

UNIVERSITÉ DE SAAD DAHLAB-BLIDA

Faculté des Sciences de l'Ingénieur

Département de Génie Civil

THÈSE DE DOCTORAT

Spécialité : Génie Civil

CONCEPTION D'UN SYSTÈME AUTOMATISÉ INTÉGRÉ
DE CONNAISSANCES POUR LES BÉTONS AUX AJOUTS
(SAICBA)

Par :

BOUKHATEM Bakhta

Devant le jury composé de :

N. BOURAHLA	Professeur, U. de Blida	Président
M. CHEMROUK	Professeur, U. de Bab Ezzouar	Examineur
A. GUESSOUM	Professeur U. de Blida	Examineur
A. TAGNIT-HAMOU	Professeur, U. de Sherbrooke	Examineur
S. KENAI	Professeur U. de Blida	Encadreur
M. GHRICI	Maître de Conférences, U. de Chlef	Co-encadreur

Blida, Juin 2011

RÉSUMÉ

La croissance rapide des systèmes informatiques tels que les modèles de simulation, les bases de données, les systèmes d'aide à la décision et l'intelligence artificielle ont eu un impact très important sur la technologie du béton. En outre, l'intégration de ces systèmes dans un seul système peut former un système intégré de la connaissance qui permet aux chercheurs, ingénieurs et praticiens de développer, stocker, extraire, intégrer et diffuser des connaissances sur tous les aspects du béton. Le but de ce travail est la conception d'un prototype de Système Automatisé Intégré de Connaissance pour les Bétons avec Ajouts (SAICBA). Ce système intègre une Base de Données informatisée sur les Bétons aux Ajouts (BDBA), des modèles de Réseaux de Neurones (RN) basés sur l'approche Analyse en Composantes Principales (ACP) pour l'analyse des données et des modèles mathématiques. C'est un système intelligent pour résoudre des problèmes complexes de prévision des propriétés des bétons contenant des ajouts minéraux (laitier, cendres volantes, fumée de silice et pouzzolane naturelle). Il trace une méthodologie pour décrire un modèle de conception d'un mélange de béton pour obtenir les propriétés désirées à l'état frais (ouvrabilité) et à l'état durci (résistance à la compression). L'efficacité des différents ajouts cimentaires par la prévision du coefficient d'efficacité a été réalisée. Le système a été validé par des essais expérimentaux. La puissance du système réside dans sa flexibilité qui peut de manière significative réduire l'ampleur de l'expérimentation et la possibilité de son utilisation par des chercheurs avec peu d'expérience dans l'informatique.

Mots clés

SAICBA, Bases de Données pour les Béton avec Ajouts (BDBA), Réseaux de Neurones (RN); Analyse en Composantes Principales (ACP), Modèles Mathématiques, Béton avec Ajout, Coefficient d'efficacité.

ABSTRACT

The rapid growth of computer systems such as simulation models, databases, decision support systems and artificial intelligence have had a very important impact on concrete technology. In addition, integrating these systems into a single system can form Computer Integrated Knowledge System (CIKS) that allows researchers, engineers and practitioners to develop, store, retrieve, integrate and disseminate knowledge on all aspects of concrete. The aim of this work is to design a prototype of a CIKS for concrete with additives. This system incorporates a Computerized Database on Concrete Additives (CDCA), Neural Networks (NN) models based on the Principal Component Analysis (PCA) approach for data analysis and mathematical models. It is an intelligent system to solve complex problems for predicting properties of concretes containing mineral admixtures (slag, fly ash, silica fume and natural pozzolan). It gives a methodology to obtain a model for designing a concrete mixture to obtain the desired properties namely workability and compressive strength. The activity of the additives is predicted in terms of the efficiency factor concept. The system was validated by experimental tests. The main feature of the system is its flexibility that can significantly reduce the scale of the experiment and its ease of use even by researchers with little computing experience.

Keywords

Computer Integrated Knowledge System, Databases, Mathematical Models, Neural Networks, Principal Component Analysis, Concrete with Additives, Efficiency Factor.

REMERCEMENTS

Cette thèse, fruit de quatre années de recherche, ne serait réalité sans la contribution multiforme de nombreuses personnes à qui je dois exprimer toute ma reconnaissance.

A priori, mes remerciements vont droit à mon encadreur Monsieur Said KENAI, Professeur à l'Université Saad DAHLAB de Blida, qui a dirigé avec intérêt mes recherches et pour ses précieux conseils, sa disponibilité et ses encouragements continus qui ont rendu ce travail possible.

Je tiens à remercier Monsieur Arezki TAGHNIT-HAMOU, Professeur à l'Université de Sherbrooke d'avoir accepté d'être co-encadreur de cette thèse, qui m'a fait l'honneur de s'intéresser à ce travail malgré ses lourdes charges, qui m'a accueilli dans son laboratoire durant la période de mon stage pour une longue 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 mon système.

Je remercié aussi mon co-encadreur Monsieur Mohamed GHRICI, Maître de Conférence à l'Université Hassiba BEN BOUALI de Chlef. Sa connaissance approfondie et son expérience scientifique ont été plus que déterminantes dans les orientations de mes travaux de recherche. J'ai bénéficié de son attention et de son écoute à chaque fois que le besoin s'est fait sentir.

Je suis redevable à Monsieur Djamel ZIOU, Professeur au département Informatique de l'Université de Sherbrooke pour les discussions scientifiques et les conseils utiles, qui m'ont permis de franchir, efficacement les difficultés apparues pendant l'élaboration de ce travail.

Je présente à Monsieur Nour-Eddine BOURAHLA, Professeur à l'Université Saad DAHLEB de Blida mes remerciements respectueux pour m'avoir fait l'honneur de présider mon jury de thèse. Mes remerciements vont aussi à Monsieur Abderrazak GUESSOUM Professeur à l'Université Saad DAHLAB de

Blida et Monsieur Mohamed CHEMROUK Professeur à l'Université Haouari BOUMEDIENNE de Bab Ezzaouar qui se sont donnés la peine d'examiner cette thèse.

Je remercie chaleureusement toutes les personnes qui ont accepté d'apporter aide par consultations, conseils et prestation des documents et références bibliographiques, et en particulier le personnel du département de Génie Civil et de la bibliothèque des sciences et génie de l'université de Sherbrooke.

Je suis reconnaissante à l'ensemble des enseignants, du département de Génie Civil de l'université Saad DAHLAB de Blida et de l'Université Hassiba BEN BOUALI de Chlef sans oublier les enseignants du département d'Informatique et en particulier son chef de département.

Je remercie l'ensemble de mes collègues du groupe béton à l'université de Sherbrooke pour les moments d'amitié partagés au laboratoire, par lesquels j'ai pu apprécier les aspects les plus agréables de la vie à l'étranger. Je remercie également Bahira ABDULRAHMANE pour l'aide amicale qu'elle m'a apportée durant mon séjour à Sherbrooke.

Enfin, je souhaite exprimer toute ma reconnaissance à mes parents, mon frère, mes sœurs et plus particulièrement ma charmante petite sœur Asmaa sans oublier Nadjia BENABDELMALEK et Sihem SAID MANSOUR que je considère comme membres de ma famille pour leur soutien continu et leur patience, même s'ils n'étaient pas à mes côtés pendant mes études au Canada. C'est aussi à eux que je dois en grande partie l'accomplissement de ce travail, par l'espoir et la confiance qu'ils ont toujours su me donner. Qu'ils trouvent ici un geste modeste de reconnaissance et de gratitude.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ.....	1
ABSTRACT.....	2
REMERCIEMENTS.....	3
TABLE DES MATIÈRES.....	5
LISTE DES FIGURES	7
LISTE DES TABLEAUX.....	9
LISTE DES ABRÉVIATIONS.....	11
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	13
 1. APPLICATION DES TECHNIQUES DE L'INFORMATIQUE SUR LE BÉTON	
1.1 Introduction.....	16
1.2 Bref historique des applications informatiques en technologie de béton...	16
1.3 Modèles de simulation pour les matériaux à base de ciment et béton	17
1.4 Applications des bases de données en technologie de béton.....	19
1.5 Intelligence d'artificielle.....	21
1.6 Applications de la technologie de CIKS sur le béton.....	28
1.7 Laboratoire virtuel d'essais sur ciment et béton	31
1.8 Systèmes et logiciels existants pour la formulation du béton	33
1.9 Conclusion.....	36
 2. CONCEPTION DE LA BASE DE DONNÉES POUR LES BÉTONS AUX AJOUTS	
2.1 Introduction.....	38
2.2 Méthodologie de collection et d'organisation des données.....	38
2.3 Conception de la base de données pour les bétons aux ajouts	41
2.4 Organisation de la base de données	51
2.5 Conclusion.....	52
 3. ANALYSE DES DONNÉES ET MODÉLISATION DES PROPRIÉTÉS DU BÉTON	
3.1 Introduction	54
3.2 Réseaux de neurones	54
3.3 Analyse en composante principales	56
3.4 Méthodologie de développement des modèles RN	59
3.5 Résultats et discussions	70
3.6 Comparaison avec les modèles de régression multiple.....	71

3.7 Exploitation des modèles RN	74
3.8 Conclusion.....	77
4. MODÉLISATION DE L'EFFICACITÉ DES AJOUTS DANS LE BÉTON	
4.1 Introduction	78
4.2 Concepts et notions théoriques	79
4.3 Modalités d'évaluation du coefficient d'efficacité	80
4.4 Revue sur la modélisation de l'efficacité des ajouts en béton	82
4.5 Évaluation de l'efficacité des ajouts par les réseaux de neurones	87
4.6 Influence du taux de substitution	91
4.7 Modèles Mathématiques	94
4.8 Conclusion.....	94
5. VALIDATION EXPÉRIMENTALE DES MODÈLES	
5.1 Introduction	96
5.2 Programme expérimental	96
5.3 Validation des modèles développés	105
5.4 Conclusion.....	113
6. CONCEPTION ET IMPLÉMENTATION DU SYSTÈME SAICBA	
6.1 Introduction.....	114
6.2 Développement du SAICBA	114
6.3 Composants de SAICBA	116
6.4 Implémentation de SAICBA.....	117
6.5 Exemple d'une session d'utilisation	124
6.6 Conclusion.....	125
CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS.....	126
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	130

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 Images en 2D et 3D d'une particule de ciment présenté par le modèle CEMHYD3D 11.	18
Figure 1.2 Base de données proposé sur les propriétés de ciment 30.	20
Figure 1.3 Organisation d'un system expert.....	22
Figure 1.4 Modélisation du neurone biologique	23
Figure 1.5 Distribution des articles publiés au JCCE utilisant le terme Neurones	25
Figure 1.6 Schéma du système de la logique floue.....	26
Figure 1.7 Algorithme génétique de base	27
Figure 1.8 Représentation des modules courants du logiciel de VCCTL [7].	32
Figure 1.9 Représentation d'un élément de microstructure [7].....	33
Figure 1.10 Représentation de la structure granulaire du matériau [98].	33
Figure 1.11 Architecture de système CAO pour l'optimisation de mélanges de béton [9].	36
Figure 2.1 Distribution des données suivant l'origine de l'ajout utilisé.....	39
Figure 2.2 Modèle entité-relation de la BDBA	42
Figure 2.3 Structure des tables de la BDBA.....	43
Figure 2.4 Page d'accueil du BDBA	47
Figure 2.5 Rechercher un document Texte	48
Figure 2.6 Rechercher sur les proportions	48
Figure 2.7 Rechercher sur les propriétés	49
Figure 2.8 Résultats de recherche	49
Figure 2.9 Affichage total du contenu de la BDBA	50
Figure 2.10 Introduire les informations sur les documents.....	50
Figure 2.11 Introduire les données sur les proportions et les propriétés des mélanges.....	51
Figure 3.1 Réseau de neurones multicouches	55
Figure 3.2 Méthodologie suivie pour l'analyse de données et modélisation.....	59
Figure 3.3 Valeurs propres et contributions des composantes à la variance	65
Figure 3.4 Variation du nombre des composantes principales avec VCP	69

Figure 3.5	Effet des taux de substitution de différents ajouts cimentaires sur l'ouvrabilité des bétons.....	75
Figure 3.6	Effet des taux de substitution de différents ajouts cimentaires sur la résistance à compression des bétons	76
Figure 4.1	Différentes classes d'activité selon le coefficient d'activité.....	80
Figure 4.2	Comparaison des coefficients d'efficacité du laitier à 28 jours	89
Figure 4.3	Comparaison des coefficients d'efficacité des cendres volantes à 28 jours	90
Figure 4.4	Comparaison des coefficients d'efficacité de la fumée de silice à 28 jours	90
Figure 4.5	Effet du taux de remplacement sur le coefficient d'efficacité à 2, 7, 28 et 90 jours.....	93
Figure 5.1	Évolution de la résistance à la compression des bétons étudiés en fonction du temps	104
Figure 5.2	Effet de l'entraineur d'air sur l'évolution de la résistance à la compression des bétons étudiés en fonction du temps.....	105
Figure 5.3	Confrontation "Modèles/Essais expérimentaux" des affaissement...	109
Figure 5.4	Confrontation "Modèles/Essais expérimentaux" des résistances à la compression	110
Figure 5.5	Variation du coefficient d'efficacité avec le rapport E/L pour les bétons aux différents ajouts	111
Figure 6.1	Architecture de SAICBA.....	116
Figure 6.2	Page d'accueil du SAICBA.....	118
Figure 6.3	Page d'accueil de la base de données.....	120
Figure 6.4	Fenêtre de prévision de l'ouvrabilité.....	120
Figure 6.5	Fenêtre de prévision de la résistance à la compression	121
Figure 6.6	Fenêtre de prévision du coefficient d'efficacité modèle RN.....	121
Figure 6.7	Fenêtre de prévision du coefficient d'efficacité modèle statistique...	122
Figure 6.8	Fenêtre de prévision composée	122
Figure 6.9	Fenêtre représentation graphique	123
Figure 6.10	Panneau du point A PROPOS du système	123
Figure 6.11	Panneau du point Commenter du système	124

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 Bases de connaissance et exemples typiques [86].....	30
Tableau 1.2 Exemple des composants et réponses [97].....	34
Tableau 2.1 Exemple des constituants et propriétés.....	40
Tableau 2.2 Gammes des constituants et propriétés des bétons aux Ajouts.....	40
Tableau 2.3 Propriétés physiques des agrégats et adjuvants et dimension des éprouvettes	41
Tableau 2.4 Compositions chimiques et surfaces spécifiques de Blaine des ciments et des ajouts utilisés	41
Tableau 2.5- Attributs du modèle entité-relation de la BDBA	43
Tableau 2.6- Explication des champs des tables de BDBA	44
Tableau 2.7- Organisation des données	52
Tableau 3.1- Corrélation entre les paramètres affectant l'ouvrabilité	61
Tableau 3.2 Corrélation entre les paramètres affectant la résistance à la compression.....	62
Tableau 3.3 Variances cumulatives des contributions des composantes	66
Tableau 3.4 Importances des variables selon les composantes	67
Tableau 3.5 Architecture et paramètres des modèles développés.....	71
Tableau 3.6 Coefficients de régression des modèles de régressions multiples ...	72
Tableau 3.7 Comparaison entre les modèles RNs et des régressions multiples..	73
Tableau 3.8 Données d'analyse de la résistance à la compression et l'ouvrabilité	74
Tableau 4.1 Expressions des coefficients d'efficacité obtenues à partir des relations de Boolomey, Feret et d'Abrams	81
Tableau 4.2 Historique des Recherches sur l'efficacité des additions minérales .	83
Tableau 4.3 Facteur d'efficacité fonction du taux de substitution des cendres volantes.....	84
Tableau 4.4 Architecture et paramètres du RN adoptés	88
Tableau 4.5 Valeurs des coefficients d'efficacité prédits des ajouts.....	92
Tableau 4.6 Coefficient de régression de chaque modèle développé.....	94
Tableau 5.1 Programme expérimental	97

Tableau 5.2	Composition chimiques et propriétés physiques du ciment et des ajouts	99
Tableau 5.3	Granulométrie complète des gros agrégats et du sable	99
Tableau 5.4	Composition des bétons étudiés	100
Tableau 5.5	Propriétés du béton à l'état frais et résistance à la compression ...	102
Tableau 5.6	Confrontation des affaissements des bétons	107
Tableau 5.7	Confrontation des résistances à la compression des bétons	108
Tableau 5.8	Confrontation des coefficients d'efficacité des différents ajouts	111
Tableau 6.1	Exemple d'utilisation.....	125

LISTE DES ABRÉVIATIONS

SIMB : Science Informatique du Matériau Béton
CEMHYD3D : Cement Hydration in three Dimension
NIST : National Institute of Standards and Technology
ACI : American Concrete Institut
BFRL : Building and Fire Recherche Laboratory
FHWA : Federal High Way Administration
VCCTL: Virtual Cement and Concrete Testing Laboratory
LCPC : Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
ASCE : American Society in Civil Engineering
IT: Information Technology
EG-ICE : European Group for Intelligent Computing in Engineering
ICONDA : International CONstruction DAtaase
RDA :Remote Database Access
IA : Intelligence Artificielle
BD : Bases de Données
SE : Systèmes Experts
RN : Réseaux de Neurones
LF : Logique Floue
AG : Algorithmes Génétiques
CIKS : Computer Integrated Knowledge System
COST : Computer Optimization Software Tool
HWYCON: Highway Concrete expert system
DURCON : DURable CONcrete expert system
JCCE : Journal of Computing in Civil Engineering
BHP : Béton à Haute Performance
VRCPT : Virtual Rapid Chloride Permeability Test
RSM : Response Surface Methodology
CAO : Conception Assisté par Ordinateur
SAICBA : Système Automatisé Intégré de Connaissance pour les Béton aux
Ajouts

BDBA : Base de Données pour les Bétons aux Ajouts
 BDSR : Base de Données Secondaire de Recherche
 BDSN : Base de Données Secondaire Numérique
 C : Ciment, L : Laitier, CV : Cendres Volantes,
 PN : Pouzzolane Naturelle, FS : Fumée de Silice
 AF : Agrégats Fins, GA : Gros Agrégats, E: Eau, SP : Superplastifiant,
 EA : Entraîneur d'air, T : Température, J : Jours
 ACP : Analyse en Composante Principale
 VCP : Variance Composante Principale
 MRNPO : Modèle Réseaux de Neurones de Prévion de l'Ouvrabilité
 MRNPRC: Modèle Réseaux de Neurones de Prévion de la Résistance à la
 Compression,
 MRNPCE : Modèle Réseaux de Neurones de Prévion du Coefficient d'Efficacité
 RNM-RP : Réseau de Neurones Multicouches à Rétro-Propagation
 RMNL : Régression Multiple Non-Linéaire
 SCE : Somme des Carrées d'Erreurs
 PCC : Pourcentage Cumulés des Composantes
 VCP : Variance des Composantes Principales,
 NCC : Nombre des Couches Cachées,
 NNCC : Nombre de Neurone dans chaque Couche Cachée,
 ITR : Nombre d'Itérations ou Cycles, E: Erreur, A : Apprentissage, T : Test
 BO : Bétons Ordinaires
 SSB : Surface Spécifique de Blaine
 CSA : Canadian Standard Association
 MV : Masse Volumique, TA : Teneur en Air, TB : Température de Béton,
 R : Coefficient de corrélation
 R^2 : Coefficient de détermination
 χ : Coefficient d'efficacité
 σ : écart type.

