

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Hassiba Benbouali de Chlef

Faculté de Génie Civil et d'Architecture

Département de Génie Civil



THÈSE

Présentée pour l'obtention du diplôme de
DOCTORAT EN SCIENCES

Spécialité : Génie Civil

Par

Yasmina KELLOUCHE

Thème :

PREDICTION DE LA DUREE DE VIE DES OUVRAGES EN BETONS

A BASE D'AJOUTS CIMENTAIRE

Soutenue le 16/01/2018, devant le jury composé de :

Karim EZZIANE	Professeur	Université de Chlef	Président
Mohamed GHRICI	Professeur	Université de Chlef	Rapporteur
Mohamed ABED	Professeur	Université de Blida	Examineur
Othmane BOUKENDAK DJI	Professeur	Université de Médéa	Examineur
Belkacem MENADI	Professeur	Université de Blida	Examineur

«وَقُلْ رَبِّ زِدْنِي عِلْمًا»

"Oh mon Seigneur, donne-moi la connaissance"

"Oh my Lord, increase my knowledge"

DEDICACE

*Je dédie ce travail aux étoiles qui
éclairent ma vie, à ma source de tendresse:*

*« **mes parents** ».*

*Ces deux êtres qui ont su m'éduquer, qui
étaient toujours derrière moi et qui m'ont
poussé à aller de l'avant.*

*Chers parents veuillez accepter mes
sentiments les plus profonds.*

Remerciements

Ce travail qui a été réalisé avec la collaboration du laboratoire de Géomatériaux de l'université Hassiba Ben-Bouali à Chlef et du laboratoire de Matériaux Cimentaires Alternatifs de l'Université de Sherbrooke au Canada, n'en serait rien sans le soutien et la coordination de toute une équipe de recherche que je tiens à les remercier tous en espérant ne pas oublier quelqu'un d'entre eux.

Je remercie d'abord M^r Mohamed Ghrici, Professeur à l'Université de Chlef, qui a dirigé mes recherches. Qu'il soit assuré de ma profonde reconnaissance pour m'avoir accordé sa confiance. Je lui adresse mes remerciements les plus sincères pour m'avoir guidé, conseillé, encouragé et supporté durant toute la durée de la préparation de ma thèse, pour m'avoir appris à faire de la recherche et à travailler en groupe. Sa contribution dans cette thèse dépasse le cadre scientifique et s'étend au niveau humain.

Je remercie aussi mon co-encadreur Dr Bakhta Boukhatem, Maître de Conférences à l'Université de Chlef, pour son attention et sa connaissance scientifique qui m'ont beaucoup apporté tout au long de cette recherche.

Je tiens à remercier professeur Arezki Taghni-Hamou qui m'a accueilli dans son laboratoire à l'université de Sherbrooke au Canada durant la période de mon stage de courte durée et qui a témoigné de l'intérêt pour mes travaux de modélisation. Sa connaissance du matériau béton, la chimie du ciment et ses nombreuses et fructueuses discussions à l'égard de mon projet ont été précieuses. Aussi pour sa proposition et sa prise en charge pour la réalisation d'un programme expérimental pour valoriser mes travaux de recherche et valider les modèles élaborés.

Je voudrais aussi exprimer ma gratitude envers tous les membres de mon jury pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant de juger ce travail : Dr Karim EZZIANE, Professeur à l'Université de Chlef, que je remercie d'avoir accepté de présider mon jury de soutenance ; Dr Mohamed ABED et Dr Belkacem MENADI, Professeurs à l'Université de Blida et Dr Othmane BOUKENDAK, Professeur à l'Université de Médéa d'avoir examiné ce travail.

Je remercie aussi tous mes collègues au laboratoire de Géomatériaux de l'Université de Chlef, pour l'ambiance conviviale et amicale qui m'a été très profitable. En plus de ceux déjà cités, je tiens à remercier mes collègues Redhouane Rebouh, Reda Esselami et Azzedine Chehat pour leur aide et leur soutien moral durant mon séjour au Canada.

Finalement, je remercie de tout coeur mes chers parents mes frères et soeurs ainsi que toutes mes amies qui m'ont tellement encouragé durant mon parcours d'élaboration de cette thèse.

Résumé

La carbonatation du béton est l'une des principales causes de corrosion des armatures des structures en béton armé. La progression du front de carbonatation dépend de plusieurs facteurs, notamment des proportions du mélange et des conditions d'exposition. Plusieurs modèles mathématiques et analytiques, de prédiction de la carbonatation, sont disponibles dans la littérature. Cependant, ces modèles sont basés sur des équations de régression simples et ne peuvent pas prédire ou refléter avec précision les divers facteurs impliqués dans la carbonatation du béton. À cet effet, ce travail consiste à appliquer la technique des Réseaux de Neurones Artificiels (RNAs) pour prédire la profondeur de carbonatation des bétons aux ajouts cimentaires (cendres volantes et laitier de hauts fourneaux). Deux modèles de prédiction ont été développés en utilisant les résultats expérimentaux de plusieurs recherches antérieures. L'élaboration de ces modèles a été effectuée en prenant en considération les paramètres les plus influents sur la carbonatation du béton : des paramètres liés aux caractéristiques du mélange (quantité du liant, rapport eau/liant, taux de substitution des cendres volantes ou du laitier, la finesse et l'indice d'acidité du laitier) ; des paramètres liés aux conditions environnementales (concentration en CO₂ et humidité relative), des paramètres liés aux conditions de cure (durée de cure) et l'âge du béton. La performance d'apprentissage, de test et de validation des modèles RNAs élaborés dans cette étude, a montré de très bonnes corrélations dépassant les 98% entre les valeurs observées et les valeurs prédites. L'étude paramétrique effectuée pour évaluer l'effet de chaque paramètre sur la profondeur de carbonatation a montré une bonne concordance avec la littérature. Ainsi, la validation expérimentale des deux modèles a prouvé leur capacité de généralisation avec des coefficients de corrélation de 0,93 pour le modèle des cendres volantes et 0,88 pour celui des bétons au laitier. En fin, une formule analytique est proposée pour prédire la profondeur de carbonatation des bétons aux cendres volantes, avec une performance qui dépasse les 92%, pouvant être appliquée avec succès pour estimer la durée de vie de ce type de béton.

Mots clés : Béton, cendres volantes, laitier de hauts fourneaux, prédiction, carbonatation, réseaux de neurones artificiels.

Abstract

The concrete carbonation is one of the main causes of steel reinforcement corrosion in reinforced concrete structures. The progression of carbonation front depends on many factors, in particular mixture proportions and exposure conditions. Several mathematical and analytical models for the carbonation prediction are available in the literature. However, these models are based on simple regression equations and cannot predict or accurately reflect the various factors involved in the concrete carbonation. For this purpose, this work consists in applying the Artificial Neural Networks (ANNs) technique to predict the carbonation depth of concretes with cementitious additions (fly ash and blast furnace slag). Two predictive models have been developed using the experimental results of several earlier researches. The development of these models was performed taking into account the most influential parameters on the concrete carbonation: parameters related to mixture characteristics (amount of binder, water/binder ratio, substitution rate of fly ash or slag, fineness and acidity index of slag); parameters related to environmental conditions (CO_2 concentration and relative humidity), parameters related to cure conditions (curing time) and the age of concrete. The learning, testing and validation performance of ANN models developed in this study, showed very good correlations exceeding 98% between the observed and the predicted values. The parametric study carried out to evaluate the effect of each parameter on the carbonation depth showed good agreement with the literature. Thus, the experimental validation of both models proved their generalization capacity with correlation coefficients of 0.93 for the fly ash concrete model and 0.88 for that of the slag concrete. Finally, an analytical formula is proposed to predict the carbonation depth of fly ash concrete, with a performance that exceeds 92%, can be successfully applied to estimate the service life of this type of concrete.

Keywords: Concrete, fly ash, blast furnace slag, prediction, carbonation, artificial neural networks.

ملخص

تعتبر كربنة الخرسانة أحد الأسباب الرئيسية لتآكل قضبان التسليح في هياكل الخرسانة المسلحة. ويعتمد تطور جبهة الكربنة على عوامل كثيرة، بما في ذلك نسب الخليط وظروف التعرض. تتوفر العديد من النماذج الرياضية والتحليلية للتنبؤ بالكربنة. ومع ذلك، تستند هذه النماذج على معادلات الانحدار بسيطة والتي لا تعكس بدقة العوامل المختلفة المشاركة في كربنة الخرسانة. لهذا الغرض، يهدف هذا العمل الى تطبيق تقنية الشبكات العصبية الاصطناعية (RNA) للتنبؤ بعمق كربنة الخرسانة التي تحتوي إضافات إسمنتية (الرماد المتطاير وخبث الفرن العالي). قد تم تطوير نموذجين للتنبؤ بالكربنة و ذلك باستخدام النتائج التجريبية للعديد من الدراسات السابقة. وقد تم تطوير هذه النماذج مع الأخذ في الاعتبار العوامل الأكثر تأثيراً على كربنة الخرسانة: عوامل متعلقة بخصائص الخليط (كمية الموثق، نسبة المياه / الموثق، معدل استبدال الرماد المتطاير أو الخبث، صفاء الخبث، مؤشر الحموضة من الخبث)؛ عوامل متعلقة بالظروف البيئية (تركيز CO_2 ، الرطوبة النسبية)، عوامل متعلقة بظروف الشفاء (زمن المعالجة) وعمر الخرسانة. وأظهرت نتائج التعلم والاختبار والتحقق من نماذج الشبكات العصبية الاصطناعية التي تم تطويرها في هذه الدراسة ارتباطات جيدة جدا تتجاوز 98٪ بين القيم الملحوظة والقيم المتوقعة. وأظهرت الدراسة البارامترية التي أجريت لتقييم تأثير كل عامل على عمق الكربنة اتفاقاً جيداً مع النتائج المتحصل عليها من طرف عدة باحثين مختلفين. وهكذا، أثبتت عملية التحقق التجريبية التي أجريت للنموذجين قدرتها على التعميم مع معاملات ارتباط 0.93 لنموذج الرماد المتطاير و 0.88 لنموذج خبث الفرن العالي. وأخيراً، تم اقتراح صيغة تحليلية للتنبؤ بعمق كربنة خرسانة الرماد المتطاير، بمعامل الارتباط يساوي 0.92، ويمكن تطبيقها بنجاح لتقدير حياة هذا النوع من الخرسانة.

مفتاح الكلمات : خرسانة، الرماد المتطاير، خبث الفرن العالي، تنبؤ، كربنة، الشبكة العصبية الاصطناعية.

Table des matières

Remerciements	
Resumé	
Abstract	
Table des matieres	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Liste des abreviations	

Introduction Générale

I. Généralités	2
I. But de travail.....	4
III. Plan de la thèse	4

Chapitre 1- Carbonatation des bétons aux ajouts cimentaires

1.1 Introduction.....	7
1.2 Généralités sur la carbonatation du béton.....	7
1.3 Mécanisme de carbonatation.....	8
1.3.1 Le dioxyde de carbone dans l'atmosphère	9
1.3.2 Le dioxyde de carbone en solution aqueuse.....	10
1.3.3 Effet de la température sur la dissolution du dioxyde de carbone	11
1.3.4 Données physico-chimiques générales sur le dioxyde de carbone	11
1.4 Carbonatation des hydrates de ciment ou du béton.....	11
1.4.1 Carbonatation de la portlandite (CH).....	12
1.4.2 Carbonatation des silicates de calcium hydratés	13
1.4.3 Carbonatation des aluminates.....	15
1.5 Paramètres influents la carbonatation	15
1.5.1 Effet du dosage en ciment	16
1.5.2 Effet du type de ciment	16
1.5.3 Influence des additions minérales	17
1.5.4 Effet du rapport E/L	22
1.5.5 Influence de la concentration en CO ₂	22
1.5.6 Effet de l'humidité relative	23
1.5.7 Effet de la température	24

1.5.8	Effet de la cure d'hydratation	25
1.5.9	Effet de la résistance à la compression	26
1.5.10	Influence de l'adjuvant	27
1.5.11	Influence de la paroi	27
1.6	Conséquences de la carbonatation sur le béton	28
1.6.1	Diminution de la porosité	28
1.6.2	Augmentation de la résistance mécanique du béton	29
1.6.3	Augmentation de la teneur en eau	29
1.6.4	Evolution des propriétés de transfert	30
1.6.5	Retrait de carbonatation	30
1.6.6	Chute du pH et corrosion des armatures	31
1.7	Corrosion des armatures	31
1.7.1	Mécanisme de la corrosion	31
1.7.2	Les phases de corrosion	32
1.7.3	Dégradation des armatures	34
1.8	Conclusion	36

Chapitre 2- Modélisation de la carbonatation

2.1	Introduction	38
2.2	Modèles de prédiction de la carbonatation	38
2.2.1	Modèles empiriques	39
2.2.2	Modèles physico-chimiques ou semi-empiriques	40
2.2.3	Modèles Réseaux de Neurones Artificiels	42
2.2.4	Définition d'un réseau de neurones artificiels	43
2.2.5	Architecture d'un neurone formel	45
2.2.6	Différents types de réseaux de neurones	46
2.2.7	Perceptron multicouches	47
2.2.8	Apprentissage des réseaux de neurones	48
2.2.9	Apprentissage de rétro-propagation	49
2.2.10	Performance d'un modèle réseau de neurones	50
2.3	Prédiction de la carbonatation par les RNAS	51
2.3.1	Modèle de Yan et al. (2008)	51
2.3.2	Modèle de Lu et Liu (2009)	52
2.3.3	Modèle de Narui et al. (2009)	52
2.3.4	Modèle de Kown et Song (2010)	53

2.3.5	Modèle de Daming et al. (2014)	54
2.3.6	Modèle de Taffese et al. (2015)	55
2.4	Conclusion	56

Chapitre 3- Conception et Analyse des données

3.1	Introduction	59
3.2	Base de données des bétons aux cendres volantes	59
3.2.1	Collecte de données expérimentales	60
3.2.2	Analyse statistique des données	62
3.2.3	Comportement des variables vis-à-vis de la carbonatation	65
3.2.4	Analyse en composantes principales	66
3.3	Base de données des bétons aux laitiers	71
3.3.1	Collecte des données expérimentales	71
3.3.2	Analyse statistique des données	73
3.3.3	Comportement des variables vis-à-vis de la carbonatation	76
3.3.4	Analyse en composantes principales	77
3.4	Normalisation des données	79
3.5	Conclusion	80

Chapitre 4- Prédiction de la Carbonatation par les RNAs

4.1	Introduction	82
4.2	Elaboration de la structure du MCV	82
4.2.1	Sélection des Variables d'Entrée	82
4.2.2	Architecture du réseau	84
4.2.3	Apprentissage du réseau	86
4.2.4	Paramètres d'apprentissage	88
4.2.5	Validation et test	88
4.2.6	Performances du MCV	89
4.2.7	Etude paramétrique du MCV	90
4.2.8	Comparaison du MCV avec d'autres modèles	97
4.3	Elaboration de la structure du ML	101
4.3.1	Sélection des Variables d'Entrée	101
4.3.2	Architecture du réseau	102
4.3.3	Apprentissage du réseau	104
4.3.4	Paramètres d'apprentissage	105
4.3.5	Validation et test	105

4.3.6 Performances du ML.....	106
4.3.7 Etude paramétrique du ML.....	106
4.3.8 Effet de proportions du laitier	107
4.3.9 Effet du rapport E/L.....	108
4.3.10 Effet de l'indice d'acidité	110
4.3.11 Effet de la finesse du laitier	111
4.3.12 Effet de la concentration du CO ₂	112
4.3.13 Effet de l'humidité relative	113
4.3.14 Effet de la cure	114
4.4 Conclusion	115

Chapitre 5- Validation Expérimentale des modèles RNAs élaborés

5.1 Introduction.....	117
5.2 Matériaux utilisés.....	117
5.2.1 Ciment	117
5.2.2 Ajouts cimentaires	118
5.2.3 Granulats	119
5.2.4 Eau de gâchage	119
5.2.5 Adjuvants.....	120
5.3 Formulations des bétons	120
5.4 Procédures de malaxage.....	121
5.5 Confection et conservation des échantillons	123
5.6 Essais de carbonatation accélérée	124
5.6.1 Préconditionnement des échantillons	124
5.6.2 Principe de l'essai de carbonatation accélérée	125
5.6.3 Mesure de la profondeur de carbonatation	126
5.7 Résultats et discussion	127
5.7.1 Carbonatation des bétons aux cendres volantes	127
5.7.2 Validation du modèle MCV	129
5.7.3 Proposition d'une formule analytique pour MCV	131
5.7.4 Prédiction de la durée de vie des bétons aux cendres volantes	132
5.7.5 Carbonatation des bétons aux laitiers	134
5.7.6 Validation du modèle ML.....	137
5.8 Conclusion	139

Conclusions Générales et Recommandations

I. Conclusions Générales.....	Erreur ! Signet non défini.
II. Recommandations et perspectives.....	Erreur ! Signet non défini.
Références Bibliographiques.....	146
Annexe 1 - Modèles de prediction de la carbonatation dans la littérature	156
Annexe 2 - Bases de données et résultats de deux modèles RNAs	165
Annexe 3 - Algorithmes et résultats de l'ACP	177

Liste des figures

Figure 1.1— Principe de la carbonatation.	8
Figure 1.2 — Augmentation de la concentration du CO ₂ dans l'atmosphère	10
Figure 1.3 — Mécanisme de carbonatation de la portlandite (Thiery, 2005).....	13
Figure 1.4 —Variation des quantités de portlandite et de carbonate de calcium avec	14
Figure 1.5 — Relation entre l'épaisseur carbonatée et le dosage en ciment (Duval, 1992)	16
Figure 1.6 — Influence de la nature du ciment sur la profondeur de carbonatation	17
Figure 1.7 — Résultats expérimentaux et modèle prédictif de profondeur de carbonatation.....	19
Figure 1.8 — Effet du taux de substitution du ciment par les cendres volantes (Burden, 2006).....	20
Figure 1.9—Influence des proportions du laitier sur la profondeur	21
Figure 1.10 — Influence du rapport E/C sur la carbonatation des pâtes de ciment	22
Figure 1.11 — Influence de concentration du CO ₂ sur la carbonatation (Yoon et al., 2007).....	23
Figure 1.12 — Degré de carbonatation, à 20°C, en fonction de l'HR	24
Figure 1.13 — Profondeur de Carbonatation des bétons sans et avec cendres volantes.....	25
Figure 1.14 — Profondeur de carbonatation pour un béton ayant subi.....	26
Figure 1.15 — Relation entre le coefficient de carbonatation	26
Figure 1.16 — Comparaison de la profondeur de carbonatation d'un béton avec superplastifiant et d'un même béton sans super plastifiant (Dakmouche, 2009).....	27
Figure 1.17 — Effet de paroi au voisinage d'un coffrage (Sadouki, 1987)	28
Figure 1.18 — Coefficient de diffusion des chlorures dans des pâtes de ciment saines.....	29
Figure 1.19 — Mesure par gammadensimétrie du taux de saturation (Hyvert, 2009)	30
Figure 1.20 — Progression de la carbonatation (Oxand, 2002).....	32
Figure 1.21 — Dégradation schématique des armatures au cours du temps	33
Figure 1.22 — Mécanisme de corrosion de l'acier dans le béton.....	35
Figure 1.23 — Augmentation du volume des produits de corrosion (Angst et al., 2009)	36
Figure 2.1 — Méta-modèle pour la prédiction de la profondeur de carbonatation	42
Figure 2.2 — Mise en correspondance neurone biologique/neurone artificiel.....	44
Figure 2.3 — Schéma général d'un réseau de neurones	44
Figure 2.4 — Schéma d'un neurone formel	45
Figure 2.5 — Classification des réseaux de neurones.....	47
Figure 2.6 — Exemple d'un réseau de type perceptron multicouches.	48
Figure 2.7 — Comparaison entre la rétropropagation et la fonction radiale pour la prédiction de la profondeur de carbonatation (Yan et al., 2008)	52
Figure 2.8 — Relation entre les résultats des deux RNAs et	52
Figure 2.9 — Comparaison des erreurs relatives (Narui et al., 2009).....	53
Figure 2.10 — Résultats de l'expérimentation et des réseaux de neurones	53
Figure 2.11 — Architecture du modèle de prédiction de la profondeur.....	54
Figure 2.12 — Prédiction de la carbonatation par la combinaison des RNAs	55
Figure 3.1 — Distribution des données selon leurs origines.....	61
Figure 3.2 — Distribution quantitative des données.....	64
Figure 3.3 — Comportement des variables vis-à-vis la profondeur de carbonatation:	65

Figure 3.4 — Spectre des valeurs propres	69
Figure 3.5 — Distribution des données selon leur origine.....	73
Figure 3.6 — Distribution quantitative des données.....	75
Figure 3.7 — Comportement des variables vis-à-vis de la profondeur de carbonatation:.....	76
Figure 4.1 — Architecture du réseau de neurone du modèle MCV	86
Figure 4.2 — Performances du MCV	89
Figure 4.3 — Effet des cendres volantes pour différents rapports E/L:	91
Figure 4.4 — Effet du dosage en ciment à différents âges pour 0, 20, 40 et 60% CV	92
Figure 4.5 — Effet du rapport E/L à différents âges pour 0, 20, 40 et 60% CV	93
Figure 4.6 — Effet de la concentration du CO ₂ à différents âges	95
Figure 4.7 — Effet de l'humidité relative à différents âges	96
Figure 4.8 — Relations entre les valeurs observées et les valeurs prédites:	101
Figure 4.9 — Architecture du réseau du ML	104
Figure 4.10 — Performances du ML	106
Figure 4.11 — Effet du pourcentage de laitier pour différents rapports E/L	108
Figure 4.12 — Effet du rapport E/L	109
Figure 4.13 — Effet de l'indice d'acidité du laitier	110
Figure 4.14 — Effet de la finesse du laitier	111
Figure 4.15 — Effet de la concentration du CO ₂	112
Figure 4.16 - Effet de l'humidité relative	113
Figure 4.17- Effet de la cure	114
Figure 5.1 — Diagramme ternaire représentant la composition des matériaux cimentaires	118
Figure 5.2 — Malaxeur d'une capacité de 125l.....	122
Figure 5.3 — Essais à l'état frais: (a) Affaissement; (b) Masse volumique	122
Figure 5.4 — Stockage des échantillons dans une chambre humide.....	124
Figure 5.5 — Stockage des prismes dans la chambre de carbonatation accélérée	125
Figure 5.6 — Equipement utilisé pour obtenir du béton fracture frais.....	126
Figure 5.7 — Bétons carbonatés: a) aux cendres volantes; b) au laitier.....	126
Figure 5.8 — Profondeurs de carbonatation observées des bétons aux cendres volantes.....	128
Figure 5.9 — Valeurs prédites par MCV et Modèle de Papadakis	131
Figure 5.10 — Performance de la formule analytique proposée	132
Figure 5.11 — Durée de vie des bétons aux cendres volantes:	134
Figure 5.12 — Profondeurs de carbonatations observées des bétons aux laitiers:	136
Figure 5.13 - Valeurs prédites par ML en fonction des valeurs observées.....	138

Liste des Tableaux

Tableau 1.1- Caractéristiques du dioxyde de carbone en phase gazeuse et en phase liquide	11
Tableau3.1- Sources de données des bétons aux cendres volantes	60
Tableau3.2- Variation des paramètres étudiés pour chaque source de données	61
Tableau3.3- Compositions chimiques des ciments et cendres volantes utilisés	62
Tableau3.4- Plage de variation des données	63
Tableau3.5- Distribution des données	63
Tableau 3.6 - Corrélations entre les variables	68
Tableau 3.7- Valeurs propres et variances	69
Tableau 3.8- Vecteurs propres.....	70
Tableau 3.9 - Composantes principales	70
Tableau3.10- Sources de données des bétons aux laitiers.....	72
Tableau3.11- Variation des paramètres étudiés pour chaque source de données	72
Tableau 3.12 - Compositions chimiques des ciments et laitiers utilisés	73
Tableau 3.13 - Plage de variation des données	74
Tableau 3.14 - Distribution des données	74
Tableau 3.15- Corrélations entre les variables	77
Tableau 3.16 - Valeurs propres et variances	78
Tableau 3.17- Vecteurs propres.....	78
Tableau 3.18 - Composantes principales	79
Tableau 4.1 - Choix des paramètres d'entrée du modèle MCV.....	83
Tableau 4.2 - Choix du nombre de neurones et des fonctions d'activation	85
Tableau 4.3 - Choix de la fonction d'apprentissage pour le premier modèle	87
Tableau 4.4 - Paramètres d'apprentissage de MCV	88
Tableau 4.5 - Division des données pour le MCV	89
Tableau 4.6- Comparaison du MCV avec d'autres modèles	99
Tableau 4.7- Choix des paramètres du ML.....	102
Tableau 4.8- Choix du nombre de neurones et des fonctions d'activation du ML	103
Tableau 4.9- Choix de la fonction d'apprentissage pour le ML	105
Tableau 4.10 - Paramètres d'apprentissage de ML	105
Tableau 4.11 – Division des données du ML.....	106
Tableau 5.1- Composition chimique des matériaux utilisés.....	119
Tableau5.2- Proportions des mélanges	121
Tableau 5.3 - Resultats des essais à l'état frais	123
Tableau5.4- Profondeurs de carbonatation des bétons aux cendres volantes	127
Tableau 5.5- Profondeurs de carbonatation observées et prédites des bétons aux cendres volantes	129
Tableau 5.6- Profondeurs de carbonatation des bétons aux cendres volantes	135
Tableau 5.7 - Profondeurs de carbonatation observées et prédites des bétons au laitier	137

Liste des abréviations

A/L	Rapport Agrégats / Liant
BPNN	Neural Network Back-Propagation (Réseaux de Neurones à Rétro-Propagation)
CaPrM	Carbonation Prediction Model
C	Ciment
CPO	Ciment Portland Ordinaire
DE-BP	Back-Propagation Differential Evolution (Evolution Différentielle de Rétro-Propagation)
e	Epaisseur d'enrobage
EA	Eantraineur d'air
E/L	Rapport Eau / Liant
E/C	Rapport Eau / Ciment
F	Finesse du laitier
FL	Cendres volantes à faible CaO
FH	Cendres volantes à CaO élevé
GA-BP	Back-Propagation Genetic Algorithm (Algorithme Génétique de Rétro-Propagation)
HR	Humidité Relative
Iac	Indice d'acidité
L	Liant
MAE	Mean Absolute Error (Erreur Absolue Moyenne)
MCV	Modèle des cendres volantes
ML	Modèle du laitier
MSE	Mean Square Error (Erreur Quadratique Moyenne)
NOAA	Agence Américaine Océanique et Atmosphérique
PSO	Particle Swarm Optimisation
PMC	Perceptron Multicouche
R	Coefficient de corrélation
R²	Coefficient de détermination
RNA	Réseaux de neurones artificiels
RP	Rétro-propagation
RBFNN	Neural Network Radial Basis Function (Réseau de neurones à fonction radiale)
RMSE	Root Mean Square Error (racine de l'erreur quadratique moyenne)
SP	Superplastifiant
\sqrt{t}	Racine carrée du temps d'exposition à la carbonatation

Introduction Générale

I. Généralités

La durabilité des structures en béton, exposées à des environnements agressifs de différentes natures, est liée à l'aptitude du matériau, d'une part à s'opposer à la pénétration des agents chimiques agressifs véhiculés par l'eau (barrière physique), et d'autre part à la limitation des effets délétères des espèces agressives ayant pénétré dans le matériau, grâce à une composition chimique et minéralogique adéquate (barrière chimique).

La capacité du béton à protéger les aciers vis-à-vis de la corrosion, est l'un des atouts majeurs du matériau, permettant de pérenniser les performances mécaniques du béton armé. Cela constitue encore aujourd'hui un enjeu majeur de la durabilité des structures intrinsèquement, le béton offre « naturellement » une protection initiale aux aciers d'armatures grâce au pH élevé (≈ 13) de sa solution interstitielle.

Parmi les mécanismes de détérioration du béton armé liés à l'environnement, la corrosion des armatures occupe une place centrale, étant la cause de dégradation la plus répandue. Elle concerne les ouvrages exposés aux ions chlorures (environnement marin, sels de déverglaçage sur les ouvrages routiers) et les ouvrages exposés à une atmosphère chargée en CO_2 comme dans les milieux urbains ou industriels (phénomène de carbonatation). Elle est à l'origine de nombreux défauts apparents qui, s'ils n'engendrent pas de pertes de capacité portante de la structure, se révèlent nuisibles à l'exploitation de l'ouvrage. Ces désordres dus à la corrosion peuvent avoir des conséquences économiques importantes : les coûts de maintenance et de réparation qu'ils entraînent sont en général très élevés. La compréhension de ce mécanisme et la prise en compte des différents facteurs qui le conditionnent, notamment les facteurs environnementaux, demeurent donc d'une importance primordiale.

Il a été rapporté que la carbonatation du béton est l'un des phénomènes les plus connus qui initialise le processus de corrosion. Elle est caractérisée par les processus physiques et chimiques dans lesquelles une série de réactions se produisent en présence du dioxyde de carbone (CO_2), qui entraîne la réduction du pH dans le béton. Le CO_2 pénètre à travers le béton par le mécanisme de diffusion. Cette pénétration et réaction de carbonatation se manifeste graduellement, en produisant une couche carbonatée (limitée par le front de carbonatation) qui se développe avec le temps.

La modélisation vise deux objectifs, d'une part elle assiste l'ingénieur dans ses décisions pour la conception d'ouvrages dont la formulation et la mise en œuvre des matériaux doivent assurer

pour la structure des performances de durabilité suffisantes. D'autre part, le recours à la modélisation permet une meilleure compréhension du rôle et de l'importance des différents phénomènes mis en jeu.

La façon la plus simple et la plus efficace de prédire la durée de vie des ouvrages consiste à évaluer la phase d'initiation (ou d'incubation) de la corrosion. En ce qui concerne la corrosion induite par la carbonatation, il s'agit de définir le temps nécessaire pour que le premier lit des armatures soit dépassivé par l'action du dioxyde de carbone. Soulignons qu'il s'agit d'une démarche sécuritaire, puisque l'incubation de la corrosion ne conduit pas à une mise en danger immédiate de la structure.

Les ajouts cimentaires tels que la fumée de silice, les cendres volantes et le laitier de haut-fourneau sont des résidus industriels utilisés en remplacement d'une partie du ciment lors de la production du béton. Les bétons contenant une proportion adéquate d'ajouts cimentaires peuvent atteindre des propriétés mécaniques et des performances de durabilité équivalentes, et parfois supérieures, à celles du béton ordinaire. Néanmoins, l'utilisation des ajouts cimentaires est grandement souhaitable d'un point de vue économique et environnemental. La réduction de la quantité de ciment requise dans le béton entraîne une baisse des coûts de production, de la consommation énergétique et des émissions polluantes liés à la fabrication du ciment Portland. De plus, l'incorporation de cendres volantes et de laitier de haut-fourneau dans le béton permet de réutiliser de façon permanente et écologique ces résidus industriels qui devraient être enfouis autrement.

Les études en laboratoire de durabilité des matériaux cimentaires sont basées sur des environnements « modèles », parfaitement reproductibles, mais parfois assez éloignés des environnements naturels (en terme de composition chimique, de l'exposition, de l'évolution dans le temps, de la composition, . . .). Si l'on s'intéresse à un environnement particulier, il est donc parfois nécessaire de recourir à des plans d'essais expérimentaux spécifiques, qui sont par nature coûteux en ressources et en temps. Dans un objectif de limiter l'étendue de ces plans d'essais expérimentaux et de mieux comprendre les phénomènes de dégradation qui peuvent se produire dans un environnement particulier, le Laboratoire des Géomatériaux de l'Université de Chlef avec la coordination du Laboratoire des Matériaux Alternatifs à l'Université de Sherbrooke au Canada ont lancé une étude pour modéliser la durée de vie des bétons aux ajouts cimentaires vis-à-vis des phénomènes agressifs tels que l'attaque aux sulfates, la carbonatation, l'attaque aux ions chlorures, etc..., par l'application des nouvelles techniques de l'intelligence artificielle

comme les réseaux de neurones, la logique flou, l'algorithme génétique ou l'hybridation entre eux.

I. But de travail

Le but de cette étude est de prédire la profondeur de carbonatation des bétons aux cendres volantes et au laitier de hauts fourneaux en appliquant les techniques d'intelligence artificielle telles que les réseaux de neurones.

Deux modèles de prédiction ont été développés par cette technique en utilisant les résultats expérimentaux disponibles dans la littérature de plusieurs chercheurs et en prenant en considération les paramètres les plus influents sur le phénomène de carbonatation, tels que des paramètres liés aux caractéristiques du mélange (quantité du liant, rapport eau/liant, taux de substitution des cendres volantes ou du laitier, la finesse du laitier, l'indice d'acidité du laitier) ; des paramètres liés aux conditions environnementales (concentration en CO₂, l'humidité relative) et des paramètres liés aux conditions de cure (durée de cure) et l'âge du béton.

A cet effet, une application de simulation des réseaux de neurones développée par le logiciel MATLAB version 2014 est employée en étudiant les effets de divers paramètres utilisés dans la construction des deux réseaux développés.

III. Plan de la thèse

Dans cette partie nous détaillons les plans de chaque chapitre dans cette thèse :

Après une introduction générale sur le contexte de la thèse, un premier chapitre a fait l'objet d'une étude bibliographique sur le phénomène de carbonatation ; sa définition, les paramètres influents sur la carbonatation et ses conséquences.

Le deuxième chapitre est consacré aux différents modèles de prédiction de la carbonatation dans la littérature ; des modèles empiriques, des modèles semi-empiriques ou physico-chimiques et des modèles développés par les nouvelles techniques de l'intelligence artificielle. Quelques descriptions théoriques sur la technique des réseaux de neurones artificiels sont présentées dans ce chapitre.

Le troisième chapitre a traité la conception et l'analyse de données des deux modèles qui vont être développés ultérieurement (un premier modèle pour les bétons aux cendres volantes et un deuxième pour les bétons au laitier de hauts fourneaux) ; tout d'abord les sources des deux bases

de données ; analyse statistique sur la distribution des données et leur comportement vis-à-vis de la profondeur de carbonatation, et une analyse en composantes principales pour éliminer la corrélation entre les paramètres de données, et enfin la normalisation des données.

Le quatrième chapitre présente le processus de réalisation des deux modèles en appliquant l'algorithme de rétro-propagation et les différentes étapes du choix des architectures. Une étude paramétrique a été faite pour les deux modèles de prédiction de la profondeur de carbonatation des bétons aux cendres volantes et au laitier développés. Ainsi qu'une comparaison entre les résultats de plusieurs chercheurs non inclus dans la base de données avec ceux de notre modèle MCV et deux autres modèles dans la littérature a été faite.

Le cinquième et dernier chapitre expose les essais expérimentaux effectués sur des bétons aux cendres volantes et au laitier de hauts fourneaux, pour la validation des deux modèles des réseaux de neurones. Une formule analytique calculant la profondeur de carbonatation des bétons aux cendres volantes a été développée et comparée avec la formule de Papadakis.

Et enfin les principales conclusions déduites de ce travail avec des perspectives et des recommandations pour des futurs travaux sont exposées à la fin de cette thèse.

Chapitre 1

Carbonatation des bétons aux ajouts cimentaires

1.1 Introduction

Dès le début de l'emploi du « béton moderne » au siècle passé, on a été confronté à des problèmes de durabilité : dégradation par certaines eaux naturelles, eau de mer, sels, gel...etc. Des examens soigneux de ponts et d'autres structures endommagés ont montré assez clairement que, à cause de la corrosion, la durée de vie d'une structure était considérablement plus courte que celle prévue initialement. La durabilité du béton, armé ou non, dans des conditions climatiques normales et extrêmes, est donc devenue un sujet d'intérêt majeur et, par conséquent, un domaine de recherche largement exploré.

La carbonatation a une influence très favorable sur le béton lui même. Elle le rend plus compact et augmente sa résistance, sans modification de volume. La carbonatation de la surface d'un béton est en quelque sorte une protection naturelle contre la pénétration des gaz et liquides et n'entraîne en aucun cas des dégâts s'il s'agit de béton non armé.

Par contre, quand il contient des armatures, il n'en est plus de même. L'acier, qui est protégé dans le béton non carbonaté, peut subir la corrosion lorsque le béton se carbonate. De nombreux facteurs jouent un rôle dans ce cas : qualité du béton, couverture des armatures, présence de chlorures, humidité, température, pollution, etc.

1.2 Généralités sur la carbonatation du béton

La carbonatation des bétons correspond à un ensemble de mécanismes physiques et chimiques qui résultent de l'instabilité des phases $\text{Ca}(\text{OH})_2$ et CSH de la matrice cimentaire sous l'action du dioxyde de carbone (CO_2). Cette description phénoménologique occulte la complexité des mécanismes de dissolution et de précipitation et des transferts réellement mis en jeu. En vue de la modélisation de la carbonatation, il apparaît par conséquent utile de rappeler les informations nécessaires à la compréhension du mécanisme de diffusion-réaction du CO_2 dans le béton.

La carbonatation résulte de l'action de la diffusion du CO_2 contenu dans l'air dans les pores du béton et les réactions consécutives de dissolution/précipitation avec les hydrates, notamment de la portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ qui joue un rôle de tampon sur le pH. Lorsque la portlandite est entièrement consommée, ou qu'elle n'est plus accessible, le pH chute à une valeur inférieure à 9, amorçant ainsi la dépassivation des aciers.

1.3 Mécanisme de carbonatation

Lors de la fabrication du béton, la quantité d'eau introduite pour l'hydratation du ciment est toujours supérieure à la quantité stœchiométrique indispensable. Par conséquent, le ciment hydraté est toujours un milieu poreux dont les pores sont en premier lieu remplis d'eau qui se charge en ions pour respecter l'équilibre chimique avec les hydrates du ciment (CH, CSH, AFt, AFm, ...). Quand le matériau cimentaire sèche à l'air libre, les pores se remplissent partiellement d'air. Le CO_2 naturellement présent dans l'atmosphère est alors susceptible de diffuser à travers la phase gazeuse du ciment (la diffusion dans la phase liquide est négligeable).

Le CO_2 présent dans la phase gazeuse des pores se dissout dans la solution interstitielle pour former des ions carbonates qui réagissent essentiellement avec les ions calcium Ca^{2+} pour former de la calcite (CaCO_3). La modification de l'équilibre chimique entre les hydrates de la matrice cimentaire et la solution interstitielle entraîne une dissolution des hydrates. Le nouvel équilibre chimique correspond alors à une solution énormément plus acide qu'originellement. Le pH passe d'une valeur de 13 dans la zone non carbonatée à une valeur inférieure à 9 dans la zone carbonatée (figure 1.1). Quand la zone de carbonatation atteint les armatures en acier, la corrosion du métal peut commencer en produisant surtout des espèces plus volumineuses que les matériaux originellement présents. Ceci explique l'éclatement du béton autour des armatures corrodées.

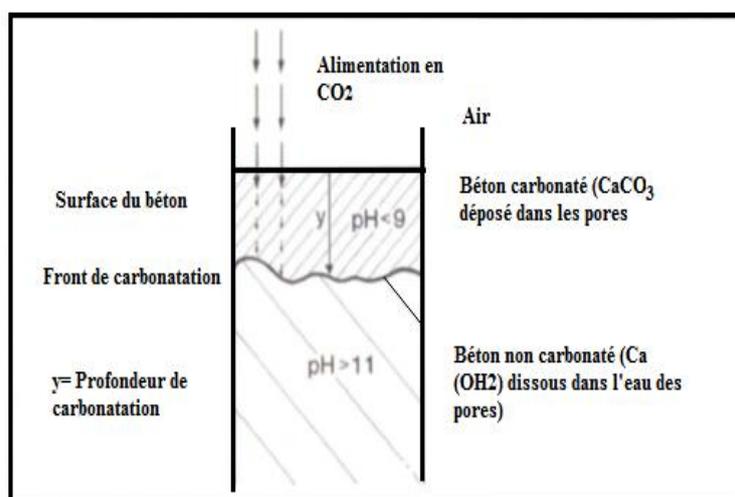


Figure 1.1— Principe de la carbonatation.

Afin de comprendre cette description phénoménologique, il est opportun de rappeler certaines informations correspondant au mécanisme de diffusion-réaction du CO₂ dans les bétons.

Nous allons, dans un premier temps revenir sur les propriétés du CO₂, puis, on décrit les réactions entre les hydrates du béton et le CO₂. On abordera ensuite la corrosion des aciers liée à la carbonatation.

1.3.1 Le dioxyde de carbone dans l'atmosphère

Actuellement, le débat tourne avec inquiétude autour des gaz à effet de serre. C'est l'émission en grande quantité du CO₂ dans l'air. Normalement le CO₂ se manifeste par de faibles concentrations, de l'ordre de 0.03% en volume par exemple en milieu rural. Dans un local mal ventilé, ce pourcentage peut atteindre 0.1%; dans les grandes agglomérations, ce pourcentage varie entre 0.3 % et 1%. La paroi d'un tunnel routier est un «bel» exemple d'un béton soumis à une concentration élevée de CO₂ (Thiery, 2005).

Le réchauffement de la planète est dû à l'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre, tel que le CO₂: il s'agit d'un des problèmes environnementaux les plus critiques pour le 21^{ème} siècle. La concentration de CO₂ dans la couche atmosphérique a augmenté constamment depuis la révolution industrielle (Figure 1.2). Depuis 1750 elle augmente de 0,5 % par année sur une échelle globale, et particulièrement dans les zones urbaines (Yoon et al., 2007). Il est probable que le changement climatique ait ainsi dans le futur une incidence sur la carbonatation des structures en béton.

La NOAA, l'Agence Américaine Océanique et Atmosphérique, vient d'annoncer un record historique. Chaque semaine, ce taux est mesuré sur le volcan Mauna Loa, à Hawaï, et la NOAA établit la teneur mondiale mensuelle en s'appuyant sur 40 sites dans le monde. C'est la première fois que la teneur de l'atmosphère en dioxyde de carbone (gaz carbonique, ou CO₂) dépasse les 400 ppm (Figure 1.2).

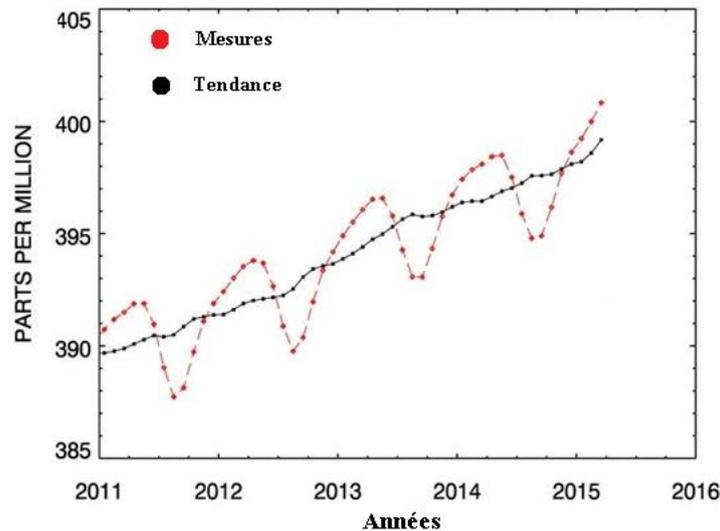


Figure 1.2 — Augmentation de la concentration du CO₂ dans l'atmosphère à l'échelle mondiale (NOAA)

En assimilant le CO₂ à un gaz parfait, sa concentration en mol/L est donnée par la formule :

$$[CO_2] = \alpha_{CO_2} \frac{P_{atm}}{RT} \quad (1.1)$$

α_{CO_2} est la fraction volumique en CO₂, R la constante des gaz parfaits (8,32 J.mol⁻¹.K⁻¹), T(K) la température absolue et P_{atm} (Pa) la pression atmosphérique.

1.3.2 Le dioxyde de carbone en solution aqueuse

La dissolution du gaz carbonique CO₂, à une pression partielle, entraîne l'acidification des solutions alcalines. C'est l'acide carbonique qui s'y forme, selon la réaction (1.2) et dont la concentration dans la solution est exprimée en fonction de la pression partielle en CO₂ selon la loi de Henry et Davis.



Dans l'eau, l'acide carbonique H₂CO₃ se comporte comme un diacide faible :



Chacune de ces deux réactions de dissociation (1.3) et (1.4) engendre une acidité de l'acide carbonique H₂CO₃ : l'ion bicarbonate HCO₃⁻ et l'ion carbonate CO₃²⁻.

Au cours de la carbonatation, le pH de la solution interstitielle du béton chute d'une valeur très basique, proche de 13 à une valeur inférieure à 9.

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

La solubilité du gaz carbonique dans l'eau sous la pression atmosphérique ($P_{\text{atm}}=10^5$ Pa) décroît rapidement avec la température et peut s'exprimer selon [Chaussadent \(1999\)](#) suivant la relation empirique (avec T en degré Kelvin)

$$s \text{ (mol.l}^{-1}\text{)} = 5,283.10^{-6} e^{(2608,2/T)} \quad (1.5)$$

La solubilité du gaz carbonique étant l'étape initiale du processus global de carbonatation du béton, la vitesse de carbonatation sera donc plus importante en hiver qu'en été ([Chaussadent, 1999](#)).

1.3.4 Données physico-chimiques générales sur le dioxyde de carbone

Dans le tableau 1.1, sont consignées quelques valeurs caractéristiques du dioxyde de carbone à l'état gazeux et à l'état absorbé dans une solution aqueuse ([Chaussadent, 1999](#)).

On notera que les coefficients de diffusion en phase aqueuse du dioxyde de carbone ont un ordre de grandeur 10^4 fois plus faible qu'en phase gazeuse.

Tableau 1.1- Caractéristiques du dioxyde de carbone en phase gazeuse et en phase liquide ([Chaussadent, 1999](#))

Caractéristiques	Quantités
Diamètre des molécules de CO_2 à l'état gazeux (nm)	0.426
Libre parcours moyen des molécules de CO_2 gazeux à 0° C (nm)	63
Viscosité dynamique du CO_2 gazeux à 20° C (Pa.s)	1.48
Coefficient de diffusion du CO_2 gazeux à 20° C ($m^2.s^{-1}$)	$1,6.10^{-5}$
Coeff. de diffusion de H_2CO_3 à 20° C ($m^2.s^{-1}$)	$7,2.10^{-10}$
Coeff. de diffusion de HCO_3^- à 20° C ($m^2.s^{-1}$)	$11,8.10^{-10}$
Coeff. de diffusion de CO_3^{2-} à 20° C ($m^2.s^{-1}$)	$9,6.10^{-10}$

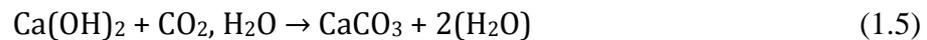
1.4 Carbonatation des hydrates de ciment ou du béton

La carbonatation est un phénomène de vieillissement naturel du béton, qui résulte de la diffusion du CO_2 , contenu dans l'air à un taux de 0,03 à 0,05% en volume selon la température et le milieu environnant, dans les pores du béton. Toutefois, ce taux peut être plus important en milieu urbain qu'en milieu rural et varie entre 0,3 à 1%. Cette diffusion se produit d'un milieu de concentration en CO_2 élevée vers un milieu de faible concentration en CO_2 suivant la loi de Fick. Ensuite, il se dissout dans le film d'eau qui couvre les murs de pores et réagit avec les constituants de la pâte de ciment ou du béton.

Les réactions consécutives de dissolution/précipitation avec les hydrates, notamment de la portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ qui joue un rôle de tampon sur le pH, entraînent la consommation de bases alcalines présentes dans la solution interstitielle des bétons, aboutissant à une consommation du pH qui passe d'une valeur de 13 à une valeur inférieure à 9.

1.4.1 Carbonatation de la portlandite (CH)

Pour réagir avec le dioxyde de carbone, l'hydroxyde de calcium solide est dissout du gel de ciment dans l'eau de pore, et se diffuse dedans à partir des régions de haute alcalinité vers d'autres de faible alcalinité (Papadakis et al., 1992). Le résultat de la dégradation chimique de la portlandite par le dioxyde de carbone conduit à la précipitation d'un sel, le carbonate de calcium (CaCO_3). La réaction peut se résumer par l'équation bilan (1.6) (Papadakis et al., 1991).



L'inconvénient de cette équation est qu'elle masque toutes les étapes intermédiaires du mécanisme. En revanche, elle a l'avantage d'indiquer que la carbonatation de la portlandite s'accompagne globalement d'une libération d'eau de structure (Thiery, 2004a).

L'hydroxyde de calcium réagissant dans l'équation (1.6) est produit par l'hydratation des silicates de calcium composants du clinker. Dans les ciments pouzzolaniques, ou dans les bétons où la pouzzolane est un ajout cimentaire, une partie de cet hydroxyde de calcium est consommée par l'activité pouzzolanique, et seulement la quantité restante est disponible pour la carbonatation (Papadakis et al., 1992).

Le pH de la masse du béton qui contrôle la dépassivation des armatures, dépend de la concentration des ions (OH^-) dans l'eau de pore. Où, en un certain point toute la quantité des $\text{Ca}(\text{OH})_2$ contenue dans le béton a été convertie en CaCO_3 , le pH de la solution du pore baisse à une valeur d'équilibre de 8.3, au-dessous du seuil de dépassivation des armatures (Papadakis et al., 1992).

La portlandite se dissout suivant la réaction (1.7) pour rétablir la basicité du milieu:



Les ions calcium qui sont libérés précipitent avec les ions carbonates, issues de l'équation (1.4) suivant la réaction (1.8) pour former du carbonate de calcium CaCO_3 .



Il s'agit d'un bilan, mais plusieurs équilibres chimiques et leurs constantes sont mis en jeu dans le processus de carbonatation. En effet la réaction a lieu en phase liquide, en solution aqueuse, mais fait aussi intervenir un gaz et un composé solide. La réaction de carbonatation nécessite ainsi le passage du CO_2 en phase aqueuse (1.2), des réactions acido-basiques impliquant les ions carbonates (1.3) et (1.4), la dissolution de la portlandite (1.7) et la précipitation du carbonate de calcium (1.8).

Le carbonate de calcium existe sous trois formes polymorphiques: la vaterite, l'aragonite et la calcite. Cependant, la forme la plus stable en conditions standards de température et de pression, est la calcite. Les deux autres ne sont présentes qu'en faible quantité et à court terme dans les matériaux cimentaires carbonatés.

Les ions calcium réagissent aussi avec les ions HCO_3^- pour former du bicarbonate de calcium $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$; Mais ce dernier ne peut pas précipiter car il n'existe pas à l'état solide, ne sont considérés que les ions Ca^{2+} qui précipitent sous forme de calcite CaCO_3 (figure 1.3).

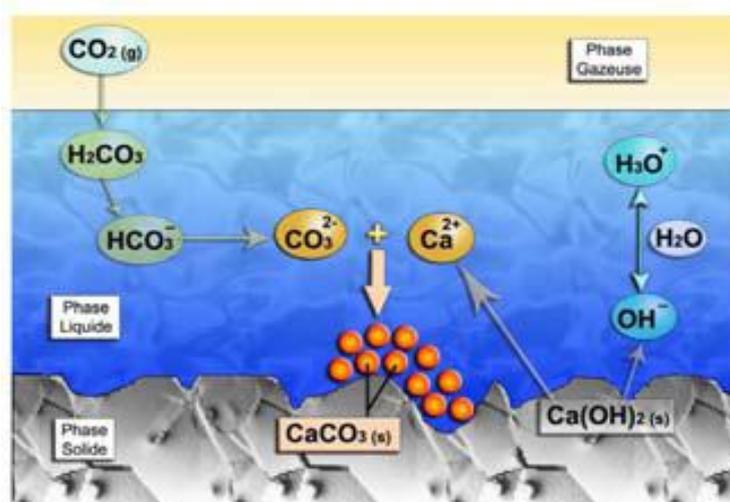


Figure 1.3 — Mécanisme de carbonatation de la portlandite (Thiery, 2005)

1.4.2 Carbonatation des silicates de calcium hydratés

Les silicates de calcium hydratés (C-S-H) constituent la phase hydratée majoritaire (environ 60% en volume).

La carbonatation des C-S-H donne naissance à des carbonates de calcium, à un matériau siliceux hydraté (gel de silice) et à de l'eau libre. L'équation de carbonatation des C-S-H peut s'écrire donc :



Mais plus récemment, Morendeu et al. (2014) ont conclu que les réactions de carbonatation des silicates de calcium hydratés (CSH) ne libèrent pas de l'eau comme c'est le cas pour l'hydroxyde de calcium (CH), ils ont donné la forme suivante pour la carbonatation des C-S-H :



Les C-S-H confèrent au béton l'essentiel de sa résistance mécanique, mais ont un pouvoir tampon sur le pH de la solution interstitielle plus faible que la portlandite. Par conséquent, leur prise en compte dans le mécanisme de carbonatation n'est pas indispensable. Néanmoins, ces hydrates induisent d'importantes modifications de la microstructure qui doivent, quant à elles, être prise en compte. De plus, le fait que les CSH consomment du CO_2 , cela peut interférer avec la carbonatation de la portlandite. Ce point a été intégré dans les modèles de Thiéry (2005).

En présence de pouzzolanes, la quantité des CSH qui se carbonate suivant la réaction (1.9) n'est pas seulement celle produite par l'hydratation du clinker, mais aussi celle résultante de l'activité pouzzolanique, des oxydes SiO_2 qui sont en état amorphe dans la pouzzolane (Papadakis et al., 1992).

La vitesse initiale de carbonatation est tout à fait semblable, mais tandis que les C-S-H continuent de se carbonater, la carbonatation des CH se ralentit et s'arrête. Cela est dû au fait que les CH deviennent de moins en moins accessibles pour la carbonatation (Dunster, 1989; Morandeu et al., 2014), comme illustré dans la figure 1.4.

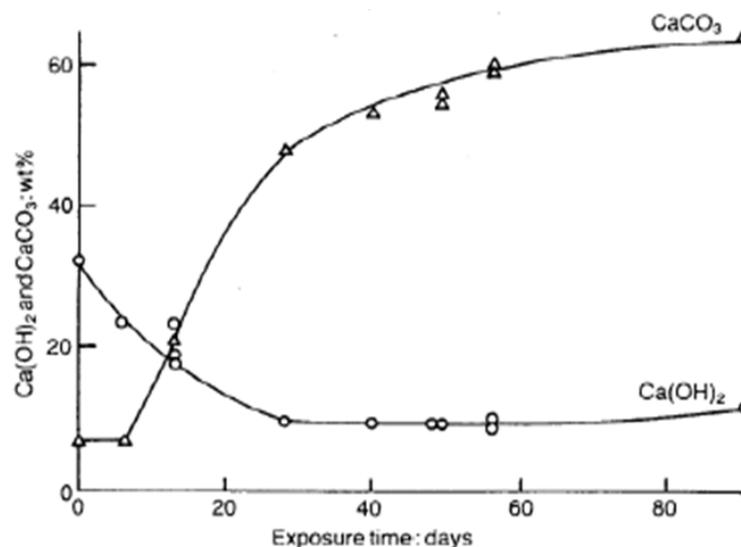


Figure 1.4 —Variation des quantités de portlandite et de carbonate de calcium avec la durée d'exposition en air (20°C, 65 %HR) (Dunster, 1989)

1.4.3 Carbonatation des aluminates

Ils sont présents sous la forme de trois composés (C_3AH_6 , C_2AH_8 , C_4AH_{13}) et sont sensibles à la carbonatation. Des études, notamment [Sauman et Lach \(1972\)](#), montrent qu'ils donnent naissance à des carbonates de calcium, un gel d'alumine ($Al(OH)_3$) et de l'eau.

D'une manière générale, la carbonatation de l'ettringite et du monosulfoaluminate de calcium produit du gypse qui est très soluble dans l'eau et très réactif. Elle peut donc conduire à des réactions secondaires. Ainsi, si les produits de carbonatation se trouvent en présence de portlandite et d'eau, il peut reformer de l'ettringite à partir des aluminates et du gypse libéré par la carbonatation. Ces hydrates sont présents en petite quantité dans les matériaux cimentaires usuels à teneurs en sulfate et/ou en aluminates modérées. C'est pourquoi leur carbonatation est généralement négligée dans la modélisation, il en est de même pour les alcalins K_2O et Na_2O ([Thiery, 2005](#)).

1.5 Paramètres influents la carbonatation

La carbonatation du béton est un phénomène physico-chimique compliqué. Le processus inclut la diffusion du CO_2 dans la phase gazeuse aux pores du béton, sa dissolution dans la phase aqueuse de ces pores, la dissolution des $Ca(OH)_2$ dans l'eau des pores, la diffusion du $Ca(OH)_2$ dissout à travers les pores humides, sa réaction avec le CO_2 dissout, et la réaction du CO_2 avec les CSH et avec les C_3S et C_2S non encore hydratées. En plus, il y a un processus en parallèle. Ce processus inclut l'hydratation des matériaux cimentaires et la réduction de la porosité du béton. Le processus de carbonatation indique que les facteurs contrôlant la carbonatation sont la diffusivité du CO_2 et la réactivité du CO_2 avec le béton. La diffusivité du CO_2 dépend du système poreux du béton durci et des conditions d'exposition. Le système poreux du béton dépend du type et du contenu du mélange, du rapport eau/liant, et du degré d'hydratation. Les conditions d'expositions principales liées à la carbonatation sont la concentration du CO_2 et l'humidité relative. La réactivité du CO_2 avec le béton dépend principalement du type et du contenu du mélange, du rapport eau/liant, et du degré d'hydratation. Ainsi, les facteurs influant le plus la carbonatation du béton sont le type et le contenu du mélange, le rapport eau/liant, et le degré d'hydratation ([Jiang et al., 2000](#); [Papadakis et al., 1992](#); [Thiery, 2005](#)). Ces facteurs ainsi que d'autres vont être détaillés dans les paragraphes qui suivent.

1.5.1 Effet du dosage en ciment

La vitesse de carbonatation varie à l'inverse du dosage en ciment. Plusieurs auteurs se sont mis d'accord sur ce point (Venuat et Alexandre, 1968a, Parott, 1987, Duval, 1992). Si le dosage en ciment est réduit en dessous de 300kg/m^3 , la vitesse de carbonatation augmente plus rapidement (figure. 1.5). Cette propriété est la conséquence de la diminution de la compacité du matériau. Donc, plus le dosage en ciment est élevé, plus la réserve en hydrates susceptibles de se carbonater est grande. Les dosages élevés en ciment, du moins à une valeur seuil, tentent à freiner la vitesse de pénétration du gaz carbonique à condition que la cure soit suffisante (Houst, 1992).

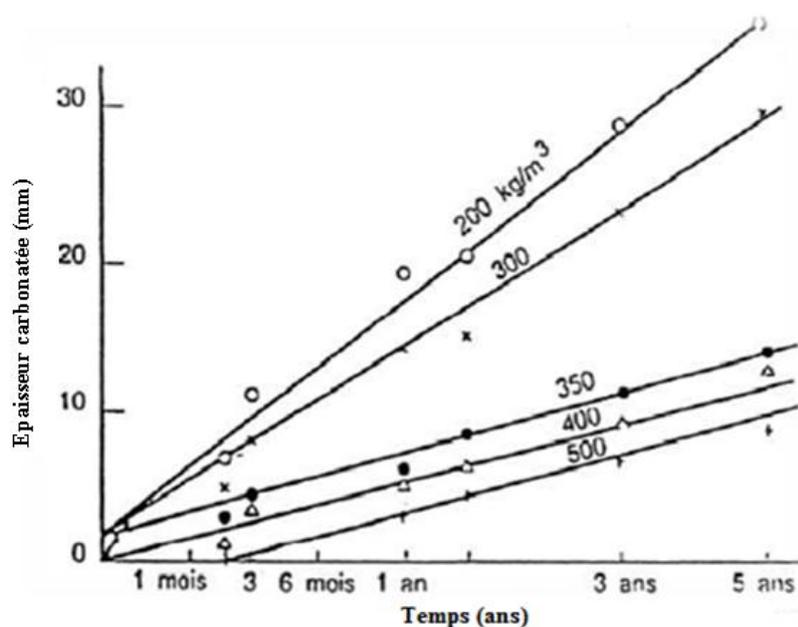


Figure 1.5 — Relation entre l'épaisseur carbonatée et le dosage en ciment (Duval, 1992)

1.5.2 Effet du type de ciment

Les caractéristiques chimiques de la matrice cimentaire sont fortement liées à la nature du ciment utilisé. Il est couramment rapporté dans la littérature que l'ajout de pouzzolanes (cendres volantes et laitiers) augmente la profondeur de carbonatation: à une échéance donnée, la profondeur carbonatée est supérieure pour les ciments composés (Papadakis et al., 1992; Chaussadent 1999; Khan et Lynsdale, 2002; Burden, 2006). Plus le taux d'ajouts est élevé et plus la profondeur de carbonatation est importante.

La figure 1.6 montre les résultats de profondeur carbonatée mesurée par pulvérisation de phénolphtaléine par (Ounoughi et al., 2000). Il est constaté que l'effet est d'autant plus important pour le ciment aux laitiers (CEMIII) par rapport au ciment portland (CEM I).

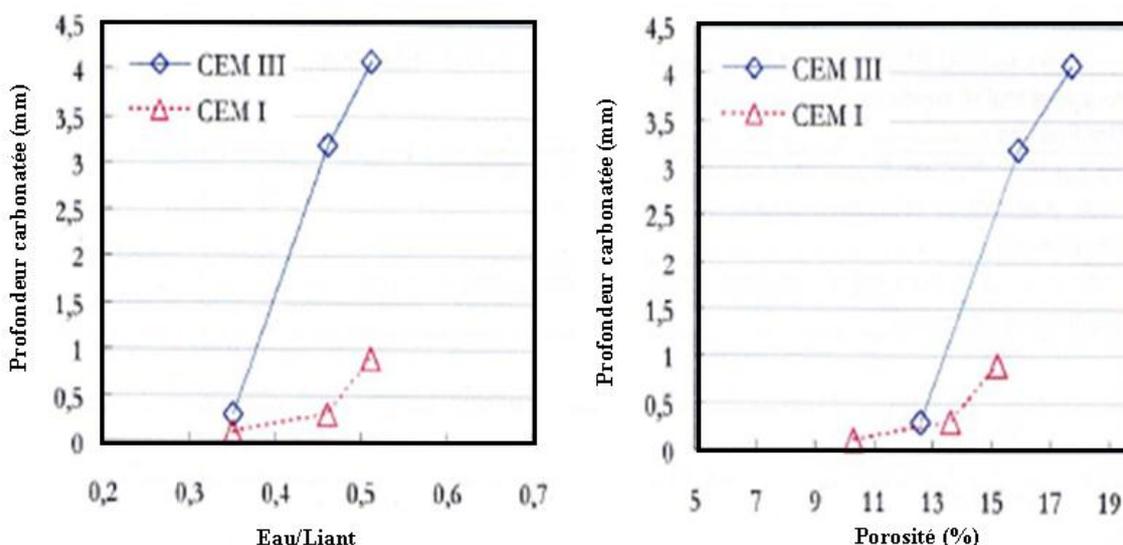


Figure 1.6 — Influence de la nature du ciment sur la profondeur de carbonatation (Ounoughi et al., 2000)

1.5.3 Influence des additions minérales

Les additions minérales sont de plus en plus souvent utilisées par les producteurs de bétons. Puisqu'il s'agit généralement de sous-produits industriels, leur prise en compte dans la formulation des bétons pour le respect du dosage minimum en ciment revêt un intérêt particulier sur le plan économique (réduction du coût des matières premières) et écologique (réduction des émissions de CO₂ et de la consommation de ressources non renouvelables).

