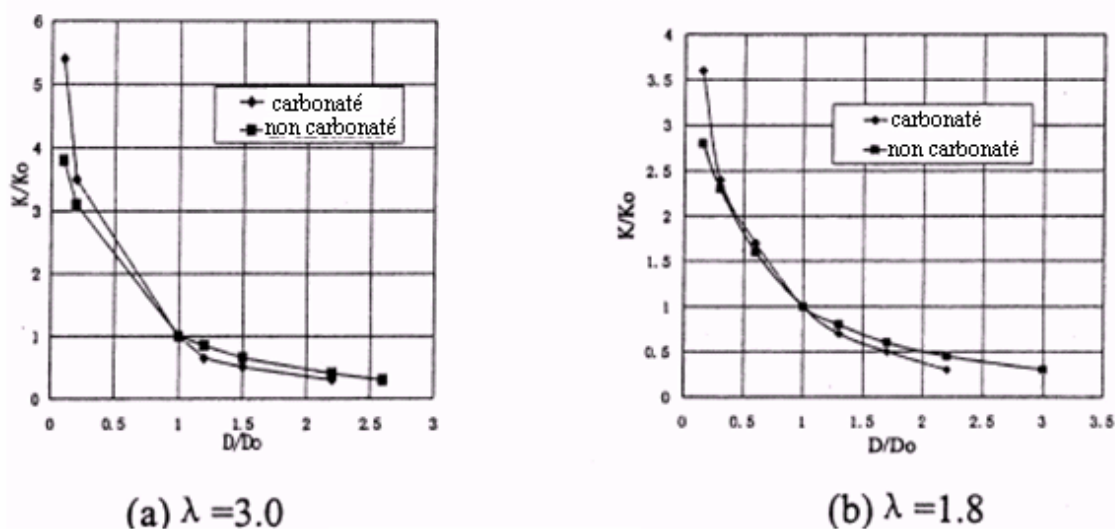


Figure II-7 Comparaison de la dégradation de rigidité [1]

λ : coefficient de cisaillement ($\lambda < 2 \Rightarrow$ poteau court)

D : déplacement latéral

D_0 : déplacement latéral correspond au point du pic de chargement

K : la rigidité équivalente du poteau

K_0 : la rigidité équivalente du poteau correspond au point du pic de chargement

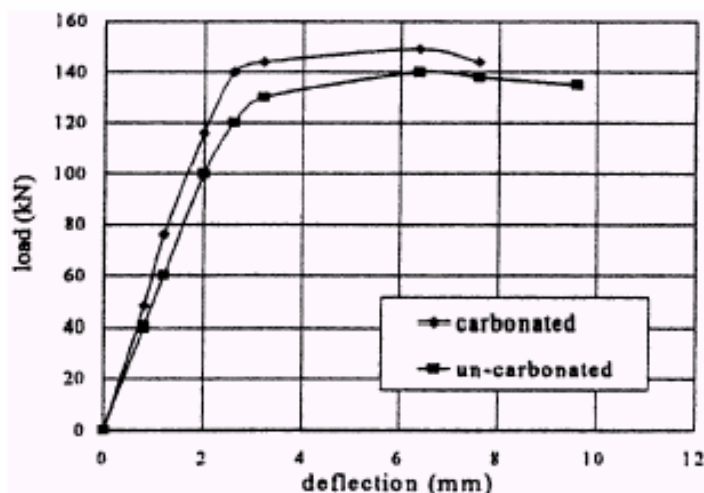


Figure II-8 Courbe chargement-déflexion [1]

I-6 Rétrécissement

Le retrait du béton peut être défini comme la déformation d'un élément de béton libre de toute sollicitation mécanique dans une ambiance thermodynamique constante, ainsi on distingue le retrait dans une ambiance séchée et le gonflement dans une ambiance saturée [23]. Il existe plusieurs types de retrait :

- * retrait de serrage.
- * retrait thermique.
- * retrait d'hydratation.
- *retrait d'évaporation avant prise (retrait plastique).
- * retrait de dessiccation.

La déformation de rétrécissement est donnée par la formule suivante :

$$\delta = [(I - I_0) / I_0] \times 100$$

Avec I et I_0 sont la longueur courante et la longueur initial respectivement.

L'expérience montre que le rétrécissement dû à la carbonatation est absent quand le degré de carbonatation D_c est inférieur à 20 %, et pour une valeur de D_c comprise entre 20 et 50 % le rétrécissement se produit graduellement et atteint 0.1 %. Cependant, un rétrécissement significatif (0.25%) aura lieu si la valeur de range entre 50 et 60 % [24] Figure II-8.

On se réfère sur la définition citée ci-dessus, il nous semble que le retrait dominant dans le cas de la carbonatation est le retrait de serrage. Le volume des hydrates formés dans la réaction d'hydratation est nettement inférieur à la somme des volumes des deux composants (ciment et eau), cette variation est de l'ordre de 8 à 12% du volume initial [23].

Chapitre II comportement et durabilité des matériaux cimentaires carbonatés

En outre, les nouveaux cristaux formés au cours de la carbonatation occupent des places dans les pores de la matrice, ceci provoque un mouvement des molécules d'eau ; parce que les produits cristallisés sont très denses que l'eau. C'est pourquoi la forme de courbe varie en fonction de dosage Figure II-10.

En effet, ce retrait se stabilise dès que le degré D_c atteint 60% (voir FigureII-9). A cette teneur la concentration de produits de carbonatation est très élevée dans la pâte de ciment qui forme donc une pâte rigide gêne son évolution.

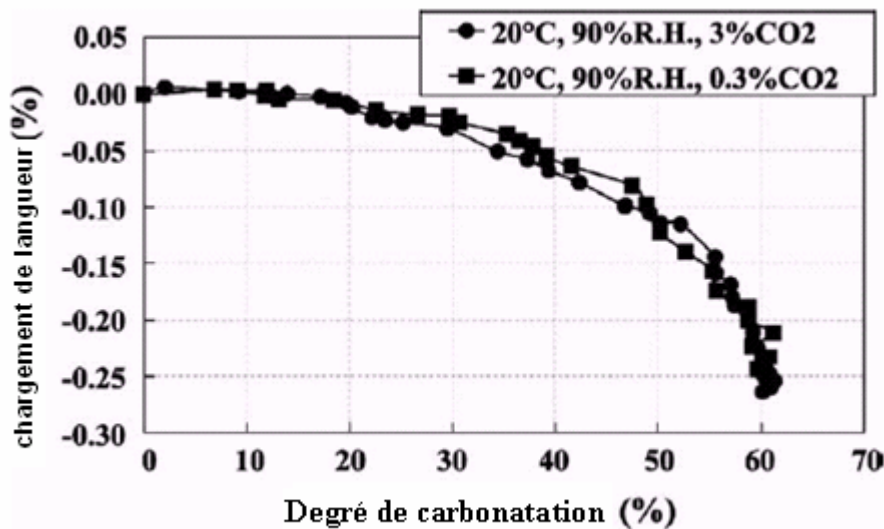


Figure II-9 Changement de longueur en fonction du degré de carbonatation [24].

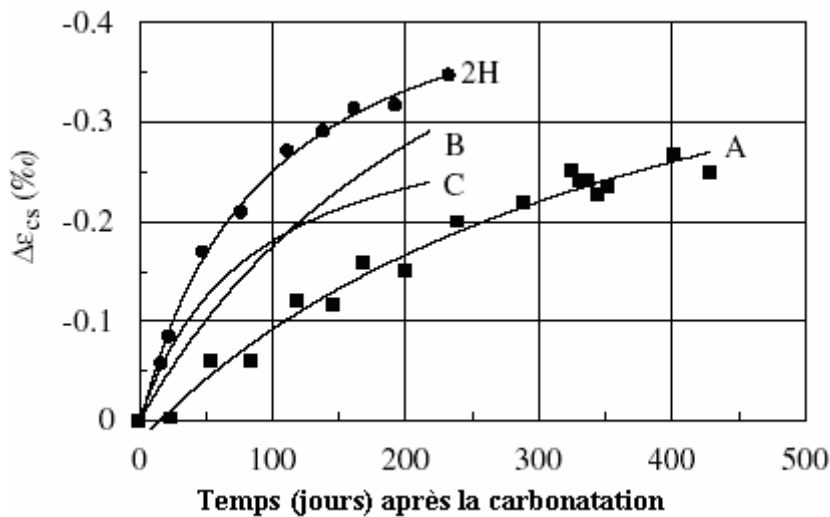


Figure II-10 L'incrément du rétrécissement $\Delta\epsilon$ des prismes en fonction du temps [19]

II – PARAMETRES INFLUENTS SUR LA CARBONATATION

II-1 Le rapport E/C

La surface exposée à l'air d'un béton ou d'un mortier se carbonate d'une manière progressive, suivant la pénétration et la progression de gaz carbonique dans le matériau.

On parlera alors de « profondeur carbonatée » à partir de la surface exposée. A un temps d'exposition donné, cette profondeur sera d'autant plus grande que le rapport eau sur ciment, E/C, est grand (Figure II-11). Car la capacité de pénétration de CO_2 dans le matériau dépend directement de sa porosité ouverte qui, elle-même, dépend du rapport E/C.

En effet, plus ce rapport est élevé, plus la quantité d'eau libre susceptible de s'évaporer est grande. En s'évaporant, cette eau laisse des vides qui favorisent, d'une part, le mouvement de l'eau libre située plus profondément dans le matériau et d'autre part, la pénétration du gaz carbonique.

En outre, l'étude menée par Lo et Lee [21], sur trois série du béton A, B et C qui ont un rapport E/C : 0,38 0,45 et 0,45 respectivement, monte bien l'influence de ce paramètre, car on observe un stade de carbonatation très élevé du béton C par rapport aux autres compositions. Cette différence n'étant pas significative dans le premier mois d'exposition ou tous les bétons ont une capacité de garde l'eau de gâchage dans cette durée, mais après 3 mois d'exposition la distinction devient remarquable, et les béton A et B sont moins carbonatés à cause du petit volume des pores grossiers qui donne d'une part le développement de la résistance et d'autre part le prolongement de la durée de cure.

La Figure II-12 montre la variation de profondeur en fonction du rapport E/C pour trois formulation du béton (0.4, 0.5 et 0.6) [10].

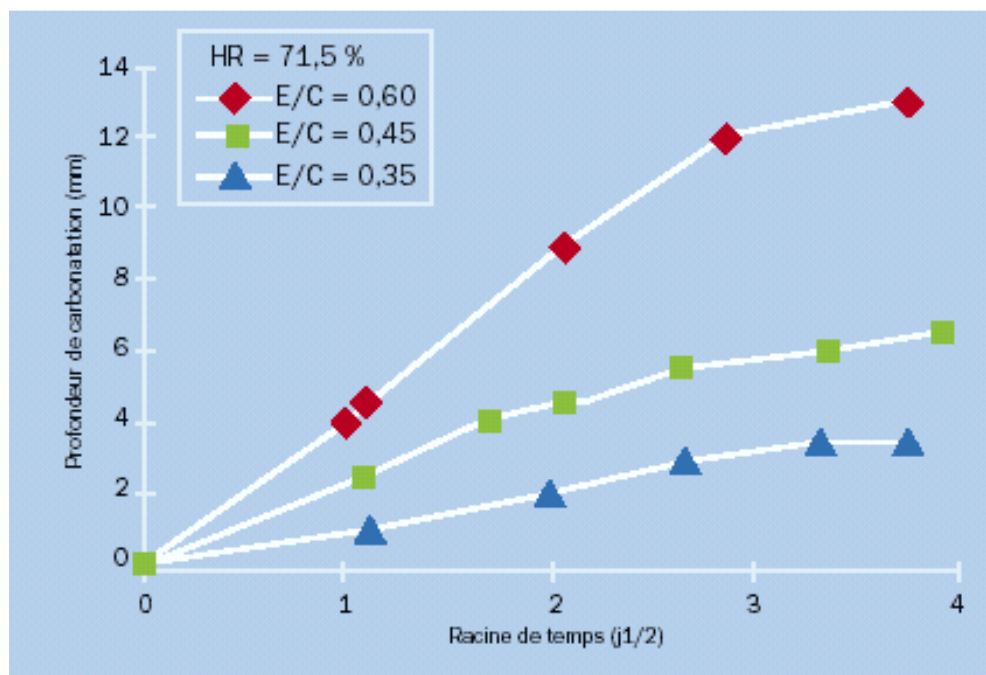


Figure II-11 Cinétique de carbonatation de pâtes de ciment de différents rapports E/C, HR 71,5 % [25]

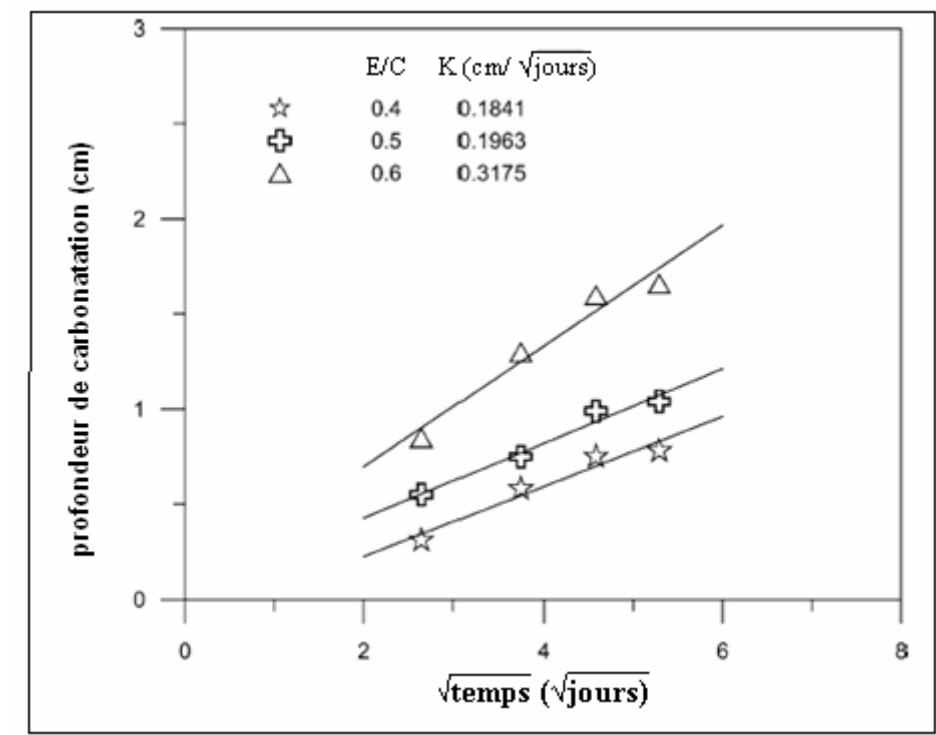


Figure II-12 Variation de profondeur en fonction de la racine carrée du temps
Pour différents rapport E/C [10]

II-2 La durée et le type de cure

La cure a pour but de maintenir des conditions de température et d'humidité propices à une meilleure hydratation du ciment. Après le décoffrage et en absence de cure, le béton d'enrobage des armatures perd rapidement son eau et l'hydratation y est alors beaucoup plus lente ce qui conduit à un degré d'hydratation plus faible, conduisant une porosité de la pâte importante. Dans ces conditions le béton d'enrobage facilite la diffusion du CO_2 et se carbonate rapidement

Pour bien comprendre l'influence de la cure sur le développement de la carbonatation, on se réfère sur l'étude de Y.Lo et Lee [21]. Les chercheurs utilisent deux types de cure (la cure en air et en eau). La profondeur mesurée à l'aide de phenolphthaleine après 1 mois indique que, le béton curé en air se carbonate de 3 mm à partir de la surface, alors que celui curé en eau ne représente que 1.5 mm et la profondeur de carbonatation continue à augmenter pour atteindre 10 et 8.5 mm pour les deux cas respectivement Figure II -13.

Cette différence enregistrée en terme de profondeur de carbonatation est attribuée certainement à la vitesse d'hydratation d'après Y.Lo. A l'échelle microscopique on peut expliquer l'influence de cure humide en terme de qualité des pores formés. Une bonne cure humide sert à produire des petits pores, et une faible connectivité entre eux, qui forment par la suite un obstacle contre la diffusion de CO_2 et empêchent leur mouvement à l'intérieur du matériau cimentaire.

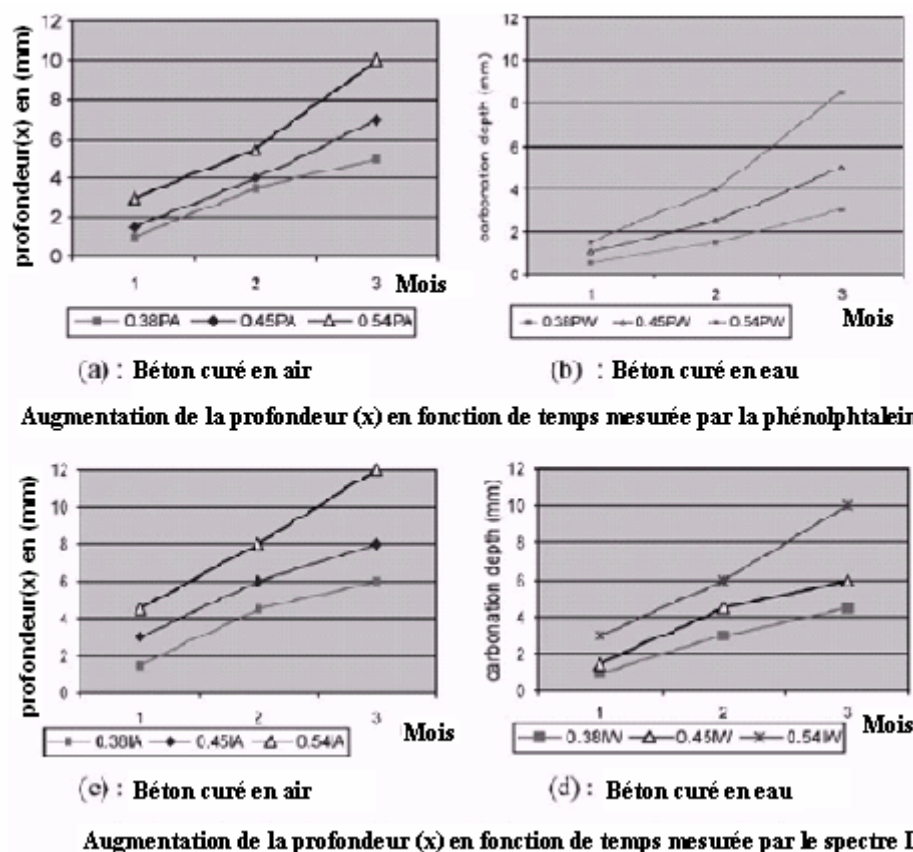


Figure II-13 Evolution de la profondeur de carbonatation en fonction du type de cure [21]

II -3 Résistance mécanique

Beaucoup de chercheurs [6], [20] estiment que la profondeur de carbonatation est une fonction décroissante de la résistance de mécanique. La relation entre ces deux grandeurs varie selon les matériaux utilisés et en particulier, elle dépend du type de ciment. Pour une résistance à la compression donnée, les bétons fabriqués avec des ciments au laitier présentent une profondeur de carbonatation un peu plus élevée [6]. Toutes les études concernant l'influence de la résistance mécanique sur la carbonatation s'accordent sur le fait que la profondeur de carbonatation à une échéance donnée diminue lorsque la résistance à la compression à 28 jours s'accroît Figure II-14.

Il existe même une approche qui consiste à relier la profondeur de carbonatation à la résistance de compression après 28, jours f_{c28} . Ce dernier paramètre étant le plus souvent mesuré, peut être révélateur du comportement des matériaux vis-à-vis de la carbonatation. Cependant, d'après [20], il existe une bonne corrélation entre ces deux grandeurs, elle dépend surtout du type du ciment et l'environnement ; la relation est une formule linéaire d'où il est possible de prévoir la profondeur partielle de la carbonatation du béton de sa résistance avec un coefficient de corrélation égale à 0.96 Figure II-15

Chapitre II comportement et durabilité des matériaux cimentaires carbonatés

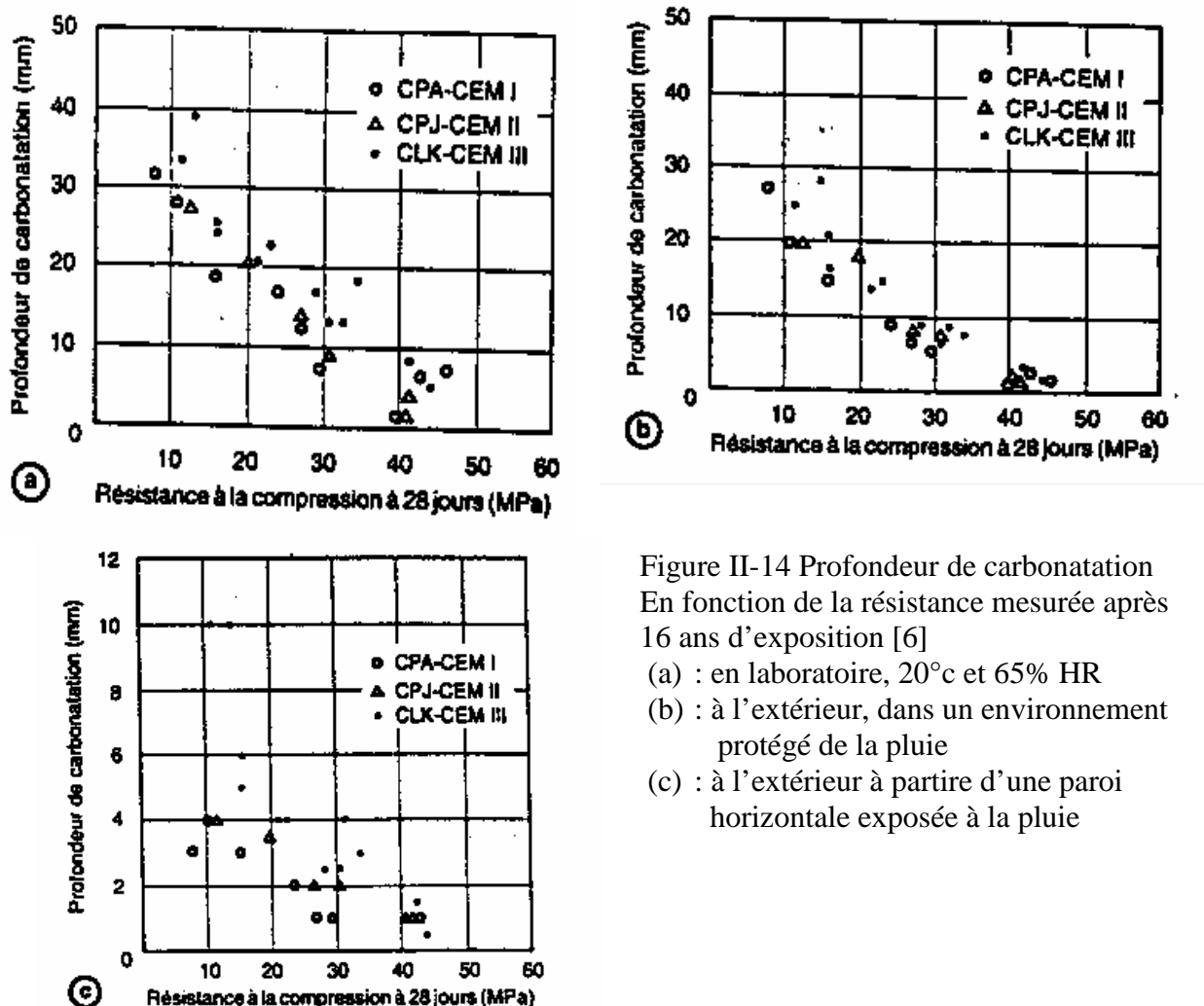


Figure II-14 Profondeur de carbonatation En fonction de la résistance mesurée après 16 ans d'exposition [6]
 (a) : en laboratoire, 20°C et 65% HR
 (b) : à l'extérieur, dans un environnement protégé de la pluie
 (c) : à l'extérieur à partir d'une paroi horizontale exposée à la pluie

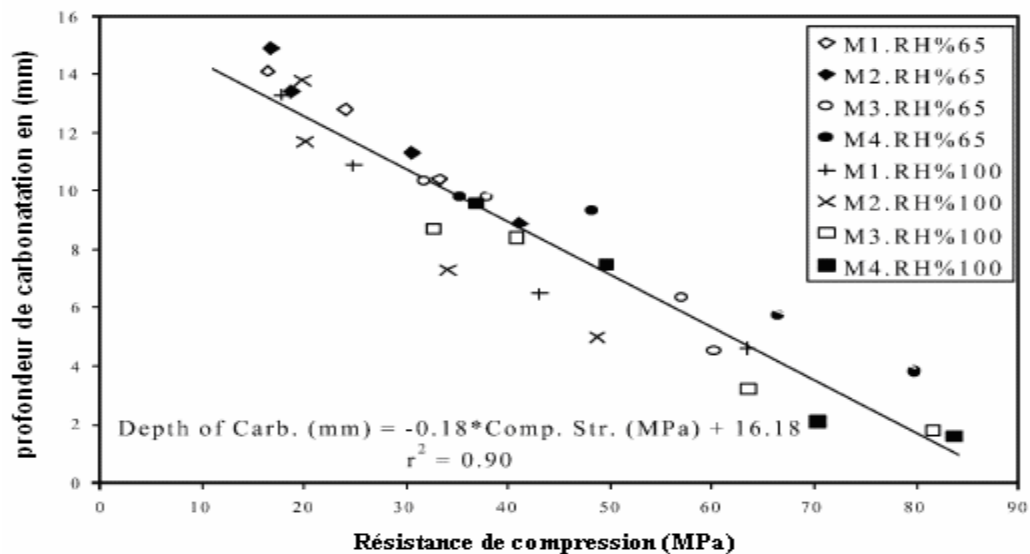
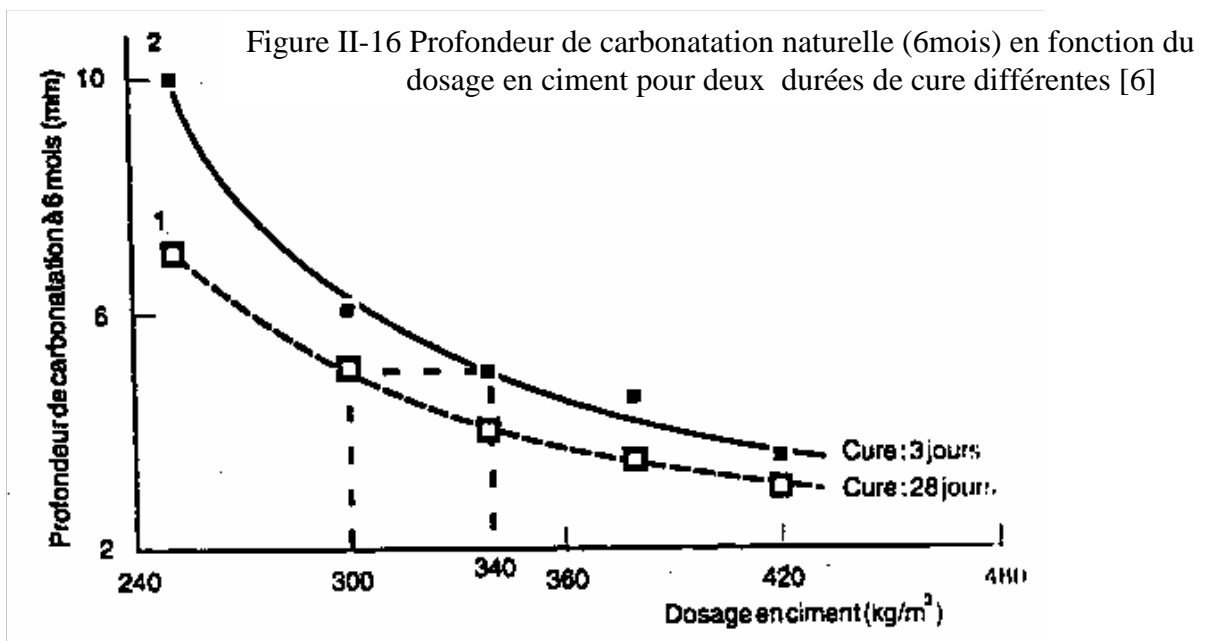


Figure II-15 Relation entre la profondeur de carbonatation et la résistance mécanique [20]

II -4 Le dosage en ciment

La profondeur de carbonatation d'un matériau cimentaire varie avec l'inverse du dosage en ciment entre 300 et 420 Kg.m^{-3} (Figure II-16). Si le dosage en ciment est en deçà de 300 Kg.m^{-3} , la vitesse de carbonatation augmente encore plus rapidement. Les travaux de Baron et al [6], effectués sur deux séries du béton, montrent clairement l'augmentation rapide de la profondeur de carbonatation à partir d'une teneur en ciment inférieure à 240 Kg.m^{-3} après 8 semaines d'exposition Figure II-17.

En effet, lorsque la compacité du matériau diminue, sa porosité et sa perméabilité augmentent, rendant la diffusion de CO_2 plus aisée. Pour un matériau correctement curé, quand la quantité de ciment dans le matériau est élevée, la quantité d'hydrates à neutraliser par le CO_2 le sera aussi. La progression du front de neutralité (profondeur de carbonatation) sera lente.



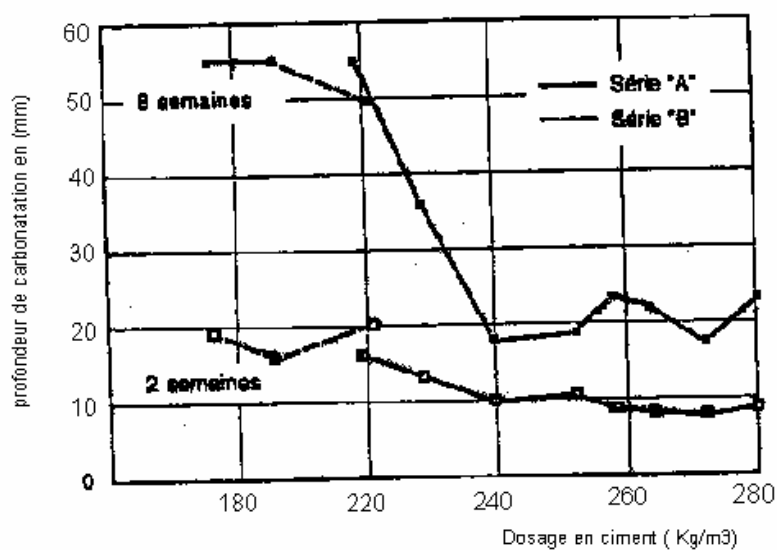


Figure II-17 Profondeur de carbonatation en fonction du Dosage en ciment d'après Baron et al [6]

II -5 Microclimat

Le chlorure est la source principale pour la corrosion de l'acier dans les bâtiments côtiers. La carbonatation du béton mène aussi à une corrosion uniforme qui accélère la formation des fissures et diminue la durée de vie des constructions. En effet, l'existence de ces profils favorise des microclimats qui attaquent le matériau cimentaire avec différentes intensités.

La distance qui sépare la construction au bord de mer, présente cette fois ci, un facteur favorable pour la diminution de taux de carbonatation. L'étude faite par [26], sur la contribution de cette distance montre son aspect positif. L'étude consiste à placer 3 échantillons du béton à des distances différentes : 50, 100, 780 m à partir de la mer (Gulf of Mexico). Les résultats montrent que les éprouvettes placées à 50 m de la mer présentent un faible coefficient de carbonatation k par rapport aux autres distances Figure II-18.

La variation du coefficient k a été observée également dans les ouvrages réels qui ont des ages différents, et situent à des distances de la mer bien définies Tableau II-8. On remarque donc une augmentation de k en fonction de la distance, exceptionnellement dans le cas 5, 9, et 10. Ceci peut être attribué par plusieurs possibilités : une résistance élevée dans le cas 5 et 10, et un degré de saturation d'eau dans la construction 9.