INTRODUCTION

1. Cadre général de l'étude

La science et la technologie du béton subissent un changement révolutionnaire dû aux développements de l'ordinateur et la technologie de l'information. Ces nouvelles techniques permettent aux chercheurs, ingénieurs, et praticiens de béton de développer, stocker, rechercher, intégrer et disséminer la connaissance sur tous les aspects du béton (formulation, mise en œuvre, inspection, prévision, réparation, et réutilisation).

La croissance rapide des systèmes informatisés tels que les modèles de simulation, les bases de données et les systèmes d'aide à la décision d'intelligence artificielle tels que les systèmes experts, les réseaux de neurones et les algorithmes génétiques ont eu un impact très important sur la technologie du béton [1-4]. En outre, l'intégration de ces systèmes dans un seul système peut former un Système Automatisé Intégré de la Connaissance (CIKS : Computer Integrated Knowledge System). Dans ce contexte, plusieurs CIKS sont utilisées de façon intensive pour de nombreux domaines d'applications. En génie civil, peu de CIKS ont été développés par exemple le CIKS pour la formulation de béton à hautes performances [5], ou pour estimer les coûts des projets de construction [6]. Par conséquent, l'idée de laboratoire électronique ou virtuel, qui permet de gâcher du béton dans un environnement virtuel (bureau) et de prévoir exactement ses propriétés et ses performances mécaniques a été développée par Bullard et al. [7]. Cependant tous ces systèmes et logiciels sont valables pour des spécifications et des normes intrinsèques à certains pays [8, 9]. Dans ce contexte, le développement d'un système universel est nécessaire pour couvrir la grande variété des bétons, en particulier le béton «vert» constitué d'ajouts cimentaires qui permettent de préserver l'environnement et de contribuer au développement durable. En fait, plusieurs travaux ont été menés et d'autres sont en cours sur l'effet des ajouts cimentaires sur les propriétés du béton. Les résultats de ces travaux expérimentaux nécessitent une collecte et une organisation dans des

bases de données sous un format spécifique et facile pour les utilisateurs. Le développement d'un tel système flexible menu d'une base de données pour les bétons aux ajouts et permettant de réduire significativement le nombre d'essais aux laboratoires est l'objet de ce travail.

2. Objectifs de recherche

L'objectif principal de cette étude est le développement d'un prototype de Système Automatisé Intégré de Connaissance pour les Bétons aux Ajouts (SAICBA) pour prévoir l'ouvrabilité et la résistance à la compression du béton contenant des ajouts cimentaires (laitier, cendres volantes, fumée de silice et pouzzolane naturelle) à partir de la composition du béton. Le système procède ainsi pour prévoir les coefficients d'efficacité de ces ajouts dans le béton. Le système intègre une base de données, des modèles réseaux de neurones et des modèles mathématiques.

Ainsi les objectifs spécifiques consistent à:

- construire une Base de Données pour les Bétons aux Ajouts (BDBA) très globalement applicable, facilement consultable et utilisable par tous les chercheurs de génie civil;
- explorer le potentiel de combinaison de l'approche statistique de l'Analyse en Composantes Principales (ACP) pour l'analyse de l'ensemble de données avec l'approche réseaux de neurones (RN) dans l'application à la prévision automatique des propriétés du béton avec ajouts;
- comparer la sensibilité des facteurs affectant l'utilisation de l'approche de régression multiple et l'approche des réseaux de neurones;
- maître en évidence l'apport des réseaux de neurones dans la modélisation de l'efficacité des ajouts cimentaires en terme de coefficients d'efficacité lorsqu'ils sont incorporés dans le béton;
- développer de nouveaux modèles mathématiques basés sur des approximations à une étape poste modélisation par des réseaux de neurones;
- la mise en place d'un système cohérent simple par l'intégration de la base de données et l'ensemble des modèles bien validés ainsi développés.

3. Plan de travail

Cette thèse est structurée en six chapitres:

Après une introduction générale exposant la problématique et définissant les objectifs de l'étude et le plan de travail, le premier chapitre présente une synthèse bibliographique sur les développements récents des technologies de l'information et leurs exploitations dans le domaine de la technologie du béton.

Le deuxième chapitre est consacré à l'étape la plus importante dans la conception du système SAICBA, à savoir la création d'une base de données automatisée pour les bétons aux ajouts.

Dans le troisième chapitre, la méthodologie d'analyse de données de la BDBA par la méthode analyse en composante principale est exposée. Ensuite, la combinaison de cette méthode avec l'application du modèle réseaux de neurones à régularisation Bayesienne pour le développement des modèles de prévision des propriétés de béton est proposée. Enfin, une évaluation comparative entre ces réseaux et les modèles de régression multiple a été présentée à la fin de ce chapitre.

Le quatrième chapitre, présente la modélisation de l'efficacité des ajouts dans le béton par les RNs ainsi que l'apprentissage, le test et la validation de ces modèles. Des modèles mathématiques à l'issus des approximations faites par les modèles RNs développés sont élaborés.

Le cinquième chapitre est consacré à la confrontation des données de sortie de l'ensemble des modèles développés avec des résultats d'essais obtenues par un programme expérimental réalisé au laboratoire.

Le sixième chapitre, est dédié quant à lui à la discussion de la conception et l'implémentation du système SAICBA par intégration et regroupement de la base de données et les différents modèles développés dans un seul système cohérent, simple et menu d'une interface utilisateur conviviale.

Enfin, les principales conclusions dégagées de cette étude, des perspectives et des recommandations pour des futurs travaux sont données à la fin de cette thèse.

CHAPITRE 1

APPLICATION DES TECHNIQUES DE L'INFORMATIQUE SUR LE BÉTON

1.1. Introduction

Le développement rapide des ordinateurs et des technologies de l'information fournit des moyens pour l'accès rapide à une grande variété d'information et des méthodes pour modéliser des systèmes complexes. Ces développements sont devenus une partie essentielle dans presque chaque discipline. Les modèles de simulation, les bases de données, les systèmes d'aide à la décision et d'intelligence artificielle (systèmes experts, réseaux de neurones, logique floue, et algorithmes génétiques) ont été rendus plus accessibles. Ces progrès ont attiré de nombreux chercheurs qui ont travaillé et continuent à travailler pour faire progresser l'emploi de ces techniques qui couvre un large éventail d'applications dans le génie civil.

Ce chapitre présente une synthèse bibliographique sur les contributions et les apports de ces techniques sur la technologie de béton. Une perspective historique sur les recherches faites et une revue de l'application des techniques d'intelligence artificielle sur le béton sont présentées. Les développements des systèmes automatisés intégrés des connaissances, l'approche des systèmes virtuels, et les logiciels de formulation de béton sont aussi discutés.

1.2. Bref historique des applications informatiques en technologie de béton

Le béton est un matériau composite souvent regardé comme un système complexe et imprévisible. En raison de cette complexité et ces aspects aléatoires, des méthodes analytiques pour quantifier la relation entre sa microstructure et ses propriétés sont généralement éliminés dès le début parce qu'elles ne reposent pas sur un corpus scientifique à la fois solide et explicite [1]. Une alternative prometteuse était portée sur l'emploi des modèles à base scientifique sous la

forme de simulations sur ordinateur. Cette simulation appliquée au béton s'appelle la *Science Informatique du Matériau Béton* (SIMB) [1] (in English : Computational Materials Science of Concrete (CMSC)). Ensuite la SIMB s'est consolidée avec le développement du premier modèle de l'hydratation de la pâte de ciment CEMHYD3D [10]. En se basant sur ce modèle, le National Institute of Standards and Technology (NIST) a lancé un défi pour construire un laboratoire virtuel d'essais sur le ciment et le béton (VCCTL:Virtual Cement and Concrete Testing Laboratory), basé sur des modèles bien validés [7]. Parallèlement, d'autres modèles d'aide à la formulation des bétons ont été proposés permettant la prévision de différentes propriétés et la comparaison aux résultats des essais expérimentaux. A cette fin, le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) a proposé un ensemble de modèles résumés dans un ouvrage de synthèse assorti d'un logiciel pour les praticiens pour la formulation des bétons [8]. En outre, d'autres chercheurs se sont orientés vers l'application des techniques de l'intelligence artificielle (système expert, réseaux de neurones, logique floue et algorithmes génétiques) pour le développement de modèles sous forme de prototype de système [2, 4].

En plus, des travaux de collaboration entre les expérimentateurs et les modélisateurs pour développer de tels systèmes ont été réalisés permettant ainsi à renforcer des liens entre différentes communautés de recherche comme l'American Society in Civil Engineering (ASCE), l'Information Technology (IT) et l'European Group for Intelligent Computing in Engineering (EG-ICE) [3].

1.3. Modèles de simulation pour les matériaux à base de ciment et béton

Pendant les trois dernières décennies, plusieurs modèles informatiques basés sur la SIMB ont été développés pour les matériaux cimentaires. Avec le développement l'éventail des outils informatiques actuels, les chercheurs sont poussés au perfectionnement et au développement de nouveaux modèles pour répondre aux différents problèmes liés à la caractérisation des matériaux aussi bien qu'aux propriétés à l'état frais et durci et à la durabilité du béton.

D'abord, la plupart des modèles sur le ciment s'intéressaient principalement à l'hydratation des silicates et des aluminates. Cependant, peu de modèles sur l'hydratation des ciments Portland ont été rapportés. Le modèle le plus avancé, le

plus robuste et le plus étendu pour l'hydratation et le développement de la microstructure du ciment Portland est le modèle CEMHYD3D développé par Bentz [11]. Le développement des modèles sur l'hydratation du ciment prend actuellement un chemin double: l'amélioration des bases scientifiques de la chimie et la physique, y compris la cinétique de l'hydratation, et l'effet de l'environnement (température, humidité relative, etc.) et l'amélioration et/ou modélisation des systèmes d'hydratation de béton contenant des ajouts minéraux comme le laitier et les cendres volantes [12, 13]. La figure 1.1 montre respectivement l'image en 2D, produite par microscopie électronique à balayage, illustrant les diverses phases chimiques d'une particule de ciment et une image en trois dimensions 3D montre les particules de ciment virtuelle mélangés dans l'eau juste avant le début de l'hydratation. L'image est un cube de 100 μm de chaque côté.

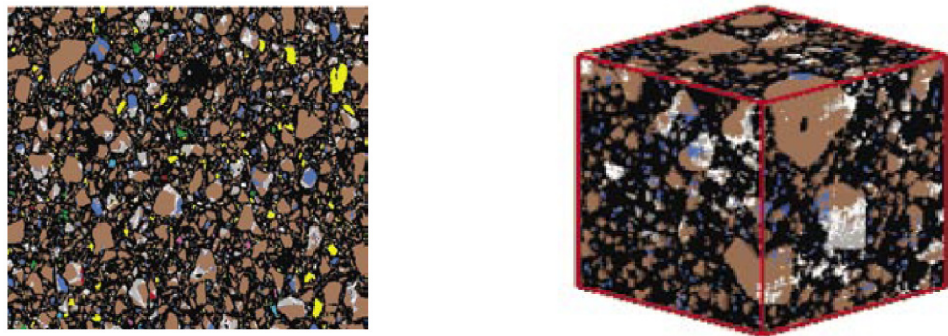


Figure 1.1 : Images en 2D et 3D d'une particule de ciment présenté par le modèle CEMHYD3D [11].

La prévision des propriétés élastiques des matériaux à base de ciment dépend du nombre de phases présentes, de la microstructure et des valeurs des modules d'élasticité pour chaque phase [10]. Pour le ciment portland, un modèle à éléments finis pour calculer le module élasticité est valable pour des prévisions à long terme [14]. Pour le béton, la prévision du module d'élasticité intrinsèque est utilisée pour des simulations de la carbonatation du béton [15]. Récemment, Bentz [16] présente un état d'art sur la modélisation du comportement viscoélastique et la prévision précise des modules d'élasticité des bétons.

La prévision des propriétés rhéologiques du béton à partir de sa formulation est basée sur plusieurs étapes selon l'échelle pates-mortier-béton pour déterminer l'influence des adjuvants chimiques et des ajouts cimentaires [17]. La prévision des propriétés du béton par la simulation numérique a été couplée aux mesures de la rhéologie expérimentale sur le mortier et/ou la pâte de ciment [18]. La modélisation du comportement rhéologique du béton frais par l'approche des éléments finis a été appliquée sur un cas élasto-visco-plastiques [19].

La prévision des propriétés mécaniques des bétons, et plus particulièrement la résistance à la compression est très importante. Pour le béton aux jeunes âges, la littérature met deux méthodes quant au développement de la définition de la fonction de maturité, qui par la suite conduit à l'établissement d'une relation résistance-maturité introduite pour la première fois par Saul et Nurse en 1949. Plus tard, D'Aloia et Chanvillard [20] décrivent un modèle pour la prévision de la résistance à la compression au jeune âge d'un béton par l'application de la méthode du temps équivalent. Concernant la prévision de la résistance à 28 jours des bétons, plusieurs contributions, modèles et méthodes ont été développés à partir de la relation de Féret ou de Bolomey qui est une approximation linéaire de la formule de Féret [21]. D'autres modèles ont été développés en se basant sur d'autres approches [22, 23]. Des modèles pour la modélisation numérique du retrait et du fluage du béton sont décrits également [24, 25].

La prévision des paramètres de durabilité est très complexe. Plusieurs modèles numériques ont été développés pour l'estimation des paramètres de durabilité tels que la perméabilité à l'eau, la diffusion des chlorures et l'attaque des sulfates [26-28].

1.4. Applications des bases de données en technologie de béton

Une quantité énorme de résultats de recherches est produite chaque année sur la technologie de béton. Une base de données peut efficacement stocker et mettre à jour ces résultats et permettre une meilleure optimisation de la recherche. Cependant, développer ou concevoir une base de données pour le béton exige un effort considérable et des qualifications spécialisées. Ainsi, l'utilisation d'Internet a créé une nouvelle dimension pour l'usage des bases de données [29].

Elle a rendu nécessaire le développement des méthodes conformes aux normes pour permettre l'interopérabilité entre les bases de données existantes. Dans ce contexte, des considérations importantes dans le développement des bases de données pour l'étalonnage des formats, de la qualité et de la fiabilité des données sont à prendre en charge. Également, des normes, des guides ou des directives sur les formats de données dans une base de données pour les propriétés mécaniques du béton ont été proposés [30, 31]. Les premières bases de données électroniques disponibles dans le secteur du béton étaient de nature bibliographiques par exemple la base de données ICONDA (CIB's International CONstruction DAtabase) qui couvre la littérature sur la technologie de construction [32]. La figure 1.2 montre un exemple d'un système de base de données des propriétés des ciments qui a été mis en application au NIST.