Les ajouts cimentaires influent sur la carbonatation du béton par deux phénomènes (Schubert, 1987; Park, 1995; Mindess et al., 2002; Burden, 2006; Younsi, 2011; Chaussadent, 1999; Borges et al., 2010):

- La consommation de portlandite due à la réaction pouzzolanique, qui implique qu'une petite quantité de CO₂ est suffisante pour carbonater les hydrates restants. Il a été observé que la profondeur de carbonatation est élevée quand la quantité de Ca(OH)₂ présente est faible (Bier, 1986). En conséquence, la présence de l'ajout cimentaire cause une augmentation de la vitesse de carbonatation.
- La modification de la porosité et la perméabilité du béton, qui conduit à une amélioration dans les propriétés du transport des bétons pouzzolaniques en certaines conditions (pouzzolane active, longue durée de cure, etc...).

La plupart des recherches antérieures confirment que la profondeur de carbonatation augmente avec l'ajout de la pouzzolane dans le béton. Cependant, quelques auteurs affirment qu'il n'y a pas de différence significative dans la profondeur de carbonatation si le béton avec ou sans ajouts a les mêmes résistances à la compression (Hobbs, 1988). Cette affirmation

n'est pas toujours valable comme il a été observé avec le métakaolin et la fumée de silice. La résistance à la compression au-delà de 50 MPa peut réduire significativement la profondeur de carbonatation naturelle, pas seulement pour le ciment Portland ordinaire, mais aussi pour les bétons avec cendres volantes (Sulapha et al., 2003). Mais cela n'est pas toujours le cas pour des conditions accélérées ($\text{CO}_2 > 4\%$), pour lequel même les bétons à haute résistance avec des pouzzolanes très actives peuvent rester vulnérables devant la carbonatation. Pour des quantités de pouzzolane relativement faibles, les différences sont négligeables (Collepari et al., 2004), mais pour des quantités élevées de pouzzolane, il devient nécessaire de diminuer le rapport eau-liant pour maintenir la même performance de carbonatation (Atis, 2003).

La présence du laitier de haut fourneau avec des pourcentages élevés ($>50\%$), augmente la profondeur de carbonatation (Bouikni et al., 2009; Gruyaert et al., 2013). Quand la durée de cure est prolongée au-delà de 7 jours, la carbonatation des bétons contenant plus de 50% de laitier de haut fourneau n'est pas significativement plus élevée que celle de béton en ciment ordinaire (Sulapha et al., 2003).

L'allure générale du béton en fumée de silice est l'augmentation de la profondeur de carbonatation, spécialement pour des taux élevés ($>10\%$). L'addition de 10% de fumée de silice réduit la profondeur de carbonatation de 9.7%, comparée avec 17.3% et 18.7% de réductions observées en substituant 10% de cendres volantes classes F et C respectivement (Sotiris et al., 2014).

Papadakis (2000) et Sotiris et al. (2014) ont trouvé qu'en utilisant les ajouts cimentaires comme remplacement des agrégats, la profondeur de carbonatation diminue avec l'augmentation de l'ajout. Tandis qu'on les utilisant comme remplacement du ciment, elle augmente avec l'augmentation de l'ajout cimentaire (Fig.1.7). L'état fréquemment cité est que la fumée de silice ou les cendres volantes diminuent la quantité de portlandite par la réaction pouzzolanique, ils peuvent augmenter le taux de carbonatation seulement pour le remplacement du ciment. Cela parce que non seulement les CH sont carbonatées, mais aussi les CSH produites par la réaction pouzzolanique. En cas de remplacement des agrégats, la quantité des constituants carbonatables (CH et CSH) reste la même, de plus la porosité diminue ce qui diminue le taux de carbonatation.

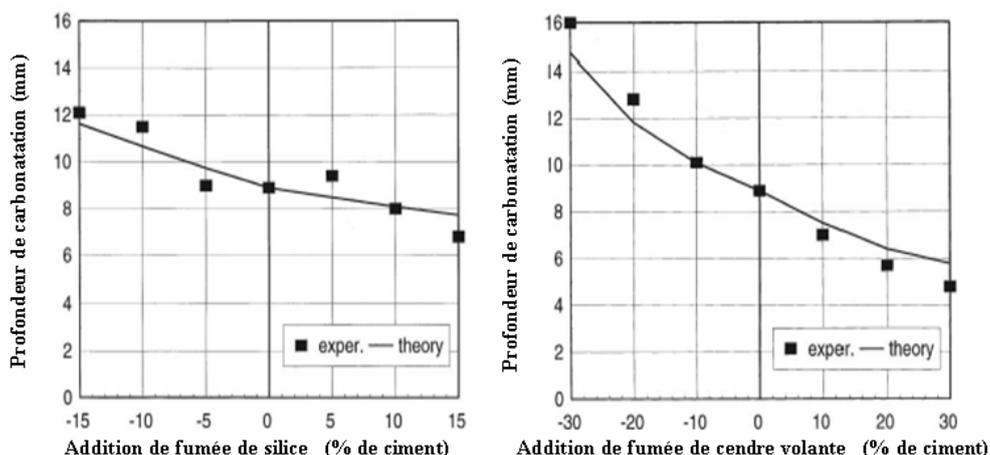


Figure 1.7 — Résultats expérimentaux et modèle prédictif de profondeur de carbonatation avec substitution de quantité de fumée de silice et de cendre volante (Papadakis, 2000)

1.5.3.1 Effet des cendres volantes sur la carbonatation

Les cendres volantes sont des sous produits issus de la combustion de charbon pulvérisé en présence ou non de combustibles, elles ont été largement utilisées comme ajouts cimentaires dans des bétons normaux ou de hautes performances. Les cendres volantes améliorent la performance et la qualité des bétons frais et durcis. Pour les bétons frais, les cendres volantes affectent les propriétés plastiques du béton par l'amélioration de l'ouvrabilité, la réduction de la demande en eau et de la ségrégation et la diminution de la chaleur d'hydratation. Pour les bétons durcis, les cendres volantes augmentent la résistance à la compression, réduisent la perméabilité et la corrosion des armatures, augmentent la résistance aux sulfates et réduisent les réactions alcali-agrégats (Mehta and Monteiro, 2006).

Il n'y a pas un accord général entre les chercheurs comment l'utilisation des cendres volantes dans le béton tend à diminuer le taux de carbonatation (Atis, 2003). Il y a quelques contradictions entre ces publications. Ho et Lewis (1983) ont rapporté que la vitesse de carbonatation dans les bétons avec cendres volantes est plus élevée que celle des bétons sans ajouts. Les profondeurs de carbonatation des bétons aux cendres volantes diminuent significativement avec l'augmentation de la résistance du béton. Ogha et Nagataki (1989) et Pedro Faustino et al. (2013) ont conclu que le coefficient de carbonatation augmente avec l'augmentation du taux de substitution des cendres volantes. Thomas et Matthews (1992) ont observé que l'augmentation de la carbonatation est significative, lorsque le taux de substitution des cendres volantes est supérieur à 30%. Dans le même sens, khunthongkeaw et al. (2006) ont observé que le coefficient de carbonatation augmente avec le contenu en cendres volantes (au-delà de 30%) et le rapport E/L. Tandis que Atis (2003) a montré que la carbonatation d'un

béton contenant 50% de cendres volantes de substitution est plus faible ou similaire que celle d'un béton témoin. Les résultats des études faites par [Shi et al. \(2009\)](#) sur un béton de haute performance incorporant les cendres volantes, ont montré que l'effet de substitution au-delà de 60% de cendres volantes sur la résistance à la compression, la perméabilité au gaz et la carbonatation est significativement influencé par les rapports E/L. L'augmentation du taux de substitution des cendres volantes et du rapport E/L avec la diminution de la durée de la cure humide fait augmenter la profondeur de carbonatation ([Burden, 2006](#)) (figure 1.8). Plus récemment, [Sotiris et al. \(2014\)](#) ont observé que l'incorporation des cendres volantes de classe C au ciment Portland CEM I conduit à une meilleure performance sous l'exposition à la carbonatation que les cendres volantes de la classe F.

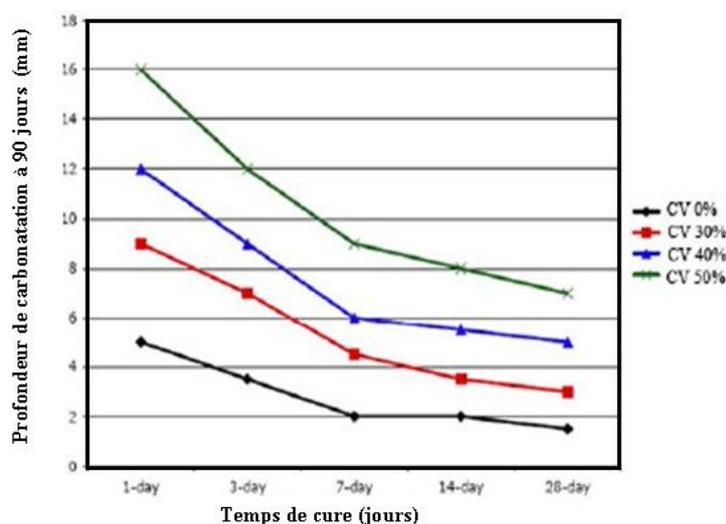


Figure 1.8 — Effet du taux de substitution du ciment par les cendres volantes ([Burden, 2006](#))

1.5.3.2 Effet du laitier des hauts fourneaux sur la carbonatation

Les laitiers de haut fourneau sont des co-produits formés lors de l'élaboration de la fonte à partir de minerai de fer. Selon le processus de refroidissement du laitier en fusion, on distingue deux familles :

- le laitier vitrifié obtenu par un refroidissement brutal à l'eau, lui confère une structure vitreuse. Cela lui permet de développer des propriétés hydrauliques. Ce laitier refroidi à l'eau est appelé 'laitier granulé'
- le laitier cristallisé, obtenu par un refroidissement lent à l'air, est une roche dure artificielle et chimiquement stable.

[Litvan et Mayer \(1986\)](#) ont montré que des bétons à base de ciment au laitier de haut-fourneau se carbonatent, après dix-huit années d'exposition en conditions naturelles, d'environ 70 % plus que des bétons au ciment Portland.

Selon Osborne (1986), des bétons à 70 et 80 % de substitution massive du ciment Portland par du laitier de haut-fourneau se carbonatent, en conditions naturelles, beaucoup plus que des bétons au seul ciment Portland. L'auteur conclut dans d'autres de ses travaux (Osborne, 1989; Osborne, 1999) que des bétons à 50 % de substitution du ciment Portland par du laitier de haut-fourneau montrent la même résistance à la carbonatation naturelle que des bétons au ciment Portland. Thomas et al. (1990) sont arrivés à la même conclusion qu'Osborne concernant des bétons à 50 % de substitution par du laitier de haut-fourneau.

D'après Bouikni et al. (2009), des bétons à 65 % de substitution massive du ciment Portland par du laitier de haut-fourneau se carbonatent, en conditions naturelles, entre 15 et 30 % plus que des bétons à 50 % de substitution.

Sisomphon et Franke (2007) et Gruyaert et al. (2013) ont observé que la carbonatation des bétons aux laitiers est liée aux proportions du mélange du béton et des conditions de cure. Les bétons aux volumes élevés de laitiers ont une profondeur de carbonatation plus élevée que celle d'un béton témoin (Sulapha et al., 2003). Quand la durée de cure initiale avant les essais de carbonatation augmente, la profondeur de carbonatation diminue. La résistance et la carbonatation des bétons ayant des taux élevés de laitier sont strictement liés aux propriétés du béton ; telles que le rapport eau-liant, le taux de substitution du laitier et la durée de cure (Parott, 1996; Sulapha et al., 2003; Oner et Akuzy, 2007; Sisomphon et Frank, 2007; Gruyaret et al., 2013 et Zhang et al., 2013) comme le montre la figure 1.9.

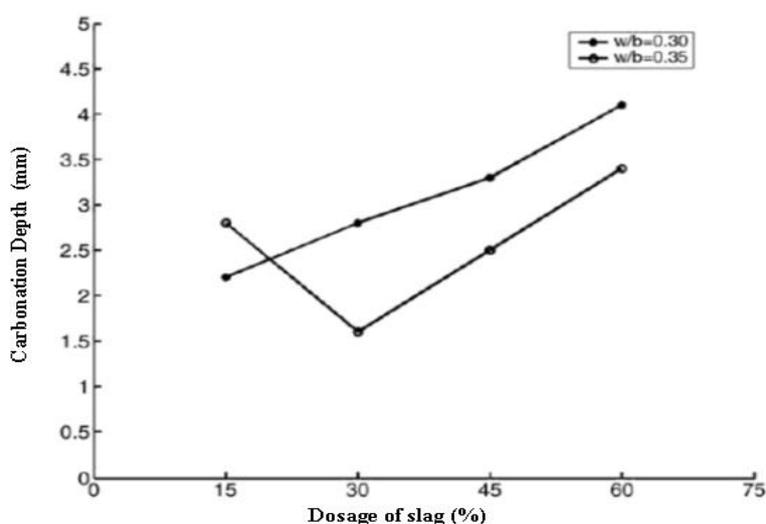


Figure 1.9—Influence des proportions du laitier sur la profondeur de carbonatation à 28 jours (Zhang et al., 2013)

1.5.4 Effet du rapport E/L

Le rapport Eau/Liant a une grande importance sur l'interconnexion du réseau poreux des bétons et par conséquent sur la perméabilité et la diffusivité du CO_2 au sein du béton. De nombreuses recherches montrent que la profondeur de carbonatation, à échéance donnée, augmente avec la porosité et avec le rapport Eau/Liant (Parott, 1987; Ounoughi et al., 2000 et Baroghel-Bouny, 2004) comme montre la figure 1.10.

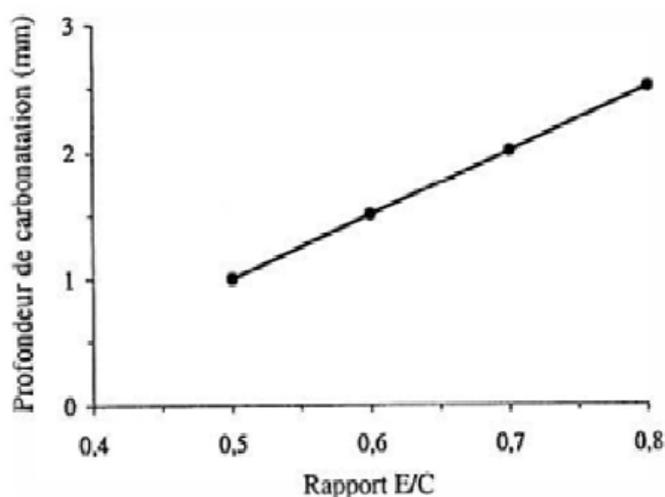


Figure 1.10 — Influence du rapport E/C sur la carbonatation des pâtes de ciment (Baroghel-Bouny, 2004)

1.5.5 Influence de la concentration en CO_2

L'augmentation de la concentration en CO_2 induit un accroissement de la vitesse de carbonatation, puisqu'on observe une augmentation de la vitesse de carbonatation dans des endroits où la teneur en CO_2 est élevée (tunnels, garages, cheminées,...) (Nischer, 1984). Cependant, les variations de la teneur en CO_2 de l'air ont une influence sur les bétons de résistance modérée (< 30 MPa environ). Au-delà, la teneur en CO_2 n'a plus d'influence sur la carbonatation (Ollivier et Vichot, 2008). La figure 1.11 représente trois types d'échantillons sous différentes concentrations en CO_2 (3%, 5% et 10%) (Yoon et al., 2007).

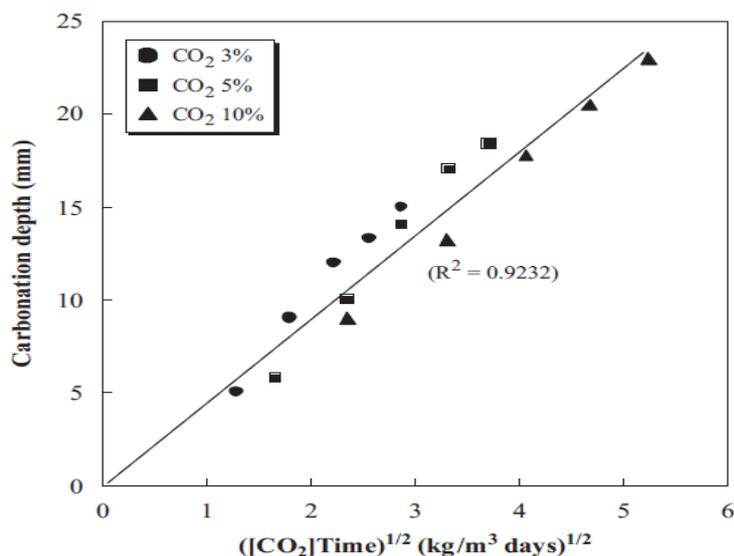


Figure 1.11 — Influence de concentration du CO₂ sur la carbonatation (Yoon et al., 2007)

1.5.6 Effet de l'humidité relative

L'humidité relative (HR) de l'air avec lequel le matériau cimentaire est en équilibre, est un des facteurs prépondérant de la carbonatation. Bakker (1988) a constaté que la diffusion du CO₂ dans un milieu liquide est environ 10⁴ fois plus faible que dans un milieu gazeux, et donc la pénétration du CO₂ dans un milieu liquide est pratiquement nulle; d'autre part, si un béton est placé dans un environnement très sec, la quantité d'eau présente dans les pores est insuffisante pour dissoudre le dioxyde de carbone. La cinétique de carbonatation est donc faible à très faible lorsqu'un béton est immergé ou lorsqu'il est placé dans un environnement très sec.

La vitesse maximale de carbonatation à 20°C pour les bétons traditionnels est obtenue pour une humidité relative comprise entre 40 et 60 %. Ces conditions optimales sont définies pour un béton durci où les transferts hydriques à l'intérieur du matériau sont en équilibre avec l'hygrométrie extérieure (Verbeck, 1958). Par ailleurs, en comparant plusieurs résultats de la littérature (Verbeck, 1958; Papadakis et al., 1991; Thiery, 2005), on relève des vitesses de carbonatation maximales pour des optimums d'humidité relative différents (Fig.1.12).

Les écarts observés sur la Figure 1.12 entre les résultats de la littérature proviennent des modes opératoires qui diffèrent d'une étude à l'autre. Les échantillons propres à chaque auteur (rapports E/C différents) n'ont pas été soumis aux mêmes conditions environnementales (taux de CO₂, température et HR), ni aux mêmes durées d'exposition, ... Par conséquent, les degrés de saturation varient d'un matériau à l'autre (Auroy, 2014).

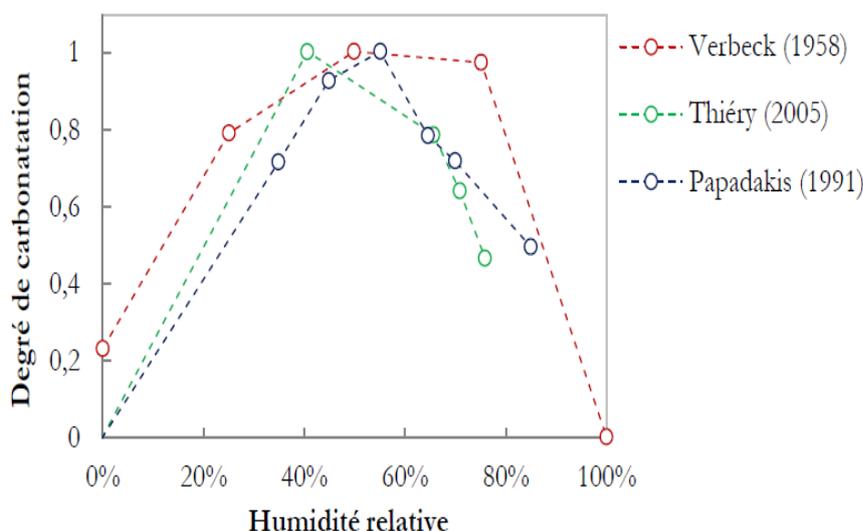


Figure 1.12 — Degré de carbonatation, à 20°C, en fonction de l'HR mesuré par différents auteurs (Auroy, 2014)

1.5.7 Effet de la température

L'effet de la température sur la vitesse de carbonatation est très discutable. D'une part, une élévation de la température accélère les réactions chimiques (thermo-activation selon la loi d'Arrhenius). D'autre part, une augmentation de la température diminue la solubilité du CO₂ et diminue sa concentration dans la phase gazeuse (Thiéry, 2005). Néanmoins, il est généralement admis qu'une élévation de la température engendre une accélération de la carbonatation (CIMbéton, 2006). Hyvert (2009) a démontré que le traitement thermique non seulement il a un effet bénéfique sur les résistances mécaniques du béton à court et à moyen terme, mais peut aussi réduire la vitesse de carbonatation. L'élévation de température augmente la vitesse de réaction du dioxyde de carbone et des composants du ciment hydraté mais aussi le séchage. Cependant, dépendant du degré de séchage, les températures élevées peuvent augmenter ou diminuer le taux de carbonatation (Roberts, 1981; Parrott, 1987).

Drouet (2010) a permis de montrer, à partir d'essais conduits à 20, 50 et 80°C sur des échantillons de CEM I, que la thermoactivation du transport est le facteur prédominant dans l'effet de la température vis-à-vis de la solubilité rétrograde des réactifs. Cette conclusion n'est cependant pas applicable aux ciments composés (CEM V et mélange Bas-pH) où les profondeurs carbonatées maximales sont mesurées pour une température médiane de 50°C. L'auteur en conclut alors qu'il existe une température de carbonatation optimale et qu'il est probable qu'au-delà d'une certaine température, la diminution de la solubilité des hydrates est telle que leur solubilité rétrograde devient le facteur limitant.

Wang et al. (2017) rapportent que la profondeur de carbonatation augmente avec l'augmentation de la température d'exposition (Fig. 1.13).

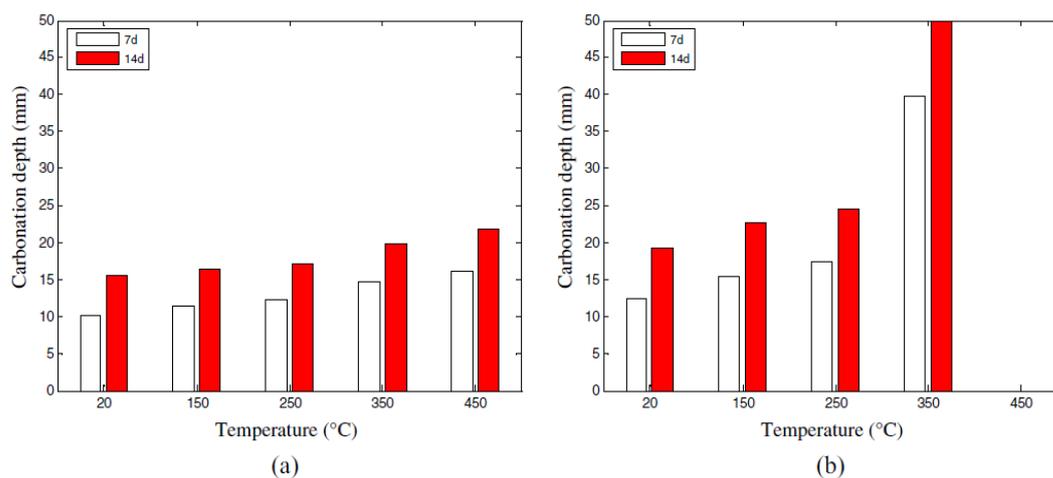


Figure 1.13 — Profondeur de Carbonatation des bétons sans et avec cendres volantes sous l'effet de la température (Wang et al., 2017)

1.5.8 Effet de la cure d'hydratation

La cure influence notablement la porosité. En effet, une cure inadaptée conduit à une hydratation insuffisante de la couche superficielle de béton par manque d'eau, ce qui augmente la porosité et, par conséquent, la sensibilité à la carbonatation. La réduction du temps de cure peut donc avoir des conséquences néfastes à long terme alors qu'une cure humide prolongée limite la profondeur de carbonatation. Il a été suggéré par quelques auteurs (Thomas et Matthews, 1992; Ho et Lewis, 1987; Nagataki et Malhotra, 1986) qu'une petite diminution de carbonatation est atteinte lorsque la période de cure dépasse 7 jours.

Fattuhi (1988) compare la carbonatation de béton ayant subi une cure durant 1, 3, 5, 7 et 28 jours dans l'eau à 23° C (Fig. 1.14). Ces échantillons présentent respectivement un taux de carbonatation de 66, 53, 42, 39 et 17 % par rapport aux mêmes échantillons conservés dans l'air (HR variant entre 22 % et 63 %).

Une cure humide permet en effet une hydratation plus complète du béton d'enrobage, donc la fermeture de la porosité et la diminution du coefficient de diffusion du CO₂. Cette sensibilité au mode de cure peut être amplifiée par l'augmentation de la proportion d'additions utilisée en substitution du ciment. Pour les additions à caractère pouzzolanique telles que les cendres volantes, on peut craindre en outre la consommation de la portlandite par la réaction pouzzolanique.

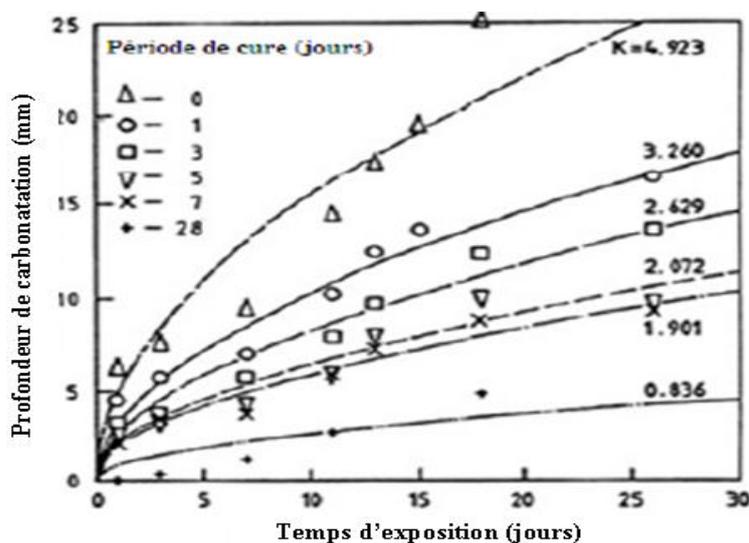


Figure 1.14 — Profondeur de carbonatation pour un béton ayant subi différents temps de cure (Fattuhi, 2008)

Une étude systématique a été menée sur ces aspects (Burden, 2006) pour tenter de quantifier l'augmentation du risque lié à la cure, pour des bétons aux cendres volantes. La profondeur carbonatée après 90 jours d'essai accéléré (à 1% de CO₂) augmente avec le taux de substitution du ciment par les cendres; mais tous les liants, y compris le témoin, montrent une forte sensibilité à la durée de cure humide.

1.5.9 Effet de la résistance à la compression

La résistance à la compression est en relation quasi linéaire avec la profondeur de carbonatation, au-delà de 50 MPa, la carbonatation devient négligeable (Tsukayama et al., 1980). Cette relation inverse est fortement due à la réduction de la porosité. Sulapha et al. (2003) ont démontré que le coefficient de carbonatation augmente avec la diminution de la résistance à la compression, donc cette dernière peut être un bon indicateur pour la vitesse de carbonatation des bétons avec et sans ajouts cimentaires (Fig. 1.15).

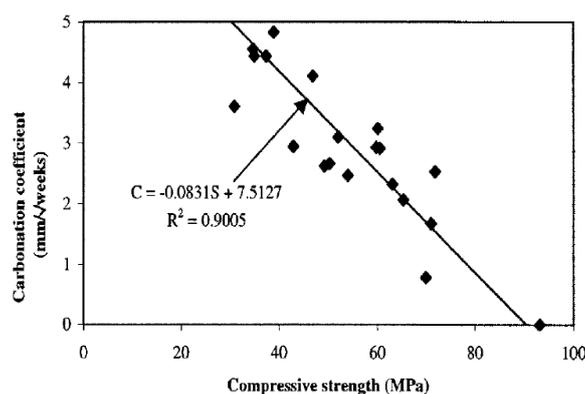


Figure 1.15 — Relation entre le coefficient de carbonatation et la résistance à la compression (Sulapha et al., 2003)

1.5.10 Influence de l'adjuvant

Aucune influence d'un superplastifiant n'est notée sur la cinétique de la carbonatation. [Peiming et al. \(2001\)](#) ont rapporté qu'en ajoutant un superplastifiant, non seulement le dosage en cendres volantes peut accroître ; mais il n'y a aussi aucun effet sur la résistance à la carbonatation. L'étude réalisée par [Dakmouche \(2009\)](#) n'a montré aucune différence significative entre le béton formulé à base d'un CEM I avec et sans adjuvant (Fig. 1.16).

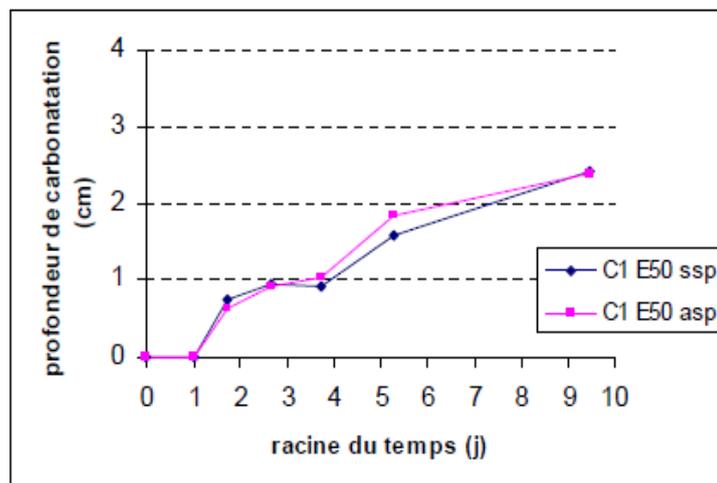


Figure 1.16 — Comparaison de la profondeur de carbonatation d'un béton avec superplastifiant et d'un même béton sans super plastifiant ([Dakmouche, 2009](#))

1.5.11 Influence de la paroi

Durant la mise en place du béton, une partie des granulats vient s'immobiliser contre les parois du coffrage et, au cours de la vibration, le centre des gros granulats ne peut pas s'approcher plus près des parois du coffrage que de leur rayon. Le volume occupé par le vide entre les gros granulats est donc plus important que dans le béton de masse ([Sadouki, 1987](#)) (Figure 1.17). Ce phénomène conditionne en partie la microstructure du béton de peau qui est plus riche en particules fines et en pâte de ciment. Cette zone est plus poreuse, ce qui contribue à faciliter la pénétration du dioxyde de carbone ([Miragliotta, 2000](#)) ; mais elle est aussi plus riche en hydrates, ce qui tend à ralentir la progression de la carbonatation et permet de maintenir un pH élevé plus longtemps. Cette deuxième caractéristique chimique est bien sûr à nuancer si la cure hydrique est insuffisante.

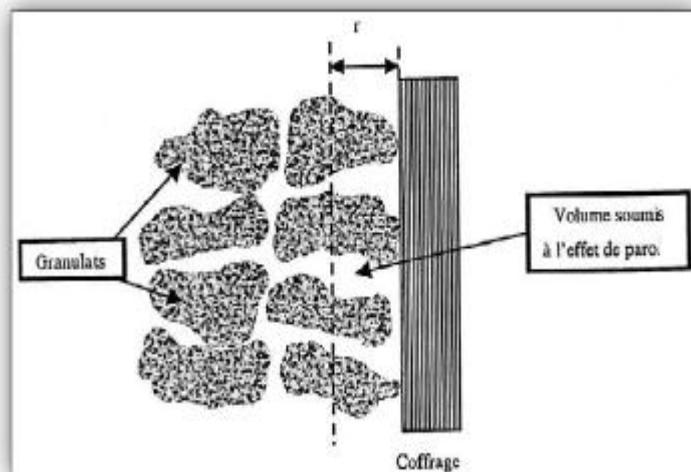


Figure 1.17 — Effet de paroi au voisinage d'un coffrage (Sadouki, 1987)

1.6 Conséquences de la carbonatation sur le béton

Du point de vue du béton seul, on considère que la carbonatation a un effet bénéfique : elle améliore les performances mécaniques et limite la pénétration d'agents agressifs en réduisant la porosité ; on parle d'un effet de « colmatage » des pores. Cependant, la diminution du pH de la phase aqueuse des pores que provoque la carbonatation, favorise la dépassivation de la couche protectrice des aciers et par conséquent favorise la corrosion des armatures. Nous présentons ci-dessous les principales conséquences de la carbonatation sur le béton armé.

1.6.1 Diminution de la porosité

La carbonatation de la portlandite entraîne une augmentation de volume. Si l'on tient compte des produits solides, l'augmentation de volume par rapport à Ca(OH)_2 est, selon la structure cristalline du carbonate de calcium formé (Calcite, Aragonite et Vatérite).

La distribution de la taille des pores d'une pâte de ciment durcie est modifiée par la carbonatation (Villain et Thiery, 2005). Elle montre une notable réduction du volume des pores après carbonatation et ainsi une diminution de la porosité. Une chute de porosité de 31,6 % à 25,6 % après 32 mois de carbonatation naturelle d'un CME I de $E/C = 0,3$ (Pihlajavaara, 1968).

Ngala et Page (1997) ont représenté l'évolution du coefficient de diffusion des chlorures dans des pâtes de ciment sains et carbonatées en fonction de la porosité capillaire (Figure 1.18). Dans ce cas précis, la carbonatation entraîne une augmentation des coefficients de diffusion.

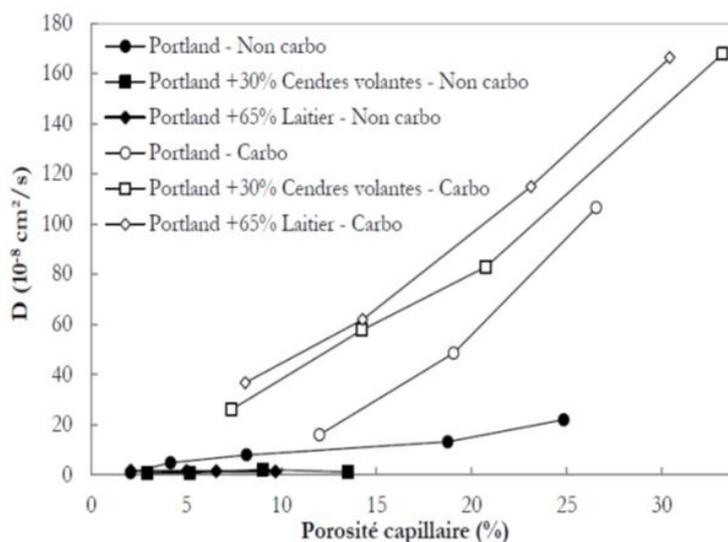


Figure 1.18 — Coefficient de diffusion des chlorures dans des pâtes de ciment saines et carbonatées (Ngala & Page, 1997)

1.6.2 Augmentation de la résistance mécanique du béton

La réduction de la porosité entraîne une augmentation de la résistance mécanique du béton. La calcite qui s'est formée consolide la structure de la pâte de ciment durcie. Il est bien connu que le carbonate de calcium qui se forme par carbonatation de la portlandite est un excellent liant. C'est lui qui assure l'essentiel de la résistance mécanique des mortiers à la chaux. La résistance à la compression et à la flexion de bétons au ciment Portland conservés dans une atmosphère de CO_2 peut augmenter jusqu'à 30 % par rapport aux mêmes bétons conservés en atmosphère exempte de gaz carbonique (Lea, 1970). L'augmentation de résistance est d'autant plus marquée que le rapport E/C du béton est faible (Houst et al., 1989).

1.6.3 Augmentation de la teneur en eau

La carbonatation induit localement une accumulation d'humidité dans les pores: en effet, la carbonatation des CH et des C-S-H libère une partie de l'eau de structure des hydrates. Cette eau libérée peut participer à la composition de la solution interstitielle et contribuer au transport d'agents agressifs (Thiery, 2005).

On observe expérimentalement sur matériau carbonaté une augmentation de la teneur en eau évaporable par séchage à 105°C , ainsi qu'une augmentation du taux de saturation (Hyvert, 2009) (Figure 1.19). Cette eau relarguée peut évidemment participer à la composition de la solution interstitielle et contribuer au transport d'agents agressifs.

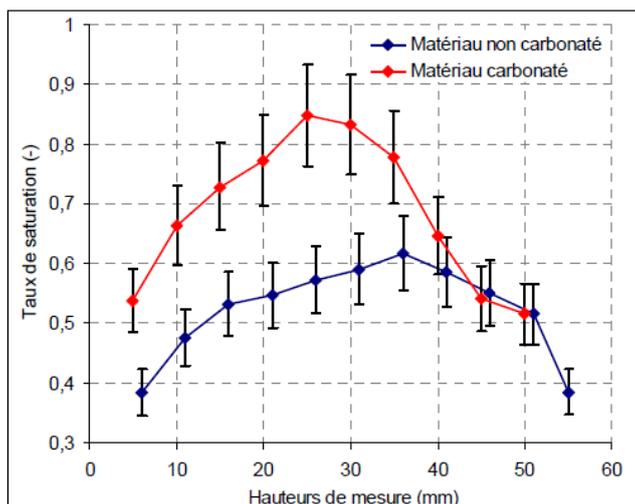


Figure 1.19 — Mesure par gammadensimétrie du taux de saturation (Hyvert, 2009)

1.6.4 Evolution des propriétés de transfert

L'évolution de la microstructure, qui accompagne la carbonatation, a un impact sur les propriétés de transfert des matériaux cimentaires : coefficients effectifs de diffusion aux ions et aux gaz et perméabilité aux gaz et à l'eau liquide.

Le coefficient effectif de diffusion aux gaz (oxygène ou hydrogène) est diminué après la carbonatation de matériaux à base de ciment CEM I (Daimon et al., 1971). Quant à l'impact de la carbonatation sur la perméabilité, les essais menés par Thiery (2005) montrent que la carbonatation provoque un accroissement de la perméabilité intrinsèque aux gaz et à l'eau liquide d'un béton assez poreux ($E/C > 0,45$), et une réduction pour un béton de porosité modérée. Son effet sur la perméabilité intrinsèque des bétons les moins poreux est négligeable.

1.6.5 Retrait de carbonatation

La carbonatation de la portlandite entraîne une augmentation de volume des solides de 3 % à 19 % selon le produit de réaction obtenu (Valérite, Calcite ou Aragonite), ce qui nous amène à penser qu'il s'agit d'un gonflement et non d'un retrait. Pourtant toutes les expériences mettent en évidence un « retrait ». Ce phénomène peut être attribué à la perte d'eau provoquée par la réaction, du fait que la quantité d'eau libérée lors de cette réaction s'accompagne d'un retrait qui est du même ordre de grandeur qu'un retrait infligé par le départ de la même quantité d'eau sans carbonatation (Houst, 1992). Plusieurs autres hypothèses ont été avancées dans le but d'expliquer le retrait de carbonatation qui est un phénomène assez complexe (Powers,

1962, Hunt et Tomes, 1962). Ces hypothèses ont permis de mieux comprendre ce phénomène mais pas d'aboutir à une conclusion déterminée et générale.

1.6.6 Chute du pH et corrosion des armatures

La solution interstitielle est une solution alcaline de pH proche de 13. Ce milieu basique assure la passivation des aciers d'armature. Or, la carbonatation du béton entraîne une baisse du pH à une valeur d'environ 9 pour laquelle le potentiel électrique des armatures chute vers les valeurs négatives favorisant leur corrosion. La pathologie qui apparaît est une corrosion généralisée se traduisant par une diminution progressive de la surface des armatures. De plus, la formation de rouille expansive exerce une pression sur le béton entourant l'armature. Cette pression est souvent suffisante pour provoquer l'éclatement du béton d'enrobage.

1.7 Corrosion des armatures

Dans des conditions normales, les armatures enrobées d'un béton compact et non fissuré sont protégées naturellement des risques de corrosion par un phénomène de passivation qui résulte de la création, à la surface de l'acier, d'une pellicule protectrice $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{CaO}$ (dite de passivation).

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

1.7.1 Mécanisme de la corrosion

La solution dans les pores du béton est une solution alcaline qui a un pH proche de 13. Dans un tel milieu, l'acier est passivé. Or, la carbonatation du béton entraîne une baisse du pH à une valeur d'environ 9 (figure 1.20). Ainsi, le film passif est détruit. Dans ce milieu, l'armature voit alors son potentiel électrique chuter vers les valeurs négatives. Elle se retrouve dans une zone de corrosion qui se traduit par la formation de produits expansifs avec une augmentation de volume. Les variations volumiques induisent des contraintes dans le béton d'enrobage et au-delà d'un certain seuil, l'apparition de petites fissures puis éclatement de la couche d'enrobage. Apparaît ensuite une corrosion généralisée se traduisant par une diminution progressive de la section des armatures et menaçant la capacité portante de l'ouvrage.

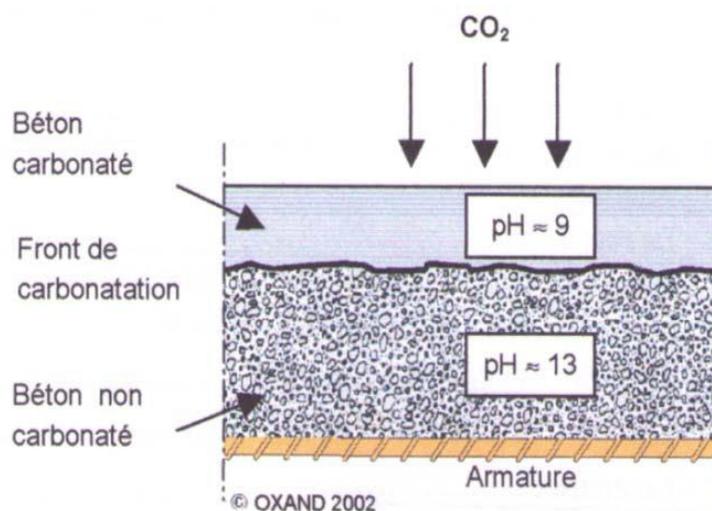


Figure 1.20 — Progression de la carbonatation (Oxand, 2002)

Lorsque le béton frais est mis en place autour de cet acier, l'eau de gâchage pénètre à travers les pores de la rouille (déjà présente autour des armatures), où elle forme progressivement de la ferrite de calcium hydraté ($4.CaO.Fe_2O_3.13H_2O$). Mais surtout, cette eau réagit avec l'acier métallique et forme sur celui-ci une fine couche d'hydroxydes de fer [$Fe(OH)_2$] et de calcium [$Ca(OH)_2$]. Tous ces produits au voisinage de l'acier donnent à la solution interstitielle du béton un pH élevé, de l'ordre de 13. Il est à noter qu'au contact de la rouille initiale, l'hydratation du ciment est perturbée: il se forme localement une zone de transition, au-delà de laquelle le béton a des caractéristiques plus homogènes. L'eau de gâchage du béton permet donc de former autour de l'acier des produits, qui le protègent par passivation. Une telle protection disparaît si la solution interstitielle a disparu (cas des grandes fissures qui atteignent les armatures) ou ne correspond plus à un béton sain.

1.7.2 Les phases de corrosion

La corrosion liée à la carbonatation de l'acier se déroule suivant 2 étapes distinctes, une phase d'initiation ou d'amorçage appelée aussi phase d'incubation et une phase de propagation. Le passage de l'une à l'autre correspond à la « dépassivation » de l'acier.

La phase « d'amorçage » correspond à la pénétration des agents agressifs (principalement le gaz carbonique, l'air et les chlorures) à travers la couche d'enrobage, jusqu'au démarrage de la corrosion de l'armature (destruction du « film passif »). La période d'amorçage ou d'incubation dépend en grande partie des processus assurant le transport des éléments agressifs jusqu'à l'armature, mais aussi des réactions chimiques se produisant au sein du béton et des réactions électrochimiques à l'interphase. La qualité de l'enrobage (perméabilité,

épaisseur...) joue un rôle fondamental sur la pénétration des agents agressifs (Dhir et al, 1989).

La phase de propagation de la rouille conduit à la fissuration, puis à la destruction de l'enrobage (figure 1.21). Ceci illustre la vie de service d'une structure armée (Tuutti, 1982).

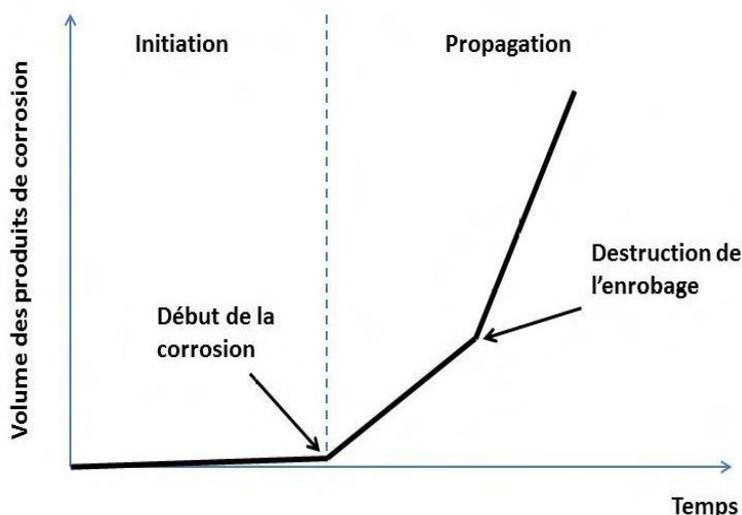


Figure 1.21 — Dégradation schématique des armatures au cours du temps (Tuutti, 1982)

En négligeant la contribution de la propagation de la corrosion pour le calcul de la durée de vie, cette hypothèse est sans doute abusive, notamment pour les parties d'ouvrages protégés des eaux pluviales et les parties de bâtiments en intérieur, dont les aciers peuvent être rapidement dépassivés par carbonatation du fait d'un environnement sec, mais qui possèdent une durée de vie très longue, puisque leur teneur en eau est trop faible pour que la corrosion s'amorce. En revanche, l'évaluation de la durée de la phase d'incubation est une méthode fiable pour connaître la durabilité des structures en extérieur, soumises à des cycles d'humidification-séchage, car la phase de corrosion est alors bien plus courte que la phase de propagation (Thiéry, 2005). La carbonatation a des effets bénéfiques sur le béton seul, mais c'est la corrosion des armatures qui pose problème. Donc, pour étudier la durabilité des structures subissant la carbonatation, il faut étudier le mécanisme de corrosion induite par carbonatation (Elhassane, 2010). Le temps nécessaire pour que la corrosion atteigne le premier lit d'armature par l'effet de carbonatation est beaucoup plus long que la durée de propagation de la corrosion (Papdakis et al., 1992).

Selon Tuutti (1982), la méthode la plus adéquate pour augmenter la durée de vie des structures en béton est d'accroître la phase d'incubation. C'est aussi l'approche utilisée dans le guide de l'AFGC (Baroghel-Bouny, 2004). La phase d'initiation (ou d'incubation) est

relativement lente, la phase de propagation est plus courte et se caractérise par une diminution rapide des performances de la structure jusqu'à la défaillance. Donc, l'étude de la première phase demeure cruciale pour la prévention des risques d'endommagement par carbonatation qui deviennent onéreux dans la phase de propagation. Ainsi, on trouve dans la littérature beaucoup plus de modèles relatifs à la phase d'initiation qu'à la phase de propagation (Elhassane, 2010).

1.7.3 Dégradation des armatures

Du point de vue chimique, la corrosion des armatures en acier dans le béton est un processus électrochimique qui implique l'existence d'une anode, d'une cathode et d'un milieu électrolytique (solution interstitielle du béton) pour constituer une pile électrochimique. L'armature joue le rôle à la fois d'anode, de cathode et de conducteur électrique. Ce phénomène peut se dérouler en deux étapes:

➤ Etape primaire

La création de ces piles sur l'armature conduit à la dissolution du métal dans les zones anodiques selon la réaction d'oxydation :



Les électrons libérés par la réaction anodique sont consommés à la cathode par la réaction cathodique :

- En présence d'oxygène :



- En absence d'oxygène :

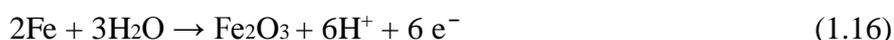
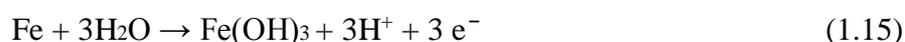


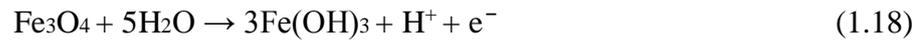
Ensuite, les ions ferreux réagissent avec les ions OH^- pour former de l'hydroxyde ferreux



➤ Etape secondaire

L'hydroxyde ferreux ($\text{Fe}(\text{OH})_2$) peut réagir ensuite dans une seconde étape, "plus tard", avec l'eau et l'oxygène présents à la surface de l'armature pour former de l'oxyde ferrique hydraté ($\text{Fe}_2\text{O}_3, \text{H}_2\text{O}$) ou de la magnétite hydratée ($\text{Fe}_3\text{O}_4, \text{H}_2\text{O}$) selon les réaction suivantes:





Puis, une oxydation lente conduit aux oxydes hydratés : γ -FeOOH (lépidocrocite) qui représente la rouille fraîchement formée, α -FeOOH (goethite) qui représente la rouille vieillie, et la magnétite Fe_3O_4 .

La Figure 1.22 présente une synthèse des différents processus mis en jeu. Le système est à l'équilibre lorsque le courant anodique est égal au courant cathodique qui sont alors tous deux égaux au courant dit de corrosion.

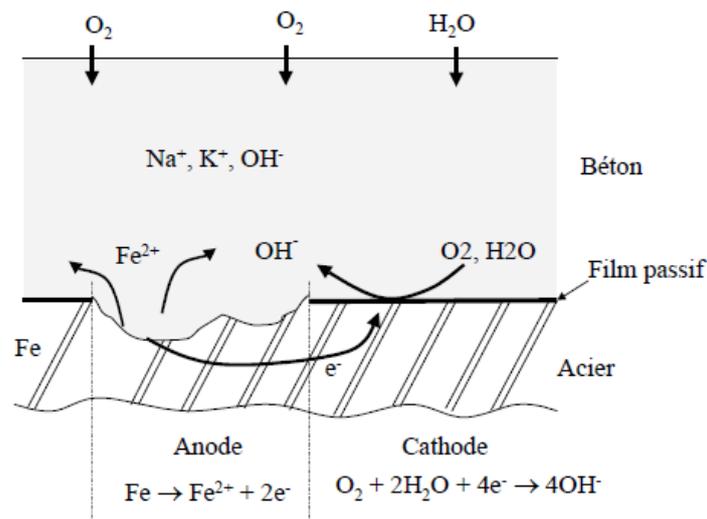


Figure 1.22 — Mécanisme de corrosion de l'acier dans le béton
(Liu, 1996)

La rouille formée sur les armatures est un mélange de ces trois constituants, en proportions variables dépendant de nombreux facteurs comme l'âge du béton et la nature du milieu environnant. La quantité de magnétite est toujours petite.

La corrosion des aciers d'armature peut provoquer des dommages au béton environnant du fait que la rouille est formée de produits fortement expansifs. En effet, suivant l'état d'oxydation, le fer métallique forme des oxydes dont le volume peut être jusqu'à six (6) fois supérieur au volume initial, comme le montre la figure 1.23 (Angst et al., 2009).

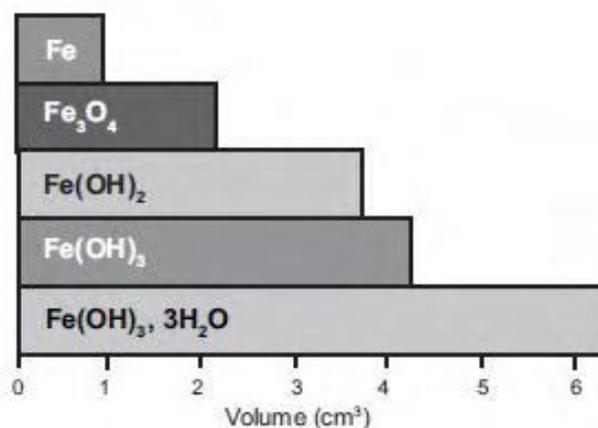


Figure 1.23 — Augmentation du volume des produits de corrosion (Angst et al., 2009)

1.8 Conclusion

Dans ce premier chapitre, on a fait une étude bibliographique approfondie sur le phénomène de carbonatation des bétons avec et sans ajouts cimentaires, en se basant sur les différents paramètres influant sur ce phénomène complexe dont des paramètres liés au matériau lui-même tels que la quantité et le type du ciment, le taux de substitution de l'ajout cimentaire, le rapport E/L et des paramètres liés aux conditions environnementales comme le taux de concentration en CO₂, l'humidité relative et la température ambiante. L'une des conséquences majeures qui rend la carbonatation un ennemi du béton est la corrosion des armatures, ce qu'on a montré par un petit paragraphe sur le processus de corrosion et son effet néfaste sur les bétons.

Chapitre 2

Modélisation de la Carbonatation

2.1 Introduction

La durabilité du béton armé a été largement étudiée ces dernières années. [Andrade et Dal Molin \(2003\)](#) rapportent que la recherche reliée à la prédiction de la durée de vie des structures en béton armé en termes de corrosion induite par la carbonatation est très active, en utilisant les modèles mathématiques. Cependant, le développement de ces modèles peut poser quelques difficultés, comme le nombre et le rendement des facteurs intervenant dans le processus de carbonatation, l'insuffisance de l'information ainsi que la difficulté et la longueur du temps implicite dans la validation des modèles.

Il existe différents types de modèles, qui se distinguent les uns des autres par les outils conceptuels utilisés, l'étendue des phénomènes étudiés, leur complexité mais surtout par leur finalité.

2.2 Modèles de prédiction de la carbonatation

Un modèle de prédiction doit être fiable, en prenant en compte tous les facteurs pertinents du mécanisme qui va être modélisé, et avoir une sensibilité qui convient à la précision des paramètres d'entrée ([Neves et al., 2012](#)). La modélisation de la carbonatation est une question délicate, bien que plusieurs facteurs doivent être pris en compte, les utilisateurs s'attendent à ce que la recherche livre des modèles simples et conviviaux ([Neves et al., 2013](#)). Elle doit permettre de couvrir l'ensemble des phénomènes qui se produisent lors de la carbonatation, leurs interactions ainsi que l'interaction avec les conditions extérieures.

Dans leurs analyses critiques des multiples modèles de prédiction de carbonatation, [Carmona et Helene \(2006\)](#) ont observé qu'il y a des modèles qui ont besoin d'être développés puisqu'ils présentent des incohérences théoriques, et que les valeurs obtenues par des modèles différents peuvent être significativement distinctes. [Yazigi \(2008\)](#) rapporte que quelques modèles sont énormément difficiles à appliquer, par exemple définir quelques paramètres d'entrée rend difficile à estimer la durée de vie des structures en service. En effet, il y a des modèles très compliqués qui n'ont pas de solution analytique ([Balén et Gemert, 1994](#); [Liang et Lin, 2003](#))

La majorité des modèles de prédiction de la carbonatation ([Tiutti, 1982](#), [Parott, 1987](#), [Bakker, 1988](#); [Helene, 1993](#)) généralement suppose que la profondeur de carbonatation peut être estimée à partir du coefficient de carbonatation par la racine carrée du temps en appliquant la loi de Fick ($x = k\sqrt{t}$).

Dans la plupart des modèles existants, il n'y a pas de consensus sur la méthode dont le coefficient de carbonatation doit être déterminé. Ce coefficient est un indicateur de durabilité qui comprend toutes les variables reliées au matériau lui-même et aux conditions environnementales (Coutinho, 1998; Monteiro et al., 2012). La quantification de ce coefficient est habituellement dure puisqu'il dépend de plusieurs paramètres, mettant ainsi la modélisation de la profondeur de carbonatation une tâche compliquée.

Vue la diversité des modèles de prédiction de la carbonatation dans la littérature (la majorité des modèles dans la littérature sont résumés en **Annexe 1**), on a essayé de les classer selon leurs techniques de développement à trois grandes classes:

2.2.1 Modèles empiriques

De nombreux modèles empiriques ont été développés depuis les années 70, pour prédire la profondeur de carbonatation x_c , mesurés par projection de phénolphtaléine sur des éprouvettes de laboratoires carbonatées sous conditions accélérées (carbonatation accélérée) ou in situ (carbonatation naturelle).

Basés sur la 1^{ère} loi de Fick ($x = k\sqrt{t}$), plusieurs modèles issus des résultats expérimentaux ont été développés, ils se diffèrent les uns des autres par le coefficient de carbonatation k pris en consideration:

- Plusieurs chercheurs se sont concentrés sur l'influence du rapport E/C, reconnaissant son effet significatif sur la perméabilité tels que les modèles de [Uschida et Hamada \(1928\)](#), [Alekseev and Rozental \(1976\)](#) et [Tsukayama and Nagataki \(1980\)](#).
- [Alexandre \(1976\)](#) et [Parott \(1987\)](#) ont suppos k lié aux caractéristiques du matériau (rapport E/C, dosage en ciment, résistance mécanique, etc...)
- la résistance à la compression a un effet important sur la vitesse de carbonatation, puisque la formation des C-S-H pendant les réactions d'hydratation implique une augmentation de la résistance et une diminution de la perméabilité d'où une diminution de diffusion du CO₂ gazeux dans les pores du béton, ce qui a poussé plusieurs chercheurs à l'introduire dans les formules de prédiction de carbonatation comme [Smolczyk \(1968\)](#), [Parott \(1987\)](#), [Duval \(1992\)](#) et récemment [Sulapaha et al \(2003\)](#).

L'utilisation des ajouts cimentaires dans les nouveaux bétons a compliqué la modélisation de la durabilité (vis-à-vis de la carbonatation), or l'utilisation des modèles empiriques présentés

ci-dessus devient très limitée avec la grande diversité des ajouts cimentaires utilisés de nos jours et de leurs effets physico-chimiques sur le phénomène de carbonatation.

D'autre part, ces modèles ne sont pas rattachés aux caractéristiques physico-chimiques des matériaux considérés et ne permettent pas de prédire un comportement à long terme, encore moins de lier carbonatation et corrosion. Si l'on veut pouvoir intégrer les nouveaux types de ciment, il faut se rattacher à des grandeurs pertinentes vis-à-vis de la durabilité telles que la teneur en portlandite, en C-S-H, la perméabilité ou la porosité initiale du matériau. C'est ce qui a amené au développement de modèles physico-chimiques analytiques (Morendeau, 2013).

2.2.2 Modèles physico-chimiques ou semi-empiriques

La plupart des modèles de carbonatation sont semi empiriques, c-à-d leur développement commence à partir de base théorique (1^{ère} loi de Fick), et elles sont complétées en adaptant les paramètres exigés aux résultats expérimentaux. Ce sont des modèles compliqués impliquant les réactions chimiques de carbonatation et d'hydratation.

Papadakis et al. (1991 et 1992) sont les premiers à développer et vérifier expérimentalement un modèle physico-chimique ou semi-empirique détaillé sur les processus de carbonatation du béton. Ces processus incluent la diffusion du CO₂ dans les pores du béton, leur dissolution dans le film aqueux de ces pores, la dissolution du solide Ca(OH)₂ dans les pores d'eau, sa réaction ultime avec le CO₂ dissolu et la réaction du CO₂ avec les C-S-H et avec quelques phases non hydratées du ciment. Le modèle mathématique rapporte un système non linéaire compliqué d'équations différentielles dans l'espace et dans le temps, et doit être résolu numériquement par les concentrations inconnues des matériaux impliqués.

Le premier modèle a donné de bonnes corrélations avec les résultats expérimentaux pour des humidités relatives bien spécifiées (35 % ≤ HR ≤ 85%) (Papadakis et al., 1991):

$$X_c = \sqrt{\frac{2 D_{CO_2} [CO_2]}{[CH] + [CSH]}} \sqrt{t} \quad (2.1)$$

Où, [CO₂], [CH] et [CSH] sont les concentrations molaires du dioxyde de carbone, d'hydroxyde de calcium et d'hydrate de silicate de calcium respectivement (mol/m³), D_{e,CO₂} la diffusivité effective du dioxyde de carbone (m²/s).

Cette formule a été sous-estimée par Papadakis et al (1992), du fait que la carbonatation des hydrates CSH est très faible devant celle des CH (Papadakis et al., 1992):

$$X_c = \sqrt{\frac{2 D_{CO_2} [CO_2]}{[CH] + 3[CSH]}} \sqrt{t} \quad (2.2)$$

Plus tard, plusieurs chercheurs (Papadakis, 2000; Thiéry, 2005; Morendau, 2013) ont inspiré leurs modèles de ceux de Papadakis cités précédemment, en ajoutant d'autres paramètres microstructuraux dans leurs formules.

D'autre part, Klopfer (1978) a développé un modèle physico-chimique incluant un paramètre lié à la quantité du CO₂ nécessaire pour une carbonatation complète du béton (Klopfer, 1978):

$$X_c = \sqrt{\frac{2 D_{CO_2} [CO_2]}{a}} \sqrt{t} \quad (2.3)$$

Duracrète (2000) a développé son modèle de la même manière en prenant en compte d'autres paramètres liés au matériau et à l'environnement.

CEB (1997) et Yoon (2007) ont adopté la même formule mais l'ont modifiée pour prendre en considération les cycles d'humidification-séchage pour s'approcher de la carbonatation naturelle.

Le coefficient de diffusion (D_{CO_2}) dans tous ces modèles est lié à la porosité et au degré de saturation de la matrice cimentaire.

Plus récemment, Ta et al. (2016) ont développé un méta-modèle inspiré des modèles physico-chimiques de plusieurs chercheurs, prenant en considération des paramètres liés aux proportions du mélange (quantité et type de ciment, classe de résistance, composition chimique du ciment, quantité du clinker, taux de substitution des cendres volantes et leur densité, le rapport E/C, le rapport Agrégats/ciment et taille maximale des agrégats), des conditions environnementales (humidité relative, température ambiante et concentration du CO₂) et des conditions de cure (durée de cure) (figure 2.1). Ce modèle a été validé en le comparant avec des résultats expérimentaux antérieurs sous une large variation de paramètres. Malgré la performance de ce modèle qui peut être appliqué sur une large gamme de mélanges incorporant les cendres volantes, sa complexité le rend difficile à appliquer en demandant un outil informatique puissant et beaucoup de temps pour l'exécuter. Ce qui est le cas pour tous les modèles semi-empiriques ou physico-chimiques.

En outre, le bénéfice de l'utilisation des modèles semi-empiriques est que la nature stochastique de tous les paramètres du modèle peut être directement considérée dans une approche probabiliste complète.