Toujours dans le même contexte, une recherche récente faite dans un climat sec, montre toujours l'augmentation de coefficient de carbonatation k (les valeurs de k enregistrés dans des bâtiments situés à 0.50 et 2 km de la mer sont 2.6 et 4.3 mm/ans^{0.5} respectivement) [27].

Chapitre II comportement et durabilité des matériaux cimentaires carbonatés

Au bord mer, la teneur d'humidité et de sels est plus élevée, apparemment elles contribuent à bloquer l'accès du CO₂ dans le réseau des pores. Ainsi dans cet environnement le béton est fortement souillé par le chlorure, et leur hygroscopicité aide à maintenir la saturation du réseau poreux. Pour cette raison le béton (à côté du bord de mer), montre des faibles coefficients de carbonatation.

De cette manière, il nous semble que dans les régions côtières, le risque de carbonatation doit être pris en considération quand l'influence du chlorure sur les constructions diminue.

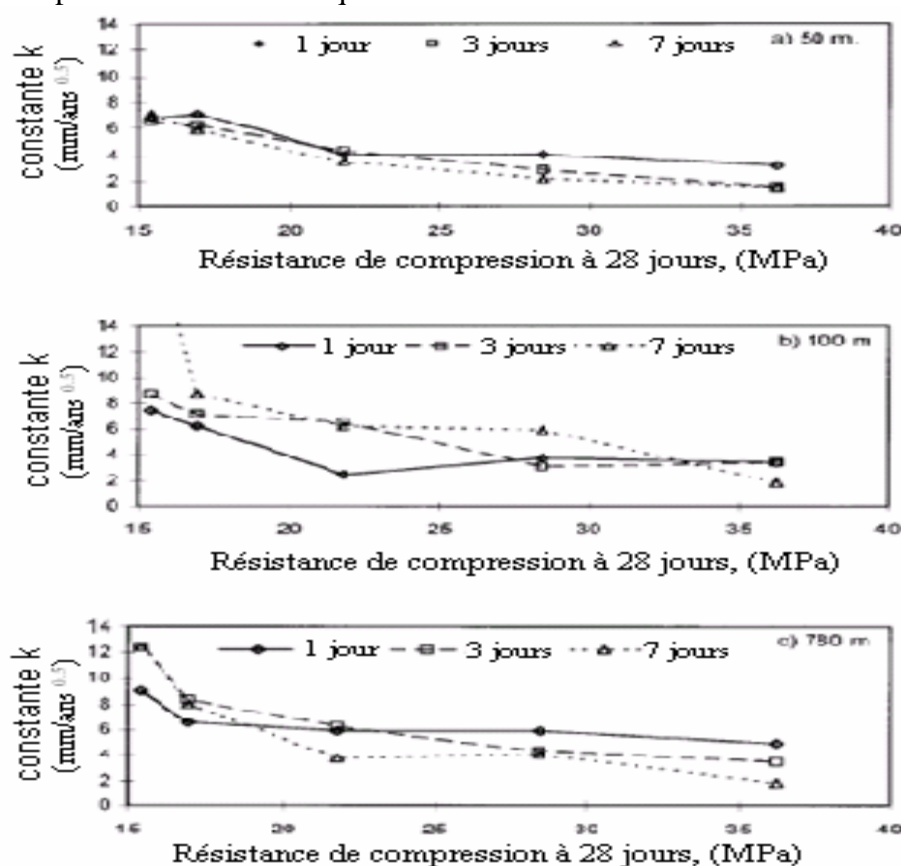


Figure II-18 Evolution du constant K Et la résistance de compression pour les différentes distances [26].((a) : 50m, (b) :100m, (c) : 780 m)

Constructions	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Valeurs de coefficient K										
Distance à partir de la mer (m)	97	105	126	132	155	166	188	213	752	776
L'âge de constructions (ans)	12	16	12	19	13	25	25	25	3.5	5.5
Coefficient de carbonatation moyen	5.0	5.7	5.9	5.2	3.5	6.3	6.4	6.4	0.9	2.1
Valeur maximale	8.4	9.5	7.5	6.7	8.3	9.6	9.0	8.0	2.7	3.8
Valeur minimale	0.6	3.0	4.6	3.2	1.7	2.2	5.2	4.2	0.0	1.7

Tableau II-8 Le coefficient de carbonatation k (mm / ans^{0.5}) en fonction de la distance à partir de la mer [27]

II –6 La teneur en eau du matériau

Le coefficient de diffusion de CO_2 étant dix mille fois plus élevé dans l'air que dans l'eau, sa diffusion est beaucoup plus lente dans les bétons saturés. En revanche comme nous l'avons signalé auparavant (section IV-2), la présence d'eau est indispensable, car elle est consommée lors de la carbonatation de la portlandite et joue le rôle de catalyseur dans la réaction de CSH. Les cinétiques de carbonatation sont optimales lorsque les molécules d'eau tapissent les surfaces des pores de la zone carbonatée sans les obstruer (Figure II-19). Les conditions d'une carbonatation optimale sont obtenues quand l'eau contenue dans les pores du matériau est en équilibre avec l'hygrométrie externe [14]. Si le matériau cimentaire est saturé, la carbonatation demeure faible même si l'air environnant est loin de la saturation. Ces conditions sont fréquemment rencontrées pendant les premiers moments d'exposition du matériau (après décoffrage). Dans ce cas, la carbonatation est couplée à l'hydratation.

Avant leur réaction, la portlandite et le gaz carbonique doivent être suffisamment dissous dans l'eau des pores. Cette principale réaction chimique produit de l'eau qui peut être fixée sur place par les réactions d'hydratation en cours, utilisée en carbonatation, ou évacuée par séchage.

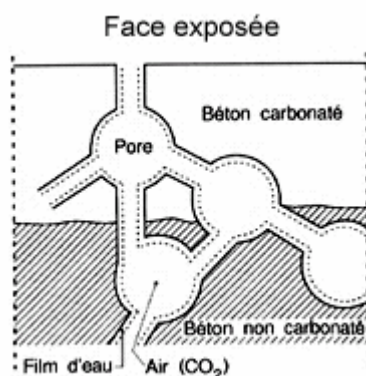


Figure II-19 Schématisation de l'état d'humidité d'un béton en cours de carbonatation [14]

III – DURABILITE DES BETONS VIS-A-VIS DE LA CARBONATATION

III-1 Béton aux cendres volantes (BCV)

La nécessité de prolonger la durabilité du béton a mené à l'utilisation des plusieurs mélanges, et une modification de la composition du béton. Cependant les cendres volantes sont devenues comme un additif courant ces dernières années.

La réaction des cendres volantes avec l'hydroxyle de calcium a comme conséquence la diminution de la porosité du béton, et l'augmentation de sa résistivité. Ce gain présente un effet bénéfique sur quelques propriétés mécaniques du béton, comme le procédé de corrosion induit par l'ion de chlorure.

Chapitre II comportement et durabilité des matériaux cimentaires carbonatés

La Figure II-20 montre l'évolution de la profondeur de carbonatation du BHP à l'âge de 2 ans (E/C = 0.27 avec 0% de FS et 10% de FS).

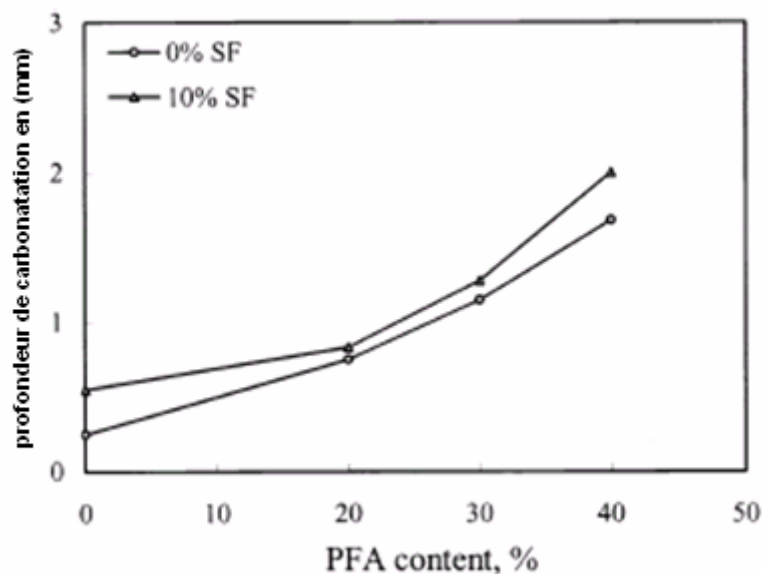


Figure II-20 La variation de la profondeur de carbonatation des BHP après 2 ans d'exposition [29] (FS : fumé de silice)

En général, la substitution partielle du ciment par les cendres volantes diminue la teneur de CaO (un des composants principaux du ciment) dans le mélange frais, et par conséquent réduit les hydrates formés. D'autre part, la présence des cendres volantes retarde le processus de réglage d'hydratation. En effet, dans les premiers moments d'exposition, les réactions de la carbonatation sont facilitées et les réactions prévues des CV sont gênées.

Dans une étude sur les mortiers avec ajouts (fumé de silice et cendre volante) [30], on remarque bien l'effet favorable de ces additions sur sa durabilité vis-à-vis de la carbonatation, si la substitution touche l'agrégat (sable). Cependant, si le remplacement se fait au niveau du ciment, on observe toujours l'augmentation de la profondeur de carbonatation Figure II-21 [30].

L'explication de ces résultats se projette directement sur la composition de mortiers. Dans le premier cas, la substitution de ciment par les cendres volantes minimise la quantité de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ formée dont certaines proportions sont partiellement consommées dans la réaction pozzolanique.

Cette situation favorise la carbonatation du matériau cimentaire car, le montant de l'hydroxyle de calcium est insuffisant pour fixer le CO_2 et le silicate de calcium (CSH) qui est le produit principal de la réaction pozzolanique ne réagit pas très rapidement avec le CO_2 pénétré.

Concernant maintenant, le deuxième cas (le remplacement des agrégats par la CV), le montant total des constituants carbonatables est supérieur comparé au premier cas et de plus la porosité est diminuée. Ces conditions ont comme résultat des degrés inférieurs de la carbonatation.

Chapitre II **comportement et durabilité des matériaux cimentaires carbonatés**

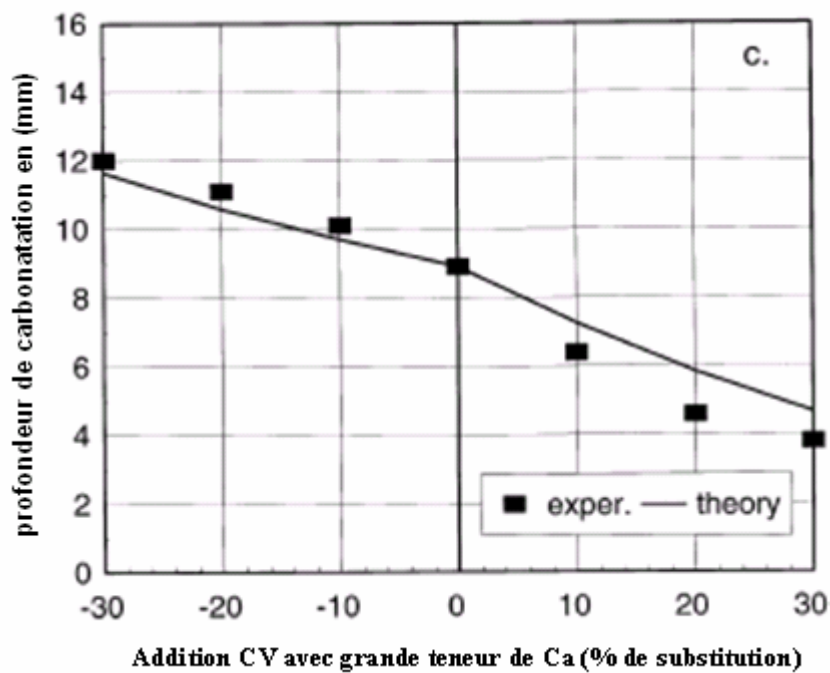
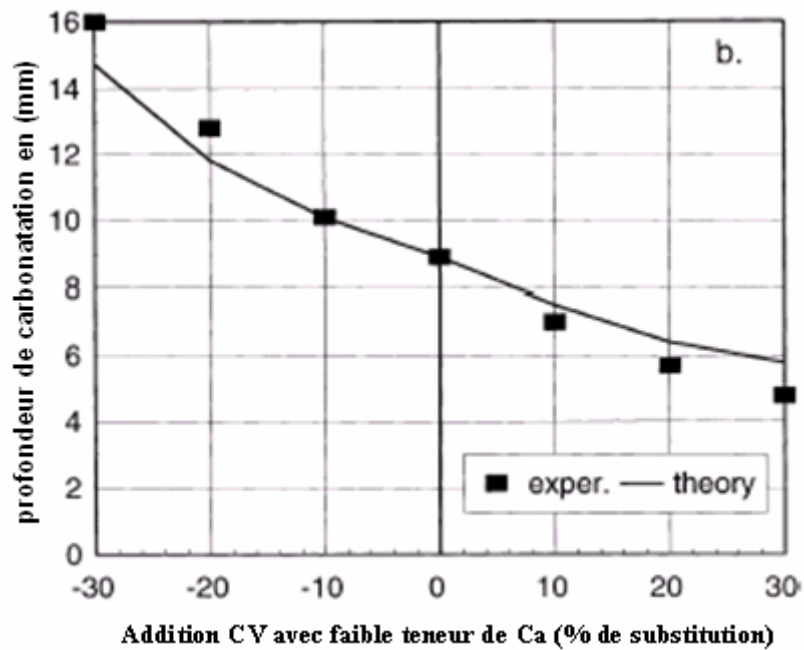


Figure II-21 Résultats théoriques et expérimentaux de la profondeur de Carbonatation des mortiers avec ajouts [30]
La partie droite se réfère au remplacement d'agrégats et la partie gauche à la substitution de ciment.

III- 2 Béton au laitier (BL)

Le béton au laitier est étudié comme un matériau de construction dû à quelques avantages qui résultent son utilisation ; ces avantages incluent : l'utilisation des sous-produits industriels dans la fabrication du béton, la faible consommation de l'énergie et réduire l'émission de CO_2 .

En visant la durabilité des BL vis à vis de la carbonatation, ce dernier se comporte par une faible résistance à cette agression. Cependant les recherches ont prouvés que le béton au laitier est le plus vulnérable comparé aux autres formulation.

L'expérience établie par [16], à travers laquelle ils ont fait une comparaison entre le BL et le BPO (béton portland ordinaire), montre que la profondeur de carbonatation est très importante dans le cas du béton au laitier (après 12 mois d'exposition dans une eau carbonatée, la profondeur de la couche ayant un PH en dessous de 9 était 20 mm pour (BL), et 12 mm pour (BPO)) Figure II-22 et II-23.

Cette importance enregistrée en terme de profondeur de carbonatation dans le BL est due en faite que non seulement le C-S-H et le $\text{Ca}(\text{OH})_2$ réagissent avec le CO_2 pour former les carbonates de calcium, la présence de laitier joue le même rôle. De plus, le béton au laitier a une faible capacité de protégé le PH de la solution interstitielle (le rapport Ca/ SO_2 mesuré dans le BL est environ 1, alors que pour le BPO ce rapport varie de 1.7 jusqu'à 2).

Ces deux causes donnent l'avantage au béton au laitier d'être très sensible à la carbonatation par rapport aux autres catégories.

La microstructure du BL étudiée grâce au scanner électronique (SEM), indique la formation des superficies riche en Ca et CH et des régions foncées contient de Si et Al ; ces régions correspondent à la décalcification de C-S-H et la précipitation de CaCO_3 formés à partir de la réaction entre les ions carbonates et le laitier (Figure II-24)

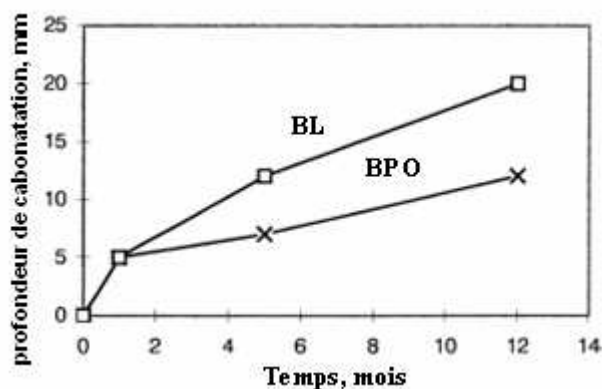


Figure II-22 Profondeur de carbonatation de BL et BPO Dans une solution de bicarbonate de sodium (0,352M) [16]

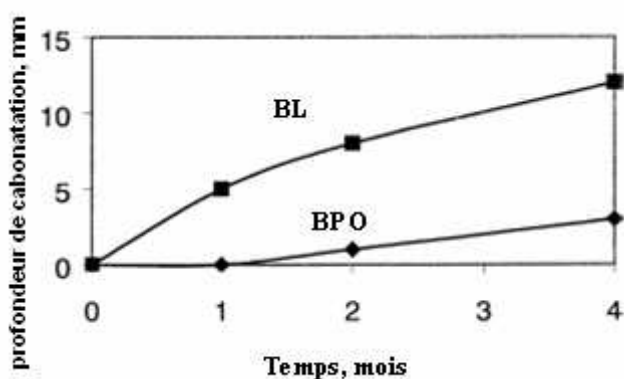


Figure II-23 Profondeur de carbonatation de BL et BPO Exposé à une atmosphère contenant 20% de CO_2 et 70% HR [16]

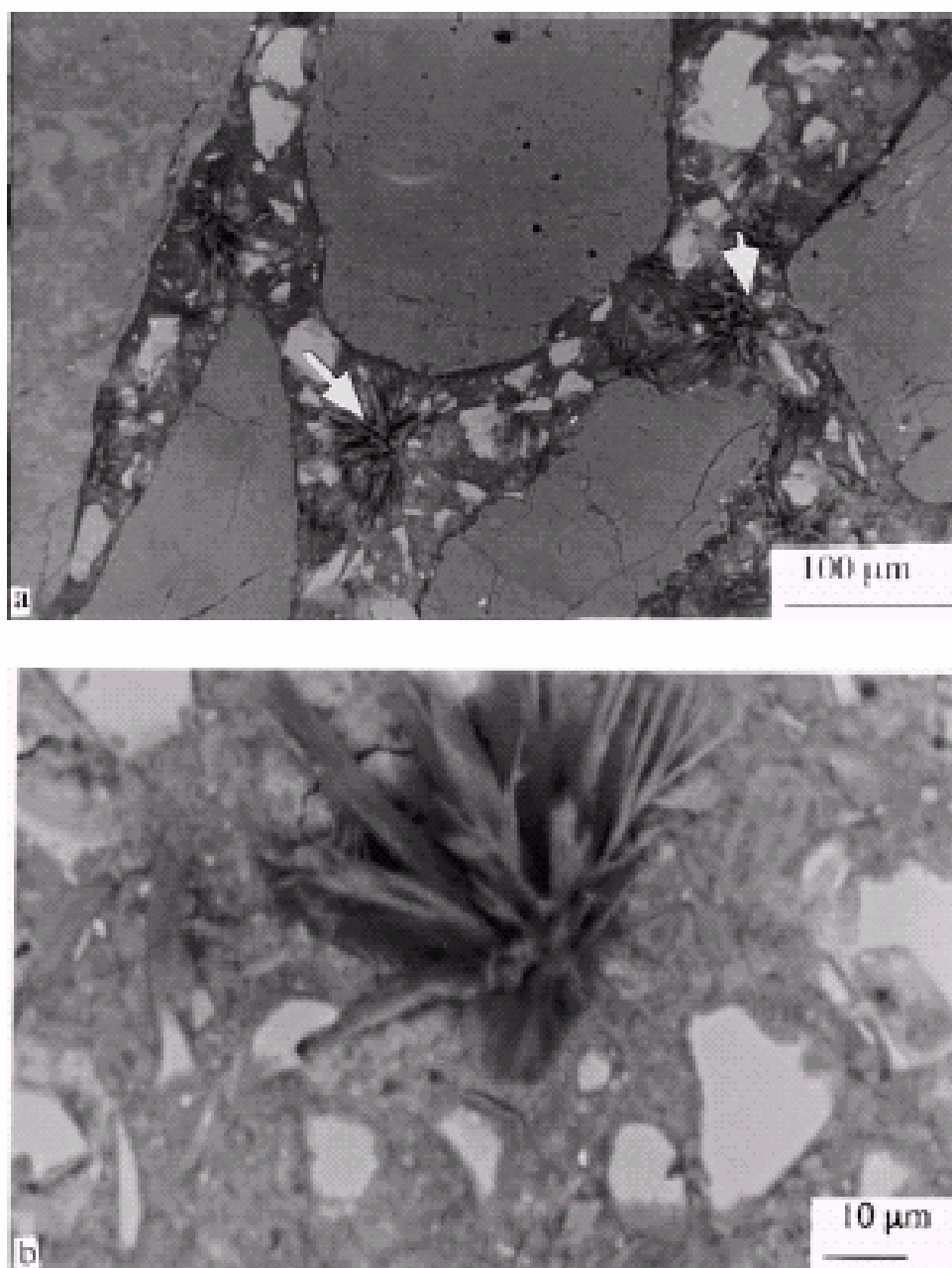


Figure II-24 Photos microscopique du BL exposé en atmosphère riche en CO₂ [16]

- (a) la flèche montre le nouveau cristal formé (calcite)
- (b) agrandissement de ce cristal

III- 3 Béton au calcaire (BC)

L'utilisation du béton au calcaire semble avoir beaucoup d'avantages techniques et économiques. Cependant cette utilisation large de ce béton exige une connaissance complète de son comportement et ses propriétés, afin d'assurer une durabilité adéquate.

Ce qui concerne la carbonatation, Le béton au calcaire se trouve en deuxième place dans le classement de la résistance des bétons les plus utilisés en génie civil à la carbonatation (Figure II-25).

En effet, dans la littérature, la teneur de calcaire qui sert a donnée des degrés bas de la carbonatation reste indéterminable. Beaucoup de travaux de recherche ont rapporté certaines teneurs par exemple [31] :

- Une profondeur de carbonatation de BC inférieur ou égale à celle mesurée à base de ciment CPA est reportée par Spring et Siebel (avec 6 à 20%).
- Tezuka et al (La contribution de dosage du calcaire à diminuer ou augmenter cette résistance varie d'un chercheur à un autre. > 10%).
- Baron (avec 15% de calcaire)).
- Dans un autre coté Scmidh a observé que la profondeur de carbonatation des bétons fabriqués avec le ciment au calcaire (13-17%) est plus importante comparé aux bétons confectionnés par le ciment portland.

Baker et Mattheus [31], ont étudié la durabilité de deux séries du béton, la série A est confectionnée avec un rapport E/C constant, la série B se caractérise par le même slump et une résistance à 28 jours identique ; les échantillons sont maintenus à une température égale à 20°C et 65% HR. Les résultats sont présentés dans le tableau II-11. On remarque que la profondeur de carbonatation a été augmentée simultanément avec le dosage au calcaire dans le cas A (passe de 8.0 (0%) à 11 (24%)). Par compte, dans la série B, on observe le contraire et la profondeur de carbonatation tend à diminuer lorsque le dosage augmente (de 8.0 (0%) à 6.9 (24%)).

Il nous semble que la vraie teneur de calcaire qui améliore la durabilité du BC vis-à-vis de la carbonatation doit être déduite de façon que tous les paramètres expérimentaux soient identiques

Les Tableaux II-12 et II-13 [32] représentent les caractéristiques du ciment et les résultats de la profondeur de carbonatation mesurés dans une étude sur la performance du ciment au calcaire et ces propriétés physiques et chimiques. Les résultats montrent que le ciment LC1 (0% de calcaire) se carbonate de 3 à 5 cm après 9 et 12 mois respectivement, en revanche les autres échantillons de différents dosages ne présentent aucun signe de carbonatation.

Chapitre II comportement et durabilité des matériaux cimentaires carbonatés

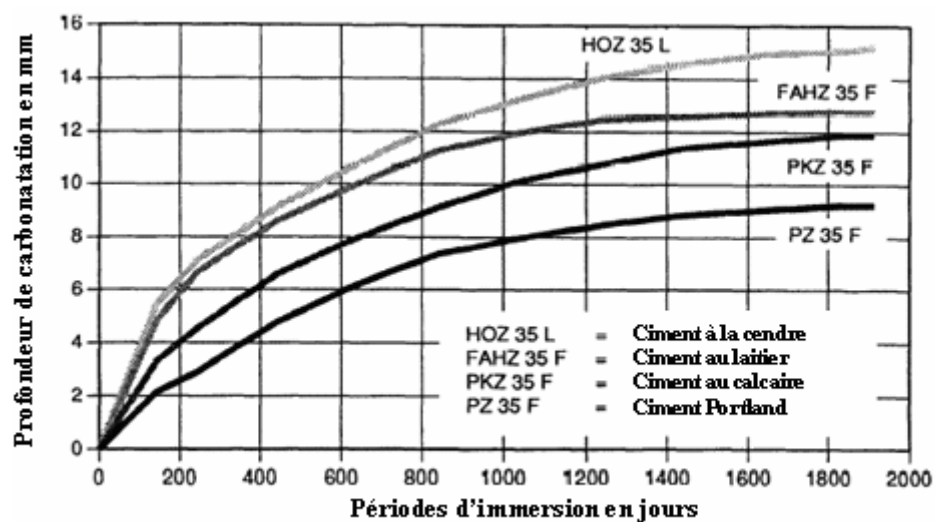


Figure II-25 Profondeur de carbonatation des bétons faits à partir de différents ciments, et conservés à 20°C et 65% d'HR pendant trois années[33].

Ciment	Cure humide	Série A 90 jours	Série A 1 ans	Série B 90 jours	Série B 1 ans
portland	1 jour	3.3	8.0	3.3	8.0
	3 jours	2.4	6.6	2.4	6.6
9 % calcaire	1 jour	3.9	7.6	4.6	8.4
	3 jours	3.1	6.2	3.3	6.6
15 % calcaire	1 jour	6.0	9.9	3.4	6.2
	3 jours	5.3	9.0	2.7	5.0
24 % calcaire	1 jour	6.6	11.0	3.4	6.9
	3 jours	6.9	9.7	2.6	6.3

Tableau II-11 Profondeurs de carbonatation à 90 jours et 1 ans pour les différents dosages en calcaire [31]

Echantillons	Composition (%)		Surf.sp. (cm ² /g)	Résistance de compression (N/ mm ²)			
	clinker	calcaire		1 jours	2 jours	7 jours	28 jours
LC 1	100	0	2600	11.9	21.3	35.3	51.3
LC 2	90	10	3400	11.2	20.9	36.3	47.9
LC 3	85	15	3660	12.9	22.7	37.7	48.5
LC 4	80	20	4700	14.9	24.3	38.0	48.1
LC 5	65	35	5300	9.8	17.0	26.2	32.9

Tableau II-12 Caractéristiques de ciments testés [32]

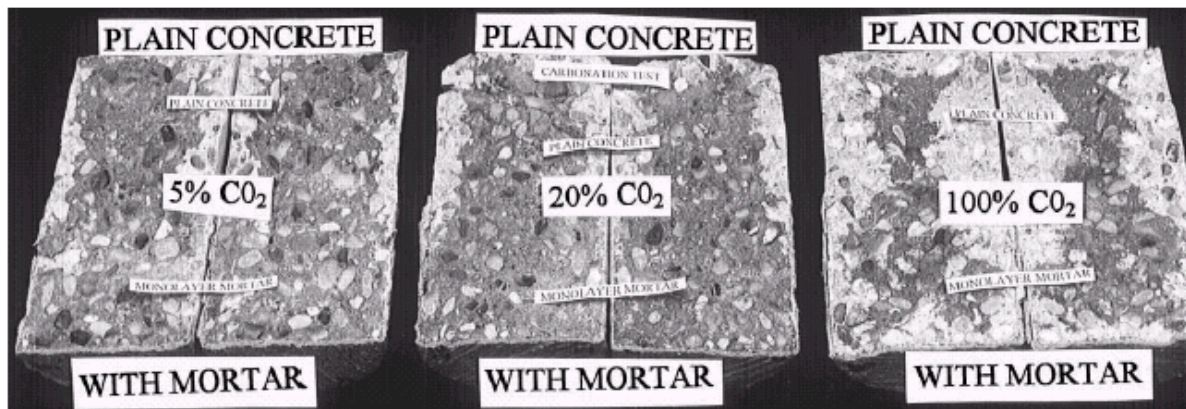


Figure II-26 Echantillons du béton recouverts par le mortier (parties inférieures) et sans enduits (parties supérieures) pour les différentes concentrations de CO_2 : 5, 20, et 100 % [22]

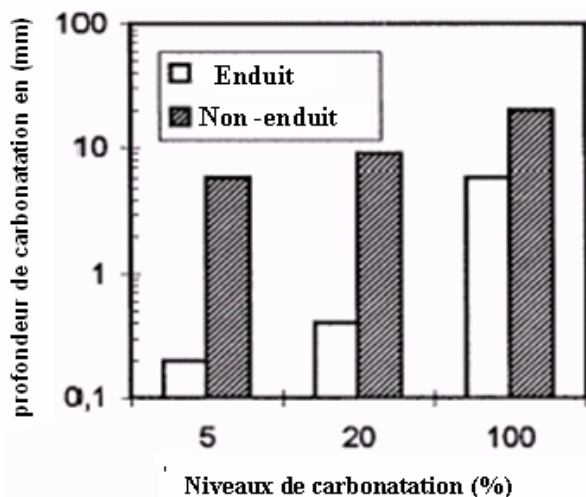


Figure II-27 Comparaison entre les profondeurs de carbonatation des bétons (enduits et non enduits) [22]

V – CONCLUSION

A la fin de ce chapitre et après l'exposition d'une documentation générale sur le phénomène de la carbonatation, il apparaît que la carbonatation affecte toute structure à base de matériaux cimentaires et provoque une modification de l'arrangement de la microstructure des matériaux ; ces évolutions à l'échelle microscopique ont des incidences plutôt néfastes à l'échelle du matériau telles que :

- dans le cas du béton armé, la baisse du PH et le changement des caractéristiques de base de ce composite.
- dans le cas des mortiers de revêtement, l'accumulation d'une façon hétérogène des retraits et des gonflements, ces dernières engendrent des fissurations et des craquelures affectant l'aspect esthétique des bâtiments.

Nous présenterons dans le prochain chapitre des cas réels prélevés à partir des ouvrages existants (en Algérie), qui illustrent bien l'importance du danger à l'échelle réel.

Chapitre III

Etude d'inventaire et d'expertise

I - GENERALITES

En Algérie, les structures en béton armé, plus particulièrement les bâtiments et ouvrages d'art, constituent un patrimoine national non négligeable, lorsqu'on sait que la plupart des constructions anciennes ou même récentes sont réalisées par ce matériau (plus de 70 %). En effet la technique béton armé reste le procédé le plus répandu dans le monde et plus particulièrement en Algérie, dans les bâtiments et ouvrages d'art.

Beaucoup de ces structures ont un âge dépassent les 50 ans et nécessitent des réparations ou renforcement. Une étude statistique sur les cas pathologiques de bâtiments dans l'ouest algérien montre le nombre très important des structures en béton armé qui doivent être rénovées, ou renforcées [35].

Le tableau III-1 représente la réparation des sinistres en fonction de l'âge de la construction, le cas le plus élevé des cas pathologiques est observé pour les constructions datant de période coloniale (plus de 40 ans) , soit 184 cas sur les 422 recensés, représentant ainsi 43.60%.

Age	19 ^{ème} Siècle	Période coloniale	Années 60	Années 70	Années 80	Années 90	En cours de réalisation
%	5.2	43.6	2.2	11.6	22.5	7.8	7.1

Tableau III-1 Réparation des sinistres en fonction de l'âge de la construction [35]

II- APERCU SUR LA QUALITE DU BETON PRODUIT EN ALGERIE

La qualité du béton confectionné aux chantiers Algériens et celui datant de la période coloniale présente l'une des causes principales de désordres. Cependant cette qualité fait intervenir beaucoup de paramètres à savoir : le choix du ciment et leur dosage, la taille et la forme des agrégats, et d'autres techniques liées au type de l'élément et à l'environnement.