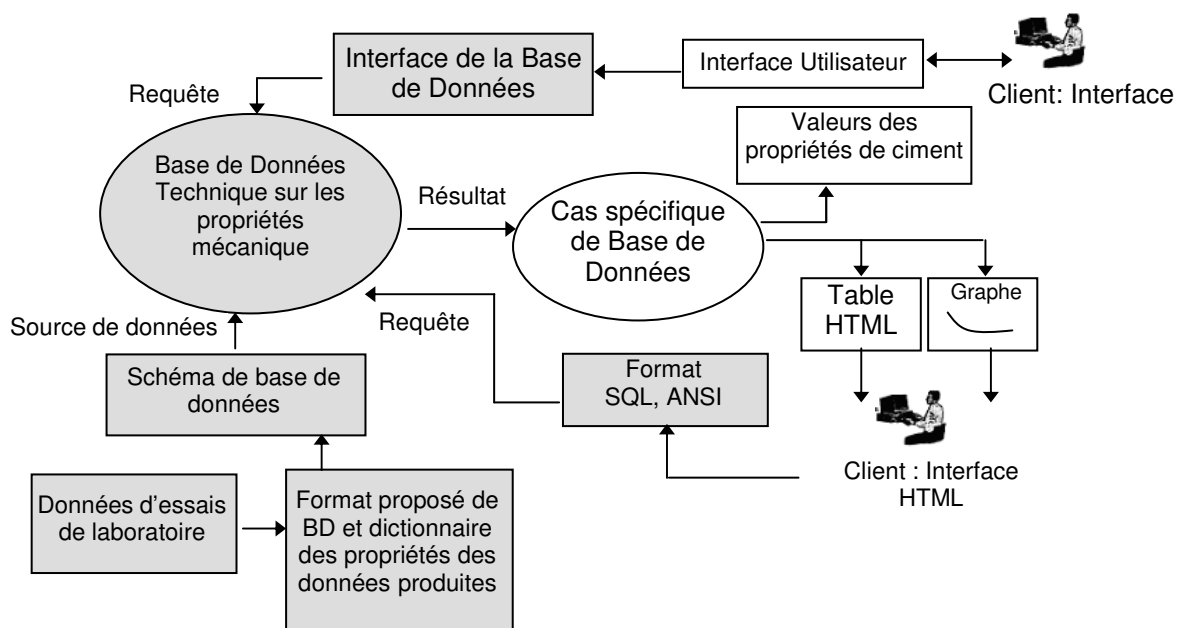


Figure 1.2 : Base de données proposée sur les propriétés de ciment [30].

Une des premières tentatives de rassembler des données numériques de recherche dans le secteur du béton est celle menée à l'université de Californie de Nord sur les propriétés du béton à haute performance [33]. En outre, des bases de données d'une structure plus complexe ont été développées ces dernières années comme celles sur la composition et les propriétés mécaniques du béton exposé à un environnement marin [34], et les bétons aux ajouts minéraux [35]. L'utilisation

de norme d'accès aux bases de données à distance RDA (Remote Database Access) [36] permet de développer des bases de données réparties (BDR). Parmi ces bases de données, il y a celles qui sont intégrées avec des systèmes incorporant des techniques de l'intelligence artificielle dans le but de développer des bases de données intelligentes ou déductives (BDD) [37].

1.5. Intelligence Artificielle

La technologie de l'intelligence artificielle (IA) fournit des techniques de développement de programmes informatiques pour la simulation de la résolution de problèmes par les humains. Parmi ces techniques, les Systèmes Experts (SEs), les Réseaux de Neurones (RNs), la Logique Floue (LF) et les Algorithmes Génétiques (AGs). La combinaison synergique de ces techniques par des modèles intelligents et des outils informatiques dans un même environnement fait apparaître des systèmes automatisés intégrés de la connaissance (CIKS). Ces systèmes intégrés par ordinateurs ont été développés pour mettre en évidence l'importance de la tâche d'analyse et de traitement des modèles qui sont nécessaires pour le développement de ces systèmes. Le perfectionnement, l'utilisation et la consultation croissante de ces systèmes mènent vers le développement de nouveaux systèmes appelés Systèmes d'Essais Virtuels opérationnels dans des laboratoires virtuels d'application potentielle concerne tous les domaines de l'ingénierie. En génie civil, ils sont considérés comme un outil utile, puissant et capable de résoudre plusieurs types de problèmes de prévision et en particulier en technologie de béton.

1.5.1. Systèmes experts pour les matériaux à base de ciment et béton

Les systèmes experts sont des programmes informatiques conçus pour modéliser la capacité de résolution de problèmes des experts humains. Ils utilisent l'information observée ou disponible pour produire des connaissances pertinentes des experts et permettent la résolution des problèmes par le raisonnement qualitatif en utilisant les connaissances heuristiques de l'expert humain. Ils se composent de deux éléments principaux: la base de connaissances et le moteur d'inférence (Fig. 1.3). La plupart de ces systèmes sont à base de règles qui reposent sur des fondements mathématiques [38].

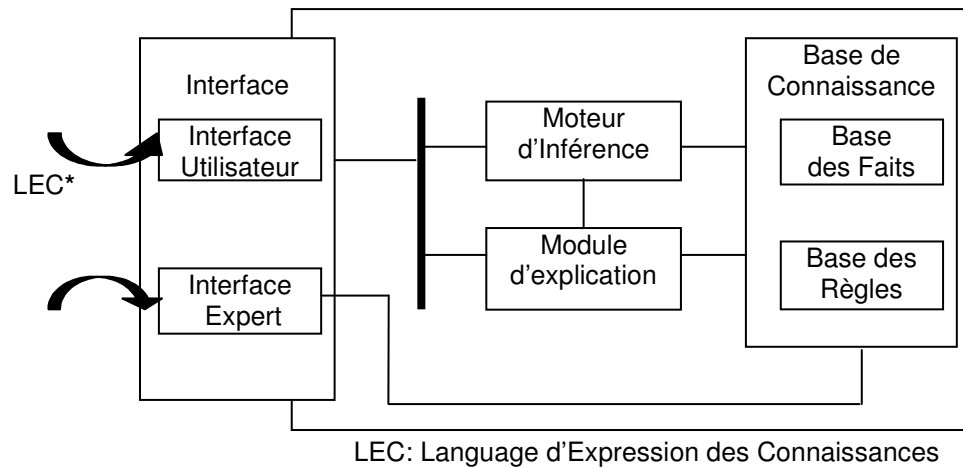


Figure 1.3 : Organisation d'un system expert.

Les systèmes experts sont appliqués dans plusieurs domaines de génie civil en particulier pour le diagnostique, le choix, la planification, le contrôle et la conception assistée par ordinateur. Une des premières applications sur le béton était portée sur la sélection des constituants du béton [39]. Le système HWYCON [40] a été développé pour aider les inspecteurs de route à identifier les causes des désordres dans les trottoirs de route et les ponts en béton et en recommandant l'action optimale de réparation. Le système DURCON (DURable CONcrete) a été développé dans les années 80 pour présenter la connaissance contenue dans le guide de l'institut américain du béton durable [41]. D'autres systèmes experts ont été développés pour la formulation d'un béton durable aux agressions chimiques [42, 43]. La technique des systèmes experts a été adoptée pour la prévision de résistance des bétons et aussi pour la formulation des bétons de hautes performances [44, 45].

1.5.2. Application des réseaux de neurones en technologie de béton

Les réseaux de neurones ont été développés pour modéliser le cerveau humain (Fig.1.4). Ils ont certaines caractéristiques puissantes dans la connaissance et le traitement des informations et sont capables d'apprendre et de généraliser à partir d'exemples et d'expériences. Cela rend les RNs un outil puissant pour résoudre certains problèmes complexes [46].

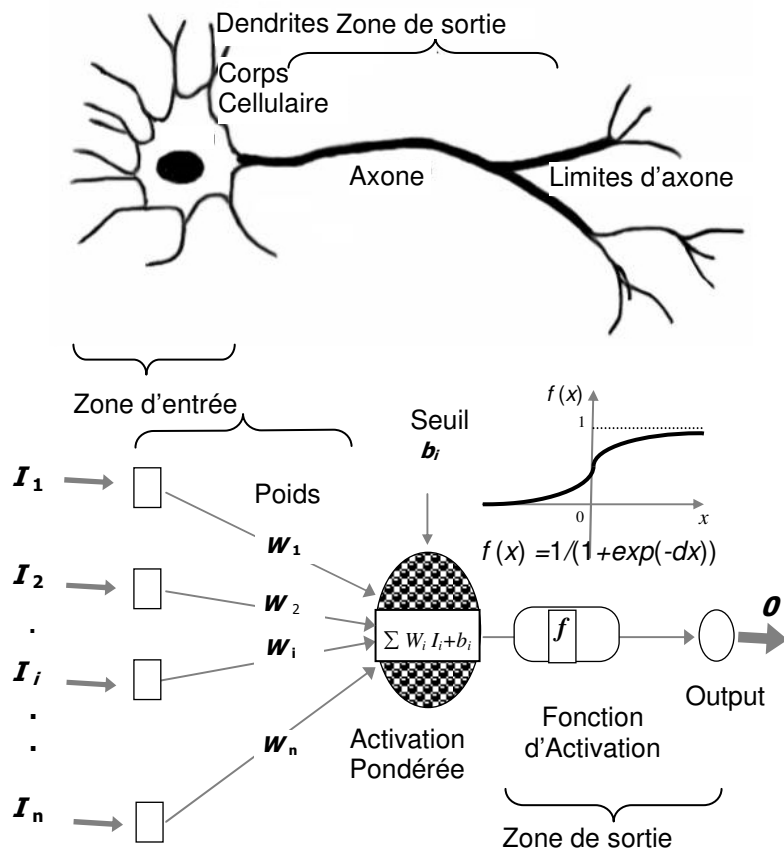


Figure 1.4 : Modélisation du neurone biologique.

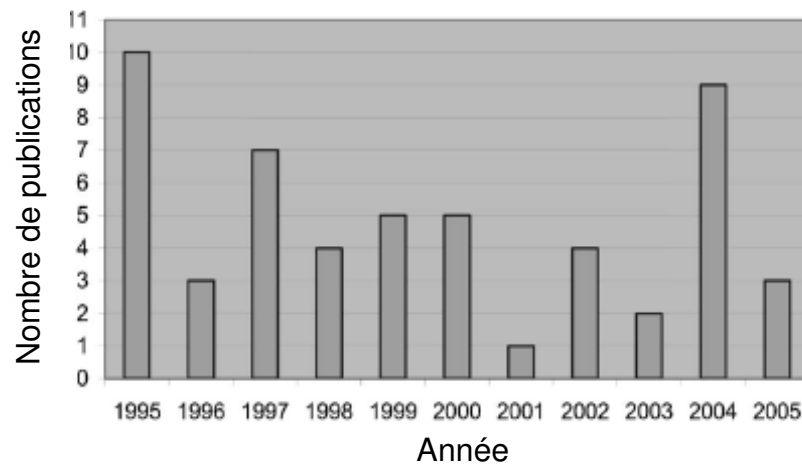
Ces dernières années, il y a eu un intérêt croissant pour les RNs. Ces derniers trouvent des applications presque dans toutes les branches de la science et de l'ingénierie pour résoudre des problèmes d'optimisation, de classification, d'identification, et de prévision. Les applications des RNs en génie civil ont connu une large utilisation vers la fin des années 1980. Plusieurs travaux de recherches ont montré clairement le potentiel et les possibilités d'application des modèles de RNs en résolvant des problèmes de structures, de géotechnique et de béton. La majorité de ces modèles ont employé la classe la plus populaire des RNs, celle du réseau multicouches à Rétropropagation [47, 48].

Dans le domaine de la technologie du béton, plusieurs recherches basées sur des systèmes de RNs ont été développées. Ces applications concernent principalement la formulation [49], l'hydratation [50], l'ouvrabilité [51], la résistance à la compression [52, 53], le module d'élasticité [54] et la durabilité

du béton [55-57]. Certains auteurs se sont intéressés seulement à la prévision de la résistance à la compression ou à la prévision de l'ouvrabilité alors que d'autres ont proposé des modèles qui prévoient à la fois la résistance et l'ouvrabilité sous forme de modèles d'acquisition de connaissance incluant aussi d'autres types de béton [58].

Durant la dernière décennie, les réseaux de neurones artificiels ont été un centre primaire d'intérêt pour la recherche informatique dans le génie civil. La majorité des applications sont publiées dans le JCCE (Journal of Computing in Civil Engineering) (Fig. 1.5). Dans la mesure où ils ont été appliqués, ils ont fourni les solutions commodées et souvent fortement précises aux problèmes de toutes les branches du génie civil. Cependant, l'ampleur de cette application n'a rarement osé au delà des problèmes rudimentaires tels que la modélisation de simples fonctions et de modèle de classification. Afin de réaliser la pleine capacité de cette technologie, comme promise par les systèmes de neurones biologiques, les chercheurs doivent prendre le défi de développer des réseaux plus complexes que ceux développées jusqu'ici. La complexité, dans ce sens, n'exige pas une simple augmentation du nombre de neurones, mais également une structure riche et évoluée du réseau, comme ceux trouvés dans les systèmes de neurones biologiques. Les approches prometteuses au développement de ces structures sont les algorithmes génétiques et les méthodes probabilistes [59].

Actuellement, plusieurs chercheurs s'orientent vers l'adoption de ces approches pour la construction des systèmes plus sophistiqués par combinaison des RNs avec les SEs [60], les réseaux de neurones artificiels probabilistes [61], et réseaux de neurones bayésiennes [62], la logique floue (LF) [63] et les algorithmes génétiques (AGs) [64]. Également, Lee [65] a proposé une architecture modulaire composée de cinq réseaux de neurones artificiels pour la prédiction de la résistance du béton de 1 à 28 jours. Dans une autre application, un modèle de réseau de neurones flous est utilisé pour évaluer l'effet de la composition des cendres volantes pour la suppression des Réactions Alcalis Granulats (RAG) [66].



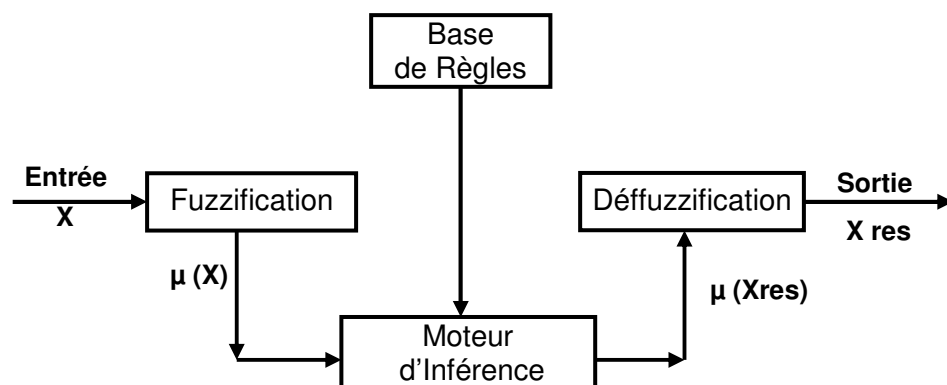
1.5 : Distribution des articles publiés au JCCE utilisant le terme " Neurones " [59].

1.5.3. Applications de la logique floue en génie civil

La logique floue est une technique utilisée en intelligence artificielle. Elle s'appuie sur la théorie mathématique des ensembles flous qui a été formalisée par Lotfi Zadeh [67] en 1965 en vue de pallier les limitations dues aux incertitudes des modèles classiques à équation différentielle. Elle est utilisée dans des domaines aussi variés pour modéliser les connaissances imprécises et incertaines [68]. La mise en œuvre d'une commande floue fait apparaître trois grands modules (Fig. 1.6). Le premier module traite les entrées du système. Dans ce module, un univers de discours, un partitionnement de cet univers en classes pour chaque entrée, et des fonctions d'appartenance pour chacune de ces entrées sont définis. Cette étape est appelée *fuzzification*. Le deuxième module consiste en l'application de règles de type «Si...alors...». Ce module est constitué d'une *base de règles* qui inclue toute les relations floues possibles entre les entrées et les sorties et d'un *moteur d'inférence* qui permet le calcul. Le troisième et le dernier module décrit l'étape de défuzzification qui est la transformation inverse de la première. C'est à dire une conversion des résultats floue aux résultats réels par des méthodes de défuzzification.

Les premières applications de la logique floue en génie civil ont été réalisées par l'industrie cimentaire pour un contrôle intelligent du broyage des

fours de cimenterie [69]. En outre, des problèmes structurels ont été analysés par des procédures de probabilités de la logique floue comme la prévision des courbes de contraintes-déformations de béton aux fibres sous compression [70], et la détection non destructive des défauts dans les structures en béton [71]. Plusieurs applications ont été faites pour le développement des modèles par la logique floue pour la prévision de la résistance à la compression du ciment [72] et des bétons contenant des cendres volantes [73]. La prévision du module d'élasticité d'un béton ordinaire et d'un béton à haute résistance par la logique floue a été aussi examinée [74]. Par ailleurs, la combinaison des réseaux de neurones artificiels et la logique floue, a été largement utilisé dans de nombreux domaines d'applications. Parmi ces applications, un modèle pour la prévision de la résistance à la compression de bétons contenant des cendres volantes à 7, 28 et 90 jours a été développé [75].



Note. x représente le vecteur des entrées, x_{RES} celui des commandes, $\mu(x)$ et $\mu(x_{RES})$ les fonctions d'appartenances correspondantes.

Figure 1.6 : Schéma du système de la logique floue.