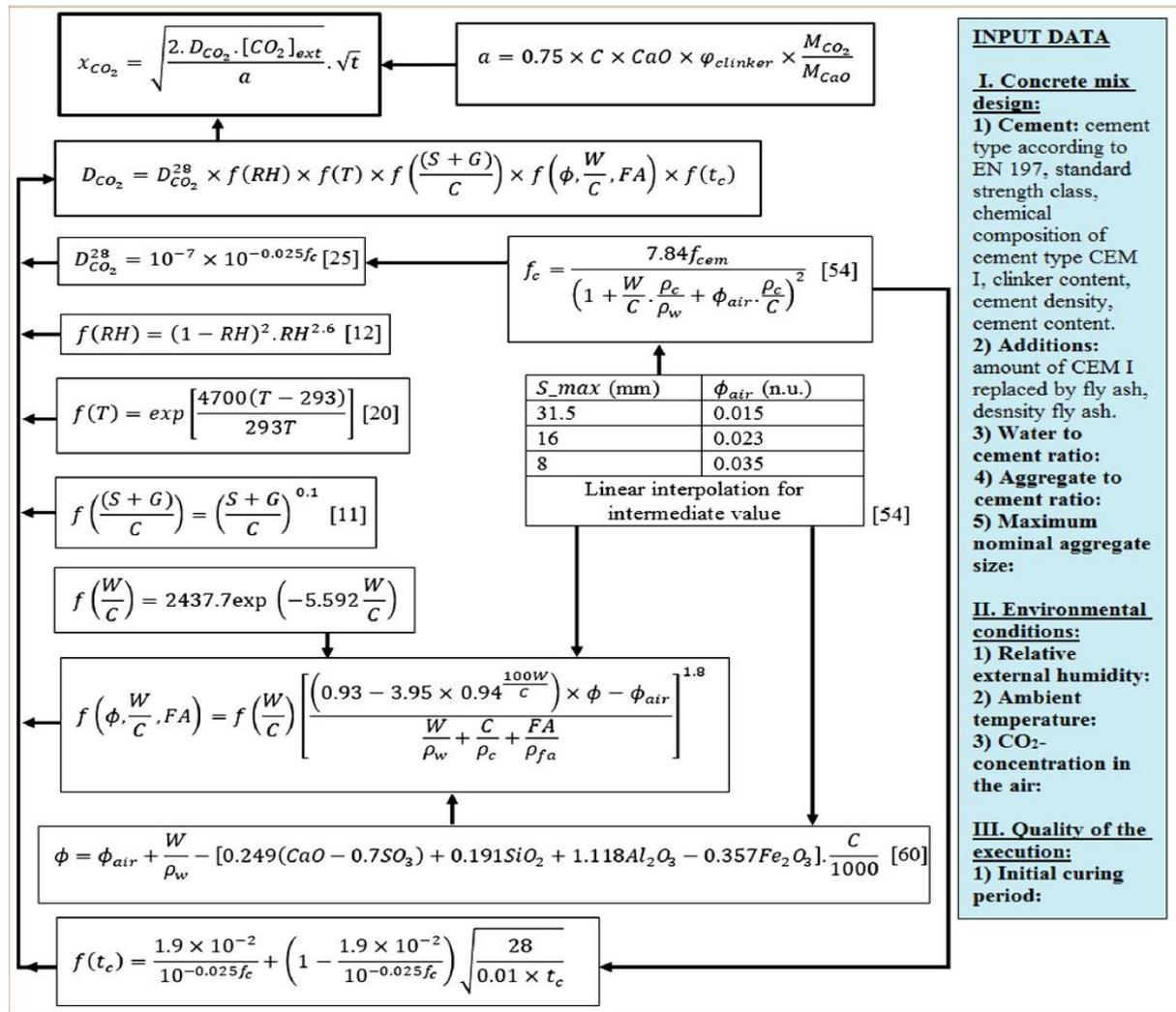


Figure 2.1 — Méta-modèle pour la prédiction de la profondeur de carbonatation (Ta et al., 2016)

2.2.3 Modèles Réseaux de Neurones Artificiels

L'intelligence artificielle est l'ensemble de théories et de techniques mises en œuvre en vue de réaliser des machines capables de simuler l'intelligence. Elle correspond donc à un ensemble de concepts et de technologies plus qu'à une discipline autonome constituée. Souvent classée dans le groupe des sciences cognitives elle fait appel à la neurobiologie computationnelle (particulièrement aux réseaux neuronaux), à la logique mathématique (sous discipline des mathématiques et de la philosophie) et à l'informatique. Elle recherche des méthodes de résolution de problèmes à forte complexité logique ou algorithmique. Par extension elle désigne, dans le langage courant, les dispositifs imitant ou remplaçant l'humain dans certaines mises en œuvre de ses fonctions cognitives.

Le progrès important réalisé au cours des dernières années dans le domaine de l'intelligence artificielle, a permis de réduire les difficultés et de s'affranchir aux limitations des modèles linéaires; les réseaux de neurones artificiels et la logique floue font partie de ces techniques. Ces dernières peuvent être utilisées pour essayer de fournir des modèles de procédés de traitement avec deux objectifs principaux: une meilleure efficacité du traitement et une réduction des coûts d'exploitation. En effet, les réseaux de neurones ne nécessitent pas de connaissance explicite sur le procédé à modéliser, le réseau de neurone va élaborer lui-même ses connaissances à partir d'exemples qu'on lui présentera. Il faut donc passer par une phase d'apprentissage pour ajuster les différents paramètres du réseau, par la suite le réseau est capable d'analyser de nouveaux cas.

En effet, le point de départ dans la modélisation des matériaux est toujours un ensemble de résultats expérimentaux. Dans la technique de modélisation analytique traditionnelle, le comportement du matériau est observé dans le but d'identifier ses caractéristiques, une fois chose faite, un modèle mathématique est développé pour simuler ce comportement. Ce processus consiste à coder la connaissance du comportement dans un ensemble de règles mathématiques.

La technique de modélisation par les réseaux de neurones utilise la capacité d'apprentissage de ces derniers pour simuler le comportement du matériau. A partir des tests de laboratoire, le réseau de neurones subit la première phase d'apprentissage, qui fait que l'information est codée et stockée dans le poids des interconnexions. La deuxième phase est celle de la simulation (validation), dans cette phase les données de quelques tests non-utilisés dans la phase d'apprentissage sont pris et comparés aux résultats obtenus par le réseau de neurones. Les auteurs ont trouvé que cette technique donnait de très bons résultats. Tout ça sans avoir recours à développer des règles ou utiliser des approximations analytiques.

2.2.4 Définition d'un réseau de neurones artificiels

Un réseau de neurone artificiel est un ensemble d'algorithmes dont la conception est inspirée du fonctionnement des neurones biologiques (figure 2.2).

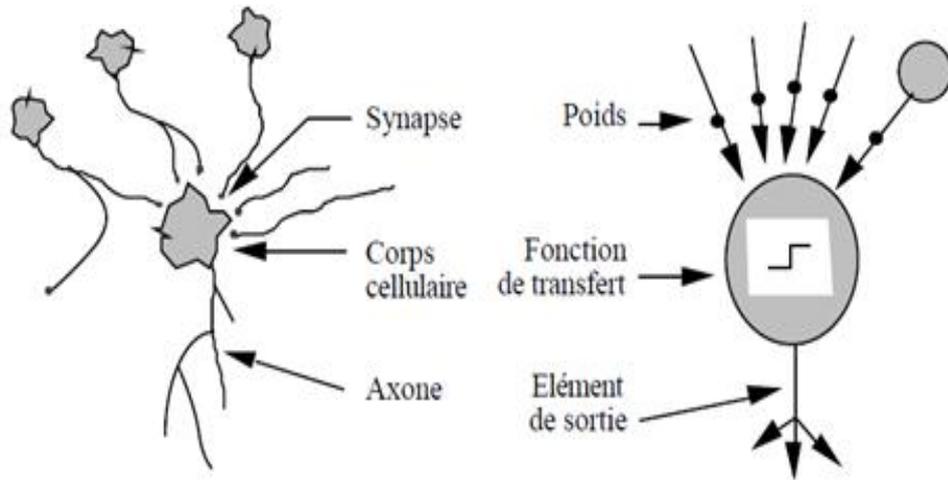


Figure 2.2 — Mise en correspondance neurone biologique/neurone artificiel.

De manière générale un réseau de neurones comporte (figure 2.3):

- des neurones d’entrée, auxquels on attribue une excitation en fonction des données que le réseau doit traiter;
- d’autres neurones au travers desquels l’excitation des neurones d’entrée se propage et est modifiée ;
- des neurones de sortie dont l’état d’excitation fournit une réponse au problème posé en entrée.

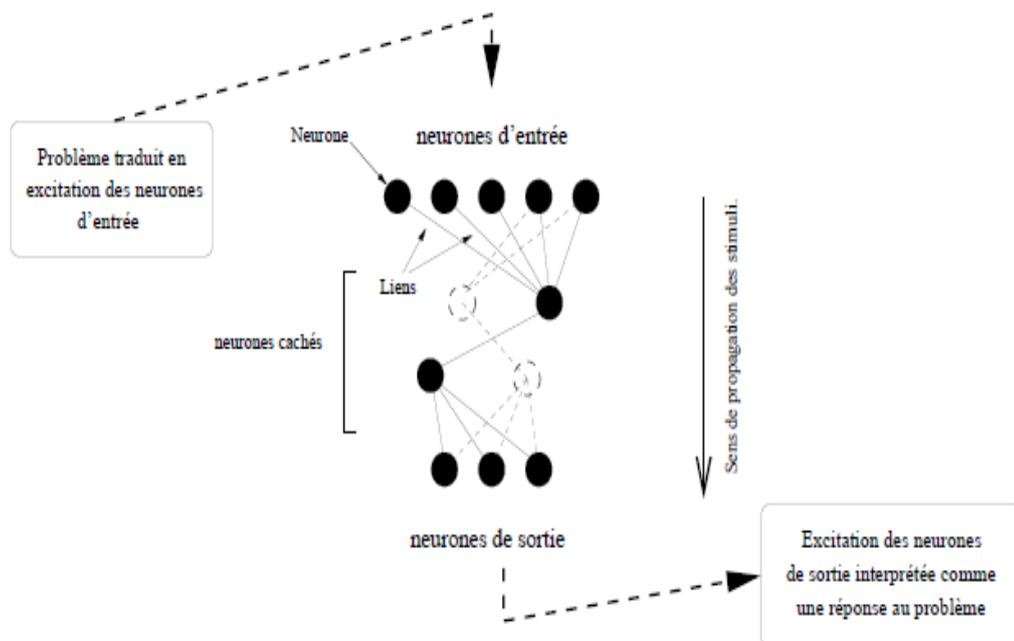


Figure 2.3 — Schéma général d’un réseau de neurones

2.2.5 Architecture d'un neurone formel

Le neurone formel est doté de caractéristiques inspirées de celles de neurones biologiques (figure 2.4):

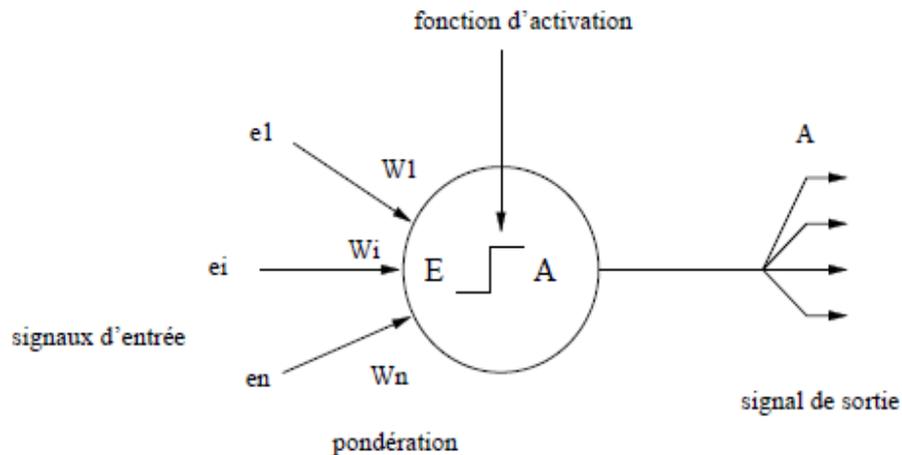


Figure 2.4 — Schéma d'un neurone formel

- **Le potentiel d'action des cellules nerveuses** : pour le neurone formel, il s'agit d'une valeur numérique, qui peut être transmise à des neurones en aval.
- **Les dendrites** : des neurones biologiques leur permettent de recevoir différents signaux de l'extérieur. De la même manière, un neurone formel peut recevoir des signaux e_i de plusieurs neurones. Ces signaux sont combinés en un signal d'entrée unique E .

$$E = \sum w_i \cdot e_i \quad (2.4)$$

Où les w_i sont les poids affectés aux signaux extérieurs.

- **Les synapses** : les poids w_i pondèrent les signaux émis par les différents neurones situés en amont. On retrouve ici l'analogie des synapses qui peuvent être inhibitrices ($w < 0$), ou excitatrices ($w > 0$).
- **La fonction d'activation** : Différentes fonctions de transfert pouvant être utilisées comme fonction d'activation du neurone sont énumérées au tableau 2.1. Les trois les plus utilisées sont les fonctions «seuil» (en anglais «hard limit»), «linéaire» et «sigmoïde».

Tableau 2.1- Types de fonctions d'activation

Type de Fonction	Définition	Représentation graphique
<i>Fonction binaire à seuil (Heaviside)</i>	$h(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } x \geq 0 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$	
Fonction signe	$\text{Sgr}(x) = \begin{cases} +1 & \text{si } x \geq 0 \\ -1 & \text{sinon} \end{cases}$	
<i>Fonction linéaire ou identité</i>	$F(x) = x$	
<i>Fonction linéaire à seuil ou multi seuils</i>	$F(x) = \begin{cases} x & x \in [u, v] \\ v & \text{si } x \geq v \\ u & \text{si } x \leq u \end{cases}$	
<i>Fonction sigmoïde</i>	$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}$	

2.2.6 Différents types de réseaux de neurones

On distingue deux grandes familles de réseaux de neurones :

- Les réseaux de neurones non bouclés (statiques) “feed-forward”, appelés aussi "réseaux de type Perceptron", ce sont des réseaux dans lesquels le flux d'information se propage de couche entrée vers couche cachés jusqu'à la sortie sans retour en arrière. Un réseau de neurone non bouclé réalise une ou plusieurs fonction des ses entrées par composition des fonctions réalisées par chacun des neurones (Dreyfus et al., 2002).
- Les réseaux de neurones bouclés (dynamiques) “feed-back”, appelés aussi "réseaux récurrents", sont des réseaux dans lesquels le flux d'information se propage en avant et en arrière. Un réseau de neurone bouclé à temps discret réalise une ou plusieurs équations non linéaires, par composition des fonctions réalisées par chacun des neurones et de retard associés à chacune des connexions (Dreyfus et al., 2002).

La figure 2.5 illustre les différents types des réseaux de neurones.

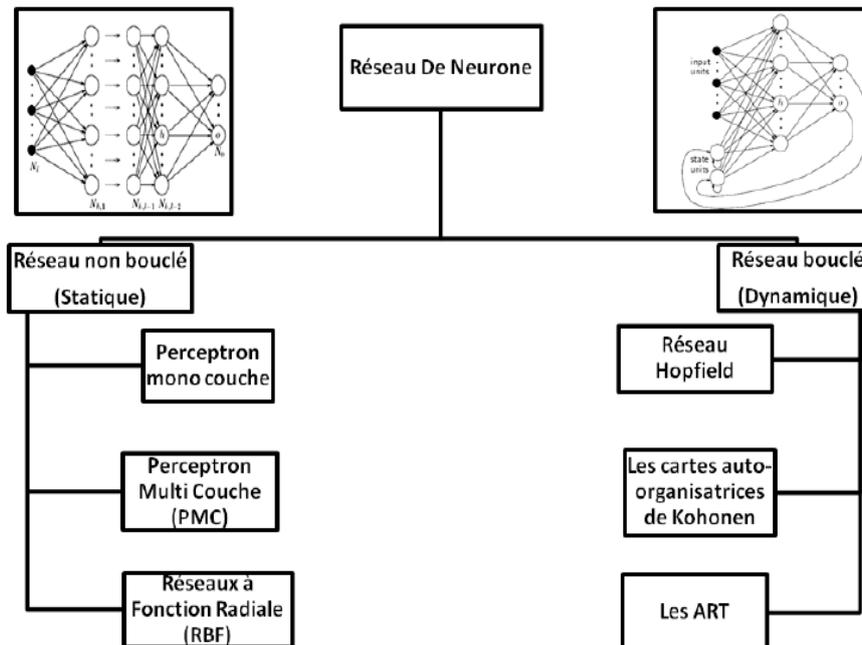


Figure 2.5 — Classification des réseaux de neurones.

2.2.7 Perceptron multicouches

Ce réseau comporte une couche d'entrées, une ou plusieurs couches cachées et une couche de sortie (MLP ou Multilayers Perceptron) (Figure.2.6). Chaque couche contient des unités de calcul (neurones) connectées à d'autres neurones par des poids (Rumelhart et McClelland, 1986). Chaque neurone va en fait calculer une somme pondérée de ses entrées qu'il va transmettre à une fonction de transfert f afin de produire ses sorties. Pour chaque couche du réseau de neurones dans un réseau PMC, il existe également un terme de *biais*. Un biais est un neurone dans lequel la fonction d'activation est en permanence égale à 1. Comme pour les autres neurones, un biais se connecte aux neurones de la couche précédente par l'intermédiaire d'un poids, généralement appelé *seuil*. Les neurones et les biais sont organisés dans une structure de couches non-bouclées (feed-forward). Ces réseaux sont en mesure de modéliser des fonctions même très complexes, où le nombre de couches et le nombre d'unités dans chaque couche va déterminer la complexité de la fonction. Lors de la conception des Perceptrons Multicouches, il est important de bien spécifier le nombre de couches cachées ainsi que le nombre d'unités dans ces couches (Bishop, 1995). Mais il est également important de bien choisir les fonctions d'activation et les méthodes d'apprentissage.

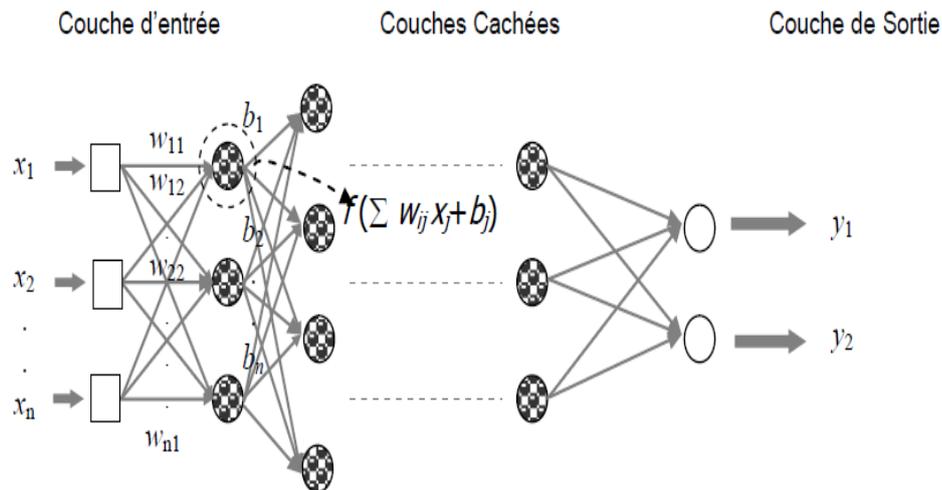


Figure 2.6 — Exemple d'un réseau de type perceptron multicouches.

2.2.8 Apprentissage des réseaux de neurones

L'apprentissage est un processus dynamique et itératif permettant de modifier les paramètres d'un réseau en réaction avec les stimuli qu'il reçoit de son environnement. Le type d'apprentissage est déterminé par la manière dont les changements de paramètre surviennent. D'où, l'apprentissage d'un réseau de neurones formels consiste à déterminer les poids w_i optimaux (de la force optimale de la connexion) suivant le problème à résoudre.

On distingue deux types d'apprentissage : Un apprentissage "supervisé" et un apprentissage "non supervisé" (Nigrin, 1993):

- On parle d'apprentissage supervisé quand le réseau est alimenté avec la bonne réponse pour les exemples d'entrées donnés. Le réseau a alors comme but d'approximer ces exemples aussi bien que possible et de développer à la fois la bonne représentation mathématique qui lui permet de généraliser ces exemples pour ensuite traiter des nouvelles situations (qui n'étaient pas présentes dans les exemples).
- Dans le cas de l'apprentissage non-supervisé le réseau décide lui-même quelles sont les bonnes sorties. Cette décision est guidée par un but interne au réseau qui exprime une configuration idéale à atteindre par rapport aux exemples introduits. Les cartes auto-organisatrices de Kohonen sont un exemple de ce type de réseau (Kohonen, 1982).

Le tableau 4.2 récapitule les différents types d'apprentissage suivant les paramètres à étudier.

Tableau 2 2- Types d'apprentissage

Paradigme	Règle d'apprentissage	Architecture	Algorithme	Taches
Supervisé	Correction d'erreur	Perceptron simple ou multi-couches	Perceptron Rétro-propagation. Adaline	Classification, approximation de fonctions, prédiction
	Boltzmann	récurrente	Apprentissage de Boltzmann	Classification
	Hebb	Multi-couches non bouclé	Analyse de discriminants linéaire	Analyse de données, classification
	Par compétition	A compétition	LVQ « Learning Vector Quantization »	Catégorisation au sein d'une classe. Compression de données
		ART	ART Map	Catégorisation au sein d'une classe, classification
Non supervisé	Correction d'erreurs	Multi-couches non bouclé	Projection de Sammon	Analyse de données
	Hebb	Non bouclé ou à compétition	Analyse en composantes principales	Analyse de données, compression de données
	Par compétition	A compétition	VQ « Vector Quantization »	Catégorisation, compression de données
		Carte de Kohonen	SOM « Self Organizing Map »	Catégorisation, analyse de données
		ART	ART1 – ART2	Catégorisation
Hybride	Correction d'erreurs et par compétition	RBF	RBF	Classification, approximation de fonctions, prédiction, contrôle.

2.2.9 Apprentissage de rétro-propagation

Il y a plusieurs algorithmes d'apprentissage pour RNA. Jusqu'à présent, l'algorithme de rétro-propagation est le plus utilisé pour la prédiction de la profondeur de carbonatation des bétons parce qu'il a une approximation des solutions optimale et une précision de prédiction élevée.

Le signal d'apprentissage est transmis de la couche de sortie vers la couche cachée ensuite le signal retourne vers la couche sortie, le processus est répété d'une manière itérative jusqu'à obtention de l'erreur désirée (Yang et al., 2003).

L'algorithme de Rétro-propagation peut être résumé par les étapes suivantes :

- Etape 01** : initialisation des paramètres principaux ; les poids (W_{kj} , W_{ij}), les biais (θ_k , θ_j)
- Etape 02** : calcul de l'erreur généralisée δ_k , le taux d'apprentissage (η) et le momentum (α)

$$\delta_k = Z_k(1 - Z_k)(d_k - Z_k) \quad (2.5)$$

- Etape 03** : ajustement des poids entre la couche cachée et la couche de sortie

$$\Delta W_{kj}(K + 1) = \eta \delta_k y_j + \alpha W_{kj}(k) \quad (2.6)$$

-Etape 04 : calcul de l'erreur généralisée de la couche cachée

$$\delta_j = y_j(1 - y_j) + \sum_k \delta_k W_{kj} \quad (2.7)$$

-Etape 05 : ajustement des poids entre la couche cachée et la couche de sortie

$$\Delta W(k + 1) = \eta \delta_j y_i + \alpha W_{ji}(k) \quad (2.8)$$

-Etape 06 : répétez les étapes de 1 à 5 jusqu'à atteindre l'erreur désirée.

2.2.10 Performance d'un modèle réseau de neurones

La performance d'un modèle de réseaux de neurones artificiels peut être évaluée en utilisant différentes expressions, notamment:

1) L'erreur quadratique moyenne MSE

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (d_i - y_i)^2 \quad (2.9)$$

2) La racine carrée de l'erreur quadratique moyenne RMSE

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (d_i - y_i)^2}{N}} \quad (2.10)$$

3) La valeur moyenne des erreurs

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |d_i - y_i| \quad (2.11)$$

4) Le coefficient de détermination

$$R^2 = 1 - \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (d_i - y_i)^2}{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (d_i - d_i^T)^2} \quad (2.12)$$

Avec d_i est la variable désirée (profondeur de carbonatation observée) et y_i la variable calculée par le modèle (profondeur de carbonatation estimée) et N le nombre de données d'entrée.

La RMSE donne une indication quantitative sur l'erreur de simulation obtenue pendant la phase de modélisation. Le coefficient de détermination R^2 représente la proportion de variation de la valeur de sortie qui est expliquée par le modèle. Les valeurs idéales pour RMSE et R^2 sont 0 et 1 respectivement.

2.3 Prédiction de la carbonatation par les RNAs

Les applications des RNAs en génie civil ont connu une large utilisation vers la fin des années 80. Plusieurs travaux de recherches ont montré clairement le potentiel et les possibilités d'application des modèles de RNAs en résolvant des problèmes de structures, de géotechnique et de béton (Jeyasehar et Sumangala, 2006 ; Parthiban et al., 2005 ; Peng et al., 2002 ; Kewalramani and Gupta, 2006 ; Parichatprecha et Nimityongskul, 2009; Boukhatem B. et al., 2010 ; Rafiq et al., 2011; Boukhatem et al., 2011 ; Boukhatem B. et al., 2012 ; Esselami et al., 2013; Kellouche et al., 2017). Et même en les combinant avec d'autres techniques tels que les algorithmes génétiques ou la logique flou pour avoir des modèles de prédiction plus fiables (Billir et al, 2016; Belalia et al., 2016; Rebouh et al., 2017).

La prédiction de la durée de vie des structures en béton en élaborant des modèles de carbonatation par les réseaux de neurones a connu un intérêt depuis peu de temps:

2.3.1 Modèle de Yan et al. (2008)

Basés sur les modèles de carbonatation existant dans la littérature, un modèle mathématique de carbonatation prenant en compte la plupart des facteurs d'influence environnementaux a été élaboré par Yan et al. (2008) en utilisant les résultats expérimentaux de la carbonatation accélérée. En même temps, un autre modèle de prédiction de la carbonatation par les réseaux de neurones a été élaboré: 3 paramètres dont le rapport E/L (X_1), la quantité du ciment (X_2) et la durée d'exposition du béton (X_3) ont été sélectionnés comme paramètres d'entrées, tandis que la profondeur de carbonatation (Y) a été considérée comme paramètre de sortie. 72 groupes de données de carbonatation ont été collectés de différents résultats expérimentaux, et analysé par les modèles RBFNN et de rétro propagation, dont 60 groupes de données pour l'apprentissage. Les résultats du modèle mathématique et les résultats expérimentaux ont été comparé aux résultats des deux modèles de prédiction des réseaux de neurones. Ils ont observé que le RBFNN est le plus fiable pour la prédiction de la profondeur de carbonatation (figure 2.7).

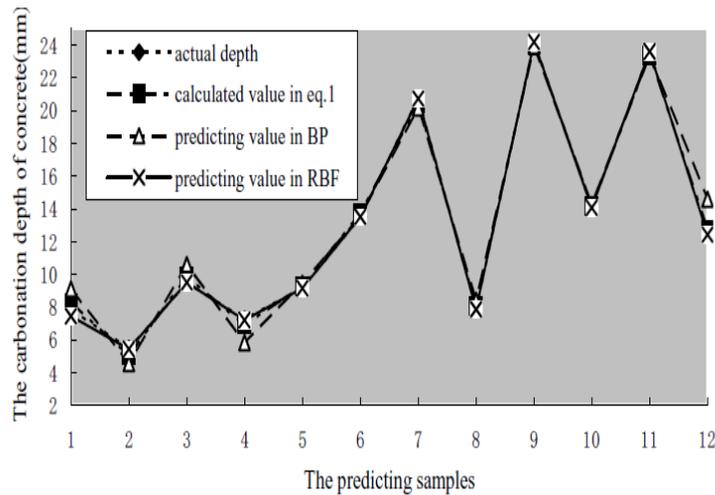


Figure 2.7 — Comparaison entre la rétropropagation et la fonction radiale pour la prédiction de la profondeur de carbonatation (Yan et al., 2008)

2.3.2 Modèle de Lu et Liu (2009)

Les mêmes résultats ont été conclus par Lu et Liu (2009) dans la prédiction de la profondeur de carbonatation de béton précontraint (figure 2.8). Ils ont observés que les deux types de réseaux de neurones ont une prédiction élevée de la profondeur de carbonatation, mais le RBFNN a donné une bonne précision de prédiction par rapport au BPNN.

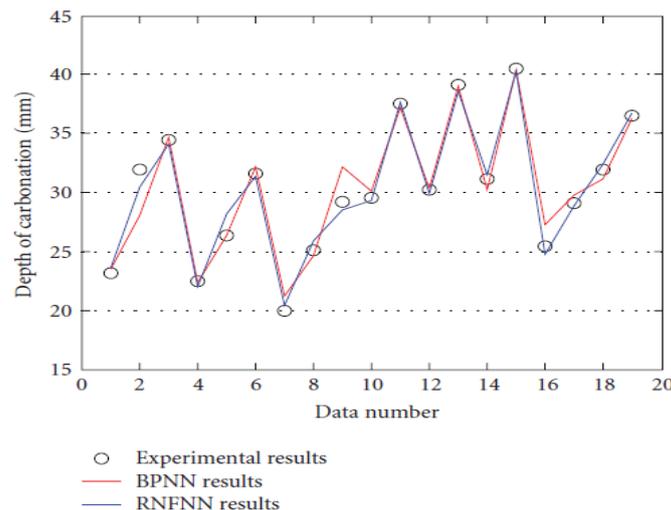


Figure 2.8 — Relation entre les résultats des deux RNAs et les résultats expérimentaux (Lu et Liu, 2009)

2.3.3 Modèle de Narui et al. (2009)

Basé sur l'évolution différentielle de la rétro-propagation (Back Propagation Differential Evolution) des réseaux de neurones, le modèle de prédiction de la profondeur de carbonatation a été présenté par Narui et al. (2009) (figure 2.9). La comparaison entre les

résultats prédits des trois modèles (BP, GABP et DE-BP) et les données contrôlées montre que la précision du DE-BP est la plus élevée avec une erreur relative de 2.8%.

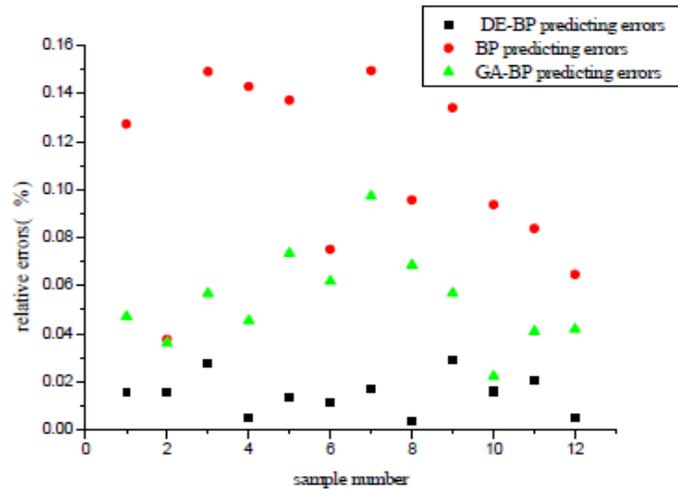


Figure 2.9 — Comparaison des erreurs relatives (Narui et al., 2009)

2.3.4 Modèle de Kown et Song (2010)

Dans l'étude faite par Kown et Song (2010), pour prédire le coefficient de diffusion du CO₂, la composition du béton telle que la quantité du ciment, le rapport E/C et le volume des agrégats ainsi que l'humidité relative ont été sélectionnés comme neurones d'entrée. La formation de l'apprentissage du réseau de neurone est effectuée par l'algorithme de rétro propagation. Les résultats obtenus montrent que le coefficient de diffusion obtenu par les réseaux de neurones est en corrélation avec les données expérimentales sous l'effet de plusieurs paramètres telles que le rapport E/C (0.42, 0.50 et 0.58) et l'humidité relative RH (10%, 45%, 75% et 90%).

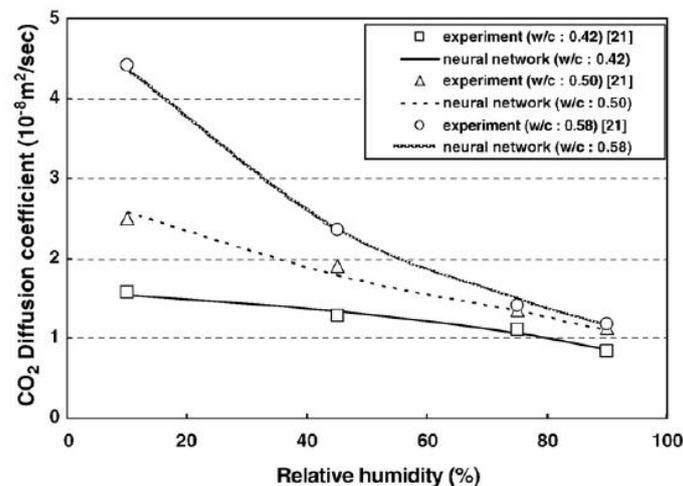


Figure 2.10 — Résultats de l'expérimentation et des réseaux de neurones avec différents rapports E/C (Kown and Song; 2010)

2.3.5 Modèle de Daming et al. (2014)

Dans l'étude faite par [Daming et al. \(2014\)](#), le réseau de neurone de rétro propagation a été optimisé par l'algorithme d'optimisation particulier (PSO) pour prédire la profondeur de carbonatation du béton. Ils ont élaboré des essais de carbonatation accélérée en utilisant le ciment Portland ordinaire (avec 15% d'ajouts), dans un climat de laboratoire artificiel, et ils les ont utilisés comme données pour la formation des réseaux de neurones.

Dans cette étude, un réseau de neurone de 3 couches a été utilisé pour le modèle de prédiction de la profondeur de carbonatation, son architecture est montrée sur la figure 2.11.

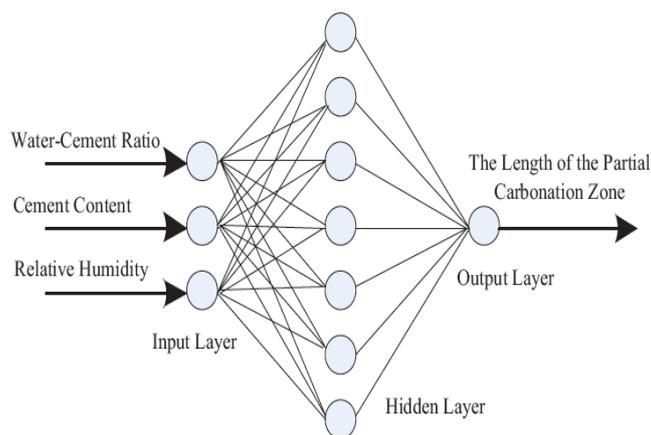


Figure 2.11 — Architecture du modèle de prédiction de la profondeur de carbonatation ([Daming et al., 2014](#))

Après la formation de la simulation, le modèle amélioré est appliqué au béton d'un pont pour prédire sa profondeur de carbonatation.

Les résultats ont montré que le modèle de RN à rétro propagation optimisé par l'algorithme PSO, peut réduire grandement l'erreur relative moyenne et améliorer l'exactitude de prédiction, et il peut prédire la profondeur de carbonatation plus rapidement. Le réseau de neurones PSO-BP peut trouver la règle cachée de la cartographie entre la sortie et l'entrée du réseau de neurones et les poids d'interconnexion. En plus, l'erreur de l'algorithme d'apprentissage PSO-BP est convergente. D'où, le modèle de prédiction basé sur les réseaux de neurones PSO-BP a une haute précision et une valeur prédite authentique qui peut refléter la vraie situation.

L'accumulation des valeurs mesurées in situ et des résultats de laboratoire est très importante pour les RNAs pour établir le modèle de prédiction de la profondeur de carbonatation du

béton. Due au fait que les données du laboratoire sont limitées, le type du béton, la résistance du béton, l'épaisseur de l'enrobage et d'autres facteurs ne sont pas pris en compte dans cette étude.

2.3.6 Modèle de Taffese et al. (2015)

Très récemment, [Taffese et al \(2015\)](#) ont comparé quatre méthodes d'intelligence artificielles pour la prédiction de la profondeur de carbonatation, ils ont utilisé les réseaux de neurones artificiels, l'arbre de décision, l'arbre de décision mise en sac (bagged decision tree) et l'arbre de décision stimulée (boosted decision tree) pour élaborer un modèle nommé CaPrM (Carbonation Prediction Model). L'apprentissage et le test du modèle ont été faits en utilisant les données obtenues du projet Finnish Duralnt. La technique des RNAs a prouvé sa performance par rapport aux autres techniques d'intelligence artificielle. Le processus du modèle CaPrM est représenté par la figure 2.12.

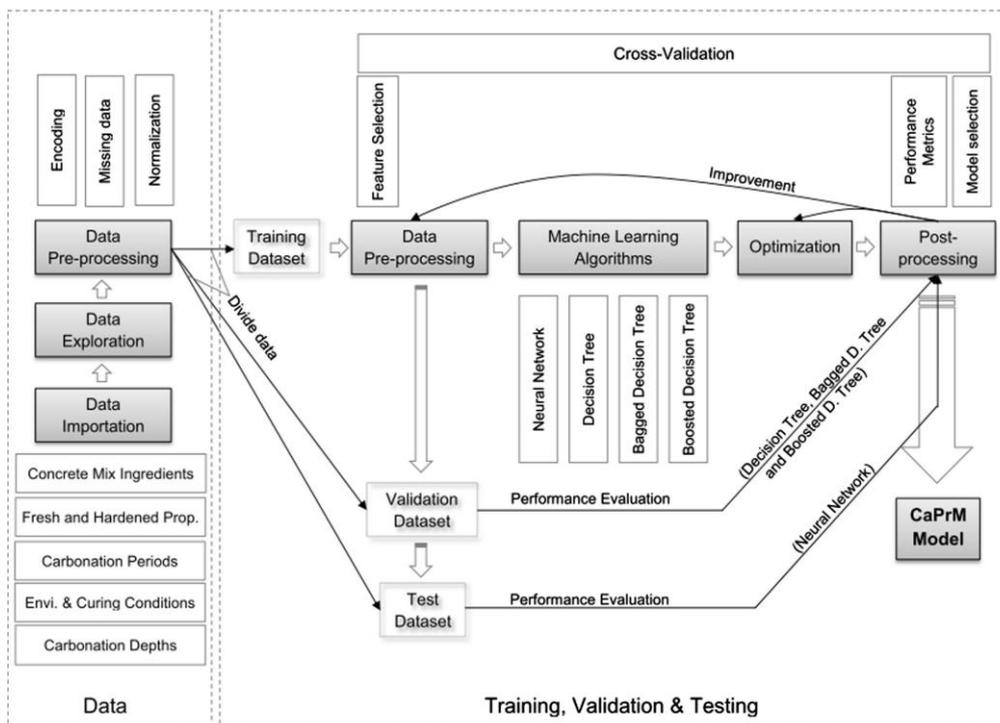


Figure 2.12 — Prédiction de la carbonatation par la combinaison des RNAs et l'arbre de décision ([Taffese et al., 2015](#))

Les techniques proposées dans ces recherches ont plusieurs avantages comme la facilité de l'estimation du coefficient de diffusion et la prédiction raisonnable de la profondeur de carbonatation. Cependant, l'ensemble de données pour l'application des réseaux de neurones n'a pas pris en considération les ajouts cimentaires comme les cendres volantes et le laitier, donc il est difficile de l'appliquer sur des des bétons aux ajouts cimentaires. Puisque les

coefficients de diffusion sont obtenus pour des humidités relatives et des concentrations en CO₂ constantes, cette technique peut avoir des applications limitées sur les structures en béton armé avec des conditions extérieures variables.

2.4 Conclusion

Après cette étude bibliographique sur la majorité des modèles existant dans la littérature et malgré leur diversité, on a pu les classer en trois catégories: modèles empiriques basés sur la lois de Fick ($x = k\sqrt{t}$), issus des résultats expérimentaux, modèles semi-empiriques ou physico-chimiques basés sur les processus physico-chimiques lors des réactions de carbonatation et de leurs effets sur la microstructure du béton, et modèles numériques utilisant les nouvelles techniques de l'intelligence artificielle telles que les réseaux de neurones artificiels.

Les modèles empiriques malgré leur simplicité restent limités parce qu'ils sont issus pour des paramètres bien spécifiés où leur marge de variation est très petite. Donc ils ne peuvent pas être généralisés sur d'autres conditions. D'autre part, ces modèles ont pris en considération un nombre limité de paramètres, tandis que la carbonatation est influencée par un très grand nombre de paramètres.

Les modèles physico-chimiques sont plus approfondis et plus détaillés que les modèles du 1^{ier} type, en introduisant un grand nombre de paramètres internes et externes et microstructurels ayant un grand effet sur le phénomène de carbonatation, ils ont même inclus l'effet d'humidification séchage sur le taux de carbonatation. Mais leur application s'avère très difficile vue leur complexité.

Des modèles numériques issus de l'intelligence artificielle tels que les réseaux de neurones, la logique floue, les algorithmes génétique, l'arbre de décision ou les modèles hybrides combinant un ou plusieurs types de ces méthodes ont été récemment élaborés pour la prédiction de la carbonatation des bétons. Ces techniques ont prouvé leur performance, mais chaque modèle exposé dans ce chapitre reste limité, parce que ou bien il n'a pas pris en considération les ajouts cimentaires qui sont de plus en plus utilisés de nos jours, ou bien il a été élaboré d'une base de données issue des résultats d'une seule expérimentation, ou bien il n'a pas été validés expérimentalement, ou il n'a pas été comparé avec d'autres modèles de la littérature.

Les réseaux de neurones ont une remarquable faculté à donner un sens, extraire des règles et des tendances à partir de données compliquées, bruitées et imprécises. Ils peuvent s'utiliser pour extraire des modèles et détecter des tendances reposant sur des fonctions mathématiques compliquées qui sont trop difficiles, voire impossible, à modéliser à l'aide de techniques analytiques ou paramétriques traditionnelles. L'une des propriétés intéressantes des réseaux de neurones est qu'ils savent prévoir avec précision des données qui ne faisaient pas partie des données d'apprentissage, un processus connu sous le nom de généralisation.

Vue la performance de ces nouvelles techniques, et le besoin de laboratoires virtuels pour le gain de couts et de temps, et avec la croissance d'utilisation des ajouts cimentaires dans les nouveaux bétons. On a choisit la technique des réseaux de neurones artificiels pour prédire la durée de vie des bétons aux ajouts cimentaires vis-à-vis de leur carbonatation.

Chapitre 3

Conception et Analyse des données

3.1 Introduction

La collecte des données et leur traitement est l'étape la plus essentielle pour réussir le développement d'un modèle de prédiction.

Dans ce chapitre on va faire la collecte de deux bases de données pour la prédiction de la profondeur de carbonatation des bétons aux ajouts cimentaires; une base de données pour les cendres volantes et une autre pour le laitier.

Les bases de données ont été construites à partir des résultats expérimentaux réalisés sur des bétons aux ajouts (cendres volantes, laitier de hauts fourneaux) et obtenus de diverses sources de recherche de la littérature. Dans ce chapitre on va expliquer les aspects détaillés de la collecte et du filtrage de données concernant la carbonatation des bétons aux ajouts.

Le processus de la collecte de données a été complété dans deux phases. L'objectif de la première phase était de rassembler des données dans la littérature. Un premier travail, souvent fastidieux mais incontournable, consiste à mener une exploration statistique de ces données: allure des distributions, présence de données atypiques, corrélations et cohérence, transformations éventuelles des données. Pour cet effet, on a utilisé la méthode d'analyse en composantes principale (ACP) pour la compression et l'élimination de corrélation entre les données. La deuxième phase a impliqué la normalisation des données sélectionnées pour répondre aux exigences d'entrée des modèles de réseaux de neurones artificiels proposés.

3.2 Base de données des bétons aux cendres volantes

Comme mentionné dans le chapitre 1, la carbonatation des bétons aux ajouts cimentaires est influencée par plusieurs paramètres; des paramètres liés à la composition du béton et des paramètres liés aux conditions environnementales. Durant le processus de la collecte de données, et vue l'insuffisance des données expérimentales, on s'est basé sur les paramètres influents le plus sur le phénomène de carbonatation et qui peuvent être comme entrée dans les réseaux de neurones tels que la quantité du liant (ciment + ajout) L (kg/m^3), le taux de substitution des cendres volantes CV (%), le rapport eau-liant E/L, la concentration du CO_2 (%), l'humidité relative HR (%) et le temps t (jours). Le choix de ces paramètres est du à leur influence sur la profondeur de carbonatation en premier lieu, et à la disponibilité des données liées à ces paramètres en second lieu.

3.2.1 Collecte de données expérimentales

Les données concernant la profondeur de carbonatation des bétons aux cendres volantes ont été extraites et rassemblées des projets de recherche de la littérature pour construire la base de 300 données. On a utilisé les résultats de 13 articles de recherche faites sur des bétons aux cendres volantes (Atis, 2003 ; Sulapha et al., 2003; Jiang et al., 2004; Khunthongkeaw et al., 2006; Burden, 2006; Sisomphon et Franke, 2007; Lammertijn et De Belie, 2008; Rozière et al., 2009; Hui et al., 2010; Younsi et al., 2011; Das et Pandey, 2011; Zhang et Li, 2013; Van et De Belie, 2014), les données sont les quantités des constituants (quantité du liant (ciment + cendres volantes), taux de substitution des cendres volantes, et le rapport eau-liant), sous différentes conditions environnementales (concentration en CO₂ et l'humidité relative) à un âge de 28 jours sous une cure de température humide de différents bétons avec les valeurs mesurées de la profondeur de carbonatation (voir tableau 3.1).

On s'est basé sur les résultats de la cure humide à 28 jours, parce que tous les articles sélectionnés ont appliqués les essais de carbonatation accélérée après une cure humide de 28 jours, quelques uns seulement ont ajoutés d'autres âges (3, 7, 14 ou 90 jours), mais le nombre limité des résultats à ces âges nous a conduit à les éliminer de notre base de données.

Tableau3.1- Sources de données des bétons aux cendres volantes

Source de données	Nombre de données	Distribution des données
Atis (2003)	05	2 %
Sulapha et al. (2003)	84	28 %
Jiang et al. (2004)	16	5 %
Khunthongkeaw et al. (2006)	24	8 %
Burden (2006)	76	25 %
Sisomphon et Franke (2007)	12	4 %
Lammertijn et De Belie (2008)	24	8 %
Roziere et al. (2009)	04	1 %
Xu et al. (2010)	16	5 %
Younsi et al. (2011)	14	5 %
Das et Pandey (2012)	10	3 %
Zhang et Li (2013)	05	2 %
Van et De Belie (2014)	10	3 %
Total	300	100 %

Les plages de variation des constituants des bétons aux cendres volantes sont indiquées dans le tableau 3.2.

Tableau3.2- Variation des paramètres étudiés pour chaque source de données

Auteur	Année	Cendres Volantes		Liant (kg/m ³)	E/L	CO ₂ (%)	RH (%)	t (jours)
		Origine	Taux (%)					
Younsi A et al.	2011	France	00 - 50	301 - 380	0.41 – 0.60	50	65	7 - 42
Sisom et Franke	2007	Allemagne	00 - 50	300 - 450	0.42 – 0.60	3	65	7 - 63
Roziere E. et al.	2009	France	00 - 30	260 - 318	0.58 – 0.63	50	65	28
Van et De Belie	2014	Belgique	0 - 50	225 – 300.8	0.35 – 0.50	10	60	7
Lam. et De Belie	2008	Belgique	0 - 67	400	0.40	10	60	7 - 126
Jiang L. et al.	2004	Chine	0 - 40	340	0.45	3 -20	70	3 - 28
Sulapha P.	2003	Singapour	0 - 30	300 - 500	0.40 – 0.60	6.5	65	14 - 364
Khunth et al	2006	Thaïlande	0 _ 30	288 - 382	0.5 _0.6	4	55	30 _ 60
Das et Pandey	2012	Inde	0 - 35	384	0.37 – 0.52	10	65	30
Burden D.	2006	Canada	30 - 50	340 - 465	0.34 – 0.50	1	65	7 - 90
Xu et al.	2010	Chine	0 - 25	312 - 336	0.39 – 0.56	20	70	30 - 120
Zhang et Li	2013	Chine	0 - 25	494	0.32	20	70	24
Atis	2003	Turquie	0 - 70	400	0.30 – 0.55	5	65	14

La distribution des données selon leur origine est illustrée dans la figure 3.1. On remarque que plus que la moitié des matériaux utilisés sont d'origine Asiatique et l'autre moitié est partagée entre l'Europe et l'Amérique du Nord. Ce qui veut dire que notre modèle sera plus valable pour les matériaux d'origine Asiatique.

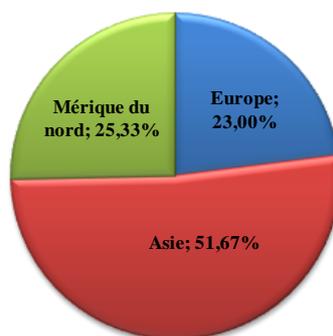


Figure 3.1 — Distribution des données selon leurs origines

Les compositions chimiques des ciments et des cendres volantes utilisés sont résumées dans le tableau 3.3.

Tableau 3.3- Compositions chimiques des ciments et cendres volantes utilisés

Auteur	Type de matériau	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	SSB* (m ² /kg)
Younsi A et al., 2011	CPO	20.5	4.5	2.7	64.8	–	–	–	3.5	340
	CV (F)	55.3	25.2	6.4	5.2	–	–	–	0.5	–
Sisomphon et Franke, 2007	CPO	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	CV (F)	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Roziere et al., 2009	CPO	20.21	4.18	2.22	63.77	–	–	–	2.76	344
	CV (F)	52.5	27.9	5.6	2.2	–	–	–	0.6	384
Van et De Belie, 2014	CPO	18.9	5.74	4.32	63.37	0.89	0.73	0.47	3.34	390
	CV (F)	48.54	33.34	3.52	2.80	0.72	1.54	0.34	0.80	–
	CV (F)	50.83	20.45	7.52	7.58	1.77	1.69	1.00	0.68	–
Lammertin et De Belie, 2008	CPO	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	CV (F)	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Jiang et al., 2004	CPO	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	CV (F)	53.52	34.26	3.10	3.60	0.92	0.97	0.71	0.45	–
Sulapha, 2003	CPO	21.10	5.24	3.10	64.39	1.10	0.57	0.23	2.52	–
	CV (F)	49.30	28.30	13.01	3.37	1.37	0.76	0.21	0.14	–
Khunthongkeaw et al., 2006	CPO	20.99	5.18	3.2	64.63	1.30	0.40	0.04	2.61	315
	CV (F)	45.88	26.2	10.94	8.28	2.83	2.78	0.9	1.04	346
	CV (C)	33.13	26.89	11.96	15.07	2.94	3.33	1.42	1.63	343
Das et Pandey, 2012	CPO	20.89	5.55	4.98	60.46	1.27	0.48	0.23	–	294
	CV1 (F)	61.26	18.26	4.90	0.48	0.51	1.12	0.02	–	200
	CV2 (F)	55.81	20.82	4.56	0.91	0.48	1.20	0.03	–	255
	CV3 (F)	61.98	18.99	4.57	1.19	0.48	1.02	0.07	–	305
Burden D., 2006	CPO	20.56	4.34	3.05	63.92	2.37	0.82	0.23	3.35	363
	CV1 (C)	54.36	24.13	3.82	10.87	1.10	0.71	3.15	0.19	–
	CV2 (C)	46	19.65	4.99	13.51	3.04	1.17	7.08	1.62	–
	CV3 (C)	36.94	20.09	6.21	16.69	4.15	0.85	7.56	2.96	–
	CV4 (C)	33.45	17.97	5.28	29.09	5.34	0.31	1.67	2.47	–
CV5 (C)	40.69	21.72	6.08	19.12	4.73	1.11	1.55	1.02	–	
Xu et al., 2010	CPO	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	CV (F)	52.62	20.53	8.72	5.84	2.92	–	–	0.33	–
Zhang et Li, 2013	CPO	20.17	5.58	2.86	63.51	3.15	0.12	0.57	2.56	329.5
	CV (F)	51.5	18.46	6.78	8.58	3.93	2.52	1.85	0.21	247
Atis, 2003	CPO	20.77	4.93	3.06	63.28	2.42	0.28	0.70	3.02	–
	CV (F)	50.20	28.59	13.17	2.55	1.28	0.98	2.39	0.57	–

* surface de Blaine

3.2.2 Analyse statistique des données

En utilisant XLSTAT de EXCEL2010, on a calculé les maximum et minimum, la moyenne et l'écart type ainsi que la distribution de données pour chaque variable d'entrée comme mentionné dans les tableaux 3.4 et 3.5 respectivement. La distribution des données est illustrée dans la figure 3.2.

Tableau 3.4- Plage de variation des données

Variables	Min	Max	Moyenne	Ecart type
L (kg/m³)	260	500	370	54
CV (%)	0	70	21,4	20,6
E/L	0,28	0,63	0,451	0,086
CO₂ (%)	1	50	9,077	11,652
HR (%)	55	70	64,25	3,66
√t (√jours)	1,732	19,080	7,622	4,393
Xc (mm)	0	57	9,053	9,339

Tableau 3.5- Distribution des données

Paramètres d'entrée	Rangée	Nombre de données	Distribution (%)
L (kg/m³)	260 - 340	58	19,33
	341 - 420	199	66,33
	421 - 500	43	14,33
CV (%)	0 - 25	155	51,67
	26 - 50	87	29,00
	51 - 70	58	19,33
E/L	0.28 – 0.39	69	23,00
	0.40 – 0.51	161	53,67
	0.52 – 0.63	70	23,33
CO₂ (%)	01-20	282	94,00
	21 - 40	0	0,00
	41 - 50	18	6,00
HR (%)	55 - 60	58	19,33
	61 - 65	200	66,67
	66 - 70	42	14,00
t (jours)	3-123	187	62,33
	124-243	47	15,67
	244-364	66	22,00

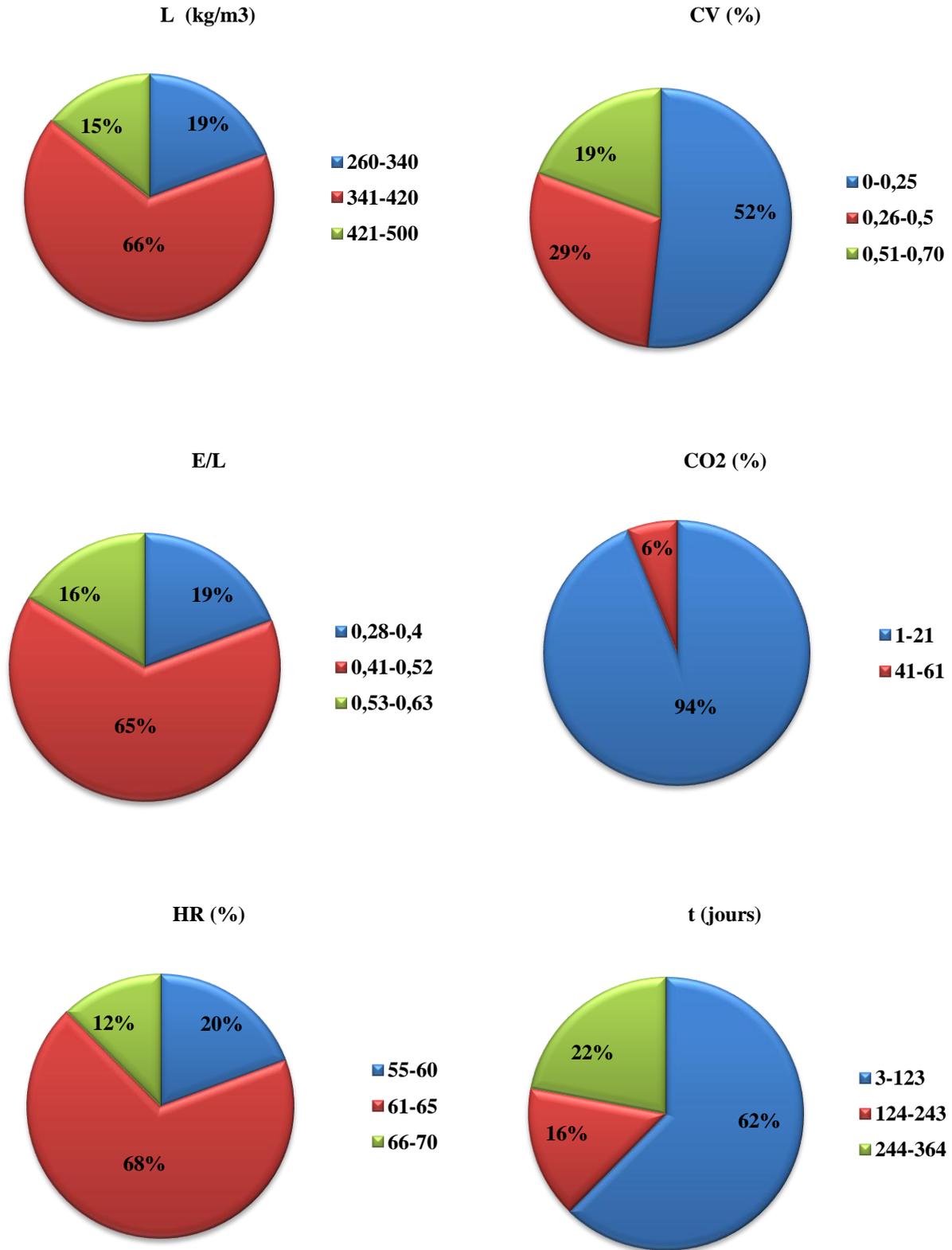


Figure 3.2 — Distribution quantitative des données

3.2.3 Comportement des variables vis-à-vis de la carbonatation

Pour avoir une idée sur le comportement de chaque paramètre (variable) en fonction de la profondeur de carbonatation, on a tracé les figures 3.3 (a-f) à l'aide de MATLAB R2014a.

D'une manière générale, la profondeur de carbonatation diminue avec l'augmentation du liant, et de l'humidité relative. Elle augmente avec l'augmentation du taux de substitution des cendres volantes, du rapport E/L, de la concentration en CO_2 et du temps d'exposition.

Malgré qu'il y a des points aberrants qui peuvent perturber la performance du modèle, et qu'on va les éliminer ultérieurement, on voit que la relation entre la profondeur de carbonatation X_c et chaque paramètre est en concordance avec la littérature. Cela explique le bon choix des articles pour construire notre base de données.

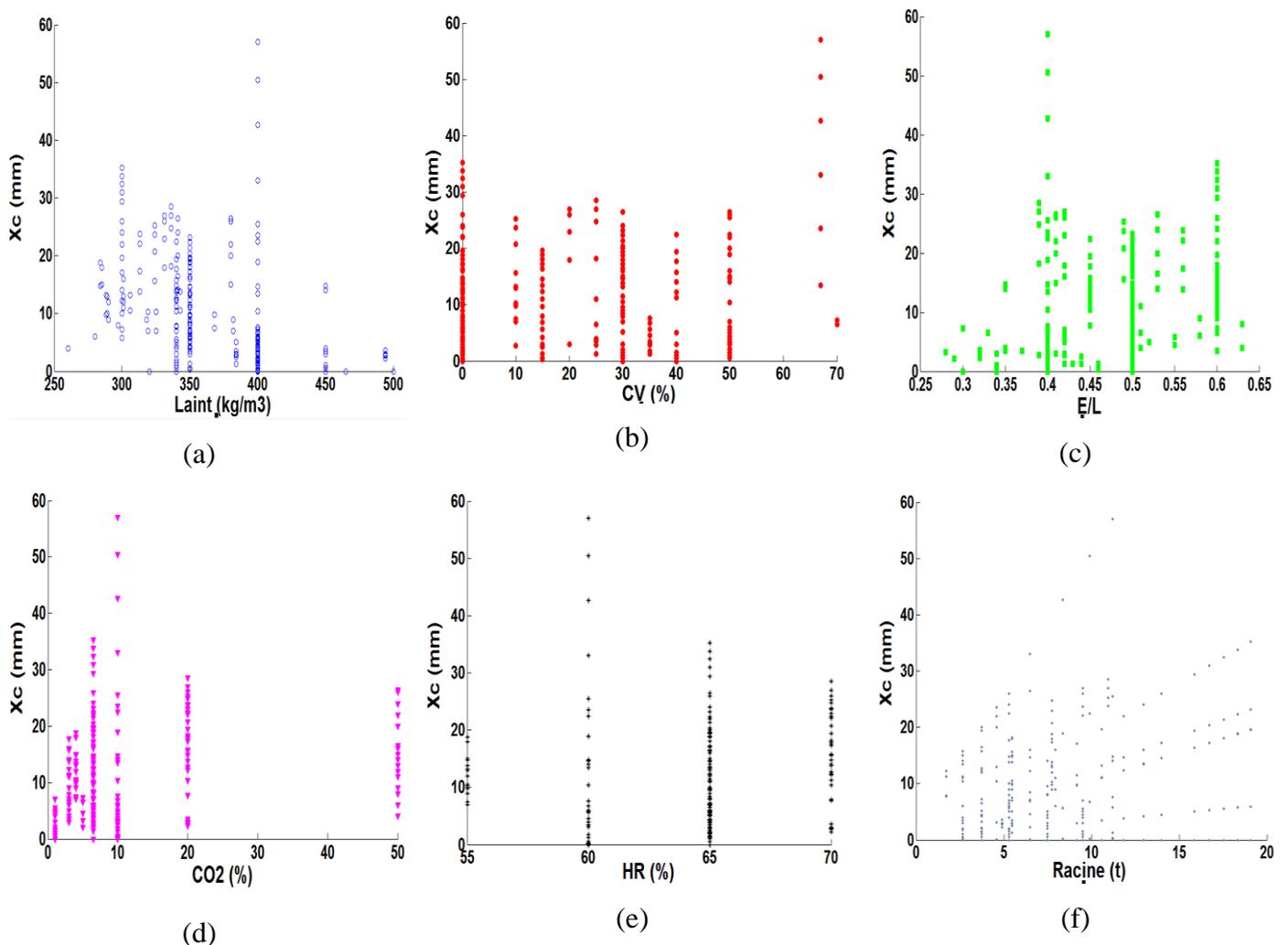


Figure 3.3 — Comportement des variables vis-à-vis la profondeur de carbonatation: (a) Liant, (b) cendres volantes, (c) E/L, (d) CO_2 , (e) HR et (f) \sqrt{t}

3.2.4 Analyse en composantes principales

L'utilisation de l'ACP pour l'exploitation des données remonte au début du siècle dernier. Issue des travaux de psychomètres américains (Pearson, 1901; Spearman, 1904; Hotelling, 1933; Thurstone, 1947). Avant de procéder à cette analyse multi-dimensionnelle, on doit faire une brève présentation sur l'ACP.

C'est une technique descriptive permettant d'étudier les dépendances qui existent entre les variables, afin d'obtenir une description ou une représentation compacte de ces dernières.

Elle a été aussi combinée avec les réseaux de neurones comme une technique pour améliorer ses performances de généralisation et réduire ses entrées (Kuźniar et Waszczyszyn, 2006; Shin et al., 2007; Bellamine et Elkamel, 2008; Junita et Brian, 2008). Ce qu'on a appliqué dans notre algorithme d'apprentissage des réseaux de neurones.