A titre d'exemple, l'étude dressée par Naadia et Kanai [36], sur 52 cas pathologiques dans la sud Algérien durant la période 87-93 (268 rapports couvrent 83 projets), montre que plus de 45 % des cas sont liées à la mise en oeuvre. Ce pourcentage élevé dépend surtout de : l'utilisation excessive de l'eau de gâchage avec un rapport E/C atteint par fois 0.74, l'absence de cure et la non utilisation des adjuvants.

En ce qui concerne la résistance du béton qui a une relation directe avec la qualité produite, les analyses statistiques des données réelles provenant de CTC (contrôle technique de constructions) ont montré que les valeurs de $f_{c \text{ chantier}}$ sont en dessous de $f_{c \text{ calcul}}$ [37,38], ceci prouve que cette qualité n'étant pas satisfaisante et le béton n'étant pas à la hauteur pour résister aux différentes agressions.

III- DIAGNOSTIC DES DESORDRES DUS A LA CARBONATATION**III -1 introduction**

Les textes réglementaires imposent, lors de la conception des ouvrages, des prescriptions minimales dont le respect devrait conduire à une durabilité optimale du matériau.

Mais, après un certain temps, l'apparition de fissures, éclats, couleurs de rouille, etc sur des éléments en béton, témoignent que cette durabilité n'est pas assurée.

Une opération d'entretien est alors nécessaire pour remettre la structure en état et empêcher le renouvellement des désordres. Cette opération qui sert de conférer à nouveau, à l'élément la durabilité qui était attendue, comporte deux phases principales : un diagnostic détaillé suivis d'une phase de réparation.

Le diagnostic représente la partie la plus délicate et la plus lente dans la procédure d'entretien. Il a comme but d'identifier la pathologie de l'ouvrage, d'en mesurer l'ampleur, d'en déterminer les causes et d'en estimer l'évolution prévisible dans le temps. En faite, nous pouvons résumer les démarches de cette procédure dans les points suivants :

- observations visuelles.
- Mesures in situ.
- Analyses en laboratoire.
- Simulation de vieillissement.

Le plus souvent, les dégradations dont l'origine de la cause est le gaz carbonique, sont interprétées dans le cadre de l'influence de facteurs propres au matériau (compacité, épaisseur d'enrobage des armatures, dosage en ciment, etc. ...).

Cependant la contribution des autres paramètres comme : l'orientation géographique, le type de la surface exposée et l'élévation semblent être très importante sur le développement de la carbonatation.

Dans ce chapitre, et à cause de l'absence ou la non disponibilité des rapports et des documents sur la qualité du béton confectionné dans les ouvrages étudiés, nous limitons notre étude aux points cités précédemment. En effet, l'objectif de ce chapitre est de répondre à la question suivante :

Comment ces facteurs ont la capacité de modifier la cinétique de la carbonatation du béton ?

Nous présentons ainsi, dans ce chapitre quelques photos sur les cas de dégradation liés à la carbonatation.

III-2 Efflorescence

Les matériaux de construction subissent un éventail de réactions physiques et chimiques dans leur environnement de service. Un certain nombre de ces réactions comporte la dissolution et la migration physique des sels solubles et la re-précipitation. En effet, le ciment et autres matériaux de construction jointifs avec le ciment, par exemple, la brique ont la capacité de développer des dépôts superficiels nommés efflorescences.

L'observateur rencontre souvent ces images sur les éléments porteurs ou même sur les façades de nos constructions. En effet ces dépôts ne sont pas normalement expansibles, mais sont esthétiquement indésirables. Figure III-1 et III-2



Figure III-1 Pont sur oued de Reghaia
(ancienne RN 05 au PK 29+900)



Figure III-2 Mortier de protection
d'un mur (Stade el- harrach)

L'aspect particulier de l'efflorescence est expliqué par la combinaison de deux dispositifs et processus : le premier est la distribution de l'eau liquide sur la surface à cause de la rugosité extérieure, les joints, les fissures, les lacures et l'orientation ; le deuxième facteur est la durée où l'eau liquide préside (la quantité d'efflorescence est également une fonction de temps).

Comme le gaz carbonique et l'humidité sont les responsables de la précipitation de CaCO_3 et l'apparition de l'efflorescence ; Son prolongement dépend de :

- La géométrie « Accumulation d'eau »

La quantité d'efflorescence se défère d'une face verticale à une autre, soit horizontale ou inclinée. Dans les surfaces où la couche d'eau est relativement épaisse, comme peut se produire sur les surfaces horizontales, le transport des ions par la solution limite les degrés d'efflorescence. En effet ce transport se produit par un mélange de flux, d'autodiffusion, la convection et d'advection.

- Evaporation

L'évaporation est une cause typique de séchage et peut être combinée avec l'aspiration dans des media poreux. Pendant l'évaporation, la capacité de stocker le CO_2 par l'eau est suffisamment faible et la formation de l'efflorescence par une évaporation complète apporte une contribution négligeable aux états d'équilibres de transportation même au cours des cycles humide-sec répétés.

Ce mécanisme dépend surtout de la disponibilité du gel de ciment $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ou de C-S-H pour la réaction et en présence de l'alcali dissous. Il est à noter aussi, si le cycle efflorescent est interrompu, comme par évaporation, il est libre de débiter encore par le rétablissement d'un film d'eau [39].

- Construction composée

L'aspect visuel de l'efflorescence peut être influencé par des facteurs supplémentaires dans les constructions composées, par exemple, la brique collée avec le mortier du ciment.

A titre d'exemple, la brique d'argile peut contribuer à l'alcalinité ou devenir saturer par un film alcalin. En outre, la visibilité des dépôts efflorescents dépend de l'épaisseur aussi bien que de la dimension particulière et le polymorphe de CaCO_3 dont tous les deux sont influencés par la dispersion de la lumière et la couleur de l'élément. Ainsi, la visibilité d'un dépôt efflorescent sera plus grande sur un élément foncé que sur un substrat de couleur claire dont les autres paramétrés étant égaux.

Remarque

Pour identifier le phénomène de carbonatation, nous avons utilisé la solution de phénolphthaleine (1%(100ml)) Figure III-3. Nous rappelons que des renseignements sur les ouvrages constatés (plans de situation, nature de l'ouvrage, fiches techniques...etc.), sont présentés en annexe.

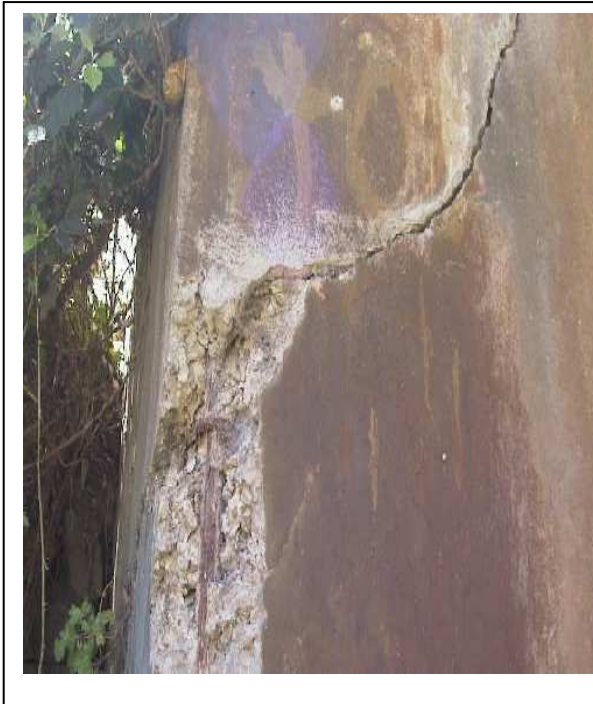


Figure III-3 Solution de phénolphtaleine employée dans l'essai

III -3 Elévation

Au moment de l'expertise, la chose qui a attiré notre attention, c'est bien l'apparition des états de dégradation très avancées localisées entre le haut et le milieu de l'élément colonne Figure III-4.

La méthode semi-déstructive (pulvériser la phénolphtaléine sur une surface fraîchement décapée), montre que le béton d'enrobage des échantillons constatés est complètement carbonaté et la couleur reste inchangée après le test Figure III-5, III-6 et III-7.



(a) Pont sur oued Zitouna, RN 09
au pk 25+00



(b) Stade 1^{ier} novembre
El Harrach



(c) Ouvrage prive, Boufarik



(d) Villa, commune de Chebli

Figure III-4 Photos couvrant les parties superieures de l'élément poteau

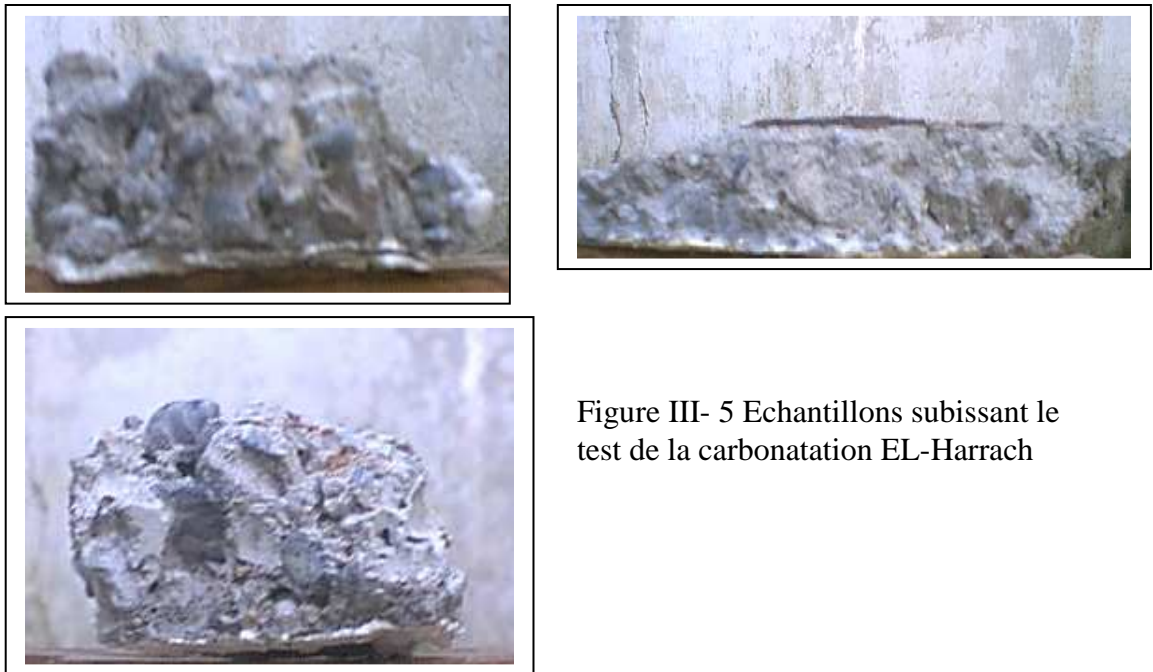


Figure III- 5 Echantillons subissant le test de la carbonatation EL-Harrach



Figure III-6 Test de phénolphtaleine (ouvrage privé), la figure (a) représente l'état



Figure III-7 Test de phénolphtaleine (villa, Chebli); la figure a gauche illustre l'état de l'échantillon avant le test, Celle de droite montre l'état après le test




De point de vue physique, il y a une distribution de la température et d'humidité en fonction de l'altitude le long des poteaux. D'une façon générale, la température demeure constante mais l'humidité a tendance à diminuer avec la hauteur du poteau [27].

Comme conséquence à cette variation de l'humidité, les parties inférieures permettent moins d'accès de CO_2 (en raison de la saturation partielle d'eau dans les pores). En effet, la base du poteau est généralement près d'une source d'humidité, cette situation permet le transport de celle-ci de la terre au fond de l'élément pendant la durée de vie de la structure, dont l'ampleur change selon les variations saisonnières.

Dans les bâtiments anciens (coloniaux), les techniques de construction n'ont pas assurés une cure adéquate du béton après le moulage. En effet, l'eau de l'extrémité haut s'est évaporée et/ou descendue par gravitation favorisant une meilleure cure naturelle du fond de poteaux. Cette cure différentielle n'a été pas facilement perçue avec des méthodes traditionnelles.

Cette explication donnée ci-dessus ne peut être pas valable si d'autres phénomènes interviens, comme le montre les Figures III-8, III-9, et III-10.

Il nous semble que dans le premier cas (Figures III-8), le phénomène de ségrégation est le responsable de la carbonatation car elle a créé des vides entre les grains du béton, dont le CO_2 trouve le chemin d'accès. Dans le deuxième cas (Figures III-9), la carbonatation est dû probablement à la présence des produits chimiques contiens certainement l'acide carbonique, comme on a constaté sur site. Concernant le troisième cas (Figures III-9) l'explication sera présentée dans la section II-4

		
<p>Figure III-8 Pont sur oued Zitouna , RN 09 au pk 25+00</p>	<p>Figure III-9 Stade 1^{ier} Novembre El-Harrach</p>	<p>Figure III-10 Pont sur Oued Oumazar, Tipaza Pk 15+690</p>

III -4 Orientation géographique

L'orientation géographique où bien l'effet du soleil sur les ouvrages joue un rôle important sur la durabilité du béton vis à vis de la carbonatation. En outre, l'influence de ce paramètre varie selon la position géographique du l'ouvrage, et l'environnement où l'ouvrage réside (des obstacles comme des bâtiments, arbres...etc., empêchent le passage du soleil vers l'élément).

Au cours de notre visite sur les sites sinistrés, nous avons constatés que, perse que tous les ouvrages examinés et qui possèdent une orientation Nord-Sud ont subit des altérations dû à la carbonatation.

Par exemple, au stade de BOU-LOURINNE, toutes les poutres exposées vers l'Est ont été dégradées, par contre celles exposées vers Ouest sont en état plus ou moins acceptable Figure III-11.

Les tests du phénophtaléine sur des échantillons ex tractés de ces poutres, prouvent que le béton examiné est complètement carbonaté Figure III-12



Figure III-11 Exemple d'une poutre appartenne à un portique exposé vers le mouvement du soleil, Boulourinne



Figure III- 12 Echantillons subissent le test de la détection par la phénolphtaleine, Boulourinne

La figure III-13 montre une comparaison entre deux façades d'une pile du pont (située sur l'oued Reghaia RN 24 au pk 38+230), nous remarquons que le côté occidental du pont n'a pas subi des endommagements profonds, par contre celui de l'est présente des éclatements du béton, apparition des armatures, et efflorescence.



Figure III-13 Pont sur oued Reghaia, RN24 au pk 38+230

Pour bien saisir l'importance de l'orientation géographique, il faut d'abord comprendre comment le mouvement du soleil entraîne la carbonatation. Cependant l'influence de ce dernier dépend surtout de la texture du béton confectionné, car il peut accélérer le degré de carbonatation de manière significative dans le cas d'un béton de mauvaise qualité même si l'élément est abrité aux rayons du soleil.

Généralement, l'orientation géographique accorde moins de période d'humidité dans l'Est que dans le côté occidental des bâtiments à cause de l'action du soleil sur les éléments. Cette période peut favoriser moins d'humidité dans l'Est que dans l'Ouest, et par conséquent la vitesse de carbonatation sera beaucoup plus rapide sur les façades exposées directement au soleil. Nous rappelons qu'un béton sous une faible humidité ne réagit pas avec le CO_2 car l'eau présente pour la dissolution est insuffisante. Et d'autre part, la pénétration CO_2 à travers un béton saturé est complètement difficile d'où la conditions optimale pour le processus de réaction est intervalle d'humidité compris entre 50 et 70%.

Il faut cependant souligner que l'effet de l'environnement qui entoure l'ouvrage semble être très ponctuel, car nous avons constaté des cas de carbonatation sur une direction du soleil perpendiculaire aux éléments.

Ces cas de dégradation dus à la carbonatation produisent généralement à l'intérieur de l'ouvrage ou si il est brisé par des arbres et/ou d'autres bâtiments.

La figure III-14 illustre la carbonatation d'une poutre du pont (oued Bill Braguettz, pk 459 Constantine), la poutre est exposée au rayon du soleil mais brisée par un autre élément. Selon les essais réalisés par SPTA et bureau d'étude français FREYSSINET la profondeur de carbonatation est de l'ordre de 40 cm [40].

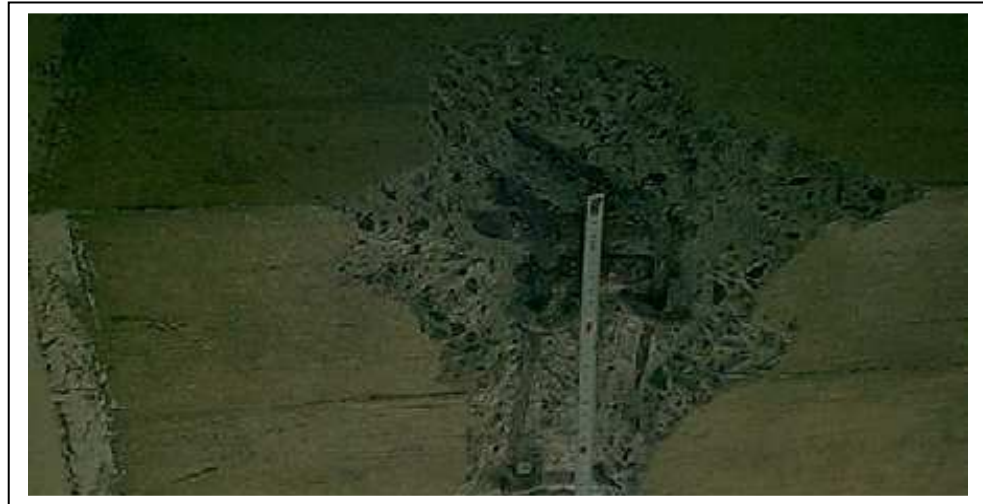


Figure III-14 Poutre du pont sur oued Bill Braguettz
au pk 459, Constantine

III -5 L'eau de pluie

L'intérêt de ce paramètre s'observe dans les endroits où la pluie réside plusieurs mois. En effet, l'inspection visuelle montre que le béton exposé dehors et abrité à l'eau de pluie se carbonate beaucoup plus rapidement que celui qui n'est pas abrité Figure III-15.

Dans le cadre général, l'eau de pluie semble être bénéfique en terme de la résistance du béton à l'attaque de dioxyde de carbone. En effet, la diffusion de CO_2 dans le matériau cimentaire sera notamment faible si l'élément en béton est exposé directement à l'eau de pluie à cause que les pores dans ce cas sont saturés par l'absorption de l'eau de pluie périodique.

Le procédé de la carbonatation sur les faces exposées directement à la pluie est généralement très complexe : le CO_2 présent dans l'eau peut pénétrer par la capillarité et cela peut également favoriser de nouveau la carbonatation du béton. En effet, dans ce cas, la diffusion de gaz n'est pas le seul mécanisme de transport, et la teneur en carbonates de la couche superficielle du matériau cimentaire change. Ce transport des ions dissous dans l'eau est effectué certainement pendant les cycles de mouillage-séchage.

L'influence de ce paramètre à été également étudiée en laboratoire par Wittmann et al [11].l'étude traite les deux situations discutées précédemment. Les résultats sont présentés dans la Figure III-17. Nous remarquons que la profondeur de carbonatation dans le cas où le mortier est exposé à l'eau de pluie est nettement inférieur à celle du mortier protégé, et dans les deux cas la variation dépend du rapport E/C.



(a)

(b)

Figure III-15 Dalle en béton armé exposée dehors, (a) représente la partie supérieure de la dalle, (b) la partie inférieure abritée à l'eau de pluie, ouvrage privé, Boufarik

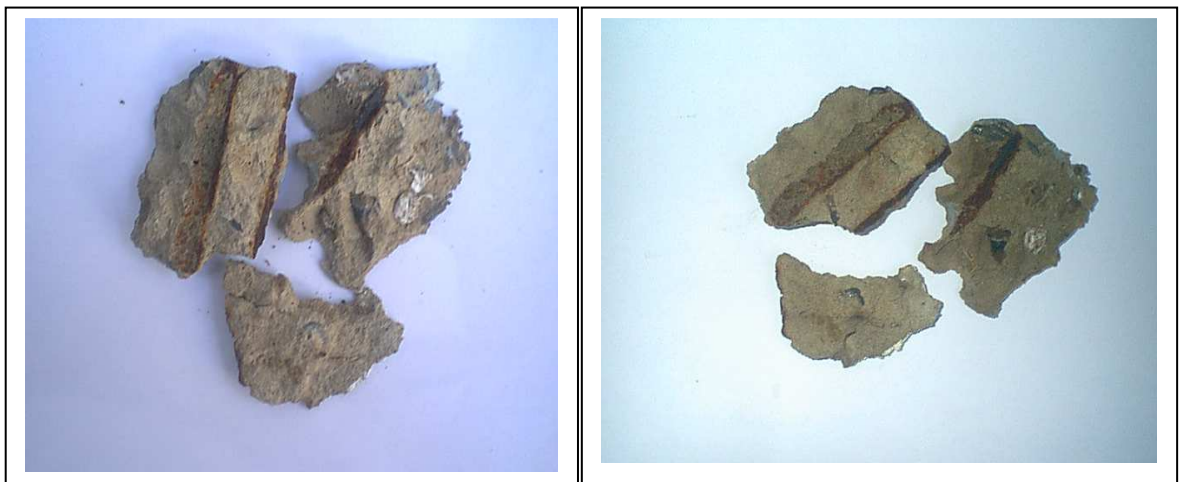


Figure III-16 le test de la phénolphtaleine appliqué sur un échantillon extrait de cette dalle, la Figure à gauche représente l'état de l'échantillon avant le test, celle de la droite montre l'état après la pulvérisation.

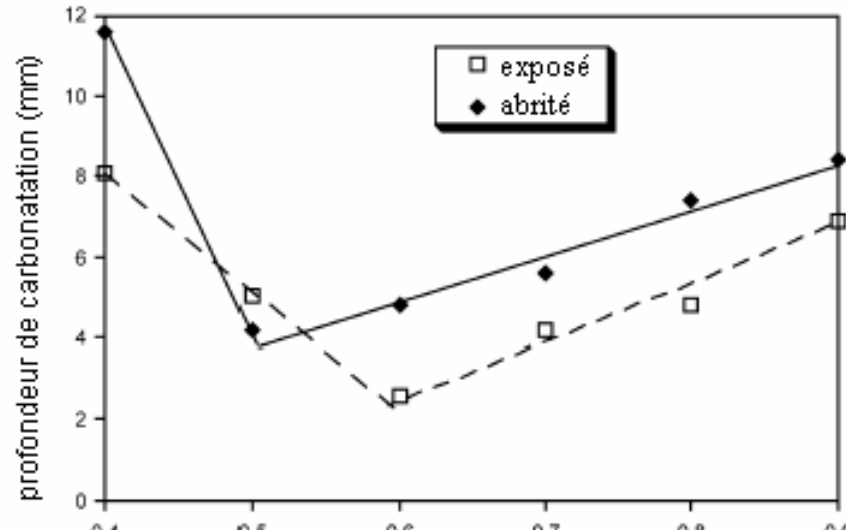


Figure III-17 Profil de carbonatation de deux faces du béton (exposée et abritée de l'eau de pluie) en fonction de rapport E/C [11]

IV- CONCLUSION

Sur la base de cette étude d'expertise, et à la lumière de ces résultats, on peut dire que l'impact de l'environnement sur la carbonatation du matériau cimentaire est très dominant, et doit être forcément inclus lors de la conception des futurs ouvrages. En outre, nous avons remarqué aussi à travers cette étude que tous les paramètres étudiés dans ce chapitre ont une relation directe avec l'humidité de l'environnement. Ceci prouve que ce facteur représente un paramètre clé dans la modélisation du phénomène et qui sera l'un des facteurs principaux qui gèrent le transport de dioxyde de carbone à l'intérieur du matériau cimentaire.

Il faut cependant souligner que la carbonatation peut être contrôlée en premier lieu par la spécification de la qualité du béton, mais par fois les constituants du matériau et les conditions climatiques sont limités à l'intérieur des parties particulières, d'où cette spécification ne suffit pas pour prédire la durée de vie de l'élément.

De cette façon, une modélisation numérique est nécessaire et le coefficient de diffusion devient tout à fait utile pour surveiller le transport de CO_2 à l'intérieur de l'élément.

Chapitre IV

Modélisation de transport du dioxyde de carbone

I - INTRODUCTION

Lors de la carbonatation du béton, comme nous avons montré dans le chapitre I, la pénétration de CO_2 va provoquer dans la matrice cimentaire un changement radical dans ses propriétés.

Cependant la meilleure manière pour contrôler ces changements dans une structure en béton c'est de déterminer la quantité de dioxyde de carbone qui s'y répand.

Dans le cadre de l'analyse des effets de la carbonatation sur le comportement mécanique des ouvrages en béton armé, il est indispensable de mettre au point un outil numérique pour la description des transferts de gaz carbonique au sein du matériau si l'on souhaite exprimer localement les conséquences de la carbonatation.

La première partie de ce chapitre constitue une brève revue de la documentation concernant les travaux de modélisation.

La deuxième partie est consacrée à la description mathématique de transfert de CO_2 dans le béton, ainsi que l'implantation du modèle éléments finis et les hypothèses de simulation.

Nous présentons enfin, dans une troisième partie, les résultats de simulation du phénomène et la validation du modèle sur la base des résultats expérimentaux.

L'ensemble des développements numériques réalisés dans ce contexte ainsi que les résultats de calcul qui sont présentés dans ce chapitre ont été effectués avec le logiciel de simulation ANSYS version 5.40.

II - TRAVAUX DE MODELISATION DE LA CARBONATATION

Les principaux mécanismes de la carbonatation ont fait l'objet d'un grand nombre d'études qui ont abouti à des modèles théoriques ou empiriques.

Les modèles théoriques sont généralement élaborés à partir d'une description physico-chimique des mécanismes de la carbonatation. Ils sont résolus analytiquement ou par des méthodes numériques qui permettant de prédire l'évolution de processus de la carbonatation.

Dans ce qui suit, nous présentons d'une manière brève quelque modèles de carbonatation publiés dans la littérature. Nous insistons seulement sur la forme finale sans entrer dans les démarches de modélisation, ceci en identifiant les principaux paramètres du modèle.

II-1 Modèle de Bakker (1993)

Le modèle de Bakker [14] est un modèle empirique qui prend en compte l'influence des cycles de mouillage-séchage que peut subir un matériau cimentaire au cours de sa carbonatation.

Bakker considère que la carbonatation est stoppée durant la période de la pluie. Elle ne sera effective que si le bord exposé du matériau (en contact avec le CO_2 atmosphérique) est non saturé.

Juste après l'arrêt de cette précipitation, le matériau commence à sécher évacuant ainsi l'eau de l'espace poreux pour permettre au CO_2 de diffuser.

La profondeur de carbonatation après n cycles de mouillage-séchage est donnée par la formule suivante [14].

$$\begin{cases} \delta_c = A\sqrt{t_{eff}(n)} \\ A = \sqrt{2D_c(C_3 - C_4)/b} \end{cases}$$

Ou

δ_c en (m) est la profondeur de carbonatation.

$t_{eff}(n)$ en (s) est le temps effectif d'exposition.

D_c en (m^2/s) est le coefficient de diffusion du CO_2 dans le matériau.

C_3 et C_4 en (kg / m^3) sont respectivement les concentrations du dioxyde de carbone dans l'air et sur le front de carbonatation.

b en (kg / m^3) est la quantité des produits carbonatables par unité de volume du matériau.

Le temps effectif de carbonatation après n cycles s'exprime comme suit :

$$t_{eff}(n) = \sum_{i=1}^n |t_d(i) - (x_s(i-1)/B)^2|$$

t_d en (s) la durée de i^{eme} période de séchage.

Le terme $(x_s(i-1)/B)^2$ représente la durée nécessaire au i^{eme} séchage pour qu'il atteigne le front de carbonatation ($i-1$)^{eme} cycle.

II-2 Modèle de Papadakis (1989)

Dans leurs travaux sur la modélisation des processus de la carbonatation, Papadakis et al [14] considèrent que les réactions chimiques de carbonatation sont limitées physiquement par la diffusion du CO_2 dans la phase gazeuse du matériau et chimiquement par la disponibilité des réactifs sous forme liquide (CO_2 et portlandite dissous).

Une résolution analytique du système obtenu a permis de proposer une relation donnant l'avancée du front de carbonatation.

Cette relation conserve la forme générale d'une évolution en racine carrée du temps

($x = k\sqrt{t}$), tel que le coefficient de carbonatation, k est donné par la relation suivante [41]

$$k = \sqrt{\frac{2D_{eff}[CO_2]}{[CH] + 3[CSH] + 3[C_3S] + 2[C_2S]}}$$

$[CO_2]$ en (mol / m³) est la concentration molaire du dioxyde de carbone dans la phase gazeuse en contact avec le béton.

$[CH],[CSH],[C_3S],[C_2S]$ en (mol / m³) sont les concentrations molaires de chacun des constituants réactifs dans le matériau durant la carbonatation.

$2 D_{eff}$ en (m² / s) est le coefficient de diffusion effectif du CO₂ dans la région carbonate.

Papadakis et al admettent que le modèle est applicable quelque soit le type du ciment. Le seule paramètre à modifier est le coefficient de diffusion D_{eff} qui sera exprimé d'une manière générale (pour tous les types du ciment) en fonction de la porosité et de l'humidité relative HR comme suit [30] :

$$D_{eff} = A \left(\frac{\varepsilon}{C / \rho_c + P / \rho_p + E / \rho_E} \right)^a + (1 - HR / 100)b$$

C, P et E en (kg / m³) sont respectivement les quantité de clinker de l'addition minérale et de l'eau par unité de volume du matériau.

ε est la porosité du matériau.

b une constante empirique égale 2,2.

A et a sont également des constants qui dépendent du rapport E / C tel que :

$$\left\{ \begin{array}{l} A = 1,64 \cdot 10^{-6}, a = 1,8 \text{ si } 0,5 < E / C < 0,8 \text{ (ciment portland)} \\ A = 6,1 \cdot 10^{-6}, a = 3,0 \text{ si } 0,38 \leq E / (C + \delta P) < 0,8 \text{ (ciment avec ajouts)} \end{array} \right.$$

δ est une constante fixée empiriquement qui exprime la contribution de l'addition minérale à déconnecter les pores du matériau (pour la fumé de silice $\delta = 2$, pour les cendres volantes $0,5 < \delta < 1$).

II-3 Modèle de Linhua et al (2000)

Le modèle de Linhua et al [42] est destiné au béton à haute quantité de cendres volantes (HVFA). Le modèle représente le prolongement du celui de Jiang et al conçu pour le béton portland est donné par la formule suivante :

$$x = 839 (1 - HR)^{1,1} \sqrt{\frac{(E / \Gamma_c \cdot C) - 0,34}{\Gamma_{HD} \cdot \Gamma_c \cdot C}} C_0 \sqrt{t}$$

x en (mm) est la profondeur de carbonatation.

HR est l'humidité relative.

C et E en (kg / m^3) sont respectivement la quantité de ciment et d'eau par unité de volume du matériau.

C_0 en (%) est la concentration de CO_2

Γ_c est un coefficient pour le type du ciment.

Γ_{HD} est le coefficient de degré de l'hydratation.

t en (jours) est le temps d'exposition.

D'après Linhua ce modèle n'est pas approprié au béton HVFA car le HVFA est différent du béton portland et d'autre formulation. La différence principale est que les cendres volantes utilisées dans les HVFA ne peuvent pas être complètement hydratés, ceci implique que sa réactivité m sera nettement inférieure par rapport aux autres béton, par exemple : m (béton portland) $>$ m (HVFA).

Pour cette raison les auteurs ont employé le rapport eau / liant effectif (E / B^*) au lieu de E/C pour tenir compte de la participation des cendres volantes dans l'évolution de la profondeur de carbonatation.