1.5.4. Application des algorithmes génétiques en génie civil

Les algorithmes génétiques (AG) sont des méthodes d'optimisation de fonctions. Ces algorithmes s'inspirent de l'évolution génétique des espèces, schématiquement, ils copient de façon extrêmement simplifiée certains comportements des populations naturelles [76]. Ils ont été introduits la première fois dans les années 1975 par John Holland en partant des systèmes évolutifs

dans son livre *Adaptation in Natural and Artificial Systems* [76]. Leur but est obtenir une solution approchée en un temps correct à un problème d'optimisation lorsqu'il n'existe pas (ou qu'on ne connaît pas) de méthode exacte pour le résoudre en un temps raisonnable.

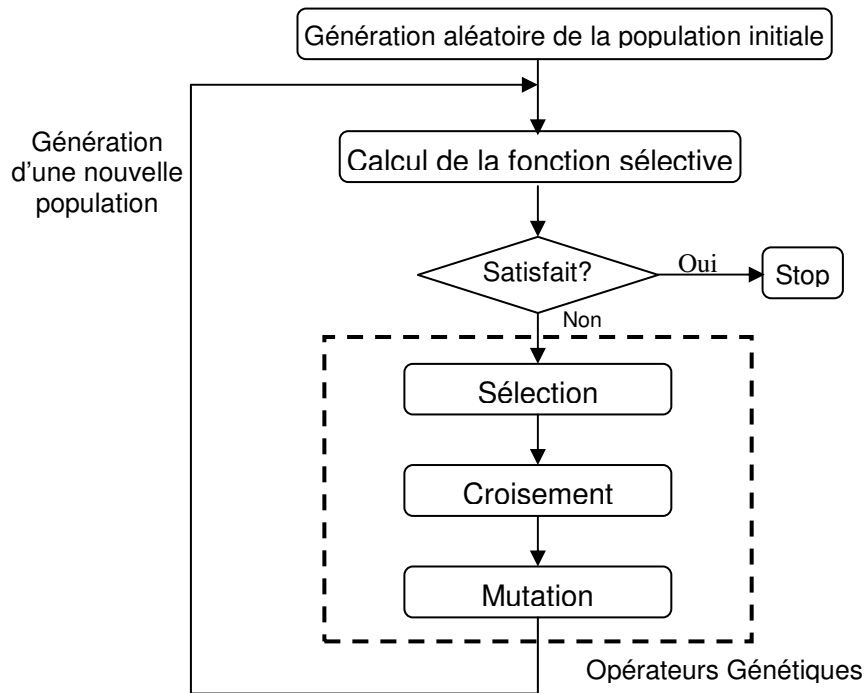


Figure 1.7 : Algorithme génétique de base

Ainsi, ces techniques reposent sur l'évolution d'une population de solutions qui sous l'action de règles précises optimisent un comportement donné, exprimé sous forme d'une fonction, dite *fonction sélective* (*fitness function*) ou *adaptation à l'environnement* [77]. Les applications des AGs sont multiples dans les différents domaines de l'ingénierie [78, 79], optimisation de fonctions numériques très compliquées, traitement d'image, contrôle de systèmes industriels, apprentissage des réseaux de neurones, optimisation des réseaux, des circuits VLSI, etc. La figure 1.7 illustre les différentes opérations qui interviennent dans un algorithme génétique de base.

L'approche des algorithmes génétiques a été utilisée avec succès dans plusieurs applications de l'ingénierie. Toutefois, ce n'est que récemment que les AGs ont été utilisés dans les recherches d'optimisation sur le béton. Plusieurs

chercheurs se sont intéressés à ces algorithmes et ils ont trouvé que les résultats obtenus en utilisant ces techniques sont favorables avec ceux des autres méthodes, et en bon accord avec les résultats expérimentaux. Nehdi et al [80] ont proposé un modèle basé sur la programmation génétique pour le calcul du cisaillement des poutres renforcées par des fibres de carbone. Dans leur application, Castilho et al. [81] ont utilisé une version modifiée des AGs comme une méthode d'optimisation pour minimiser les coûts de fabrication de poutres en utilisant des poutrelles en béton précontraint. La technique des algorithmes génétiques a également été utilisée dans des recherches sur le béton pour modéliser la résistance à la compression des mortiers, et la formulation d'un mélange de béton ordinaire, de hautes performances, et à l'optimisation des agrégats dans le béton [82-84]. Les algorithmes génétiques ont récemment été utilisés comme des techniques d'optimisation des réseaux de neurones (GA-RN) [85]. Actuellement, plusieurs chercheurs s'orientent vers l'adoption des approches de l'IA pour la construction de nouveaux systèmes plus sophistiqués par combinaison des ces approches pour former les systèmes intégrés.

1.6. Applications de la technologie de CIKS sur le béton

Un système intégré automatisé basé sur la connaissance (*Computerized Integrated Knowledge based System* : CIKS) est un système intelligent automatisé intégré de base de connaissance fournissant la connaissance requise qui est le plus souvent une combinaison de la connaissance heuristique et empirique pour résoudre des problèmes complexes. Il inclue des Bases de Données (BD), des modèles mathématiques et de simulation, des systèmes d'Intelligence Artificielle (IA), des guides, des manuels, des normes et des codes. Pour qu'un CIKS soit opérationnel, il faut définir son but et déterminer ses utilisateurs prévus ; identifier et développer son architecture ; développer un modèle d'information ; développer un prototype de système ; et établir un système de maintenance et des méthodes pour son entretien.

Le terme *Base de Connaissance* (BC) dénote n'importe quelle entité qui contient la connaissance, y compris les bases de données, les modèles mathématiques et de simulation, les systèmes d'intelligence artificielle, les guides, les normes et les codes. Quelques bases de connaissance typiques pour le Béton

à Haute Performance (BHP) sont énumérées au tableau 1.1. L'*Intégration* signifie que la connaissance et les données s'écoulent automatiquement à travers des interfaces, c.à.d. d'une base de connaissance à l'autre et par une interface utilisateur graphique. Dans un système complètement intégré, le système obtient toute information nécessaire sur le problème spécifique (application), pendant une session interactive avec l'utilisateur, et les recommandations ou les conclusions sont automatiquement présentées à l'utilisateur. Pour répondre à certains dispositifs désirés d'un CIKS, il faut qu'il soit *ouvert*, dans lequel l'exécution est indépendante de l'ordinateur et du système, *interactif*, avec une interface utilisateur graphique, *capable* d'acquérir la connaissance et les données des systèmes répartis, *assimile* facilement les nouvelles connaissances, et avoir une architecture entièrement intégrée qui fournit le transfert automatique de la connaissance à travers des interfaces des systèmes [86]. Le développement d'un CIKS implique les étapes principales suivantes:

- il faut définir le but du système, identifier quels problèmes seront adressés, et déterminer quels sont les utilisateurs prévus;
- identifier une architecture pour le système, facilitée avec les avancements rapides en technologie de l'information comme l'architecture des systèmes répartis;
- développer un modèle de l'information, qui exige l'identification du type de la connaissance qui sera incluse, de sa façon de présentation, d'échange, et d'utilisation ou d'interprétation;
- développer un système de prototype par les utilisateurs potentiels. Ces derniers font périodiquement des changements recommandés sur ce système. Ceci implique plusieurs cycles avant qu'un système opérationnel ne soit produit;
- établir un système de maintenance pour l'entretien du système par l'incorporation périodique de nouvelles connaissances car la réalisation d'un CIKS opérationnel est un processus itératif et un effort continu pendant la vie du système.

La technologie de CIKS est appliquée sur le béton par le développement de plusieurs systèmes de prototypes. Un prototype pour prévoir la durée de vie des structures en béton armé dans un milieu agressif (présence de chlorures) a été développé [87]. Dans le laboratoire de recherche Building and Fire Recherche

Laboratory (BFRL) au NIST, un intérêt particulier est porté sur le développement d'un système pour fabriquer un béton de haute performance (BHP) utilisable et durable [88]. Ce système est amélioré et mis à jour périodiquement d'une part, par la diffusion de données sur les types, les propriétés, et les sources de matériaux de construction disponibles sur le marché, et d'autre part par l'intégration de nouveaux systèmes qui sont actuellement disponibles tels que le laboratoire virtuel d'essais de ciment et de béton (VCCTL) [7]. Ce dernier constitue un défi scientifique en technologie de béton pour représenter la science informatique du matériau béton du fait qu'il est directement accessible sur Internet. Dans d'autres applications, Kurihara [89] a proposé un système intégré par ordinateur de la connaissance pour aider à la conception des matériaux de construction de hautes performances. Ainsi, Jrade et Alkass [6] ont élaboré un CIKS pour estimer les coûts de projets de constructions.

Tableau 1.1 : Bases de connaissance et exemples typiques [86]

Base de connaissance	Exemples typiques
Bases de Données	Constituants de béton, proportions de mélange, propriétés de béton
Modèles	Simulation des propriétés de transport, de durée de vie, de conception de mélange
Systèmes Experts	Durabilité et traitement de BHP, contrôle de qualité, diagnostic de béton détruit
Réseaux de neurones	Prévision des propriétés de BHP, analyse des images, diagnostique
Vidéos, Cours	Test, traitement et inspection
Directives	Traitement de BHP, essai de résistance sur BHP
Méthodes de Test	Essais sur les propriétés de transport et mécaniques, la durabilité, et le contrôle
Manuels	Propriétés et compositions des constituants de BHP
Livres et Rapports	Monographie électronique sur le ciment et le béton, rapports de recherche sur BHP

1.7 Laboratoire virtuel d'essais sur ciment et béton

En janvier 2001, la collaboration entre trois laboratoires de recherches au NIST (Building Fire Research Laboratory: BFRL, Information Technology : IT, et Material Science and Engineering : MSE) a abouti à la création et à l'établissement d'un nouveau laboratoire d'essais virtuel sur le ciment et le béton (Virtual Cement and Concrete Testing Laboratory : VCCTL). Ce laboratoire virtuel permet de réduire le nombre d'essais physiques sur le béton, pour le contrôle de la qualité ou pour des essais de recherche et de développement [7].

L'objectif principal de ce laboratoire est de développer un système d'essais virtuels, en utilisant une suite de modules intégrés dans un logiciel opérationnel sur Internet, pour la simulation de l'hydratation et de la microstructure, y compris la prévision de nombreuses propriétés physiques et mécaniques des ciments et des bétons basé sur la connaissance détaillée de la microstructure des matières premières bien-caractérisé, les conditions de cure, et les facteurs environnementaux (Fig. 1.8). Le développement des modèles intégrés au VCCTL est basé sur l'approche de la microstructure en 3D. Cette microstructure est obtenue par une résolution spatiale au niveau de chaque sous-particule sur des éléments de faible volume $1 \mu\text{m}^3$ (Fig. 1.9).

Le VCCTL incorpore comme partie principale, plusieurs modèles sophistiqués de science des matériaux. Dans ce qui suit, nous fournissons les noms, les sites web et les descriptions d'un certain nombre d'outils disponibles sur VCCTL.

- *Monographie Électronique* (<http://ciks.cbt.nist.gov/monograph/>): est un site Web installé comme un livre électronique (manuel virtuel). Il couvre la majorité des modèles développés sur le béton au NIST [90].
- *HCSSMODEL* (<http://fire.nist.gov/concpubs/software/hcss/readme.htm>): est un ensemble de programmes informatiques qui simulent la microstructure et évaluent la percolation et les propriétés de diffusion/conduction d'un système composite [91].
- *CEMHYD3D* (<http://fire.nist.gov/concpubs/software/cemhyd3d/readme.htm>): est un modèle en 3D développé au NIST [10] pour l'étude du développement de l'hydratation et de la microstructure de ciment.

- CIKS (<http://ciks.cbt.nist.gov/cicks.html>): est un CIKS pour le BHP incluant la formulation du béton, la diffusion des chlorures et la prévision de la durée de vie d'un ouvrage en béton [87].
- COST (<http://ciks.cbt.nist.gov/cost>): est un logiciel pour l'optimisation et la formulation de béton pour aider les ingénieurs, les producteurs de béton et les chercheurs à déterminer des constituants optimaux de béton.
- CURING (<http://construction.asu.edu/cim/curing/curingfirstpage.htm>): est un programme de calcul du taux d'évaporation pour le béton normalisé en tenant compte des conditions favorables pour l'apparition des fissures du retrait plastique.
- VRCPT (<http://ciks.cbt.nist.gov/VirtualRCPT>): est une méthode d'essai virtuel rapide de perméabilité au chlorures (Virtual Rapid Chloride Permeability Test : VRCPT) pour la prévision de la conductivité de pore en solution de ciment et la charge totale passée dans des essais standards [26].

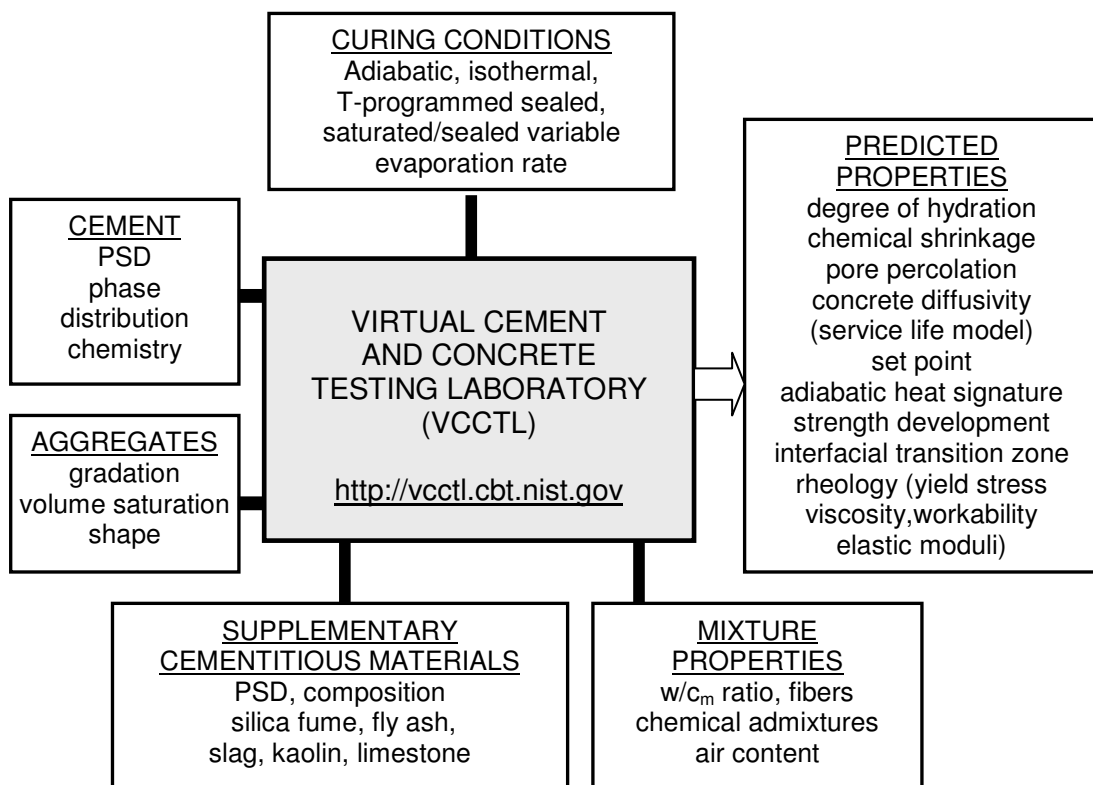


Figure 1.8 : Représentation des modules courants du logiciel de VCCTL [7].

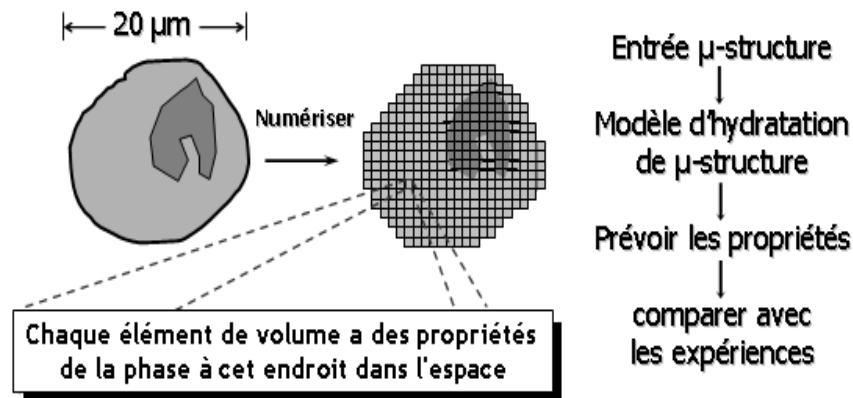


Figure 1.9 : Représentation d'un élément de microstructure [7].

Le concept VCCTL ne peut pas, et n'est pas prévu pour remplacer les essais expérimentaux. Des études illustrent bien la puissance et la flexibilité du système de VCCTL et que leurs modèles peuvent de manière significative réduire l'ampleur de l'expérimentation. Par exemple, on trouve les modèles qui ont été développés sur la substitution des gros agrégats de ciment par des fillers calcaires, du laitier, et du carbonate de calcium, pour la simulation de l'hydratation et le développement de la résistance [92]. Une autre étude a visé la prévision des propriétés physiques de ciment [93].

Les modèles du VCCTL sont améliorés sans interruption par des collaborations entre le NIST et ses associés comme l'ACI (American Concrete Institute) et continuent de se développer et de valider leurs capacités prédictives.