L'ACP est une technique de projection orthogonale linéaire qui projette les observations multidimensionnelles représentées dans un sous-espace de dimension m (m est le nombre de variables observées (7) dans notre cas) dans un sous-espace de dimension inférieure ($L < m$) en maximisant la variance des projections.

L'objectif de l'Analyse en Composantes Principales (ACP) est de revenir à un espace de dimension réduite (par exemple 2) en déformant le moins possible la réalité. Il s'agit donc d'obtenir le résumé le plus pertinent possible des données initiales.

Les variables sont collectées dans une matrice X^b . Soit ($m=7$) le nombre de variables et ($N=300$) le nombre d'observations de chaque variable. X^b est donnée par:

$$X^b = \begin{pmatrix} x_1(1) & x_2(1) & \dots & x_m(1) \\ x_1(2) & x_2(2) & \dots & x_m(2) \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ x_1(N) & x_2(N) & \dots & x_m(N) \end{pmatrix} \quad (3.1)$$

Où $x_1(1)$ représente la valeur de la première variable de la première observation. Au préalable, afin de rendre le résultat indépendant des unités utilisées pour chaque variable, un prétraitement indispensable consiste à centrer et réduire les variables. Chaque colonne X_j de la nouvelle matrice centrée est donnée par:

$$X_j = \frac{X_j^b - M_j}{\sigma_j} \quad (3.2)$$

Où X_j^b est la j^{ieme} colonne de la matrice X^b et M_j est sa moyenne donnée par:

$$M_j = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_j(k) \quad (3.3)$$

et σ_j^2 est sa variance qui sera estimée en utilisant l'équation:

$$\sigma_j^2 = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (x_j(k) - M_j)^2 \quad (3.4)$$

La nouvelle matrice des données normalisées est notée:

$$X = [X_1 \quad . \quad . \quad X_m] \quad (3.5)$$

La matrice de corrélation est donnée par:

$$\Sigma = \frac{1}{N-1} X^T X \quad (3.6)$$

L'estimation des paramètres de l'ACP se résume en une estimation des valeurs et vecteurs propres de la matrice de corrélation Σ . Une décomposition spectrale de cette dernière permet d'écrire:

$$\Sigma = P \Lambda P^T = \sum_{i=1}^m \lambda_i p_i p_i^T \quad (3.7)$$

Où p_i est le i^{ieme} vecteur propre de Σ , λ_i est la valeur propre correspondante et Λ est matrice diagonale des valeurs propres.

S'il existe q relations linéaires entre les colonnes de X , on aura q valeurs propres nulles et la matrice X peut être représentée par les premières $(m-q)=L$ composantes principales correspondant aux valeurs propres non nulles. Toutefois, les valeurs propres égales à zéro sont rarement rencontrées en pratique (relations quasi-linéaires, bruits,...). Donc, il est nécessaire de déterminer le nombre L représentant le nombre de vecteurs propres correspondant aux valeurs propres dominantes.

Pour le choix de L , il faut choisir le pourcentage de la variance totale qu'on veut conserver. Le nombre de composantes est alors le plus petit nombre pris de telle sorte que ce pourcentage soit atteint ou dépassé, les composantes sont choisies successivement dans l'ordre des

variances décroissantes. Le pourcentage de variance expliquée par les L premières composantes est donné par :

$$PCV(L) = 100 \left(\frac{\sum_{j=1}^L \lambda_j}{\sum_{j=1}^m \lambda_j} \right) \% \quad (3.8)$$

Dans notre étude on a développé un algorithme sur “MATLAB R2014a” pour le calcul de tous les paramètres de l’ACP, les résultats sont résumés dans les tableaux 3.7 à 3.10. Les algorithmes et les résultats de cette analyse pour les deux bases de données sont donnés dans l’Annexe 3.

3.2.4.1 Analyse de corrélation

Le coefficient de corrélation linéaire (parfois appelé coefficient de Pearson ou de Bravais-Pearson) est un indice rendant compte numériquement de la manière dont les deux variables considérées varient simultanément. Calculé par le rapport entre la covariance et le produit des écarts-types.

Le coefficient de corrélation est compris entre -1 et 1. Plus il est proche de ces valeurs extrêmes -1 et 1, plus la corrélation entre les variables est forte. Une corrélation égale à 0 signifie que les variables sont linéairement indépendantes.

Le tableau 3.6 donne les matrices de corrélation pour les différents paramètres de données. Remarquons que la plupart des corrélations sont négatives, (ce qui signifie que toutes les variables varient, en moyenne, dans des sens opposés). Le coefficient de corrélation R a été calculé pour chaque couple de paramètres. On note que presque tous les paramètres sont indépendants les uns des autres avec des coefficients de corrélation proches de 0. Sauf entre le liant et le rapport E/L il y a une forte corrélation avec $R = -0.86$.

Tableau 3.6 - Corrélation entre les variables

Variables	Liant (kg/m ³)	CV (%)	E/L	CO ₂ (%)	RH (%)	√t	Xc (mm)
Liant	1	0,082	-0,857	-0,174	0,107	0,026	-0,425
CV (%)	0,082	1	-0,288	-0,064	-0,053	-0,272	0,088
E/L	-0,857	-0,288	1	0,192	-0,199	0,081	0,384
CO₂ (%)	-0,174	-0,064	0,192	1	0,188	-0,120	0,358
RH (%)	0,107	-0,053	-0,199	0,188	1	-0,004	0,030
√t	0,026	-0,272	0,081	-0,120	-0,004	1	0,362
Xc (mm)	-0,425	0,088	0,384	0,358	0,030	0,362	1

3.2.4.2 Valeurs et vecteurs propres

Chaque ligne du tableau 3.7 correspond à une variable virtuelle (facteurs) dont la colonne valeur propre fournit la variance (en fait, chaque valeur propre représente la variance du facteur correspondant). La colonne ou pourcentage de variance, correspond au pourcentage de variance de chaque ligne par rapport au total. La colonne pourcentage cumulé représente le cumul de ces pourcentages. Les facteurs sont les nouvelles variables après la projection.

Tableau 3.7- Valeurs propres et variances

facteurs	valeurs propres	% variance	% cumulé
λ_1	2,32	33,18	33,18
λ_2	1,29	18,40	51,58
λ_3	1,28	18,26	69,83
λ_4	1,03	14,68	84,52
λ_5	0,72	10,29	94,81
λ_6	0,28	4,02	8,82
λ_7	0,08	1,18	100,00

La variance représente la contribution de chaque composante principale et le % cumulé c'est le cumul de cette contribution.

A titre d'exemple, la première valeur propre représente la valeur expliquée de la première composante principale ($\lambda_1=2.32$), elle correspond à 33.18% de la variance totale.

La figure 3.4 illustre le spectre des valeurs propres, on remarque que le facteur 1 a la variance la plus élevée par rapport aux autres facteurs.

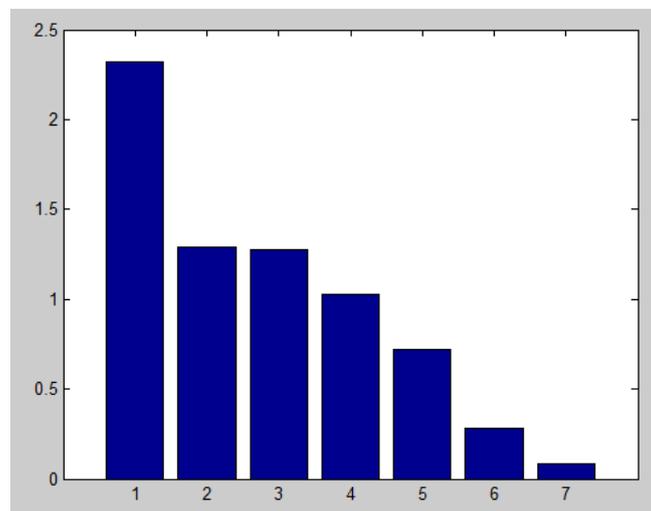


Figure 3.4 — Spectre des valeurs propres

Le tableau 3.8 résume les vecteurs propres de cette analyse.

Tableau 3.8- Vecteurs propres

	U1 (%)	U2 (%)	U3 (%)	U4 (%)	U5 (%)	U6 (%)	U7 (%)
1	-58,78	26,17	-2,44	10,15	-27,85	7,64	70,12
2	-14,21	-33,16	45,09	67,13	25,56	-38,23	6,63
3	59,01	-23,87	-11,31	-17,35	15,25	-22,86	69,03
4	24,90	26,41	58,07	-16,92	-61,30	-35,23	-5,02
5	-8,21	51,41	40,44	-32,06	67,53	-3,75	7,21
6	14,42	57,36	-50,21	35,72	3,27	-51,06	-9,37
7	44,34	31,85	17,47	50,00	-3,14	63,99	10,43

3.2.4.3 Composantes principales

Et enfin les composantes principales de la base de données des bétons aux cendres volantes sont résumées dans le tableau 3.9.

Tableau 3.9 - Composantes principales

	CP1 (%)	CP2 (%)	CP3 (%)	CP4 (%)	CP5 (%)	CP6 (%)	CP7 (%)
Liant	99,57	-3,18	6,54	5,13	-0,94	-2,49	0,14
CV	3,61	99,53	-0,22	-4,11	0,48	7,98	0,05
E/L	-0,14	-0,06	-0,01	0,00	-0,26	0,13	100,00
CO2	-4,02	-2,15	91,98	-35,82	-7,97	13,12	-0,03
HR	0,70	-1,13	6,99	-1,53	99,47	7,30	0,25
\sqrt{t}	0,15	-5,89	0,38	36,66	-6,33	92,64	-0,14
Xc	-7,53	6,57	38,05	85,60	1,23	-33,52	0,04

Le processus d'extraction des composantes principales se poursuit jusqu'à ce qu'il y ait autant de composantes principales que de variables.

Les composantes principales sont linéairement liées aux variables comme suit:

$$CP1 = 0.996 (L) + 0.036 (CV) - 0.001 (E/L) - 0.040 (CO_2) + 0.007 (HR) + 0.002 (\sqrt{t}) - 0.075 (Xc) \quad (3.9)$$

$$CP2 = -0.032 (L) + 0.995 (CV) - 0.001 (E/L) - 0.022 (CO_2) - 0.011 (HR) - 0.059 (\sqrt{t}) - 0.066 (Xc) \quad (3.10)$$

$$CP3 = 0.065 (L) - 0.002 (CV) - 0.000 (E/L) + 0.920 (CO_2) + 0.0070 (HR) + 0.004 (\sqrt{t}) - 0.381 (Xc) \quad (3.11)$$

$$CP4 = 0.051 (L) - 0.041 (CV) + 0.000 (E/L) - 0.358 (CO_2) - 0.015 (HR) + 0.367 (\sqrt{t}) + 0.856 (Xc) \quad (3.12)$$

$$CP5 = -0.009 (L) + 0.005 (CV) - 0.003 (E/L) - 0.080 (CO_2) + 0.995 (HR) - 0.063 (\sqrt{t}) + 0.012 (Xc) \quad (3.13)$$

$$CP6 = -0.025 (L) + 0.080 (CV) + 0.001 (E/L) + 0.131 (CO_2) + 0.073 (HR) + 0.926 (\sqrt{t}) - 0.335 (Xc) \quad (3.14)$$

$$CP7 = 0.001 (L) + 0.001 (CV) + 1.000 (E/L) - 0.000 (CO_2) + 0.003 (HR) - 0.001 (\sqrt{t}) + 0.000 (Xc) \quad (3.15)$$

3.3 Base de données des bétons aux laitiers

Vue l'insuffisance des articles traitant la carbonatation des bétons aux laitiers, notre recherche s'est limitée sur six (6) articles seulement avec une base de données de 218 (après traitement des données).

Avec le même parcours suivi dans la collecte des données des bétons aux cendres volantes, notre base de données des bétons aux laitiers s'est fait filtrer. Le choix des paramètres a été fait selon la disponibilité des données et l'effet de chaque paramètre sur la profondeur de carbonatation, plus de détails seront exposés dans le chapitre 4 pour la conception des réseaux de neurones.

3.3.1 Collecte des données expérimentales

Les données concernant la profondeur de carbonatation des bétons aux laitiers ont été extraites et rassemblées des projets de recherche et de la littérature pour construire la base de 218 données. On a utilisé les résultats de 06 articles de recherche faites sur des bétons aux laitiers (Sulapha et al., 2003; Shi et al., 2009; Younsi et al., 2013; Zhang et al., 2013; Gruyaret et al., 2013; Duan et al., 2013). Les paramètres étudiés sont: les constituants des mélanges (quantité du liant (ciment + laitier), taux de substitution du laitier, et le rapport eau-liant), la composition chimique des laitiers (indice d'acidité I_{ac} et la finesse du laitier), les conditions environnementales (concentration en CO_2 et l'humidité relative) et la durée de cure.

On a pris en considération l'indice d'acidité (indice d'hydraulicité) et la finesse du laitier, pour différencier entre la grande gamme de laitiers existant dans le marché et prendre l'influence de ces deux paramètres sur la profondeur de carbonatation en considération dans notre modèle à élaborer.

La formule (3.16) a été utilisée pour le calcul de l'indice d'acidité des laitiers (Pal et al., 2003):

$$I_{ac} = \frac{CaO + MgO + Al_2O_3}{SiO_2} \times 100 \quad (3.16)$$

Le tableau 3.10 illustre la source des données:

Tableau 3.10- Sources de données des bétons aux laitiers

Source de données	Nombre de données	Distribution des données (%)
Sulapha et al. (2003)	80	36,70
Shi et al. (2009)	24	11,01
Younsi et al. (2013)	15	6,88
Zhang et al. (2013)	21	9,63
Gruyaret et al. (2013)	72	33,03
Duan et al (2013)	6	2,75
Total	218	100

La distribution des données par article est résumée dans le tableau 3.11

Tableau3.11- Variation des paramètres étudiés pour chaque source de données

Auteur	Année	Laitier		Liant (kg/m ³)	E/L	Iac (%)	Finesse (m ² /kg)	CO ₂ (%)	HR (%)	t (jours)	Cure (jours)
		Origine	Taux (%)								
Sulapha et al	2003	Singapour	30 - 67	350	0.5	90.41 – 91.33	450 - 600	6.5	65	14 - 392	28
She et al	2009	Chine	15 - 60	550	0.3 – 0.35	57.29	371	20	70	14 - 56	90
Younsi et al	2013	France	0 - 75	301 - 413	0.41 – 0.60	0 – 89.83	0 - 450	50	65	7 – 42	28
Zhang et al	2013	Chine	0 - 60	550	0.25 – 0.35	0 – 57.29	0 - 371	20	70	14 - 56	90
Gruyaret e al	2013	Belgique	0 - 85	347 - 350	0.50	0 – 98.11	0 - 397	10	60	14 - 112	30 - 540
Duan et al	2013	Chine	0 - 10	360	0.50	0 – 66.86	0 - 290	20	70	3 - 180	28

La distribution des données selon l'origine des matériaux utilisés est illustrée dans la figure 3.5. On remarque que plus de 60% des matériaux sont d'origine Asiatique et 40% sont d'origine Européenne. Ce qui veut dire que notre modèle sera plus valable pour les matériaux Asiatiques.

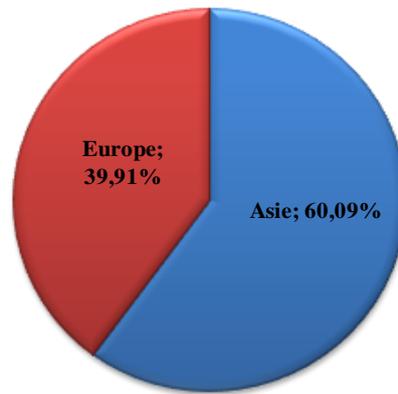


Figure 3.5 — Distribution des données selon leur origine

Le tableau 3.12 résume les compositions chimiques des ciments et laitiers utilisés dans notre 1^{ère} base de données.

Tableau 3.12 - Compositions chimiques des ciments et laitiers utilisés

Auteur	Type de matériau	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	SSB (m ² /kg)
Sulapha et al, 2003	CPO	21.10	5.24	3.10	64.39	1.10	0.57	0.23	2.52	317
	Laitier	32.40	13.90	0.40	42.65	5.90	–	–	–	450
		32.30	14.00	0.60	42.40	6.00	–	–	–	600
		32.70	13.80	0.20	42.40	5.90	–	–	–	800
Shi et al, 2009	CPO	21.40	5.60	2.70	63.30	1.90	0.70	–	3.40	–
	Laitier	36.39	13.76	2.44	30.13	9.36	–	–	1.30	371
Younsi et al, 2013	CPO	20.50	4.50	2.70	64.80	–	–	–	3.50	340
	Laitier	33.30	12.50	0.40	41.50	–	–	–	0.20	450
Zhang et al, 2013	CPO	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	Laitier	36.39	13.76	2.44	30.13	9.36	–	–	1.30	371
Gruyaret e al, 2013	CPO	18.73	4.94	3.99	63.12	1.02	–	–	3.07	359
	Laitier	33.86	8.91	0.69	42.64	07.33	0.52	0.28	1.62	397
Duan et al, 2013	CPO	21.35	4.67	3.31	62.60	–	–	2.25	–	369.6
	Laitier	34.26	17.11	1.23	35.17	–	–	1.72	–	390

3.3.2 Analyse statistique des données

Les maximum, minimum, la moyenne et l'écart type ainsi que la distribution de données pour chaque variable d'entrée sont résumés dans les tableaux 3.13 et 3.14 respectivement.

Tableau 3.13 - Plage de variation des données

Variable	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
L (kg/m³)	301	550	390,57	82,60
Laitier (%)	0	85	45,29	27,06
I acidité	0	98,11	71,31	35,09
 finesse (m²/kg)	0	600	367,75	181,97
E/L	0,25	0,60	0,46	0,07
CO₂ (%)	6,5	50	13,81	11,14
RH (%)	60	70	64,52	3,73
√t	1,73	19,79	8,74	4,90
cure (jrs)	28	540	98,16	136,15
Xc (mm)	0	36	9,03	7,86

Tableau 3.14 - Distribution des données

Paramètres d'entrée	Rangée	Nombre de données	Distribution (%)
Liant (kg/m³)	301-385	168	77,06%
	386-470	5	2,29%
	471-555	45	20,64%
Laitier (%)	0-29	49	22,48%
	30-59	73	33,49%
	60-85	96	44,04%
E/L	0,25-0,37	45	20,64%
	0,38-0,49	5	2,29%
	0,50-0,60	168	77,06%
Iac (%)	0-33	37	16,97%
	34-66	36	16,51%
	67-98,11	145	66,51%
F(m²/kg)	0-199	37	16,97%
	200-399	91	41,74%
	400-600	90	41,28%
CO₂ (%)	6,5-16,5	152	69,72%
	17,5-26,5	51	23,39%
	27,5-46,5	0	0,00%
	47,5-56,5	15	6,88%
HR (%)	60-63,3	72	33,03%
	63,4-66,7	95	43,58%
	66,8-70,1	51	23,39%
√t (jours)	1,73-8,23	132	60,55%
	8,24-14,73	51	23,39%
	14,74-21,23	35	16,06%

La figure 3.6 illustre la distribution quantitative des données.

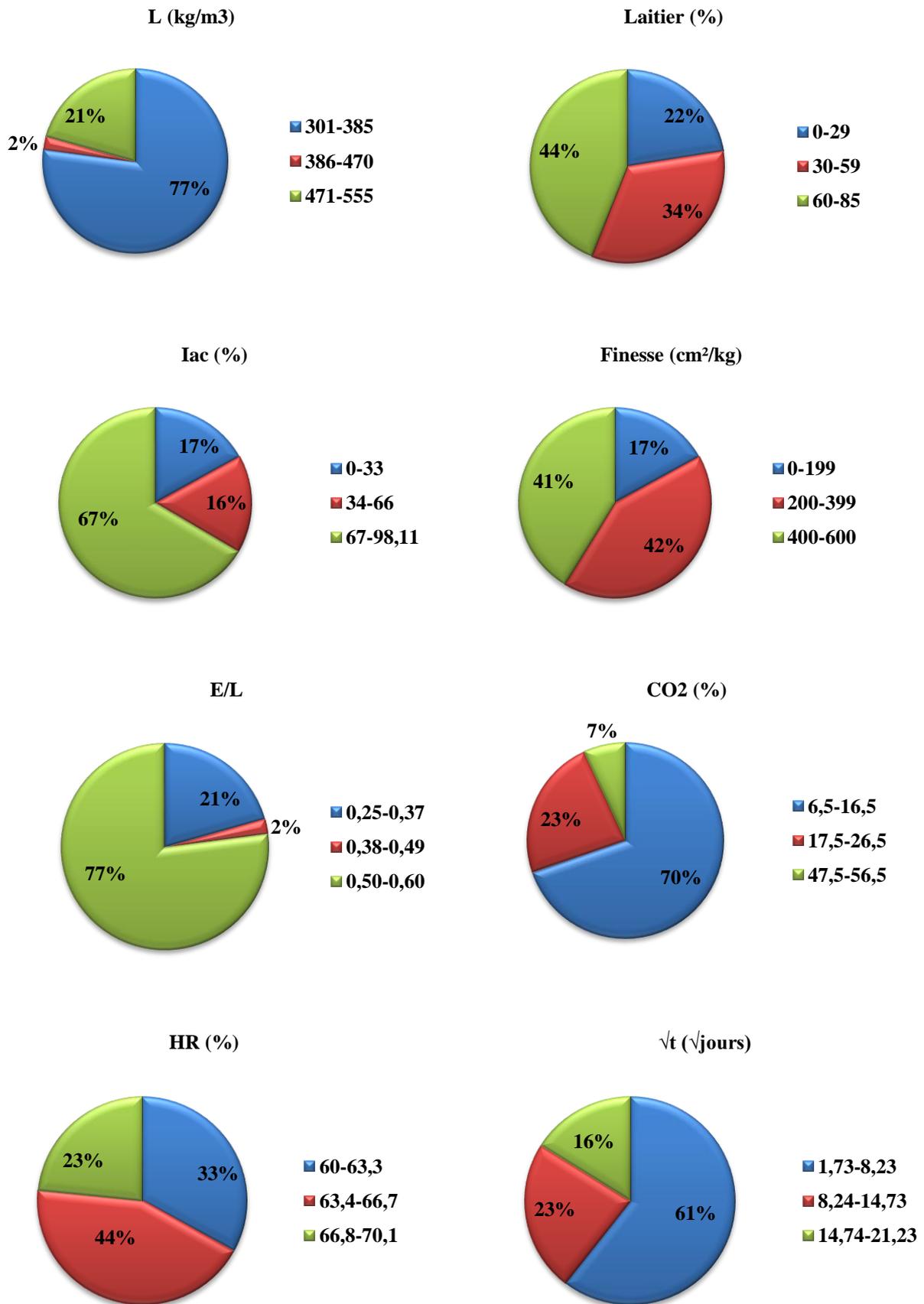


Figure 3.6 — Distribution quantitative des données

3.3.3 Comportement des variables vis-à-vis de la carbonatation

Les figures 3.7 (de a à i) illustrent le comportement des paramètres pris en considération vis-à-vis de la profondeur de carbonatation.

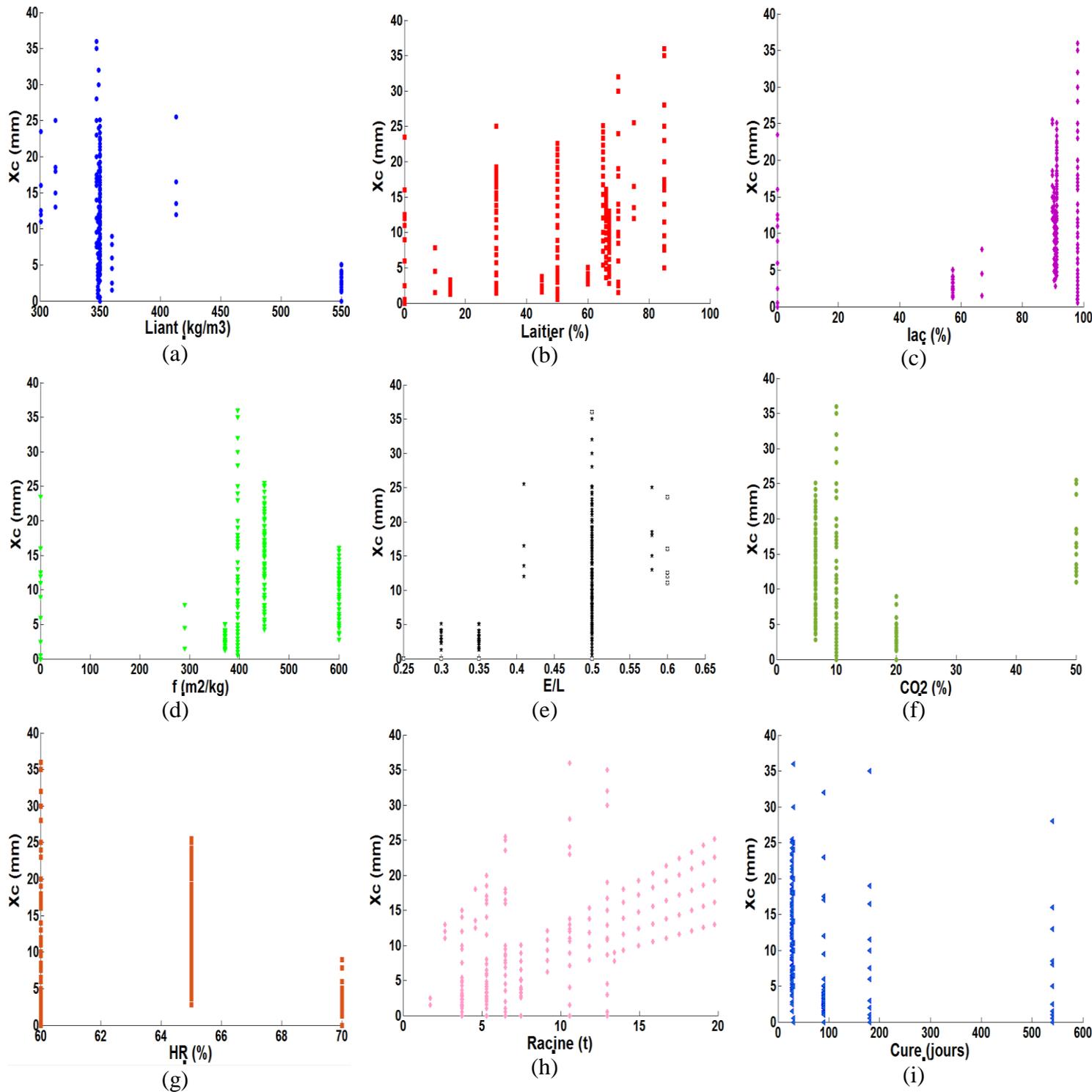


Figure 3.7 — Comportement des variables vis-à-vis de la profondeur de carbonatation:
 (a) Liant, (b) Laitier, (c) Iac, (d) Finesse, (e) E/L, (f) CO₂, (g) HR, (h) t et (i) cure.

D'une manière générale, la profondeur de carbonatation diminue avec l'augmentation du liant, de la finesse du laitier, de l'humidité relative et de la durée de cure. Elle augmente avec l'augmentation du taux de substitution du laitier, de l'indice d'acidité, du rapport E/L, du CO₂ et du temps d'exposition.

Cette figure nous montre que l'effet de chaque paramètre sur la profondeur de carbonatation des bétons au laitier est en concordance avec la littérature et qu'il y a peu de points aberrants qui peuvent nous perturber les résultats, ce qui nous facilitera la tâche pour le développement de notre modèle.

3.3.4 Analyse en composantes principales

Les memes étapes suivies précédemment ont été appliquées sur la base de données des bétons aux laitiers:

3.3.4.1 Analyse de corrélation

Le tableau 3.15 donne les matrices de corrélation pour les différents paramètres de données. Remarquons que la plupart des corrélations sont négatives, (ce qui signifie que toutes les variables varient, en moyenne, dans des sens opposés). On note que plusieurs paramètres sont en corrélation les uns des autres avec des coefficients de corrélation proches de 1 comme mentionnés en gras sur le tableau. Cette dépendance entre les paramètres va être éliminée en appliquant l'ACP.

Tableau 3.15- Corrélation entre les variables

Variables	Liant (kg/m ³)	Laitier (%)	I ac (%)	finesse (m ² /kg)	E/L	CO ₂ (%)	RH (%)	√t (√jrs)	cure (jrs)	Xc (mm)
Liant (kg/m ³)	1	-0,246	-0,341	-0,170	-0,970	0,262	0,748	-0,325	-0,032	-0,437
BFS (%)	-0,246	1	0,837	0,780	0,192	-0,281	-0,271	0,189	-0,005	0,494
I acidité	-0,341	0,837	1	0,901	0,302	-0,308	-0,236	0,276	-0,090	0,507
finesse (m ² /kg)	-0,170	0,780	0,901	1	0,150	-0,286	0,044	0,347	-0,238	0,401
E/L	-0,970	0,192	0,302	0,150	1	-0,173	-0,686	0,287	0,014	0,430
CO ₂ (%)	0,262	-0,281	-0,308	-0,286	-0,173	1	0,327	-0,439	-0,092	0,006
RH (%)	0,748	-0,271	-0,236	0,044	-0,686	0,327	1	-0,071	-0,374	-0,198
√t	-0,325	0,189	0,276	0,347	0,287	-0,439	-0,071	1	-0,208	0,548
cure (jrs)	-0,032	-0,005	-0,090	-0,238	0,014	-0,092	-0,374	-0,208	1	-0,259
Xc (mm)	-0,437	0,494	0,507	0,401	0,430	0,006	-0,198	0,548	-0,259	1

3.3.4.2 Valeurs et vecteurs propres

Les valeurs propres et leurs variances sont résumées dans le tableau 3.16.

Tableau 3.16 - Valeurs propres et variances

Facteurs	valeurs propres	% variance	% cumulé
λ_1	4.06	40.55	40.55
λ_2	2.16	21.63	62.18
λ_3	1.35	13.51	75.69
λ_4	1.08	10.82	86.50
λ_5	0.65	6.55	93.05
λ_6	0.35	3.55	96.60
λ_7	0.16	1.57	98.17
λ_8	0.13	1.26	99.44
λ_9	0.03	0.34	99.78
λ_{10}	0.02	0.22	100

Les vecteurs propres de la base de données des bétons aux laitiers sont résumés dans le tableau 3.17.

Tableau 3.17- Vecteurs propres

N°	U1	U2	U3	U4	U5	U6	U7	U8	U9	U10
1	-36,87%	0,15%	16,67%	-8,86%	19,35%	-18,70%	-9,00%	-15,27%	20,90%	72,09%
2	36,93%	26,53%	32,75%	19,56%	7,75%	-34,23%	-14,31%	67,91%	-19,72%	6,30%
3	40,62%	27,53%	23,78%	15,69%	-7,90%	14,57%	3,07%	-57,18%	-55,50%	12,13%
4	34,82%	41,72%	16,19%	4,88%	-16,53%	40,53%	-10,08%	-3,37%	67,12%	-15,05%
5	34,60%	-40,05%	-21,24%	15,08%	-20,02%	31,31%	19,97%	20,63%	5,84%	65,43%
6	-22,56%	4,05%	-26,46%	74,50%	25,44%	25,34%	-43,52%	1,19%	-5,87%	-2,26%
7	-27,48%	48,40%	-20,70%	-6,00%	2,10%	43,07%	52,23%	32,69%	-27,52%	-4,94%
8	27,41%	8,52%	-36,95%	-55,60%	40,11%	22,89%	-47,35%	7,40%	-15,81%	6,39%
9	-4,15%	-32,16%	58,77%	-1,97%	61,79%	36,63%	17,31%	3,35%	3,26%	-3,21%
10	34,42%	10,73%	-37,72%	18,98%	52,45%	-35,79%	45,17%	-17,69%	22,43%	-5,29%

3.3.4.3 Composantes principales

Les composantes principales de la base de données des bétons aux laitiers sont résumées dans le tableau 3.18.

Tableau 3.18 - Composantes principales

	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6	CP7	CP8	CP9	CP10
Liant	-8,32%	-11,80%	98,40%	7,57%	2,58%	-5,14%	3,27%	0,29%	-2,93%	0,09%
Laitier	10,43%	7,29%	-1,58%	82,57%	-46,90%	25,44%	-8,84%	7,32%	6,17%	0,03%
Iac	15,92%	8,68%	-5,37%	49,33%	69,40%	-47,40%	-5,23%	8,85%	6,27%	0,02%
Finesse	92,95%	27,55%	13,02%	-18,71%	-5,54%	6,52%	0,44%	-1,99%	-1,96%	-0,01%
E/L	0,01%	0,01%	-0,09%	-0,03%	0,03%	0,06%	0,00%	-0,11%	0,03%	100,00%
CO₂	-1,49%	-2,02%	2,46%	2,32%	52,18%	82,11%	-6,45%	21,67%	-2,41%	-0,03%
HR	0,16%	-1,21%	3,31%	-6,18%	1,63%	5,51%	7,42%	-11,43%	98,64%	-0,05%
t	0,96%	-0,14%	-1,63%	-5,19%	-10,85%	-10,40%	53,27%	82,88%	6,08%	0,09%
Cure	-30,36%	94,70%	9,17%	-4,48%	0,33%	1,69%	1,75%	-0,48%	0,34%	0,00%
Xc	1,84%	-0,30%	-3,69%	15,80%	10,12%	12,37%	83,34%	-48,94%	-11,69%	-0,06%

Les composantes principales sont linéairement liées aux variables, par exemple :

$$CP1 = -0.083 (L) + 0.104 (\text{Laitier}) + 0.159 (I_{ac}) + 0.929 (F) - 0.015 (CO_2) + 0.002 (HR) + 0.010(t) - 0.304(\text{cure}) + 0.018 (X_c) \quad (3.17)$$

3.4 Normalisation des données

La normalisation est une transformation de mise à l'échelle. Au sein des données, il y a souvent des différences assez larges entre le maximum et le minimum des valeurs. Quand la normalisation est effectuée, l'ordre de grandeur des valeurs est réduit.

Après la division des données, chaque valeur d'entrée et de sortie doit être limitée avant de la traiter dans un réseau de neurones, donc les données ont été normalisées entre -1 et 1 pour être compatible avec les limites de la fonction de transfert sigmoïde tangente choisit pour nos deux modèles comme on va voir dans le chapitre 4 de cette these.

L'équation 3.18 a été utilisée pour la normalisation de nos données :

$$X_n = aX + b \quad (3.18)$$

Où :

X sont les valeurs actuelles des paramètres d'entrée ou de sortie;

X_n sont les valeurs normalisées des paramètres d'entrée ou de sortie;

a et b sont des coefficients de l'équation normalisée calculés par les formules (3.19) et (3.20) respectivement.

$$a = \frac{X}{X_{max} - X_{min}} \quad (3.19)$$

$$a = \frac{X_{max} + X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \quad (3.20)$$

X_{min} et X_{max} sont le minimum et le maximum des paramètres d'entrée ou de sortie respectivement.

3.5 Conclusion

Dans ce chapitre on a traité les deux bases de données consacrées à la prédiction de la profondeur de carbonatation des bétons aux cendres volantes et aux laitiers. On a fait une analyse statistique calculant les min, max et écarts types des deux bases de données. Ensuite, on a fait une distribution des données par région et par quantité. Une analyse en composantes principales permettant d'éliminer les données en corrélations a été aussi faite. Et enfin on a fait une normalisation des données pour adapter nos données d'être des valeurs d'entrée ou de sortie des réseaux de neurones artificiels.

Chapitre 4

Prédiction de la carbonatation par les réseaux de neurones artificiels

4.1 Introduction

Au cours des deux dernières décennies, nous avons pu constater un développement fulgurant des réseaux de neurones (RNA). Cet intérêt a démarré avec l'application réussie de cette technique puissante pour des problématiques très différentes, et dans des domaines aussi divers que la finance, la médecine, la production industrielle, la géologie ou encore la physique.

Le succès croissant des réseaux de neurones sur la plupart des autres techniques statistiques peut s'attribuer à leur puissance, leur polyvalence et à leur simplicité d'utilisation. Les réseaux de neurones sont des techniques extrêmement sophistiquées de modélisation et de prévision, en mesure de modéliser des relations entre des données ou des fonctions particulièrement complexes.

Dans ce chapitre on va choisir étape par étape l'architecture des deux réseaux de neurones pour la prédiction de la profondeur de carbonatation des bétons aux cendres volantes et aux laitiers.

4.2 Elaboration de la structure du MCV

Le premier modèle à élaborer est conçu pour la prédiction de la profondeur de carbonatation des bétons aux cendres volantes qu'on a appelé MCV.

Dans la littérature on trouve une variété de réseaux qui possède chacun des avantages et des inconvénients, donc il faudra bien se placer et faire un choix optimal pour répondre aux différentes contraintes.

4.2.1 Sélection des Variables d'Entrée

Le nombre d'unités d'entrée et d'unités de sortie est déterminé par le problème. La variable cible est censée dépendre des entrées donc son choix est clair. Ce n'est en revanche pas aussi évident pour le choix des entrées. Il peut précisément exister une certaine incertitude quand aux entrées à utiliser. Il faut savoir que le choix d'un nombre suffisant de bons prédicteurs est d'une importance cruciale pour la modélisation prédictive (c'est-à-dire la mise en relation d'une variable cible et d'un ensemble d'entrées) et en fait, pour toutes les formes d'analyses statistiques. Si nous intégrons des entrées qui n'ont pas véritablement de lien avec la variable cible, nous pouvons par exemple détériorer sans nous en rendre compte la performance du

réseau de neurones. À l'inverse, un fichier de données comportant un nombre insuffisant d'entrées pourra ne jamais être modélisé de façon précise par un réseau de neurones.

Le choix des paramètres d'entrée de notre modèle s'est fait après plusieurs itérations; en premier lieu on a pris en considération 8 paramètres d'entrée: rapport agrégats/liant (A/L), température (T), liant (L), cendres volantes (CV), rapport E/L, concentration CO₂, humidité relative HR et le temps t. Mais cette combinaison n'a pas donné de résultats satisfaisants vis-à-vis de la performance du modèle (coefficient de corrélation R). Le tableau 4.1 résume quelques architectures proposées avec leurs performances.

Tableau 4.1 - Choix des paramètres d'entrée du modèle MCV

Nombre de paramètres	Paramètres d'entrée	R	Nombre de paramètres	Paramètres d'entrée	R
08	C (kg/m ³), CV (%), A/L, E/L, CO ₂ , T(°C), HR (%), t(jours)	0.9234	05	L (kg/m ³), CV (%), E/L, CO ₂ , \sqrt{t} (\sqrt{j} jours)	0.9356
07	C (kg/m ³), CV (%), A/L, E/L, CO ₂ , T(°C), t(jours)	0.8675	08	L (kg/m ³), CV (%), E/L, A/L, CO ₂ , HR (%), T (°C), \sqrt{t} (\sqrt{j} jours)	0.8764
07	C (kg/m ³), CV (%), E/L, CO ₂ , T(°C), HR (%), t(jours)	0.8942	07	CV (%), E/L, A/L, CO ₂ , HR (%), T (°C), \sqrt{t} (\sqrt{j} jours)	0.8532
07	L (kg/m ³), CV (%), E/L, CO ₂ , T(°C), HR (%), t(jours)	0.8754	08	C (kg/m ³), CV (%), E/L, A/L, CO ₂ , HR (%), T (°C), \sqrt{t} (\sqrt{j} jours)	0.9565
06	L (kg/m³), CV (%), E/L, CO₂, HR (%), \sqrt{t}(\sqrt{j}jours)	0.9825	07	L (kg/m ³), E/L, A/L, CO ₂ , HR (%), T (°C), \sqrt{t} (\sqrt{j} jours)	0.8721
07	L (kg/m ³), CV (%), E/L, A/L, CO ₂ , HR (%), \sqrt{t} (\sqrt{j} jours)	0.9540	06	A/L, E/L, CO ₂ , T(°C), HR (%), t(jours)	0.8348

La meilleure combinaison est composée de six (6) paramètres d'entrée (L, CV, E/L, CO₂, HR et t) et une seule sortie la profondeur de carbonatation (x_c) avec un coefficient de corrélation de 0.9825. Cette performance n'est pas du seulement aux paramètres d'entrée choisis mais à d'autres paramètres qu'on va voir ultérieurement.

4.2.2 Architecture du réseau

Il n'y a pas de méthodes précises pour le choix du nombre de couches cachées et de neurones dans chaque couche. Cela peut se faire d'une manière itérative. On commence d'abord par une architecture simple d'un perceptron monocouche, si ce choix nous donne de meilleures performances on va l'adopter pour notre modèle. Sinon, on opte pour un perceptron multicouches en commençant avec deux couches cachées.

De la même façon, on fait le choix des neurones de la couche cachée ainsi que les fonctions d'activation pour chaque couche (couche cachée et couche de sortie).

Si le nombre de neurone dans la couche cachée n'est pas suffisant, le réseau ne pourra pas décrire la fonction étudiée à cause du nombre insuffisant de paramètres qui permet l'exploration de tous les points des données d'apprentissage, ceci peut être représenté par un manque de degré de liberté du réseau. Dans le cas contraire, s'il y a beaucoup de neurones, le réseau aura beaucoup de paramètres libres ce qui peut mener à ce qu'on appelle du sur-apprentissage « overfitting », dont le résultat est la perte de la capacité de généralisation du réseau. De plus, le nombre excessif des neurones dans la couche cachée peut retarder énormément le processus d'apprentissage. Pour éviter ce genre de cas, on a préféré lancer à chaque fois la procédure « essai-erreur », en commençant par 15 neurones et en diminuant jusqu'à arriver au nombre exacte de neurones dans la couche cachée. A chaque essai, l'apprentissage est lancé 100 fois (cycle d'apprentissage) de manière à varier chaque fois les conditions initiales (valeurs initiales des poids) dans le but d'éviter de tomber dans le minimum local. Seuls les résultats de la meilleure performance de généralisation sont retenus comme mentionné dans le tableau 4.2 résumant quelques itérations faites pour le choix du nombre de neurones de la couche cachée et des fonctions d'activation.

Tableau 4.2 - Choix du nombre de neurones et des fonctions d'activation

NNCC*	Fonction d'activation CC**	Fonction d'activation CS***	R	Performance (MSE)
15	Tansig	Tansig	0.9525	0.2385
	Tansig	Logsig	0.4517	10.5830
	Tansig	Purelin	0.9725	0.0079
	Logsig	Puerlin	0.9613	0.0649
	Logsig	Tansig	0.9798	0.1455
	Logsig	Logsig	0.4526	10.5830
12	Tansig	Tansig	0.9616	0.0092
	Tansig	Logsig	0.4035	10.5830
	Tansig	Purelin	0.9743	0.2549
	Logsig	Purelin	0.9824	0.0058
	Logsig	Tansig	0.9616	0.1208
	Logsig	Logsig	0.4770	10.5830
10	Tansig	Tansig	0.9727	0.0305
	Tansig	Logsig	0.4555	10.5830
	Tansig	Purelin	0.9740	0.1945
	Logsig	Purlin	0.9506	0.1221
	Logsig	Tansig	0.9642	0.0769
	Logsig	Logsig	0.3355	10.5830
8	Tansig	Tansig	0.9825	0.0035
	Tansig	Logsig	0.4035	10.5830
	Tansig	Purelin	0.9743	0.2549
	Logsig	Purelin	0.9624	0.0058
	Logsig	Tansig	0.9726	0.1208
	Logsig	Logsig	0.4770	10.5830

NB : * Nombre de Neurones dans la Couche Cachée ; ** Couche Cachée ; *** Couche de Sortie

D'après les résultats du tableau ci-dessus, on peut constater que la combinaison Tansig-Tansig avec 8 neurones dans la couche cachée donne les meilleures performances.

L'architecture du réseau pour le premier modèle de prédiction de la profondeur de carbonatation des bétons aux cendres volantes est illustrée par la figure 4.1.

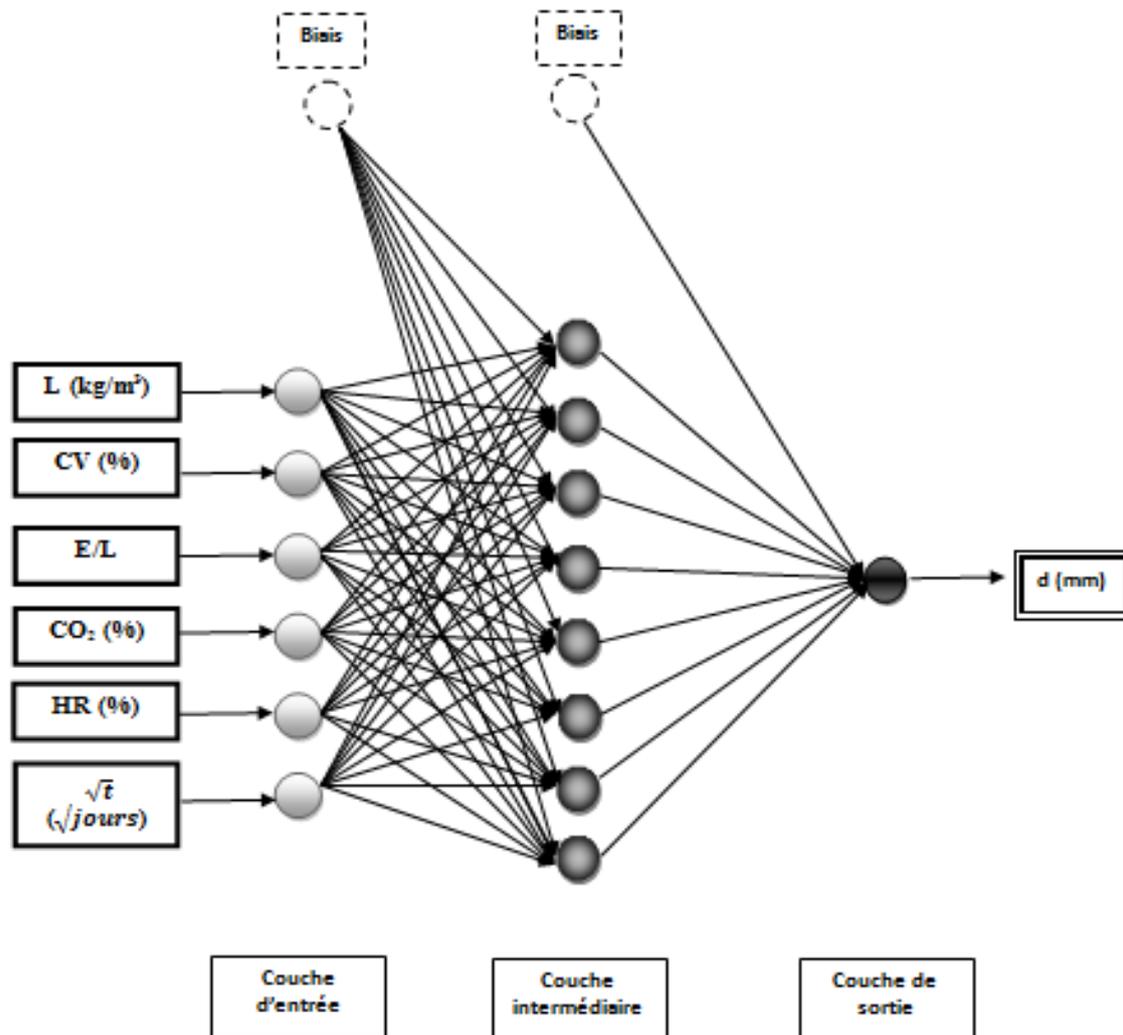


Figure 4.1 — Architecture du réseau de neurone du modèle MCV

4.2.3 Apprentissage du réseau

Une fois l'architecture du réseau de neurones choisie, c'est-à-dire le type de réseau de neurones, les fonctions d'activation, etc..., nous devons déterminer les autres paramètres ajustables du modèle qui sont les poids qui permettent de connecter les entrées aux neurones cachés et les neurones cachés aux neurones de sortie. Le processus d'ajustement de ces paramètres de telle sorte que le réseau soit en mesure d'approcher la relation fonctionnelle sous-jacente entre les entrées x et les cibles t est connu sous le nom d'*apprentissage*. C'est au cours de ce processus que le réseau de neurones va apprendre à modéliser les données par des exemples. Bien qu'il existe différentes manières de réaliser l'apprentissage des réseaux de neurones, la plupart d'entre elles utilisent des algorithmes numériques qui sont en mesure d'effectuer la tâche au cours d'un nombre fini d'itérations. Nous avons recours à ces algorithmes itératifs essentiellement en raison de la nature fortement non-linéaire des modèles

de réseau de neurones pour lesquels une solution en forme fermée n'est généralement pas disponible. Un algorithme d'apprentissage itératif va ajuster graduellement les poids du réseau de neurones de telle sorte que pour toute donnée d'entrée x , le réseau de neurones est en mesure de produire une sortie aussi proche que possible de t .

La méthode la plus utilisée est la rétro-propagation: nous entrons des valeurs des cellules d'entrée et en fonction de l'erreur obtenue en sortie, nous corrigeons les poids. Ce cycle est répété jusqu'à ce que la courbe d'erreur du réseau ne soit croissante (il faut bien prendre garde de ne pas sur-entraîner un réseau de neurones qui deviendra alors moins performant). Le critère d'arrêt de l'apprentissage est souvent calculé à partir d'une fonction de coût (MSE), en caractérisant l'écart entre les valeurs de sortie obtenues et les valeurs de références.

Pour construire et apprendre le modèle MCV pour prédire la profondeur de carbonatation des bétons aux cendres volantes, un programme sur MATLAB (R2014a) a été développé et utilisé pour tester la performance de 5 algorithmes d'apprentissage vis-à-vis leur précision et leur vitesse comme montré sur le tableau 4.3.

Tableau 4.3 - Choix de la fonction d'apprentissage pour le premier modèle

Fonction d'apprentissage	Algorithme de rétro-propagation	R	Performance (MSE)	Cycle d'apprentissage/ temps actuel
traingd	Gradual descendent	0.9811	0.0053052	100000/100000
traingda	Gradual descendent self-adaptw/l	0.9419	0.026974	100/100
traingdm	Gradual descendent w/momontum	0.8168	0.030711	100/43
traingdx	Gradual descendent w/momentum and self-adapt	0.9518	0.014867	1000/117
trainlm	Levenberg-Marquardt	0.9825	0.0034805	100/17

Selon le tableau 4.3, l'algorithme de Levenberg–Marquardt a convergé facilement et a une plus grande précision que les autres algorithmes du point de vue vitesse d'apprentissage et erreur quadratique moyenne MSE. Donc, cet algorithme a été sélectionné pour notre RNA.

Les itérations faites par l'algorithme de Levenberg-Marquardt suivent l'équation 4.1:

$$x_{i+1} = x_i - (H + \mu I)^{-1} \nabla f \quad (4.1)$$

où f est une fonction quadratique et H la matrice Hessienne évalué en x_i . Sachant que le calcul de la Hessienne est complexe, elle est remplacée par la matrice Jacobienne J (Equation 4.2):

$$H = J^T J \quad (4.2)$$

Le gradient peut être calculé par l'équation 4.3

$$\nabla f = J^T e \quad (4.3)$$

où e est le vecteur d'erreur, alors on obtient l'équation 4.4:

$$x_{i+1} = x_i - (J^T J + \mu I) - 1 J^T e \quad (4.4)$$

Si le scalaire μ est égale à 0, la méthode devient une méthode Gauss Newton qui est assez rapide et précis près d'un minimum local, mais avec un μ plus grand, l'algorithme tend vers la méthode du gradient descendant. Si la fonction de l'erreur de la fonction diminue, μ diminue aussi (par un facteur de 10) pour réduire l'influence du gradient descendant mais si l'erreur augmente, le test n'est pas accepté et μ est augmenté (Ranganathan, 2004).

4.2.4 Paramètres d'apprentissage

La meilleure architecture du réseau est aboutie après un certain nombre d'itérations, les paramètres optimaux du réseau sont trouvés en minimisant la fonction d'erreur sélectionnée (tableau 4.4)

Tableau 4.4 - Paramètres d'apprentissage de MCV

Paramètres	RNA
Nombre de neurones dans la couche d'entrée	6
Nombre de couches cachées	1
Nombre de neurones dans la couche cachée	8
Nombre de neurones dans la couche de sortie	1
Vitesse d'apprentissage	0.05
Cycle d'apprentissage	100
Fonction d'activation	Tansig
Algorithme d'apprentissage	Trainlm

4.2.5 Test et Validation

Alors que les tests concernent la vérification des performances d'un réseau de neurones hors apprentissage et sa capacité de généralisation, la validation est parfois utilisée lors de l'apprentissage. Une fois le réseau calculé, il faut toujours procéder à des tests afin de vérifier que le réseau réagit correctement. Il y a plusieurs méthodes pour effectuer une validation: la validation croisée, le bootstrapping etc... Mais pour les tests, dans le cas général, une partie

de l'échantillon est simplement écartée de l'échantillon d'apprentissage et conservée pour les tests hors échantillons.

A travers ce test on fait extraire les performances du système, si ces performances ne sont pas satisfaisantes, il faudra soit modifier l'architecture du réseau, soit modifier la base d'apprentissage et de test.

Dans notre étude on a divisé notre base de données à 60% pour l'apprentissage, 20% pour le test et 20% pour la validation parce que cette division a donné les meilleures performances comme mentionné dans le tableau 4.5.

Tableau 4.5 - Division des données pour le MCV

Apprentissage	Validation	Test	R	MSE
60%	20%	20%	0.9825	0.0034805
70%	15%	15%	0.9834	0.0072356
80%	10%	10%	0.9788	0.0080579

4.2.6 Performances du MCV

Après la procédure de sélection des paramètres du MCV, et l'apprentissage appliqué suivant l'algorithme de rétro-propagation développé avec Matlab Ra2014. On a pu constater que notre modèle a de bonnes performances vis-à-vis de la corrélation entre les valeurs observées et les valeurs prédites par les RNAs (figure 4.2). Que se soit pour les données d'apprentissage ($R=0.9872$), pour le test ($R=0.9468$) ou pour la validation ($R=0.9801$), avec un coefficient de corrélation global de 0.9825. Mais cela reste insuffisant pour juger notre modèle.

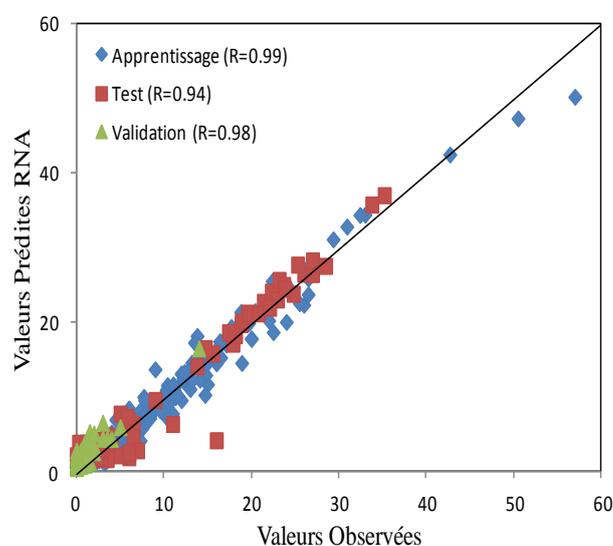


Figure 4.2 — Performances du MCV

4.2.7 Etude paramétrique du MCV

Le premier modèle élaboré pour la prédiction de la profondeur de carbonatation des bétons aux cendres volantes avec un coefficient de corrélation de 0.9825 et un $MSE=0.0035$, va être validé par l'effet de chaque paramètre d'entrée sur la profondeur de carbonatation en fixant les autres paramètres. Si le comportement est en accord avec les résultats issus de la littérature, on dit que notre modèle est performant.

4.2.7.1 Effet de proportions des cendres volantes

Pour voir l'effet du taux de substitution des cendres volantes sur la profondeur de carbonatation à travers le temps, on a fixé tous les paramètres ($L=350\text{kg/m}^3$; $\text{CO}_2=4\%$; $\text{HR}=65\%$) et on a calculé la profondeur de carbonatation pour $E/L=(0.3; 0.4; 0.5 \text{ et } 0.6)$ pour différents taux de substitution des cendres volantes (0 à 60%) à différents âges (7, 28, 90, 120, 240 et 360 jours) comme illustré dans la figure 4.3.

Cette figure montre que l'effet des cendres volantes sur la profondeur de carbonatation n'est pas appréciable au jeune âge, seulement pour de forts taux de substitution (au-delà de 40% de cendres volantes), il y'a une légère diminution de la profondeur de carbonatation. A 90 et 120 jours, l'augmentation de la profondeur de carbonatation est plus remarquée à partir de 20% du taux de substitution et qui reste presque constante avec l'augmentation du dosage en cendres volantes. A l'âge de 360 jours, la vitesse de carbonatation est plus prononcée avec l'augmentation du dosage en cendres volantes. Ces résultats sont en accord avec la littérature ; que l'ajout de pouzzolanes (cendres volantes et de laitiers) augmente la profondeur de carbonatation : plus le taux d'ajouts est élevé et plus la profondeur de carbonatation est importante (Ogha et Nagataki, 1989; Papadakis et al, 1992; Chaussadent 1999; Atis, 2003; Khunthongkeaw et Tangtermsirikul, 2005; Burden, 2006; Khunthongkeaw et al., 2006; Sisomphon et Franke, 2007; Bouzoubaa et al., 2010; Pedro Faustino et al., 2013; Zhang et Liu, 2013).

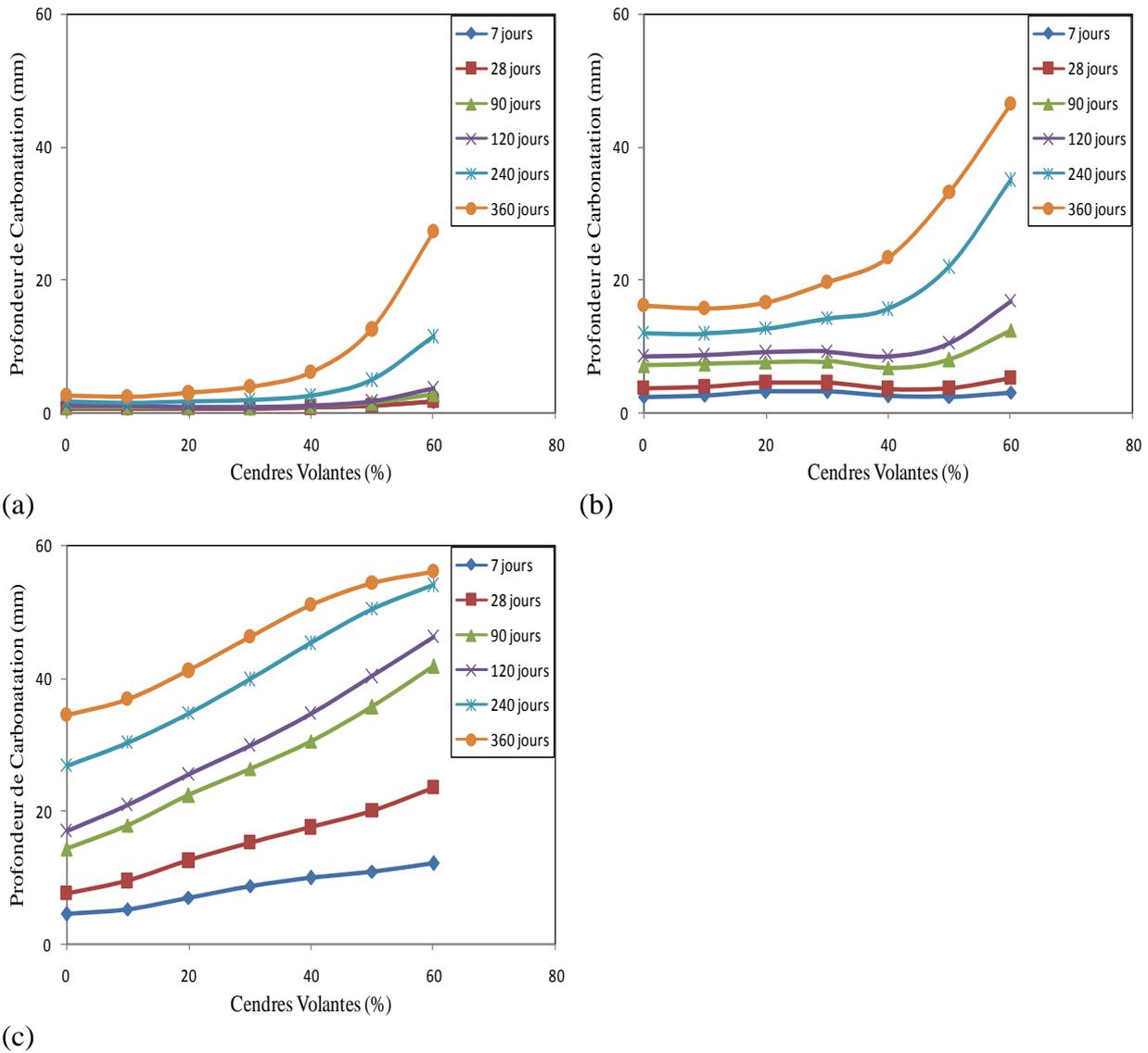


Figure 4.3 — Effet des cendres volantes pour différents rapports E/L:
 a) E/L=0.4; b) E/L=0.5; c) E/L=0.6

4.2.7.2 Effet du dosage en ciment

Pour voir l'effet du dosage en ciment (liant) sur la profondeur de carbonatation à travers le temps, on a varié L(450, 400, 350, 300 et 250 kg/m³) pour des rapports E/L (0.40, 0.45, 0.5, 0.55 et 0.60), en fixant (CO₂=4% et HR=65%) pour chaque taux de substitution des cendres volantes (0 à 60%) à différents âges (7, 28, 90, 120, 240 et 360 jours) comme illustré par la figure 4.4.