La relation pour prédire la profondeur de carbonatation de HVFA est donnée par la formule suivante [42] :

$$x = 839 (1 - \text{HR})^{1,1} \sqrt{\frac{(E / B^*) - 0,34}{\alpha k' C}} C_0^n \sqrt{t}$$

$$(E / B^*) = \frac{1 - M}{1 - m} \frac{E}{C + F'}$$

m en (%) est la quantité de cendres volantes

F' est la quantité de cendres volantes qui peut être hydratée

M est la quantité maximale de cendres volantes qui peut être hydratée

C et E en (kg / m^3) sont respectivement la quantité de ciment et d'eau par unité de volume du matériau

α est le degré de l'hydratation du ciment

n est un paramètre lié au système poreux du béton, sa valeur varie entre 2 et 2,1

k' est le coefficient de la réactivité de carbonatation est donné par

$$k' = 1 - \beta.k$$

β le degré de l'hydratation des cendres volantes

$$k = \frac{M}{1 - m} m_{\text{fa}} \frac{1}{102.10^{-3}} \frac{1}{8.03}$$

m_{fa} en (%) est la quantité de Al_2O_3 dans les cendres volantes.

II-4 Autres modèles de carbonatation

Les modèles présentés auparavant sont conçus à partir d'une étude thermodynamique des processus de carbonatation. Ils ont une démarche mathématique pour la description de la carbonatation.

Dans la littérature, on trouve également de nombreuses formules empiriques plus simples à appliquer. Ces formules n'intègrent pas l'aspect réactionnel des processus de carbonatation. La cinétique du phénomène obéit uniquement à un processus de diffusion.

La majorité de ces modèles empiriques expriment l'épaisseur carbonatée comme variant proportionnellement avec la racine carrée du temps [43].

$$\delta_c = \delta_0 + k \sqrt{t}$$

δ_c en (mm) est la profondeur de carbonatation.

δ_0 en (mm) est la profondeur initiale avant le suivi du processus de carbonatation.

t en (s) est la durée de l'exposition.

k en ($m / s^{0,5}$) est le coefficient de carbonatation.

Le tableau IV-1 résume quelques formules pour calculer approximativement l'évolution de la profondeur de carbonatation dans le matériau cimentaire.

Auteurs	δ_0 en (mm)	K en ($mm.an^{-1}$)
Smolezyk	-0,5	$7(10 \frac{E}{C} \frac{1}{\sqrt{f_{c28}}} - 0,175)$
Wierig	0,95	$(84,62 \frac{E}{C} \frac{1}{\sqrt{f_{c28}}} - 0,64 \frac{E}{C} - 1,63)$
Vesikari	0	$(\frac{E}{C} - 3)^2 + 0,07)$
Brown	0	$\sqrt{\frac{2D_{co_2} [C_{g_0}]}{[C_g]}}$
Kishitani	0	3 à 4
Verbeek	0	5
Venuat et Alexandre	2,2	4,8

Tableau IV-1 Formules empiriques pour la prédiction de l'avancement de la profondeur de carbonatation dans le temps [14]

III – TRANSPORT DE DIOXYDE DE CARBONE PAR DIFFUSION DANS LE RESEAU POREUX DU BETON

III-1 Introduction

La diffusion désigne le processus de transport d'un constituant dans un milieu donné sous l'effet de son agitation aléatoire à l'échelle moléculaire.

S'il existe des différences de concentration entre deux points du milieu, ce phénomène engendre un transport global du constituant considéré, orienté de la zone la plus concentrée vers la zone la moins concentrée.

III-2 Equations mathématiques et description du phénomène de diffusion

Le processus de diffusion de CO₂ à l'intérieur du matériau poreux, comme le béton, peut être décrit par l'équation habituelle de diffusion résultant à partir de la première et seconde loi de Fick [44].

$$\partial g / \partial t = \text{div} [Dg \text{ grad } (g)] \quad (\text{III-1})$$

Où

g est la concentration de CO₂

Dg est le coefficient de diffusion qui dépend de la température, le degré de carbonatation et le contenu de l'humidité. Plusieurs formulations ont été développées pour déterminer ce coefficient, nous citerons par exemple :

- $Dg(h, T, te, c) = Dg_{28} \cdot F_1^*(h) \cdot F_2(T) \cdot F_3(te) \cdot F_4(c)$ [45]

Dg_{28} est la diffusivité aux conditions standard après 28 jours.

$$F_1^*(h) = (1-h)^{2.5}; \quad F_2(T) = \exp \left[\left(\frac{Q}{R T_0} \right) - \left(\frac{Q}{R T} \right) \right]; \quad F_3(te) = \chi + (1-\chi) \sqrt{28 / te}$$

$$F_4(c) = 1 - \zeta \cdot c$$

La fonction $F_1^*(h)$ prend en considération la diminution de diffusivité quand l'humidité relative augmente, $F_3(te)$ décrit le ralentissement de la diffusion en fonction du degré d'hydratation et $F_4(c)$ représente la diminution de la diffusivité due à la réduction de la porosité par la carbonatation.

- $Dg = D_0 \cdot f_T \cdot f_H \cdot f_K \cdot I$ [46]

Où

D_0 coefficient de diffusion de référence

f_T l'effet de la température sur la diffusion

f_H l'effet de l'humidité sur le mécanisme de transport

f_K l'influence de la réaction de carbonatation sur le coefficient de transport

$$f_T = \frac{U + 273}{297} \quad U : \text{température}$$

$$f_H = a_1 + \frac{a_2}{1 + (a_3 - a_3 \varphi)^{a_4}} \quad \varphi : \text{l'humidité}$$

a_1 , a_2 , a_3 , et a_4 sont des paramètres expérimentaux qui sont respectivement 0,993 ; - 0,974 ; 3,621 ; 6,75.

$$f_k = \exp[C_1.k]$$

C_1 paramètre du matériau
 k dénote le degré de carbonatation.

$$\bullet \quad Dg = 10^{-7} \cdot 10^{-0.025 f_{ck}} \quad [47]$$

f_{ck} est la résistance de compression cylindrique

Dans le but de prendre en compte la perte de CO_2 durant la réaction de carbonatation, l'équation différentielle (III-1) sera réécrite sous la forme suivante [44]

$$\partial g / \partial t = \text{div} [Dg \text{ grad} (g)] - \partial g_c / \partial t \quad (\text{III-2})$$

$\partial g_c / \partial t = \alpha_4 \cdot \partial c / \partial t$ représente le changement de la concentration de CO_2 due à la carbonatation en unité de temps

α_4 coefficient du matériau varie entre 0 et 1, et qui définit l'interaction entre la diffusion de CO_2 et la carbonatation, il est donné d'après Saetta [48] par la formule suivante

$$\alpha_4 = 1200 g_{\text{env}} \quad \text{où } g_{\text{env}} \text{ est la concentration de } \text{CO}_2 \text{ dans l'environnement}$$

$\partial c / \partial t$ où v est le taux de la réaction qui représente la quantité de CaCO_3 produite en fonction du temps. Cette quantité dépend du degré de carbonatation (la disponibilité de $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$, la température, la concentration du dioxyde de carbone $[\text{CO}_2]$ et l'humidité relative à l'intérieur des pores).[44]

$$\partial c / \partial t = v = \frac{\partial(\text{CaCO}_3)}{\partial t} = f(h, T) \cdot [\text{Ca}(\text{OH})_2] \cdot [\text{CO}_2]$$

La fonction $f(h, T)$ est exprimée comme suit :

$$f(h, T) = f_1(h) \alpha_1 . k$$

où

$$k = A \cdot e^{-E_0/RT} \text{ représente l'équation de Arrhenius}$$

α_1 paramètre de matériau compris entre $2.8 \cdot 10^{-7}$ et $3.0 \cdot 10^{-7}$

$f_1(h)$ fonction qui prend en considération l'influence de HR sur la carbonatation et qui considère aussi que la réaction sera produite seulement en présence d'eau.

Pour un béton sec ($h < 0,5$), cette fonction est égale à zéro (le processus de carbonatation est arrêté)[46].

$$f_1(h) = \begin{cases} 0 & \text{si } 0 \leq h \leq 0,5 \\ 5/2 (h-0.5) & \text{si } 0,5 \leq h \leq 0,9 \\ 1 & \text{si } 0,9 \leq h \leq 1,0 \end{cases}$$

Le taux de carbonatation v peut être exprimé avec une autre manière et beaucoup similaire à celui proposé par Wittmann [44]

$$V = \alpha_1 \cdot f_1(h) \cdot f_2(g) \cdot f_3(c) \cdot f_4(T)$$

Dans cette équation, $f_3(c)$ décrit l'influence du degré de carbonatation c ; elle varie entre 0 et 1 selon la relation suivante :

$$f_3(c) = 1 - (c / c_{\max})^m$$

où c_{\max} est la quantité maximale de CaCO_3 et m est habituellement pris égale à 1

Toujours la fonction $f_2(g)$ varie entre 0 (quand CO_2 n'a pas encore pénétré) et 1 (quand la concentration de CO_2 est égale à sa valeur maximale g_{\max})

$$f_2(g) = g / g_{\max}$$

La fonction $f_4(T)$ a été mentionnée auparavant (équation d'Arrhenius) ou E_0 est l'énergie d'activation du processus de carbonatation, R constant de gaz parfait et T la température absolue.

A la fin, et après avoir illustré les différents paramètres qui entrent en jeu pour résoudre le problème de transport, nous récapitulons l'équation (III-2) sous sa forme simple après l'intégration des lois mathématiques.

Pour un problème bidimensionnel dans x et y , le transport de dioxyde de carbone est gouverné par l'équation suivante [49] :

$$\frac{\partial Cc}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(Dc \frac{\partial Cc}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(Dc \frac{\partial Cc}{\partial y} \right) + Qc \quad (\text{III-3})$$

Où

Dc en (m^2 / s) est le coefficient de diffusion

Cc en (mol / m^3) est la concentration de CO_2

Qc en ($\text{mol} / \text{m}^3 \cdot \text{s}$) le terme qui représente la réduction de CO_2 dans le béton dû à la carbonatation

Nous rappelons que l'équation (III-3) est une formulation qui permet de modéliser n'importe quel problème de transport de masse à l'intérieur du matériau poreux, telles que la température et l'humidité relative.

Cette équation est valable pour le transport sous forme de gaz uniquement, pour les autres cas comme le transport sous forme liquide ou sous forme vapeur, d'autres équations doivent être établies.

IV – IMPLÉMENTATION DU MODÈLE ÉLÉMENTS FINIS

IV-1 Introduction

Le modèle développé ici est conçu pour le cas de la carbonatation accélérée, nous avons utilisé le logiciel de simulation ANSYS pour étudier ce problème. Nous rappelons que ce logiciel permet de modéliser le problème de diffusion à l'intérieur de matériau poreux par analogie avec l'étude thermique dont quelques paramètres doivent être changés.

Le Tableau IV-2 montre les facteurs utilisés dans l'étude thermique et ses équivalents dans l'étude de la diffusion de CO₂ à l'intérieur de matériau cimentaire

Etude thermique		Etude de la diffusion de CO ₂ à l'intérieur De matériau cimentaire
Champ : la température	T	Champ : la concentration de CO ₂ dans L'environnement Cc
Conductivité thermique	K	Coefficient de diffusion Dc
La chaleur génératrice	Q	Taux de carbonatation Qc
Output : la variation de température à L'intérieur de l'élément		Output : la variation de la concentration de CO ₂ à L'intérieur de l'élément

Tableau IV-2 paramètres de l'étude thermique et ses équivalents dans l'étude de la diffusion

IV-2 Détermination de paramètres du modèle

La résolution de l'équation de diffusion non linéaire (équation III-3), pour l'étude de la carbonatation des structures en béton nécessite la détermination de certains paramètres fondamentaux. Ces paramètres sont divisés en deux catégories : les paramètres environnementaux qui tiennent compte de l'état de l'environnement et ceux liés au matériau.

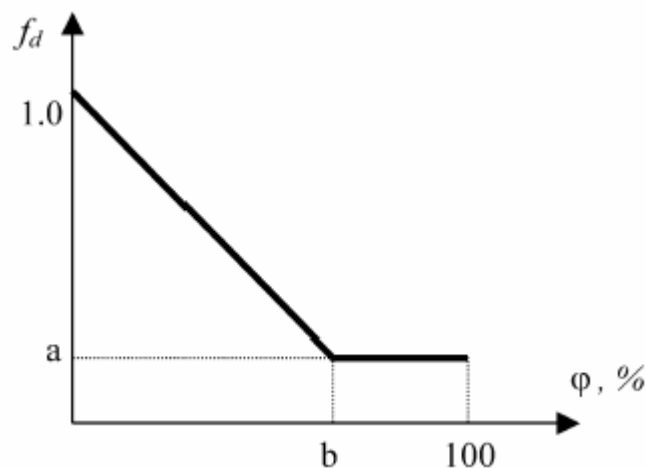
Actuellement ces derniers sont devenus faciles à identifier grâce à l'expérience qui dispose des moyens scientifiques de recherche très avancés.

En ce qui concerne le coefficient de diffusion D_c et comme il a été mentionné auparavant, le procédé de carbonatation change les propriétés de transport. La modélisation de ce changement est un problème théorique très complexe ; pratiquement basé sur des études expérimentales une fonction d'affaiblissement pour D_c a été suggérée.

En effet, cette fonction d'affaiblissement (figure III-1) peut être employée pour simuler l'effet de la carbonatation sur la diffusion de CO_2 ainsi que l'humidité relative (les paramètres a et b peuvent être déterminés empiriquement basé sur le changement observé de la porosité due à la carbonatation).

Il reste à noter que le changement de propriétés de transport dû aux cycles de mouillage-séchage peut également changer la structure des pores dans le béton. En effet, ce changement n'a pas été incorporé dans ce travail.

Le tableau IV-3 regroupe tous les paramètres utilisés dans la simulation



FigureIV-1 Fonction d'affaiblissement de CO_2 [49]

Paramètres numériques	valeur	
Béton portland		
Coefficient d'interaction entre la carbonatation et la diffusion de CO ₂	α_4	0.4
L'énergie d'activation	E_0	$2.08 \cdot 10^6$ N. m/ kg [46]
/	α_1	$3.0 \cdot 10^{-7}$
/	a, b	0.6, 90 [49]
/	A	$3.6 \cdot 10^{10}$ h ⁻¹ [46]
Paramètres environnementaux		
Concentration de CO ₂	g_{env}	5, 20, et 50 % correspondent à 2.285, 9.14, et 22.85 mol / m ³
Température	T_{env}	30 °C
Humidité relative	h_{env}	65%

Tableau IV-3 Paramètres numériques du modèle

IV-3 Choix de formulation

Dans ce travail, la simulation a été effectuée sur trois séries du béton A, B et C distinguées par la valeur de rapport E/C 0.45, 0.60 et 0.80 respectivement (tableau IV-4). Concernant la composition chimique du clinker employée dans la formulation, nous avons choisi celle donnée par la référence [14].

La réactivité du béton avec le gaz carbonique a été calculée suivant la relation de molarité qui existe entre les produits hydrates et anhydres comme suit [42]

$$m_0 = [Ca(OH)_2] + 3[C_3S_2H_3] + 3[C_3S] + 2[C_2S]$$

où m_0 est la réactivité du béton, et pour une hydratation complète du béton portland on trouve :

$$[Ca(OH)_2] = 3/2[C_3S] - 4[C_4AF] + 1/2[C_2S] - [C_3A] + [CSH_2]$$

$$[C_3S_2H_3] = 1/2[C_2S] + 1/2[C_3S]$$

$$[C_3S] = 0$$

$$[C_2S] = 0$$

Avec

$$m_{is}^* \cdot m_{cl} \cdot \rho_c$$

$$[i] = \frac{m_{is}^* \cdot m_{cl} \cdot \rho_c}{M_{is} (1 + E/C \cdot \rho_c / \rho_E + A/C \rho_c / \rho_A)} \quad [14]$$

$$M_{is} (1 + E/C \cdot \rho_c / \rho_E + A/C \rho_c / \rho_A)$$

Où

i : représente le constituant à calculer

m_{is}^* fraction du constituant anhydre dans le clinker

m_{cl} fraction du clinker dans le ciment

M_{is} masse molaire de constituant anhydre donnée par le tableau IV-6

series	A	B	C
caractéristiques			
Ciment (kg/m ³)	400	350	300
Sable (kg/m ³)	714	698	683
Gravier (kg/m ³)	1070	1047	1025
Eau (kg/m ³)	180	210	240
E/C	0.45	0.60	0.80
A/C	4.46	5	5.7
Masse volumique (kg/m ³)	2364	2306	2249
Air (%)	2	2	2
Résistance (Mpa)	37.13	24.75	15.47

$$\rho_c = 3.15 \text{ g/cm}^3 ; \rho_A = 2.65 \text{ g/cm}^3 ; \rho_E = 1.00 \text{ g/cm}^3$$

Tableau IV-4 caractéristiques physiques des bétons

oxyde	CaO	SiO ₂	AlO ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	NaO	SO ₃	TiO ₂	MnO	SrO
(%) massique	64.02	19.81	5.19	2.38	0.90	1.11	0.06	3.50	0.28	0.05	0.15
	0.16										

89% du clinker

Tableau IV-5 Composition chimique du clinker [14]

constituant	C ₂ S	C ₃ S	C ₃ A	C ₄ AF
Mis (kg/mol)	172.22	228.30	270.18	485.96

Tableau IV-6 Masse molaire des anhydres [14]

IV-4 Hypothèses du calcul

La complexité du matériau cimentaire et les transferts de masse dont il est question, nous amènent à poser quelques hypothèses pour faciliter le travail. Dans ce qui suit nous supposons que :

- 1- Le problème traité a une seule dimension c- à- d le flux de CO_2 est évalué suivant une seule direction (direction x), les autres cotés sont considérés non exposés.
- 2- Le transport du CO_2 est considéré sous forme gazeuse uniquement, et la réaction de CO_2 dessous est supposée beaucoup plus rapide que le procédé de carbonatation.
- 3- Le matériau est supposé complètement hydraté
- 4- La teneur de température et de HR est supposée constante à l'intérieur du matériau est égale à celle de l'environnement.

IV-5 Description du modèle EF et les conditions aux limites

Le modèle EF est un modèle plan de dimensions 40x50 mm ; le maillage est constitué d'éléments solides de type QUAD8 (quadratique à huit nœuds). Le nombre totale d'éléments est de 4900 (14980 nœuds) établie à partir d'une étude statique afin d'assurer la stabilité du modèle.

Concernant maintenant les conditions aux limites, seulement les nœuds du coté gauche du modèle sont exposés au dioxyde de carbone, tandis que les autres bords sont isolés ($[\text{CO}_2]=0$).

Initialement à ($t=0$), la concentration du CO_2 vaut 0 mol/m³ correspond à un degré de carbonatation nul.

La figure IV-2 représente le maillage et les conditions aux limites considérés pour étudier la pénétration du CO_2 à l'intérieur du béton.

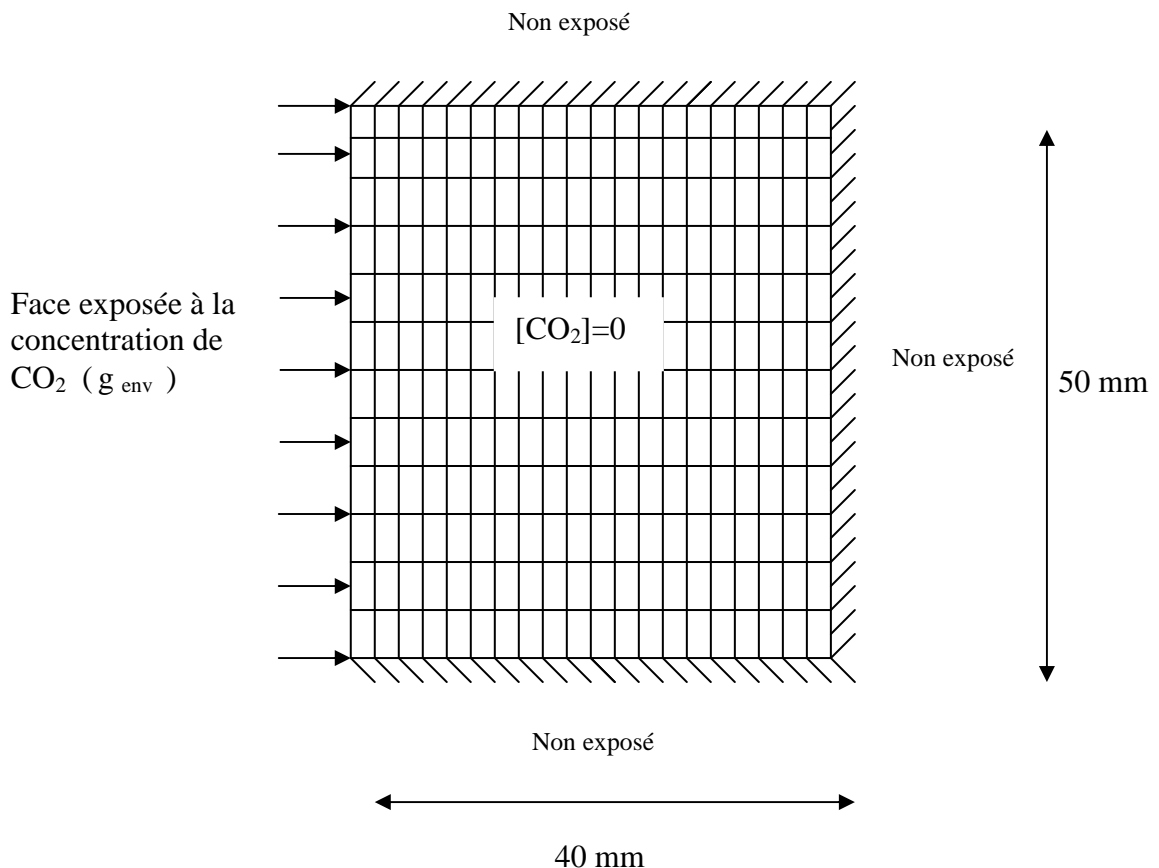


Figure IV-2 Maillage et conditions aux limites pour le calcul de la diffusion de CO_2

V – RESULTAS ET DISCUSSION

V-1 Analyse des résultats

Les modèles ont été analysés pour quatre intervalles du temps qui sont respectivement 3, 7, 28, et 90 jours. Les résultats de simulation sont graphiquement donnés dans la figure IV-4 (cas du béton A, et 5% de CO₂). Les résultats concernant les autres concentrations en CO₂ (20% et 50%) ainsi ceux concernant les bétons B et C sont présentés en annexe. Nous rappelons que la forme du graphe déduite est similaire à celle donné par les différents chercheurs (modèles numériques) [44], [45],[50],[51]

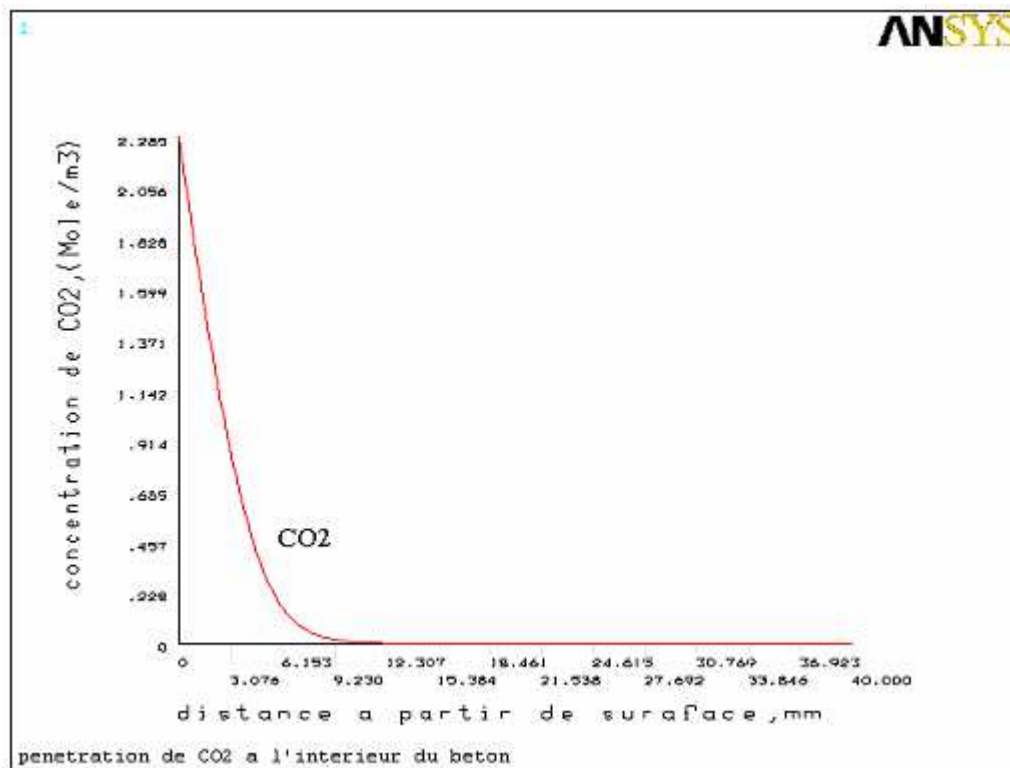


Figure IV-3a la variation de concentration de CO₂ en fonction de la profondeur après 3 jours (cas du béton A, 5% de CO₂)

Figure IV-3b la variation de concentration de CO₂ en fonction de la profondeur après 7 jours (cas du béton A, 5% de CO₂)

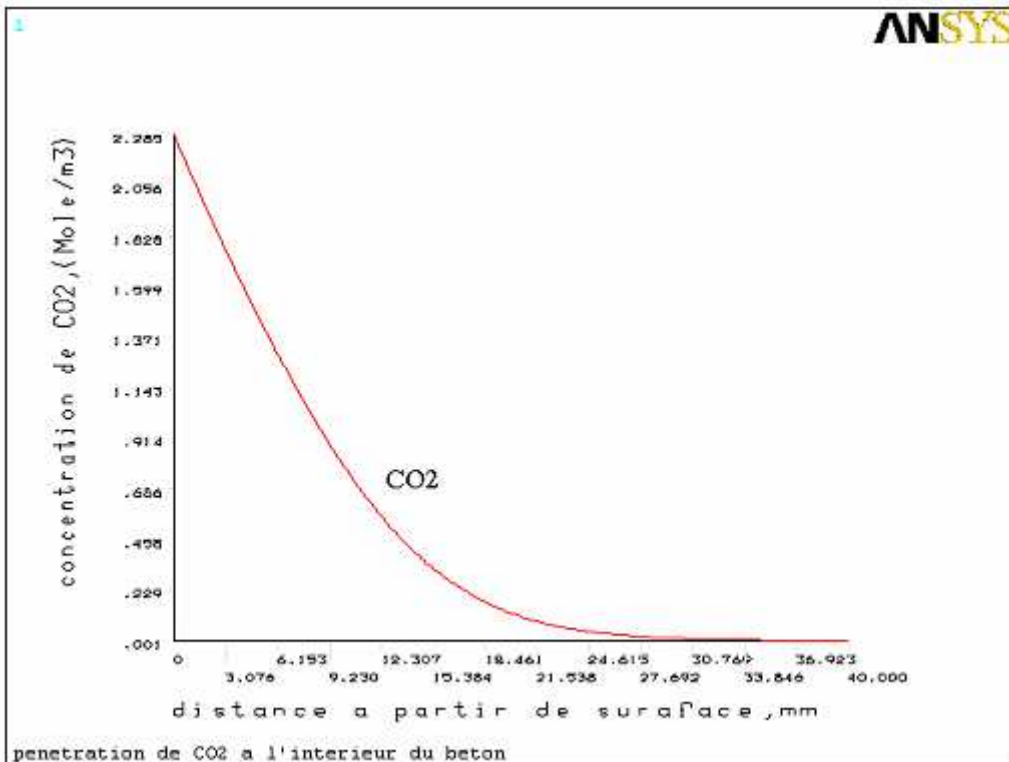
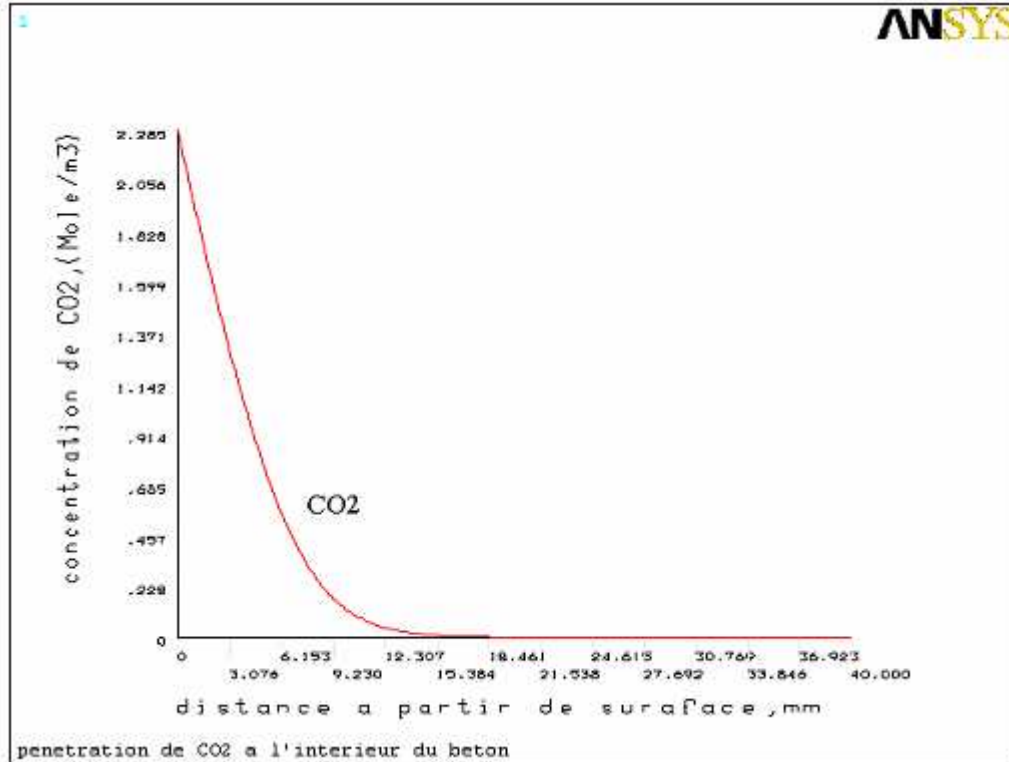


Figure IV-3c la variation de concentration de CO₂ en fonction de la profondeur après 28 jours (cas du béton A, 5% de CO₂)

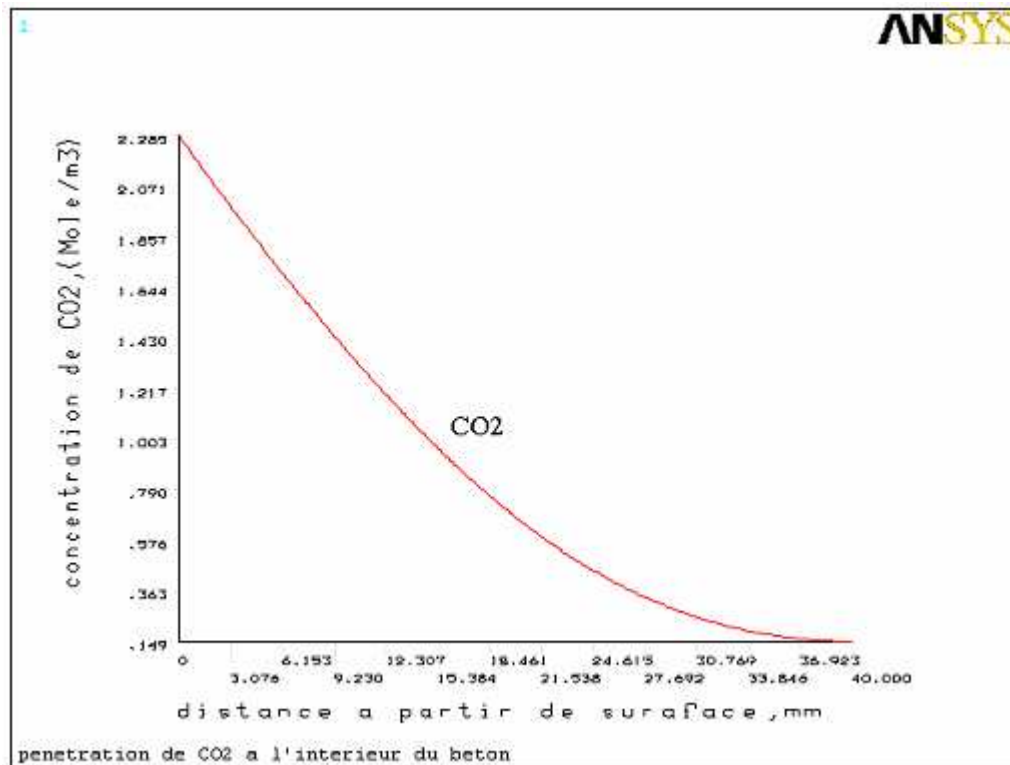


Figure IV-3d la variation de concentration de CO₂ en fonction de la profondeur après 90jours (cas du béton A, 5% de CO₂)

Nous remarquons que, pour un temps donné la concentration de CO₂ tend a diminuée lorsque on se dirige vers la profondeur. Cette diminution est due principalement à la consommation de CO₂ par la réaction de carbonatation d'une part, et d'autre part par la difficulté de CO₂ de diffuser à l'intérieur du béton parce que la porosité a été changée après la carbonatation.