1.8. Systèmes et logiciels existants pour la formulation du béton

Le problème de la formulation des bétons comporte, de nos jours, davantage de variables (résistance du béton, ouvrabilité, environnement) et davantage de dimensions. Face à ces réalités, les formulateurs sont soumis à une pression croissante en termes de délais et de coûts. Ces considérations ont poussé plusieurs chercheurs au développement de logiciels d'aide à la formulation des bétons par l'application de différentes approches. Certains produits sont basés sur des méthodes analytiques conventionnelles telles que la méthode ACI 211 [94] ou

la méthode Dreux-Gorisse [95] et d'autres chercheurs ont appliqué les techniques de l'intelligence artificielle pour la construction de leurs logiciels [48, 58, 83]. Dans ce qui suit, quelques logiciels pour la formulation de béton sont présentés.

1.8.1. Logiciel COST pour l'optimisation des bétons

COST (Concrete Optimisation Software Tool) est un logiciel d'optimisation de béton, un produit communément développé par le FHWA (Federal High Way Administration) et le NIST [96]. C'est un système accessible sur Internet développé pour aider les ingénieurs, les producteurs de béton et les chercheurs pour l'optimisation des dosages des constituants du béton. COST est basé sur des modèles statistiques et des méthodes d'analyse et applique la méthode des surfaces de réponse (RSM : Response Surface Methodology) aux problèmes d'optimisation des proportions des mélanges de béton, où plusieurs variables d'entrées (composants) influencent sur une propriété mesurée (réponse) (Tableau 1.2).

Tableau 1.2 : Exemple des composants et réponses [96].

Composants	Réponses
1. Eau	<u>Propriétés rhéologiques</u>
2. Ciment	(ouvrabilité, teneur en air, masse volumique, température, temps de prise)
3. Ajouts minéraux (cendres volantes, fumées de silice, laitier de hauts fourneaux, Metakaolin).	<u>Propriétés mécaniques</u>
4. Adjuvants chimiques (supperplastifiant, entraîneur d'air, réducteur d'eau, retardateur).	(résistance mécaniques, module d'élasticité, fluage, fatigue)
5. Agrégats.	<u>Durabilité</u>
	(gel-dégel, dégradation, réaction alkali granulats, attaque par les sulfates, abrasion).

1.8.2. Logiciel BétonlabPro pour la formulation des bétons

BétonlabPro [8] (Béton laboratoire Professionnel) dans sa version courante (version 3) est un logiciel de formulation de béton disponible sur CD-ROM à partir

de janvier 2008. Il a été élaboré à partir de la première version appelée Bétonlab du LCPC lancée en 1992 pour des fins pédagogiques [97]. BétonlabPro est basé sur une nouvelle approche de la formulation des bétons [98]. Cette approche s'appuie principalement sur une analyse de la structure granulaire du matériau dont le modèle de base est le modèle d'Empilement Compressible (MEC) (Fig. 1.10). Le logiciel est muni d'une base de données, dans laquelle l'utilisateur peut l'utiliser et l'enrichir par une série de mesures réalisées sur les constituants (gravillons, sable, ciments seul ou composés, additions minérales, adjuvants).

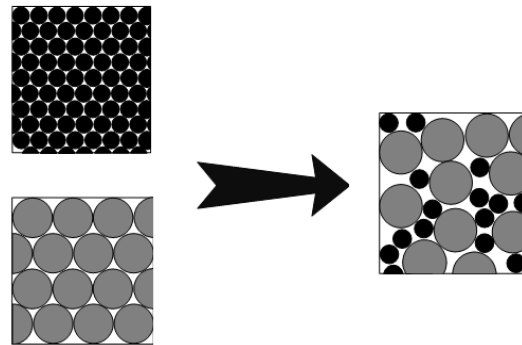


Figure 1.10 : Représentation de la structure granulaire du matériau [98].

1.8.3. Système CAO pour l'optimisation de mélanges de béton

Yeh [9], a développé un système CAO (Conception Assistée par Ordinateur) pour l'optimisation des mélanges de béton par l'utilisation des réseaux de neurones et les technologies de l'optimisation. Il a suivi trois étapes pour le développement de ce système. D'abord, le problème de conception d'un mélange de béton est transformé en optimisation de formulation, y compris la fonction objective et les fonctions de contrainte. Puis, les fonctions de la formulation, y compris la résistance et l'ouvrabilité, sont employées pour modéliser un module basé sur les réseaux de neurones. Enfin, la formulation d'optimisation est résolue par un module d'optimisation basé sur la programmation non-linéaire et les algorithmes génétiques. Ces modules sont intégrés dans un système de la conception assistée par ordinateur (CAO). L'architecture du système est montrée dans la figure 1.11.

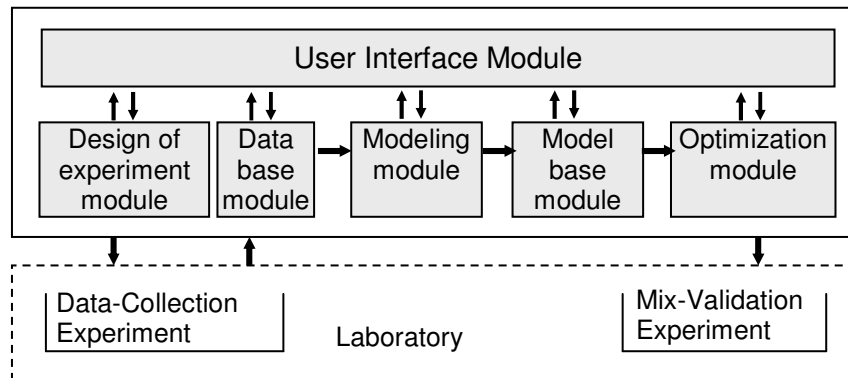


Figure 1.11 : Architecture de système CAO pour l'optimisation de mélanges de béton [9].

Le système a été développé pour la formulation des bétons pour des ouvrabilités allant de 50 à 250 mm et des résistances à la compression allant de 25 à 55 MPa.

1.9. Conclusion

Les développements récents de la technologie de l'information ont eu un impact considérable sur la technologie du béton et en particulier sur l'optimisation et la prévision de ses performances [99]. Ces techniques ont facilité le partage de données, l'information, et la connaissance entre les chercheurs géographiquement dispersés et les praticiens de béton. Ces nouvelles techniques comportent des systèmes de connaissance tels que les modèles informatiques, des systèmes interactifs d'aide à la décision et des systèmes d'intelligence artificielle tels que les bases de données intelligentes, les systèmes experts, les réseaux de neurones et les algorithmes génétiques. En outre, l'intégration de ces systèmes peut former des systèmes automatisés intégrés de la connaissance. Ceux-ci offrent des possibilités intéressantes pour représenter pratiquement toutes les connaissances scientifiques et rendre ces connaissances aisément disponibles à ceux qui ont besoin d'elles. Par conséquent, l'idée du laboratoire électronique ou virtuel, qui permet de gâcher du béton dans un environnement virtuel (bureau) et de prévoir exactement ses propriétés et ses performances mécaniques a été développée. Cette idée concerne le développement de systèmes et de logiciels qui sont

valables pour des spécifications et des normes intrinsèques à certains pays. Cependant, il faut noter qu'il reste indispensable de vérifier les propriétés des bétons formulés par des essais de laboratoire ad-hoc.

Par ailleurs, beaucoup de travaux sont menés et d'autres sont en cours sur les ajouts cimentaires pour le béton comme la fumée de silice, le laitier de haut fourneau, les cendres volantes vu de leurs avantages écologiques, économiques et afin d'assurer une meilleure durabilité du béton. Ces travaux engendrent beaucoup de données des essais de laboratoire. Les résultats de ces travaux nécessitent une collecte et une organisation (informatisation) sous un format spécifique pour leur utilisation dans les bases de données. Ce type de base de données fait l'objet du chapitre suivant.

CHAPITRE 2

CONCEPTION DE LA BASE DE DONNÉES POUR LES BÉTONS AUX AJOUTS

2.1. Introduction

La première étape dans la conception de notre système SAICBA est la conception de sa base de données. Elle est considérée comme l'étape la plus importante. L'objectif de ce chapitre est de développer une Base de Données pour les Bétons aux Ajouts (BDDBA) très globalement applicable, facilement consultable et utilisable par tous les chercheurs en génie civil. Le processus de la conception de cette base de données a été complété dans deux phases. L'objectif de la première phase était de rassembler des données de la littérature et d'expliquer les aspects détaillés de la collecte et du filtrage de données concernant les bétons aux ajouts (laitier, cendre volantes, fumée de silice, et pouzzolane naturelle). La deuxième phase a impliqué le développement du programme de la base de données. Les données ont été recueillies et rassemblées à partir des résultats expérimentaux obtenus de diverses sources de recherche et sont organisées et analysées pour être exploitables par les modèles du système. De même, toutes les données rassemblées ont été examinées pour éliminer les duplications possibles des données dues au chevauchement entre les points de données.

2.2. Méthodologie de collection et d'organisation des données expérimentales

Les données concernant les bétons aux ajouts minéraux par substitution partielle du Ciment (C) par le Laitier (L), les Cendres Volantes (CV), la Pouzzolane Naturelle (PN) et la Fumée de Silice (FS) ont été extraites et rassemblées des projets de recherche précédents de sources différentes et de la littérature pour construire la base de données [100-239]. Chaque ensemble se compose des vecteurs de facteurs influençant (constituants du béton), de la résistance à la

compression et de l'ouvrabilité correspondante du béton (tableau 2.1). Toutes les résistances testées sur les différents types d'éprouvettes ont été généralisées sur des cylindres de 100x200 cm sous des conditions de cure humide de 2 jours jusqu'à 6 mois [240]. L'ouvrabilité a été mesurée par l'essai standard d'affaissement au cône d'Abrams sur des bétons fermes à des bétons fluides. La gamme des constituants dans les bétons aux ajouts est indiquée dans le tableau 2.2. Selon ce tableau, une distribution étendue est observée au niveau de chaque constituant d'une part pour couvrir la grande variété des ajouts utilisées par substitution en poids de ciment et d'autres part pour inclure de nombreux familles de béton notamment des bétons ordinaires à un rapport E/L élevés aux bétons de haute performance à faible rapport E/L. Les propriétés physiques des agrégats et des adjuvants, les dimensions des éprouvettes et les compositions chimiques des ciments et ajouts sont indiquées dans les tableaux 2.3 et 2.4 respectivement. La distribution des données expérimentales selon l'origine des ajouts utilisés est

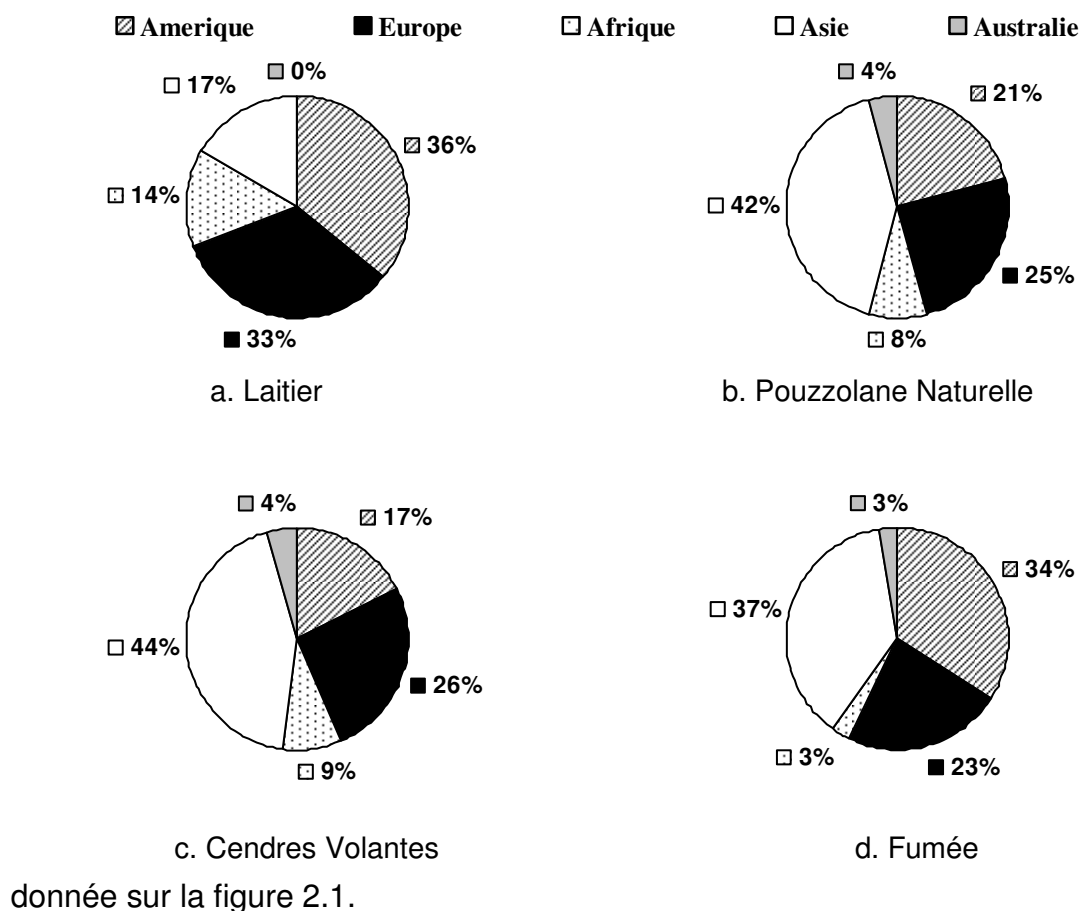


Figure 2.1 : Distribution des données suivant l'origine de l'ajout utilisé.

Tableau 2.1 : Exemple des constituants et propriétés.

Constituants	Propriétés
1. Ciment	<u>Propriétés rhéologiques</u> (affaissement, pourcentage d'air, température) <u>Propriétés mécaniques</u> (résistance à la compression, et coefficient d'efficacité)
2. Ajouts minéraux (laitier, cendres volantes, fumée de silice, et pouzzolane naturelle).	
3. Adjuvants chimiques (super-plastifiant et entraîneur d'air)	
4. Agrégats (sable et gravier)	
5. Eau	

Tableau 2.2 : Gammes des constituants et propriétés des bétons aux ajouts.

Constituants et propriétés		Données	
		Min	Max
Ciment (C) (kg/m ³)		200	600
Quantité Ajouts (%)	Laitier (L)	10	80
	Pouzzolane Naturelle (PN)	05	60
	Cendre Volante (CV)	10	70
	Fumée de Silice (FS)	05	30
Agrégats Fins (AF) (kg/m ³)		400	1000
Gros Agrégats (GA) (kg/m ³)		800	1200
Eau (E) (kg/m ³)		100	250
Adjuvants Chimiques	Superplastifiant (SP) (l/m ³)	0	16
	Entraîneur d'air (EA) (l/m ³)	0	1,7
Eau/Ciment (E/C)		0,25	0,70
Température (T) (°C)		5	50
Quantité d'Aire (%)		1,5	8,0
Age (J) (Jours)		3	180
Résistance à la Compression (Rc) (MPa)		2	100
Ouvrabilité (Ouv) (mm)		15	250

Tableau 2.3 : Propriétés physiques des agrégats et adjuvants et dimension des éprouvettes.

Agrégats						Adjuvants				Spécimens	
Fins			Gros			Super-plastifiant		Entraîneur d'Air			
Mf	D	AE	Mx	D	AE	Base	D	Base	D	Type	Forme (cm)
0,92	2,53	0,8	5-20	2,0	0,28	PNS	1,8-2,1	RS	1-1,17	Cube Cylindre Prisme	10 et 15
-	-	-	-	-	-						15x30, 10x20
3,34	2,7	1,8	5-10	2,89	1,1						16x32 et 4x4x16

Note : MF : Module de Finesse, D : Densité, AE : Absorption d'Eau, Mx : Grosseur Maximale des Gravillons, PNS : Poly Naphtalène Sulfonate, RS : Résine Synthétique.

Tableau 2.4 : Compositions chimiques et surfaces spécifiques de Blaine des ciments et des ajouts utilisés.

	Ciment	Laitier	Cendres Volantes	Fumé de Silice	Pouzzolane Naturelle
SiO ₂	18,97-39	3,1-43,76	23,1-93,8	20,9-97,1	40,1-76,6
Al ₂ O ₃	0,27-10	2,8-40	0,06-35,4	0,06-41	9,1-26,4
Fe ₂ O ₃	1,2-7,72	0,1-6,1	0,09-28,9	0,15-4,32	0,9-12,1
CaO	43-74,7	0,35-43	0,12-35,8	0,07-64	0,51-9,7
MgO	0,2-4	0,3-14	0,16-13	0-4,91	0-10
K ₂ O	0,15-2,5	0,2-0,9	0,3-4,2	0,04-3	1,5-5,6
Na ₂ O	0,01-1,8	0,1-2,6	0-7,3	0-1	0-3,9
SO ₃	0,3-4,7	0,1-3,3	0,1-5,1	0,1-2,9	0,1-0,8
SSB (m ² /kg)	255-500	250-608	211-930	12-4x104	320-750

Note : SSB : Surface Spécifique de Blaine.