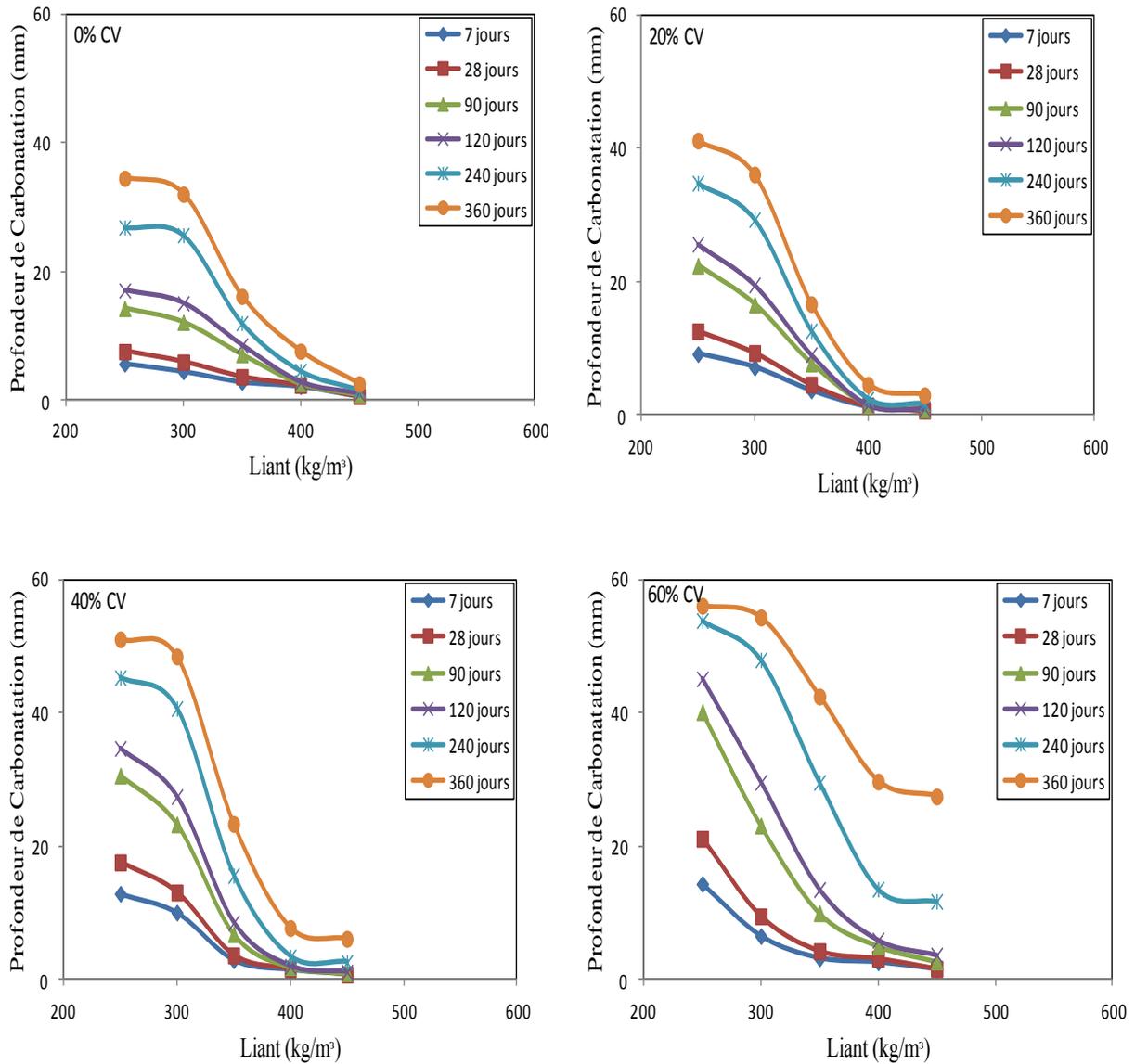


Figure 4.4 — Effet du dosage en ciment à différents âges pour 0, 20, 40 et 60% CV

En diminuant la quantité du liant, la profondeur de carbonatation augmente considérablement pour différents dosages en cendres volantes à tous les âges. Pour 480 kg/m³ de liant, la profondeur de carbonatation est presque nulle pour 20% de cendres volantes et elle augmente avec la croissance du dosage en cendres volantes à tous les âges. Pour 350 kg/m³ de liant, la profondeur de carbonatation marque les valeurs les plus élevées, seulement qu'elle est en diminution avec la croissance du dosage en cendres volantes jusqu'à 120 jours d'exposition.

En augmentant la quantité du liant c'est le dosage en ciment qui augmente, Plusieurs auteurs se sont mis d'accord que la vitesse de carbonatation varie à l'inverse du dosage en ciment (Venuat et Alexandre, 1968a, Parott, 1987, Duval, 1992 rapporté par Hyvert, 2009). Si le dosage en ciment est réduit en dessous de 300kg/m³, la vitesse de carbonatation augmente

plus rapidement. Cette propriété est la conséquence de la diminution de la compacité du matériau. Les dosages élevés en ciment tentent à freiner la vitesse de pénétration du gaz carbonique à condition que la cure soit suffisante (Houst, 1992).

4.2.7.3 Effet du rapport E/L

L'effet du rapport E/L a été étudié en variant L(450, 400, 350, 300 et 250 kg/m³) pour des rapports E/L (0.40, 0.45, 0.5, 0.55 et 0.60), en fixant (CO₂=4% et HR=65%) pour chaque taux de substitution des cendres volantes (0 à 60%) à différents âges (7, 28, 90, 120, 240 et 360 jours) comme illustré par la figure 4.5.

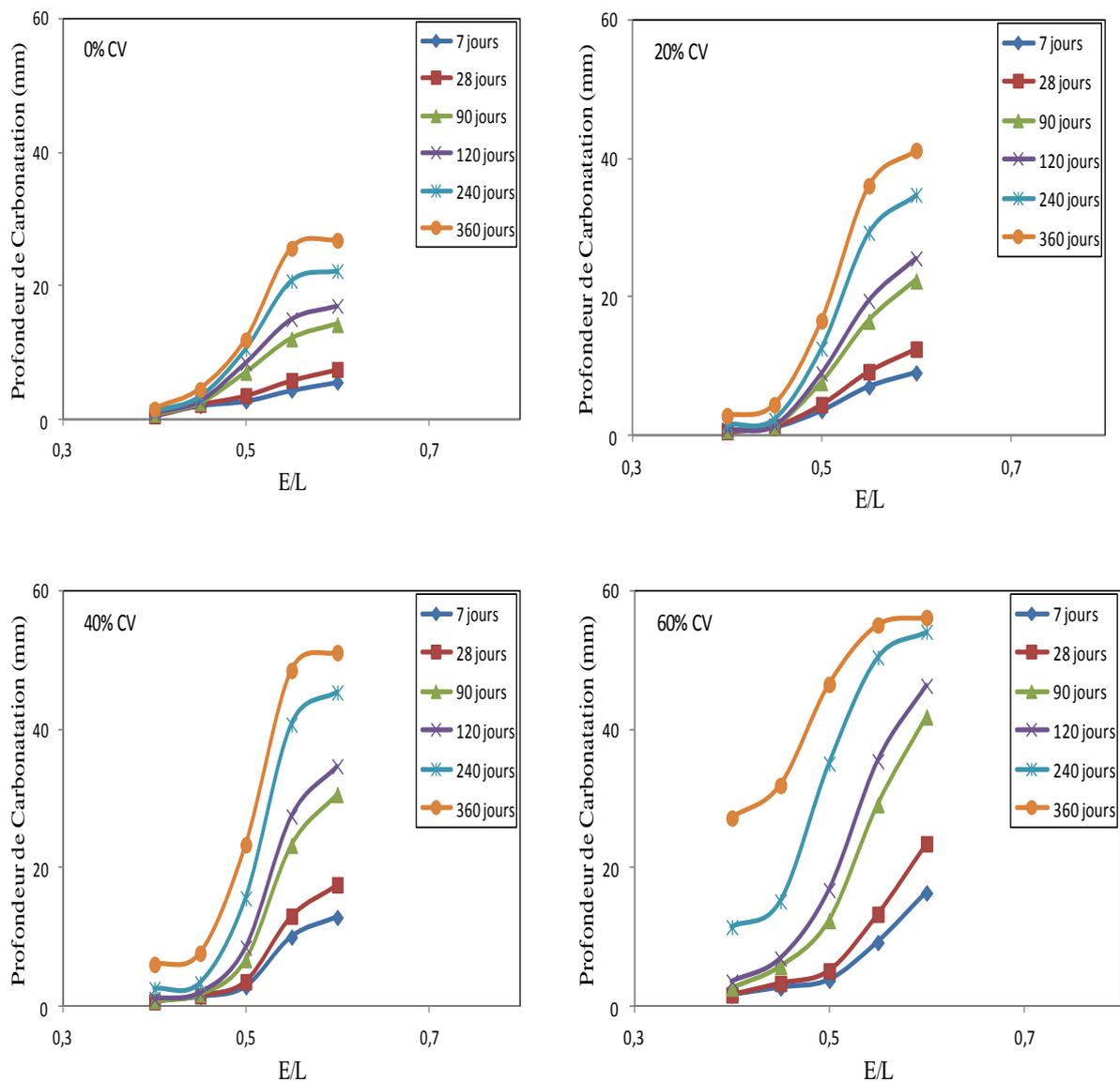


Figure 4.5 — Effet du rapport E/L à différents âges pour 0, 20, 40 et 60% CV

Il est bien clair que la profondeur de carbonatation est en croissance avec le rapport E/L et le taux de substitution des cendres volantes pour tous les âges. Ces résultats sont en concordance avec les résultats des recherches antérieures (Khunthongkeaw et al.,2006; Khunthongkeaw et Tangtermsirikul, 200 ; Shi et al., 2009). Sulapha et al. (2003) ont rapporté que des faibles rapports E/L (0.3 à 0.6) et une longue durée de cure humide (28 jours), la vitesse de carbonatation est en diminution, possiblement à cause d'une densification des pores de la structure.

Un faible rapport E/L dans une rangée de 0.3 à 0.6 et une durée de cure humide prolongée conduisent généralement à de faibles taux de carbonatation. Cela est due possiblement à une densification de la structure des pores (Papadakis et al, 1992; Ounoughi et al, 2000; Baroghel-Bouny, 2004; Parott, 1987).

4.2.7.4 Effet de la concentration du CO₂

On a fixé tous les paramètres ($L=350 \text{ kg/m}^3$; $E/L=0.50$; $HR=65\%$), et on varié CO₂ (1, 5, 10, 15, 20 et 50%) pour voir l'effet de la concentration du dioxyde de carbone sur la profondeur de carbonatation des bétons à différents taux de substitution de cendres volantes (0, 20, 40 et 60%) et à différents âges (7, 28, 90, 120, 240 et 360 jours) comme illustré dans la figure 4.6.

Pour des faibles concentrations en CO₂ (5, 10 et 15%), il n'y a presque aucun effet sur la profondeur de carbonatation avec l'augmentation du pourcentage des cendres volantes dans le béton au jeune âge, mais cet effet commence à apparaître à partir de 90 jours et devient plus prononcé à 360 jours. Pour des concentrations plus élevées (20 et 50% de CO₂), il y a une légère diminution dans la profondeur de carbonatation avec l'élévation du pourcentage des cendres volantes dans le béton au jeune âge. Mais avec le temps, la profondeur de carbonatation devient presque constante en augmentant le taux de substitution des cendres volantes dans le béton jusqu'à l'âge de 360 jours, où on remarque une augmentation dans la profondeur de carbonatation avec l'augmentation du taux de substitution des cendres volantes. Plusieurs auteurs ont rapporté que la vitesse de carbonatation des bétons aux cendres volantes augmente avec l'augmentation de la concentration en CO₂ (Khunthongkeaw et al.,2006; Khunthongkeaw et Tangtermsirikul, 2005; Jiang et al., 2004).

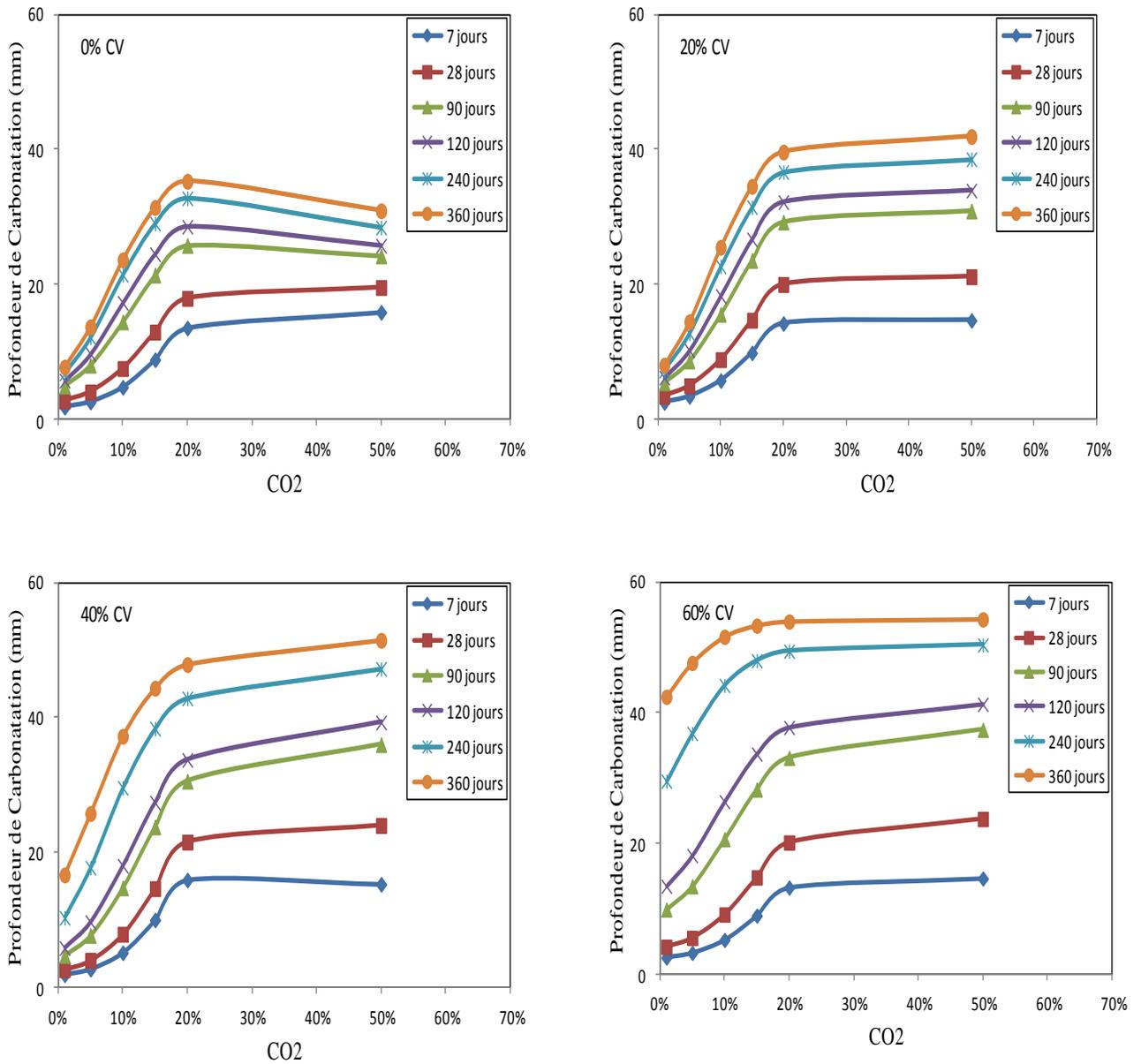


Figure 4.6 — Effet de la concentration du CO₂ à différents âges

4.2.7.5 Effet de l'humidité relative

Pour voir l'effet de l'humidité relative sur la profondeur de carbonatation des bétons à différents taux de substitution de cendres volantes (30, 40, 50 et 60%) et à différents âges (7, 28, 90, 120, 240 et 360 jours), on a fixé tous les paramètres ($L=350 \text{ kg/m}^3$; $E/L=0.50$; $\text{CO}_2=4\%$) et on a varié HR(60 à 100%) comme illustré dans la figure 4.7.

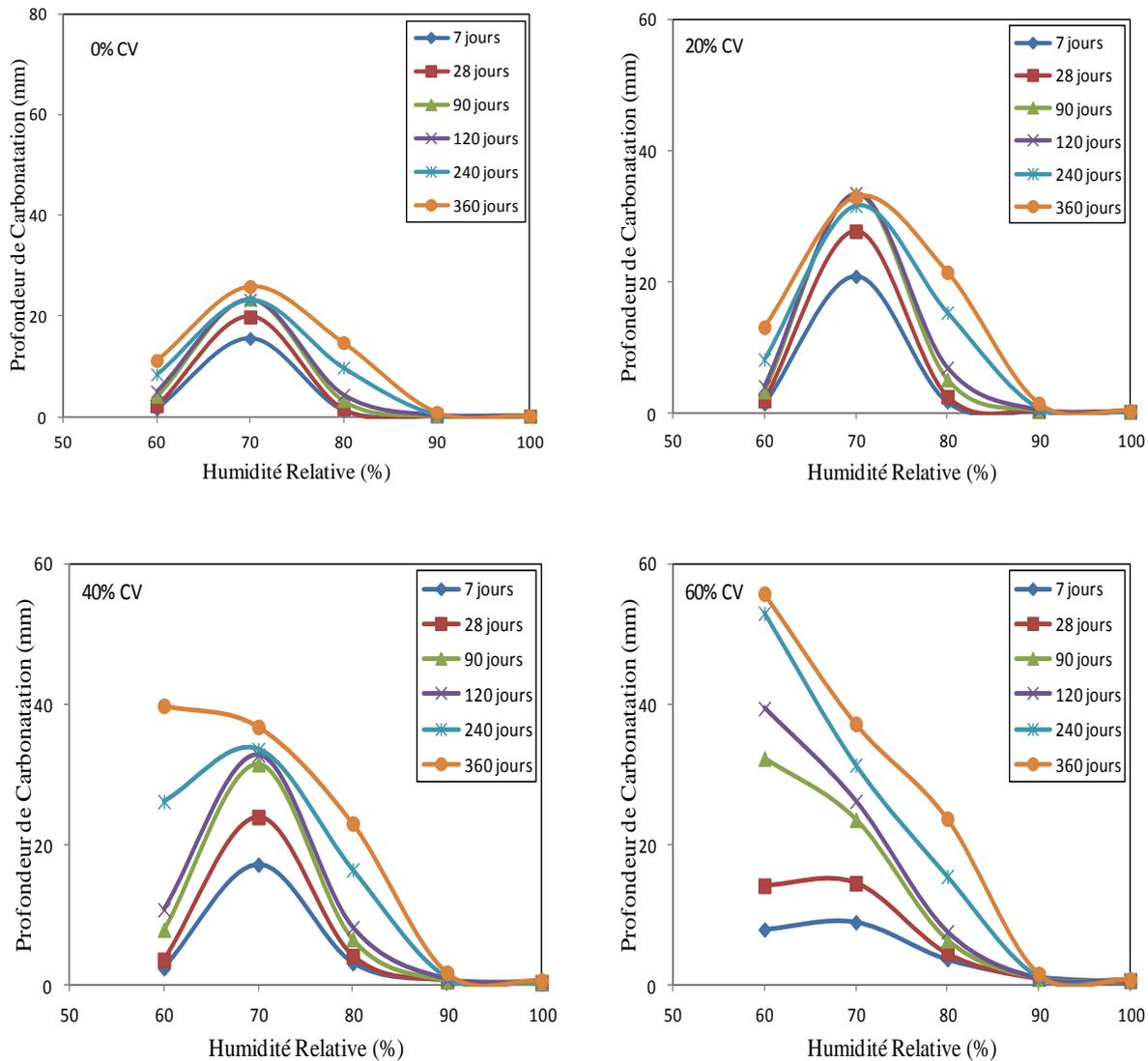


Figure 4.7 — Effet de l'humidité relative à différents âges

Pour de faibles dosages en cendres volantes (20%), la profondeur de carbonatation est presque nulle pour $HR=55\%$ à tous les âges, et commence à augmenter à partir de 60% d'humidité relative jusqu'à atteindre ces valeurs maximales pour $HR=70\%$. Mais avec l'augmentation du taux de substitution des cendres volantes (40 et 60%), on remarque une diminution de la profondeur de carbonatation avec la croissance de l'humidité relative jusqu'à atteindre ces valeurs minimales pour $RH=65\%$, et ensuite elle augmente pour $RH=70\%$ à différents âges. L'étude faite par [Roy et al. \(1999\)](#) a conclu que lorsque l'humidité croît de 52% à 75%, il y a une augmentation significative de la profondeur de carbonatation des bétons sans ajouts, mais elle diminue pour une humidité entre 75% et 84% et augmente après pour une humidité relative supérieure à 92%. [Wolf et Dal Molin \(1989\)](#) ont obtenu les plus grandes profondeurs de carbonatation pour une humidité relative de 70%.

4.2.8 Comparaison du MCV avec d'autres modèles

Le tableau 4.6 montre la comparaison entre les valeurs prédites par MCV et les nouvelles données de validation collectées de quatre articles non inclus dans notre base de données (Quan et Kasami, 2014, Gao et al., 2013; Huiang et al., 2012, Chen et al, 2008) ainsi que les valeurs obtenues en appliquant les modèles de Papadakis (2000) et de Burden (2006).

Ces deux modèles ont été sélectionnés parce qu'ils sont les seules modèles développés dans la littérature pour la prédiction de la profondeur de carbonatation des bétons aux cendres volantes qui ont pris en considération presque les mêmes paramètres choisis dans notre étude.

L'évolution de la profondeur de carbonatation X_c (m) avec le temps t (s) est calculée en utilisant l'expression suivante (Papadakis, 2000):

$$X_c = \sqrt{\frac{2D_{e,CO_2}(CO_2/100)t}{0.33CH + 0.214CSH}} \quad (4.5)$$

Où CO_2 est la concentration du dioxyde de carbone (%); D_{e,CO_2} est la diffusivité du CO_2 (m^2/s), CH et CSH sont les quantités des hydrates dans le béton (kg/m^3).

Sous des conditions environnementales ambiantes, la diffusivité du CO_2 peut être estimée par l'équation empirique suivante (Papadakis, 2000):

$$D_{e,CO_2} = A \left(\frac{\varepsilon_c}{\frac{C}{\rho_C} + \frac{FA}{\rho_{FA}} + \frac{W}{\rho_W}} \right)^a \times (1 - RH/100)^b \quad (4.6)$$

Où C, FA et W sont les quantités de ciment, cendres volantes et d'eau en kg/m^3 respectivement; ρ_C , ρ_{FA} et ρ_W sont les densités du ciment, des cendres volantes et de l'eau respectivement. ε_c est la porosité totale du béton carbonaté et RH est l'humidité relative (%). A, a et b sont des paramètres obtenus de l'analyse de régression des données expérimentales, égaux à 1.64×10^{-6} , 1.8, et 2.2, pour $0.5 < E/C < 0.8$ et à 6.1×10^{-6} , 3, et 2.2, pour $0.38 < E/(C+kP) < 0.58$ respectivement.

Où k est le facteur d'efficacité des cendres volantes en terme de résistance à la compression à 28 jours (égal à 0.5 et 1 pour FL et FH respectivement) et P est le taux de substitution des cendres volantes (Papadakis, 2000).

Les quantités des hydrates de CH et CSH, pour une hydratation complète et une réaction pouzzolanique sont estimées comme suit (Papadakis, 2000):

Pour des cendres volantes à faibles CaO :

$$CH = 0.30 - 1.30FL \quad (4.7)$$

$$CSH = 0.57C - 1.25FL \quad (4.8)$$

$$\varepsilon_c = (W - 0.268C - 0.177FL)/1000 \quad (4.9)$$

Pour des cendres volantes à CaO élevé :

$$CH = 0.29C - 0.50FH \quad (4.10)$$

$$CSH = 0.57C - 0.79FH \quad (4.11)$$

$$\varepsilon_c = (W - 0.267C - 0.203FH)/1000 \quad (4.12)$$

Buden (2006) a estimé la profondeur de carbonatation comme suit:

$$X = \left[\left(13.8 \times \frac{W}{CM} \right) \left(1 + \frac{FA}{45} \right) (cure)^{0.25} - 2 \right] \sqrt{t} \quad (4.13)$$

Avec, W/CM le rapport eau/liant ; FA le % des cendres volantes ; Cure la durée de cure (jours) et t le temps d'exposition (jours).

Le tableau 4.6 résume les erreurs relatives calculées pour chaque modèle de prédiction (eqs 4.14 à 4.16)

$$E_1(\%) = ABS \left(\frac{X_{exp} - X_{RNA}}{X_{exp}} \right) \times 100 \quad (4.14)$$

$$E_2(\%) = ABS \left(\frac{X_{exp} - X_{Papadakis}}{X_{exp}} \right) \times 100 \quad (4.15)$$

$$E_3(\%) = ABS \left(\frac{X_{exp} - X_{Burden}}{X_{exp}} \right) \times 100 \quad (4.16)$$

Où X_{exp} , X_{RNA} , $X_{Papadakis}$ et X_{Burden} sont les valeurs expérimentales, les valeurs calculées par le modèle RNA et les valeurs calculées par les modèles de Papadakis et de Burden respectivement.

On peut remarquer que les erreurs relatives des modèles de Papadakis (2000) et de Burden (2006) sont plus importantes que celles de notre modèle RNA.

La comparaison des erreurs relatives montre que le modèle RNA est une approche plus définie que l'approche analytique pour apprendre le comportement complexe de la carbonatation des bétons aux cendres volantes.

Tableau 4.6- Comparaison du MCV avec d'autres modèles

Auteur, Année	liant (kg/m ³)	FA (%)	E/L	CO ₂ (%)	RH (%)	\sqrt{t} ($\sqrt{\text{jours}}$)	X _{EXP} (mm)	X _{RNA} (mm)	X _{Papadakis} (mm)	X _{Burden} (mm)	E1 (%)	E2 (%)	E3 (%)
Huiang et al, 2012	312,5	0	0,56	20	70	1,73	8,62	6,99	4,90	2,35	18,91	43,11	72,68
	312,5	0	0,56	20	70	2,65	13,19	8,50	7,49	3,60	35,57	43,21	72,73
	312,5	0	0,56	20	70	3,74	18,62	10,49	10,59	5,09	43,67	43,11	72,68
	312,5	0	0,56	20	70	5,29	21,25	13,56	14,98	7,19	36,18	29,50	66,15
	312,5	0	0,56	20	70	6,48	24,2	15,98	18,35	8,81	33,96	24,18	63,59
	324,1	10	0,54	20	70	1,73	9,21	8,65	5,17	2,16	6,12	43,84	76,55
	324,1	10	0,54	20	70	2,65	14,09	10,60	7,90	3,30	24,79	43,93	76,59
	324,1	10	0,54	20	70	3,74	19,89	13,17	11,17	4,66	33,77	43,83	76,55
	324,1	10	0,54	20	70	5,29	22,04	17,13	15,80	6,60	22,28	28,31	70,07
	324,1	10	0,54	20	70	6,48	26,4	20,22	19,35	8,08	23,41	26,70	69,39
	331,3	20	0,53	20	70	6,48	29,11	25,55	21,47	7,74	12,23	26,24	73,43
	336	25	0,52	20	70	1,73	10,76	12,43	6,04	1,97	15,50	43,83	81,70
	336	25	0,52	20	70	2,65	16,46	15,37	9,23	3,01	6,63	43,91	81,73
	336	25	0,52	20	70	3,74	23,24	19,09	13,06	4,25	17,84	43,82	81,70
	336	25	0,52	20	70	5,29	26,77	24,39	18,46	6,02	8,89	31,03	77,53
	336	25	0,52	20	70	6,48	30,24	28,13	22,61	7,37	6,99	25,22	75,64
Chen et al, 2008	460	20	0,35	20	70	1,73	2	5,47	2,38	0,19	173,37	19,00	90,56
	460	20	0,35	20	70	2,65	2,5	5,79	3,64	0,29	131,78	45,42	88,46
	460	20	0,35	20	70	3,74	3,5	6,29	5,14	0,41	79,74	46,90	88,34
	460	20	0,35	20	70	5,29	6	7,19	7,27	0,58	19,84	21,18	90,38
	460	20	0,35	20	70	7,75	7,5	8,98	10,64	0,84	19,74	41,92	88,74
	460	20	0,35	20	70	9,49	9	10,42	13,04	1,03	15,79	44,84	88,51
	460	20	0,35	20	70	10,95	9,5	11,70	15,05	1,19	23,14	58,45	87,43
Quan et Kasami, 2014	348	0	0,5	5	60	2,65	0,6	1,53	4,23	2,65	154,46	604,47	341,48
	332	15	0,5	5	60	2,65	0,8	1,73	5,21	2,68	116,74	551,53	234,42
	328	25	0,5	5	60	2,65	1	1,73	6,13	2,69	73,39	512,71	169,30
	348	0	0,5	5	60	5,29	1	2,20	8,44	5,29	120,21	743,77	428,77
	332	15	0,5	5	60	5,29	2	2,42	10,40	5,34	21,09	420,24	167,03
	328	25	0,5	5	60	5,29	5	2,45	12,23	5,38	51,05	144,62	7,52
	348	0	0,5	5	60	7,48	1,8	3,03	11,93	7,48	68,26	562,82	315,38
	332	15	0,5	5	60	7,48	3	3,23	14,71	7,55	7,83	390,41	151,72
	328	25	0,5	5	60	7,48	7	3,36	17,29	7,60	52,04	147,07	8,59
	348	0	0,5	5	60	9,54	2	4,10	15,22	9,54	105,19	660,83	376,80
	332	15	0,5	5	60	9,54	4	4,32	18,76	9,63	8,04	369,10	140,78
	328	25	0,5	5	60	9,54	8,5	4,67	22,06	9,69	45,04	159,50	14,06
	348	0	0,5	5	60	13,49	2,5	7,08	21,52	13,48	183,24	760,68	439,37
	332	15	0,5	5	60	13,49	6,5	7,92	26,53	13,62	21,89	308,20	109,53

	328	25	0,5	5	60	13,49	11	9,61	31,19	13,71	12,65	183,55	24,63
Gao et al, 2013	480	0	0,31	20	70	1,73	2	1,93	3,49	-0,24	3,26	74,50	112,13
	480	20	0,31	20	70	1,73	2,3	2,68	3,59	-0,23	16,53	56,09	109,93
	480	30	0,31	20	70	1,73	3	3,79	3,69	-0,22	26,44	23,00	107,37
	480	0	0,31	20	70	2,65	2,5	2,14	3,79	-0,37	14,47	51,60	114,87
	480	20	0,31	20	70	2,65	3,2	3,04	3,89	-0,35	4,95	21,56	110,93
	480	30	0,31	20	70	2,65	4	4,23	3,99	-0,34	5,85	0,25	108,47
	480	0	0,31	20	70	3,74	3,8	2,42	4,09	-0,52	36,38	7,63	113,80
	480	20	0,31	20	70	3,74	4,4	3,54	4,19	-0,49	19,66	4,77	111,22
	480	30	0,31	20	70	3,74	5,5	4,82	4,29	-0,48	12,35	22,00	108,69
	480	0	0,31	20	70	5,29	5,9	2,90	4,39	-0,74	50,92	25,59	112,58
	480	20	0,31	20	70	5,29	7,2	4,36	4,49	-0,70	39,51	37,64	109,70
	480	30	0,31	20	70	5,29	8,8	5,77	4,59	-0,68	34,48	47,84	107,69
	480	0	0,31	20	70	7,48	8	3,77	4,69	-1,05	52,93	41,38	113,11
	480	20	0,31	20	70	7,48	10,8	5,73	4,79	-0,99	46,90	55,65	109,14
	480	30	0,31	20	70	7,48	12,5	7,30	4,89	-0,96	41,57	60,88	107,65

D'après la figure 4.8, on remarque que notre modèle (MCV) a donné les meilleures corrélations ($R=0.94$) avec les résultats expérimentaux de [Quan et Kasami \(2014\)](#), [Gao et al. \(2013\)](#), [Huiang et al. \(2012\)](#) et [Chen et al.\(2013\)](#) par rapport à de faibles corrélations marquées par le modèle de Papadakis ($R=0.44$) qui a élaboré son modèle pour des rapports E/L limités ($0.35 < E/L < 0.85$), et de Burden ($R=0.17$) qui a travaillé sur des bétons contenant des taux de substitution de cendres volantes élevés (50%), en plus son modèle ne tient pas en compte tous les paramètres pris en considération dans notre modèle.

Ce qui indique que notre modèle développé par les RNAs est plus performant que le modèle semi-empirique de [Papadakis \(2000\)](#) et le modèle empirique de [Burden \(2006\)](#), malgré qu'il soit limité dans des plages de données bien spécifiées comme on a vu au chapitre 3.

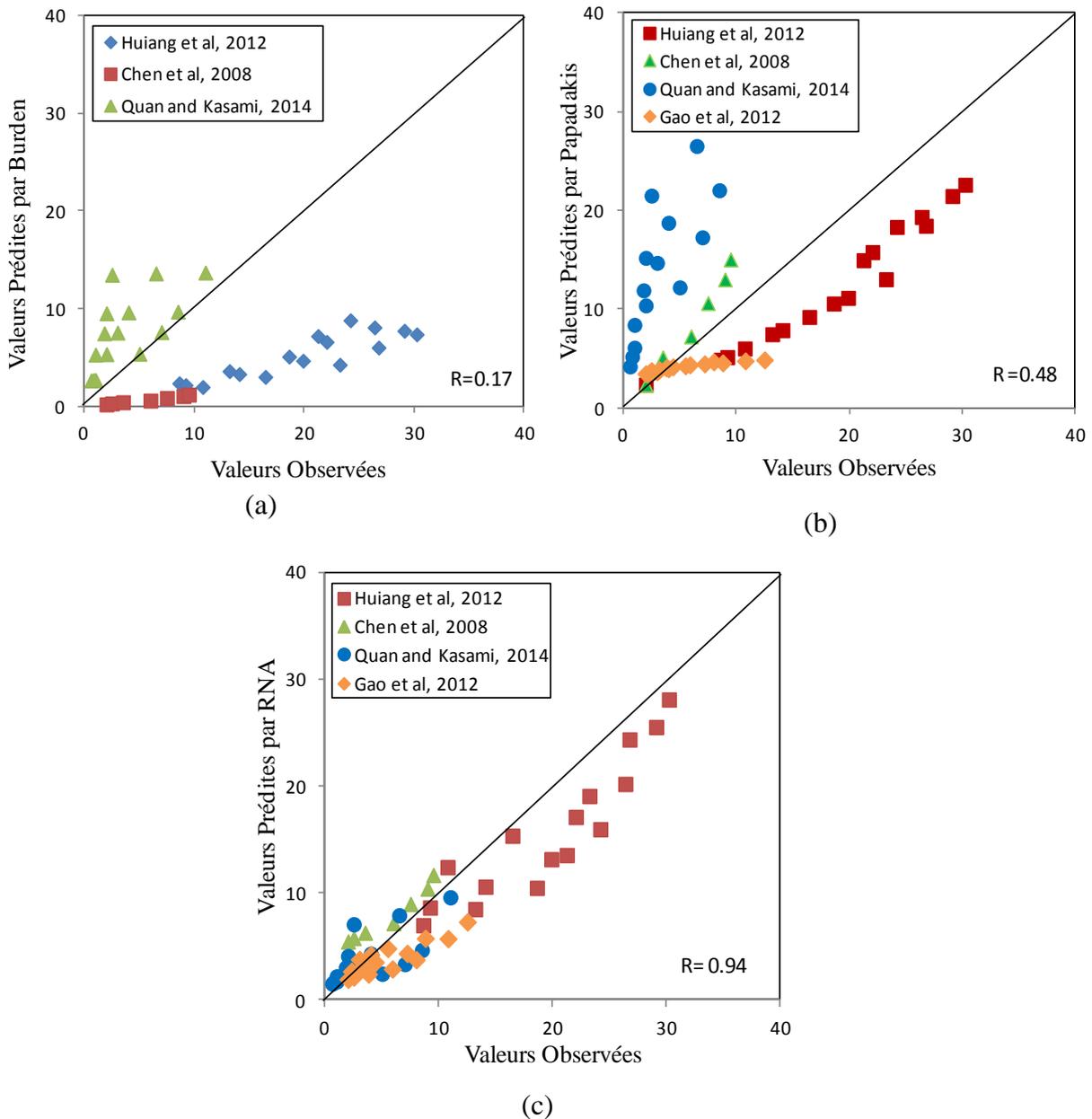


Figure 4.8 — Relations entre les valeurs observées et les valeurs prédites:
 a) Modèle Burden; b) Modèle Papadakis; c) Modèle RNA (MCV)

4.3 Elaboration de la structure du ML

Les mêmes étapes ont été suivies pour l’élaboration du modèle ML consacré à la prédiction de la profondeur de carbonatation des bétons aux laitiers.

4.3.1 Sélection des Variables d'Entrée

Vue le nombre de paramètres influant sur la profondeur de carbonatation des bétons aux ajouts cimentaires, ainsi que la variété des types de laitiers selon leurs finesses et leurs compositions chimiques. On a choisit les memes paramètres d’entrées du premier modèle

(bétons aux cendres volantes) et on a ajouté la finesse et l'indice d'acidité comme paramètres liés à la composition des matériaux ainsi que la durée de cure par ce qu'on a sélectionné des articles qui ont fait des essais avec plusieurs durées de cure contrairement à la base de données des bétons aux cendres volantes.

Le choix des paramètres d'entrée de notre modèle s'est fait après plusieurs itérations; en premier lieu on a pris en considération 10 paramètres d'entrée: liant (L), Laitier, rapport E/L, indice d'acidité, finesse, concentration CO₂, humidité relative HR, température (T) le temps t et la cure.. Mais cette combinaison n'a pas donné de résultats satisfaisants vis-à-vis la performance du modèle (coefficient de corrélation R). Le tableau 4.7 résume quelques architectures proposées avec leurs performances.

Tableau 4.7- Choix des paramètres du ML

Nombre de paramètres	Paramètres d'entrée	R	Nombre de paramètres	Paramètres d'entrée	R
10	L (kg/m ³), Laitier (%), Iac, finesse, E/L, CO ₂ , T(°C), HR (%), t(jours), cure (jours).	0.9374	08	L (kg/m ³), Iac, finesse, E/L, CO ₂ , HR (%), t(jours), cure (jours).	0.7467
09	L (kg/m ³), Laitier (%), Iac, finesse, E/L, CO ₂ , T(°C), HR (%), t(jours).	0.9297	08	L (kg/m ³), Laitier (%), Iac, finesse, E/L, CO ₂ , HR (%), t(jours).	0.8623
09	L (kg/m ³), Laitier (%), Iac, finesse, E/L, CO ₂ , HR (%), t(jours), cure (jours).	0.9824	07	L (kg/m ³), Laitier (%), E/L, CO ₂ , T(°C), HR (%), t(jours)	0.8275
09	Laitier (%), Iac, finesse, E/L, CO ₂ , T(°C), HR (%), t(jours), cure (jours).	0.8532	07	Iac, finesse, E/L, CO ₂ , T(°C), HR (%), t(jours),	0.6423
09	L (kg/m ³), Iac, finesse, E/L, CO ₂ , T(°C), HR (%), t(jours), cure (jours).	0.8287	07	L (kg/m ³), Laitier (%), Iac, finesse, T(°C), HR (%), t(jours),	0.8765
08	Laitier (%), Iac, finesse, E/L, CO ₂ , HR (%), t(jours), cure (jours).	0.9645	06	L (kg/m ³), Laitier (%), CO ₂ , t(jours), cure (jours).	0.5329

D'après le tableau 4.7, la combinaison composée de la plupart des paramètres qui influent sur la carbonatation a donné de bons résultats du point de vue performance du modèle.

Cette combinaison est composée de neufs (9) paramètres d'entrée (Liant, Laitier, Iac, finesse, E/L, CO₂, HR, cure et t) et une seule sortie qui est la profondeur de carbonatation (X_c) avec un coefficient de corrélation de 0.9824.

4.3.2 Architecture du réseau

De la même façon, on fait le choix des neurones de la couche cachée ainsi que les fonctions d'activation pour chaque couche (couche cachée et couche de sortie).

On a lancé à chaque fois la procédure « essai-erreur », en commençant avec 25 neurones et en diminuant jusqu'à arriver au nombre exacte de neurones dans la couche cachée. A chaque essai, l'apprentissage est lancé 100 fois (cycle d'apprentissage) de manière à varier chaque fois les conditions initiales (valeurs initiales des poids). Seuls les résultats de la meilleure performance de généralisation est retenue comme mentionné dans le tableau 4.8 résumant quelques iterations faites pour le choix du nombre de neurones de la couche cachée et des fonctions d'activation.

Tableau 4.8- Choix du nombre de neurones et des fonctions d'activation du ML

NNCC	Fonction d'activation CC	Fonction d'activation CS	R	Performance (MSE)
25	Tansig	Tansig	0.9365	0.2535
	Tansig	Logsig	0.4035	11.6750
	Tansig	Purelin	0.9789	0.0091
	Logsig	Purlin	0.9542	0.0348
	Logsig	Tansig	0.9676	0.0950
	Logsig	Logsig	0.4035	11.6750
20	Tansig	Tansig	0.9796	0.0086
	Tansig	Logsig	0.4035	11.6750
	Tansig	Purelin	0.9757	0.0539
	Logsig	Purlin	0.9735	0.0168
	Logsig	Tansig	0.9726	0.0208
	Logsig	Logsig	0.4035	11.6750
18	Tansig	Tansig	0.9821	0.0376
	Tansig	Logsig	0.4035	11.6750
	Tansig	Purelin	0.9810	0.1703
	Logsig	Purlin	0.9387	0.3256
	Logsig	Tansig	0.9734	0.0856
	Logsig	Logsig	0.4035	11.6750
15	Tansig	Tansig	0.9824	0.0015
	Tansig	Logsig	0.4035	11.6750
	Tansig	Purelin	0.9798	0.1557
	Logsig	Purlin	0.9657	0.2068
	Logsig	Tansig	0.9796	0.1568
	Logsig	Logsig	0.4035	11.6750

D'après les résultats du tableau ci-dessus, on peut constater que la combinaison Tansig-Tansig avec 15 neurones dans la couche cachée donne les meilleures performances.

L'architecture du réseau pour le deuxième modèle de prédiction de la profondeur de carbonatation des bétons aux laitiers est illustrée dans la figure 4.9.

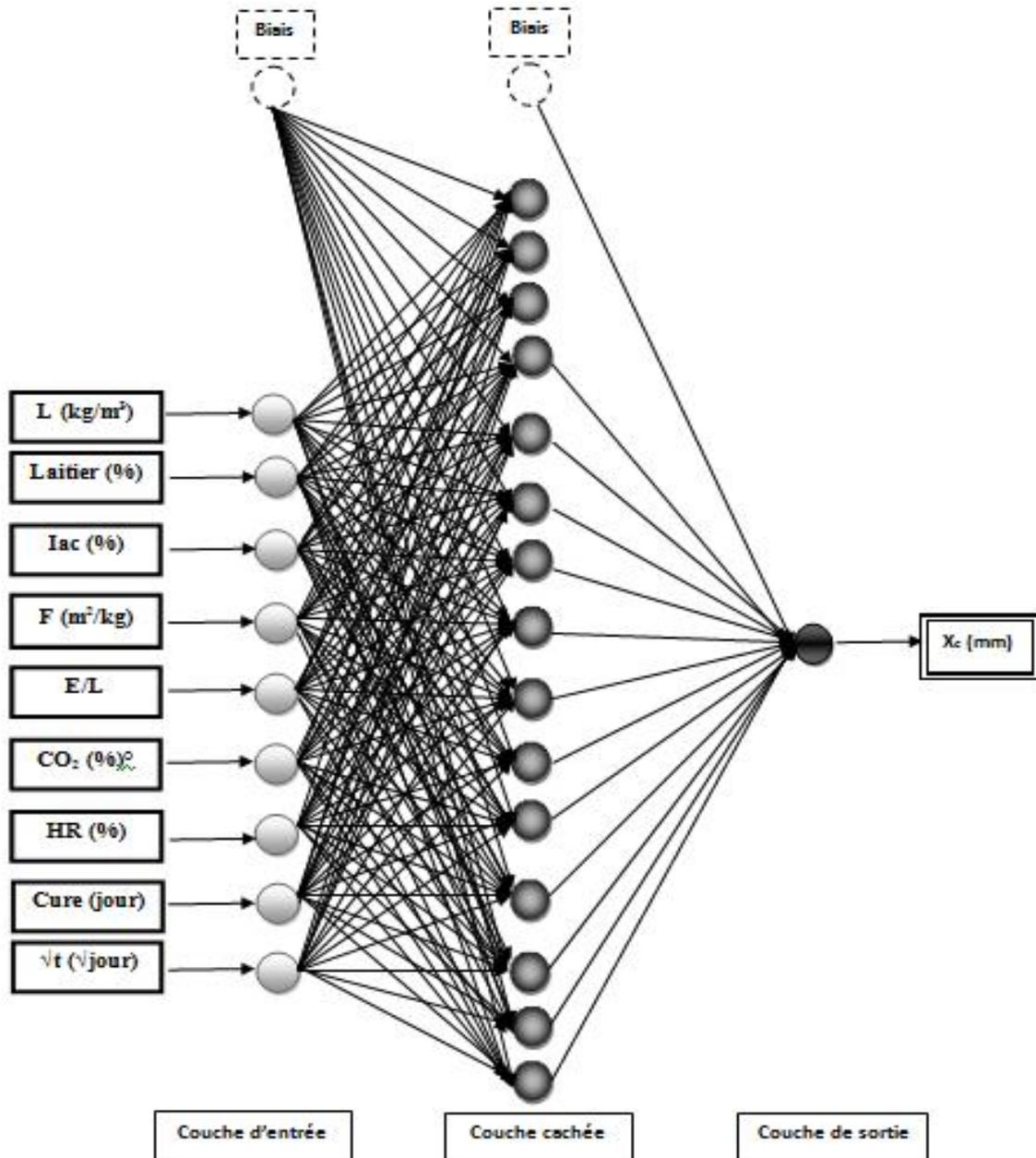


Figure 4.9 — Architecture du réseau du ML

4.3.3 Apprentissage du réseau

L'apprentissage consiste à calculer les poids synaptiques, à partir des exemples fournis, de telle façon que le réseau reproduise au mieux la sortie (profondeur de carbonatation). Il fait appel à des algorithmes d'optimisation qui cherchent à minimiser par des méthodes non linéaires une fonction coût (MSE) qui mesure l'écart entre les réponses réelles du réseau et ses réponses désirées. Cette optimisation se fait de manière itérative, en modifiant les poids en

fonction du gradient de la fonction cout. Le système le plus communément utilisé est l'algorithme de rétro-propagation qu'on a choisit pour le deuxième modèle aussi. Et l'algorithme de minimisation retenu pour notre réseau de neurones est celui de Levenberg-Marquard, choisit parmi plusieurs algorithmes comme montré dans le tableau 4.9.

Tableau 4.9- Choix de la fonction d'apprentissage pour le ML

Fonction d'apprentissage	Algorithme de rétro-propagation	R	Performance (MSE)	Cycle d'apprentissage/ temps actuel
traingd	Gradual descent	0.9853	0.0064247	100000/100000
traingda	Gradual descent self-adaptw/l	0.9504	0.038580	100/99
traingdm	Gradual descent w/momontum	0.8347	0.057810	100/57
traingdx	Gradual descent w/momentum and self-adapt	0.9347	0.015359	1000/123
trainlm	Levenberg-Marquardt	0.9825	0.0015315	100/20

4.3.4 Paramètres d'apprentissage

La meilleure architecture du réseau est aboutie après un certain nombre d'itérations, les paramètres optimaux du réseau sont trouvés en minimisant la fonction d'erreur sélectionnée (tableau 4.10)

Tableau 4.10 - Paramètres d'apprentissage de ML

Paramètres	RNA
Nombre de neurones dans la couche d'entrée	9
Nombre de couches cachées	1
Nombre de neurones dans la couche cachée	15
Nombre de neurones dans la couche de sortie	1
Vitesse d'apprentissage	0.05
Cycle d'apprentissage	100
Fonction d'activation	Tansig
Algorithme d'apprentissage	Trainlm

4.3.5 Test et Validation

Dans notre étude on a divisé notre base de données à 60% pour l'apprentissage, 20% pour le test et 20% pour la validation parce que cette division a donné les meilleures performances comme mentionné dans le tableau 4.11.

Tableau 4.11 – Division des données du ML

Apprentissage	Validation	Test	R	MSE
60%	20%	20%	0.9824	0.0015315
70%	15%	15%	0.9794	0.0084247
80%	10%	10%	0.9818	0.0074589

4.3.6 Performances du ML

Après la procédure de sélection des paramètres du ML, et l'apprentissage appliqué suivant l'algorithme de rétro-propagation développé avec Matlab Ra2014. On a pu constater que notre modèle a de bonnes performances vis-à-vis la corrélation entre les valeurs observées et les valeurs prédites par les RNAs (figure 4.10); pour les données d'apprentissage ($R=0.9855$), pour le test ($R=0.9753$), pour la validation ($R=0.9802$), et le coefficient de corrélation global est de 0.9824. Ces performances ne peuvent pas être le seul critère pour juger notre modèle, il faut faire une étude paramétrique et une validation expérimentale pour dire que notre modèle est performant.

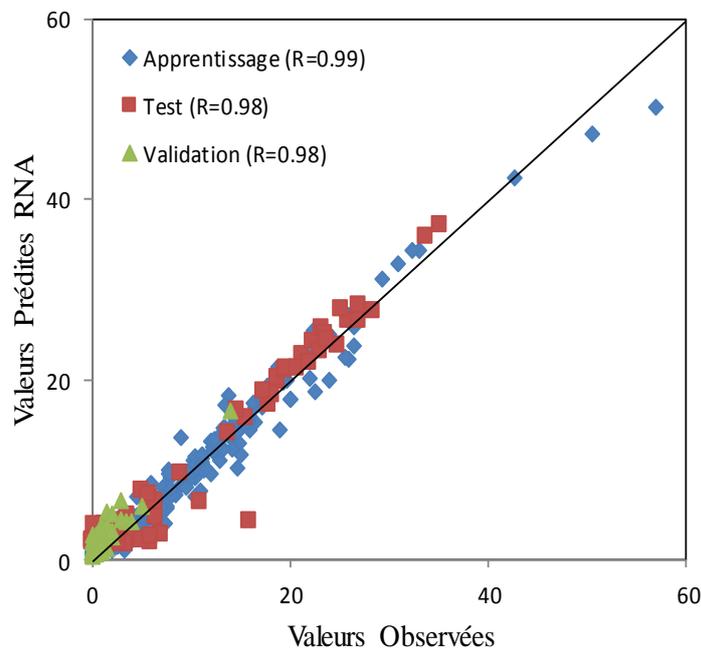


Figure 4.10 — Performances du ML

4.3.7 Etude paramétrique du ML

Le deuxième modèle élaboré pour la prédiction de la profondeur de carbonatation des bétons aux laitiers avec un coefficient de corrélation de 0.9824 et un $MSE=0.00115$, va être validé

par l'effet de chaque paramètre d'entrée sur la profondeur de carbonatation en fixant les autres paramètres. Si le comportement est en accord avec les résultats issus de la littérature, alors notre modèle est généralisé.

4.3.8 Effet de proportions du laitier

Pour voir l'effet du laitier sur la profondeur de carbonatation, on a fixé des paramètres ($L=350 \text{ kg/m}^3$; $I_{ac}=98.11$, $F=450 \text{ m}^2/\text{kg}$, $\text{CO}_2=6.5\%$, $\text{HR}=65\%$ et $\text{cure}=28\text{jours}$) pour chaque rapport E/L (0.30, 0.35 et 0.50) et on a varié le taux de substitution du laitier (0, 30, 50, 70 et 85%) à différents âges (14, 28, 42 et 56 jours).

La figure 4.11 montre que la profondeur de carbonatation augmente avec le taux de substitution du laitier et avec l'âge, cela est remarqué pour tous les rapports E/L (0.3, 0.35 et 0.50).

Il ressort de cette observation que le laitier de haut-fourneau diminue la résistance des bétons à la carbonatation. Cela peut être expliqué par le fait que ces bétons ont une faible teneur en clinker dans la mesure où une partie de leur ciment est remplacée par le laitier de haut-fourneau. Par conséquent, ils ont une faible quantité de Portlandite. Sachant que la cinétique de carbonatation est plus importante lorsque la quantité de Portlandite (principal produit carbonatable) présente est plus faible, la cinétique de carbonatation est donc accélérée en présence de laitier de haut-fourneau.

Ces résultats sont en accord avec la littérature ; que l'ajout de pouzzolanes (cendres volantes et de laitiers) augmente la profondeur de carbonatation : plus le taux d'ajouts est élevé et plus la profondeur de carbonatation est importante (Ogha et Nagataki, 1989; Papadakis et al, 1992; Chaussadent 1999; Atis, 2003; Khunthongkeaw et Tangtermsirikul, 2005; Burden, 2006; Khunthongkeaw et al., 2006; Sisomphon et Franke, 2007; Bouzoubaa et al., 2010 ; Pedro Faustino et al., 2013; Zhang et Liu, 2013).

Et même en augmentant le rapport E/L, la profondeur de carbonatation augmente simultanément.

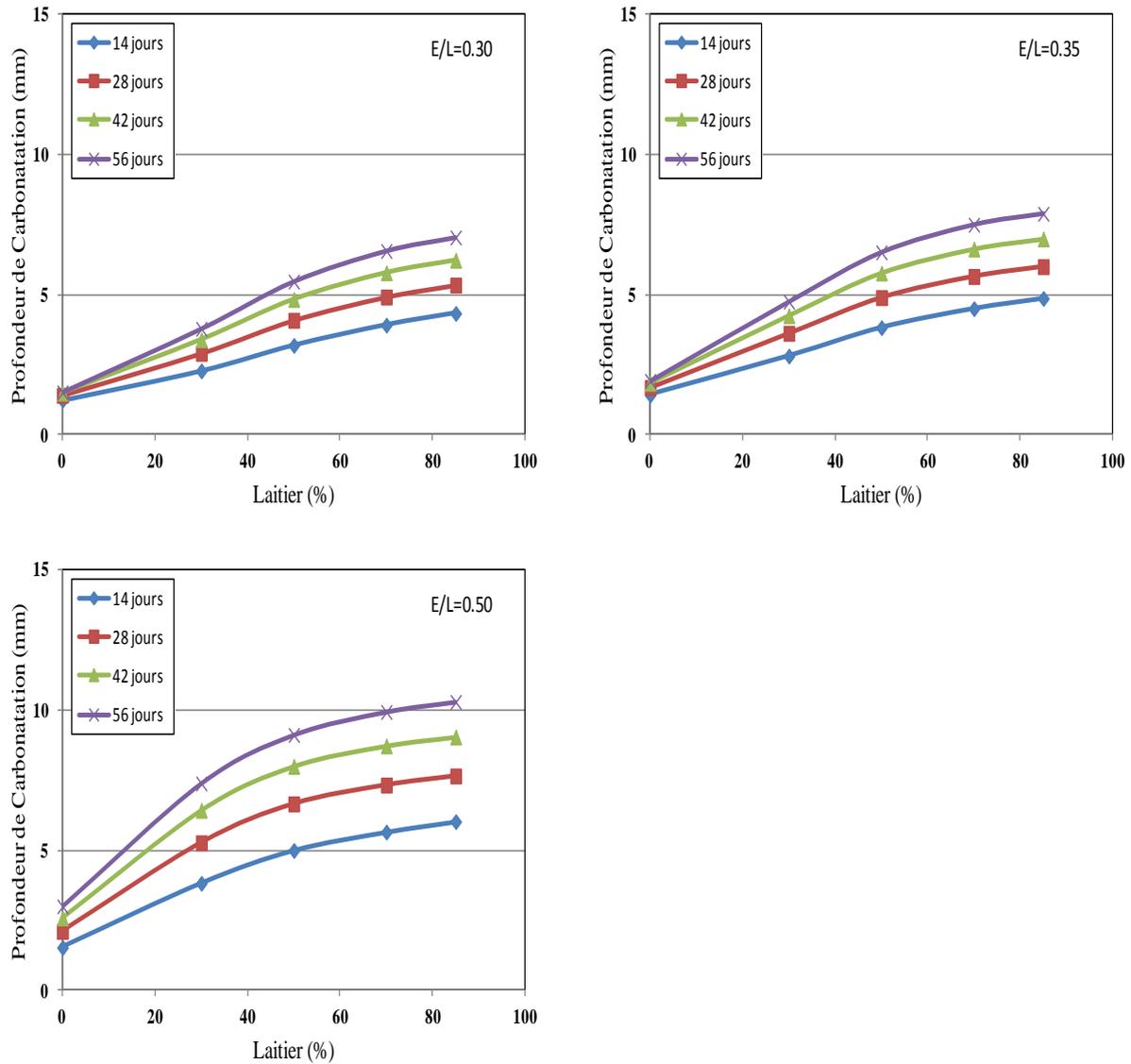


Figure 4.11 — Effet du pourcentage de laitier pour différents rapports E/L

4.3.9 Effet du rapport E/L

L'effet du rapport E/L est étudié en variant L(550,450 et 350 kg/m³) pour des rapports E/L (0.30,0.35 et, 0.5), en fixant($I_{ac}=98.11$, $F=450$ m²/kg, $CO_2=6.5\%$, $HR=65\%$ et $cure=28$ jours) pour chaque taux de substitution du laitier (0, 30, 50, 70 et 85%) à différents âges (14, 28, 42 et 56 jours) comme illustré par la figure 4.12.

Il est bien clair que la profondeur de carbonatation est en croissance avec le rapport E/L et le taux de substitution du laitier pour tous les âges. Seulement que cette augmentation n'est pas appréciable pour de faibles rapports E/L (0.30 et 0.35). Cela est dû à l'augmentation de la porosité de la matrice cimentaire avec la croissance du rapport E/L. Ces résultats sont en concordance avec les résultats des recherches antérieures (Oner et Akuzy, 2007).

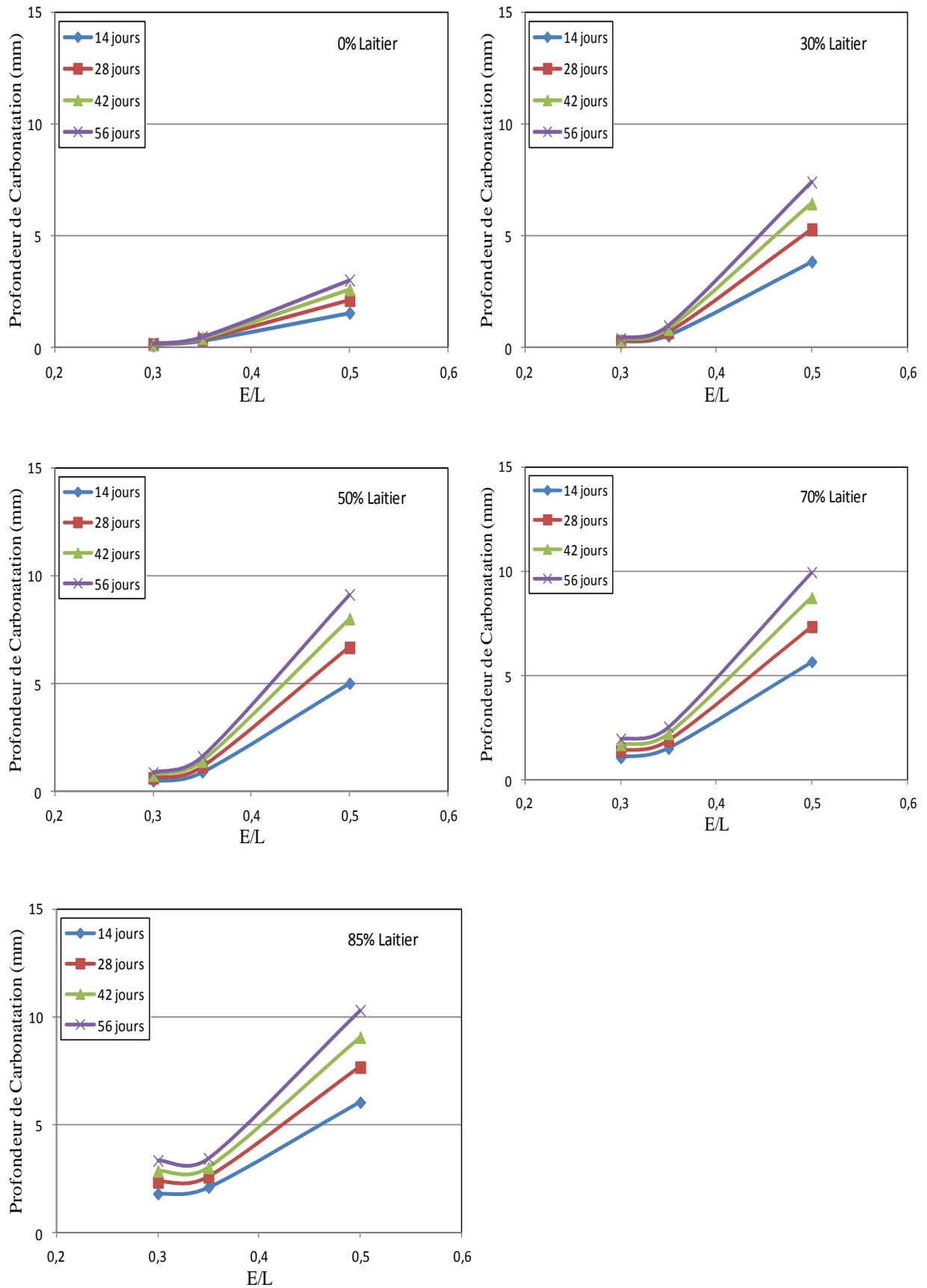


Figure 4.12 — Effet du rapport E/L

4.3.10 Effet de l'indice d'acidité

L'effet de l'indice d'acidité sur la profondeur de carbonatation des bétons à différents taux de substitution du laitier (30, 50, 70 et 85%) et à différents âges (14, 28, 42 et 56 jours) est illustré dans la figure 4.13. On a fixé des paramètres ($L=350\text{kg/m}^3$, $F=450\text{ m}^2/\text{kg}$, $E/L=0.50$, $\text{CO}_2=6.5\%$ $\text{HR}=65\%$ et $\text{cure}=28\text{jours}$) et on a varié I_{ac} (57.29, 91.33 et 98.11%).

On remarque que la profondeur de carbonatation augmente avec l'augmentation de l'indice d'acidité pour tous les âges. Cette augmentation reste presque constante au-delà de 50% de laitier. Cet effet peut être expliqué par le fait qu'en augmentant l'indice d'acidité le CaO est élevé dans la solution interstitielle, ce qui signifie la disponibilité d'une grande quantité de portlandite qui peut être carbonatée facilement.