Dans le cas de la carbonatation naturelle, la forme de la courbe (concentration-profondeur) suit presque la même forme comme montrée à la figure IV-4. La seule différence qu'on peut signaler c'est au niveau de deux branches 1et 2 où la concentration reste constante dans ces endroits.

La première branche (1) représente la concentration de CO₂ dans la couche superficielle de béton. Cette couche est très poreuse parce qu'elle a perdu son eau ce qui conduit a stoppé l'hydratation du ciment. Cette situation favorise la diffusion de CO₂ de manière uniforme.

Dans la deuxième branche de la courbe qui signifiée le cœur du l'élément, le réseau poreux est très serré et le degré de saturation est élevé. Dans ces conditions la carbonatation doit être forcément arrêté, et par conséquent la concentration de CO₂ reste constante

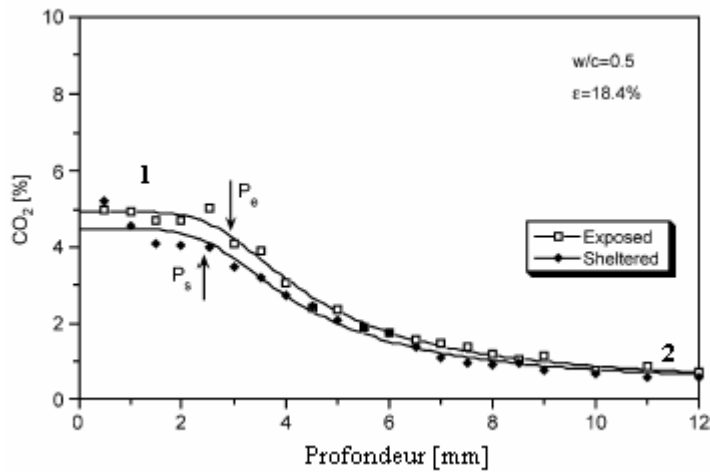
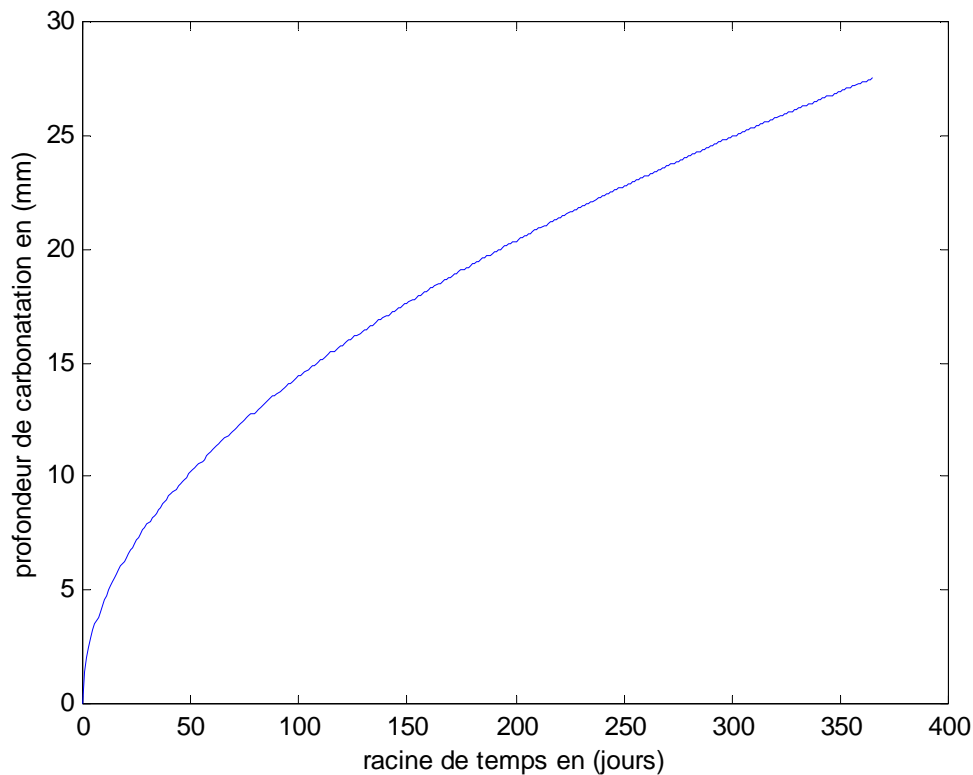


Figure IV-4 Profondeur et profil de CO₂ après 40.5 mois d'exposition (mortier E/C = 0.5) [11]

La deuxième remarque qu'on peut l'observer c'est l'augmentation de la concentration de CO₂ d'un intervalle du temps à un autre. Par exemple dans le cas (béton A, 5%), elle passe de 0.001 mol/m³ (28 jours) à 0.149 mol/m³ (90 jours) à une distance égale 30 mm de la surface.

Cependant cette concentration ne représente pas la profondeur de carbonatation exacte parce qu'il existe une teneur critique à partir de laquelle les carbonates de calcium se forme.

La Figure IV-5 représente l'évolution de la profondeur de carbonatation en fonction de temps (cas béton A, et 5 % de CO₂).



FigureIV-5 Evolution de la profondeur de carbonatation en fonction de temps (cas du béton A, et 5% de concentration de CO₂)

Concernant maintenant le rapport E/C, on peut constater que plus la valeur de rapport est grande, plus la profondeur de carbonatation est intéressante Figure IV-6. En effet, comme il a été mentionné auparavant (chapitre I), un faible rapport de E/C mène à un réseaux poreux très serré qui forme un obstacle contre la diffusion de CO₂ et par conséquent la profondeur sera réduite.

Dans le présent travail la profondeur de carbonatation mesurée saute de 20 mm (E/C = 0.45) à 23 et 25 mm (0.6 et 0.8) pour une concentration de 5%, et t = 200 jours ; et de 40 mm à 46 et 51 pour 20% de concentration de CO₂.

Un autre aspect intéressant qu'on peut le constater dans cette étude, c'est l'influence de la concentration sur la profondeur de carbonatation Figure IV-7. Nous remarquons dans le cas du béton A (E/C = 0.45) que la profondeur augmente de 24.94 mm (5% de CO₂) à 49.7 et 78.63 mm pour 20 et 50% respectivement, ceci pour un t = 300 jours. Cette variation est due principalement à la quantité de CO₂ diffusée à l'intérieur de l'élément.

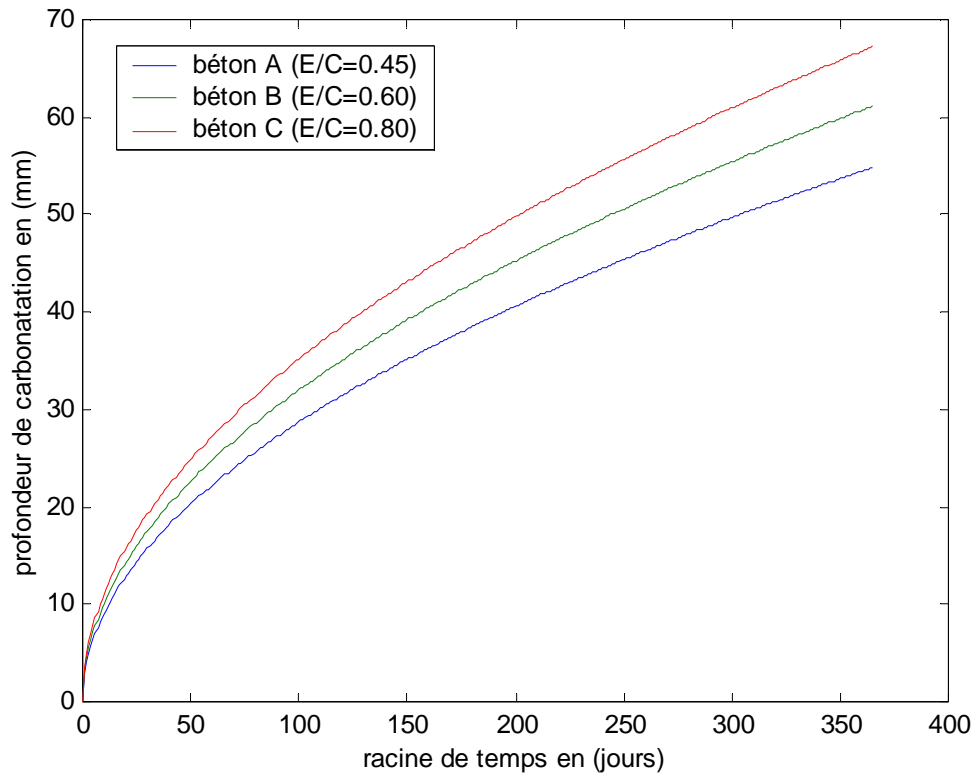


Figure IV-6 Comparaison de la profondeur de carbonatation pour les différents cas de formulation A, B, et C (20% de concentration de CO_2)

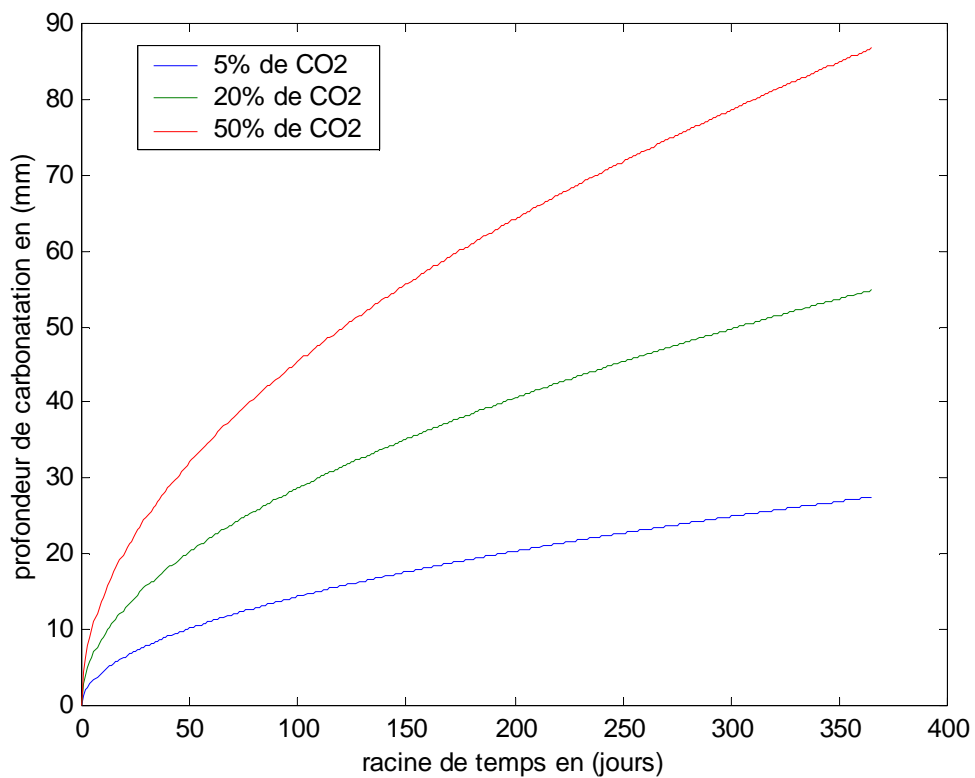


Figure IV-7 Comparaison de la profondeur de carbonatation pour les différents cas de concentrations 5, 20, et 50 % CO_2 (cas du béton A)

V-2 Validation du modèle

Pour la validation du modèle, nous utilisons les résultats de l'essai de carbonatation accélérée de Papadakis et al [41]. La composition chimique du clinker, ainsi les caractéristiques physiques des bétons employés sont donnés dans le tableau IV-7 et tableau IV-8 respectivement.

CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	résidu
65.28	23.55	6.12	2.51	1.30	0.47	0.77
BPO 94.9% de clinker, 5.1% de gypse						

Tableau IV-7 composition chimique de clinker [41]

Nombre des échantillons	Rapport eau-ciment (E/C)	Rapport agrégats-ciment (A/C)
S1	0.50	0
S2	0.50	3
S3	0.65	3
S4	0.80	3
S5	0.65	3
S6	0.65	5
S7	0.65	5
S8	0.65	7

Tableau IV-8 Proportions du mélange des échantillons du béton [41]

Les résultats obtenus dans ce contexte ont été reportés sur la Figure IV-9, nous constatons que l'évolution de la profondeur de carbonatation est globalement reproduite, et les résultats sont en accord avec les résultats expérimentaux.

Cependant l'écart entre les résultats de simulation et ceux de l'expérimentale varié de 1.24% et 18 %, sauf dans le cas (S4) où il atteint 24.56%. Il semble que dans ce cas la grande valeur de rapport E/C = 0.8 fait ce grand pourcentage car le contenu d'humidité est élevé par conséquent sa variation est considérable.

Nous rappelons que nos simulations rendent compte en revanche d'une carbonatation très rapide pour des faibles variations d'humidité.

Il faut cependant souligner que l'équation de transfert de CO₂ est relativement simple et les paramètres numériques sont faciles à identifier grâce à l'expérience.

Ainsi, dans le cadre des hypothèses introduites, nous estimons l'ensemble des résultats numériques obtenus satisfaisants pour l'étude de carbonatation accélérée du béton.

Figure IV-8a comparaison entre les résultats numériques (courbe) et expérimentaux (points) pour l'essai de la carbonatation accélérée, cas de formulation S_1 et S_2

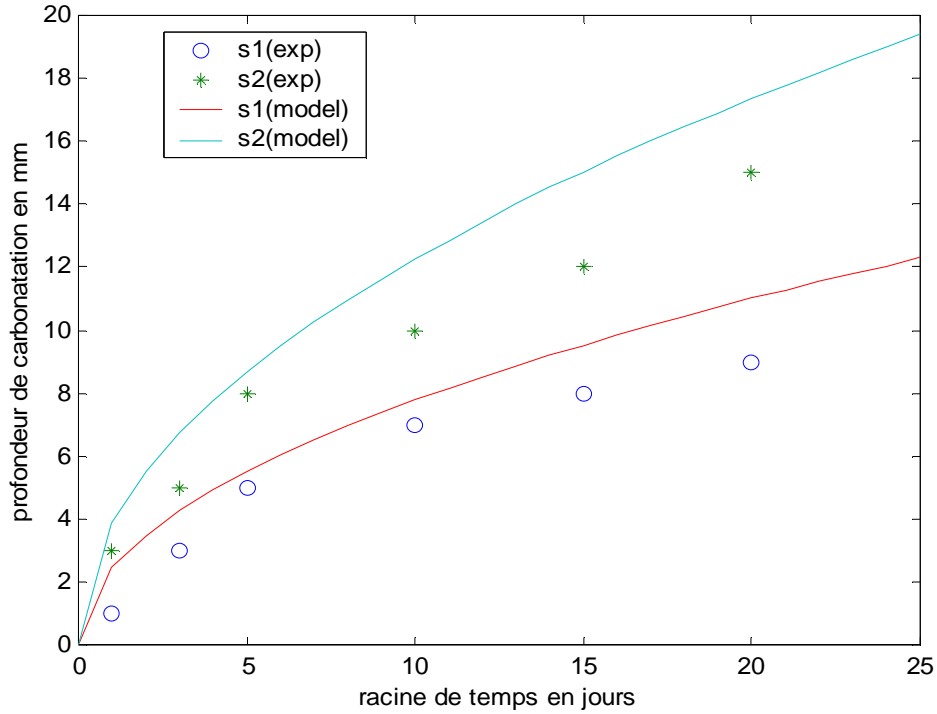


Figure IV-8b comparaison entre les résultats numériques (courbe) et expérimentaux (points) pour l'essai de la carbonatation accélérée, cas de formulation S_3 et S_4

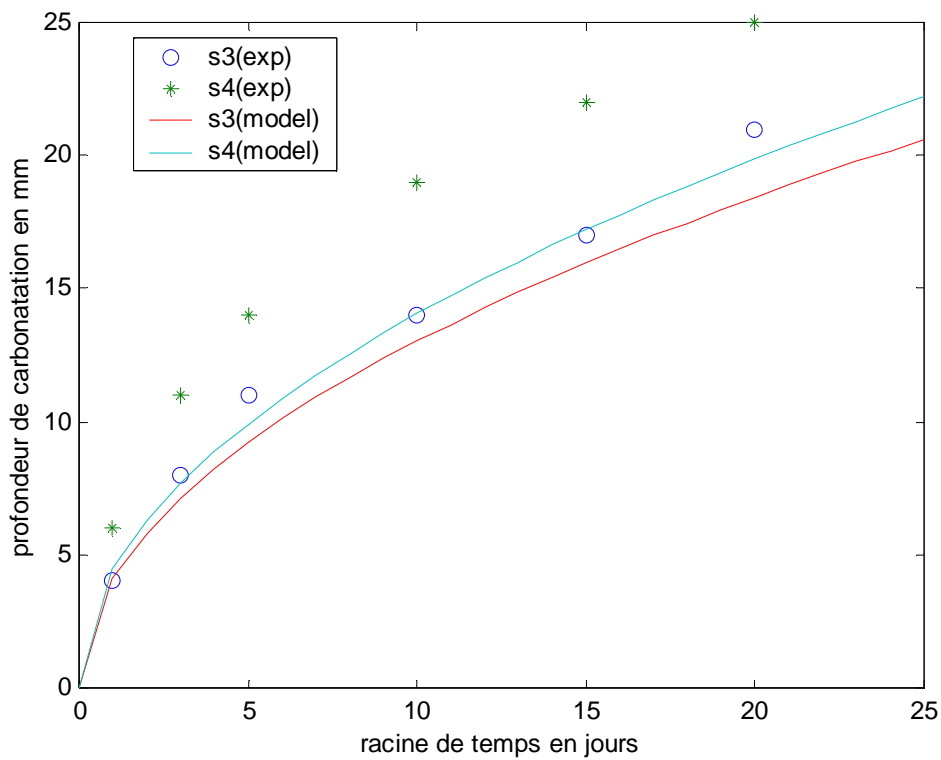


Figure IV-8c comparaison entre les résultats numériques (courbe) et expérimentaux (points) pour l'essai de la carbonatation accélérée, cas de formulation S₅ et S₆

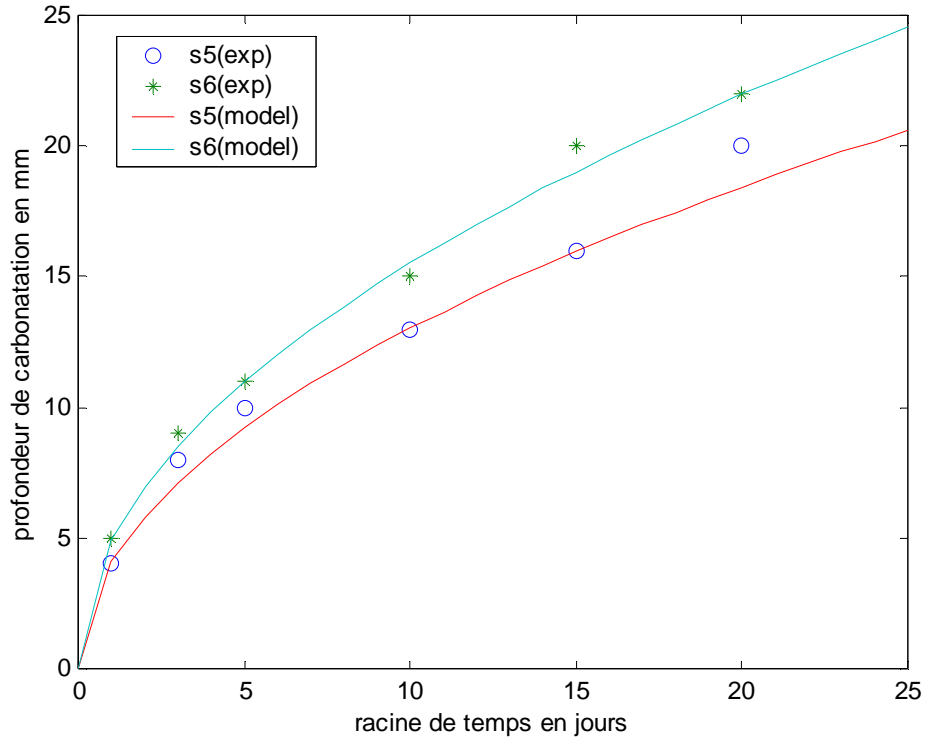
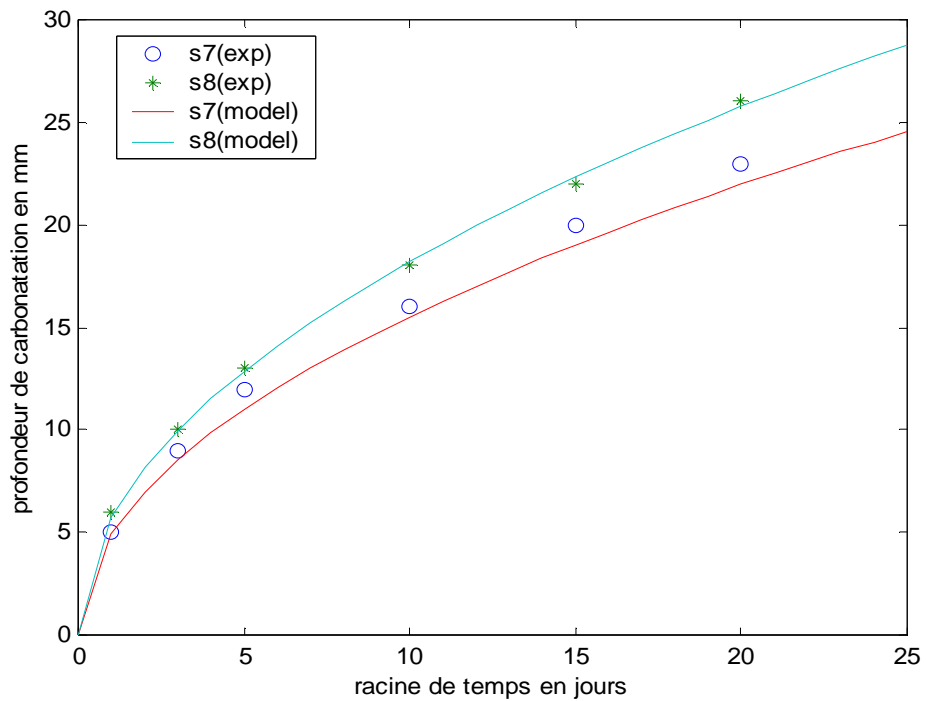


Figure IV-8d comparaison entre les résultats numériques (courbe) et expérimentaux (points) pour l'essai de la carbonatation accélérée, cas de formulation S₇ et S₈



VI - CONCLUSION

La carbonatation du béton est un phénomène extrêmement lent qui peut être décrit par une équation de diffusion non linéaire. Cette équation met en jeu deux paramètres qui sont :

- le coefficient de diffusion de dioxyde de carbone obtenu par l'observation de changement de porosité en cherchant à approcher au mieux à la réalité.
- Le taux de carbonatation qui constitue véritablement un « paramètre-clé » en ce sens où il permet la détermination de la quantité de carbonates de calcium produite à une concentration de CO₂ donnée.

Le modèle développé ci-dessus montre des résultats satisfaisants par rapport aux résultats expérimentaux en terme de carbonatation accélérée. Une certaine corrélation modèle-expérience a été constatée, et l'écart entre les deux résultats varié de 1,24 % à 18 %. Néanmoins, la confrontation indique que des valeurs de profondeur de carbonatation données par le modèle sont surestimées. En effet, il nous semble que les hypothèses considérées sont tout à fait acceptables pour simuler ce genre de phénomène.

Il faut cependant souligner que l'effet de la carbonatation sur la structure des pores et les propriétés de perméabilité du béton est un problème complexe pour lequel un modèle satisfaisant doit être développé encore.

Néanmoins, les modèles disponibles sont proportionnés pour fournir une explication raisonnable pour le comportement observé dans les structures en béton soumises à la carbonatation.

Chapitre V
Conclusions générales et
Recommandations

I - CONCLUSIONS

Dans le présent travail, nous avons étudié le phénomène de carbonatation dans le matériau cimentaire et dresser un constat des ouvrages en Algérie vis-à-vis de la carbonatation. Cet constat permet de sélectionner les principaux paramètres responsables à la formation de phénomène, qui nous aide par la suite à la modélisation du transport de CO_2 à l'intérieur du matériau cimentaire.

Tout d'abord et dans le but d'illustrer l'importance du problème, il est nécessaire de comprendre le mécanisme de formation du phénomène et voir les caractéristiques physico-chimiques du matériau cimentaire avant et après la carbonatation. Ceci permet de connaître les différents paramètres entrent en jeu et leurs influence sur la procédure de carbonatation.

La carbonatation affecte toute structure à base de matériau cimentaire et provoque une modification de l'arrangement de la microstructure des matériaux ; ces évolutions à l'échelle microscopique ont des incidences plutôt néfastes à l'échelle du matériau :

- dans le cas du béton armé, la baisse du PH et le changement des caractéristiques de base de ce composite.
- Dans le cas des mortiers de revêtement, l'accumulation d'une façon hétérogène des retraits et gonflements, ces derniers engendrent des fissurations et des craquelures affectant l'aspect esthétique des bâtiments.

La démarche générale de l'expertise consiste à faire un bilan général des informations en ce qui concerne le problème de la carbonatation. Nous avons commencé par un questionnaire proposé aux experts de génie civil, citer les endroits touchés par cette maladie, déplacer sur site et prélever des échantillons et à la fin analyser les échantillons et interprétation des résultats.

A cause de l'absence des rapports sur la qualité du béton produit sur les constructions examinées, nous avons orienté notre interprétation sur l'influence de l'environnement et l'état de l'élément sur la durabilité du béton vis-à-vis de la carbonatation.

A travers donc cette démarche de l'expertise, nous avons conclu que l'impact de l'environnement sur la carbonatation des bétons est très important et doit être pris en considération lors de conception des ouvrages, le choix de matériaux et la durabilité de nos constructions.

La carbonatation peut être contrôlée en premier lieu par la spécification de la qualité du béton qui présente un paramètre essentiel dans le contexte de durabilité des bétons. En effet, les constituants du matériau et les conditions climatiques sont limités à l'intérieur des parties particulières, d'où cette spécification ne suffit pas pour prédire l'évolution de la profondeur de carbonatation en fonction du temps.

A cet effet, nous avons proposé un modèle décrivant le processus de carbonatation d'un matériau cimentaire. Ce modèle intègre également l'évolution de la concentration de CO₂ à l'intérieur de l'élément. Ces concentrations sont les sorties du modèle, elles sont utilisées pour estimer la variation de la profondeur de carbonatation en fonction du temps.

Dans ce modèle, une équation de diffusion non linéaire a été résolue, cette équation met en jeu deux paramètres qui sont :

- le coefficient de diffusion de CO₂ obtenu par l'observation de changement de porosité en cherchant à approcher au mieux à la réalité.
- Le taux de carbonatation qui constitue véritablement un « paramètre-clé » en ce sens où'il permet la détermination de la quantité de carbonates de calcium produits à une concentration de CO₂ donnée.

La validation du modèle proposé a été effectuée en comparant les profondeurs théoriques avec celles mesurées dans l'essai de la carbonatation accélérée. Une certaine corrélation modèle- expérience a été constatée, et l'écart entre les deux résultats varie de 1.24% à 18 %. Néanmoins, la confrontation indique que des valeurs de profondeur de carbonatation données par le modèle sont surestimées. Il semble que la variation de l'humidité relative soit discutable.

En fin, nous envisageons de tenir compte de la variation de l'hygrothermie de l'ambiance d'exposition. La simulation de cycles de variation de la température et de l'humidité est une étape très impérative pour la détermination de la quantité de CO₂ répandant dans le matériau cimentaire.

Cette simulation passe d'abord par l'exploitation de données météorologiques, même si les plages de variations de la température en conditions atmosphériques restent limitées.

II- RECOMMANDATIONS POUR FUTURS TRAVAUX

Cette étude sur la carbonatation du matériau cimentaire ne peut qu'être préliminaire et d'autres points doivent être étudiés. En effet nous proposons ici quelques idées pour les futurs travaux de recherche :

- étude approfondie de la contribution des paramètres environ mentaux sur l'évolution du phénomène de la carbonatation.
- Etude expérimentale (carbonatation accélérée) sur la durabilité des bétons avec ajouts, particulièrement béton au calcaire, vis-à-vis de la carbonatation.
- Une modélisation complète du problème de carbonatation (la modélisation tient compte les différents mécanismes de transport, la variation de la température et l'humidité relative, ainsi que le couplage entre les différents champs).
- Une étude statique qui gouverne tous les ouvrages Algériens sinistrés par le problème de la carbonatation afin d'estimer les zones les plus touchées, et d'effectuer une carte de zonage qui divise les régions sur la base de ces agressivités carboniques.
- Etablir un annexe global propre à l'Algérie qui aide les ingénieurs de fixer l'épaisseur de béton d'enrobage en fonction de la zone d'implantation, et faire un choix de formulation qui tient compte l'effet de la carbonatation. Cet annexe est rédigée sur la base des études citées précédemment.

Annexe 1

Mesurer la corrosion de l'armature du béton à l'aide de relevés de potentiel par demi-pile

La façon la plus simple d'évaluer le degré de corrosion de l'acier est de mesurer son potentiel de corrosion car celui-ci du point de vue quantitatif, étroitement lié au premier. Pour ce faire, on peut mesurer la différence de potentiel entre une demi-pile portable ordinaire, normalement constituée d'une électrode de référence cuivre-sulfate de cuivre (Cu/CuSO_4) placée à la surface du béton, et l'armature d'acier située en dessous.

Les éléments de base de cette méthode, appelée (relevé de potentiel par demi-pile), sont illustrés à la Figure 1.

L'électrode de référence est branchée à la borne positive du voltmètre et l'acier d'armature, à la borne négative.

La confiance dans la fiabilité des relevés de potentiel par demi-pile pour évaluer le potentiel de corrosion a été renforcée par les résultats recueillis au fil des ans lors d'inspection visant à déterminer le degré de corrosion des tabliers de pont. Au cours des années 70, les chercheurs ont mis au point une méthode permettant de mesurer de façon empirique la probabilité relative d'activité de corrosion.