2.3. Conception de la base de données pour les bétons aux ajouts

2.3.1. Objectifs de BDBA

Le but de la base de données conçue inclut la représentation et l'échange des données des proportions et des propriétés des bétons contenant des ajouts minéraux pour les utilisations suivantes:

1. collecte et synthèse de données concernant les bétons aux ajouts de différentes sources (Thèses de magistère et doctorat, articles de journaux, documents et ouvrages, etc.);
2. consultation de la base de données par des sujets des domaines (mots clés);

3. mise à jour rapide des données;
4. fourniture d'une manière facile pour que l'utilisateur manipule les données;
5. établissement des relations entre différentes propriétés des bétons aux ajouts;
6. création, échange et interprétation des données sur les bétons de différentes sources qui permettent à l'utilisateur d'obtenir une compréhension des changements dans leurs propriétés à des périodes différentes;
7. utilisation des données pour la conception des modèles du système.

L'intégration de données venant de sources différentes pose immédiatement le problème de la traçabilité des données (références) et surtout de sa cohérence interne. Une attention particulière est alors consacrée à la méthodologie de sélection et d'intégration de données. Ainsi, les valeurs de propriétés du béton sont accompagnées d'un niveau de qualité dépendant du personnel et des appareils de mesures utilisés.

2.3.2. Modèle conceptuel de BDBA

Le modèle relationnel est caractérisé par sa simplicité de structure et facilité des modifications. En conséquence, ce modèle a été choisi pour développer le modèle conceptuel de la BDBA représenté sur la figure 2.2. Le tableau 2.5 récapitule les différents attributs du modèle Entité-Relation de la BDBA.

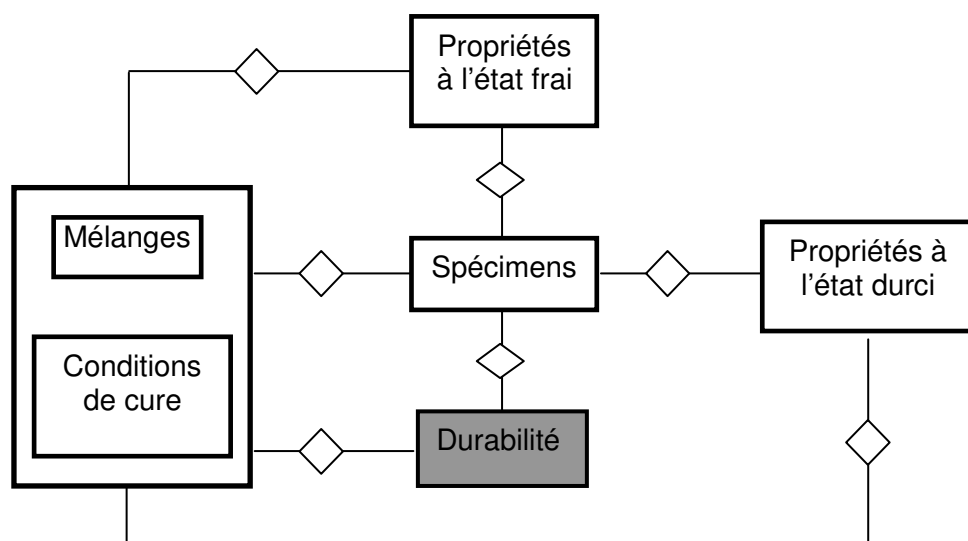


Figure 2.2 : Modèle entité-relation de la BDBA.

Tableau 2.5- Attributs du modèle entité-relation de la BDBA

Mélanges	Conditions de cure	Spécimens	Propriétés pastiques à l'état frais	Propriétés mécaniques à l'état durci
- Ciment - Ajout - Agrégats - Adjuvants - Eau	- Type de cure - Temps de cure - Température de cure	- Type de spécimen - Forme de spécimen - Méthodes de test	- Ouvrabilité - Air occlus	- Résistance à la compression - Coefficient d'Efficacité

2.3.3. Structure de la BDBA

La structure de la BDBA contient deux parties : chacune ayant une fonction distinctive. La première partie incorpore une Base de Données Secondaire de Recherche (BDSR) qui contient les informations texte des différents documents et articles publiés. Sa structure est semblable à une base de données bibliographique. La deuxième partie incorpore une Base de Données Secondaire Numérique (BDSN) qui contient des données numériques contenues dans les articles. La figure 2.3 montre les entités-relations pour les deux bases de données secondaires.

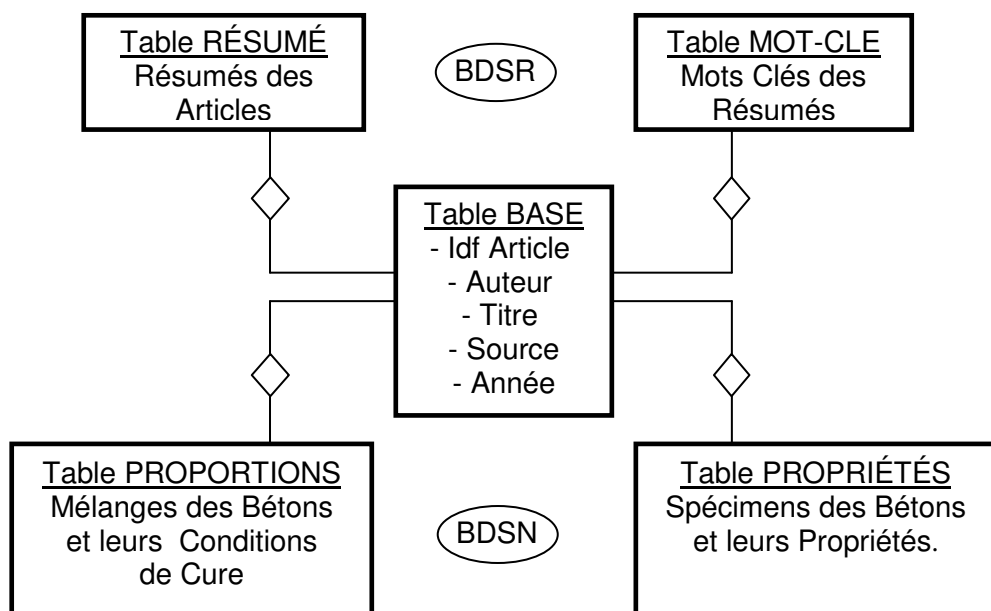


Figure 2.3 : Structure des tables de la BDBA.

Tableau 2.6 : Explication des champs des tables de BDBA.

Nom De table	N°	Nom du champ	Format du champ	Explication
BASE	0	BS_ID_ART	N	Identificateur d'article
	0	AUT	C	Nom de l'auteur
	0	TITRE	C	Titre de l'article
	0	SOURCE	C	Source
	0	ANNEE	N	Année de publication
RESUME	0	RS_ID_ART	N	Identificateur d'article
	0	N_RSM	N	N° d'article
	0	RSM_ART_TXT	A	Résumé de l'article
MOT_CLE	0	MC_ID_ART	N	Identificateur d'article
	0	N_RSM	N	N° d'article
	0	MOT_CLE	A	Mots clés d'article
PROPORTION	1	A_ID_ART	N	Identificateur d'article
	2	A_ID_SPEC	N	Identificateur de spécimen
	3	A_ID_MEL	N	Identificateur de mélange
	4	TP_CMT	A	Type de ciment
	5	QTE_CMT	N	Quantité de ciment
	6	TP_AM	A	Type d'ajout minéral
	7	QTE_AM	N	Quantité d'ajout minéral
	8	QTE_AG_F	N	Quantité des agrégats fins
	9	QTE_AG_G	N	Quantité de gros agrégats
	10	TP_ADCHM	A	Type d'adjuvant chimique
	11	QTE_ADCHM	N	Quantité d'adjuvant chimique
	12	QTE_AIR	N	Quantité d'Air
	13	QTE_EAU	N	Quantité d'eau
	14	RAPP_E_C	N	Rapport eau/ciment
	15	MD_CUR	A	Méthode de cure
	16	TM_CUR	N	Temps de cure
	17	TEMP_CUR	N	Température de cure
	18	HR	N	Humidité relative
PROPRIÉTÉS	19	B_ID_ART	N	Identificateur d'article
	20	B_ID_SPEC	N	Identificateur de spécimen
	21	B_ID_MEL	N	Identificateur de mélange
	22	TP_SPEC	A	Type de spécimen
	23	FR_SPEC	A	Forme de spécimen
	24	AGE_TST	N	L'âge de test
	25	MDTST_OUV	A	Méthode de test d'ouvrabilité
	26	OUV_VAL	N	Valeur de test d'ouvrabilité
	27	MDTST_RC	A	Méthode de test de résistance à la compression
	28	RC_VAL	N	Valeur de résistance à la compression
	29	CE_VAL	N	Valeur du Coefficient d'Efficacité

Note : C : Caractère, A : Alphanumérique, N : Numérique.

Le programme de BDBA contient un total de cinq tables. Une brève discussion de chaque table est donnée ci-dessous.

La Table BASE contient des informations de base sur chaque document telles que l'identificateur de l'article, le nom de l'auteur, le titre d'article et l'année de la publication. Sa clef primaire est une colonne des numéros d'identification des articles.

La Table RÉSUMÉ contient le texte des résumés de chaque document. Sa clef primaire se compose de numéros d'identification d'articles et de numéros d'identification des résumés.

La Table MOT-CLE contient les mots-clés du résumé de chaque document. Sa clef primaire se compose de numéros d'identification d'articles et de numéros d'identification de résumé.

La Table PROPORTIONS contient l'information sur des proportions des mélanges des bétons et les conditions de cure de chaque mélange. Sa clef primaire se compose de numéros d'identification d'articles, de numéros d'identification de spécimens, et de numéros d'identification de mélange.

La Table PROPRIÉTÉS contient l'information sur les spécimens des bétons utilisés et les propriétés désirés correspondantes. Sa clef primaire se compose de numéros d'identification d'articles, de numéros d'identification de spécimens, et de numéros d'identification de mélanges.

Le tableau 2.6 montre le nom, l'explication, le type et le format de chaque champ de la BDBA.

2.3.4. Implémentation de la BDBA

2.3.4.1. Interface de la BDBA

Le programme de la BDBA contient deux modes d'opérations: Mode Recherche et Mode Entrée.

Dans le *mode recherche*, l'utilisateur peut effectuer sa recherche sur les informations contenues seulement dans les deux sous-bases de données sans

intervention dans leurs structures internes. Dans le *mode entrée*, il peut alors introduire, modifier ou même supprimer des documents. Dans ce contexte, trois niveaux d'utilisateur sont prévus pour la BDBA :

- Les utilisateurs du niveau 1 peuvent seulement accéder au mode recherche du programme. Il ne peut pas entrer ou mettre à jour des données;
- Les utilisateurs du niveau 2 peuvent accéder au mode recherche aussi bien que le mode entrée du programme. À ce niveau, l'utilisateur peut introduire ou mettre à jour des données;
- Les utilisateurs du niveau 3 peuvent accéder au programme entier. En plus de l'entrée et la recherche, les utilisateurs peuvent maintenir le programme.

En outre, le menu d'application principal de la BDBA est développé par l'emploi du logiciel DELPHI 7 [241] pour sa capacité de concevoir et de développer des applications de bases de données sous *Windows* avec son module *Base de Données*. Cet environnement visuel allie la productivité des langages de quatrième génération à la puissance et la souplesse d'un langage compilé. Ainsi, le système de gestion de base de données PARADOX 7 [242] est choisi pour établir les liens et permettre l'accès aux diverses opérations du programme.

2.3.4.2. Procédures de BDBA

A la mise en marche du programme, la page d'accueil du système s'affiche comme le montre la figure 2.4. Selon le niveau utilisateur où l'on peut effectuer des opérations dans un, deux ou chacun des deux modes (entrée ou recherche). Si l'utilisateur est du niveau 2, alors il est incité à donner son nom et son mot de passe. Pour faire interroger la base de données, cliquer sur le *Mode Recherche*. Le programme peut effectuer deux types de recherche :

- Rechercher un document texte (Fig. 2.5);
- Rechercher les résultats numériques sur les documents. Dans ce cas le programme peut effectuer deux autres types de recherche:
 - Rechercher sur les proportions (Fig. 2.6); et
 - Rechercher sur les propriétés (Fig. 2.7).

Les résultats de recherche correspondants s'affichent pour chaque type de recherche. Si l'utilisateur s'intéresse à exporter les résultats numériques de sa

recherche alors il est invité à cliquer sur le bouton *Exporter* puis introduire son mot de passe. Dans ce cas les résultats seront transportés dans un fichier Excel (Fig. 2.8). L'utilisateur peut ainsi imprimer ses résultats de recherches en cliquant sur le bouton *Imprimer*.



Figure 2.4 : Page d'accueil du BDBA.

L'utilisateur peut également afficher le contenu total de la base de données en cliquant sur le bouton *Affichage* (Fig. 2.9).

Pour entrer les données dans la base de données, on clique sur *Mode Entrée*. Dans ce cas, l'utilisateur est incité à donner son mot de passe. il peut :

- Introduire les informations sur les documents (Fig. 2.10);
- Introduire les données sur les proportions et les propriétés des mélanges de bétons (Fig. 2.11);

De même comme pour l'export des données, l'introduction des données numériques à la base de données se fait par un appel à des fichiers Excel déjà organisés sous un format spécifique. Cette opération est effectuée en cliquant sur le bouton *Importer*. Les autres informations sont introduites directement en remplissant convenablement les champs. Après la saisie des données, il faut les stocker, et retourner à la page d'accueil.

Système Automatisé Intégré de Connaissance pour les Bétons aux Ajouts



Mode Recherche:

Rechercher un document text

Rechercher les proportions

Rechercher les propriétés

Mode Entrée:

Entree de document

Modifier un document

Supprimer un document

Supprimer un mélange

Affichage...

Rechercher un document texte :

Type de document: Tout Type De Documents

Auteur: Boukhatem

Titre: Conception d'une Base de Données

Source:

Année de publication : L intervalle

Année 1:

Année 2:

Rechercher Reset Return

Figure 2.5 : Rechercher un document texte.

Système Automatisé Intégré de Connaissance pour les Bétons aux Ajouts



Mode Recherche:

Rechercher un document text

Rechercher les proportions

Rechercher les propriétés

Mode Entrée:

Entree de document

Modifier un document

Supprimer un document

Supprimer un mélange

Affichage...

Rechercher sur les Proportions des Mélanges:

Type de Document: Publication

Auteur:

Titre:

☒ Type de Ciment ☒ Type d'Adjuvant

☐ Sans ajouts ☐ Sans adjuvant

☒ Avec ajouts ☒ Avec adjuvant

Type de Cure

☐ Eau

☐ Air

☐ Autre...

Ajout **Adjuvant** **E/ C**

☒ Laitier ☐ Accélérateur de Prise

☐ Pozzolane ☐ Réducteur d'eau

☐ Cendre Volante ☐ Plastifiant

☐ Fumé de silice ☒ Super Plastifiant

☐ Calcaire ☐ Entraîneur d'Air

☐ Métakoalin

Température

MIN

MAX

Rechercher Reset Return

Figure 2.6 : Rechercher sur les proportions.

Système Automatisé Intégré de Connaissance pour les Bétons aux Ajouts

Béton-Ajouts
BDDB

Mode Recherche:

Rechercher un document text

Rechercher les proportions

Rechercher les propriétés

Mode Entrée:

Entree de document

Modifier un document

Supprimer un document

Supprimer un mélange

Affichage...

Rechercher sur les Propriétés

Type de Document: Publication

Auteur:

Titre:

Ouvrabilité :

Min 25

Max 150

Résistance à la Compression :

Min 4

Max 90

Coefficient d'Efficacité:

Min

Max

Module d'Elasticité:

Min

Max

Rechercher Reset Return

Figure 2.7 : Rechercher sur les propriétés.

Système Automatisé Intégré de Connaissance pour les Bétons aux Ajouts

Béton-Ajouts
BDDB

Mode Recherche:

Rechercher un document text

Rechercher les proportions

Rechercher les propriétés

Mode Entrée:

Entree de document

Modifier un document

Supprimer un document

Supprimer un mélange

Affichage...

Rapport de recherche sur le melange concerné

Ciment I	Ciment II	Ciment III	Laitier	Pozzolan	Cendre Volante	Fumée
205	0	0	205	0	0	0
200	0	0	200	0	0	0

Enregistrer sous

Enregistrer dans: Documents

Historique

Mes documents

Favoris réseau

Non de fichier:

Type de fichier: Casseur Excel

Enregistrer Annuler

Imprimer... Exporter... Return

Figure 2.8 : Résultats de recherche.