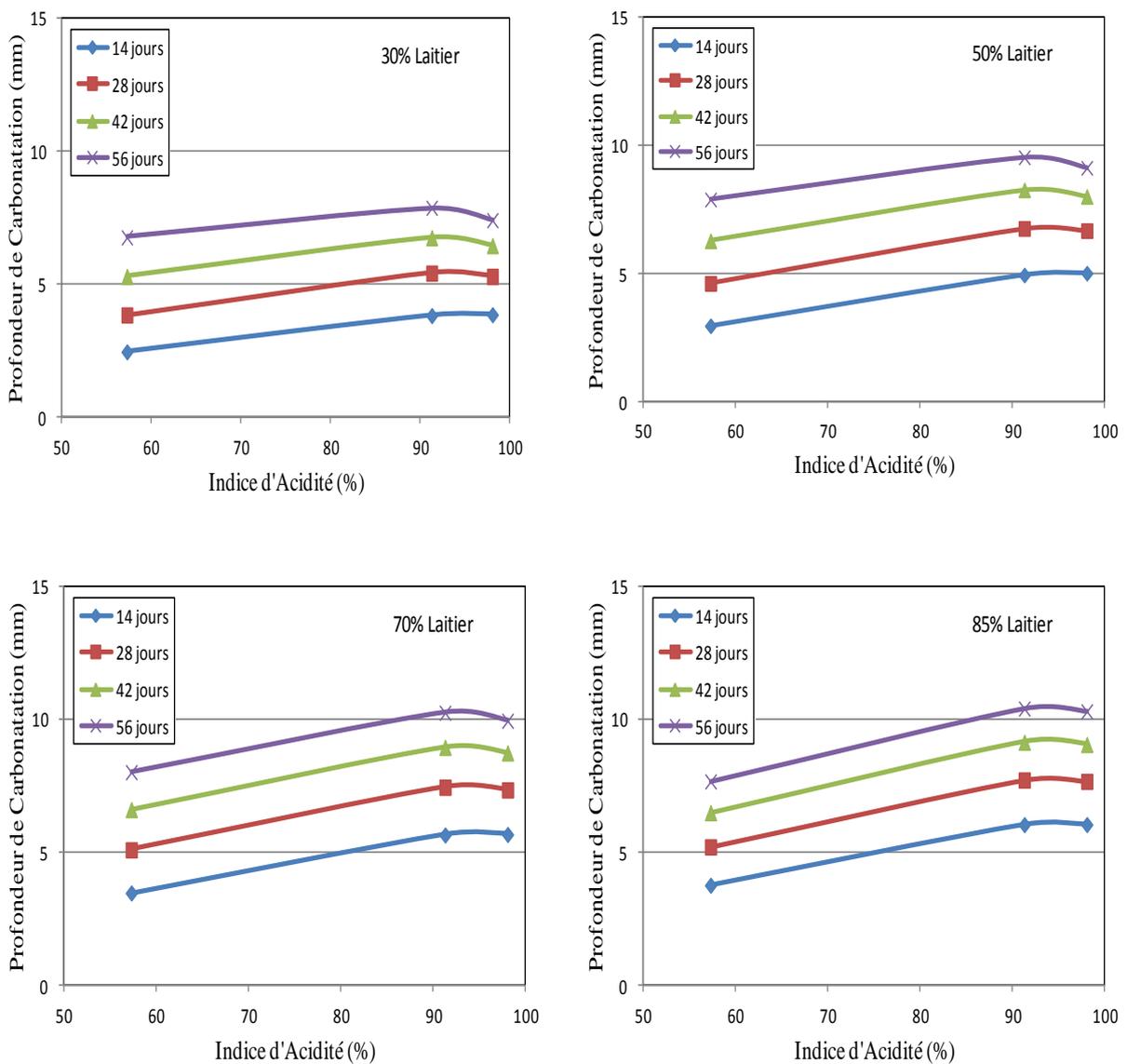


Figure 4.13 — Effet de l'indice d'acidité du laitier

4.3.11 Effet de la finesse du laitier

Pour voir l'effet de la finesse du laitier sur la profondeur de carbonatation des bétons à différents taux de substitution du laitier (30, 50, 70 et 85%) et à différents âges (14, 28, 42 et 56 jours). On a fixé des paramètres ($L=350\text{kg/m}^3$, $I_{ac}=98.11\%$, $E/L=0.50$, $\text{CO}_2=6.5\%$, $\text{HR}=65\%$ et $\text{cure}=28\text{jours}$) et on a varié F (371; 397; 450 et $600\text{ m}^2/\text{kg}$) comme illustré dans la figure 4.14.

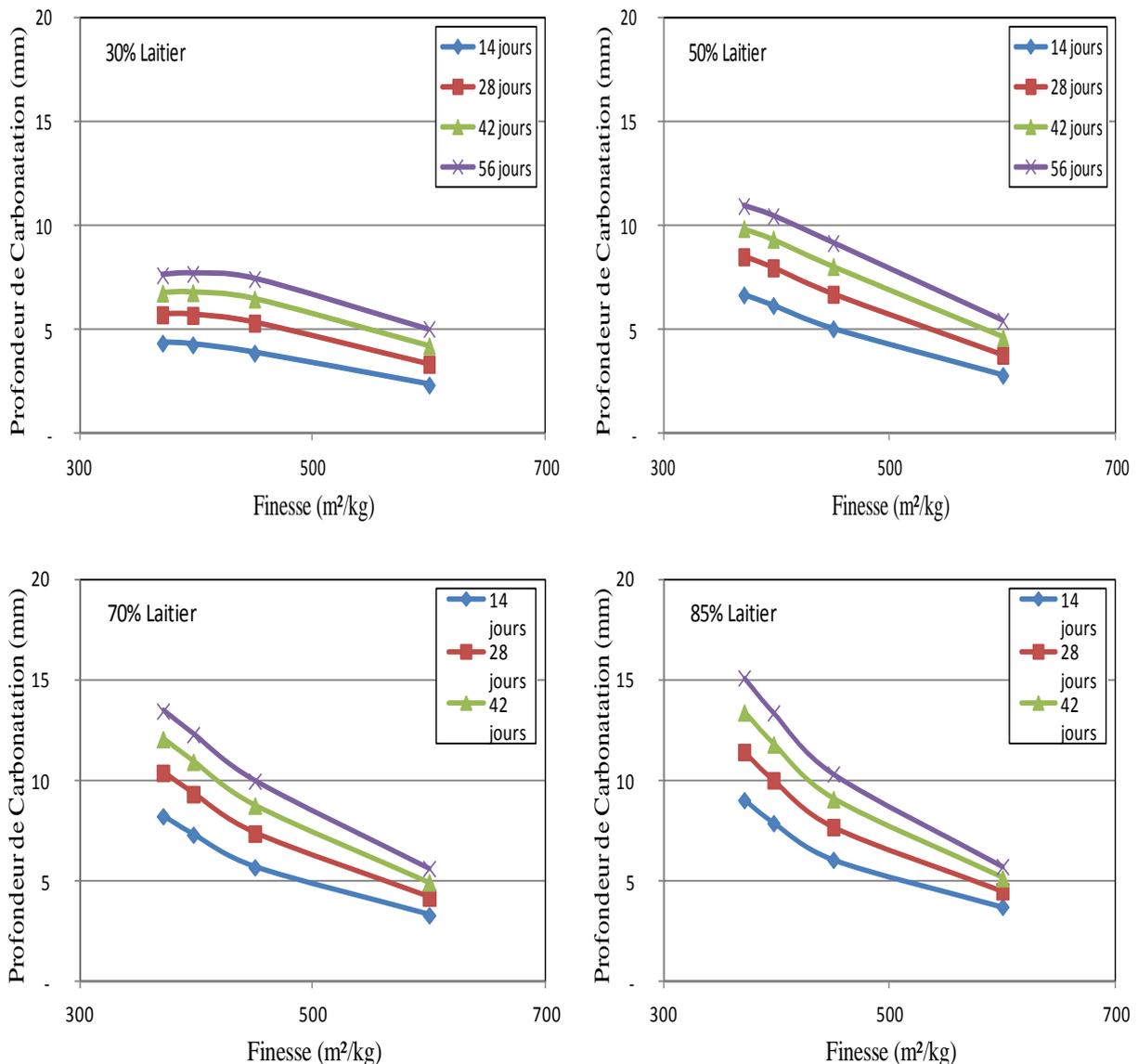


Figure 4.14 — Effet de la finesse du laitier

La figure 4.14 montre que la profondeur de carbonatation est en diminution avec la croissance de la finesse du laitier pour tous les âges et avec tous les taux de substitution du laitier. Cela est peut être dû au colmatage des pores par les particules fines du laitier, freinant ainsi la diffusion du gaz carbonique (l'acteur principal du phénomène de carbonatation) à travers la matrice cimentaire du béton au laitier.

Swamy (1998) a rapporté que l'augmentation de la finesse du laitier de 2 à 3 fois que celle du ciment Portland normal peut préserver les bénéfices de la finesse du matériau dans une variété de propriétés d'ingénierie telles que le ressuage, la durée de prise, l'évolution de chaleur d'hydratation, haute résistance et une excellente durabilité.

4.3.12 Effet de la concentration du CO₂

Pour voir l'effet du CO₂ sur la profondeur de carbonatation, on a fixé des paramètres (L=350 kg/m³; I_{ac}=98.11, F=450 m²/kg, E/L=0.5, HR=65% et cure= 28jours) pour différentes concentrations en CO₂ (6.5, 10 et 20), et on a varié le taux de substitution du laitier (0, 30, 70 et 85%) à différents âges (14, 28, 42 et 56 jours). La figure 4.15 représente cet effet pour chaque taux de substitution de laitier.

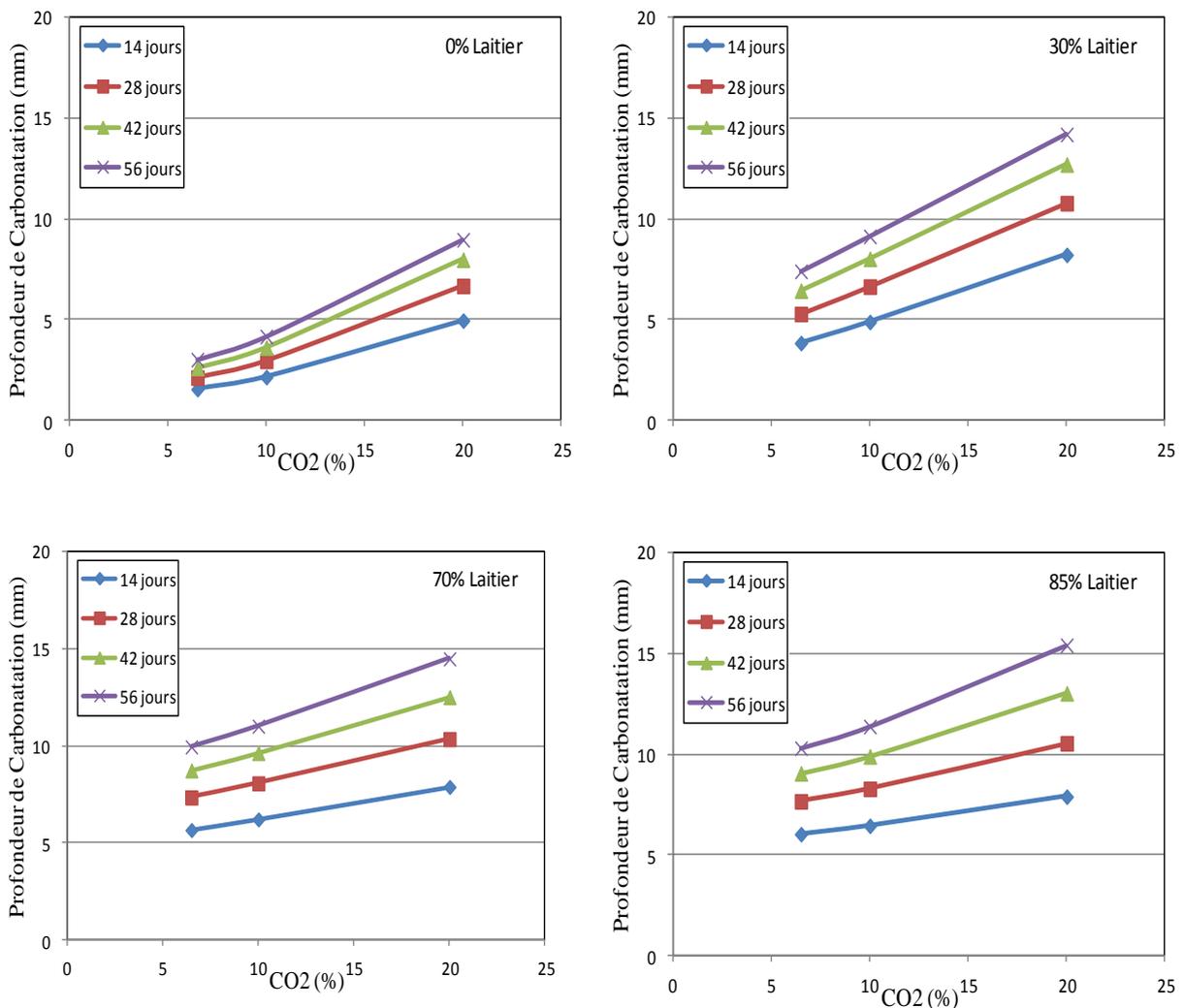


Figure 4.15 — Effet de la concentration du CO₂

Comme pour un béton ordinaire, l'augmentation de la concentration du CO₂ fait accroître la carbonatation des bétons aux laitiers à n'importe quel taux de substitution.

4.3.13 Effet de l'humidité relative

L'effet de l'humidité relative sur la profondeur de carbonatation des bétons à différents taux de substitution du laitier (0, 50, 70 et 85%) et à différents âges (14, 28, 42 et 56 jours) est illustré dans la figure 4.16. On a fixé des paramètres ($L=350\text{kg/m}^3$, $I_{ac}=98.11\%$, $F=450\text{m}^2/\text{kg}$, $E/L=0.50$, $\text{CO}_2=6.5\%$ et $\text{cure}=28\text{jours}$) et on a varié HR (60, 65 et 70 %).

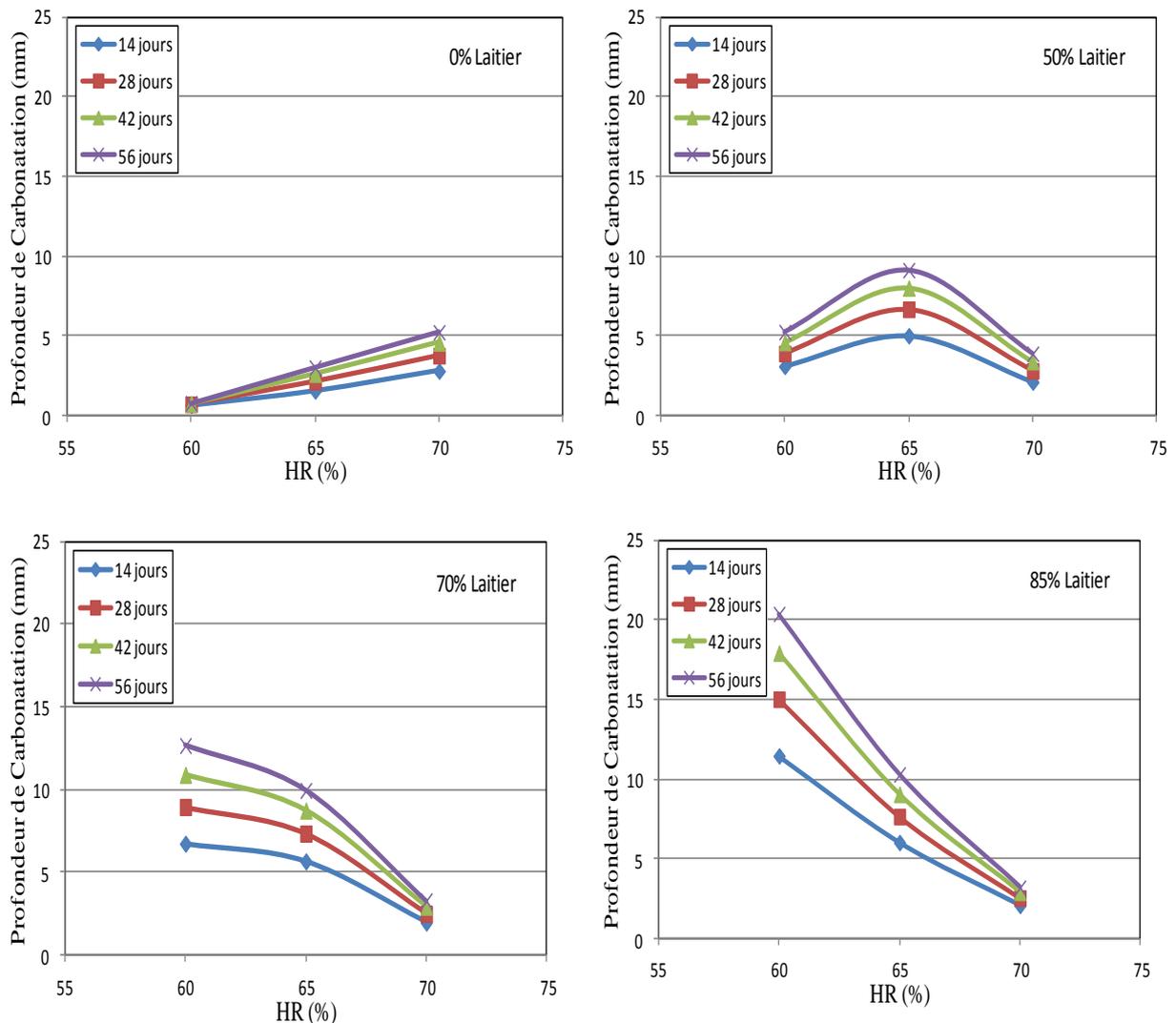


Figure 4.16 - Effet de l'humidité relative

Pour des bétons témoins, la profondeur de carbonatation augmente avec l'augmentation de l'humidité relative. Pour des bétons contenant 50% de laitier, la profondeur de carbonatation augmente et ensuite diminue pour former un pic à 65% de HR. Ce pic devient à 60% HR pour des bétons ayant des taux de substitution de laitier plus élevés (70 à 85).

Selon les types de bétons, il est souvent admis que la vitesse de carbonatation est maximale entre 50 et 70 % d'humidité relative. En dessous de 50 % et au-dessus de 90 à 95 % la vitesse

est très faible ou nulle (Houst, 1992). Le même comportement a été observé dans la littérature avec un changement dans les pics (Verbeck, 1958; Papadakis, 1991; Thiery, 2005).

4.3.14 Effet de la cure

Pour voir l'effet de la cure sur la profondeur de carbonatation, on a fixé des paramètres ($L=350 \text{ kg/m}^3$; $I_{ac}=98.11$, $F=450 \text{ m}^2/\text{kg}$, $E/L=0.5$, $\text{CO}_2=6.5\%$, $\text{HR}=65\%$) pour des durées de cure variants de entre 28 et 98 jours, et on a varié le taux de substitution du laitier (0, 30, 50 et 85%) à différents âges (14, 28, 42 et 56 jours). La figure 4.17 représente cet effet pour chaque taux de substitution de laitier.

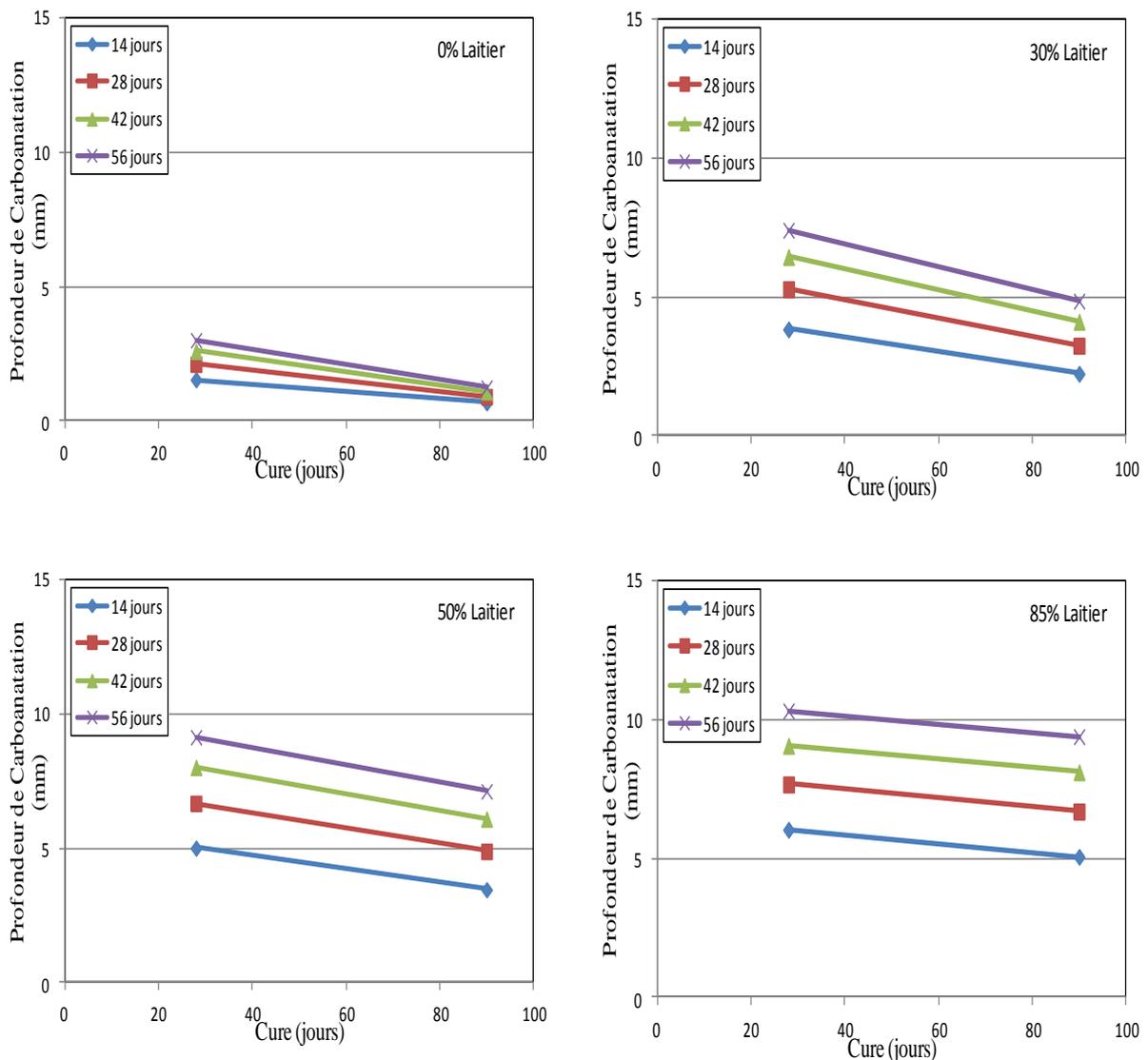


Figure 4.17- Effet de la cure

On remarque que pour tous les taux de substitution du laitier, la profondeur de carbonatation diminue avec l'augmentation de la durée de cure.

Une bonne cure, qui consiste à maintenir le béton dans des conditions de température et d'humidité relative propices à une meilleure hydratation (Delmi, 2004), diminue la vitesse de carbonatation (Bier, 1986; Fattuhi, 1988; Loo et al., 1994; Sickert, 1997; Atiş, 2003). Contrairement à une conservation à l'air libre, une cure dans l'eau favorise l'hydratation du ciment et réduit ainsi la porosité du béton ce qui conduit à un béton plus résistant à la carbonatation. Cette résistance à la carbonatation est d'autant plus importante que la durée de la cure est longue.

4.4 Conclusion

Dans ce chapitre, on a élaboré deux modèles de prédiction de la profondeur de carbonatation des bétons aux cendres volantes et au laitier. On a fait d'abord le choix des paramètres d'entrées des deux modèles RNAs, ensuite on a choisit les paramètres d'apprentissage et les combinaisons qui donnent les meilleures performances.

Pour MCV, la meilleure combinaison est composée de six (6) paramètres d'entrée (L, CV, E/L, CO₂, HR et t) et une seule sortie qui est la profondeur de carbonatation (X_c) avec un coefficient de corrélation de 0.9825 et un MSE=0.0035. Et pour ML, cette combinaison est composée de neuf (9) paramètres d'entrée (L, Laitier, I_{ac}, finesse, E/L, CO₂, HR, cure et t) et une seule sortie qui est la profondeur de carbonatation (X_c) avec un coefficient de corrélation de 0.9824 et un MSE=0.0015.

Pour généraliser nos modèles, on a besoin de faire une étude paramétrique, et les comparer avec d'autres modèles existant dans la littérature. On a pu constater par cette étude que leur comportement vis-à-vis de la variation des paramètres influents la carbonatation pris en considération dans chaque modèle est en accord avec les résultats d'autres chercheurs qui ont travaillé sur la carbonatation des bétons aux ajouts cimentaires.

D'autre part, on a pu valider le modèle MCV par les résultats expérimentaux de quatre recherches non inclus dans notre base de données. On a même comparé ces résultats avec ceux du modèle de Papadakis (2000) et de Burden (2006). Les erreurs relatives de notre modèle ont été moins importantes que celles des deux autres modèles, mais elles n'étaient pas négligeables. Cela est peut être du aux paramètres pris comme neurones d'entrées dans notre modèle RNA qui sont insuffisants par rapport au grand nombre de facteurs influents le phénomène complexe de carbonatation.

Pour le modèle ML, la non disponibilité de recherches traitant la carbonatation des bétons aux laitiers nous a empêché de le valider avec d'autres résultats expérimentaux.

Chapitre 5

Validation Expérimentale des Modèles RNAs Elaborés

5.1 Introduction

Pour la validation des modèles de prédiction de la profondeur de carbonatation développés précédemment, deux campagnes expérimentales ont été effectuées au Laboratoire des Matériaux à l'Université de Sherbrooke au Canada: les premiers essais sur des bétons aux cendres volantes et ensuite les mêmes essais ont été appliqués sur des bétons aux laitiers de hauts fourneaux. Les mêmes types de ciments, eau de gâchage, granulats et super-plastifiants ont été utilisés pour les deux types d'ajouts. Des échantillons de béton ont été confectionnés avec différents taux de substitution des ajouts cimentaires, variant de 0, 20, 30 à 50% pour les cendres volantes et de 0, 20, 40 à 60% pour les laitiers des hauts fourneaux. Les rapports eau-liant pour chaque type de béton varient de 0.4, 0.5 à 0.6.

Dans ce contexte, plusieurs propriétés des bétons frais et durcis ont été mesurées durant le parcours expérimental en plus de la profondeur de carbonatation qui va être détaillée ultérieurement.

5.2 Matériaux utilisés

Les bétons confectionnés dans ce travail sont constitués de ciment, de granulats, d'eau, des additions minérales et des adjuvants.

5.2.1 Ciment

Le ciment, qui représente de l'ordre de 10 % du volume des bétons usuels, est constitué essentiellement de clinker obtenu à partir de la cuisson vers 1450 °C d'un mélange de 80 % de calcaire et de 20 % d'argile.

Selon la teneur en clinker et autres constituants, cinq types de ciment courant sont définis par la norme NF EN 197-1 (2001). Parmi ces ciments, le plus communément utilisé est le ciment Portland ordinaire qui est essentiellement composé :

- de silicate tricalcique, $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ noté C_3S ;
- de silicate bicalcique, $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ noté C_2S ;
- d'aluminate tricalcique, $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ noté C_3A ;
- d'aluminoferrite tétracalcique, $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ noté C_4AF .

Le ciment Portland utilisé dans tous nos essais est le ciment à usage général (GU) commercialisé au Québec Canada selon les performances et la spécification d'utilisation des ciments à usage général (ASTM C 1157). Sa surface de Blaine est de 444.1 m²/kg.

5.2.2 Ajouts cimentaires

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

5.2.2.1 Cendres Volantes

Les cendres volantes sont d'origine Canadienne. Leur surface spécifique de Blaine est de 387 m²/kg avec une densité de 2.36. D'après la norme ASTM C618 ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) > 70%, les cendres volantes utilisées sont de classe F (silico-alumineuse) présentant des propriétés pouzzolaniques.

5.2.2.2 Laitier de hauts fourneaux

Le laitier granulé des hauts fourneaux a les mêmes constituants chimiques que le ciment Portland ordinaires, mais en différentes proportions (figure 5.1). Ceci est l'une des raisons qui fait que le pourcentage utilisé dans le ciment est plus grand que celui des cendres volantes.

Le laitier de hauts fourneaux utilisé est d'origine Canadienne. Sa surface spécifique de Blaine est de 607 m²/kg et sa densité est 2.8.

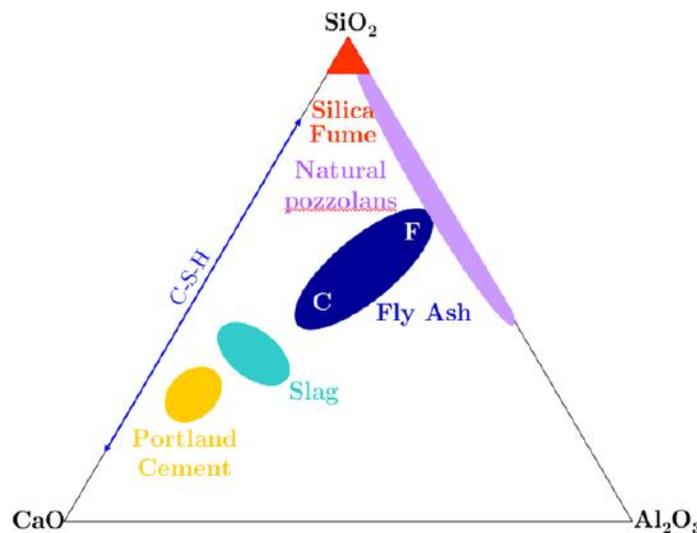


Figure 5.1 — Diagramme ternaire représentant la composition des matériaux cimentaires (Kokaba, 2009)

La composition chimique de ces trois matériaux est représentée par le tableau 5.1

Tableau 5.1- Composition chimique des matériaux utilisés

Composants	Ciment	Cendres Volantes	Laitier
CaO	61,55	4,652	41,853
SiO ₂	20,219	47,736	35,285
Al ₂ O ₃	4,330	23,861	10,471
Fe ₂ O ₃	2,471	16,971	0,372
MgO	1,997	1,011	7,845
K ₂ O	0,823	1,978	0,324
Na ₂ O	0,144	0,838	0,223
SO ₃	3,544	0,702	1,819
TiO ₂	0,194	1,165	0,475
P ₂ O ₅	0,098	0,385	0,012
PAF	1,8	2,72	0,30

5.2.3 Granulats

Les granulats, qui représentent généralement de l'ordre de 70 % du volume du béton, peuvent être naturels, artificiels, ou recyclés.

Les gros granulats utilisés sont des granulats concassés de densités de 2.71 à 2.73, on a utilisé deux types de tailles différentes : 5-10 et 10-20. Les granulats fins sont du sable de la rivière d'une densité de 2.65.

Les deux types de granulats satisfont aux exigences de la norme CSA A23.1-04. Tous les agrégats sont utilisés dans un état saturé à surface sèche (SSD).

5.2.4 Eau de gâchage

Indispensable à l'hydratation du ciment, l'eau de gâchage contribue aussi à l'ouvrabilité du béton. Elle doit être exempte d'impuretés nuisibles telles que les matières organiques, les acides, les alcalins et les sels. Elle ne doit pas être employée avec excès sous risque de diminuer les résistances mécaniques et la durabilité du béton.

L'eau utilisée dans les essais est l'eau du robinet potable, exempte d'impuretés, maintenue à une température constante.

5.2.5 Adjuvants

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

- Adjuvants modifiant l'ouvrabilité du béton (plastifiants réducteurs d'eau, superplastifiants) ;
- Adjuvants modifiant les cinétiques de prise et de durcissement (accélérateurs de prise, accélérateurs de durcissement, retardateurs de prise) ;
- Adjuvants modifiant certaines propriétés du béton (entraîneurs d'air, générateurs de gaz, hydrofuges de masse, etc.).

Deux adjuvants sont employés dans ce travail de thèse : les superplastifiants et les entraîneurs d'air.

5.2.5.1 Superplastifiants

En défloculant les grains de ciment, les superplastifiants réduisent fortement la teneur en eau du béton sans toutefois en modifier la consistance.

5.2.5.2 Entraîneurs d'air

Le béton durci contient un certain volume d'air résiduel réparti de façon aléatoire et dont la fraction volumique est généralement de 1 à 2 %. Les entraîneurs d'air permettent d'en entraîner un volume supérieur ($\approx 5\%$) et de le répartir uniformément en vue d'améliorer la résistance au gel du béton (Chatterji, 2003), ainsi que sa résistance aux sels de déverglaçage (Deja, 2003).

Un entraîneur d'air type (Airextra) et un super-plastifiant (Eucon 37) ont été utilisés comme adjuvants pour améliorer l'ouvrabilité des bétons avec faibles rapports E/L.

5.3 Formulations des bétons

12 formulations ont été réalisées pour les bétons aux cendres volantes avec un total de 36 prismes $100 \times 100 \times 400$ pour les essais de carbonatation. Et 12 autres formulations pour les bétons aux laitiers. Pour chaque rapport E/L variant de 0.4, 0.5 et 0.6, quatre mélanges ont été confectionnés pour les différents taux de substitutions d'ajouts (0%, 20%, 30% et 50% pour les cendres volantes et 0%, 20%, 40% et 60% pour le laitier). Les proportions des mélanges de bétons aux cendres volantes sont résumées dans le tableau 5.2.

On désigne par BT le béton témoin, B20CV, B30CV et B50CV les bétons contenant 20, 30 et 50% de cendres volantes respectivement et B20L, B40L et B60L les bétons contenant 20, 40 et 60% de laitier.

Tableau 5.2- Proportions des mélanges

E/L	Code	Ciment (kg/m ³)	Cendres volantes (kg/m ³)	Laitier (kg/m ³)	Ajout (%)	Eau (kg/m ³)	Sable (kg/m ³)	Granulats (kg/m ³)		Adjuvants	
								80% 5-14 mm	20% 10-20 mm	SP (%)	EA (ml/m ³)
0.6	BTCV 0.6	380	0	0	0	228	519	856	214	0	327.18
	B20CV 0.6	304	76	0	20	228	498	856	214	0	433.2
	B30CV 0.6	266	114	0	30	288	487	856	214	0	500.08
	B50CV 0.6	190	190	0	50	288	465	856	214	0	583.3
	BTL 0.6	312	0	0	0	187.2	767.5	909.4	241.8	0	0
	B20L 0.6	249.6	0	62.4	20	187.2	765.5	907.1	241.2	0	0
	B40L 0.6	187.2	0	124.8	40	187.2	763.6	904.8	240.6	0	0
0.5	B60L 0.6	124.8	0	187.2	60	187.2	761.7	902.5	240	0	0
	BTCV 0.5	380	0	0	0	190	620	856	214	0	400.14
	B20CV 0.5	304	76	0	20	190	598	856	214	0	545.68
	B30CV 0.5	266	114	0	30	190	587	856	214	0	563.54
	B50CV 0.5	190	190	0	50	190	566	856	214	0	583.3
	BTL 0.5	350	0	0	0	175	767	909.1	241.8	0.3	0
	B20L 0.5	280	0	70	20	175	765	906.6	241.1	0.3	0
0.4	B40L 0.5	210	0	140	40	175	763	903.7	240.4	0.6	0
	B60L 0.5	140	0	210	60	175	760	900.8	239.6	0.9	0
	BTCV 0.4	380	0	0	0	152	721	856	214	1	433.2
	B20CV 0.4	304	76	0	20	152	698	856	214	1	500.08
	B30CV 0.4	266	114	0	30	152	687	856	214	0.9	583.3
	B50CV 0.4	190	190	0	50	152	667	856	214	0.5	666.52
	BTL 0.4	400	0	0	0	160	764	905.6	240.8	2.2	0
0.4	B20L 0.4	320	0	80	20	160	761	901.7	239.8	3	0
	B40L 0.4	240	0	160	40	160	758	898.6	239	3.1	0
	B60L 0.4	160	0	240	60	160	756	895.4	238.1	3.3	0

5.4 Procédures de malaxage

Après le lavage du malaxeur (figure 5.2) et séchage du sable, on le fait tourner dans le malaxeur pendant 1min. ensuite on fait la correction du sable pour prendre en considération l'eau absorbée ou évaporée. On ajoute les gros granulats et la moitié d'eau de gâchage au sable et on laisse agiter pendant 2 min. Par la suite, on ajoute le ciment + cendres volantes (ou laitier) et on laisse agiter pendant 30 sec. A la fin, on ajoute l'eau qui reste avec les adjuvants selon les besoins pour obtenir le rapport E/L désiré, et on laisse tourner le mélange pendant 3 min. On arrête le malaxeur pendant 2 min et on le redémarre pour les dernières 3 min.



Figure 5.2 — Malaxeur d'une capacité de 125l

Des essais à l'état frais ont été effectués pour mesurer l'affaissement et la masse volumique de chaque mélange comme illustré dans la figure 5.3. Les résultats sont présentés dans le tableau 5.3.



(a)



(b)

Figure 5.3 — Essais à l'état frais: (a) Affaissement; (b) Masse volumique

Tableau 5.3 - Resultats des essais à l'état frais

Grandeurs mesurées	E/L	Cendres Volantes (%)				Laitier (%)			
		Témoin	20 CV	30 CV	50 CV	Témoin	20 L	40 L	60 L
Air (%)	0.6	5,5	5,6	5,2	5,1	1,4	1,3	1,4	1,2
	0.5	6,0	7,0	7,4	7,6	1,7	1,5	1,2	1,5
	0.4	6,0	5,3	5,2	7,1	1,7	1,8	1,8	1,7
Affaissement (mm)	0.6	215	230	235	240	125	130	125	135
	0.5	110	170	175	210	110	105	100	105
	0.4	145	160	140	160	140	130	120	135
Masse volumique (kg/m ³)	0.6	2258	2237	2230	2223	2387	2394	2375	2369
	0.5	2286	2221	2194	2195	2415	2418	2415	2396
	0.4	2351	2333	2308	2232	2439	2422	2425	2419
Température (°C)	0.6	21,0	23,4	21,0	22,8	20,0	17,3	19,3	17,6
	0.5	21,8	22,6	22,0	23,0	20,4	18,1	20,6	18,2
	0.4	22,3	22,0	23,0	22,0	21,1	18,1	18,7	17,4

5.5 Confection et conservation des échantillons

Les mélanges sont mis dans des prismes 100×100×400 en assurant leur vibration pour éviter la ségrégation. 3 prismes ont été confectionnés pour chaque type de mélange avec un rapport E/L et un taux de substitution de cendres volantes fixe. Le nombre total des échantillons pour différents rapports E/L (0.4, 0.5 et 0.6) et différents taux de substitution des cendres volantes (0%, 20, 30% et 50%) et de laitier (0%, 20%, 40% et 60%) est 72 prismes.

Les échantillons sont couverts avec un film plastique pour éviter l'évaporation de l'eau et stockés au laboratoire pendant 24h. Après le démoulage, ils sont mis dans une chambre humide (HR>95%) pendant 28 jours (figure 5.4).



Figure 5.4 — Stockage des échantillons dans une chambre humide

5.6 Essais de carbonatation accélérée

5.6.1 Préconditionnement des échantillons

La connaissance des conditions optimales pour la carbonatation conduit les expérimentateurs à maintenir l'humidité relative comme un paramètre important pour les essais de carbonatation accélérée (Arliguie, 1990). A la fin de la cure humide, les matériaux ont une humidité très élevée. La carbonatation directe dans les conditions accélérées n'est pas recommandée car la pénétration du dioxyde de carbone (CO_2) serait grandement ralentie. Le prétraitement des échantillons sous la forme de séchage est donc essentiel. Dans une étude faite par Sabet and Jong (2006), ils ont constaté que le séchage à l'étuve peut endommager la microstructure du béton et perturber ainsi les résultats de carbonatation. A cet effet, on a opté pour un séchage naturel sans étuvage.

Après la cure, les échantillons sont placés dans un milieu ambiant ($\text{HR} = 55\%$, $T = 23^\circ\text{C}$) pendant 14 jours, pour stabiliser l'humidité relative interne de la microstructure avant de les mettre dans l'enceinte de carbonatation, pour que les résultats ne soient pas sous-estimés à cause de la saturation des pores.

5.6.2 Principe de l'essai de carbonatation accélérée

La carbonatation naturelle des éprouvettes est par définition la méthode la plus proche de la réalité. Cependant, cette méthode est longue. Il est donc nécessaire de disposer d'une méthode de carbonatation en laboratoire qui permet d'apprécier rapidement le comportement des matériaux face à ce type de sollicitation physico-chimique.

L'essai de carbonatation accélérée consiste à conserver des éprouvettes de béton dans une enceinte enrichie en dioxyde de carbone et à humidité relative et température contrôlées. Pour des échéances définies, les échantillons sont retirés de l'enceinte.

L'essai est réalisé dans des enceintes de carbonatation. Deux petits ventilateurs sont placés de part et d'autre de chaque enceinte afin d'assurer le brassage et l'homogénéisation de l'atmosphère. L'alimentation en mélange gazeux est assurée par un analyseur de dioxyde de carbone fonctionnant en continu, précis à ± 1 %. La carbonatation étant réputée optimale pour une hygrométrie relative comprise entre 50 et 70 %, une solution saline à base de nitrate d'ammonium (NH_4NO_3) est disposée au fond des enceintes. Elle assure le maintien de l'humidité relative à 65 ± 5 %. Le maintien de ce taux constitue un point essentiel pour le déroulement de l'essai. Par ailleurs, l'essai est réalisé à la température de $20 \text{ °C} \pm 2 \text{ °C}$. Dans chaque enceinte, ces paramètres sont contrôlés grâce à un thermohygromètre (figure 5.5).



Figure 5.5 — Stockage des prismes dans la chambre de carbonatation accélérée

Après la durée de pré-conditionnement, chaque prisme est couvert d'un papier aluminium des deux faces parallèles en longueurs et deux faces parallèles en largeurs, laissant seulement les deux faces en longueur sans couverture pour assurer une carbonatation unidimensionnelle. Les échantillons sont ensuite transférés dans l'enceinte de carbonatation à conditions environnementales contrôlées ($\text{CO}_2=4\%$, $\text{HR}=65\%$, $T=20\text{°C}$) pendant 7, 28, 90 et 180 jours.

5.6.3 Mesure de la profondeur de carbonatation

Les mesures de l'épaisseur carbonatée sont effectuées par pulvérisation d'un indicateur de pH. Pour mesurer une profondeur de carbonatation, un indicateur coloré de pH doit présenter un contraste marqué entre la forme acide et la forme basique. De plus, il est important qu'une des deux colorations soit nettement distinctes du ton gris naturel du béton ou des mortiers. C'est pourquoi la phénophtaléine a été retenue comme indicateur coloré (plage de virage : 8,0 – 9,9).

Après achèvement de chaque durée d'exposition, les trois prismes de chaque mélange sont sciés à l'aide d'un appareil (figure 5.6), leurs faces subissent une vaporisation de phénophtaléine diluée dans de l'alcool. La couleur rose indique que le béton est sain (non carbonaté) pour un $\text{pH} > 9$. Le béton carbonaté reste non coloré pour un $\text{pH} \leq 9$ comme illustré dans les figures 5.7.



Figure 5 6 — Equipement utilisé pour obtenir du béton fracture frais



(a)



(b)

Figure 5 7 — Bétons carbonatés: a) aux cendres volantes; b) au laitier

Les mesures de l'épaisseur carbonatée sont alors réalisées à l'aide d'un pied à coulisse et correspondent aux distances (au dixième de millimètre près) entre la surface externe et le front de coloration.

De chaque côté des parties fendues (carbonatation unidirectionnelle), on repère 5 points de mesure équidistants d'environ un centimètre. Seuls les 3 points centraux sont retenus afin de s'affranchir des effets de bords dus au CO₂ qui circule plus facilement entre l'aluminium autocollant et le matériau. A chaque échéance, on dispose donc de $3 \times 2 \times 3 = 18$ mesures. La moyenne arithmétique est maintenue.

5.7 Résultats et discussion

5.7.1 Carbonatation des bétons aux cendres volantes

5.7.1.1 Discussion des résultats

Les valeurs moyennes des profondeurs de carbonatation pour chaque type d'échantillon à 7, 28, 90 et 180 jours d'exposition dans l'enceinte de carbonatation accélérée sont résumées dans le tableau 5.4.

Tableau 5.4- Profondeurs de carbonatation des bétons aux cendres volantes

Code	E/L	Xc (mm)			
		7 j	28 j	90 j	180 j
BT 0.6	0.6	1,5	5,7	6,4	6.6
B20CV 0.6		2,5	8,3	10,2	12
B30CV 0.6		4	8,6	12	15.5
B50CV 0.6		5,5	10,8	15,7	22.8
BT 0.5	0.5	0,5	2	4	4.6
B20CV 0.5		1,5	3,3	5,7	5.6
B30CV 0.5		2	5,2	6,8	7.3
B50CV 0.5		4	8,17	13	17.5
BT 0.4	0.4	0,5	0,8	1	1,5
B20CV 0.4		1	1,7	1,8	2
B30CV 0.4		1,5	2	2,5	2,8
B50CV 0.4		1,7	2,5	3	5

Les figures 5.8 montrent que pour chaque taux de substitution des cendres volantes (0%, 20%, 30% et 50%), les profondeurs de carbonatation augmentent en augmentant les rapports E/L et l'âge. La porosité de la microstructure augmente avec l'augmentation du rapport E/L, ce qui facilite la pénétration du CO₂ à travers les pores du béton. Cette remarque a été observée par plusieurs recherches antérieures ([Khunthongkeaw et al., 2006](#); [Khunthongkeaw et Tangtermsirikul, 2005](#); [Shi et al., 2009](#)). Et pour chaque rapport E/L, la profondeur de carbonatation augmente avec le taux de substitution des cendres volantes à tous les âges.

Pour le béton témoin, il n'y a presque pas de différence entre les différents rapports E/L au jeune âge, mais elle commence à apparaître à l'âge de 28 jours avec la progression des réactions d'hydratation et la formation des CH susceptibles de se carbonater. Les profondeurs de carbonatations les plus élevées sont marquées pour E/L=0.6 à cause de la grande porosité qui facilite la pénétration du gaz carbonique.

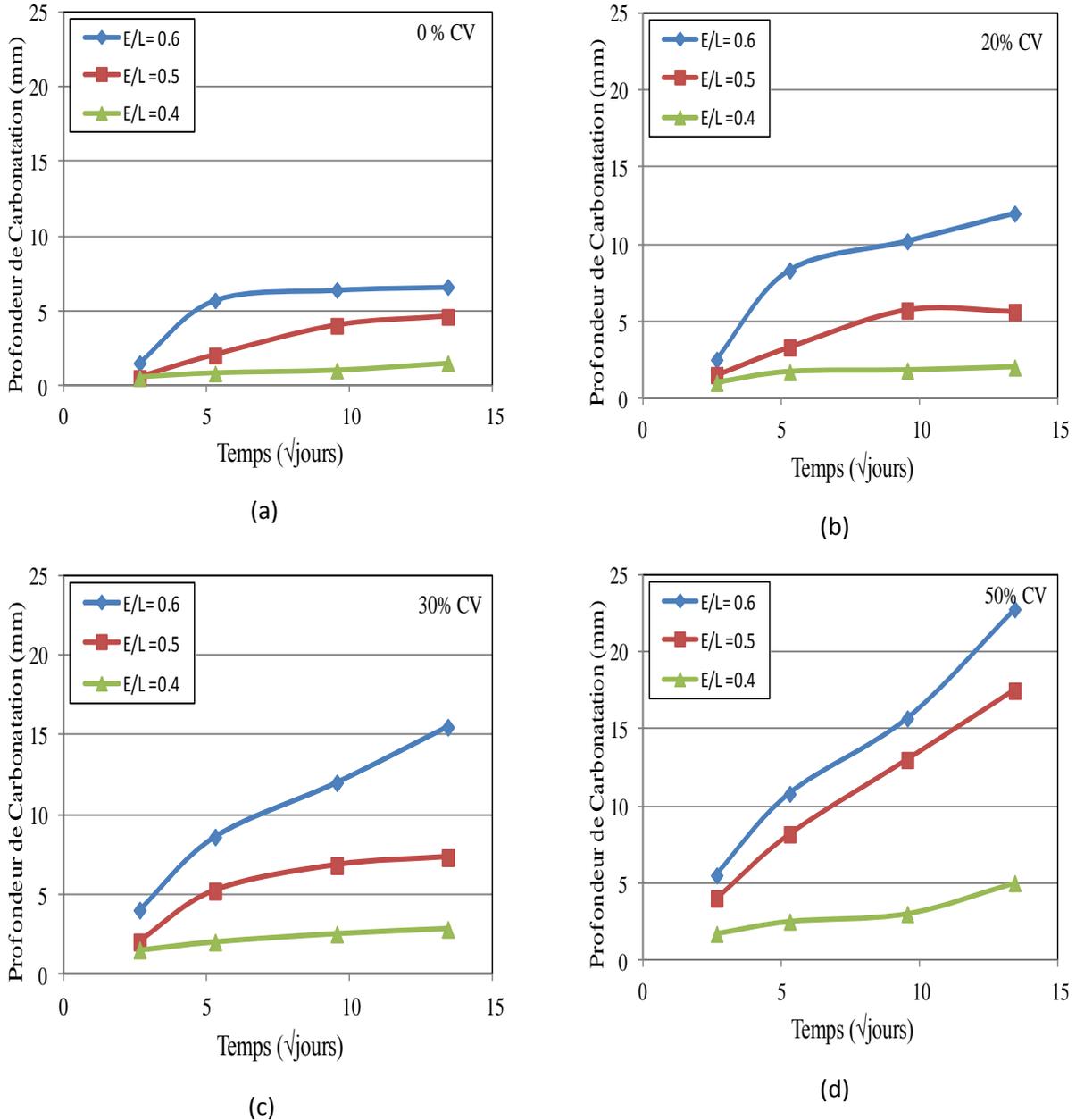


Figure 5 8 — Profondeurs de carbonatation observées des bétons aux cendres volantes

En substituant le ciment par 20% de cendres volantes, une légère augmentation des profondeurs de carbonatation est remarquée par rapport à celles du béton témoin au jeune âge pour les différents rapports E/L. Avec le temps, cette différence reste toujours faible pour E/L (0.4 et 0.5), tandis qu'elle est de 100% pour E/L=0.6 à 180 jours.

L'effet pouzzolanique des cendres volantes par la formation des CSH tend à colmater les pores et freiner la diffusion du CO₂, mais la quantité restante des CH va être carbonatée et donner cette

différence dans les profondeurs de carbonatation des deux bétons. En augmentant le rapport E/L (0.6), la porosité importante de ce type de béton facilite la pénétration du CO₂ dans la matrice cimentaire.

Pour 30% CV, la différence entre les profondeurs de carbonatation par rapport à celles du béton témoin est beaucoup plus importante pour E/L (0.5 et 0.6). Tandis que pour E/L=0.4, une légère augmentation est remarquée pour tous les âges.

Pour 50% CV, une grande différence entre les profondeurs de carbonatation par rapport à celles du béton témoin est observée pour les différents rapports E/L surtout à long terme. La quantité des CH est très faible à cause de la substitution du ciment par les cendres volantes, ce qui accélère le processus de carbonatation.

Des bétons avec 20% et 30% de substitution de cendres volantes avec un rapport E/L de 0.4 ont des profondeurs de carbonatation plus faibles que celles d'un béton sans ajouts avec des rapports E/L de 0.5 et 0.6.

Un béton avec 30% CV et un rapport E/L=0.5 a des profondeurs de carbonatation plus faibles que celles d'un béton témoin avec un rapport E/L=0.6 à tous les âges.

Un béton contenant 50% de cendres volantes avec un rapport E/L de 0.4 a des profondeurs de carbonatation plus faibles que celles d'un béton témoin ayant des rapports E/L de 0.5 et 0.6 à tous les âges.

5.7.2 Validation du modèle MCV

Le tableau 5.5 représente les résultats expérimentaux (X_{EXP}) et les résultats prédits par les modèles MCV et de Papadakis (2000) avec leurs erreurs relatives calculées par les formules (4.14) et (4.15) respectivement.

L'erreur relative moyenne du modèle RNA (MCV) est de 37.14 tandis que celle du modèle de Papadakis est de 242.09. Cette grande différence entre les erreurs relatives des deux modèles prouve la performance de notre modèle.

Tableau 5.5- Profondeurs de carbonatation observées et prédites des bétons aux cendres volantes

Liant (kg/m ³)	CV (%)	E/L	CO ₂ (%)	RH (%)	\sqrt{t}	X _C (mm)	X _{RN} (mm)	X _{Papadakis} (mm)	E ₁ (%)	E ₂ (%)
380	0	0,6	4	65	2,65	1,5	4,03	3,89	168,47	159,15
380	20	0,6	4	65	2,65	2,5	5,12	4,95	104,77	98,04
380	30	0,6	4	65	2,65	4	5,38	5,86	34,62	46,40
380	50	0,6	4	65	2,65	5,5	6,65	11,40	20,93	107,27
380	0	0,6	4	65	5,29	5,7	6,07	7,76	6,40	36,14
380	20	0,6	4	65	5,29	8,3	6,75	9,88	18,72	19,08
380	30	0,6	4	65	5,29	8,6	7,08	11,69	17,66	35,93
380	50	0,6	4	65	5,29	10,8	9,26	22,76	14,26	110,71

380	0	0,6	4	65	9,54	6,4	11,07	13,99	73,00	118,66
380	20	0,6	4	65	9,54	10,2	10,47	17,82	2,60	74,74
380	30	0,6	4	65	9,54	12	11,20	21,08	6,65	75,68
380	50	0,6	4	65	9,54	15,7	13,10	41,04	16,54	161,40
380	0	0,6	4	65	13,42	10	11,08	19,69	10,82	96,86
380	20	0,6	4	65	13,42	12	15,29	25,07	27,38	108,94
380	30	0,6	4	65	13,42	15,5	17,04	29,66	9,93	91,33
380	50	0,6	4	65	13,42	25,5	18,95	57,73	25,67	126,39
380	0	0,5	4	65	2,65	0,5	2,35	3,12	370,97	524,74
380	20	0,5	4	65	2,65	1,5	2,47	4,05	64,49	169,96
380	30	0,5	4	65	2,65	2	2,90	4,83	44,87	141,39
380	50	0,5	4	65	2,65	4	3,95	9,53	1,26	138,37
380	0	0,5	4	65	5,29	2	3,27	6,24	63,50	211,78
380	20	0,5	4	65	5,29	3,3	3,49	8,08	5,61	144,95
380	30	0,5	4	65	5,29	5,2	5,50	9,64	5,72	85,33
380	50	0,5	4	65	5,29	8,17	8,77	19,03	7,30	132,97
380	0	0,5	4	65	9,54	4	4,67	11,25	16,77	181,13
380	20	0,5	4	65	9,54	5,7	4,86	14,58	14,67	155,75
380	30	0,5	4	65	9,54	6,8	6,84	17,38	0,52	155,59
380	50	0,5	4	65	9,54	13	9,24	34,33	28,93	164,04
380	0	0,5	4	65	13,42	4,6	4,96	15,82	7,72	243,89
380	20	0,5	4	65	13,42	5,6	5,87	20,51	4,81	266,19
380	30	0,5	4	65	13,42	7,3	7,04	24,45	3,58	234,91
380	50	0,5	4	65	13,42	17,5	9,25	48,29	47,13	175,92
380	0	0,4	4	65	2,65	0,5	1,36	2,11	172,64	322,94
380	20	0,4	4	65	2,65	1	1,88	2,87	88,49	186,86
380	30	0,4	4	65	2,65	1,5	2,00	3,49	33,33	132,46
380	50	0,4	4	65	2,65	1,7	1,70	7,12	0,17	318,94
380	0	0,4	4	65	5,29	0,8	1,45	4,22	81,78	427,67
380	20	0,4	4	65	5,29	1,7	1,73	5,73	1,61	236,84
380	30	0,4	4	65	5,29	2	2,14	6,96	6,85	248,04
380	50	0,4	4	65	5,29	2,5	2,22	14,22	11,38	468,69
380	0	0,4	4	65	9,54	1	1,69	7,61	69,18	661,29
380	20	0,4	4	65	9,54	1,8	1,84	10,33	2,08	473,71
380	30	0,4	4	65	9,54	2,5	2,21	12,55	11,49	402,12
380	50	0,4	4	65	9,54	3	3,02	25,64	0,52	754,64
380	0	0,4	4	65	13,42	1,5	1,71	10,71	13,75	613,94
380	20	0,4	4	65	13,42	2	2,73	14,53	36,32	626,34
380	30	0,4	4	65	13,42	2,8	2,82	17,66	0,65	530,66
380	50	0,4	4	65	13,42	5	5,30	36,07	5,97	621,34

La figure 5.9 illustre la comparaison entre les résultats des deux modèles et des résultats expérimentaux avec leurs coefficients de corrélation.

Cette figure nous montre clairement que le modèle de Papadakis surestime les profondeurs de carbonatations. [Sabet et Jong \(2006\)](#) ont expliqué cette surestimation par l'étuvage des

échantillons à 105°C lors du préconditionnement utilisé dans les essais de Papadakis pour élaborer ce modèle. Ce qui a conduit à accélérer la carbonatation et donner des résultats beaucoup plus élevés.

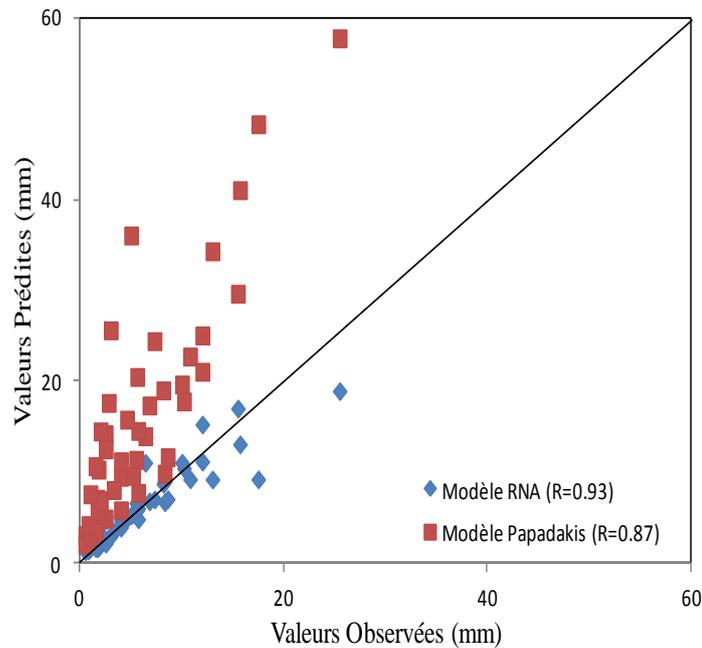


Figure 5 9—Valeurs prédites par MCV et Modèle de Papadakis en fonction des valeurs expérimentales

5.7.3 Proposition d'une formule analytique pour MCV

En se basant sur la 1^{ère} loi de Fick $X(t) = A\sqrt{t}$, [Saetta et al \(1993, 1995\)](#) et [Saetta and Vitaliani \(2004\)](#) on proposé une formule en fonction des paramètres influents la carbonatation:

$$A = f_{mat.} \left(L, \frac{E}{L}, CV \right) \cdot f_{env.}(CO_2, HR, T) \cdot f_{cure} \quad (5.1)$$

Avec $f_{mat.}$ fonction des paramètres liés au matériau (L, E/L, % CV), $f_{env.}$ fonction liée aux paramètres environnementaux (CO₂, HR, T) et f_{cure} fonction liée aux conditions de cure.

Dans notre cas, on ne prend en considération que les paramètres qu'on a introduits comme neurones d'entrées dans le modèle MCV (L, E/L, CV, HR et CO₂) pour élaborer notre formule.

En se basant sur les modèles existant dans la littérature et l'allure du comportement de la profondeur de carbonatation en fonction de chaque paramètre étudié, on a pu proposer une formule mathématique à l'aide de STATISTICA en introduisant les données et les résultats de la base de données des bétons aux cendres volantes avec d'autres données issus du modèle MCV élaboré par les RNAs, la meilleure corrélation obtenue après plusieurs itérations est celle de la formule (5.2)

$$X_c = \frac{(E/L)^{1.93} \times (CO_2)^{0.43}}{(L)^{0.08} \times (1 - HR)^{1.76} \times (1 - CV)^{1.94}} \sqrt{t} \quad (5.2)$$

En appliquant cette formule sur les données expérimentales des essais effectués pour la validation du modèle MCV, une corrélation de 0.92 est atteinte, tandis qu'elle est de 0.87 seulement quand on a appliqué la formule de Papadakis citée précédemment comme illustré dans la figure 5.10.

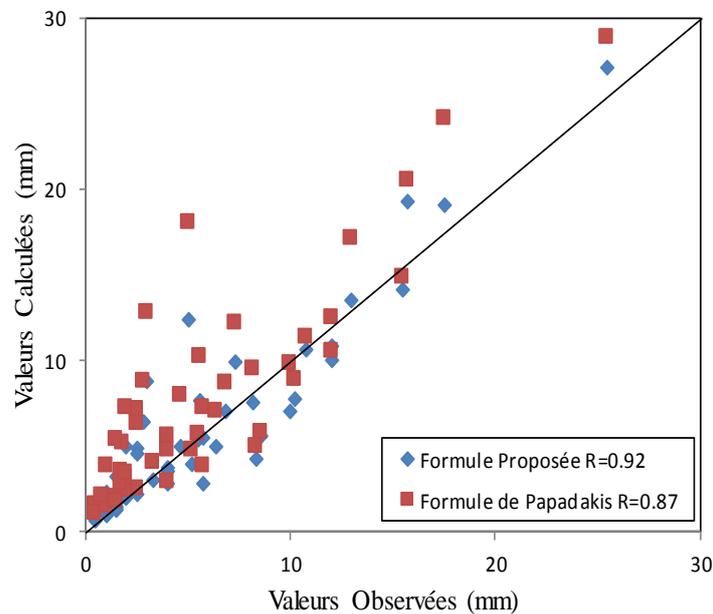


Figure 5 10 — Performance de la formule analytique proposée

Ce résultat nous indique que notre formule peut être utilisée pour la prévision de la durée de vie du béton aux cendres volantes.

5.7.4 Prédiction de la durée de vie des bétons aux cendres volantes

La carbonatation se manifeste dans le béton dans deux phases successives comme l'a représenté [Tiutti \(1980\)](#); une première phase d'incubation où le dioxyde de carbone se diffuse à travers les pores de béton jusqu'à atteindre le premier lit des armatures après une durée de temps $t_{\text{incubation}}$ pour une profondeur de carbonatation $X_c = e$ où e est l'enrobage du béton, et une deuxième phase appelée phase de propagation, la carbonatation se propage en dépassant les armatures avec la diminution du pH jusqu'à des valeurs inférieures à 9. Ce processus de carbonatation nous indique que la phase la plus importante qu'on doit prendre en considération pour estimer la durée de vie des bétons est la phase d'incubation.

Notre modèle (MCV) élaboré par la technique des RNAs a été appliqué sur des résultats de carbonatation accélérée, et pour estimer la durée de vie ($t_{\text{incubation}}$) il faut convertir la profondeur de carbonatation accélérée à celle naturelle. Des chercheurs ont trouvé de bonnes corrélations entre la carbonatation accélérée et la carbonatation naturelle ([Khunthongkeaw et al., 2006](#)),

seulement que les relations déduites de ces études sont applicables pour leurs propres résultats. Récemment, [Czarnecki et Woyciechowski \(2015\)](#) ont constaté que la carbonatation accélérée pour $CO_2 = 1\%$ est identique à une carbonatation naturelle.

D'après la relation (5.2) en supposant $X_c = e$, et en prenant en compte la déduction de [Czarnecki et Woyciechowski \(2015\)](#), la durée de la phase d'incubation $t_{incubation}$ peut être estimée par la relation suivante:

$$t_{incubation} = \left(\frac{(L)^{0.08} \times (1 - HR)^{1.76} \times (1 - CV)^{1.94}}{(E/L)^{1.93} \times (CO_2)^{0.43}} \times e \right)^2 \quad (5.3)$$

En supposant un béton aux cendres volantes exposé à une carbonatation naturelle ($CO_2 = 1\%$) et une humidité relative de 65%, la durée de vie varie en fonction du taux de substitution des cendres volantes et du rapport E/L et de l'épaisseur d'enrobage e comme illustré dans les figures 5.11 (a, b et c).

Le rapport E/L joue un rôle très important dans la durée de vie des bétons avec et sans cendres volantes, plus il est faible plus le béton ait une durée de vie plus longue, à cause de la densification de la microstructure qui empêche la pénétration des agents agressifs comme le CO_2 .

Pour tous les rapports E/L (0.4, 0.5 et 0.6), la durée de vie augmente avec l'augmentation de l'épaisseur d'enrobage, qui représente une enveloppe de protection des armatures:

Pour une épaisseur d'enrobage variant de 20 à 60mm, la durée de vie d'un béton sans ajouts varie de 150 à 1200 ans pour $E/L = 0.4$, et de 100 à 450 ans pour $E/L = 0.5$ et de 25 à 220 ans pour $E/L = 0.6$.