C'est sur cette méthode qu'est fondée la norme ASTM C876. Celle-ci définit des lignes directrices générales (voir tableau 1) servant à évaluer la corrosion de l'armature des ouvrages en béton

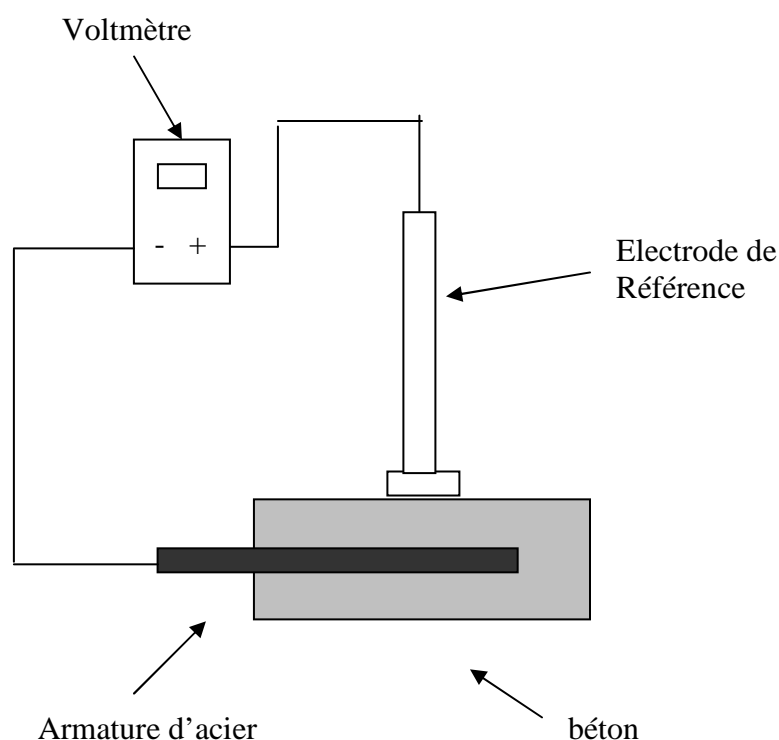
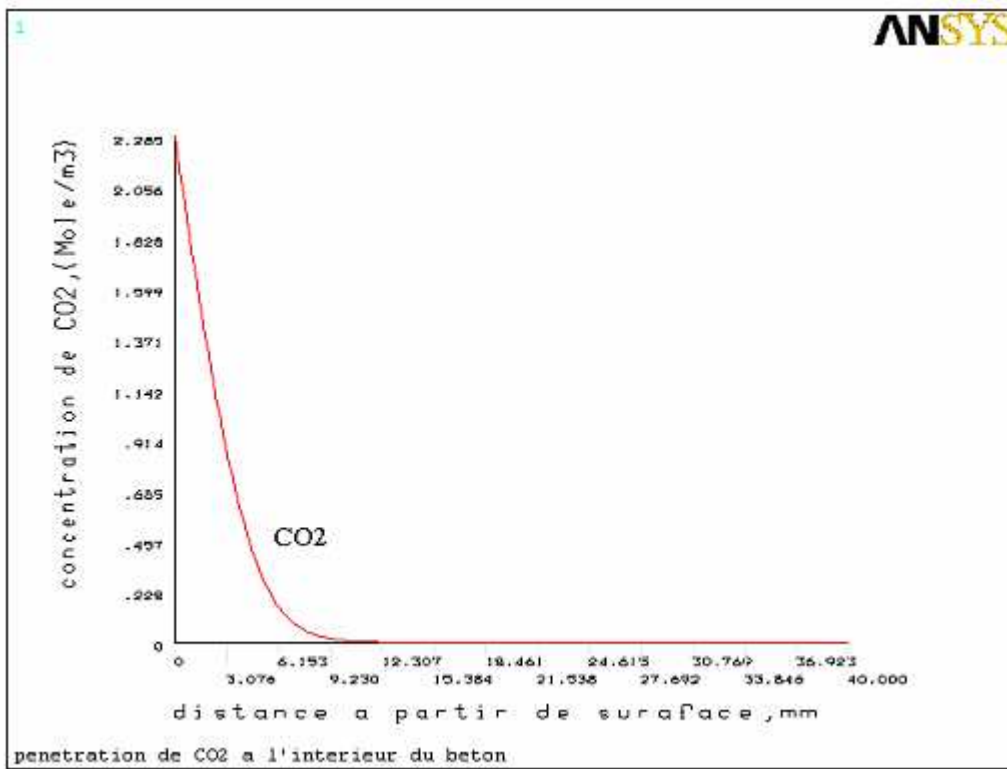


Figure 1 Schéma de principe de la technique du relevé de potentiel par demi-pile

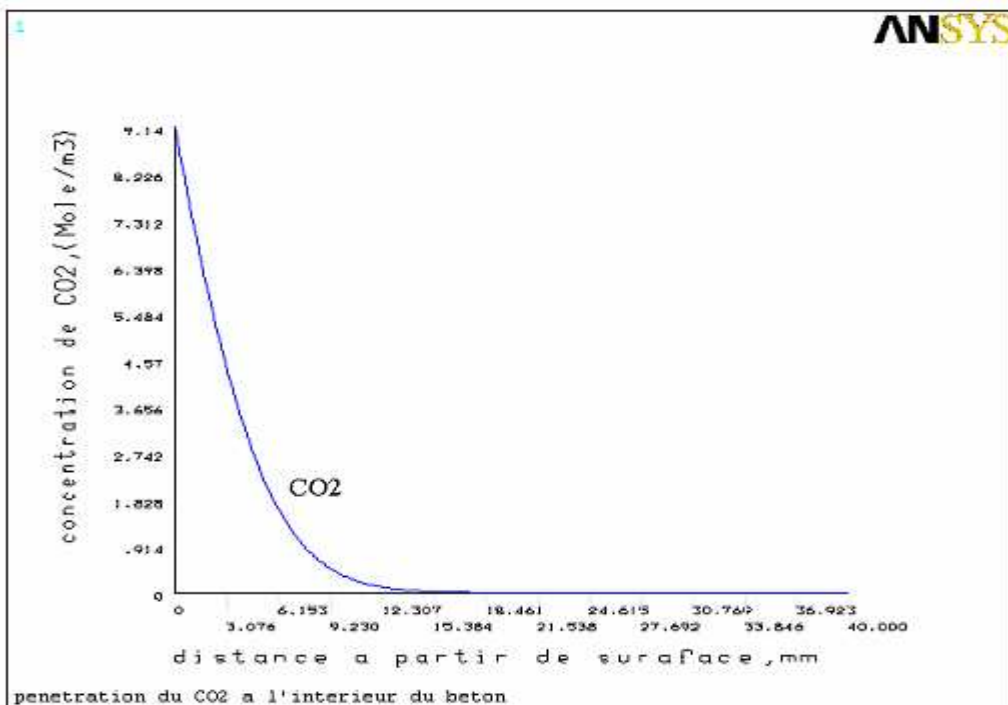
Relevé de potentiel par demi-pile Cu/CuSO₄	Activité de corrosion
Valeur négative inférieure à - 0.2 V	90 % de probabilité d'absence de corrosion
Valeur située entre - 0.2 V et -0.35 V	Plus grande probabilité de corrosion
Valeur négative supérieure à - 0.35V	90 % de probabilité de corrosion

Tableau 1 Probabilité de corrosion d'après les relevés de potentiel par demi-pile

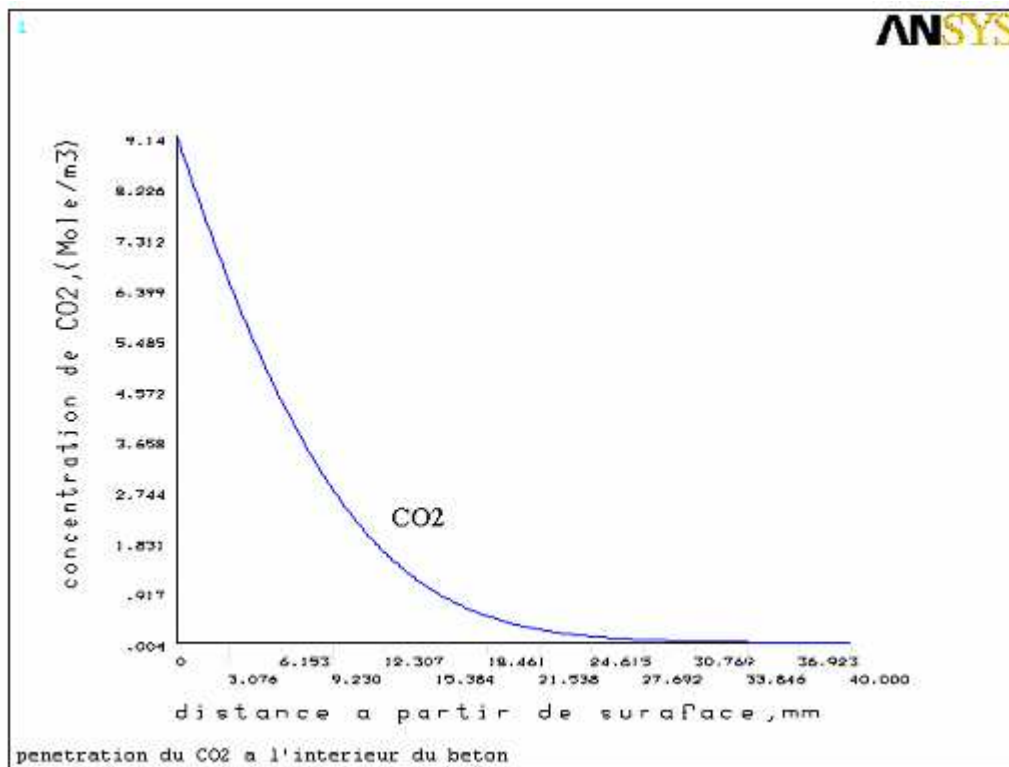
Annexe 3



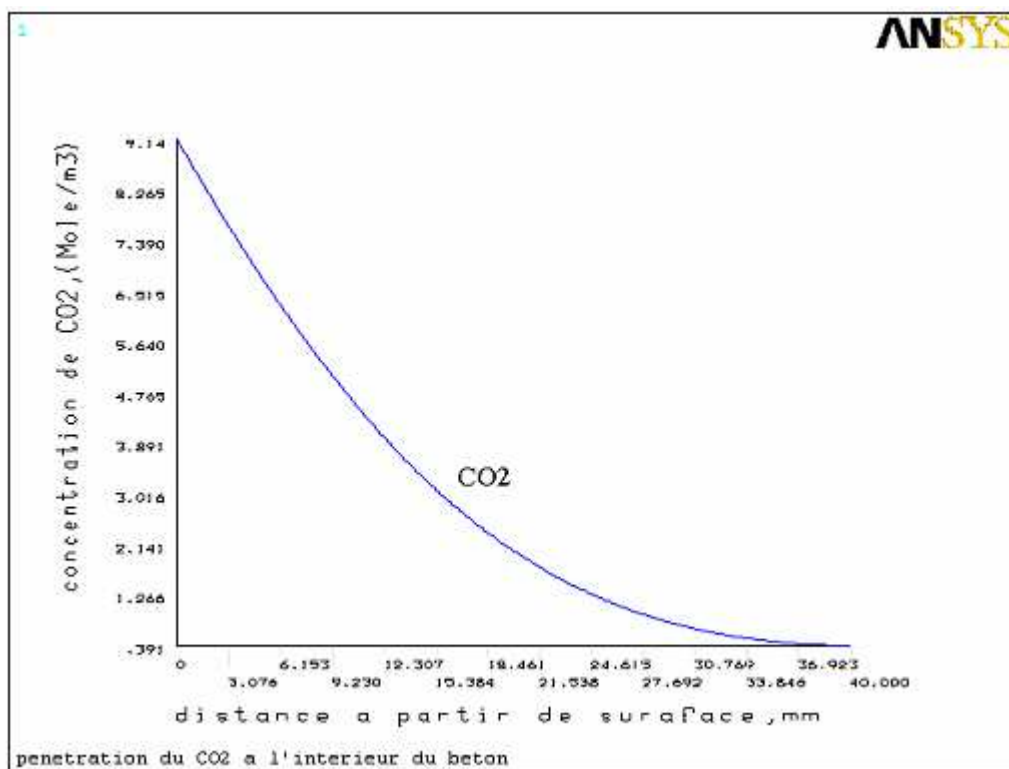
La variation de concentration de CO₂ en fonction de la profondeur
 Pour 3 jours (cas du béton A, et 20% de CO₂)



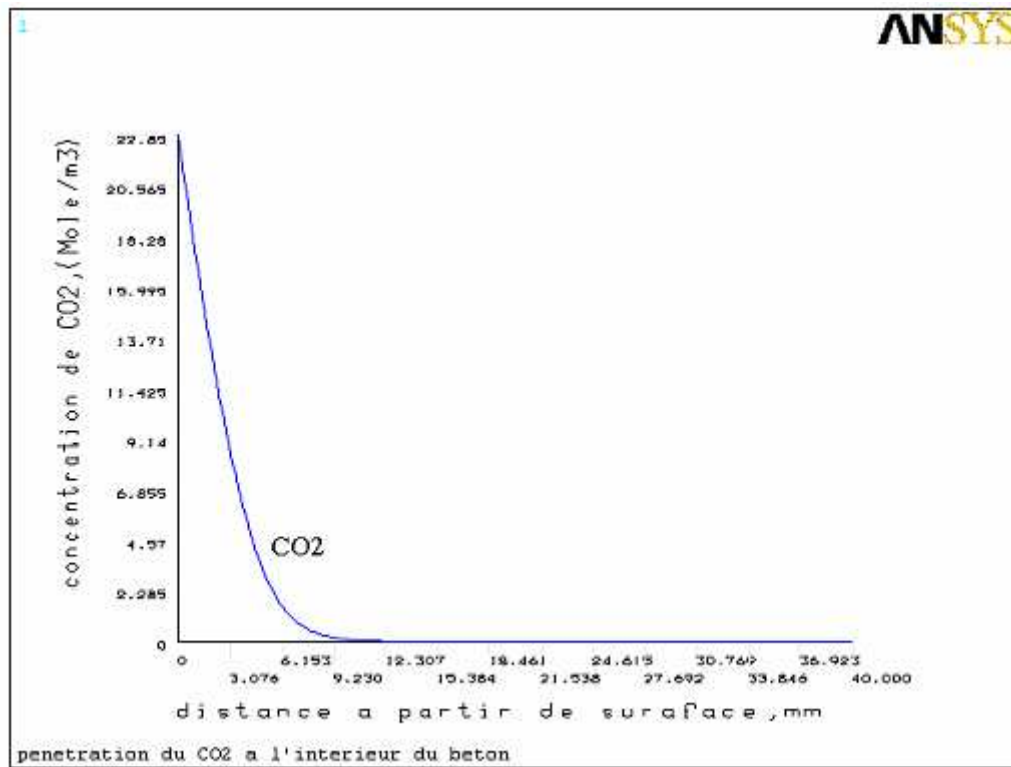
La variation de concentration de CO₂ en fonction de la profondeur
 Pour 7 jours (cas du béton A, et 20% de CO₂)



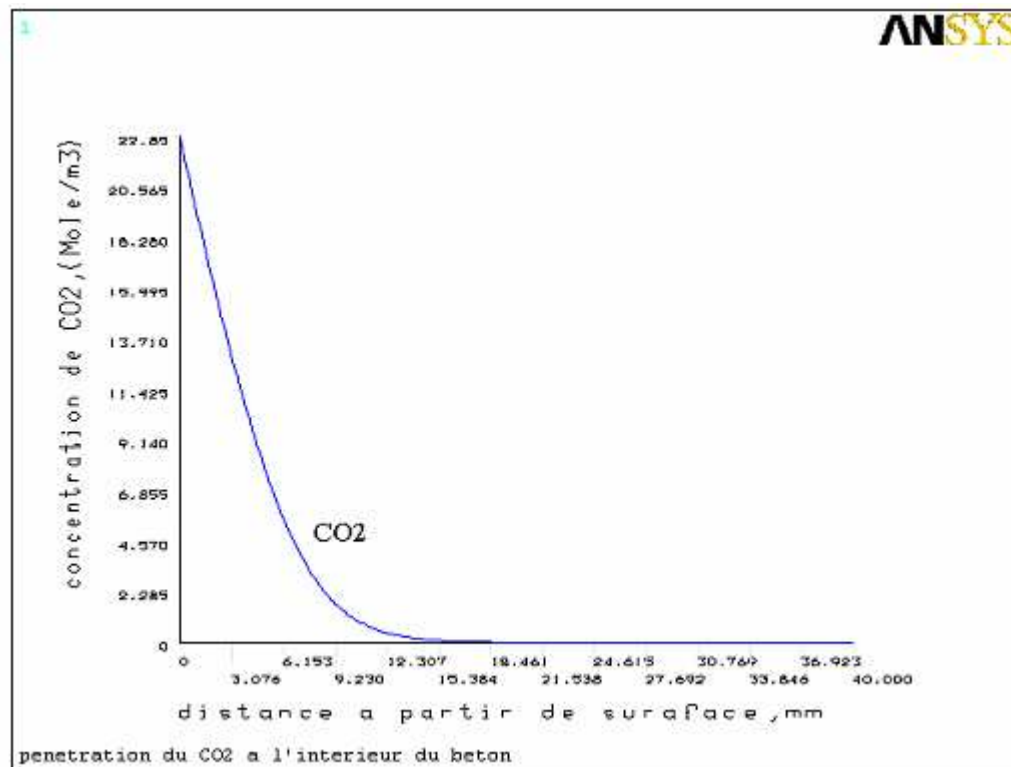
La variation de concentration de CO₂ en fonction de la profondeur
Pour 28 jours (cas du béton A, et 20% de CO₂)



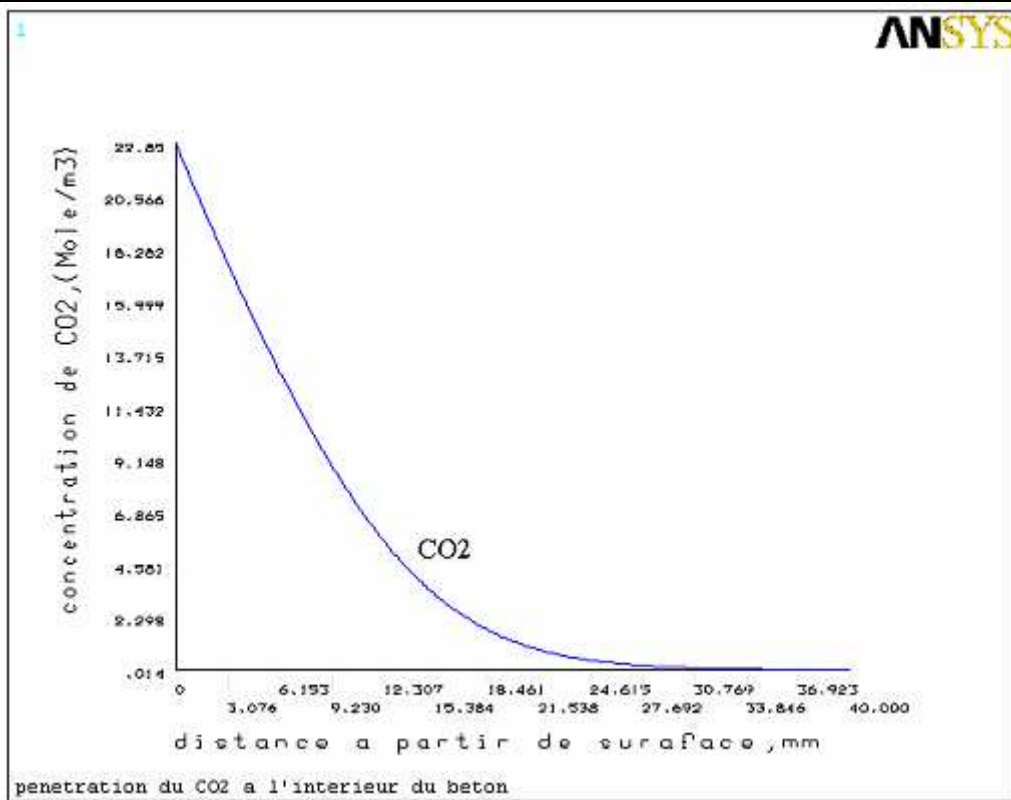
La variation de concentration de CO₂ en fonction de la profondeur
Pour 90 jours (cas du béton A, et 20% de CO₂)



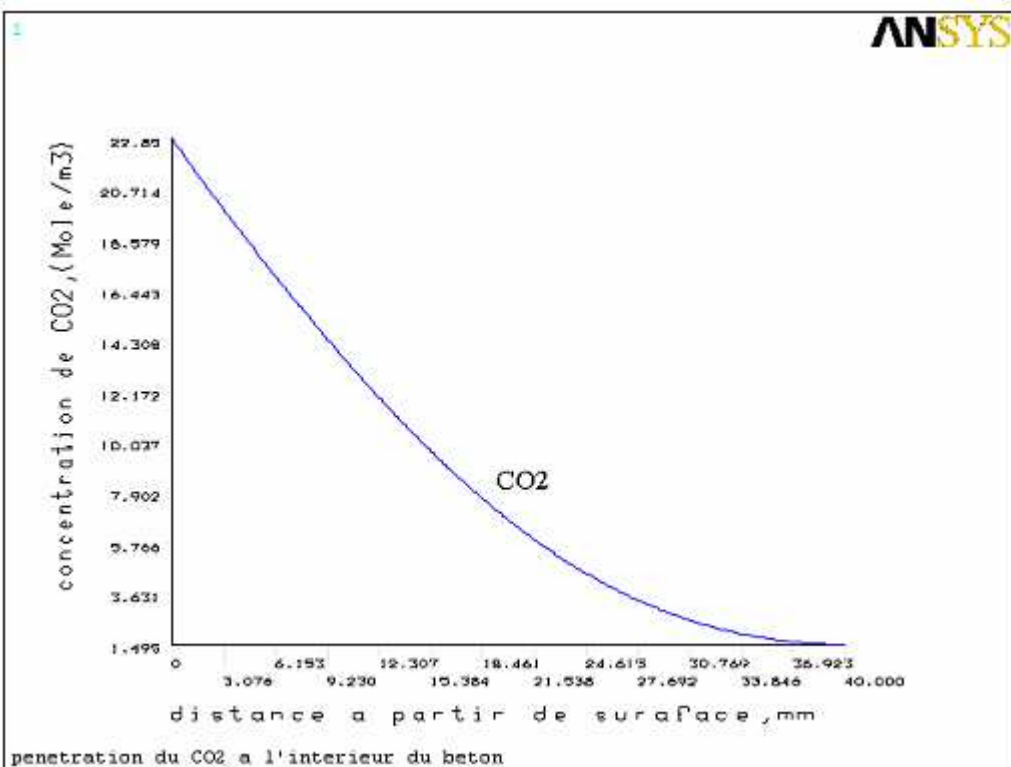
La variation de concentration de CO₂ en fonction de la profondeur Pour 3 jours (cas du béton A, et 50% de CO₂)



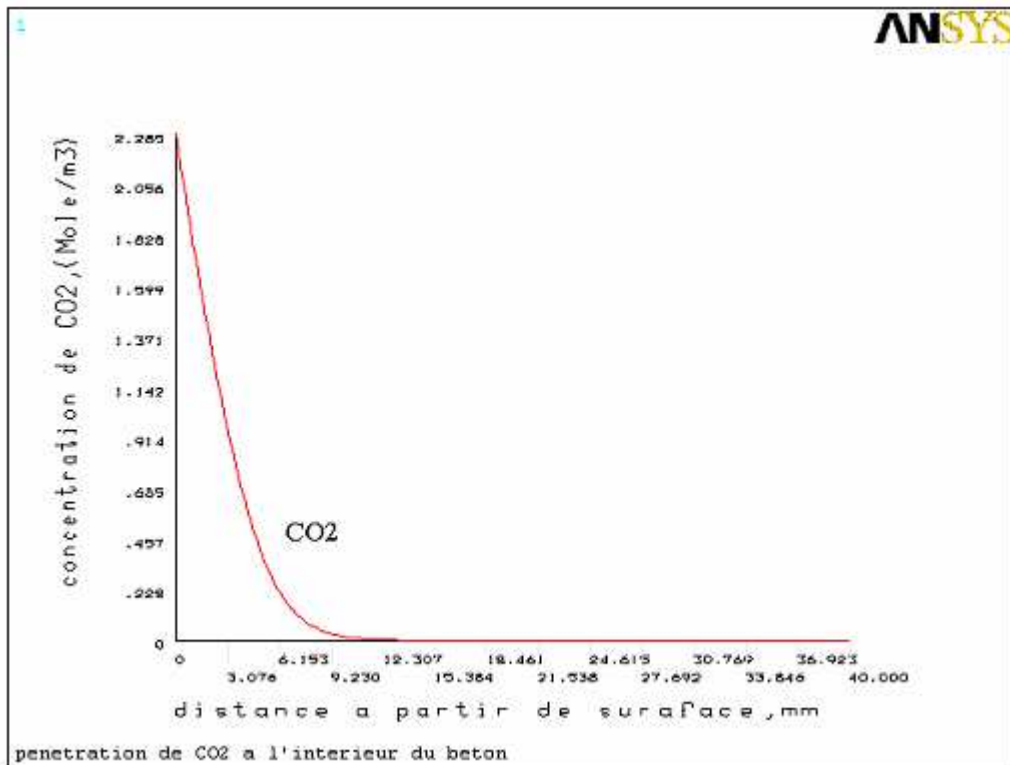
La variation de concentration de CO₂ en fonction de la profondeur Pour 7 jours (cas du béton A, et 50% de CO₂)



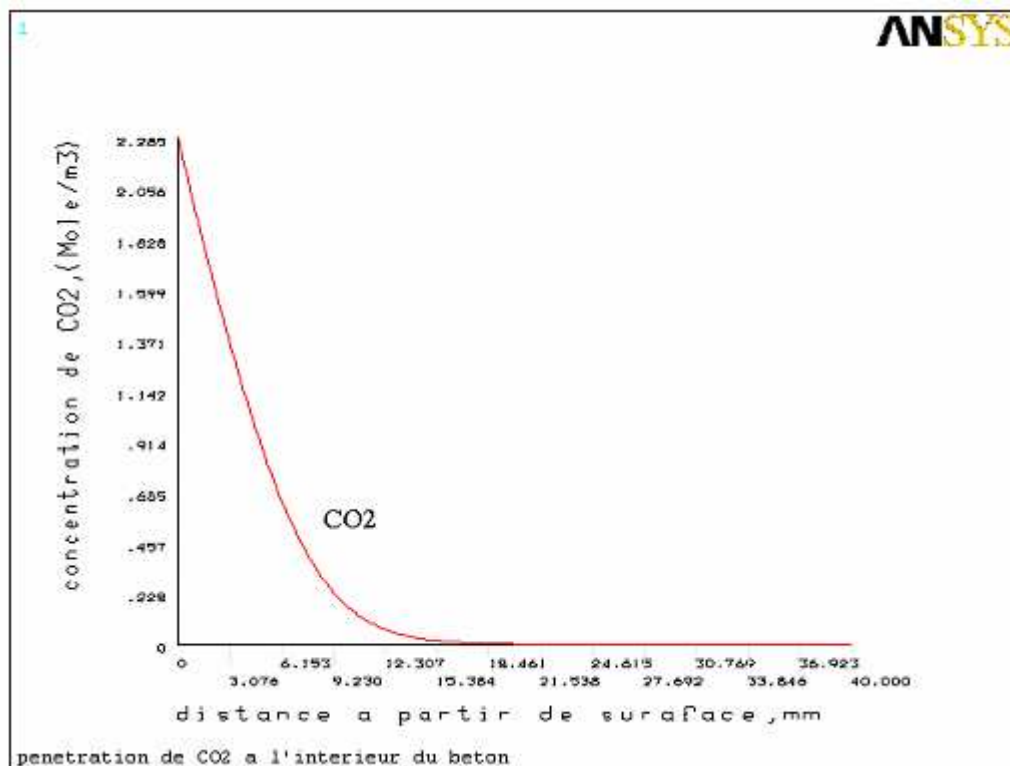
La variation de concentration de CO₂ en fonction de la profondeur Pour 28 jours (cas du béton A, et 50% de CO₂)



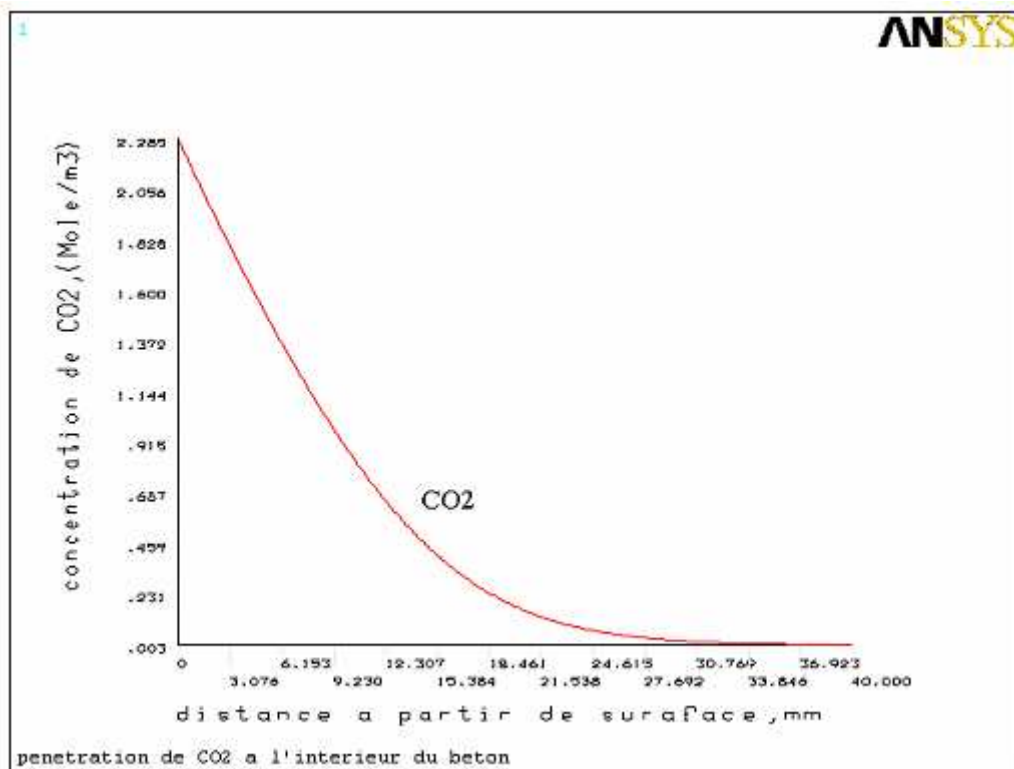
La variation de concentration de CO₂ en fonction de la profondeur Pour 90 jours (cas du béton A, et 50% de CO₂)



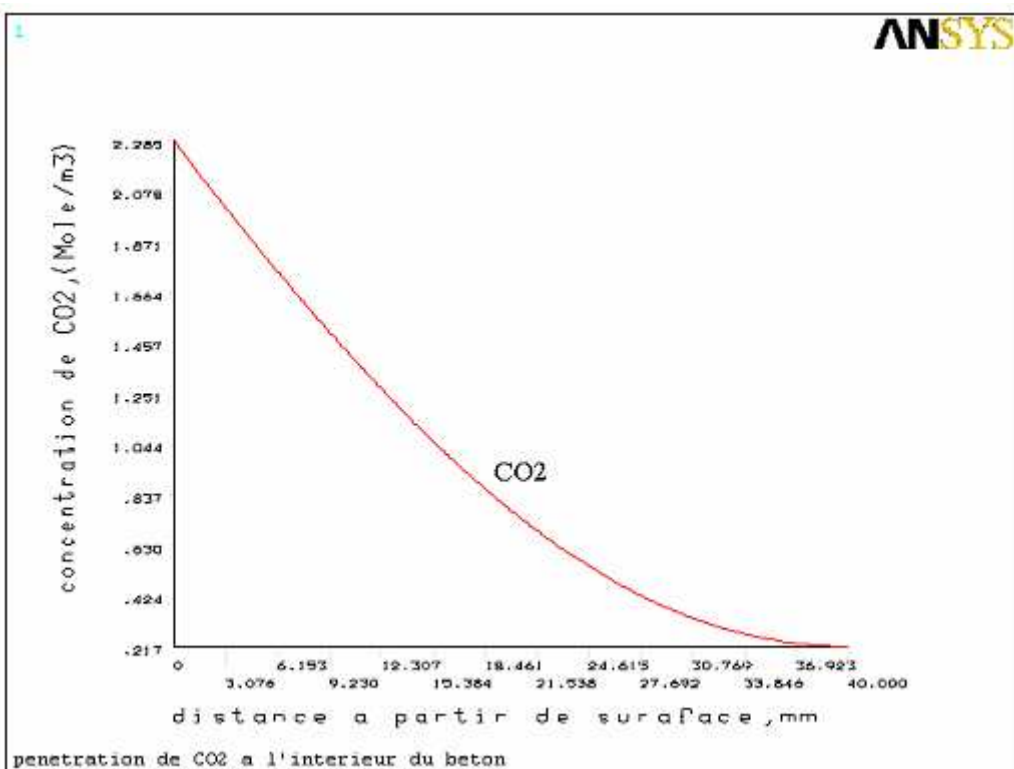
La variation de concentration de CO₂ en fonction de la profondeur
Pour 3 jours (cas du béton B, et 5% de CO₂)