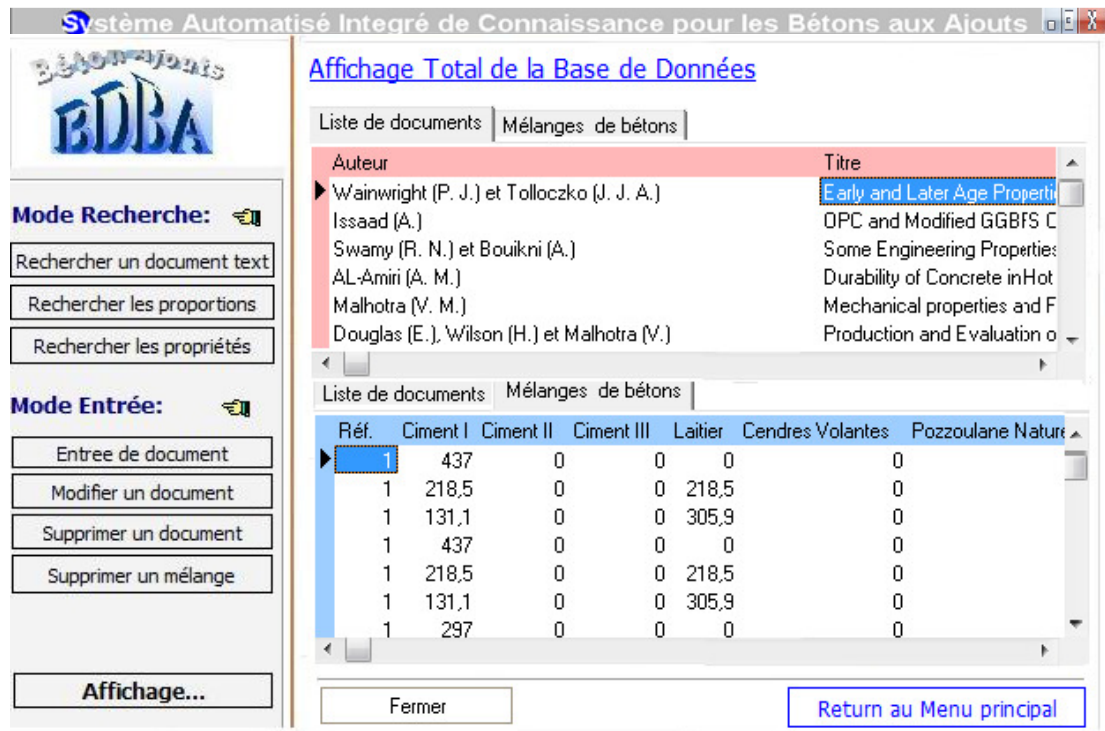


Figure 2.9 : Affichage total du contenu de la BDBA.

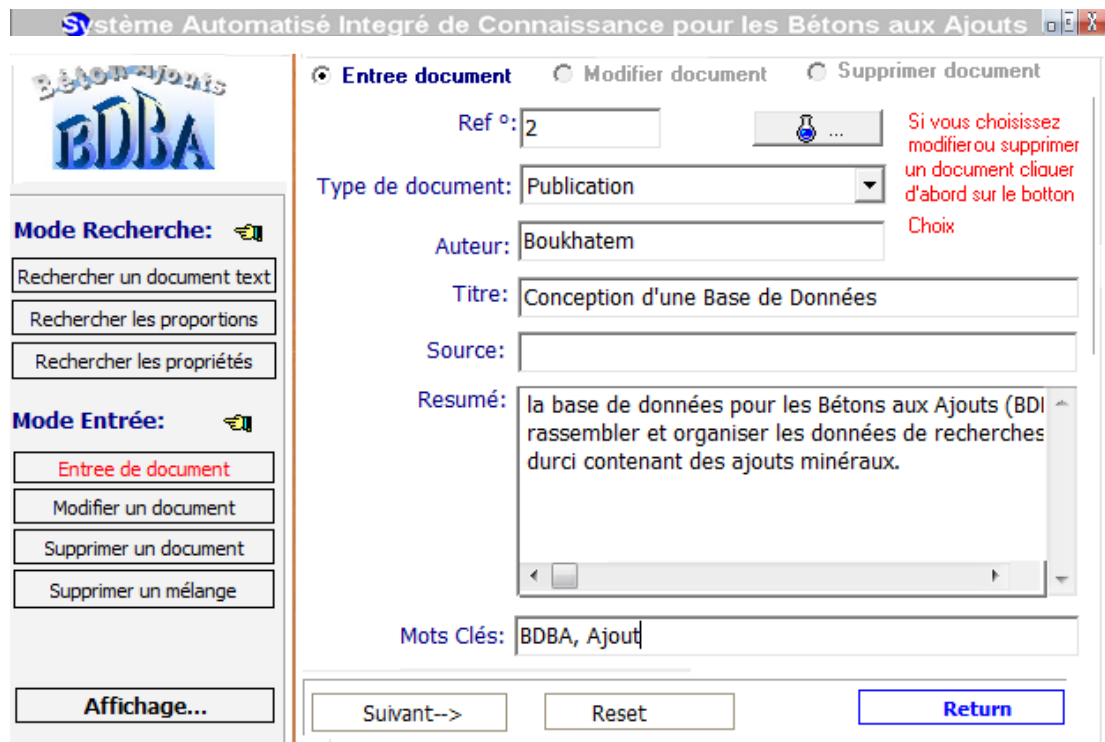


Figure 2.10 : Introduire les informations sur les documents.

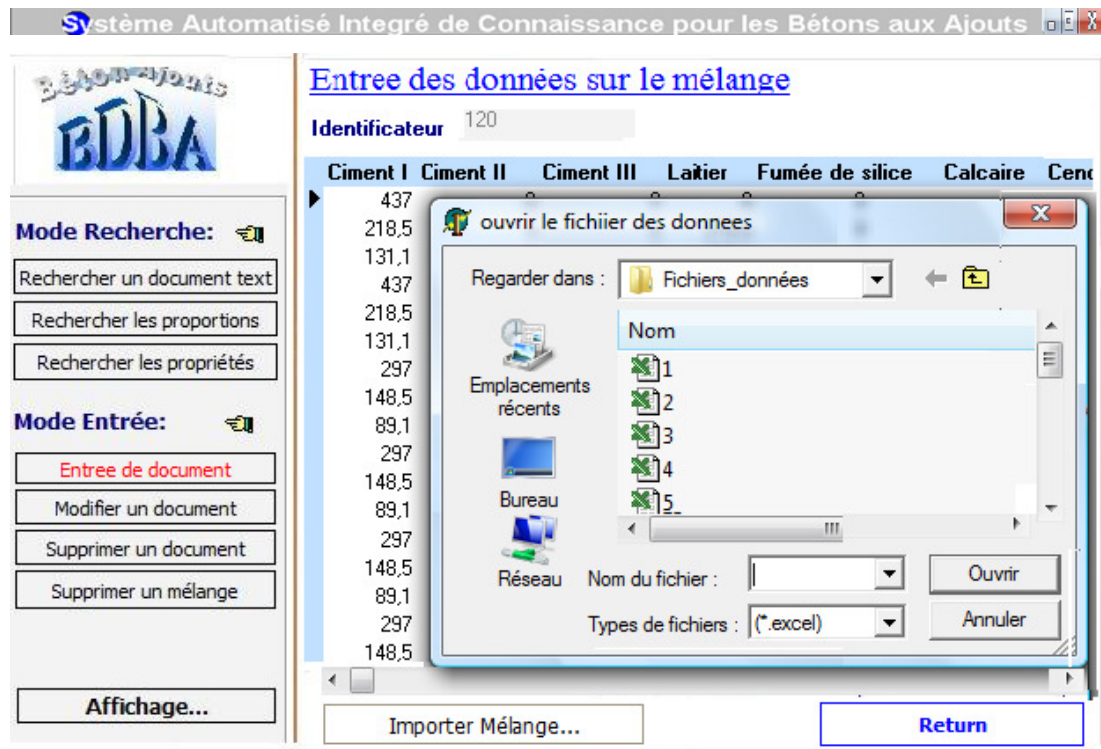


Fig. 2.11- Introduire les données sur les proportions et les propriétés des mélanges

L'utilisateur peut ainsi modifier ou supprimer des informations sur les documents ou même le document lui-même. Cette opération se fait en cochant sur un des trois choix de la zone de liste (Introduire, Modifier ou Supprimer).

Au cours de toutes ces opérations, des messages d'erreurs sont fournis et affichés pour aider et guider l'utilisateur pour le bon déroulement des opérations.

2.4. Organisation de la base de données

L'ensemble des données représente un total de plus de 300 compositions constituant la base de données. Le tableau 2.7 récapitule l'organisation des données selon chaque ajout comprenant les deux sous-ensembles pour tous les modèles. Selon ce tableau, on dispose au total de 4948 valeurs. Ces résultats seront employés pour la conception et le test de la fiabilité des modèles de réseaux de neurones à développer. Pendant l'évaluation des données, certaines de ces formules de bétons ont été supprimées à cause de l'insuffisance d'information concernant les compositions utilisées. Ensuite, les données sont organisées et transférées dans des fichiers Excel sous un format spécifique pour

faciliter leur introduction à la base de données. Après cela, pour chaque modèle, l'ensemble des données a été fractionné sur 3 sous ensembles : Apprentissage (60%), Test (20%) et Validation (20%) pour chaque modèle. L'ensemble de données d'apprentissage a été utilisé pour entraîner les modèles RNs, l'ensemble de données de validation a été utilisé pour l'arrêt du processus d'apprentissage et l'ensemble de données de test a été utilisé pour évaluer la performance des Modèles RNs après l'achèvement du processus d'apprentissage.

Tableau 2.7 : Organisation des données.

Ajouts	NTD	NDA	NDT	NDV	Modèle
Laitier (L)	195	117	39	39	MRNPOL
	650	390	130	130	MRNPRCL
	435	261	87	87	MRNPCEL
Cendres Volantes (CV)	113	69	22	22	MRNPOCV
	772	464	154	154	MRNPRCCV
	634	382	126	126	MRNPCECV
Fumée de Silice (FS)	166	98	34	34	MRNPOFS
	1144	688	228	228	MRNPRCFS
	385	231	77	77	MRNPCEFS
Pouzzolane Naturelle (PN)	50	30	10	10	MRNPOPON
	182	110	36	36	MRNPRCPN
	222	134	44	44	MRNCEPN
Total	4948	2974	987	987	

Note : NTD Nombre Totale de Données, NDA Nombre de Données d'Apprentissage, NDT Nombre de Données de Test, NDV Nombre de Données de Validation, MRNPO : Modèle Réseaux de Neurones de Prévion de l'Ouvrabilité, MRNPRC: Modèle Réseaux de Neurones de Prévion de la Résistance à la Compression, MRNPCE : Modèle Réseaux de Neurones de Prévion du Coefficient d'Efficacité.

2.5. Conclusion

Le développement et la conception de la base de données pour les bétons aux ajouts a exigé un effort considérable et des qualifications spécialisées et elle a pris la moitié du temps alloué à la construction du système complet.

Une Méthodologie a été suivie pour la sélection et l'organisation des données sur les proportions et les propriétés des bétons avec ajouts. Un

programme numérique de Base de Données pour les Bétons avec Ajouts appelé BDBA a été développé pour la numérisation de ces données. Ce programme a été construit en utilisant le modèle de base de données relationnelle et le logiciel DELPHI 7 et contient un système de menu et d'autres interfaces utilisateur qui guident des utilisateurs non experts. Des structures nécessaires de table et les procédures convenables d'Entrée/Recherche ont été incorporées. En utilisant les procédures de Recherche dans le programme, les utilisateurs peuvent rapidement rechercher des données. La duplication ou l'omission des données est également réduite sensiblement. Le programme offre des possibilités de recherche sur la base de données basée sur des informations concernant la bibliographie, les constituants de mélanges des bétons utilisés, et les propriétés désirées. Ainsi, il serait considéré comme une plate-forme pour d'autres applications de modélisation. Dans ce projet, la BDBA servirait de noyau pour le développement des modèles de réseaux de neurones du système SAICBA.

Les composants qui forment la matrice d'entrée d'un réseau de neurones ont différentes limites quantitatives, et sont constitués d'information corrélées entre elles. Par conséquent, un prétraitement et une normalisation des données seront nécessaires et ceci est l'objet du prochain chapitre.

CHAPITRE 3

ANALYSE DES DONNÉES ET MODÉLISATION DES PROPRIÉTÉS DU BÉTON

3.1. Introduction

Ce chapitre comporte une analyse des données de la base de données présentée dans le chapitre précédent. Cette analyse vise à étudier l'influence de divers facteurs ou paramètres de la composition du béton sur les propriétés désignées afin d'améliorer la performance de leurs prévision. Les modèles de prévision seront construits en combinant deux approches : l'approche réseau de neurones (RN) et l'approche statistique analyse en composante principale (ACP). L'approche ACP est proposée pour la compression et l'élimination de la corrélation entre les données. En premier lieu, les deux approches sont présentées. Ensuite, la méthodologie suivie pour l'analyse statistique des données est discutée. Enfin, les résultats obtenus à l'aide des modèles développés par la combinaison de l'ACP et les RNs ainsi que les résultats obtenus par les modèles de régression multiples sont donnés.

3.1. Réseaux de neurones

Les Réseaux de Neurones Artificiels (RNs) sont considérés parmi les métaphores biologiques employées de nos jours pour la résolution des différents problèmes [243]. Plusieurs auteurs se sont intéressés aux réseaux de neurones et chacun les a définis à sa manière. Un RN est un système composé d'un ensemble de neurones interconnectés entre eux. Une certaine disposition de la connexion de ces neurones produit un modèle RN adapté pour certaines tâches. Le Réseau de Neurones Multicouches à Rétro-Propagation (RNM-RP) est le type de modèle des réseaux de neurones le plus utilisé, composé de trois couches adjacentes : entrée, cachée et sortie [244]. Chaque couche contient plusieurs

neurones (Figure 3.1). Le RN est entraîné en lui présentant un ensemble de données entrées-sorties associées basé sur la règle d'apprentissage. Le processus d'apprentissage utilise un algorithme, au cours duquel le RN développe une fonction entre les entrées et les sorties. Généralement, dans un processus apprentissage, les neurones reçoivent des données d'entrée de l'environnement extérieur (notées : $x_1, x_2, \dots, x_n$) et les transmettent aux neurones dans la couche cachée, qui sont responsables de simples calculs mathématiques utiles impliquant les poids des connexions (notés : $w_{11}, w_{12} \dots, w_{1n}$), les biais (notés : $b_1, b_1, \dots, b_n$), et les valeurs d'entrée. Le résultat de ces neurones cachés est passé par une fonction de seuil ou d'activation (noté : f) qui à chaque neurone (élément de traitement) limite la sortie avec les bornes minimales et maximales permises [245]. Le choix du type de cette fonction se révèle être un élément très important d'un RN et souvent des fonctions non linéaires et plus évoluées seront nécessaires. Une fois appliqué cette fonction, les résultats finaux sont produits. Par la suite, ces résultats deviennent les entrées à tous les neurones dans la couche adjacente (soit la deuxième couche cachée ou la couche de sortie), et le processus de calcul est répété par le biais des couches jusqu'à la couche de sortie. Les valeurs de sortie sont produites aux neurones de sortie (noté $y_1, y_2, \dots$ dans la figure 3.1). À ce stade, une valeur d'erreur de sortie est calculée entre les sorties produites et les sorties désirées. Généralement, le processus d'apprentissage est itératif, et s'arrête quand une erreur acceptable est atteinte. À l'achèvement d'un processus d'apprentissage, le réseau devrait être en mesure de donner la solution de sortie(s) pour tout ensemble de données sur la base de l'architecture généralisée développée.

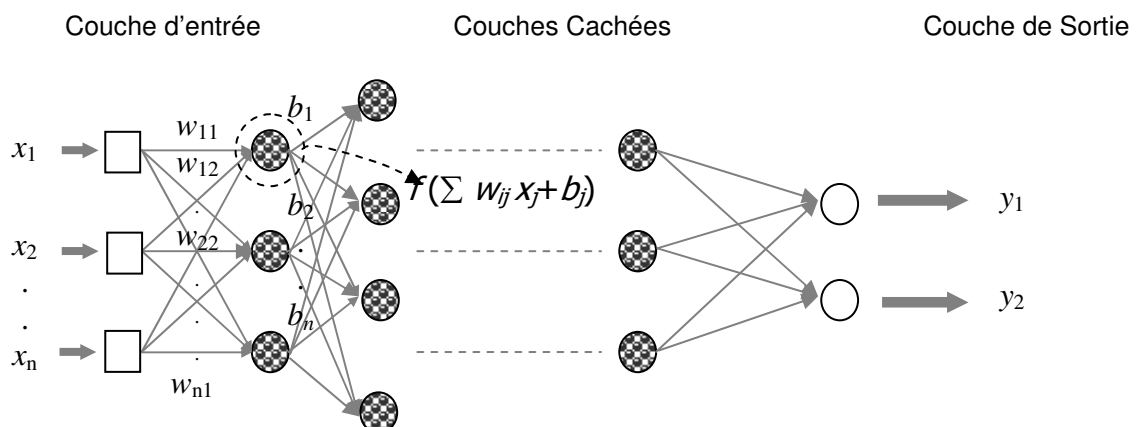


Figure 3.1 : Réseau de neurones multicouches.

La performance d'un RNM-RP dépend beaucoup de sa capacité de généralisation, qui, à son tour, dépend de la représentation des données. Une caractéristique importante de représentation des données est la dé-corrélation de ces données. En d'autres termes, un ensemble de données présentées à un RNM-RP ne devrait pas consister des corrélations entre les données. Parce que les données corrélées réduisent le caractère distinctif de la représentation des données et donc, d'introduire une confusion pour le modèle de RNM-RP pendant le processus d'apprentissage et par conséquent, produit un RNM-RP de faible capacité de généralisation pour de nouvelles données [246]. Cela suggère la nécessité d'éliminer la corrélation des données avant qu'elles ne soient présentées à un RNM-RP. Cet objectif peut être atteint par l'application de la technique ACP sur l'ensemble de données d'entrées avant le processus d'apprentissage d'un RNM-RP [247]. Il s'agit de la technique à examiner dans ce chapitre.