La substitution du ciment par les cendres volantes diminue la durée de vie des bétons aux cendres volantes, cette diminution est beaucoup plus appréciable pour des taux de substitution plus élevées (40 et 60%).

D'après la figure 5.11 (a), on peut déduire que la substitution du ciment par 20% CV avec un enrobage $e = 30\text{mm}$, peut donner un béton de même durée de vie qu'un béton témoin avec un enrobage de 20mm. Au-delà de 30mm d'enrobage, la durée de vie des bétons à 20%CV dépasse les 200 ans.

En comparant les figures 5.11 (a et b), on remarque que la durée de vie d'un béton à 20% CV avec un rapport $E/L = 0.4$ est la même que celle d'un béton sans ajouts avec $E/L = 0.5$ pour les différentes épaisseurs d'enrobage.

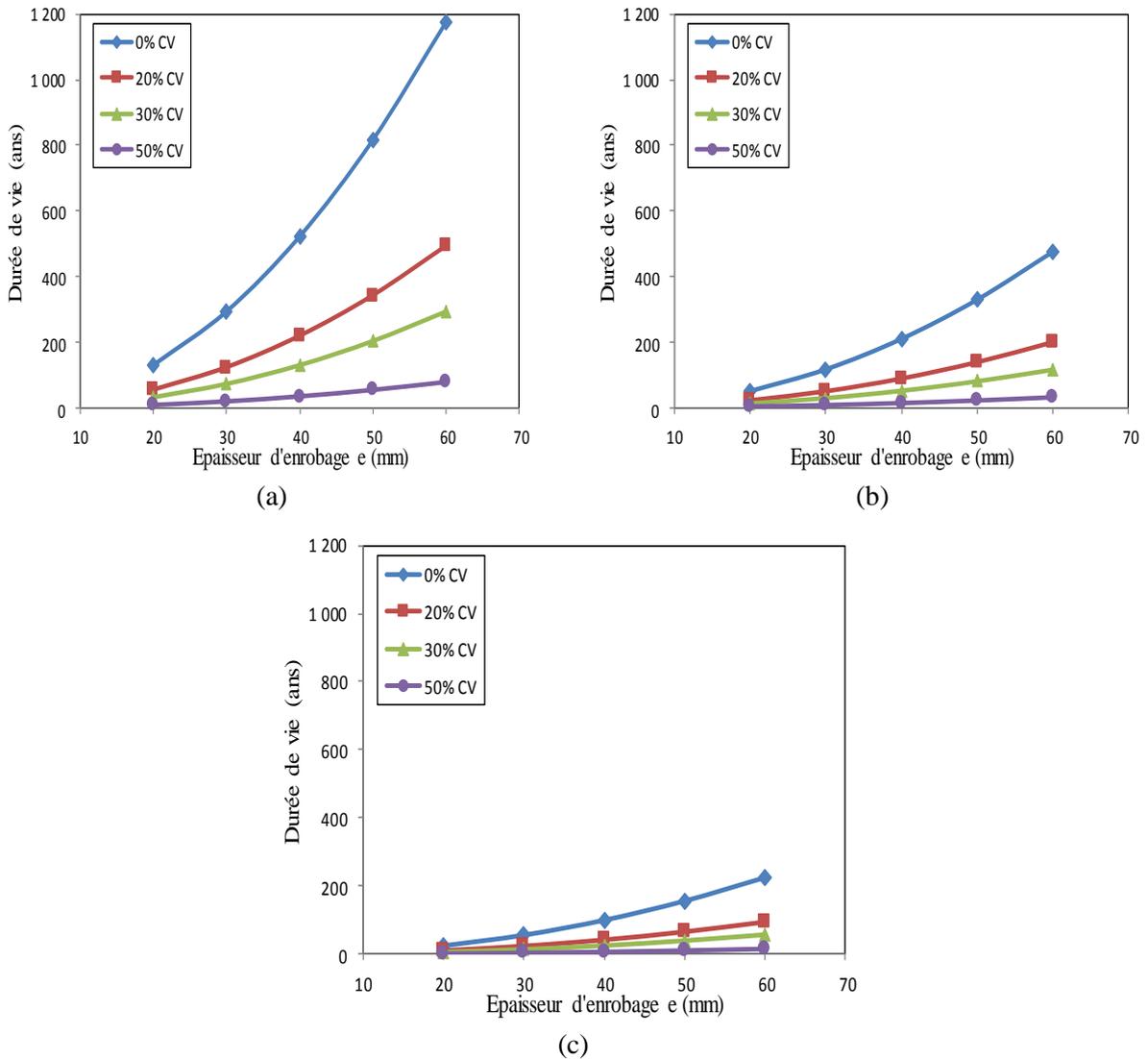


Figure 5 11 — Durée de vie des bétons aux cendres volantes:

a) E/L=0.4; b) E/L=0.5; c) E/L=0.6

5.7.5 Carbonatation des bétons aux laitiers

Les valeurs moyennes des profondeurs de carbonatation pour chaque type d'échantillon des bétons au laitier à 7, 28 et 90 jours sont résumées dans le tableau 5.6.

Tableau 5.6- Profondeurs de carbonatation des bétons aux cendres volantes

Code	E/L	Xc (mm)		
		7 j	28 j	90 j
BT 0.6	0.6	2	5,5	7.5
B20L 0.6		4,5	9	10
B40L 0.6		5,5	11	12
B60L 0.6		7,5	11,5	13.5
BT 0.5	0.5	1,5	2,75	3.5
B20L 0.5		2	3,5	4.5
B40L 0.5		2,5	5,75	6
B60L 0.5		4,25	8,25	9.5
BT 0.4	0.4	0,01	1	1.2
B20L 0.4		1	2,5	3
B40L 0.4		1	2,5	3.25
B60L 0.4		3	4,25	5

La figure 5.12 montre que pour chaque taux de substitution de laitier (0%, 20%, 40% et 60%), les profondeurs de carbonatation augmentent en augmentant les rapports E/L avec l'âge. Cela est dû à la porosité du béton qui augmente avec l'augmentation du rapport E/L, ce qui facilite la pénétration du CO₂ à travers les pores du béton. Des recherches antérieures ont trouvé les mêmes résultats (Khunthongkeaw et al., 2006; Khunthongkeaw et Tangtermsirikul, 2000; Shi et al., 2009).

Pour le béton témoin (CPO), la profondeur de carbonatation pour E/L=0.6 est 100% plus élevée que celle de E/L=0.4 et presque la même pour celle de E/L=0.5 au jeune âge. Cette différence est beaucoup plus appréciable à long terme. Ce qui indique l'effet remarquable du rapport E/L sur le phénomène de carbonatation.

En substituant le ciment par 20% de laitier, la profondeur de carbonatation augmente par rapport à celle du béton témoin pour tous les âges, cette augmentation est plus appréciable pour E/L=0.6 qui dépasse 100% à 7 jours et 30% à 90 jours.

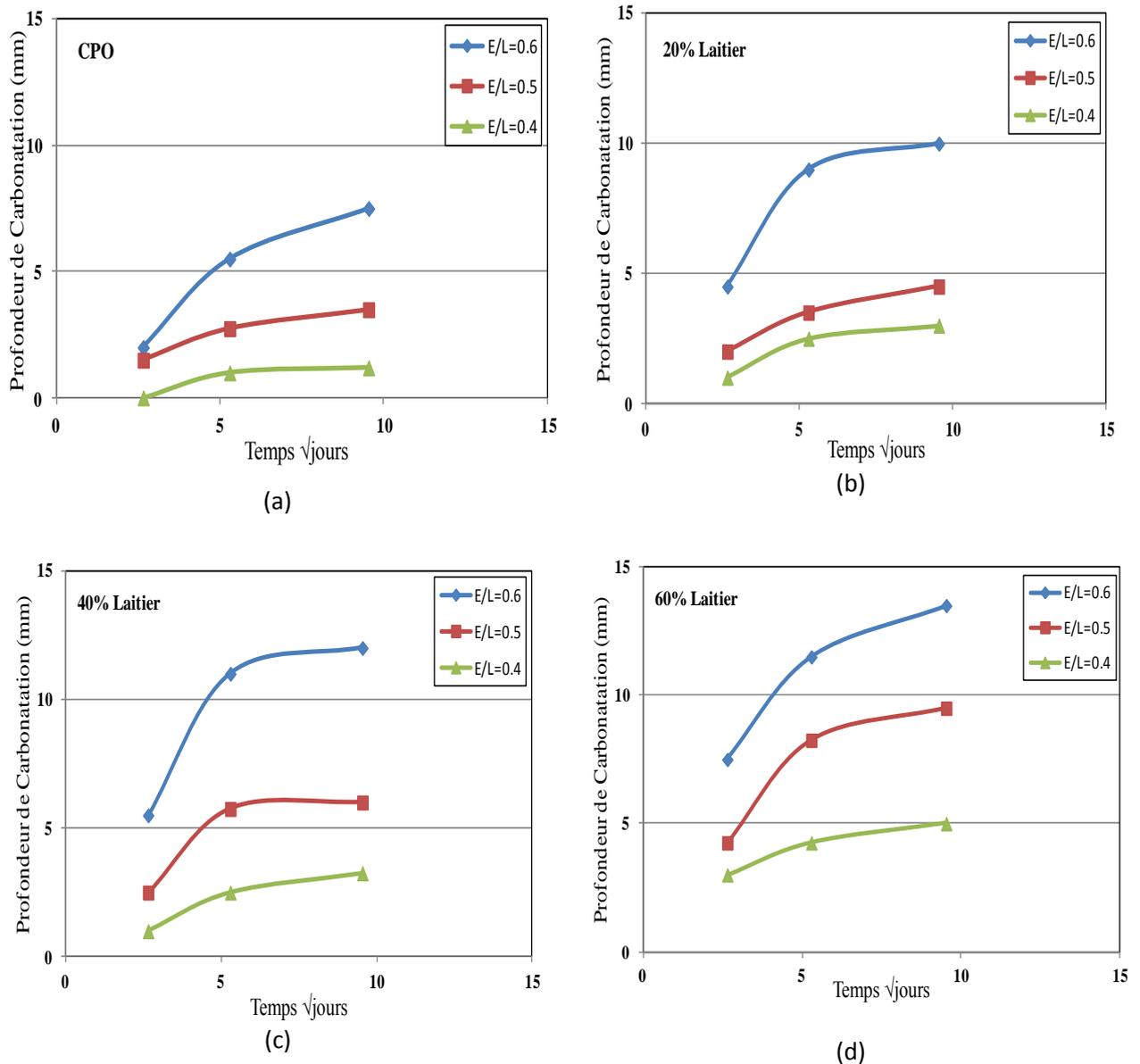


Figure 5.12 — Profondeurs de carbonatations observées des bétons aux laitiers: (a) CPO; (b) 20%; (c) (40%) et (d) 60% laitier

Cette évolution de la profondeur de carbonatation continue avec l'augmentation du taux de substitution du laitier pour tous les rapports E/L avec l'âge. Ce qui veut dire que le laitier a un effet pouzzolanique par la consommation de la portlandite facilitant ainsi la pénétration du dioxyde de carbone.

Pour des rapports E/L=0.4, la profondeur de carbonatation n'augmente pas considérablement entre le béton témoin (OPC) et les bétons avec 20 et 40% de laitier au jeune âge. Mais elle atteint 100% pour le béton contenant 60% de laitier.

D'une manière générale, on remarque que la cinétique de carbonatation ralentie après 28 jours pour les mélanges contenant (0%, 20% et 40%) de laitier ayant des rapports E/L faibles (0.4 et

0.5). A l'âge de 28 jours, les réactions d'hydratation sont presque complètes, ce qui mène à colmater les pores de la matrice cimentaire par les hydrates produites lors de ces réactions. Pour les bétons qui contiennent de 20 à 40% de laitier, la production des hydrates supplémentaires par les réactions pouzzolaniques, mène à la densification de la microstructure du béton freinant ainsi la pénétration du CO₂.

Mais pour des taux élevés de laitier (60%), il y a accélération de la cinétique de carbonatation, peut être à cause de la faible quantité des CH disponibles.

En comparant les figures 5.12 (a et c), on remarque qu'un béton avec 40% de laitier de substitution et un rapport E/L de 0.5 peut donner des profondeurs de carbonatation plus faibles que celles d'un béton sans ajouts avec un rapport E/L=0.6 après l'âge de 28 jours. Et un béton avec 40% de laitier de substitution ayant un rapport E/L de 0.4 donne presque les mêmes profondeurs de carbonatation d'un béton témoin avec un rapport E/L=0.5 pour tous les âges. Un béton contenant 60% de laitier avec un rapport E/L de 0.4 est 50% plus résistant à la carbonatation qu'un béton sans ajouts ayant un rapport E/L de 0.6.

5.7.6 Validation du modèle ML

Le tableau 5.7 représente les résultats expérimentaux (X_c) et les résultats prédits par le modèle ML avec leurs erreurs relatives calculées par la formule (4.14).

D'après le tableau 5.7, on peut remarquer que les valeurs de profondeurs de carbonatation observées des bétons au laitier sont beaucoup plus grandes que les valeurs prédites. L'erreur relative moyenne étant de 48%. Le coefficient de corrélation entre les valeurs observées et les valeurs prédites est de 0.88 comme illustré dans la figure 5.13.

Tableau 5.7 - Profondeurs de carbonatation observées et prédites des bétons au laitier

L (kg/m ³)	Laitier (%)	I _{ac} (%)	F (m ² /g)	E/L	CO ₂ (%)	RH (%)	√t	cure (jours)	X _c (mm)	X _{RNA} (mm)	E (%)
312	0	0	0	0,6	4	65	2,65	28	2	1,72	13,96
312	20	90,74	607	0,6	4	65	2,65	28	4,5	2,71	39,69
312	40	90,74	607	0,6	4	65	2,65	28	5,5	3,01	45,32
312	60	90,74	607	0,6	4	65	2,65	28	7,5	4,37	41,72
312	0	0	0	0,6	4	65	5,29	28	5,5	3,63	33,93
312	20	90,74	607	0,6	4	65	5,29	28	9	5,69	36,72
312	40	90,74	607	0,6	4	65	5,29	28	11	6,40	41,80
312	60	90,74	607	0,6	4	65	5,29	28	11,5	6,75	41,31
312	0	0	0	0,6	4	65	9,54	28	7,5	3,69	50,83
312	20	90,74	607	0,6	4	65	9,54	28	10	12,01	20,12
312	40	90,74	607	0,6	4	65	9,54	28	12	13,85	15,42
312	60	90,74	607	0,6	4	65	9,54	28	13,5	13,46	0,28

350	0	0	0	0,5	4	65	2,65	28	1,5	0,52	58,81
350	20	90,74	607	0,5	4	65	2,65	28	2	1,18	36,20
350	40	90,74	607	0,5	4	65	2,65	28	2,5	1,70	9,42
350	60	90,74	607	0,5	4	65	2,65	28	4,25	2,32	44,14
350	0	0	0	0,5	4	65	5,29	28	2,75	0,47	56,10
350	20	90,74	607	0,5	4	65	5,29	28	3,5	2,54	26,09
350	40	90,74	607	0,5	4	65	5,29	28	5,75	3,24	0,01
350	60	90,74	607	0,5	4	65	5,29	28	8,25	3,85	35,63
350	0	0	0	0,5	4	65	9,54	28	3,5	0,50	85,71
350	20	90,74	607	0,5	4	65	9,54	28	4,5	5,82	29,28
350	40	90,74	607	0,5	4	65	9,54	28	6	6,85	14,18
350	60	90,74	607	0,5	4	65	9,54	28	9,5	7,06	25,70
400	0	0	0	0,4	4	65	2,65	28	0,1	0,40	78,52
400	20	90,74	607	0,4	4	65	2,65	28	1	0,58	3482,93
400	40	90,74	607	0,4	4	65	2,65	28	1	1,04	2202,56
400	60	90,74	607	0,4	4	65	2,65	28	3	1,69	1415,18
400	0	0	0	0,4	4	65	5,29	28	1	0,39	77,91
400	20	90,74	607	0,4	4	65	5,29	28	2,5	1,03	11,25
400	40	90,74	607	0,4	4	65	5,29	28	2,5	1,67	81,27
400	60	90,74	607	0,4	4	65	5,29	28	4,25	2,46	229,14
400	0	0	0	0,4	4	65	9,54	28	1,2	0,48	60,35
400	20	90,74	607	0,4	4	65	9,54	28	3	2,03	32,31
400	40	90,74	607	0,4	4	65	9,54	28	3,25	3,08	5,27
400	60	90,74	607	0,4	4	65	9,54	28	5	4,06	18,75

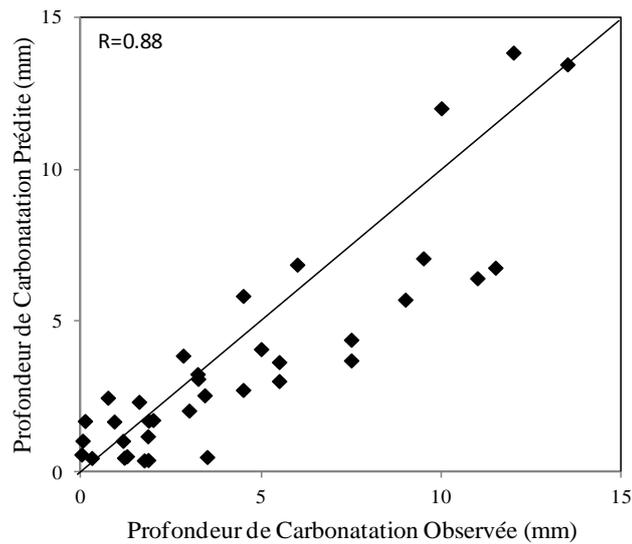


Figure 5.13 - Valeurs prédites par ML en fonction des valeurs observées

On peut dire que notre modèle peut être généralisé, puisque les sources de données utilisés dans la base de données des bétons au laitier sont complètement différentes de celles des matériaux utilisés dans nos essais (voir chapitre 3).

5.8 Conclusion

Il ressort de cette synthèse de résultats de travaux sur la carbonatation des bétons aux cendres volantes et au laitier de haut-fourneau, que ces deux additions minérales diminuent la résistance des bétons à la carbonatation surtout pour des taux de substitution et des rapports E/L élevés.

La substitution du ciment par 20 à 30% de cendres volantes et 20 à 40 % de laitier avec un faible rapport E/L (0.4) est bénéfique du point de vue de durabilité vis-vis de la résistance à la carbonatation.

Les profondeurs de carbonatation des bétons au laitier sont plus importantes que celles des bétons aux cendres volantes pour des rapports E/L faibles (0.4) et des taux de substitution élevés, et sont presque similaires pour des rapports E/L élevés (0.5 et 0.6) au jeune âge. La porosité élevée affecte plus la carbonatation que la pouzzolanicité des cendres volantes et des laitiers qui commence à partir de cet âge. Mais en diminuant la porosité, la quantité élevée du laitier (60%) tend à densifier la microstructure du béton par ces fines particules à cause de sa finesse plus élevée que celle des cendres volantes.

Tandis qu'à long terme, les profondeurs de carbonatation des bétons aux cendres volantes ayant des rapports E/L élevés (0.5 et 0.6) sont plus importantes que celles des bétons au laitier. La consommation pouzzolanique des CH par les cendres volantes est plus grande que celle du laitier, et la porosité élevée de la microstructure rend les produits pouzzolaniques insuffisants pour colmater les pores. Pour des rapports E/L faibles (0.4), l'inverse se produit parce qu'il y a colmatage des pores par les produits pouzzolaniques du laitier, tandis que la grande pouzzolanicité des cendres volantes tend à diminuer plus les CH et accélérer la cinétique de carbonatation. Les résultats obtenus ont montré l'effet de l'incorporation des ajouts cimentaires (cendres volantes et laitier) sur la profondeur de carbonatation qui sont en accord avec la littérature.

La validation expérimentale des modèles MCV et ML a donné de bons résultats prouvant ainsi la capacité de généralisation de ces deux modèles. Puisque la performance des réseaux de neurones se mesure par la manière dont ils savent prévoir des données inconnues.

Conclusions Générales et Recommandations

I. Conclusions Générales

L'objectif de ce projet de recherche était de développer des modèles de prédiction de la carbonatation des bétons aux ajouts cimentaires, pour estimer la durée de vie des ouvrages en béton avec ajouts cimentaire. C'est un projet de recherche entre le Laboratoire de Géomatériaux de l'Université de Chlef en Algérie et le Laboratoire des Matériaux Alternatifs de l'Université de Sherbrooke au Canada.

La carbonatation est l'un des phénomènes les plus agressifs qui attaque les ouvrages en béton armé causant leur dégradation avec le temps. Pour cet effet, une étude bibliographique a été menée pour comprendre le processus de carbonatation avec les différents paramètres qui influent sur ce phénomène qui s'avère très compliqué du point de vue du nombre important de facteurs impliqués sur son déroulement et de leur complexité. On a pu constater que la carbonatation elle-même ne présente aucun danger au béton, mais elle l'est pour des bétons armés, parce qu'elle s'amorce avec la dépassivation des armatures après la chute du pH qui est due à la diminution des hydrates CH dans la matrice cimentaire. Ce qui a conduit plusieurs chercheurs à se concentrer sur la période d'incubation qui précède la dépassivation de l'armature pour estimer la durée de vie des structures en béton armé.

Et vue l'utilisation progressive des ajouts cimentaires dans les bétons de construction, pour minimiser le coût de production et diminuer le taux de pollution à cause du dégagement du CO₂ par la production du ciment, notre étude s'est basée sur la carbonatation des bétons aux ajouts cimentaires.

Pour se faire, l'étude bibliographique nous a aidé à choisir la technique de prédiction pour notre travail de recherche. On a vu des modèles empiriques simples basés sur des résultats des essais de carbonatation mais qui n'ont pas pris en considération la majorité des paramètres influant la carbonatation, ce qui a limité leur performance. Des modèles semi-empiriques développés à partir des essais très délicats tels que la gammadensimétrie, la thermogravimétrie et l'analyse chimique. Ces modèles sont très compliqués et difficiles à appliquer à cause des paramètres stochastiques issus des réactions d'hydratation et de carbonatation pris en considération. Des modèles basés sur la technique de l'intelligence artificielle et plus précisément l'approche de réseaux de neurones artificiels, cette technique qui s'est montrée très efficace dans le domaine de modélisation des processus complexes et non linéaires depuis plusieurs années. Les approches basées sur l'utilisation des RNAs sont en effet bien adaptées aux problèmes qui s'y posent, grâce

à leur robustesse, leur capacité à traiter des données de différentes natures et surtout leur capacité d'adaptation, d'apprentissage et de généralisation.

Plusieurs chercheurs ont adopté cette technique pour prédire la carbonatation des bétons, mais la plupart d'entre eux ont utilisé leurs propres résultats pour élaborer leur modèle, et ont présenté des performances statistiques seulement.

L'originalité de notre travail réside dans l'utilisation de l'intelligence artificiel dans la prédiction de la profondeur de carbonatation des bétons avec ajouts cimentaires (cendres volantes et laitier de hauts fourneaux) en prenant en considération de nouveaux paramètres qui n'ont pas été inclus dans les recherches antérieures tels que la durée de cure, l'indice d'hydraulicité et la finesse du laitier, qui ont été issus de plusieurs recherches différentes, et la validation des modèles développés par des essais expérimentaux.

Pour cet effet, deux bases de données ont été collectées à partir de plusieurs recherches antérieures ; une base de 300 données pour élaborer le modèle des cendres volantes (MCV), et une autre base de 218 données pour les modèles du laitier (ML). Ces deux bases de données ont subi des analyses statistiques pour avoir une idée sur leurs plages de variations quantitatives et leurs distributions selon l'origine des matériaux, et une analyse en composantes principales pour éliminer la corrélation entre les différents paramètres pris en considération. Une normalisation des données a été nécessaire pour qu'elles soient adaptables avec les fonctions d'activation des réseaux de neurones.

Le choix des architectures et des paramètres d'apprentissages des deux modèles RNAs a été fait après plusieurs itérations. En appliquant l'apprentissage de rétropropagation, les deux modèles ont donné des performances élevées avec 98% de corrélation et une erreur quadratique moyenne de 0.0035 pour MCV et de 0.0015 pour ML. L'étude paramétrique appliquée sur les deux modèles pour évaluer l'effet de chaque paramètre pris en considération sur la profondeur de carbonatation a donné des résultats en bonne concordance avec la littérature.

La disponibilité de quelques modèles mathématiques traitant la carbonatation des bétons aux ajouts cimentaires et utilisant presque les mêmes paramètres que ceux utilisés dans le modèle MCV nous a permis de faire une comparaison de ce dernier avec deux modèles semi-empiriques. La validation a été faite par l'introduction des données d'autres recherches non inclus dans la base de données, les résultats obtenus ont indiqué la performance de notre modèle dans la plage de variation des paramètres pris en compte dans notre étude.

Une campagne expérimentale a été effectuée pour valider nos deux modèles élaborés. Les résultats obtenus ont approuvé la capacité de généralisation des deux modèles avec une performance qui dépasse 93% pour le MCV et 88% pour ML.

Enfin, une formule mathématique proposée dans cette étude, permet la prédiction de la durée de vie des bétons aux cendres volantes avec une précision satisfaisante dépassant les 92%.

Les résultats expérimentaux obtenus pour les deux types d'ajout ont été en accord avec la littérature. En augmentant le taux de substitution des cendres volantes ou du laitier, la profondeur de carbonatation augmente avec l'élévation du rapport E/L et avec l'âge.

Au jeune âge, les profondeurs de carbonatation des bétons au laitier sont plus importantes que celles des bétons aux cendres volantes pour des rapports E/L faibles (0.4) et des taux de substitution élevés, et sont presque similaires pour des rapports E/L élevés (0.5 et 0.6). La porosité élevée affecte plus la carbonatation que la pouzzolanité des cendres volantes et des laitiers qui débute à partir de cet âge. Par contre, lorsque la porosité diminue, la quantité élevée du laitier (60%) tend à densifier la microstructure du béton par des fines particules grâce à sa finesse plus élevée que celle des cendres volantes.

Tandis qu'à long terme, les profondeurs de carbonatation des bétons aux cendres volantes ayant des rapports E/L élevés (0.5 et 0.6) sont plus importantes que celles des bétons au laitier. Pour des rapports E/L faibles (0.4), l'inverse se produit parce qu'il y a colmatage des pores par les produits de la réaction pouzzolanique du laitier.

Un béton avec 50% de substitution de cendres volantes ou 60% de substitution de laitier et un faible rapport E/L (0.4) est plus résistant à la carbonatation qu'un béton ordinaire avec un rapport E/L élevé (au-delà de 0.5).

II Recommandations et perspectives

Dans le but d'avoir des résultats de prédiction plus fiables pour pouvoir estimer la durée de vie des ouvrages en béton avec ajouts cimentaires, et dans le soucis d'améliorer encore les performances des modèles élaborés, les points suivant sont recommandés pour des futurs travaux:

- Elargir les deux bases de données, pour mieux généraliser les modèles,
- Appliquer une autre technique de modélisation par la combinaison des réseaux de neurones avec la logique floue ou les algorithmes génétiques, pour augmenter la performance des modèles élaborés.

- Prendre en considération les conditions de prétraitement qui influent considérablement sur la cinétique de la carbonatation des bétons.
- Prendre en considération l'effet d'humidification-séchage qui rend la carbonatation instable avec le temps.
- Proposer une formule mathématique issue des résultats de réseaux de neurones pour estimer la durée de vie du béton au laitier.

Références Bibliographiques

- Alekseev S. and Rozental N.** (1976) *The rate of concrete carbonation*, RILEM International Symposium on the Carbonation of Concrete, Fulmer Grange, 5-6 April, Cement and Concrete Association.
- Alexandre J.**, (1976), *Vitesse de Carbonatation*, RILEM International Symposium on the Carbonation of Concrete, Fulmer Grange, 5-6 April Cement and Concrete Association.
- Andrade J.J.O., Dal Molin, D.C.**, (2003), *Considerations on the models employed in service life prediction of reinforced concrete structures: depassivation by chloride ions*, *Engenharia Civil*, 3;18:31–44.
- Angst U., Elsener B., Larsen C.K., Vennesland O.**, (2009), *Critical chloride content in reinforced concrete — A review*; *Cement and Concrete Research*, vol. 39, no.12, p. 1122-1138.
- Arliguie G., Grandet J.**, (1990), *Influence de la composition d'un ciment Portland sur son hydratation en présence de Zinc*, *Cement and Concrete Research*, 20, 517-524
- ASTM C 1157**, *Standard Performance Specification for Hydraulic Cement*.
- ASTM C 618**, *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*.
- Atis C. D.**, (2003), *Accelerated carbonation and testing of concrete made with fly ash*, *Construction and Building Materials*, 17, No. 3, 147–152.
- Auroy M.**, (2014), *Impact de la Carbonatation sur les Propriétés de Transport d'eau des Matériaux Cimentaires*, Thèse présentée et soutenue publiquement à l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
- Bakker R.**, (1988), *Initiation period. Corrosion of steel in concrete*, Chapman & Hall; 1988. p. 22–5.
- Balen K., Gemert D.**, (1994), *Modelling lime mortar carbonation*. *Mater Struct*;27(7):393–8.
- Baroghel-Bouny V.**, (2004), *Conception des bétons pour une durée de vie donnée des ouvrages – Maitrise de la durabilité vis-à-vis de la corrosion des armatures et de l'alcali-réaction – Etat de l'art et guide pour la mise en œuvre d'une approche performoantielle sur la base d'indicateurs de durabilité*. Association Française du Génie Civil.
- Belalia Douma O., Boukhatem B., Ghrici M., Tagnit-Hamou A.**, (2016), *Prediction of properties of self-compacting concrete containing fly ash using artificial neural network*, *Neural Comput & Applic*, DOI 10.1007/s00521-016-2368-7.
- Bier T.A.**, (1986), *Influence of the type of cement and curing on carbonation progress and pore structure of hydrated cement pastes*, *Materials Research Society Symposium Proceedings*, 85, 123 doi:10.1557/PROC-85-123.
- Billir T., Gencil O., Topçu I.B.**, (2016), *Prediction of restrained shrinkage crack widths of slag mortar composites by Taakagi and Sugeno ANFIS models*, *Neural Comput Appl*, 27:2523–2536.
- Bishop C.**,(1995), *Neural Networks for Pattern Recognition*, Oxford University Press.
- Borges P.H.R., Costa J.O., Milestone N.B., Lynsdale C.J., Streatfield R.E.**, (2010), *Carbonation of CH and C-S-H in composite cement pastes containing high amounts of BFS*. *Cement and Concrete Research*, 40(2) :284–292.
- Boukhatem B., Kenai S., Ghrici M., Tagnit Hamou A.**,(2010), *Prévision de l'efficacité des cendres volantes dans le béton par l'utilisation d'un réseau de neurones artificiel*, XXVIIIèmes Rencontres Universitaires de Génie Civil – La Bourboule du 2 au 4 juin 2010.
- Boukhatem B., Kenai S., Ghrici M., Tagnit Hamou A.**, (2011), *Prediction of Efficiency Factor of Ground-Granulated Blast-Furnace Slag of Concrete Using Artificial Neural Network*, *ACI Materials Journal*.

- Boukhatem B., Kenai S., Tagnit Hamou A., Ziou D., Ghrici M.,** (2012), *Optimizing a Concrete Mix Design Incorporating Natural Pozzolans using Artificial Neural Networks*, Computers and Concrete, Vol. 10, No. 6, 557-573.
- Bouikni A., Swamy R., Bali A.,** (2009), *Durability properties of concrete containing 50% and 65% slag*, Construction and Building Materials, 23, 2836–2845.
- Bouzoubaa N., Bilodeau A., Foo S.,** (2010), *Carbonation of fly ash concrete: laboratory and field data*. Can J Civ Eng 37(12):1535–1549
- Burden D.,** (2006), *The durability of concrete containing high levels of fly ash*. PhD thesis, University of New Brunswick.
- Carmona T.G., Helene P.R.L.,** (2006), *Models of prediction of the depassivation of reinforcement in concrete structures subjected to carbonation*, Technical bulletin PCC/425 of the Polytechnic School of the University of São Paulo, São Paulo, Brazil; [in Portuguese].
- CEB,** (1997), *New approach to durability design—an example for carbonation induced corrosion*, Rapport technique n. 238, Comité Euro-international du béton.
- Chen S., Sun W., Zhang Y., Guo F.,** (2008), *Carbonation depth prediction of fly ash concrete subjected to 2- and 3-dimensional CO₂ attack*, Front. Archit. Civ. Eng. China, 2(4): 395–400.
- Chatterji S.,** (2003), *Freezing of air-entrained cement-based materials and specific actions of air-entraining agents*, Cement and Concrete Composites, 25 (7), 759-765.
- Chaussadent T.,** (1999), *Etat des lieux et réflexion sur la carbonatation du béton armé*, Etudes et Recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.
- Coutinho J.S.,** (1998), *Improvement of the durability of concrete by treatment of the moulding*, PhD Thesis in Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Porto, Portugal; [in Portuguese].
- Czarnecki L., Woyciechowski P.,** (2015), *Modelling of concrete carbonation; is it a process unlimited in time and restricted in space?*, Bulletin of Polish Academy of Sciences, Technical Sciences, vol 63, N°1
- Dakhmouche C.F.Z.,** (2009), *Carbonatation des bétons adjuvantés à base de ressources locales algériennes*, Thèse en cotutelle pour l'obtention du grade de docteur de l'université d'Orléans et de l'Université Mentouri de Constantine.
- Daimon M., Akiba T., Kondo R.,** (1971), *Through pore size distribution and kinetics of the carbonation reaction of Portland cement mortars*, Journal of the American Ceramic Society 54(9): 423-8.
- Daming L., Ditao N., and Zhenping D.,** (2014), *Application of Neural Network for Concrete Carbonation Depth Prediction*, 4th International Conference on the Durability of Concrete Structures 24–26 July 2014, Purdue University, West Lafayette, IN, USA.
- Das B.B., Pandey S.P.,** (2011), *Influence of Fineness of Fly Ash on the Carbonation and Electrical Conductivity of Concrete*, J. Mater. Civ. Eng. (23) :1365-136.
- Deja,** (2003), *Freezing and de-icing salt resistance of blast furnace slag concretes*, Cement and Concrete Research, 25 (3), 2003, 357-361.
- Dhir R.K., Hewlett P.C., Chan Y.N.,** (1989), *Near surface characteristics of concrete prediction of carbonation resistance*, Magazine of Concrete Research 41, 122–128.
- Dreyfus G., Martinez J.M., Samuelides M., Mirta B.G., Badran F, Thiri S., Hérault L.,**(2002), *Réseau de neurones-Méthodologie et application*, Ed. Eyrolles, 386p.
- Drouet E.,** (2010), *Impact de la température sur la carbonatation des matériaux cimentaires – prise en compte des transferts hydriques*, Thèse de doctorat, école normale supérieure de Cachan, France.

- Duan P., Shui Z., Chen W., Shen C.**, (2013), *Enhancing microstructure and durability of concrete from ground granulated blast furnace slag and metakaolin as cement replacement materials*, Journal of Material Research and Technology, 2(1):52-59
- Dunster A.M.**, (1989), *An investigation of the carbonation of cement paste using trimethylsilylation*, Advances in Cement Research, 2 (7) : 99-106.
- Duval R.**, (1992), *La durabilité des armatures et du béton d'enrobage dans la durabilité des bétons*, Collection de l'ATHIL, Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 492 p
Duracrete, (2000), *Statistical Quantification of the Variables in the Limit State Functions- Probabilistic Performance based Durability Design of Concrete Structures*, The European Union-Brite Euram III TNO Building and Construction Research, Gouda.
- Elhassane J.**, (2010), *Évaluation fiabiliste de l'impact des facteurs climatiques sur la corrosion des poutres en béton armé Application au cas libanais*, Thèse de Doctorat, École Doctorale Sciences Pour L'ingénieur de Clermont Ferrand, Université Blaise Pascal –Clermont II.
- Esselami R., Boukhatem B. and Ghrichi M.**, (2013), *Prediction of Efficiency Factor of Natural Pozzolan by the Use of an Artificial Neural Network*, Civil and Environmental Research, Special Issue for International Congress on Materials & Structural Stability, Rabat, Morocco
- Fattuhi N.I.**, (1988), *Concrete carbonation as influenced by curing regime*, Cement and Concrete Research, 18(3):426-430.
- Gao Y., Cheng L., Gao Z., Guo S.**, (2013), *Effects of different mineral admixtures on carbonation resistance of lightweight aggregate concrete*, Construction and Building Materials 43, 506–510.
- Gruyaert E., Van den Heede P., De Belie N.**, (2013), *Carbonation of slag concrete: effect of the cement replacement level and curing on the carbonation coefficient – effect of carbonation on the pore structure*, Cement Concr. Compos. 35 (1) 39–48.
- Helene P.R.L.**, (1993), *Contribution to the study of corrosion of concrete reinforcement*. PhD Thesis in Engineering, Polytechnic School, University of São Paulo, São Paulo, Brazil.
- Ho D.W.S., Lewis R.K.**, (1987), *Carbonation of Concrete and its Prediction*, Cement Concrete Research, 17, No. 3, pp. 489 – 504.
- Ho D.W.S., Lewis R.K.**, (1983), *Carbonation of concrete incorporating fly ash or a chemical admixture*, Proceedings of the First International Conference on The Use of Fly Ash, Silica Fume, Slag and other Mineral By-Products in Concrete, Montebello, Canada: SP-79, pp. 333-346.
- Hobbs, D.**, (1988), *Alkali–Silica Reaction in Concrete*, London, Thomas Telford.
- Houst Y.F., Wittman F.H.**, (1989), *Retrait de carbonatation*, I.A.B.S.E symposium, Lisbonne, 255 – 260.
- Houst Y.F.**, (1992), *Diffusion de gaz, carbonatation et retrait de la pâte de ciment durcie*, Thèse N°1108 de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 1992.
- Hui X., Zhanqing C., Subei L., Wei H. Dan M.**, (2010), *Carbonation Test Study on Low Calcium Fly Ash Concrete*, Applied Mechanics and Materials Vols. 34-35 pp 327-331.
- Huiang C., Geng G., Lu Y., Bao G., Lin Z.**, (2012), *Carbonation depth research of concrete with low-volume fly ash*, Appl Mech Mater 155–156:984–988.
- Hunt C.M., Tomes L.A.**,(1962), *Reaction of blended Portland cement paste with carbon-dioxide*, Journal of Research of the National Bureau of Standards Physics and Chemistry, 66A, p. 473 – 481.
- Hyvert N.**, (2009), *Application de l'approche probabiliste à la durabilité des produits préfabriqués en béton*, Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse III, France.

- Jeyasehar C.A., Sumangala K.**, (2006), *Damage assessment of prestressed concrete beams using artificial neural network (ANN) approach*, Computers and Structures, vol. 84, no. 26- 27, pp. 1709–1718.
- Jiang L., Lin B., Caib Y.**, (2000), *A model for predicting carbonation of high-volume fly ash concrete*, Cem Concr Res.,30(5):699–702.
- Jiang L., Zhenqing L., Yiqun Y.**, (2004), *Durability of concrete incorporating large volumes of low-quality fly ash*, Cement and Concrete Research 34, 1467–1469.
- Kellouche Y., Boukhatem B., Ghrici M., Tagnit-Hamou A.**, (2017), *Exploring the major factors affecting fly-ash concrete carbonation using artificial neural network*, Neural Comput & Applic, DOI 10.1007/s00521-017-3052-2.
- Kewalramani M.A., Gupta R.**, (2006), *Concrete compressive strength prediction using ultrasonic pulse velocity through artificial neural networks*, Automation in Construction, vol. 15, no. 3, pp. 374–379.
- Khan M.I., Lynsdale C.J.**, (2002), *Strength, permeability, and carbonation of high-performance concrete*, Cement and Concrete Research, 32 (1), 123-131.
- Khunthongkeaw J., Tangtermsirikul S.**, (2005), *Model for simulating carbonation of fly ash concrete*, J Mater Civ Eng, 17(12):570–578.
- Khunthongkeaw J., Tangtermsirikula S., Leelawat T.** (2006), *A study on carbonation depth prediction for fly ash concrete*. Constr Build Mater, 20(9):744–53.
- Kishitani K.**, (1960), *Consideration on durability of reinforced concrete*, Transactions of the Architectural Institute of Japan, 65: 9–16.
- Klopfer H.**, (1978), *The carbonation of external concrete and the control of it*, Bautenschutz Bausanier. 1 (3) 86–97.
- Kokaba V.**, (2009), *Développement and Evaluation of Methods to follow Microstructural Development of Cementious Systems Including Slags*, Thèse de Doctorat N°4523.
- Kohonen T.**, (1982), *Self-organized formation of topologically correct feature maps*. Biological Cybernetics, 43:59-69.
- Kwon S.J., Song H.W.**, (2010), *Analysis of carbonation behavior in concrete using neural network algorithm and carbonation modeling*, Cement and Concrete Research, 40 p 119–127
- Lammertijn S., De Belie N.**, (2008), *Porosity, gas permeability, carbonation and their interaction in high-volume fly ash concrete*, Magazine of Concrete Research, 60, No. 7, 535–545.
- Lea F.M.**, (1970), *The Chemistry of Cement and Concrete* (2e edition), Edward Arnold.
- Liang M.T., Lin S.M.**, (2003), *Mathematical modeling and applications for concrete carbonation*, J Mar Sci Technol, 11(1):20–33.
- Litvan G.G., Meyer A.**, (1986), *Carbonation of granulated blast furnace slag cement concrete during twenty years of field exposure*, 2nd International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Madrid.
- Liu Y.**, (1996), *Modeling the time-to-corrosion cracking of the cover concrete in chloride contaminated reinforced concrete structures*, Thèse de doctorat de Virginia Polytechnic Institute, États-Unis, 1996.
- Loo Y.H., Chin M.S., Tam. C.T., Ong K.C.G.**, (1994), *A carbonation prediction model for accelerated carbonation testing of concrete*, Magazine of Concrete Research, 46 (168), 1994, 191-200.
- Lu C. and Liu R.**, (2009), *Predicting Carbonation Depth of Prestressed Concrete under Different Stress States Using Artificial Neural Network*, Hindawi Publishing Corporation Advances in Artificial Neural Systems Volume 193139, 8 pages doi:10.1155/2009/193139.

- Metha P.K., Monteiro P.J.M.**, (2006), *Concrete, microstructure, properties and materials*, New York: McGraw-Hill.
- Mindess S., Young J.F., Darwin D.**,(2002), *Concrete*. 2nd ed. New Jersey, USA: Prentice Hall.
- Miragliotta R.**, *Modélisation des processus physicochimiques de la carbonatation des bétons préfabriqués - Prise en compte des effets de parois*, Thèse de Doctorat, Université de La Rochelle, France.
- Moisson M.**, (2005), *Contribution à la maîtrise de la Réaction Alkali Silice par ajout de fines de granulats réactifs dans le béton*, Thèse de Doctorat de l'Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse.
- Monteiro I., Branco F.A., De Brito J., Neves R.**, (2012), *Statistical analysis of the carbonation coefficient in open air concrete structures*, *Constr Build Mater*, 29:263–9.
- Morandeu A.**, (2013), *Carbonatation atmosphérique des systèmes cimentaires à faible teneur en portlandite*, Thèse de Doctorat, Ecole Doctorale : Sciences, Ingénierie et Environnement, Université Paris-Est.
- Morandeu A., Thiéry M., Dangla P.**, (2014), *Investigation of the carbonation mechanism of CH and C-S-H in terms of kinetics, microstructure changes and moisture properties*. *Cement and Concrete Research*, 56 :153 – 170.
- Nagataki S., Malhotra V.M.**, (1986)., *Effect of Curing Conditions on the Carbonation of Concrete with Fly Ash and the Corrosion of Reinforcement in Long Term Tests*, Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolanas in Concrete, ACI – SP91, Vol. 1, American Concrete Institute, Detroit, pp. 521 – 540.
- Narui B., Guoli Y., Hui Z.**, (2009), *Prediction of Concrete carbonization Depth Based on DE-BP Neural Network*, Third International Symposium on Intelligent Information Technology Application.
- Neves R., Branco F.A., De Brito J.**, (2012), *A method for the use of accelerated carbonation tests in durability design*, *Constr Build Mater*, 36:585–91.
- Neville A.M.**, (1995) *Properties of Concrete*, Harlow, Longman.
- Neves R., Branco F.A., De Brito J.**, (2013), *Field assessment of the relationship between natural and accelerated concrete carbonation resistance*. *Cem Concr Compos*;41:9–15.
- Ngala V., Page C.**, *Effects of carbonation on pore structure and diffusional properties of hydrated cement pastes*. *Cement and Concrete Research*, 27, No. 7, 995–1007.
- Nigrin, A.**, (1993), *Neural Networks for Pattern Recognition*, Cambridge, MIT Press, 11p.
- Nischer P.**, (1984), *Effect of environment and concrete quality on carbonation* , *Betonwerk + Fertigteil-Technik*, n°11, pp. 752-757.
- NF EN 197-1**, (2001), *Ciment – Partie 1 : Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants*.
- NF EN 934-2**, (2002), *Adjuvants pour béton, mortier et coulis – Partie 2 : Adjuvants pour bétons – Définitions, exigences, conformité, marquage et étiquetage*.
- Ogha H., Nagataki S.**, (1989), *Prediction of carbonation depth of concrete with fly ash*, In: Third international conference on fly ash, silica fume, slag and natural pozzolans in concrete, vol. SP-114. Trodheim, Norway; p. 275–294.
- Ollivier J.P., Vichot A.**, (2008), *La durabilité des bétons*, Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 840 pages.**Oner A., Akyuz S.**, (2007). *An experimental study on optimum usage of GGBS for the compressive strength of concrete*, *Cement and Concrete Composites* 29, 505–514.

- Osborne G.J.**, (1986), Carbonation of blast-furnace slag cement concretes, *Durability of Building Materials*, 4 (1), 81-96.
- Osborne G.J.**, (1989), Carbonation and permeability of blast-furnace slag cement concretes from field structures, 3rd International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans on Concrete, Trondheim.
- Osborne G.J.**, (1999), Durability of Portland blast-furnace slag cement concrete, *Cement and Concrete Composites*, 21 (1), 11-21.
- Ounoughi K., Baroghel-Bouny V., Gawsewitch J., Chaussadent T., Croquette G.**, *Influence du rapport eau/ciment, du type de ciment et de la microstructure sur la carbonatation des bétons*, (éd.), Journées "Durabilité", Bordeaux - CETE du sud-ouest, 8 et 9 mars.
- Oxand**, (2002), *Solutions for durability*, fiche technique- corrosion des armatures carbonatation
- Pal S.C., Mukherjee A., Pathac S.R.**, (2003), *Investigation of hydraulic activity of ground branulated blast furnace slag in concrete*, *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, pp.1481-1486
- Papadakis V., Vayenas C., Fardis M.**, (1989), *A reaction engineering approach to the problem of concrete carbonation*, *AIChE J* ;35(10):1639–1650.
- Papadakis V., Vayenas C., Fardis M.**, (1991), *Physical and chemical characteristics affecting the durability of concrete*, *ACI Mater J* ;88(2):186–96.
- Papadakis V., Fardis M. and Vayenas C.**,(1992), *Hydration and carbonation of pozzalanic cements*, *American Concrete Institute Journal*, 89(2): 119–30.
- Papadakis V.**, (2000), *Effect of supplementary cementing materials on concrete resistance against carbonation and chloride ingress*. *Cement and Concrete Research*, 30(2) :291 – 299.
- Park G.K.**, (1995), *Durability and carbonation of concrete*, *Mag Korean Concr Inst* ;7:74–81.
- Parthiban T., Ravi R., Parthiban G. T., Srinivasan S., Ramakrishnan K. R., Raghavan M.**, (2005), *Neural network analysis for corrosion of steel in concrete*, *Corrosion Science*, vol. 47, no. 7, pp. 1625–1642.
- Parichatprecha R., Nimityongskul P.**, (2009), *Analysis of durability of high performance concrete using artificial neural networks*, *Construction and Building Materials*, 23; 910–917.
- Parrott L.J.**, (1987), *A review of carbonation in reinforced concrete* », *Cement and Concrete Association*, 41 pages.
- Parrott L.J.**, (1996), *Some effects of cement and curing upon carbonation and reinforcement corrosion in concrete*, *Mater. Struct.* 29 (3) 164–173.
- Pedro Faustino M., Carlos C., Ângela N.**, (2013), *Carbonation service life modelling of RC structures for concrete with Portland and blended cements*, *Cement & Concrete Composites* 37 171–184
- Peiming W., Yangfang Z., Yiki J.I., Zhongling S.**,(2001), *The carbonation property of large fluidity concrete with large dosage of fly ash and slag*, *Building Material Transaction*, , 4(4), pp.305-310.
- Peng J., Li Z., Ma B.**,(2002), *Neural network analysis of chloride diffusion in concrete*, *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 14, no. 4, pp. 327–333.
- Pihlajavaara S.E.**, (1968), *Some results of the effect of carbonation on the porosity and pore size distribution of cement paste*, *Materials and Structures*, 1(6) :521–526.
- Powers C.**, (1962), *A hypothesis on carbonation shrinkage*, *Journal of the Portland Cement Association Research & Development Laboratories*, vol. 4, no. 2, p. 40 – 50.

- Quan H.Z. and Kasami H.**, (2014), *Experimental Study on Durability Improvement of Fly Ash Concrete with Durability Improving Admixture*, Hindawi Publishing Corporation, The Scientific World Journal, Article ID 818103, 11 pages.
- Rafiq M.Y., Bugmann G., Easterbrook D. J.**, (2011), *Neural network design for engineering applications*, Computers and Structures, vol. 79, no. 17, pp. 1541–1552.
- Ranganathan, A.**, (2004), *The levenberg-marquardt algorithm' Tutorial on LM algorithm*, 1-5.
- Rebouh R., Boukhatem B., Ghrici M., Tagnit-Hamou A.**, (2017), *A practical hybrid NNGA system for predicting the compressive strength of concrete containing natural pozzolan using an evolutionary structure*, Construction and Building Materials 149 p 778–789
- Roberts, M.H.**, (1981), *Carbonation of Concrete Made with Dense Natural Aggregates*, Building Research Establishment Information Paper.
- Rozière E., Loukili A., Cussigh F.**, (2009), *A performance based approach for durability of concrete exposed to carbonation*, Construction and Building Materials, 23 190-199
- Rumelhart, D.E., McClelland J.L.**, (1986), *Parallel Distributed Processing*, Volume 1. The MIT Press. Foundations.
- Sadouki H.**, (1987), *L'effet de paroi : son influence sur les propriétés du béton superficiel*, Chronique des Matériaux de Construction, pp. 11-15.
- Sabet B., Jong, H.C.**, (2006), *Effect of preconditioning of concrete under accelerated test*, Proceedings of the 31st Conference on Our World.
- Saetta A.V., Schrefler B.A., Vitaliani R.V.**, (1993) *The carbonation of concrete and the mechanism of moisture, heat and carbon dioxide flow through porous materials*, Cement Concrete Res., vol. 23, no. 4, pp. 761-772,.
- Saetta A.V., Schrefler B.A., Vitaliani R.V.**, (1995), *2 D model for carbonation and moisture/heat flow in porous materials*, Cement and Concrete Research, 25(8) :1703 – 1712.
- Saetta A.V., Vitaliani R.V.**, (2004), *Experimental investigation and numerical modeling of carbonation process in reinforced concrete structures Part I : Theoretical formulation*, Cement and Concrete Research, 34(4) :571–579.
- Schubert P.**, (1987), *Carbonation behaviour of mortars and concrete made with fly ash*, ACI Special Publications SP-100; p. 1945–62.
- Shi H.S., Xu B.W., Zhou X.C.**, (2009), *Influence of mineral admixtures on compressive strength, gas permeability and carbonation of high performance concrete*, Construction and Building Materials 23, 1980–1985.
- Sickert G.**, (1997), *Extended modelling for the advance of carbonation in concrete*, Betonwerk und Fertigteil-Technik, 63 (12), 74-88.
- Sisomphon K., Franke L.**, (2007), *Carbonation rates of concretes containing high volume of pozzolanic materials*, Cem. Concr. Res. 37 (12) 1647–1653.
- Smolczyk H.**, (1968), *Discussions to M. Hamada's paper: Neutralization (carbonation) of concrete and corrosion of reinforcing steel*, In: 5th international symposium on cement chemistry, Tokyo, Japan; 1968. p. 369–83.
- Sotiris D., Maria P. Efstathiou b, Vagelis G. Papadakis**, (2014), *Computer-aided modeling of concrete service life*, Cement & Concrete Composites 47, 9–18.
- Sulapha P, Wong SF, Wee TH, Swaddiwudhipong S.**, (2003), *Carbonation of concrete containing mineral admixtures*. ASCE J Mater Civ Eng, 5(2):134–43.

- Swamy R.N.**, (1998), *Desing for Durability and Strength Through the Use of Fly Ash and Slag in Concrete*, CANMET/ACI International Workshop on Supplementary Cementing Materials. Superplastizers and Other Chemical Admixtures in Concrete, Toronto, Canada, American Concrete Institute, pp.1-72.
- Ta V. L., Bonnet S., Senga Kiese T., Ventura A.**, (2016), *A new meta-model to calculate carbonation front depth within concrete structures*, Construction and Building Materials, 129 172–181
- Taffese W.Z., Sistonen E., Puttonen J.**, (2015), *CaPrM: Carbonation prediction model for reinforced concrete using machine learning methods*, Construction and Building Materials, 100 70–82.
- Thiéry M., Dangla P., Villain G., Platret G.**, (2004), *Modélisation du processus de carbonatation des bétons*, 1^{er} Congrès International sur la Technologie et la Durabilité , Alger (Algérie), 1-10.
- Thiéry M.**, (2005), *Modélisation de la carbonatation atmosphérique des matériaux cimentaires, Prise en compte des effets cinétiques et des modifications microstructurales et hydriques*, Thèse de Doctorat, ENPC, Champs sur Marne.
- Thomas M.D.A., Osborne G.J., Matthews J.D., Cripwell J.B.**, (1990), *A comparison of the properties of OPC, PFA and GGBS concretes in reinforced concrete tank walls of slender section*, Magazine of Concrete Research, 44 (152), 127-134.
- Thomas, M.D.A., Matthews, J.D.** (1992), *Carbonation of Fly Ash Concrete*, Magazine of Concrete Research, Vol. 44, No. 160, 1992, pp. 217-228
- Tsukayama R., Abe H., Nagataki S.**, (1980), *Long-term experiments on the neutralization of concrete mixed with fly ash and the corrosion of reinforcement*, 7^e Congrès international de la chimie des ciments, Paris, 3,4, 30-35
- Tuutti K.**, (1982), *Corrosion of steel in concrete*, Stockholm, Sweden, Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm.
- Uchida, S. and Hamada, M.**, (1928), *Durability tests of steel and concrete*, Journal of Architecture and Building Science 516: 1–18.
- Van P., De Belie N.**,(2014), *Service life based global warming potential for high-volume fly ash concrete exposed to carbonation*, Construction and Building Materials, 55;183–193.
- Verbeck G.J.**, (1958), *Carbonation of hydrated Portland Cement.*, ASTM Special Publication, 205 17–36.
- Venaut M., Alexandre J.**, (1968a), *De la carbonatation du béton*, Publication du CERILH, n°638, pp. 421-427.
- Villain G., Thiéry M.**, (2005), *Impact of carbonation on microstructure and transport properties of concrete*, Conference on Durability of Building Materials and Components, pages 1–8, Lyon.
- Wolf J., Dal Molin D.C.C.**, (1989), *Carbonation of mortars and concrete: Intervening factors*, Symposium on Pathology of Buildings: Prevention and Recovery, Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brazil, p. 118–33.
- Wang W., Lu C., Li Y., Yuan G., Li Q.**, (2017), *Effects of stress and high temperature on the carbonation resistance of fly ash concrete*, Construction and Building Materials, 138 486–495.
- Yan L., Zhao S., Yi C.**, (2008), *The Forecast of Carbonation Depth of Concrete Based on RBF Neural Network*, Intelligent Information Technology Application, IITA '08. Second International Symposium on (Volume:3), 544 - 548
- Yang B.D.S., Park S.K. Lee, J.H.**, (2003), *A Prediction on Mix Proportion Factor and Strength of Concrete Using Neural Network*, KSCE Journal of Civil Engineering, Vol. 7, N° 5,

- Yazigi R.**, (2008), *Evaluation of carbonation in reinforced concrete viaducts*, Master's Dissertation in Aeronautical Infrastructure Engineering, Aeronautical Technology institute, São Paulo, Brazil. pp.525-536.
- Yoon I.S., Oguzhan C., Park K.B.**, (2007), Effect of global climatic change on carbonation progress of concrete, *Atmospheric Environment* 41 7274–7285
- Younsi A.**, (2011), *Carbonatation de bétons à forts taux de substitution du ciment par des additions minérales*, Thèse de Doctorat, Université de La Rochelle.
- Younsi A., Turcry P., Roziere E., Aït-Mokhtar A., Loukili A.**, (2011), *Performance-based design and carbonation of concrete with high fly ash content*, *Cement & Concrete Composites* 33 993–1000
- Younsi A., Turcry Ph., Aït-Mokhtar A., Staquet S.**, (2013), *Accelerated carbonation of concrete with high content of mineral additions: Effect of interactions between hydration and drying*, *Cement and Concrete Research* 43, 25–33.
- Zhang X., Zhou X., Zhou H., Gao K., Wang Z.**, (2013), *Studies on forecasting of carbonation depth of slag high performance concrete considering gas permeability*, *Applied Clay Science* 79, 36–40.
- Zhang P., Li Q.**, (2013), *Effect of Fly Ash on Durability of High Performance Concrete Composites*, *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology* 6(1): 7-12.