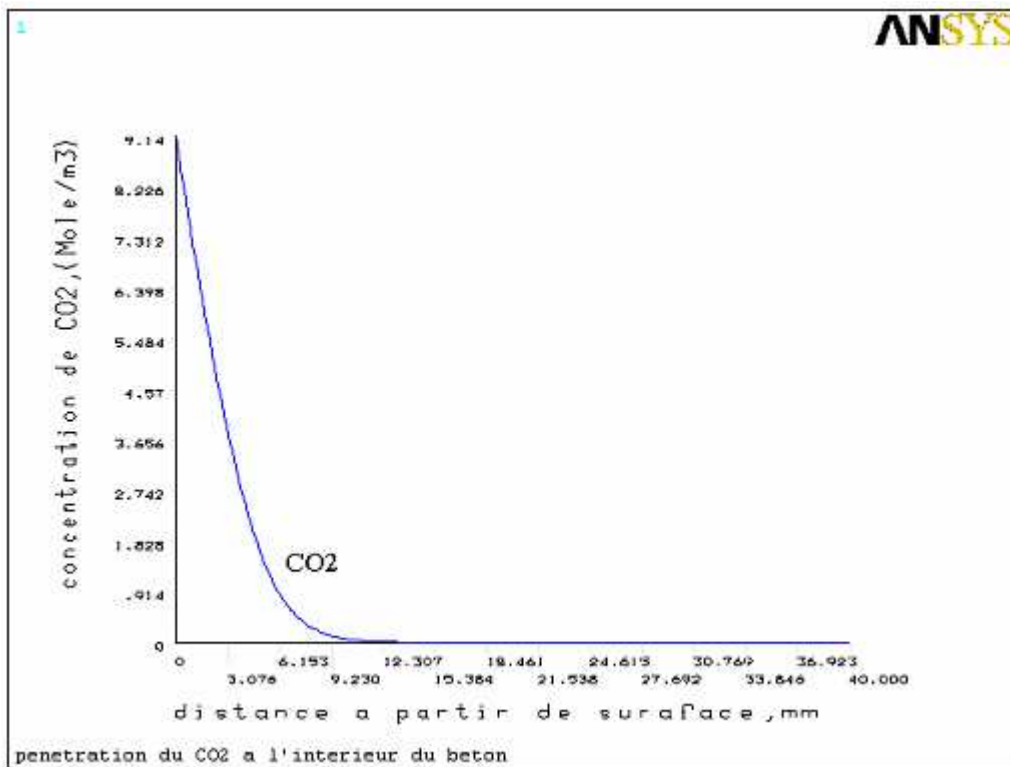
La variation de concentration de CO₂ en fonction de la profondeur
Pour 7 jours (cas du béton B, et 5% de CO₂)



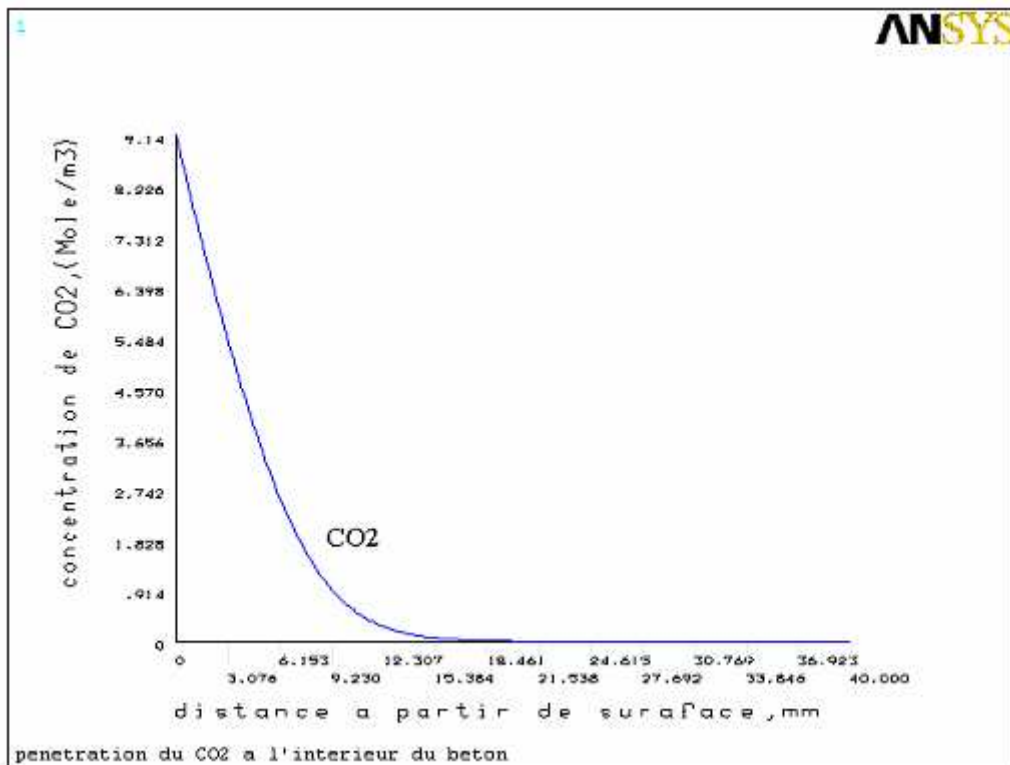
La variation de concentration de CO₂ en fonction de la profondeur
Pour 28 jours (cas du béton B, et 5% de CO₂)



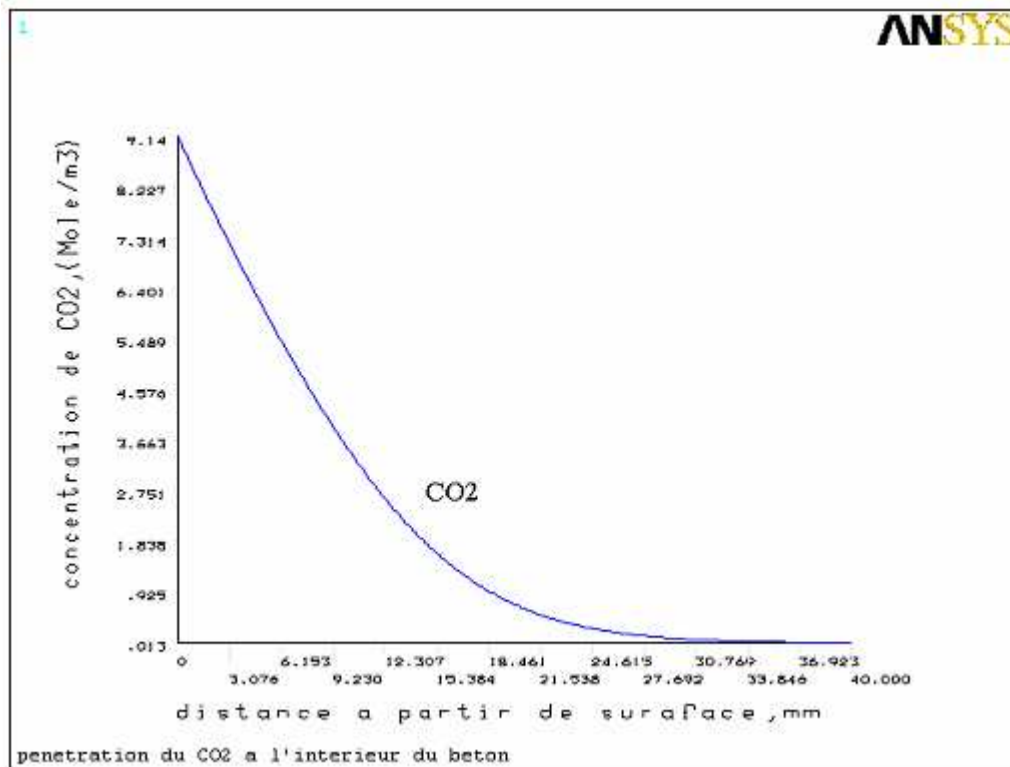
La variation de concentration de CO₂ en fonction de la profondeur
Pour 90 jours (cas du béton B, et 5% de CO₂)



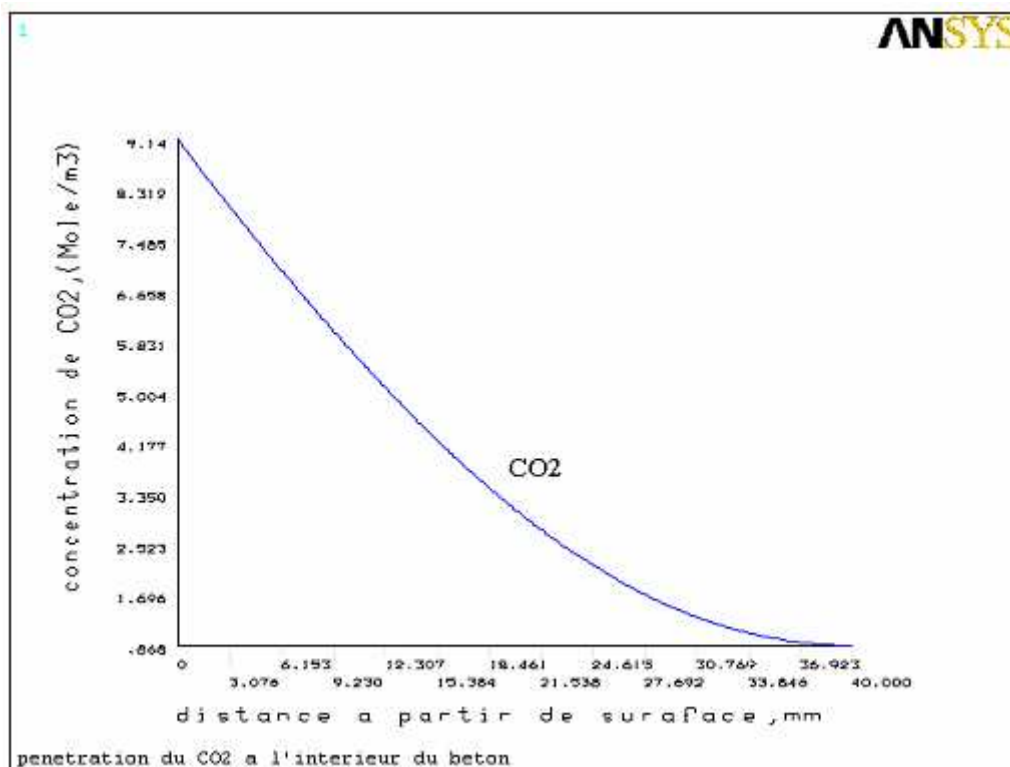
La variation de concentration de CO₂ en fonction de la profondeur
Pour 3 jours (cas du béton B, et 20% de CO₂)



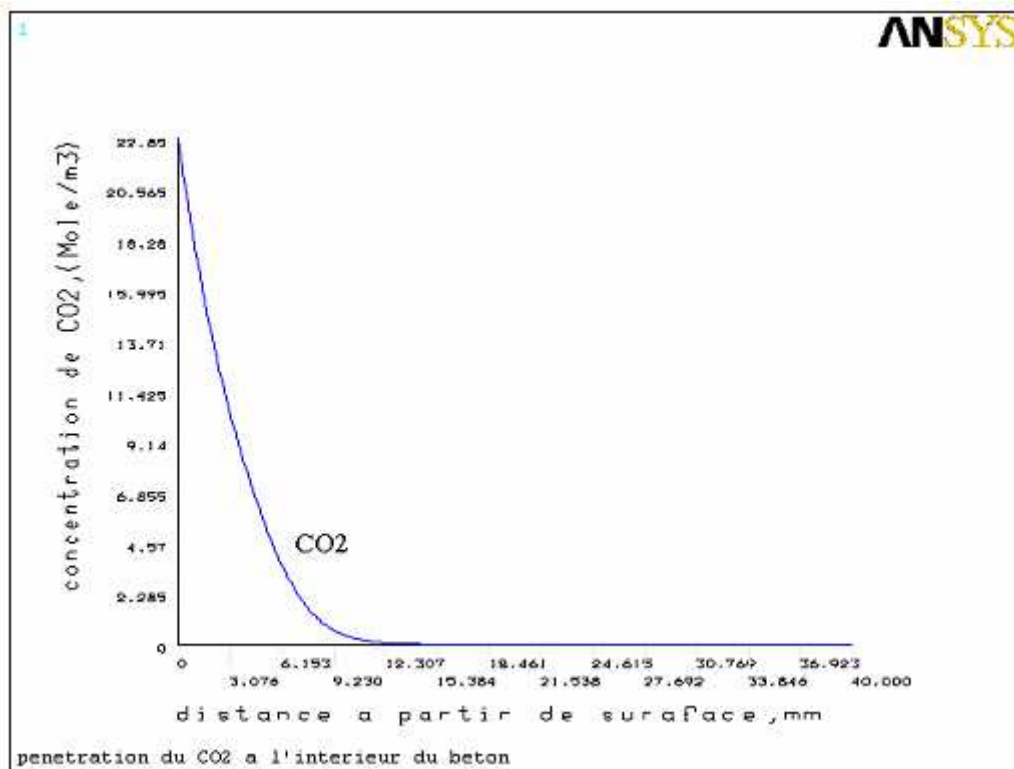
La variation de concentration de CO₂ en fonction de la profondeur
Pour 7 jours (cas du béton B, et 20% de CO₂)



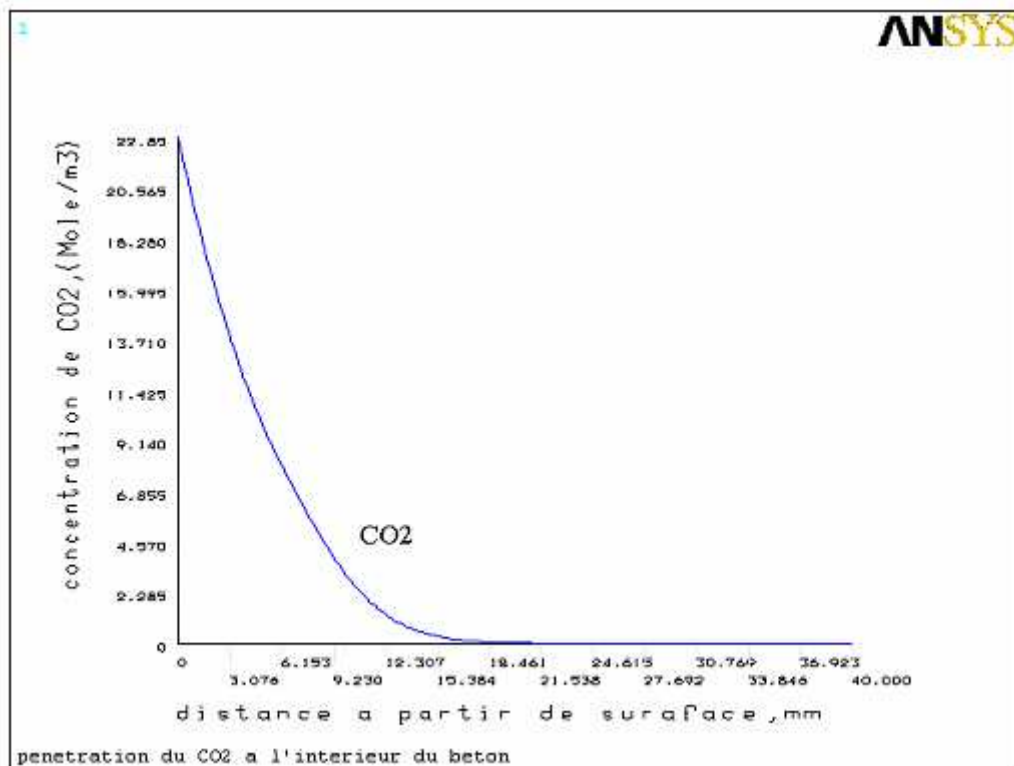
La variation de concentration de CO₂ en fonction de la profondeur
Pour 28 jours (cas du béton B, et 20% de CO₂)



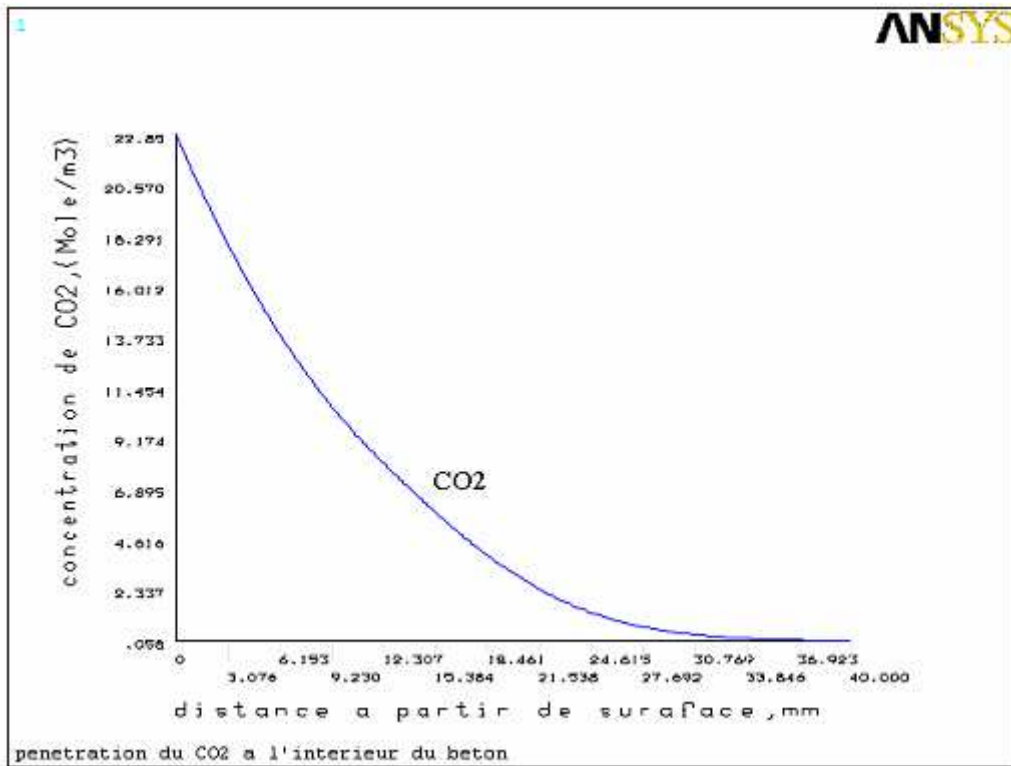
La variation de concentration de CO₂ en fonction de la profondeur
Pour 90 jours (cas du béton B, et 20% de CO₂)



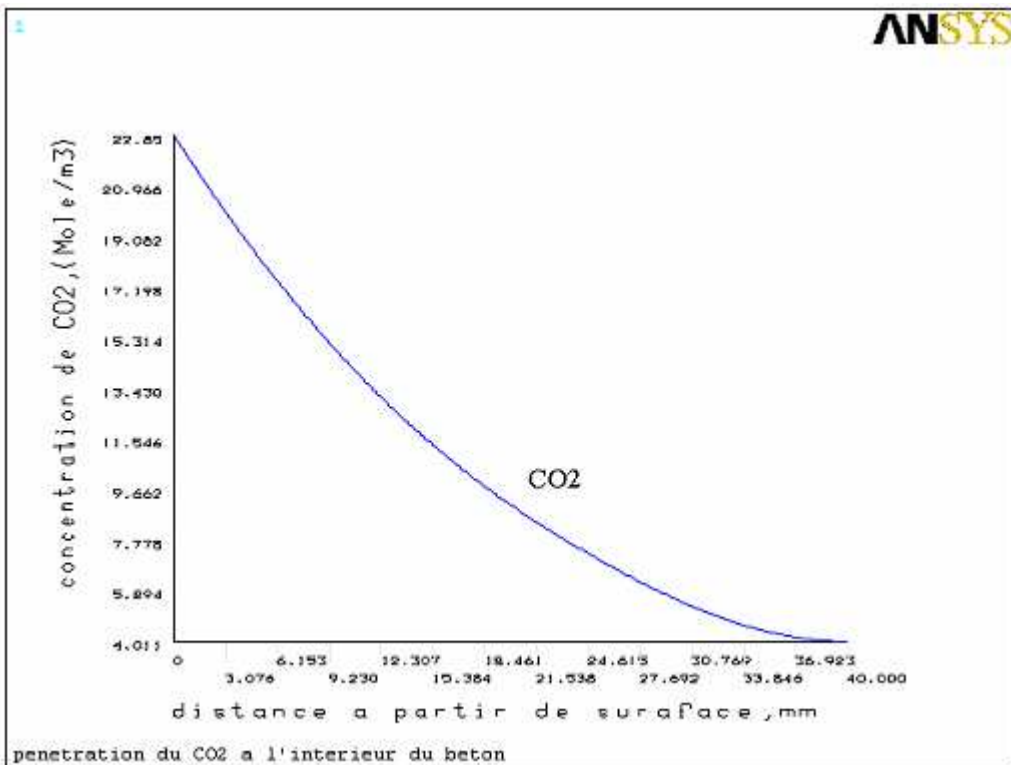
La variation de concentration de CO₂ en fonction de la profondeur
Pour 3 jours (cas du béton B, et 50% de CO₂)



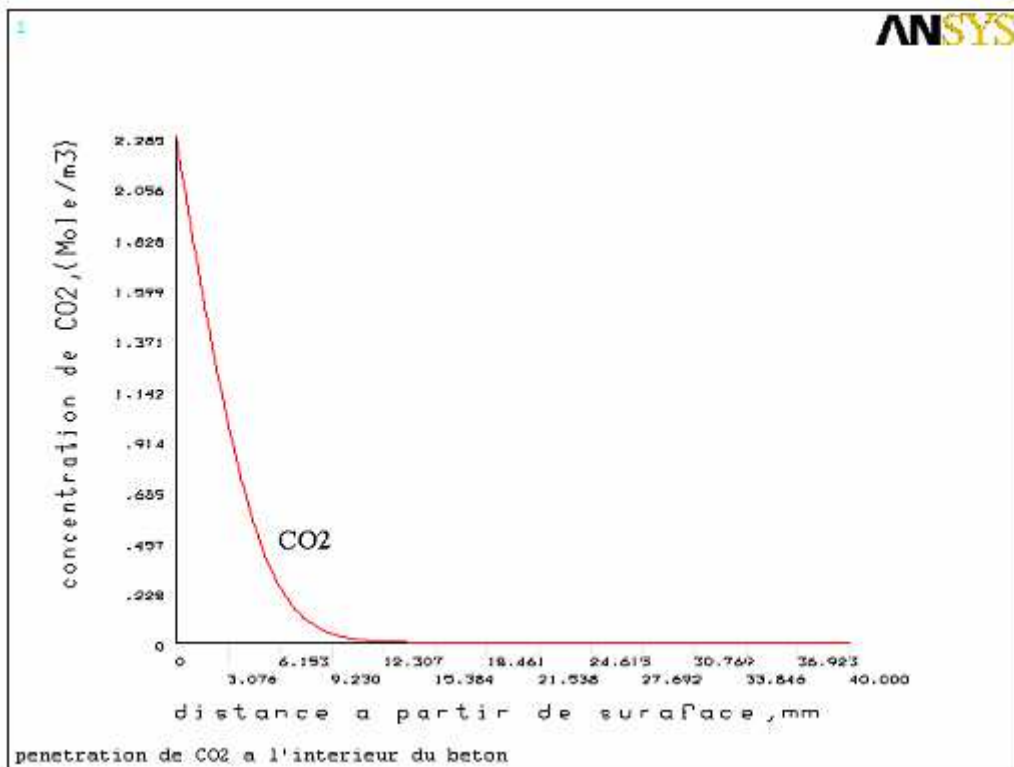
La variation de concentration de CO₂ en fonction de la profondeur
Pour 7 jours (cas du béton B, et 50% de CO₂)



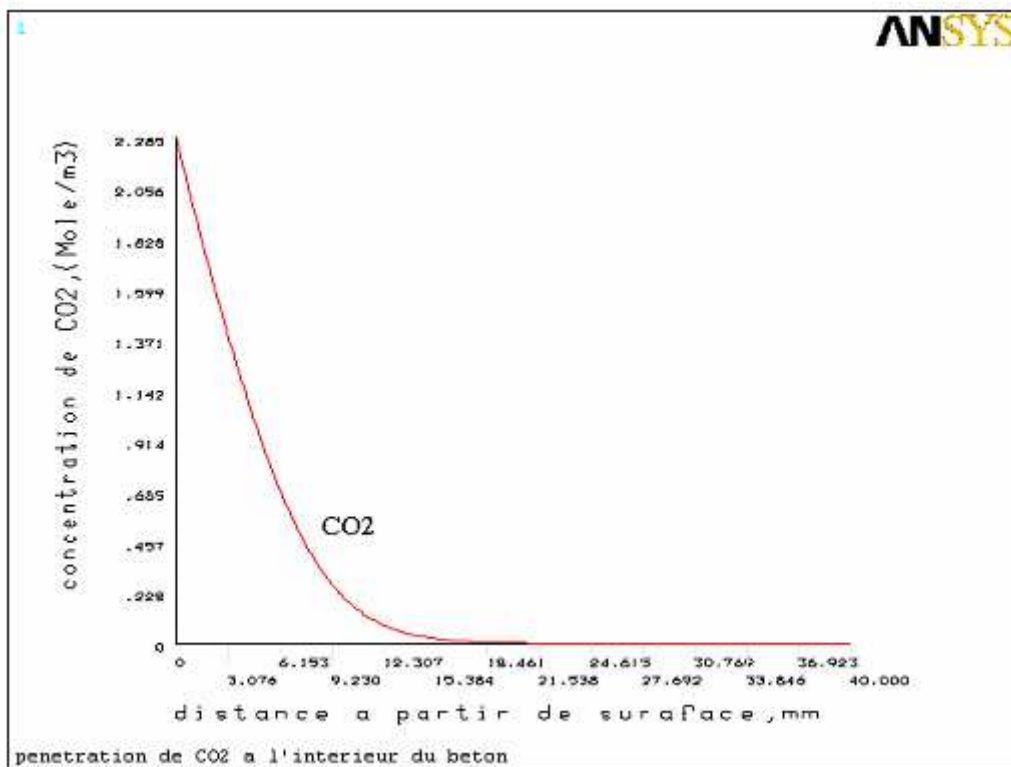
La variation de concentration de CO₂ en fonction de la profondeur
Pour 28 jours (cas du béton B, et 50% de CO₂)



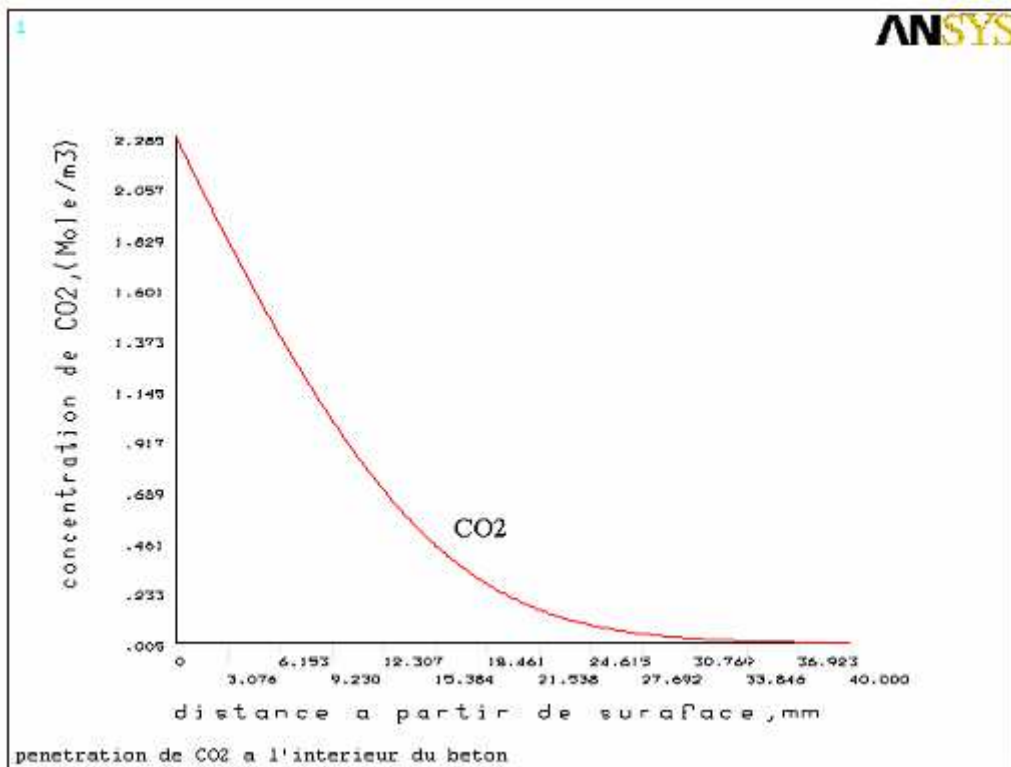
La variation de concentration de CO₂ en fonction de la profondeur
Pour 90 jours (cas du béton B, et 50% de CO₂)



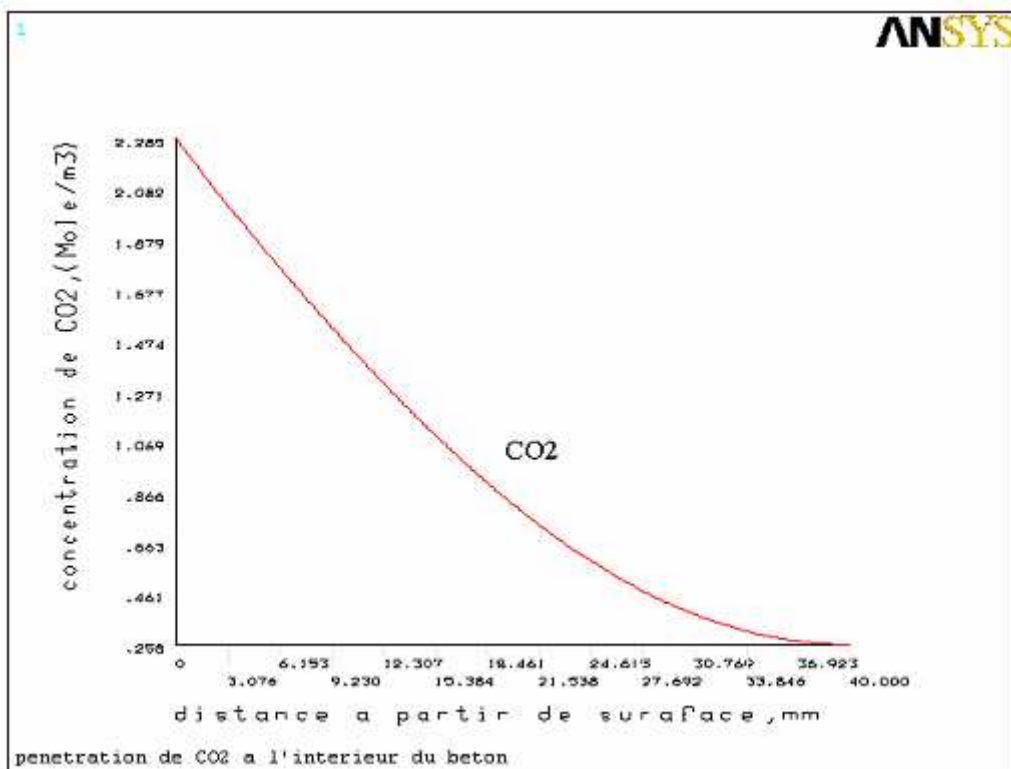
La variation de concentration de CO₂ en fonction de la profondeur
Pour 3 jours (cas du béton C, et 5% de CO₂)