Annexe 1

Modèles de prédiction de la carbonatation dans la littérature

Auteurs	Profondeur de carbonatation (X_c)	Paramètres pris en considération dans la formule
Uchida and Hamada (1928)	$x = k\sqrt{t}$ ou encore $x = \frac{w_0 - 0.3}{\sqrt{0.3(1 + 3w_0)}}\sqrt{t}$	k facteur dépendant de plusieurs paramètres (la diffusivité, réserve en alcalinité, concentration du dioxyde de carbone, et les conditions d'exposition) w_0 est le rapport E/C
Kishitani (1960)	Pour E/C < 0.6 : $x = \frac{4.6w - 1.76}{7.2} \sqrt{t}$ Pour E/C > 0.6 : $x = \frac{w - 0.25}{\sqrt{0.3(1.15 + 3w)}} \sqrt{t}$	W : Le rapport ,
Smolczyk (1969)	$x = a\left(\frac{w}{\sqrt{N_T}} - b\right)\sqrt{t}$	a et b sont des coefficients ; N_T la résistance à la compression à T jours.
Daimon et al., (1971)	$x = 0 \text{ pour } 0 \leq t < t_i$ $x = A(t - t_i)^\lambda \text{ pour } t \geq t_i$ Ou bien $X_c = \sqrt{k_e(t - t_i)}$ Où $k_e = \frac{k_t}{f}$ $k_t = \frac{2D_0\varepsilon\Delta PT^{0.75}}{273^{1.75}RC_0\rho}$	t_i temps d'incubation ; t période d'exposition ; k_e constante expérimentale de la vitesse de carbonatation ; k_t constante théorique de la vitesse de carbonatation ; f la tortuosité ; D_0 le coefficient de diffusion à 0°C ; ε la porosité de l'échantillon ; ΔP la pression différentielle à travers la couche carbonatée ; T la température ; R constante du gaz ; C_0 quantité réagit par unité de poids de l'échantillon et ρ densité du matériau.
Weirig (1972)	$x = \left(\frac{582w}{\sqrt{SO_{sf}}} + 1.12w - 1.47\right)\sqrt{t}$	S est la perte de masse et O_{sf} est la surface spécifique.
Alexandre (1976)	$x = \sqrt{2k_1}\sqrt{t}$	k_1 coefficient du matériau
Alekseev and Rozental (1976)	$x = A^n\sqrt{t}$	A est un coefficient, $n=1.92$ pour E/C=0.6 et $n=2.54$ pour E/C=0.7
Parott (1978)	$x = 125\exp^{-0.05f_{c28}}$	f_{c28} : résistance à la compression à 28 jours.
Tsukayama et al. (1980)	$x = (1.187w - 0.493)\sqrt{t}$	W le rapport E/C
Parott (1987)	$x = At^\lambda$	A se rapporte à des données de type « matériaux » (E/C, dosage en ciment, résistance mécanique, etc...) λ est généralement pris égale à 0.5

<p>Papadakis et al. (1989)</p>	$X_c = \sqrt{\frac{2 D_{CO_2} [CO_2]}{[CH] + [CSH]}} \sqrt{t}$ $D_e = (1.64 \times 10^{-6}) \varepsilon_p^{1.8} \left[1 - \left(\frac{RH}{100} \right) \right]^{2.2}$	<p>RH \geq 50% ; [CO₂] est la concentration molaire du dioxyde de carbone (mol/m³), [Ca(OH)₂] est la concentration molaire d'hydroxyde de calcium (mol/m³), [CSH] est la concentration molaire d'hydrate de silicate de calcium (mol/m³), D_{e,CO₂} la diffusivité effective du dioxyde de carbone (m²/s) et ε_p est la porosité de la pate.</p>
<p>Papadakis et al. (1991)</p>	$X_c = \sqrt{\frac{2 D_{CO_2} [CO_2]}{[CH] + [CSH]}} \sqrt{t}$ $\sqrt{D_e} = (1.2 \pm 1) 10^{-3} \varepsilon_p \left[1 - \left(\frac{RH}{100} \right) \right]$ <p>(ce modèle n'est pas adapté pour RH < 50%)</p>	<p>CO₂=50%</p> <p>35 % \leq RH \leq 85%</p> <p>Ils ont proposé un modèle numérique pour des RH \geq 50%</p>
<p>Papadakis et al. (1992)</p>	$X_c = \sqrt{\frac{2 D_{CO_2} [CO_2]}{[CH] + 3[CSH]}} \sqrt{t}$ <p>Ou bien,</p> $X_c \approx 350 \left(\frac{\rho_c}{\rho_w} \right) \frac{\left(\frac{W}{C} \right) - 0.3}{1 + \left(\frac{\rho_c}{\rho_w} \right) \left(\frac{W}{C} \right)} \left(1 - \frac{RH}{100} \right) \left\{ \left[1 + \left(\frac{\rho_c}{\rho_w} \right) \left(\frac{W}{C} \right) - \frac{RH}{100} \right] \left[1 + \left(\frac{\rho_c}{\rho_a} \right) \left(\frac{a}{C} \right) \right] y_{CO_2} t \right\}^{1/2}$ <p>E/C \leq 0.6 : $X_c \approx 1650 \left(\frac{W}{C} - 0.38 \right) \left(1 - \frac{RH}{100} \right) (y_{CO_2} t)^{1/2}$</p> <p>E/C > 0.6 : $X_c \approx 1650 \left(\frac{\left(\frac{W}{C} \right) - 0.25}{\left[1 + 2.6 \left(\frac{W}{C} \right) \right]^{1/2}} \right) \left(1 - \frac{RH}{100} \right) (y_{CO_2} t)^{1/2}$</p> $y_{CO_2} = \frac{23.8}{44} 10^{-6} C_{CO_2}$ $D_e = (1.64 \times 10^{-6}) \varepsilon_p^{1.8} \left[1 - \left(\frac{RH}{100} \right) \right]^{2.2}$ $\varepsilon_p = \varepsilon \frac{1 + \left(\frac{W}{C} \right) \left(\frac{\rho_c}{\rho_w} \right) + \left(\frac{a}{C} \right) \left(\frac{\rho_c}{\rho_a} \right)}{1 + \left(\frac{W}{C} \right) \left(\frac{\rho_c}{\rho_w} \right)}$ <p>$\varepsilon = \varepsilon_0 - \Delta\varepsilon_H - \Delta\varepsilon_P - \Delta\varepsilon_C$</p> <p>Ciment portland : $\Delta\varepsilon_P = 0$</p> <p>Béton non carbonaté : $\Delta\varepsilon_C = 0$</p>	<p>y_{CO_2} la quantité ambiante d'hydroxyde de carbone par volume, ρ_c la densité massique du ciment (kg/m³), ρ_w la densité massique de l'eau (kg/m³), ρ_a la densité massique d'agrégats (kg/m³), w/c le rapport eau/ciment, a/c le rapport agrégats/ciment, ε_p la porosité de la pate du ciment et RH l'humidité relative (%). Seulement pour RH \geq 50%</p> <p>CO₂=50%, Pour une hydratation complète.</p> <p>Ce modèle n'a pas donné de résultats satisfaisant pour des RH max en l'appliquant sur plusieurs résultats expérimentaux.</p> <p>http://www.freet.cz/rclifetime.html</p>
<p>Duval (1992)</p>	$x = \sqrt{365t} \left(\frac{1}{2.1 \sqrt{f_{c28}}} - 0.06 \right)$	<p>F_{c28} la résistance à la compression à 28 jours.</p>

<p>Papadakis et al. (1992)</p>	$X_c = \left[\frac{2D_{e,co2}^{(2)}[CO_2]^0}{[CH]^{(2)} + 3[CSH]^{(2)}}(t - t_d) + \left(d \frac{D_{e,co2}^{(2)}}{D_{e,co2}^{(1)}} + x_{c,a} \right)^2 - d \frac{D_{e,co2}^{(2)}}{D_{e,co2}^{(1)}} \right]^{1/2}$	<p>modèle mathématique de carbonatation d'un béton couvert d'une couche de mortier à la chaux pour prévenir la carbonatation</p> <p>d : l'épaisseur du revêtement en mortier.</p> <p>$D_{e,co2}^{(1)}, D_{e,co2}^{(2)}$: la diffusion du CO₂ à travers le revêtement en mortier et le béton respectivement.</p> <p>$[CO_2]^0$: la concentration molaire du CO₂ qui est supposé constante dans l'espace et dans le temps</p> <p>$x_{c,a}$: profondeur de carbonatation avant la mise en place du revêtement en mortier de la chaux pour un temps t_a.</p>
<p>Umoto and Takada (1993)</p>	$Xc = (2.084 - 0.8471 \log C_{CO_2}) \times e^{8.748 - \frac{2563}{T}} \times [2.39 \left(\frac{w}{c}\right)^2 + 0.446 \frac{w}{c} - 0.398] \times \sqrt{C_{CO_2} \times t}$	<p>C_{CO_2} –concentration du CO₂, %; T – température ambiante, K; t – durée d'exposition ans, w/c – rapport E/C.</p>
<p>Kropp (1995)</p>	$X = k\sqrt{t} - x_0 \quad \text{si } t \geq \left(\frac{x_0}{k}\right)^2$ $X=0 \quad \text{si } t < \left(\frac{x_0}{k}\right)^2$	
<p>Jiang (1996)</p>	$X = 839(1 - RH)^{1.1} \sqrt{\frac{W/r_c C - 0.34}{r_{HD} r_c C}} C_0 \sqrt{t}$	<p>RH l'humidité relative (%); W la quantité d'eau (kg/m³); C quantité du ciment (kg/m³); C₀ concentration en CO₂ (%); r_c le coefficient du type de ciment; r_{HD} coefficient du degré d'hydratation et t le temps d'exposition (jours).</p>
<p>CEB (1997)</p>	$X = \sqrt{\frac{2 \times \Delta C}{R_{C65}}} \sqrt{k_0 k_1 k_2} \left(\frac{t_0}{t}\right)^n$ $R_{C65} = \frac{2 \times C_{accl} t_1}{X_1^2} = \frac{2 \times C_{accl}}{k^2}$	<p>t_1 est le temps (ans); C_{accl} la concentration du CO₂ (90.10³kg/m³); $\Delta C=0.7.10^{-3}$kg/m³ (la différence de concentration du CO₂ entre l'extérieur et le front de carbonatation); $k_0=3$ valeur constante prenant en considération les conditions et méthodes des essais; k_1 est une constante représentant la présence d'humidité relative; k_2 constante prenant en compte l'effet de la cure (1 pour une cure normalisée, 0.25 pour une période de cure de 3 jours), t_0 est la période de référence= 1 an et n est un paramètre prenant en compte l'influence du temps de mouillage/séchage.</p>

<p>Niu and Dong (1999)</p>	$X(t) = k_{CO_2} \cdot k_c \left[\frac{57.94}{f_{cub}} - 0.761 \right] \sqrt{t}$ $k_{CO_2} = \sqrt{\frac{C_0}{0.03}};$ $k_c = \frac{\sqrt[4]{T}(100 - RH) \cdot RH}{A}$	<p>F_{cub} la résistance à la compression cubique (MPa) ; t est le temps limite de carbonatation ; k_{CO_2} le coefficient d'influence de la concentration du CO_2 ; k_c le coefficient d'influence de l'humidité et de la température ambiante et A la valeur d'influence de l'environnement local.</p>
<p>Papadakis et al. (2000)</p>	$X_c = \sqrt{\frac{2D_{CO_2} \left(\frac{CO_2}{100} \right) t}{0.33CH + 0.214CSH}}$ $D_e = 1.64 \times 10^{-6} \left(\frac{\frac{\varepsilon_c}{\rho_c + \frac{p}{\rho_p} + \frac{w}{\rho_w}}}{- \frac{RH}{100}} \right)^{1.8} \quad (1)$ <p>Valable pour $0.5 < E/C < 0.8$</p>	<p>E/C, P/C, A/C (variables)</p> <p>RH=61%</p>
<p>Jiang (2000)</p>	$X = 839(1 - RH)^{1.1} \sqrt{\frac{W/B^* - 0.34}{\alpha k' C}} C_0^n \sqrt{t}$ $\frac{W}{B^*} = \frac{W}{W + F'}$ $k' = 1 - \beta k$	<p>$\frac{W}{B^*}$ le rapport E/L effectif ; α le degré d'hydratation du ciment ; n paramètre en fonction du système poreux du béton (entre 2 et 2.1) ; k' coefficient en fonction de la réactivité de carbonatation ; β degré d'hydratation des cendres volantes et k l'indice d'activité des cendres volantes.</p>
<p>Duracrete et al. (2000)</p>	$X_c = \sqrt{\frac{2k_e k_c k_t C_0}{R_{carb}}} \sqrt{t}$ $R_{carb} = \frac{a}{D_{eff}}$ <p>a : la capacité de liaison du béton avec CO_2.</p>	<p>L'importance de ce modèle est qu'il prend en considération la plupart des paramètres participant à la carbonatation.</p>
<p>Papadakis et al. (2002)</p>	$x = \sqrt{\frac{2D_{CO_2} (CO_2/100)}{0.18(C + kP)}}$ $D_{CO_2} = 6.1 \times 10^{-6} \left(\frac{(W - 0.267(C + kP))/1000}{\frac{C + kP}{\rho_c} + \frac{W}{\rho_w}} \right)$ $\times \left(\frac{1 - RH}{100} \right)^{2.2}$ <p>K=0.5 pour FL (low calcium FA) K=0.7 pour FH (high calcium FA)</p>	<p>D_{CO_2} coefficient de diffusion du CO_2 (m^2/s); CO_2 la quantité du CO_2 à l'air ambiant (%); k le coefficient d'efficacité de l'ajout cimentaire et RH l'humidité relative.</p>
<p>Zhang et al. (2003)</p>	$X_c = 1.017 \times 10^4 (0.7 - RH)^{1.82} \sqrt{\frac{W/C - 0.31}{C}}$	<p>RH : humidité relative ;</p> <p>W/C : rapport eau/ciment ;</p> <p>C : quantité du ciment</p>

Sulapha et al (2003)	$X = (-0.0831S + 7.5127)\sqrt{t}$	S: résistance à la compression (MPa) ; t le temps d'exposition (semaine).
Atis (2003)	$X_C = -0.18f_{cm} + 16.18$	Xc est la profondeur de carbonatation accélérée (mm) ; f_{cm} résistance à la compression (MPa).
Atis (2004)	$X_C = 5.32 - 0.112S + 0.822P$	Xc est la profondeur de carbonatation accélérée (mm) ; S la porosité (%) et P la résistance à la compression (MPa).
Thiery (2005)	$X_C = \sqrt{\frac{2 D_{CO_2} [CO_2]}{n_{Ca(OH)}}} \sqrt{t}$ $D_{CO_2}(\phi, S_l) = \phi(1 - S_l)\tau D_{air,co_2}$ <p>Il y a une sur- estimation des anciens modèles de Papadakis.</p>	[CO ₂] la concentration molaire du CO ₂ dans la phase gazeuse en contact avec le béton (Mol/m ³) ; Ø la porosité ; S _l le degré de saturation de l'eau et τ un paramètre du modèle de tortuosité.
Khunthongkea w and Tangtermisirik ul (2005)	$D_{Co} = \frac{15 \times 10^{-7} d(t)n^2(t)\eta \left[1 - \frac{C_w(x,t)}{100}\right]}{RH(x,t)}$ $D_{Ci} = \frac{6 \times 10^{-7} d(t)n^2(t)\eta \left[1 - \frac{C_w(x,t)}{100}\right]}{RH(x,t)}$	D_{Co} et D_{Ci} les coefficients de diffusion de la surface exposée et de l'élément intérieur du béton respectivement ; n la porosité totale (%) ; d la taille moyenne des ports (nm) ; η l'effet des constituants d'agrégats ; RH l'humidité relative dans les ports de béton (%) et C_w la quantité d'eau relative (%).
Khunthongkea w et al. (2006)	<p>Avec;</p> $D_{n,t} = A \cdot D_a \cdot \sqrt{t}$ $A = 0.22 \cdot \frac{C^{0.56}}{RH}$	$D_{n,t}$ la profondeur de carbonatation naturelle (mm); D_a profondeur de carbonatation accélérée (mm) ; t le temps d'exposition (mois) ; A la pente de la relation entre $D_{n,t}$ et D_a ; C la concentration du CO ₂ (ppm) et RH l'humidité relative environnementale.
Rovnanik et al. (2006)	$X_C = \psi 4147 \sqrt{\frac{2C_{CO_2} D_{CO_2} t}{0.218(C + kP)}}$ $D_{CO_2} = 6.1 \times 10^{-6} \left[\frac{((W - 0.267)(C + kP))/1000}{\frac{C + kP}{\rho_c} + \frac{W}{1000}} \right]$ $\times \left(1 - \frac{RH}{100}\right)^{2.2}$ <p>Ψ ; facteur d'incertitude du modèle. K : facteur d'efficacité de l'ajout cimentaire vis-à-vis la résistance à la carbonatation.</p>	9 paramètres d'entrée sont traitées comme variables aléatoires dans ce modèle : C _{CO₂} , C, k, W, p, ρ _c , RH, Cc(l'enrobage du béton) et Ψ. (http://www.freet.cz/rclifetime.htm)
CEB-FIP (2006)	$g(a, X_C(t)) = a - X_C(t)$ $= a - \sqrt{2 \cdot k_e \cdot k_c \cdot R_{NAC, O}^{-1} \cdot C_s \sqrt{t} \cdot W(t)}$	$g(a, X_C(t))$ une fonction de base d'état limite ; a l'enrobage des armatures (mm) ; Xc (t) la profondeur de carbonatation ; ke fonction environnementale qui prend en compte l'humidité relative réelle ; kc un paramètre de transfert d'exécution qui en relation avec

	$k_e = \left(\frac{1 - \left(\frac{RH_{real}}{100}\right)^{f_e}}{1 - \left(\frac{RH_{ref}}{100}\right)^{f_e}} \right)^{g_e}$ $k_c = \left(\frac{t_c}{7}\right)^{b_c}$	la cure du béton ; $R_{NAC,O}^{-1}$ l'inverse de la résistance de carbonatation effective sous des conditions de carbonatations naturelles ((mm ² /ans)/(kg/m ³)) ; Cs La concentration de CO ₂ atmosphérique croissante avec le temps et prévue sans émissions supplémentaires attribuées au trafic motorisé ; fe et ge deux paramètres constantes indépendantes des conditions d'exposition ; bc l'exponentiel de régression ; tc la période de cure (jours).
Burden (2006)	$X = \left[\left(13.8 \times \frac{W}{CM} \right) \left(1 + \frac{FA}{45} \right) (cure)^{0.25} - 2 \right] \sqrt{t}$	W/CM : rapport eau/liant ; FA : % des cendres volantes ; Cure : durée de cure (jours) ; t : temps d'exposition (jours)
Yoon et al. (2007)	$X_c = \sqrt{\frac{2D_{CO_2}}{a} C_{CO_2} \times t \left(\frac{t_0}{t}\right)^{n_m}}$ $D_e = D_1 \times t^{-m}$	a : la quantité nécessaire en CO ₂ pour une carbonatation complète. n _m : facteur d'âge en conditions microclimatiques associées aux cycles mouillage-séchage, m : facteur d'âge dépendant du rapport E/C. D ₁ : coefficient de diffusion après un an. RH (variable)
CEB (2007)	$X_c = \sqrt{\frac{2C_0 D_{CO_2} t}{a}}$ $D_{CO_2} = \frac{aC^2}{2C_0 t}$	Le modèle le plus simple. Prend seulement la concentration C ₀ du CO ₂ à la surface du béton en compte.
Sabet et al. (2008)	$X_c = e^{\left(8.6 - \frac{2563}{T}\right)} \times \sqrt{\frac{2D_{CO_2}[CO_2]}{k \times ([CH] + 3[CSH])} t}$	T est la température environnementale absolue (k)
Hyvert (2010)	$x = \sqrt{\frac{2 \cdot D_{CO_2} \cdot P_{CO_2}}{Q \cdot R \cdot T}} \times \sqrt{t}$	D _{CO2} coefficient de diffusion du CO ₂ à la zone carbonatée (m ² /s) ; P _{CO2} la pression du CO ₂ à la surface du béton (Pa) ; Q quantité du calcium carbonatatable (mol/m ³ du matériau) ; R constante des gaz parfaits (J/mol/K) et T la température ambiante (K). L'humidité relative étant constante (RH=65%)

Ruixia (2010)	$X_c = 0.04 \sqrt{\frac{81.78RH^{-0.3886}T^{0.435}(W/b - 0.309)V_{CO_2}}{0.31W_{ce}(1 - 4.48FA\%SiO_2\%)}} \sqrt{t}$	<p>W_{ce} est la masse du ciment dans une unité de volume de béton ; FA% pourcentage des CV dans une unité de volume de béton ; $SiO_2\%$ pourcentage des SiO_2 dans une unité de volume de béton.</p>
Huang (2012)	<p>Ou</p> $x = \sqrt{\frac{2D(C_s - C_{cf})}{a}} \sqrt{t}$ $x = \sqrt{4D} \operatorname{erfc}^{-1}\left(\frac{C}{C_s}\right) \sqrt{t}$	<p>D le coefficient de diffusion du CO_2 (m^2/s) ; C_s la concentration du CO_2 à la surface du béton (g/m^3) ; C_{cf} la concentration du CO_2 au front de carbonatation (g/m^3) ; C est la concentration du CO_2 à une profondeur x à l'instant t ; a est la quantité de CO_2 nécessaire pour la carbonatation d'espèces alcalins dans $1m^3$ de béton (g/m^3) et erfc est une fonction d'erreur complémentaire.</p>
Monteiro et al. (2012)	$X = \sqrt{\left(\frac{2 \times C \times t}{R_{C65}}\right) \left[\sqrt{k_0 \times k_1 \times k_2} \left(\frac{1}{t}\right)^n\right]}$ <p>$R_{C65} = 0.0016f_m^{3.106}$ pour CEM I;CEM II/A</p> <p>$R_{C65} = 0.0018f_m^{2.862}$ pour EM II/B; CEMIII; CEMIV;CEMV</p>	<p>C la concentration du CO_2 (kg/m^3) ; t période d'exposition (ans) ; R_{C65} coefficient de résistance à la carbonatation ($kg \text{ an}/m^5$) ; k_0 facteur égal à 3 quand les conditions sont selon LNEC E-391; k_1 facteur dépendant au niveau d'exposition (tableau 2) k_2 facteur égal à 1 pour une cure standard et à 0.25 pour 3 jours de cure ; n un facteur prenant en compte l'effet de mouillage séchage à temps ouvert et f_m la résistance à la compression moyenne (MPa).</p>
Silva et al. (2014)	<p>$x = k_d \sqrt{t}$ pour $RH \leq 70\%$</p> <p>Avec :</p> $k_d = 0.556c - 3.602X - 0.148f_c + 18.734$ <p>$x = k_w \sqrt{t}$ pour $RH > 70\%$</p> <p>Avec :</p> $k_w = 3.355c - 0.019C - 0.042f_c + 10.83$	<p>k_d est les coefficient de carbonatation pour $RH \leq 70\%$ ($mm/an^{0.5}$) ; c est la concentration en CO_2 (%) ; X la classe d'exposition du ciment ; f_c la résistance à la compression à 28jours (MPa) ; k_w est les coefficient de carbonatation pour $RH > 70\%$ ($mm/an^{0.5}$) et C la quantité de clinker (kg/m^3).</p>
Sotiris et al. (2014)	$X_c = \sqrt{\frac{2D_{e,co_2}(CO_2/100)t}{0.33CH + 0.214CSH}}$ $D_{e,co_2} = 6.1 \times 10^{-6} \left(\frac{\varepsilon_c - \varepsilon_{air}}{1 - \frac{A}{dA} - \varepsilon_{air}} \right)^3 - \frac{RH}{100}^{2.2} \quad (1)$	<p>CO_2 la quantité de CO_2 dans l'air (%); D_{e,co_2} diffusivité effective du CO_2 dans le béton carbonate (m^2/s); CH et CSH quantité des CH et CSH dans le béton (kg/m^3) ; ε_c la porosité du béton carbonaté ; ε_{air} la fraction du volume d'air entraîné ou entrappé dans le béton ; A quantité d'agréats dans le volume du béton (kg/m^3) ; dA densité des agrégats (kg/m^3).</p>

<p>Taffese et al. (2015)</p>	$X_c = \sqrt{2 \cdot k_e \cdot k_c \cdot R_{NAC,0}^{-1} \cdot C_s \cdot W(t) \cdot \sqrt{t}}$	<p>K_e: fonction environnementale; k_c: fonction de transfert d'exécution, C_s concentration en CO_2 (kg/m^3); $W(t)$ est la fonction du climat; $R_{NAC,0}^{-1}$; l'inverse de la résistance à la carbonatation effective du béton ($mm^2/an)/(kg/m^3)$] déterminée à un certain temps t_0 en utilisant l'essai de carbonatation naturelle NAC</p>
<p>Lee and Wang (2016)</p>	$X_c = \sqrt{\frac{2D_c[CO_2]_0 t}{[CH] + 1.76[CSH]_c + 1.14[CSH]_{SG}}}$ $D_c = A \left(\frac{\varepsilon_c}{\rho_c} + \frac{P}{\rho_{FA}} + \frac{W_0}{\rho_w} \right)^a \left(1 - \frac{RH}{100} \right)^{2.2}$ $\varepsilon_c = \frac{W_0}{\rho_w} - W_{cbm} - \Delta\varepsilon_c$	<p>Prédiction de la profondeur de carbonatation des bétons aux laitiers. En plus des paramètres étudiés dans le modèle de Papadakis, ce modèle a pris en compte la durée de cure (3 et 28 jours)</p>

Annexe 2

Bases de données et résultats des deux Modèles RNAs

Base de données et résultats du modèle MCV (base FF)

Auteur, Année	Liant	CV (%)	E/L	CO ₂ (%)	RH (%)	\sqrt{t}	X(Exp) (mm)	X(ANN) (mm)
Younsi et al. (2011)	301	0	0,6	50	65	2,65	11	7,67
	301	0	0,6	50	65	3,74	12	9,48
	301	0	0,6	50	65	4,58	13	10,97
	301	0	0,6	50	65	6,48	16	14,43
	341	0	0,53	50	65	2,65	14	14,63
	341	30	0,53	50	65	3,74	16,5	15,22
	341	30	0,53	50	65	4,58	20	17,78
	341	30	0,53	50	65	5,29	24	19,99
	341	30	0,53	50	65	6,48	26,5	23,68
	380	30	0,41	50	65	2,65	15	14,58
	380	50	0,41	50	65	3,74	20	17,71
	380	50	0,41	50	65	4,58	22	20,19
	380	50	0,41	50	65	5,29	26	22,30
	380	50	0,41	50	65	6,48	26,5	25,82
Atis (2003)	400	0	0,55	5	65	3,74	4,5	3,75
	400	50	0,28	5	65	3,74	3,2	1,03
	400	50	0,29	5	65	3,74	2,1	1,04
	400	70	0,33	5	65	3,74	6,5	4,42
	400	70	0,3	5	65	3,74	7,3	4,06
Rozière et al. (2008)	260	0	0,63	50	65	5,29	4	5,14
	297	30	0,63	50	65	5,29	8	9,13
	280	0	0,58	50	65	5,29	6	8,37
	318	30	0,58	50	65	5,29	9	13,63
Khunthongkea w et al. (2006)	325	0	0,5	4	55	5,48	7	7,21
	319	10	0,5	4	55	5,48	7	5,97
	306	30	0,6	4	55	5,48	10,5	9,02
	290	0	0,6	4	55	5,48	9	9,25
	288	10	0,6	4	55	5,48	9,8	9,34
	284	30	0,5	4	55	5,48	14,8	12,86
	382	0	0,5	4	55	5,48	7	5,86
	368	10	0,5	4	55	5,48	7,5	5,70
	343	30	0,5	4	55	5,48	10,5	10,98
	325	0	0,5	4	55	7,75	10,3	10,91
	319	10	0,5	4	55	7,75	10,3	9,73
	306	30	0,6	4	55	7,75	13,2	14,52
	290	0	0,6	4	55	7,75	12	13,05
	288	10	0,6	4	55	7,75	13,2	13,74
	284	30	0,5	4	55	7,75	18,8	21,32
	382	0	0,5	4	55	7,75	9	8,28
	368	10	0,5	4	55	7,75	9,8	8,81
	343	30	0,5	4	55	7,75	13,8	18,11
	290	0	0,6	4	55	5,48	9	9,25
	289	10	0,6	4	55	5,48	10	9,36
285	30	0,6	4	55	5,48	15	11,61	
290	0	0,6	4	55	7,75	12	13,05	
289	10	0,6	4	55	7,75	13	13,75	
285	30	0,6	4	55	7,75	18	18,33	
lamertinj et al. (2009)	400	0	0,4	10	60	2,65	0,05	0,64
	400	35	0,4	10	60	2,65	1,8	2,08
	400	50	0,4	10	60	2,65	6	4,88
	400	67	0,4	10	60	2,65	13,5	17,22
	400	0	0,4	10	60	4,58	0,08	0,80
	400	35	0,4	10	60	4,58	3,12	2,67
	400	50	0,4	10	60	4,58	10,4	7,04

	400	67	0,4	10	60	4,58	23,5	25,33
	400	0	0,4	10	60	6,48	0,12	0,96
	400	35	0,4	10	60	6,48	4,51	3,44
	400	50	0,4	10	60	6,48	14,7	10,19
	400	67	0,4	10	60	6,48	33	34,40
	400	0	0,4	10	60	8,37	0,16	1,10
	400	35	0,4	10	60	8,37	5,69	4,36
	400	50	0,4	10	60	8,37	18,9	14,48
	400	67	0,4	10	60	8,37	42,7	42,48
	400	0	0,4	10	60	9,90	0,19	1,20
	400	35	0,4	10	60	9,90	6,79	5,18
	400	50	0,4	10	60	9,90	22,5	18,62
	400	67	0,4	10	60	9,90	50,5	47,33
	400	0	0,4	10	60	11,22	0,21	1,34
	400	35	0,4	10	60	11,22	7,64	6,00
	400	50	0,4	10	60	11,22	25,5	22,50
	400	67	0,4	10	60	11,22	57	50,23
Jiang et al. (2004)	340	0	0,45	20	70	1,73	7,70	9,92
	340	40	0,45	20	70	1,73	12,20	12,45
	340	0	0,45	20	70	2,65	10,40	11,50
	340	40	0,45	20	70	2,65	15,70	15,60
	340	0	0,45	20	70	3,74	12,70	13,37
	340	40	0,45	20	70	3,74	19,40	19,66
	340	0	0,45	20	70	5,29	14,80	15,88
	340	40	0,45	20	70	5,29	22,40	25,48
	340	0	0,45	3	70	1,73	7,80	9,48
	340	40	0,45	3	70	1,73	11,30	9,87
	340	0	0,45	3	70	2,65	11,20	10,78
	340	40	0,45	3	70	2,65	14,10	12,24
	340	0	0,45	3	70	3,74	12,30	12,20
	340	40	0,45	3	70	3,74	15,80	15,19
	340	0	0,45	3	70	5,29	13,80	13,79
340	40	0,45	3	70	5,29	17,70	19,31	
sulapha (2003)	500	0	0,3	6,5	65	3,74	0	0,40
	400	0	0,4	6,5	65	3,74	1,43	1,33
	350	0	0,5	6,5	65	3,74	4,38	3,69
	300	0	0,6	6,5	65	3,74	7,22	8,01
	350	15	0,5	6,5	65	3,74	4,16	4,30
	350	30	0,5	6,5	65	3,74	5,18	4,80
	500	0	0,3	6,5	65	5,29	0	0,47
	400	0	0,4	6,5	65	5,29	1,88	1,35
	350	0	0,5	6,5	65	5,29	5,92	4,86
	300	0	0,6	6,5	65	5,29	10,05	10,17
	350	15	0,5	6,5	65	5,29	5,72	5,53
	350	30	0,5	6,5	65	5,29	7	5,99
	500	0	0,3	6,5	65	6,48	0	0,53
	400	0	0,4	6,5	65	6,48	2,24	1,37
	350	0	0,5	6,5	65	6,48	7,1	5,98
	300	0	0,6	6,5	65	6,48	12,22	12,05
	350	15	0,5	6,5	65	6,48	6,92	6,65
	350	30	0,5	6,5	65	6,48	8,4	7,07
	500	0	0,3	6,5	65	7,48	0	0,58
	400	0	0,4	6,5	65	7,48	2,53	1,41
350	0	0,5	6,5	65	7,48	8,09	7,08	
300	0	0,6	6,5	65	7,48	14,05	13,77	
350	15	0,5	6,5	65	7,48	7,93	7,71	
350	30	0,5	6,5	65	7,48	9,57	8,11	
500	0	0,3	6,5	65	9,17	0	0,69	

400	0	0,4	6,5	65	9,17	3,03	1,58
350	0	0,5	6,5	65	9,17	9,76	9,25
300	0	0,6	6,5	65	9,17	17,12	16,96
350	15	0,5	6,5	65	9,17	9,63	9,74
350	30	0,5	6,5	65	9,17	11,55	10,16
500	0	0,3	6,5	65	10,58	0	0,80
400	0	0,4	6,5	65	10,58	3,45	1,83
350	0	0,5	6,5	65	10,58	11,17	11,23
300	0	0,6	6,5	65	10,58	19,71	19,84
350	15	0,5	6,5	65	10,58	11,06	11,59
350	30	0,5	6,5	65	10,58	13,21	12,16
500	0	0,3	6,5	65	11,83	0	0,90
400	0	0,4	6,5	65	11,83	3,82	2,15
350	0	0,5	6,5	65	11,83	12,4	12,94
300	0	0,6	6,5	65	11,83	21,99	22,49
350	15	0,5	6,5	65	11,83	12,32	13,24
350	30	0,5	6,5	65	11,83	14,68	14,10
500	0	0,3	6,5	65	12,96	0	1,02
400	0	0,4	6,5	65	12,96	4,15	2,51
350	0	0,5	6,5	65	12,96	13,52	14,30
300	0	0,6	6,5	65	12,96	24,05	24,93
350	15	0,5	6,5	65	12,96	13,46	14,63
350	30	0,5	6,5	65	12,96	16	15,90
500	0	0,3	6,5	65	14,00	0	1,14
400	0	0,4	6,5	65	14,00	4,46	2,94
350	0	0,5	6,5	65	14,00	14,55	15,35
300	0	0,6	6,5	65	14,00	25,94	27,17
350	15	0,5	6,5	65	14,00	14,5	15,74
350	15	0,5	6,5	65	14,00	17,22	17,52
500	0	0,3	6,5	65	15,87	0	1,40
400	0	0,4	6,5	65	15,87	5,01	3,94
350	0	0,5	6,5	65	15,87	16,41	16,93
300	0	0,6	6,5	65	15,87	29,36	31,08
350	15	0,5	6,5	65	15,87	16,39	17,39
350	30	0,5	6,5	65	15,87	19,42	20,22
500	0	0,3	6,5	65	16,73	0	1,55
400	0	0,4	6,5	65	16,73	5,27	4,54
350	0	0,5	6,5	65	16,73	17,27	17,73
300	0	0,6	6,5	65	16,73	30,93	32,80
350	15	0,5	6,5	65	16,73	17,26	18,14
350	30	0,5	6,5	65	16,73	20,43	21,44
500	0	0,3	6,5	65	17,55	0	1,71
400	0	0,4	6,5	65	17,55	5,51	5,20
350	0	0,5	6,5	65	17,55	18,08	18,64
300	0	0,6	6,5	65	17,55	32,42	34,36
350	15	0,5	6,5	65	17,55	18,08	19,00
350	30	0,5	6,5	65	17,55	21,39	22,69
500	0	0,3	6,5	65	18,33	0	1,89
400	0	0,4	6,5	65	18,33	5,74	5,94
350	0	0,5	6,5	65	18,33	18,85	19,70
300	0	0,6	6,5	65	18,33	33,79	35,76
350	15	0,5	6,5	65	18,33	18,87	20,02
350	30	0,5	6,5	65	18,33	22,3	24,06
500	0	0,3	6,5	65	19,08	0	2,09
400	0	0,4	6,5	65	19,08	5,96	6,76
350	0	0,5	6,5	65	19,08	19,59	20,93
300	0	0,6	6,5	65	19,08	35,21	37,02
350	15	0,5	6,5	65	19,08	19,62	21,24

	350	30	0,5	6,5	65	19,08	23,18	25,63
Sisomphon and Frank (2007)	350	0	0,42	3	65	2,65	3	1,59
	350	0	0,6	3	65	2,65	3,5	4,07
	350	25	0,51	3	65	2,65	4	3,24
	350	50	0,42	3	65	2,65	6	1,83
	350	0	0,42	3	65	5,29	5	2,08
	350	0	0,6	3	65	5,29	6,5	6,31
	350	25	0,51	3	65	5,29	6,5	4,54
	350	50	0,42	3	65	5,29	7	2,76
	350	0	0,42	3	65	7,94	6	2,47
	350	0	0,6	3	65	7,94	9	9,51
	350	25	0,51	3	65	7,94	11	6,28
	350	50	0,42	3	65	7,94	16	4,10
Das and Pandey (2012)	384	0	0,52	10	65	5,47	5	7,68
	384	15	0,41	10	65	5,47	3	2,37
	384	25	0,4	10	65	5,47	3,5	1,75
	384	35	0,37	10	65	5,47	3,5	1,56
	384	15	0,44	10	65	5,47	2,5	3,72
	384	25	0,42	10	65	5,47	2,8	2,11
	384	35	0,39	10	65	5,47	2,8	1,81
	384	15	0,44	10	65	5,47	1,3	3,72
	384	25	0,43	10	65	5,47	1,3	2,35
	384	35	0,42	10	65	5,47	1,3	2,20
Zhang and Li (2013)	494	0	0,32	20	70	4,9	2,3	2,54
	494	10	0,32	20	70	4,9	2,7	2,97
	494	15	0,32	20	70	4,9	2,8	3,50
	494	20	0,32	20	70	4,9	3	4,13
	494	25	0,32	20	70	4,9	3,55	4,75
Xu et al. (2010)	312,5	0	0,56	20	70	5,47	13,8	14,03
	324,1	10	0,49	20	70	5,47	15,6	15,74
	331,3	20	0,42	20	70	5,47	17,9	17,07
	336	25	0,39	20	70	5,47	18,2	18,21
	312,5	0	0,56	20	70	7,74	17,4	18,60
	324,1	10	0,49	20	70	7,74	20,8	21,15
	331,3	20	0,42	20	70	7,74	23	23,01
	336	25	0,39	20	70	7,74	24,8	23,77
	312,5	0	0,56	20	70	9,49	22,1	21,90
	324,1	10	0,49	20	70	9,49	23,7	24,96
	331,3	20	0,42	20	70	9,49	26	26,48
	336	25	0,39	20	70	9,49	27	26,42
	312,5	0	0,56	20	70	10,95	23,8	24,45
	324,1	10	0,49	20	70	10,95	25,3	27,69
	331,3	20	0,42	20	70	10,95	27	28,26
336	25	0,39	20	70	10,95	28,5	27,53	
Van and De Belie (2014)	300	0	0,55	10	60	11,22	5,75	7,24
	350	15	0,46	10	60	11,22	1,25	3,77
	350	15	0,46	10	60	11,22	0,25	3,77
	450	50	0,35	10	60	11,22	14,75	16,46
	450	50	0,35	10	60	11,22	14	16,46
	320	0	0,5	10	60	2,65	0	1,30
	350	15	0,46	10	60	2,65	0,25	1,08
	350	15	0,46	10	60	2,65	0,5	1,08
	450	50	0,35	10	60	2,65	4	4,30
	450	50	0,35	10	60	2,65	3,5	4,30
Burden (2006)	340	0	0,5	1	65	2,65	0	1,77
	400	0	0,4	1	65	2,65	0	0,88
	465	0	0,34	1	65	2,65	0	0,36
	340	0	0,5	1	65	3,74	0	2,11

400	0	0,4	1	65	3,74	0	0,87
465	0	0,34	1	65	3,74	0	0,40
340	0	0,5	1	65	5,29	0,50	2,71
400	0	0,4	1	65	5,29	0	0,88
465	0	0,34	1	65	5,29	0	0,47
340	0	0,5	1	65	7,48	1	3,87
400	0	0,4	1	65	7,48	0,50	0,97
465	0	0,34	1	65	7,48	0	0,58
340	0	0,5	1	65	9,49	1,50	5,21
400	0	0,4	1	65	9,49	0,50	1,15
465	0	0,34	1	65	9,49	0	0,71
340	30	0,5	1	65	2,65	0	2,71
400	30	0,4	1	65	2,65	0	0,83
450	30	0,34	1	65	2,65	0	0,47
340	30	0,5	1	65	3,74	1	3,12
400	30	0,4	1	65	3,74	0	0,82
450	30	0,34	1	65	3,74	0	0,50
340	30	0,5	1	65	5,29	1,50	3,80
400	30	0,4	1	65	5,29	0,50	0,79
450	30	0,34	1	65	5,29	0	0,56
340	30	0,5	1	65	7,48	2	5,02
400	30	0,4	1	65	7,48	0,50	0,76
450	30	0,34	1	65	7,48	0	0,70
340	30	0,5	1	65	9,49	3	6,47
400	30	0,4	1	65	9,49	1	0,82
450	30	0,34	1	65	9,49	0,50	0,90
340	40	0,5	1	65	2,65	0	2,16
400	40	0,4	1	65	2,65	0	1,06
450	40	0,34	1	65	2,65	0	0,54
340	40	0,5	1	65	3,74	1	2,52
400	40	0,4	1	65	3,74	0	1,08
450	40	0,34	1	65	3,74	0	0,56
340	40	0,5	1	65	5,29	1	3,14
400	40	0,4	1	65	5,29	0,50	1,06
450	40	0,34	1	65	5,29	0,50	0,64
340	40	0,5	1	65	7,48	3	4,33
400	40	0,4	1	65	7,48	1	1,05
450	40	0,34	1	65	7,48	0,50	0,81
340	40	0,5	1	65	9,49	5	5,88
400	40	0,4	1	65	9,49	1,50	1,15
450	40	0,34	1	65	9,49	1	1,09
340	50	0,5	1	65	2,65	1	2,10
400	50	0,4	1	65	2,65	0,50	1,47
450	50	0,34	1	65	2,65	0,50	0,72
340	50	0,5	1	65	3,74	2	2,51
400	50	0,4	1	65	3,74	0,50	1,55
450	50	0,34	1	65	3,74	0,50	0,77
340	50	0,5	1	65	5,29	2	3,24
400	50	0,4	1	65	5,29	1	1,63
450	50	0,34	1	65	5,29	0,50	0,89
340	50	0,5	1	65	7,48	5	4,75
400	50	0,4	1	65	7,48	2	1,73
450	50	0,34	1	65	7,48	1	1,21
340	50	0,5	1	65	9,49	7	6,88
400	50	0,4	1	65	9,49	4	2,00
450	50	0,34	1	65	9,49	3	1,73
340	50	0,5	1	65	2,65	2	2,10
340	50	0,4	1	65	3,74	2	2,51

	340	50	0,34	1	65	7,48	4	4,75
	340	50	0,5	1	65	9,49	4,5	6,88
	340	50	0,4	1	65	2,65	1	2,10
	340	50	0,34	1	65	3,74	1,5	2,51
	340	50	0,5	1	65	7,48	3	4,75
	340	50	0,4	1	65	9,49	5,5	6,88
	340	50	0,34	1	65	2,65	2	2,10
	340	50	0,5	1	65	3,74	2	2,51
	340	50	0,4	1	65	7,48	4,5	4,75
	340	50	0,34	1	65	9,49	5	6,88
	340	50	0,5	1	65	2,65	2	2,10
	340	50	0,4	1	65	3,74	2	2,51
	340	50	0,34	1	65	7,48	4	4,75
	340	50	0,5	1	65	9,49	5	6,88

Base de données et résultats du modèle ML (BDDS)

Auteurs	Liant (kg/m ³)	BFS (%)	I acidité (%)	finesse (m ² /kg)	E/L	CO2 (%)	RH (%)	√t	cure (jrs)	X(EXP) (mm)	X(ANN) (mm)
Younsi et al. (2013)	301	0	0	0	0,6	50	65	2,65	28	11	9,70
	301	0	0	0	0,6	50	65	3,74	28	12	11,72
	301	0	0	0	0,6	50	65	4,58	28	12,5	13,77
	301	0	0	0	0,6	50	65	5,29	28	16	15,86
	301	0	0	0	0,6	50	65	6,48	28	23,5	19,98
	313	30	89,83	450	0,58	50	65	2,65	28	13	11,80
	313	30	89,83	450	0,58	50	65	3,74	28	15	14,95
	313	30	89,83	450	0,58	50	65	4,58	28	18	17,72
	313	30	89,83	450	0,58	50	65	5,29	28	18,5	20,21
	313	30	89,83	450	0,58	50	65	6,48	28	25	24,39
	413	75	89,83	450	0,41	50	65	2,65	28	12	9,71
	413	75	89,83	450	0,41	50	65	3,74	28	12	12,79
	413	75	89,83	450	0,41	50	65	4,58	28	13,5	15,66
	413	75	89,83	450	0,41	50	65	5,29	28	16,5	18,38
413	75	89,83	450	0,41	50	65	6,48	28	25,5	23,20	
Gruyaret et al. (2013)	350	0	0	0	0,5	10	60	3,74	30	0	0,15
	350	0	0	0	0,5	10	60	5,29	30	0	0,16
	350	0	0	0	0,5	10	60	6,48	30	0	0,17
	350	0	0	0	0,5	10	60	10,58	30	0	0,31
	350	0	0	0	0,5	10	60	12,96	30	0,5	0,60
	348	50	98,11	397	0,5	10	60	3,74	30	5	3,66
	348	50	98,11	397	0,5	10	60	5,29	30	6,5	4,57
	348	50	98,11	397	0,5	10	60	6,48	30	7,5	5,38
	348	50	98,11	397	0,5	10	60	10,58	30	11	9,77
	348	50	98,11	397	0,5	10	60	12,96	30	11	14,64
	349	70	98,11	397	0,5	10	60	3,74	30	10	8,76
	349	70	98,11	397	0,5	10	60	5,29	30	14	11,49
349	70	98,11	397	0,5	10	60	6,48	30	18	13,90	

349	70	98,11	397	0,5	10	60	10,58	30	24	23,84
349	70	98,11	397	0,5	10	60	12,96	30	30	29,63
347	85	98,11	397	0,5	10	60	3,74	30	14	15,91
347	85	98,11	397	0,5	10	60	5,29	30	20	20,14
347	85	98,11	397	0,5	10	60	6,48	30	25	23,38
347	85	98,11	397	0,5	10	60	10,58	30	36	32,07
350	0	0	0	0,5	10	60	3,74	90	0	0,07
350	0	0	0	0,5	10	60	5,29	90	0	0,07
350	0	0	0	0,5	10	60	6,48	90	0	0,07
350	0	0	0	0,5	10	60	10,58	90	0	0,10
350	0	0	0	0,5	10	60	12,96	90	0	0,19
348	50	98,11	397	0,5	10	60	3,74	90	1	2,09
348	50	98,11	397	0,5	10	60	5,29	90	2	2,56
348	50	98,11	397	0,5	10	60	6,48	90	3,5	2,97
348	50	98,11	397	0,5	10	60	10,58	90	4	5,29
348	50	98,11	397	0,5	10	60	12,96	90	4,5	8,48
349	70	98,11	397	0,5	10	60	3,74	90	3	5,23
349	70	98,11	397	0,5	10	60	5,29	90	6	7,01
349	70	98,11	397	0,5	10	60	6,48	90	9,5	8,67
349	70	98,11	397	0,5	10	60	10,58	90	12	17,53
349	70	98,11	397	0,5	10	60	12,96	90	32	25,13
347	85	98,11	397	0,5	10	60	3,74	90	9,5	10,92
347	85	98,11	397	0,5	10	60	5,29	90	17	14,74
347	85	98,11	397	0,5	10	60	6,48	90	17,5	18,06
347	85	98,11	397	0,5	10	60	10,58	90	23	29,50
350	0	0	0	0,5	10	60	3,74	180	0	0,03
350	0	0	0	0,5	10	60	5,29	180	0	0,03
350	0	0	0	0,5	10	60	6,48	180	0	0,03
350	0	0	0	0,5	10	60	10,58	180	0	0,03
350	0	0	0	0,5	10	60	12,96	180	0	0,05
348	50	98,11	397	0,5	10	60	3,74	180	0,5	1,02
348	50	98,11	397	0,5	10	60	5,29	180	1	1,27
348	50	98,11	397	0,5	10	60	6,48	180	2	1,48
348	50	98,11	397	0,5	10	60	12,96	180	3	4,28
349	70	98,11	397	0,5	10	60	3,74	180	3	2,64
349	70	98,11	397	0,5	10	60	5,29	180	6	3,67
349	70	98,11	397	0,5	10	60	6,48	180	10	4,69
349	70	98,11	397	0,5	10	60	12,96	180	19	19,60
347	85	98,11	397	0,5	10	60	3,74	180	7,5	6,21
347	85	98,11	397	0,5	10	60	5,29	180	11,5	9,21
347	85	98,11	397	0,5	10	60	6,48	180	16,5	12,25
347	85	98,11	397	0,5	10	60	12,96	180	35	32,58
350	0	0	0	0,5	10	60	3,74	540	0	0,05
350	0	0	0	0,5	10	60	5,29	540	0	0,05
350	0	0	0	0,5	10	60	6,48	540	0,5	0,05

	350	0	0	0	0,5	10	60	10,58	540	0	0,07
	350	0	0	0	0,5	10	60	12,96	540	0	0,09
	348	50	98,11	397	0,5	10	60	3,74	540	0,5	0,68
	348	50	98,11	397	0,5	10	60	5,29	540	1	0,96
	348	50	98,11	397	0,5	10	60	6,48	540	1	1,24
	348	50	98,11	397	0,5	10	60	10,58	540	1,5	2,51
	349	70	98,11	397	0,5	10	60	3,74	540	1,5	2,33
	349	70	98,11	397	0,5	10	60	5,29	540	2,5	3,96
	349	70	98,11	397	0,5	10	60	6,48	540	8,5	5,69
	349	70	98,11	397	0,5	10	60	10,58	540	13	13,80
	349	85	98,11	397	0,5	10	60	3,74	540	5	5,61
	347	85	98,11	397	0,5	10	60	5,29	540	8	10,09
	347	85	98,11	397	0,5	10	60	6,48	540	16	14,25
	347	85	98,11	397	0,5	10	60	10,58	540	28	27,44
Shi et al. (2009)	550	15	57,29	371	0,3	20	70	3,74	90	1,25	1,69
	550	30	57,29	371	0,3	20	70	3,74	90	2,35	2,23
	550	45	57,29	371	0,3	20	70	3,74	90	2,2	2,74
	550	60	57,29	371	0,3	20	70	3,74	90	3,25	3,22
	550	15	57,29	371	0,3	20	70	5,29	90	2,25	2,17
	550	30	57,29	371	0,3	20	70	5,29	90	2,75	2,80
	550	45	57,29	371	0,3	20	70	5,29	90	3,25	3,39
	550	60	57,29	371	0,3	20	70	5,29	90	4,15	3,94
	550	15	57,29	371	0,3	20	70	7,48	90	2,8	2,84
	550	30	57,29	371	0,3	20	70	7,48	90	4	3,58
	550	45	57,29	371	0,3	20	70	7,48	90	3,75	4,28
	550	60	57,29	371	0,3	20	70	7,48	90	5,1	4,97
	550	15	57,29	371	0,35	20	70	3,74	90	1,9	1,36
	550	30	57,29	371	0,35	20	70	3,74	90	1,4	1,82
	550	45	57,29	371	0,35	20	70	3,74	90	1,6	2,33
	550	60	57,29	371	0,35	20	70	3,74	90	2,7	2,91
	550	15	57,29	371	0,35	20	70	5,29	90	2,8	1,80
	550	30	57,29	371	0,35	20	70	5,29	90	1,6	2,40
	550	45	57,29	371	0,35	20	70	5,29	90	2,5	3,06
	550	60	57,29	371	0,35	20	70	5,29	90	3,35	3,78
Sulapha et al. (2003)	350	30	91,33	450	0,5	6,5	65	3,74	28	4,3	3,80
	350	30	91,33	450	0,5	6,5	65	5,29	28	5,7	5,40
	350	30	91,33	450	0,5	6,5	65	6,48	28	6,8	6,74
	350	30	91,33	450	0,5	6,5	65	7,48	28	7,8	7,87
	350	30	91,33	450	0,5	6,5	65	9,17	28	9,3	9,67
	350	30	91,33	450	0,5	6,5	65	10,58	28	10,7	11,04
	350	30	91,33	450	0,5	6,5	65	11,83	28	11,8	12,16

350	30	91,33	450	0,5	6,5	65	12,96	28	12,9	13,13
350	30	91,33	450	0,5	6,5	65	14,00	28	13,8	14,03
350	30	91,33	450	0,5	6,5	65	14,97	28	14,7	14,89
350	30	91,33	450	0,5	6,5	65	15,87	28	15,6	15,70
350	30	91,33	450	0,5	6,5	65	16,73	28	16,4	16,49
350	30	91,33	450	0,5	6,5	65	17,55	28	17,2	17,26
350	30	91,33	450	0,5	6,5	65	18,33	28	17,9	17,99
350	30	91,33	450	0,5	6,5	65	19,08	28	18,6	18,69
350	30	91,33	450	0,5	6,5	65	19,80	28	19,3	19,35
350	50	91,33	450	0,5	6,5	65	3,74	28	4,8	4,94
350	50	91,33	450	0,5	6,5	65	5,29	28	6,5	6,76
350	50	91,33	450	0,5	6,5	65	6,48	28	7,8	8,26
350	50	91,33	450	0,5	6,5	65	7,48	28	8,9	9,54
350	50	91,33	450	0,5	6,5	65	9,17	28	10,8	11,60
350	50	91,33	450	0,5	6,5	65	10,58	28	12,4	13,16
350	50	91,33	450	0,5	6,5	65	11,83	28	13,7	14,42
350	50	91,33	450	0,5	6,5	65	12,96	28	15,0	15,51
350	50	91,33	450	0,5	6,5	65	14,00	28	16,1	16,50
350	50	91,33	450	0,5	6,5	65	14,97	28	17,2	17,46
350	50	91,33	450	0,5	6,5	65	15,87	28	18,2	18,41
350	50	91,33	450	0,5	6,5	65	16,73	28	19,2	19,39
350	50	91,33	450	0,5	6,5	65	17,55	28	20,1	20,39
350	50	91,33	450	0,5	6,5	65	18,33	28	20,9	21,42
350	50	91,33	450	0,5	6,5	65	19,08	28	21,8	22,47
350	50	91,33	450	0,5	6,5	65	19,80	28	22,6	23,53
350	65	91,33	450	0,5	6,5	65	3,74	28	5,4	5,49
350	65	91,33	450	0,5	6,5	65	5,29	28	7,3	7,32
350	65	91,33	450	0,5	6,5	65	6,48	28	8,8	8,83
350	65	91,33	450	0,5	6,5	65	7,48	28	10,0	10,14
350	65	91,33	450	0,5	6,5	65	9,17	28	12,1	12,31
350	65	91,33	450	0,5	6,5	65	10,58	28	13,8	14,02
350	65	91,33	450	0,5	6,5	65	11,83	28	15,4	15,43
350	65	91,33	450	0,5	6,5	65	12,96	28	16,7	16,65
350	65	91,33	450	0,5	6,5	65	14,00	28	18,0	17,78
350	65	91,33	450	0,5	6,5	65	14,97	28	19,2	18,89
350	65	91,33	450	0,5	6,5	65	15,87	28	20,3	20,00
350	65	91,33	450	0,5	6,5	65	16,73	28	21,4	21,18
350	65	91,33	450	0,5	6,5	65	17,55	28	22,4	22,41
350	65	91,33	450	0,5	6,5	65	18,33	28	23,3	23,69
350	65	91,33	450	0,5	6,5	65	19,08	28	24,2	25,01
350	65	91,33	450	0,5	6,5	65	19,80	28	25,1	26,33
350	66	90,41	600	0,5	6,5	65	3,74	28	3,6	3,22
350	66	90,41	600	0,5	6,5	65	5,29	28	4,8	4,22
350	66	90,41	600	0,5	6,5	65	6,48	28	5,7	5,08
350	66	90,41	600	0,5	6,5	65	7,48	28	6,5	5,86

	350	66	90,41	600	0,5	6,5	65	9,17	28	7,8	7,26
	350	66	90,41	600	0,5	6,5	65	10,58	28	8,9	8,46
	350	66	90,41	600	0,5	6,5	65	11,83	28	9,9	9,51
	350	66	90,41	600	0,5	6,5	65	12,96	28	10,8	10,41
	350	66	90,41	600	0,5	6,5	65	14,00	28	11,6	11,18
	350	66	90,41	600	0,5	6,5	65	14,97	28	12,4	11,86
	350	66	90,41	600	0,5	6,5	65	15,87	28	13,1	12,45
	350	66	90,41	600	0,5	6,5	65	16,73	28	13,7	13,00
	350	66	90,41	600	0,5	6,5	65	17,55	28	14,4	13,53
	350	66	90,41	600	0,5	6,5	65	18,33	28	15,0	14,05
	350	66	90,41	600	0,5	6,5	65	19,08	28	15,6	14,59
	350	66	90,41	600	0,5	6,5	65	19,80	28	16,1	15,16
	350	67	90,79	600	0,5	6,5	65	3,74	28	2,8	3,25
	350	67	90,79	600	0,5	6,5	65	5,29	28	3,8	4,24
	350	67	90,79	600	0,5	6,5	65	6,48	28	4,5	5,08
	350	67	90,79	600	0,5	6,5	65	7,48	28	5,2	5,85
	350	67	90,79	600	0,5	6,5	65	9,17	28	6,2	7,23
	350	67	90,79	600	0,5	6,5	65	10,58	28	7,1	8,42
	350	67	90,79	600	0,5	6,5	65	11,83	28	7,9	9,45
	350	67	90,79	600	0,5	6,5	65	12,96	28	8,7	10,33
	350	67	90,79	600	0,5	6,5	65	14,00	28	9,3	11,11
	350	67	90,79	600	0,5	6,5	65	14,97	28	9,9	11,78
	350	67	90,79	600	0,5	6,5	65	15,87	28	10,5	12,38
	350	67	90,79	600	0,5	6,5	65	16,73	28	11,0	12,93
	350	67	90,79	600	0,5	6,5	65	17,55	28	11,6	13,47
	350	67	90,79	600	0,5	6,5	65	18,33	28	12,1	14,01
	350	67	90,79	600	0,5	6,5	65	19,08	28	12,5	14,56
	350	67	90,79	600	0,5	6,5	65	19,80	28	13,0	15,15
Zhang et al. (2013)	550	0	0	0	0,25	20	70	3,74	90	0	0,36
	550	0	0	0	0,25	20	70	5,29	90	0	0,38
	550	0	0	0	0,25	20	70	7,48	90	0	0,43
	550	0	0	0	0,3	20	70	3,74	90	0	0,41
	550	0	0	0	0,3	20	70	5,29	90	0	0,42
	550	0	0	0	0,3	20	70	7,48	90	0	0,45
	550	0	0	0	0,35	20	70	3,74	90	0	0,47
	550	0	0	0	0,35	20	70	5,29	90	0	0,48
	550	0	0	0	0,35	20	70	7,48	90	0	0,50
	550	15	57,29	371	0,35	20	70	3,74	90	1,3	1,36
	550	15	57,29	371	0,35	20	70	5,29	90	2,2	1,80
	550	15	57,29	371	0,35	20	70	7,48	90	2,8	2,52
	550	30	57,29	371	0,35	20	70	3,74	90	2,4	1,82
	550	30	57,29	371	0,35	20	70	5,29	90	2,8	2,40
	550	30	57,29	371	0,35	20	70	7,48	90	4	3,34
	550	45	57,29	371	0,35	20	70	3,74	90	2,2	2,33
	550	45	57,29	371	0,35	20	70	5,29	90	3,3	3,06

	550	45	57,29	371	0,35	20	70	7,48	90	3,7	4,20
	550	60	57,29	371	0,35	20	70	3,74	90	3,2	2,91
	550	60	57,29	371	0,35	20	70	5,29	90	4,1	3,78
	550	60	57,29	371	0,35	20	70	7,48	90	5,1	5,14
Duan et al. (2013)	360	0	0	0	0,5	20	70	1,73	28	2,5	2,08
	360	0	0	0	0,5	20	70	5,29	28	6	5,28
	360	0	0	0	0,5	20	70	13,42	28	9	8,95
	360	10	66,86	290	0,5	20	70	1,73	28	1,5	2,33
	360	10	66,86	290	0,5	20	70	5,29	28	4,5	3,79
	360	10	66,86	290	0,5	20	70	13,42	28	7,8	8,18

Annexe 3

Algorithmes et Résultats de l'ACP

Algorithme et résultats de l'ACP pour la base de données des bétons aux cendres volantes

```

clc; clear all,clear memory,clear workspace;
% Lecture des données et calcul des dimensions
load baseFF.dat; x=baseFF(:, :);
[nligne ncol] =size(x);
P=x(:, 1:6);T=x(:, 7);
% Les lignes suivantes permettent d'attribuer chaque paramètre à la colonne
% qui lui correspond dans la base de données.
liant    = baseFF(:, 1); % kg/m3
CV       = baseFF(:, 2); % %
EL       = baseFF(:, 3);
CO2      = baseFF(:, 4); % %
HR       = baseFF(:, 5); % %
t        = baseFF(:, 6); % jours
Xc       = baseFF(:, 7); % mm
% La commande suivante permet de réaliser l'analyse en composantes
% principales: [COEFF,scores,latent,tsquare]=princomp(X).
% COEFF correspond à une matrice dont chaque colonne contient les
% coefficients pour une composantes principales.
% scores est la représentation de X dans l'espace des composantes
% principales.
% latent renvoie un vecteur contenant les valeurs propres de la matrice
% de covariance X.
% tsquare renvoie au test statistique d'Hotteling pour chaque point.
% princomp(zscore(X))permet de réaliser l'analyse en composantes
% principales sur des valeurs standardisées.
[vect_propres,scores,val_propres,t2, matrix_correlation,COEFF] =
princomp(zscore(baseFF))
[pc,score,latent,tsquare]=princomp(baseFF)
[matrix variance_covariance]=princomp(baseFF)
% La commande suivante permet de réaliser le graphe des valeurs propres.
figure('Name','Spectre des valeurs propres','NumberTitle','off');
bar(val_propres);
% Et ceci nous donne les inerties cumulées des valeurs propres.
cumsum(val_propres)./sum(val_propres)

```

Résultats

vect_propres =

```

-0.5878  0.2617  -0.0244  0.1015  -0.2785  0.0764  0.7012
-0.1421  -0.3316  0.4509  0.6713  0.2556  -0.3823  0.0663
 0.5901  -0.2387  -0.1131  -0.1735  0.1525  -0.2286  0.6903
 0.2490  0.2641  0.5807  -0.1692  -0.6130  -0.3523  -0.0502
-0.0821  0.5141  0.4044  -0.3206  0.6753  -0.0375  0.0721
 0.1442  0.5736  -0.5021  0.3572  0.0327  -0.5106  -0.0937
 0.4434  0.3185  0.1747  0.5000  -0.0314  0.6399  0.1043

```

val_propres =

2.3227

1.2878

1.2779

1.0278

0.7204

0.2811

0.0824

pc =

0.9957	-0.0318	0.0654	0.0513	-0.0094	-0.0249	0.0014
0.0361	0.9953	-0.0022	-0.0411	0.0048	0.0798	0.0005
-0.0014	-0.0006	-0.0001	0.0000	-0.0026	0.0013	1.0000
-0.0402	-0.0215	0.9198	-0.3582	-0.0797	0.1312	-0.0003
0.0070	-0.0113	0.0699	-0.0153	0.9947	0.0730	0.0025
0.0015	-0.0589	0.0038	0.3666	-0.0633	0.9264	-0.0014
-0.0753	0.0657	0.3805	0.8560	0.0123	-0.3352	0.0004

latent =

1.0e+03 *

2.9324

0.4252

0.1447

0.0636

0.0126

0.0107

0.0000

Algorithme et résultats de l'ACP pour la base de données des bétons aux laitiers

```

clc; clear all,clear memory,clear workspace;
% Lecture des données et calcul des dimensions
load BDDSACP.dat; x=BDDSACP(:,:);
[nligne ncol] =size(x);
P=x(:,1:9);T=x(:,10);
% Les lignes suivantes permettent d'attribuer chaque paramètre à la colonne
% qui lui correspond dans la base de données.
liant      = BDDSACP(:,1); % kg/m3
laitier    = BDDSACP(:,2); % %
Iacid      = BDDSACP(:,3); % %
finesse    = BDDSACP(:,4); % g/cm2
EL         = BDDSACP(:,5);
CO2        = BDDSACP(:,6); % %
HR         = BDDSACP(:,7); % %
t          = BDDSACP(:,8); % jours
cure       = BDDSACP(:,9); % jours
Xc         = BDDSACP(:,10); % mm
% La commande suivante permet de réaliser l'analyse en composantes
% principales: [COEFF,scores,latent,tsquare]=princomp(X).
% COEFF correspond à une matrice dont chaque colonne contient les
% coefficients pour une composantes principales.
% scores est la représentation de X dans l'espace des composantes
% principales.
% latent renvoie un vecteur contenant les valeurs propres de la matrice
% de covariance X.
% tsquare renvoie au test statistique d'Hotteling pour chaque point.
% princomp(zscore(X))permet de réaliser l'analyse en composantes
% principales sur des valeurs standardisées.
[vect_propres,scores,val_propres,t2] = princomp(zscore(BDDSACP))
[pc,score,latent,tsquare]=princomp(BDDSACP)
[matrix variance_covariance]=princomp(BDDSACP)
% La commande suivante permet de réaliser le graphe des valeurs propres.
figure('Name','Spectre des valeurs propres','NumberTitle','off');
bar(val_propres);
% Et ceci nous donne les inerties cumulées des valeurs propres.
cumsum(val_propres)./sum(val_propres);

```

Résultats

vect_propres =

-0.3687	0.4015	0.1667	-0.0886	0.1935	-0.1870	-0.0900	-0.1527	0.2090	0.7209
0.3693	0.2653	0.3275	0.1956	0.0775	-0.3423	-0.1431	0.6791	-0.1972	0.0630
0.4062	0.2753	0.2378	0.1569	-0.0790	0.1457	0.0307	-0.5718	-0.5550	0.1213
0.3482	0.4172	0.1619	0.0488	-0.1653	0.4053	-0.1008	-0.0337	0.6712	-0.1505
0.3460	-0.4005	-0.2124	0.1508	-0.2002	0.3131	0.1997	0.2063	0.0584	0.6543
-0.2256	0.0405	-0.2646	0.7450	0.2544	0.2534	-0.4352	0.0119	-0.0587	-0.0226

-0.2748	0.4840	-0.2070	-0.0600	0.0210	0.4307	0.5223	0.3269	-0.2752	-0.0494
0.2741	0.0852	-0.3695	-0.5560	0.4011	0.2289	-0.4735	0.0740	-0.1581	0.0639
-0.0415	-0.3216	0.5877	-0.0197	0.6179	0.3663	0.1731	0.0335	0.0326	-0.0321
0.3442	0.1073	-0.3772	0.1898	0.5245	-0.3579	0.4517	-0.1769	0.2243	-0.0529

val_propres =

4.0554
2.1631
1.3506
1.0817
0.6545
0.3549
0.1575
0.1264
0.0340
0.0219

pc =

-0.0832	-0.1180	0.9840	0.0757	0.0258	-0.0514	0.0327	0.0029	-0.0293	0.0009
0.1043	0.0729	-0.0158	0.8257	-0.4690	0.2544	-0.0884	0.0732	0.0617	0.0003
0.1592	0.0868	-0.0537	0.4933	0.6940	-0.4740	-0.0523	0.0885	0.0627	0.0002
0.9295	0.2755	0.1302	-0.1871	-0.0554	0.0652	0.0044	-0.0199	-0.0196	-0.0001
0.0001	0.0001	-0.0009	-0.0003	0.0003	0.0006	0.0000	-0.0011	0.0003	1.0000
-0.0149	-0.0202	0.0246	0.0232	0.5218	0.8211	-0.0645	0.2167	-0.0241	-0.0003
0.0016	-0.0121	0.0331	-0.0618	0.0163	0.0551	0.0742	-0.1143	0.9864	-0.0005
0.0096	-0.0014	-0.0163	-0.0519	-0.1085	-0.1040	0.5327	0.8288	0.0608	0.0009
-0.3036	0.9470	0.0917	-0.0448	0.0033	0.0169	0.0175	-0.0048	0.0034	-0.0000
0.0184	-0.0030	-0.0369	0.1580	0.1012	0.1237	0.8334	-0.4894	-0.1169	-0.0006

latent =

1.0e+04 *
3.6703
1.6835
0.6541
0.0306
0.0118
0.0107
0.0041
0.0006
0.0002
0.0000