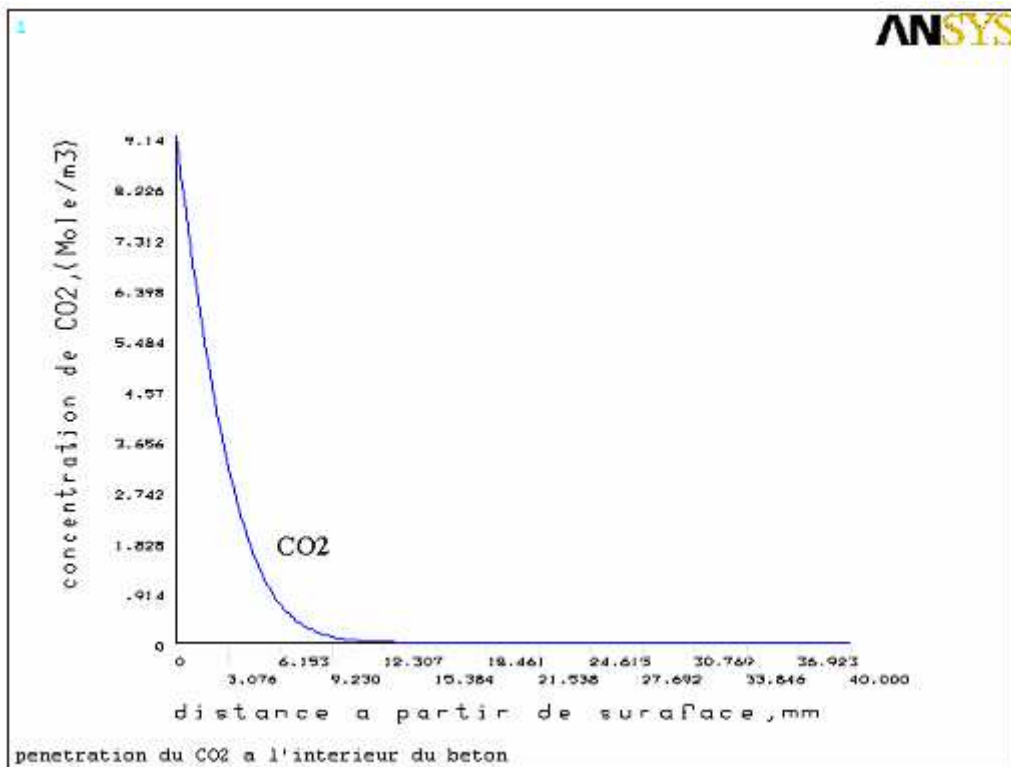
La variation de concentration de CO₂ en fonction de la profondeur
Pour 7 jours (cas du béton C, et 5% de CO₂)



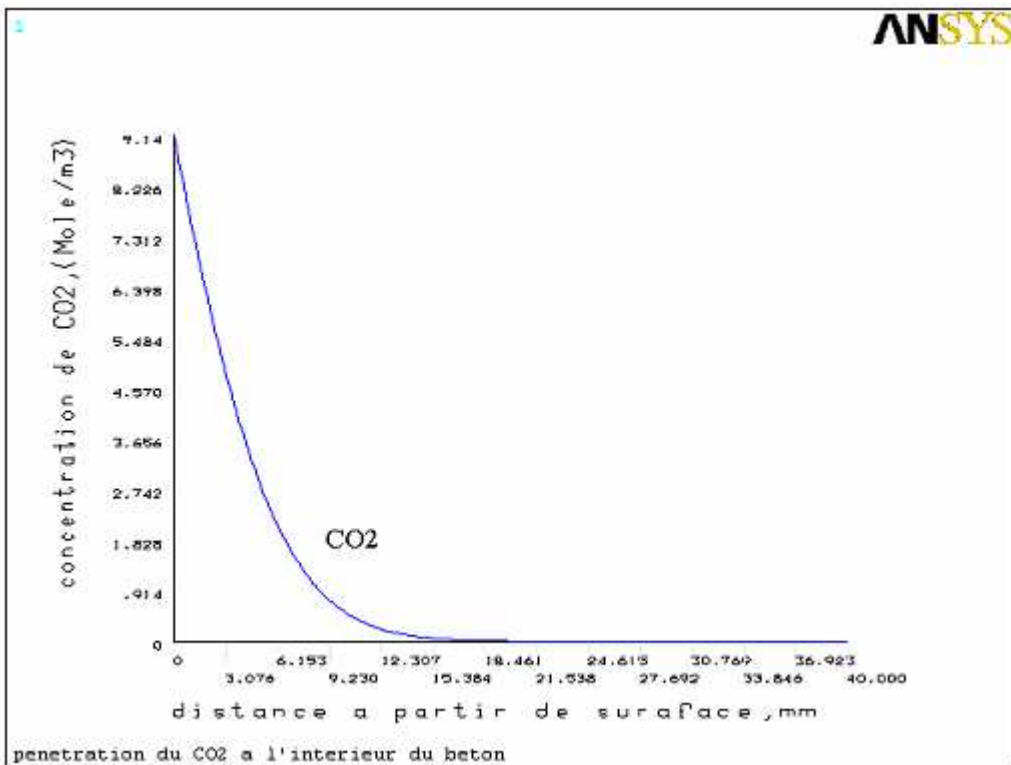
La variation de concentration de CO₂ en fonction de la profondeur
Pour 28 jours (cas du béton C, et 5% de CO₂)



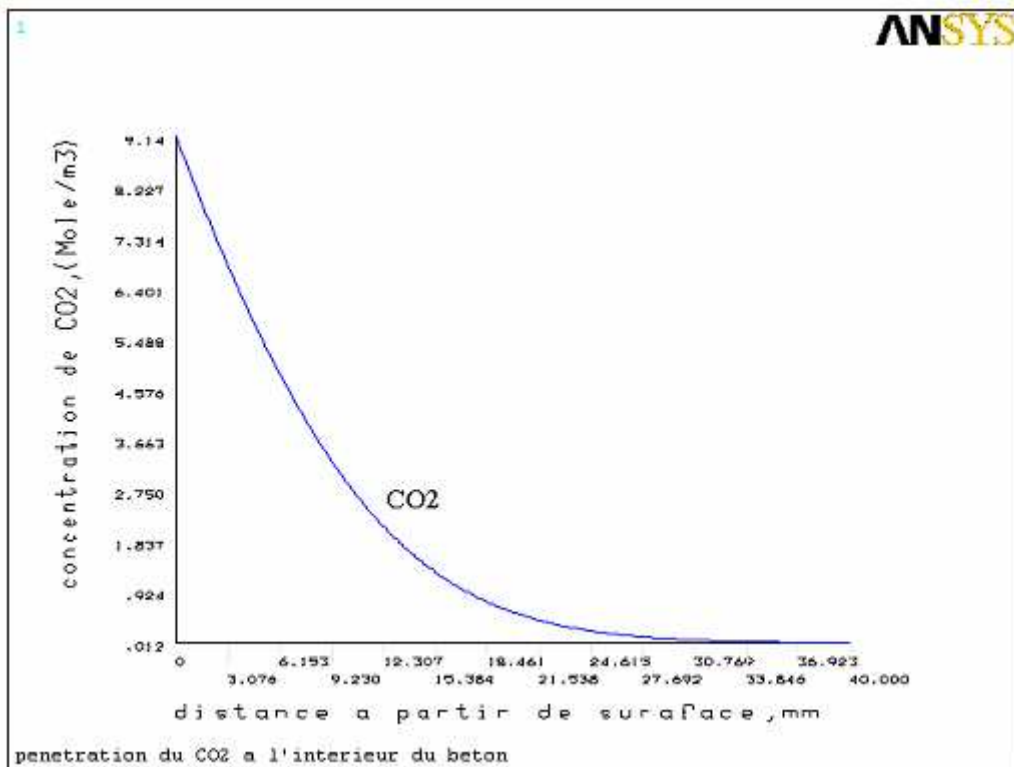
La variation de concentration de CO₂ en fonction de la profondeur
Pour 90 jours (cas du béton C, et 5% de CO₂)



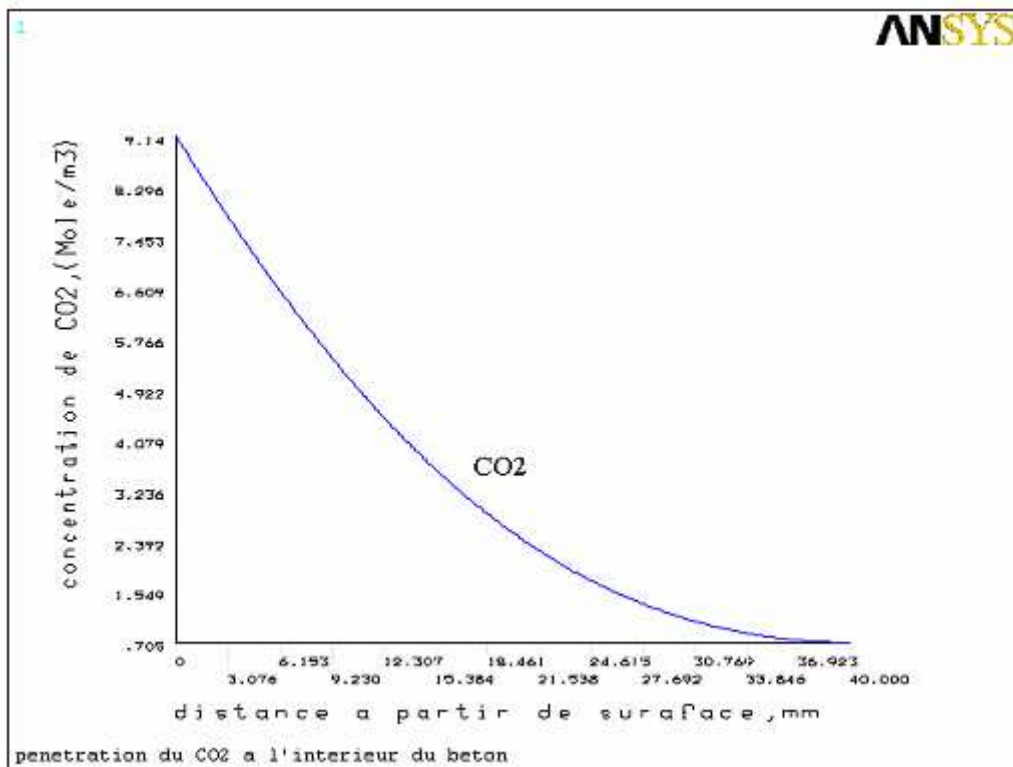
La variation de concentration de CO₂ en fonction de la profondeur
Pour 3 jours (cas du béton C, et 20% de CO₂)



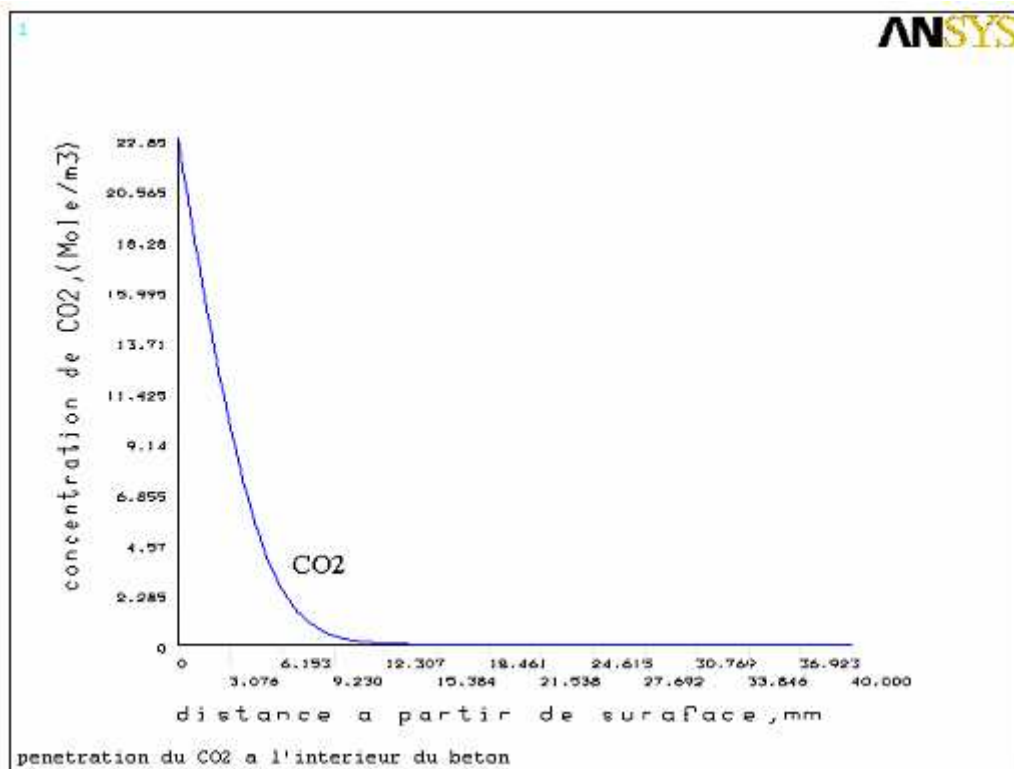
La variation de concentration de CO₂ en fonction de la profondeur
Pour 7 jours (cas du béton C, et 20% de CO₂)



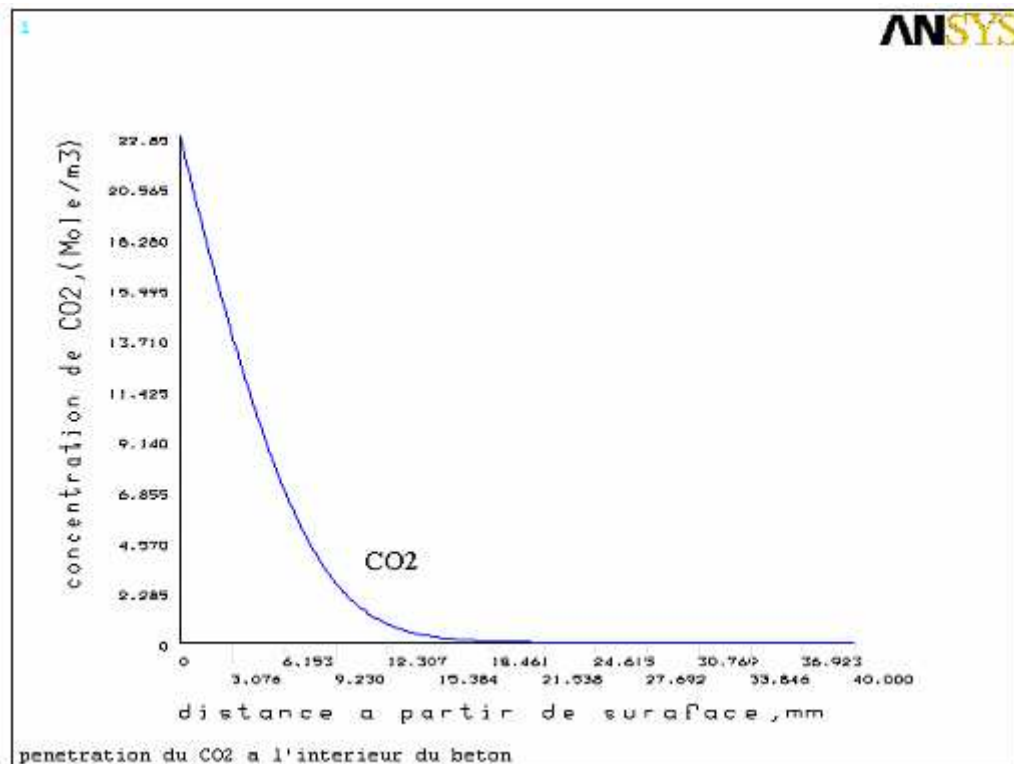
La variation de concentration de CO₂ en fonction de la profondeur
Pour 28 jours (cas du béton C, et 20% de CO₂)



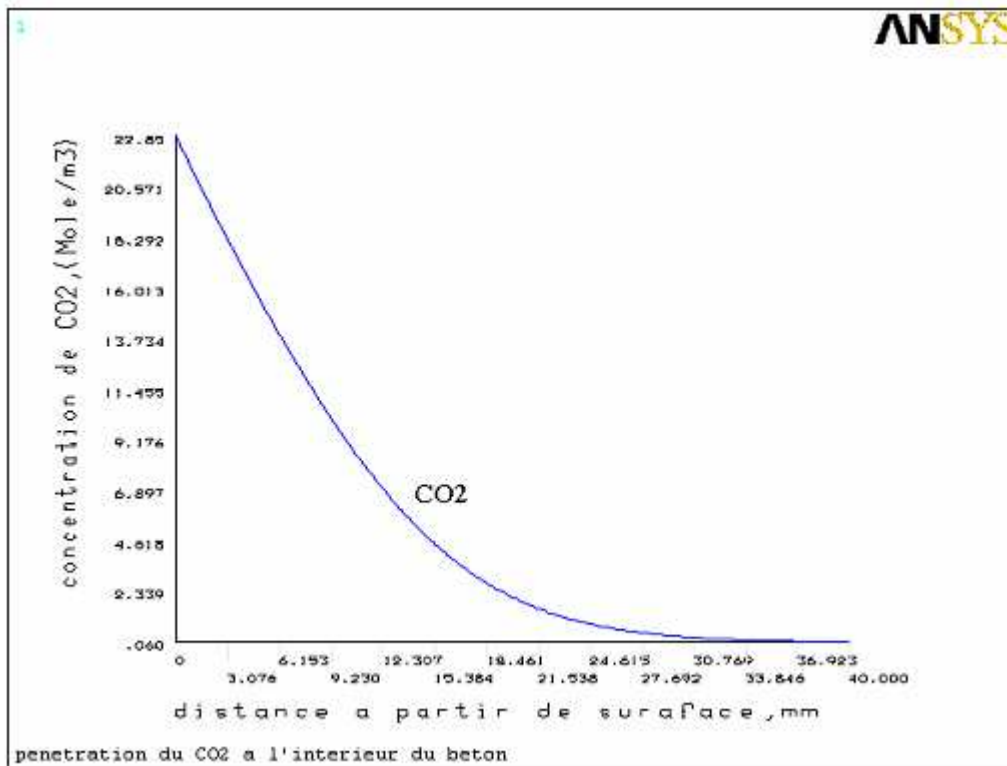
La variation de concentration de CO₂ en fonction de la profondeur
Pour 90 jours (cas du béton C, et 20% de CO₂)



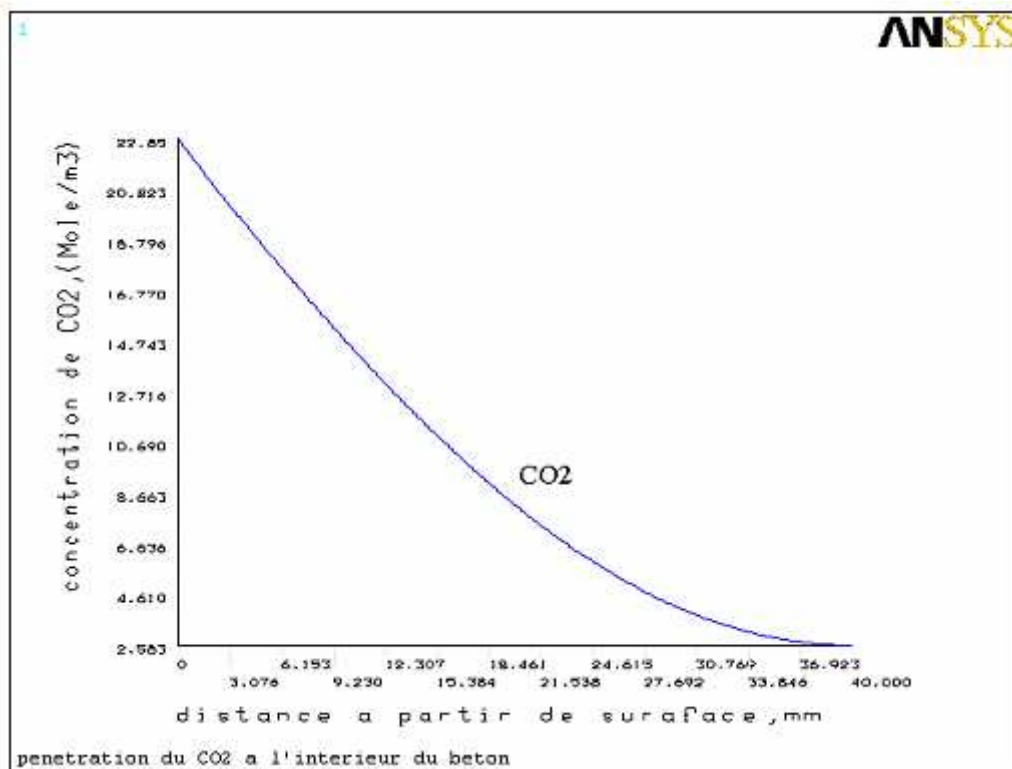
La variation de concentration de CO₂ en fonction de la profondeur
Pour 3 jours (cas du béton C, et 50% de CO₂)



La variation de concentration de CO₂ en fonction de la profondeur
Pour 7 jours (cas du béton C, et 50% de CO₂)



La variation de concentration de CO₂ en fonction de la profondeur
Pour 28 jours (cas du béton C, et 50% de CO₂)



La variation de concentration de CO₂ en fonction de la profondeur
Pour 90 jours (cas du béton C, et 50% de CO₂)

Annexe 2

RÉFÉRENCE BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **J. Xiao, J.Li, B.Zhur, F.Ziyan** : Experimental study on strength and ductility of carbonated concrete elements; construction and building materials; volume 16; issue 3 avril 2002; pages 187-192
- [2] **C.Geraid** : La carbonatation du béton armé, ST technical facilities management (ST/TFM), CERN, Genève suisse.
- [3] **John P Broomfield** : Carbonation and its effects in reinforced concrete; materials performance; juin 2000,39,1; Proquest Science journals; pg 64
- [4] **Gané R.R** : cours de durabilité et réparation du béton « GCT-714 », chapitre2 : la durabilité du béton ; université Sherbooke ; Canada ; 2002, ; PP32.
- [5] **K. AIT Mokhtar** : Etude comparative vis-à-vis de la carbonatation de matériaux cimentaires à base de ciment portland et de ciment aux cendres, université de la Rochelle, France.
- [6] **J.Baron, J-Ollivier** : Les bétons bases et données pour leur formulation ; Eyrolles ; février 1999.
- [7] : **André RAHARINAIVO et al** : La corrosion et la protection des aciers dans le béton ; école nationale des ponts et chaussées ; septembre 1998.
- [8] **P.Mommer et E.Dondonne** : Dégradation de dalles de tablier de ponts en région Wallonne, étude d'une pathologie complexe.PH Demars Gramme- liège.
- [9] **A.Iracos** : Protection cathodique des ouvrages en béton armé anode en Zinc hydrogel # 4727 conçue par 3 MTM, revue technique, 3-2002, Luxembourg.
- [10] **Jiang Jhy Chang, Weichung Yeih, Ran Huang, Chun Tao Chen** : Suitability of several current used concrete durability indices on evaluating the corrosion hazard for carbonated concrete; materials chemistry and physics; volume 84; issue 5; mars 2004; pages 71-78
- [11] **Yves F. Houst, Folker H. Wittmann** : Depth profiles of carbonates formed during natural carbonation; cement and concrete research; volume 33; issue 1; janvier 2003; pages 147-154
- [12] **Brahma** : Microstructure et mécanique des matériaux ; cours de magister ; université de Blida ; 2003 (voir le professeur Brahma)
- [13] **G. Collett, N.J Crammonds, R.N Swamy, J.H Sharp** : The role of dioxide in the formation of thaumasite; cement and concrete research; volume 34; issue 9; septembre 2004; pages 1594-1612.

- [14] **M. Delmi** : Etude de l'hydratation et du couplage carbonatation -échanges hydriques dans les mortiers et bétons ; Thèse de doctorat ; université de la Rochelle ; décembre 2004.
- [15] **P.LE Bescop, F. Adenot, C. Galle, P. Lovera** : Dégradation des matériaux à base de liants hydrauliques en milieu saturé- application au comportement à long terme des colis « béton », CEA-DDC/DESD/SESD – CE Saclay et CE Cadarache, France.
- [16] **T. Bakharev, J.G Sanjayan, Y.B Cheng** : Resistance of alkali-activated slag concrete to carbonation; cement and concrete research; volume 3; issue 9; septembre 2001; pages 1277-1283.
- [17] **D.J Anstice, C.L Page, M.M Page** : The pore solution phase of carbonated cement pastes; cement and concrete research; in press; corrected page available on line 10 november 2004.
- [18] **Fumiaki Matsushita, Yoshimichi Aono, Sumio Shibata** : Carbonation degree of autoclaved aerated concrete; cement and concrete research; volume 30; issue 1; novembre 2000; pages 1741-1745.
- [19] **Jan Jerga** : Physico-mechanical properties of carbonated concrete; construction and building materials; volume 8; issue 9; novembre 2004; pages 661-667.
- [20] **Cengiz Duran Atis** : Accelerated carbonation and testing of concrete made with fly ash; construction and building materials; volume 17; issue 3; avril 2003; pages 147-152.
- [21] **Y.Lo, H.M. Lee** : Curing effects on carbonation of concrete using a phenolphthalein indicator and Fourier-transform infrared spectroscopy; building and environment; volume 37; issue 5; Mai 2002; pages 507-514.
- [22] **Miguel Angel Sanjuan** : Carbonation resistance of on industrial mortar used as a concrete coating; building and environment; volume 36; issue 8; octobre 2001; pages 949-953.
- [23] **S.Kanai** : Technologie du béton ; cours de magister ; université de Blida, 2003 (Voir le professeur Kanai).
- [24] **Fumiaki Matsushita, Yoshimichi Aono, Sumio Shibata** : Calcium silicate structure and carbonation shrinkage of a tobermorite-based material; cement and concrete research; volume 34; issue 7; juillet 2004; pages 1251-1257.
- [25] Durabilité, entretien, réparation et adaptation des infrastructures ; la vie scientifique et technique ; chapitre 2 ; pages 21-27.
- [26] **P.Castro, M.A.Sanjuan, J.Genesca** : Carbonation of concretes in the Mexican Gulf; building and environment; volume 35; issue 2; février 2000; pages 145-149.

- [27] **P.Castro, E.I.Moreno, J.Genesca** : Influence of marine micro-climats on carbonation of reinforced concrete; cement and concrete research; volume 30; issue 10; octobre 2000; pages 1565-1571.
- [28] **M.F Montemor, M.P Cunha, M.G.Ferreira, A.M.Simoes** : Corrosion behaviour of rebars in fly ash mortar exposed to carbon dioxide and chlorides; cement and concrete compsits; volume 24; issue 1; février 2002; pages 45-53.
- [29] **M.I.Khan, C.J.Lynsdale** : Strength, permeability, and carbonation of high-performance concrete; cement and concrete research; volume 32; issue 1; janvier 2002; pages 123-131.
- [30] **Vagelis.G. Papadakis** : Effect of supplementary cementing materials on concrete resistance againt carbonation and chloride ingress; cement and concrete research; volume 30; issue 2; février 2000; pages 291-299.
- [31] **J.Detwiler and Paul.D.Tennis** : The use of limestone in portland cement : A state -of-the-Art review; Portland cement association; 1996; pages 22-23
- [32] **S.Tsivilis, G.Batis, E.Chaniotakis, Gr.Grigoriadis, D.Theodossis** : Properties and behavior of limestone cement concrete and mortar; cement and concrete research; volume 30; issue 10; octobre 2000; pages 1679-1683.
- [33] **Ahmed Hadj Sadok** : Durabilité des mortier à base de ciment au calcaire ; mémoire de magister ; université de Blida ; juin 2004.
- [34] **Gerald Ondrey** : A new concrete is resistant to carbonation; chemical engineering, volume 104; issue 7; juillet 1997; pag 23.
- [35] **A.Laribi** : Pathologie et qualité des construction dans l'ouest Algérien « étude statistique » ; mémoire de magister ; institut de génie civil de l'université de Blida ; avril 1999.
- [36] **T.Naadia** : La qualité du béton dans les chantiers de construction ; mémoire de magister ; institut de génie civil de l'université de Blida ; septembre 1996.
- [37] **A.Ferhoul, C.Fenani, A.Kanouni** : Etude statistique et contrôle de la qualité des bétons dans les régions centre (Alger, Blida, Tipaza) ; mémoire d'ingénieur de génie civil ; université de Blida ; octobre 1996.
- [38] **A.Derbala** : Contribution aux possibilité d'amélioration de la qualité du béton ; mémoire de magister ; université de Blida ; 2000.
- [39] **C.Dow, F.P Glasser** : Calcium carbonate efflorescence on Portland cement and building materials; cement and concrete research; volume 33; issue 1; janvier 2003; pages 147-154.
- [40] **M.Abdesmed** : Comportement des poutres isostatiques en béton armé renforcées par tissus et lamelles de fibres de carbone ; mémoire de magister ; institut de génie civil ; 2003

- [41] **G.Vagelis Papadakis, G Costas Vayenas, Michael N Fardis** : Fundamental modeling and experimental investigation of concrete carbonation ; ACI materials journal; volume 88; No 4; juillet- Août 1991.
- [42] **Linhua Jiang, Baoyu Lin, Yuebo Cai** : A model for predicting carbonation of high volume fly ash concrete; cement and concrete research; volume 30; issue 5; Mai 2000; pages 699-702
- [43] **D.W.S Ho et R.K Lewis** : Carbonation of concrete and its prediction; cement and concrete research; volume17; mars 1987; pages 489-504.
- [44] **Anna V Sietta, Bernhard A. Schrefler, et Renato V Vitaliani** : The carbonation of concrete and the mechanism of moisture, heat and carbon dioxide flow through porous materials; cement and concrete research; volume 23; pages 761-722, 1993.
- [45] **Anna V Sietta, Bernhard A. Schrefler, et Renato V Vitaliani** : 2-D model for carbonation and moisture/heat flow in porous materials; cement and concrete research; vol 25; No 8; pages 1703-1712; 1995
- [46] **Alexander Steffens, Dieter Dinkler, Hermann Ahrens** : Modeling carbonation for corrosion risk prediction of concrete structures, cement and concrete research; volume 32; issue 6; juin 2002; pages 935-941
- [47]] **Anna V Sietta et Renato V Vitaliani** : Experimental investigation and numerical modeling of carbonation process in reinforced concrete structures part II: practical applications; cement and concrete research; in press; available on line 27 octobre 2004
- [48]] **Anna V Sietta et Renato V Vitaliani** : Experimental investigation and numerical modeling of carbonation process in reinforced concrete structures part I: theoretical applications; cement and concrete research; volume 34; issue 1; avril 2004; pages 571-579
- [49] **O.Burkan Isgor, A.Ghani Razaqpur** : Finite element modeling of coupled heat transfer, moisture transport and carbonation processes in concrete structures; cement and concrete composites; volume 26; issue 1; janvier 2004; pages 57-73.
- [50] **L.M Brieger et F.H Wittmann** : numerical simulation of carbonation of concrete, Swiss federal institute of technology; Lausanne, Switzerland; pp 635-640
- [51] **B.F Johannesson** : Nonlinear transient phenomena in porous media with special regard to concrete and durability;;Adv Cem Bas Mat; Avril 1997; pp 71-75