3.3. Analyse en composante principales

La technique de l'ACP a été introduite pour la première fois par Karl Pearson en 1901 [248]. 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. Depuis les années 70, de nombreux travaux ont proposé d'utiliser l'ACP comme un outil de modélisation des processus à partir duquel un modèle peut être obtenu. L'ACP a été appliquée avec succès en tant qu'une technique de réduction de dimensionnalité des entrées des RN dans une variété d'applications d'ingénierie [249]. Elle a été aussi combinée avec les réseaux de neurones comme une technique pour améliorer ses performances de généralisation et réduire ses entrées [250-252].

Mathématiquement, 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) dans un sous-espace de dimension inférieure ($L < m$) en maximisant la variance des projections.

En pratique, pour la modélisation d'un processus en utilisant l'ACP, les variables de ce processus sont collectées dans une matrice X^b . Soit m le nombre de variables et N le nombre d'observations de chaque variable. X^b est donnée par :

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

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^{eme} 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 :

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

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^{eme} 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.

De nombreuses règles sont proposées dans la littérature pour déterminer le nombre de composantes L à retenir [253] dont la plupart sont heuristiques. Dans notre travail nous avons utilisé la méthode des pourcentages cumulés de la variance totale (PVC). A la base de cette méthode, chaque composante principale est représentative d'une portion de la variance des données du processus étudié. Les valeurs propres de la matrice de corrélation sont les mesures de cette variance et peuvent donc être utilisées dans la sélection du nombre de composantes principales.

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 :

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

Pour mettre en évidence les effets de la technique de l'APC sur la performance d'un RNM-RP, les données de la composition des bétons aux ajouts cimentaires ont été choisies.

L'analyse concerne les paramètres ayant un effet sur les propriétés désignées à prévoir (l'ouvrabilité et la résistance à la compression) des bétons contenant des ajouts (laitier, cendres volantes, fumée de silice et pouzzolane naturelle) à savoir les compositions de ses béton (Ciment, Ajouts, Agrégats, Adjuvants et Eau). Elle permet de déterminer les paramètres indépendants et significatifs. Une analyse multi-variable par l'ACP est ensuite effectuée pour déterminer les principaux facteurs (combinaison des paramètres d'influences) qui affectent les propriétés du béton et aussi pour la compression et l'élimination de la corrélation entre eux. En suivant cela, l'approche RN est appliquée, pour le traitement des non linéarités entre les paramètres d'entrée (principaux facteurs de l'ACP compressés et décolérés) et de sortie. Enfin, la méthode de régression linéaire multiple est appliquée sur les données pour disposer des modèles statistiques de comparaison.

3.4.1. Analyse de corrélation

L'analyse de corrélation s'effectue généralement sur des données qu'on envisage qu'il existe des relations de dépendance entre elles. En statistique, ceci permet d'étudier la corrélation entre deux ou plusieurs variables. Une mesure de cette corrélation est obtenue par le calcul du coefficient de corrélation linéaire (R). Ce coefficient est égal au rapport de leur covariance et du produit non nul de leurs 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.

Les tableaux 3.1 et 3.2 donnent les matrices de corrélation pour les différents paramètres pour chaque type de béton. Le coefficient de corrélation R a été calculé pour chaque couple de paramètres. On note par exemple que la corrélation entre la quantité de ciment et la quantité du laitier est fortement significative avec une valeur de $R=0,71$. Ceci signifie que si nous tirons au hasard des échantillons de la même taille que notre échantillon, à partir d'une population dans laquelle ces deux paramètres ne sont pas corrélés, nous devons trouver dans un cas sur 1000 seulement, un échantillon où la corrélation serait supérieure ou égale à 0,71.

Tableau 3.1 : Corrélation entre les paramètres affectant l'ouvrabilité.

		C	L, CV, FS, PN	AF	GA	SP	EA	E	T
Laitier	C	1,00							
	L	-0,71	1,00						
	AF	-0,30	-0,17	1,00					
	GA	0,11	-0,08	-0,00	1,00				
	SP	0,12	0,25	-0,16	-0,13	1,00			
	EA	0,13	-0,10	-0,10	-0,01	-0,07	1,00		
	E	0,39	-0,13	-0,32	0,15	-0,24	-0,10	1,00	
	T	0,14	0,01	-0,18	-0,15	0,05	0,16	0,04	1,00
Cendres Volantes	C	1,00							
	CV	-0,57	1,00						
	AF	-0,34	0,06	1,00					
	GA	-0,18	-0,31	-0,44	1,00				
	SP	0,42	0,06	-0,09	-0,23	1,00			
	EA	-0,21	0,17	0,46	-0,18	0,03	1,00		
	E	0,07	-0,24	-0,21	-0,01	-0,41	-0,52	1,00	
	T	-0,17	0,02	0,15	0,11	-0,12	0,17	0,00	1,00
Fumée de Silice	C	1,00							
	FS	-0,09	1,00						
	AF	-0,54	-0,21	1,00					
	GA	0,04	-0,04	-0,55	1,00				
	SP	0,43	0,18	-0,04	-0,14	1,00			
	EA	-0,28	-0,04	0,15	-0,08	-0,14	1,00		
	E	0,02	0,03	-0,23	-0,16	-0,38	-0,10	1,00	-
	T	0,38	0,07	-0,63	0,37	0,26	-0,03	-0,05	1,00
Pouzzolane Naturelle	C	1,00							
	PN	-0,43	1,00						
	AF	0,09	0,07	1,00					
	GA	0,64	-0,17	0,71	1,00				
	SP	0,67	0,03	0,25	0,71	1,00			
	E	-0,71	0,17	-0,33	-0,80	-0,94	-	1,00	
	T	0,81	-0,07	0,30	0,84	0,79	-	-0,80	1,00

Note : C : Ciment, L : Laitier, CV : Cendres Volantes, FS : Fumée de Silice, PN : Pouzzolane Naturelle, AF : Agrégats Fins, GA : Gros Agrégat, SP : Superplastifiant, EA : Entraîneur d'Air, E : Eau, T : Température, J : Jours.

Tableau 3.2- Corrélation entre les paramètres affectant
la résistance à la compression.

		C	L,CV,F S,PN	AF	GA	SP	EA	E	T	J
Laitier	C	1,00								
	L	-0,75	1,00							
	AF	-0,26	-0,13	1,00						
	GA	-0,00	-0,11	0,02	1,00					
	SP	0,16	0,15	-0,06	-0,05	1,00				
	EA	0,11	-0,08	-0,11	0,01	-0,04	1,00			
	E	0,26	-0,04	-0,33	-0,19	-0,40	-0,10	1,00		
	T	0,04	0,01	0,00	-0,10	0,10	-0,20	-0,08	1,00	
	J	-0,07	0,01	0,03	-0,04	0,04	-0,01	-0,13	-0,09	1,00
Cendres Volantes	C	1,00								
	CV	-0,67	1,00							
	AF	-0,03	-0,34	1,00						
	GA	-0,18	0,05	-0,59	1,00					
	SP	0,21	0,23	-0,18	0,02	1,00				
	EA	-0,10	0,04	-0,05	0,34	-0,03	1,00			
	E	0,04	-0,16	-0,24	-0,07	-0,45	-0,35	1,00		
	T	-0,04	0,10	-0,19	0,14	0,10	0,04	0,14	1,00	
	J	0,02	-0,03	0,04	-0,00	-0,01	0,08	-0,10	-0,01	1,00
Fumée de Silice	C	1,00								
	FS	-0,22	1,00							
	AF	-0,45	-0,21	1,00						
	GA	-0,08	-0,09	-0,35	1,00					
	SP	0,33	0,31	-0,12	-0,11	1,00				
	EA	-0,22	-0,03	0,12	-0,04	-0,13	1,00			
	E	-0,08	-0,03	-0,30	-0,24	-0,20	-0,05	1,00		
	T	0,28	0,05	-0,27	-0,03	-0,06	-0,05	-0,21	1,00	
	J	0,10	0,00	0,02	-0,10	0,06	-0,06	-0,05	-0,00	1,00
Pouzolane Naturelle	C	1,00								
	PN	-0,70	1,00							
	AF	-0,67	0,37	1,00						
	GA	0,27	-0,20	-0,43	1,00					
	SP	0,55	-0,09	-0,36	0,39	1,00				
	E	-0,14	0,07	0,03	-0,37	-0,45	1,00			
	T	0,09	-0,10	-0,12	0,22	0,14	0,01	1,00		
	J	-0,13	0,04	0,02	-0,02	-0,08	0,13	-0,05	1,00	

On note la présence des fortes corrélations entre la quantité de ciment et la quantité des ajouts sauf pour la fumée de silice car elle est utilisée avec de faibles quantités. On note également une corrélation moyenne entre les agrégats fins et les gros agrégats, alors que l'âge est faiblement corrélé avec les autres paramètres pour tous les types des bétons.

3.4.2. Application de l'ACP

Deux types de traitement de données de l'APC ont été mis en œuvre en deux phases. La première se nomme PRÉ-APC, qui est chargée du prétraitement de la matrice de données d'apprentissage de la composition du béton, pour éliminer les corrélations entre ses variables. La deuxième est appelée POST-APC, qui sert à transformer les matrices de données de validation et de test en fonction de ses composantes principales. L'implémentation et la simulation ont été effectuées à l'aide des fonctions de MATLAB 7.5 de la boîte à outils Réseaux de Neurones (Neural Network Toolbox) [254].

3.4.2.1. Phase du PRE-ACP

L'utilisation de la fonction de l'APC en MATLAB implique d'indiquer une valeur correspondante à une valeur souhaitée en pourcentage de plus faible contribution de l'élément d'entrée. Par exemple, une valeur de 0,05 signifie que les composantes qui contribuent pour moins de 5% de la variation totale dans l'ensemble des données seront rejetées. À partir de ce moment-là, cette valeur sera simplement dénommée la Variance des Composantes Principales (VCP).

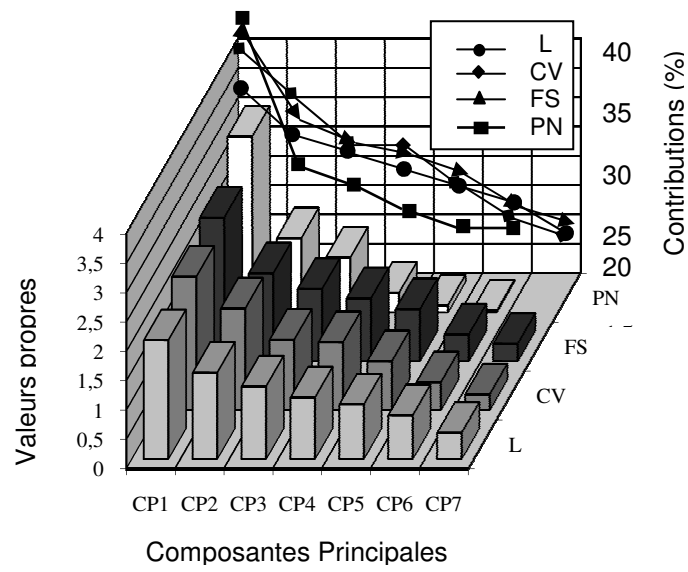
Avant l'utilisation des données (proportions des mélanges) de la matrice pour apprendre un RN, elles doivent être prétraitées et normalisées pour en extraire les corrélations des données (Fig. 3.2). En premier lieu, les données de la matrice d'entrée (Noté C) ont été normalisées, ce qui signifie qu'elles ont une moyenne de 0 et une variance de 1. Ensuite, les paramètres de l'ACP (valeurs propre et vecteurs propres) ont été estimés pour calculer les composantes principales en utilisant la matrice de corrélation déterminée à partir des données normalisées (noté N), la moyenne et la valeur de variance. Après cela, une matrice de transformation est générée (notée TransMat) et un ensemble de données transformées (Ntrans) est produit, composé des éléments orthogonaux (composantes principales) non corrélées. Ces composantes principales ont été

classées en fonction de l'ampleur de leurs variations et ont résulté de la décomposition de la matrice de corrélation des variables par une estimation des valeurs et vecteurs propres.

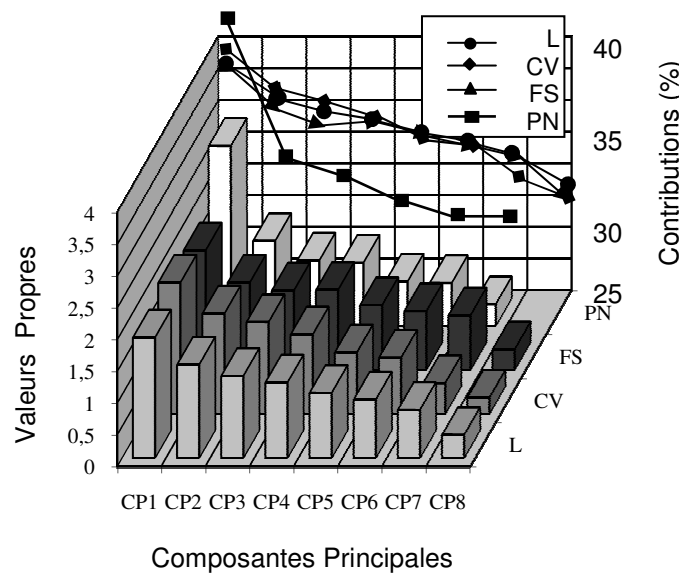
La figure 3.3 illustre une représentation des valeurs propres en fonction des composantes principales pour les huit modèles ainsi que les contributions relatives de chaque composante principale à la variance totale des données.

Par exemple, pour le modèle de prévision de l'ouvrabilité du béton au laitier, la première composante présente presque 26% de la variance, cela signifie que cette composante a un effet significatif sur l'ouvrabilité. Les composantes 2 et 3 présentent chacune une variance d'environ 18 et 15, alors que les quatre dernières composantes présentent environ 14, 13, 9 et 6 respectivement. Les cinq premières composantes présentent environ 84% de la variance. La matrice TransMat a été stockée pour une utilisation ultérieure au cours de la phase du POST-ACP.

Les variances cumulatives des contributions relatives des composantes principales à la variance totale des données pour tous les modèles sont données sur le tableau 3.3. En regardant les valeurs de la distribution, les premières composantes principales à plus de 95% de la variance totale des données ont été choisies et les autres peuvent être négligées, car elles n'ont pas d'incidence importante sur l'information. Ainsi, les 9 et 8 paramètres dans le vecteur d'entrée peuvent être remplacés par 7 et 6 premières composantes principales basées sur des valeurs de VCP choisies pour les modèles de résistance et d'ouvrabilité respectivement, sauf pour la pouzzolane naturelle, les 8 et 7 paramètres sont remplacés par les 6 et 4 premières composantes principales. Ils ont ensuite été transmis aux RNs avec leurs valeurs de sortie désirées ont été entraîné en utilisant différentes valeurs de VCP afin de déterminer le pourcentage optimal de cette valeur de la variation totale dans la base de données.



a. Ouvrabilité



b. Résistance à la compression

Figure 3.3 : Valeurs propres et contributions des composantes à la variance totale.

La méthode ACP nous a permis aussi de déterminer l'importance des variables sur le phénomène à étudier (ouvrabilité et résistance à la compression) où chacune des variables est relative à une composante (tableau 3.4). Ainsi, selon l'ordre de ces composantes on peut classer l'effet de chaque variable sur le phénomène à étudier. Dans notre étude on peut tirer des constatations importantes concernant l'effet de la composition des mélanges de béton sur les propriétés étudiées. Par exemple, pour le MPOL, on note que la première composante désigne principalement le dosage du ciment et le laitier. La seconde composante est liée au sable. La troisième composante correspond à l'eau. La 4^{ème} et 5^{ème} correspondent respectivement aux gros granulats, super-plastifiant et entraineur d'air et enfin la dernière est relative à la température.

Tableau 3.3- Variances cumulatives des contributions des composantes.

		Variances Cumulatives (%)			
		Laitier	Cendres Volantes	Fumée de Silice	Pouzzolane Naturelle
Ouvrabilité	CP1	25,33	28,46	30,58	61,44
	CP2	43,72	50,13	49,36	79,51
	CP3	59,21	65,11	64,79	92,86
	CP4	72,31	79,60	78,22	<u>97,64</u>
	CP5	83,95	90,04	89,30	99,39
	CP6	<u>93,26</u>	<u>95,97</u>	<u>95,01</u>	99,83
	CP7	98,83	99,32	98,71	61,44
Résistance à la Compression	CP1	21,11	22,98	20,93	35,43
	CP2	37,45	40,57	36,23	52,14
	CP3	51,81	56,66	50,16	65,00
	CP4	65,03	70,58	64,17	77,42
	CP5	76,41	81,36	75,52	86,14
	CP6	86,64	91,18	85,79	<u>94,57</u>
	CP7	<u>95,06</u>	<u>96,58</u>	<u>95,34</u>	98,82
	CP8	99,09	99,41	98,92	35,43

Note : CP : Composante Principale

Tableau 3.4 : Importances des variables selon les composantes.

		Importances des Variables aux Composantes (%) (CPi)			
		Laitier	Cendres Volantes	Fumée de Silice	Pouzzolane Naturelle
Ouvrabilité	C	0,63(CP1)	0,51(CP2)	0,46(CP1)	-0,39(CP1)
	A	-0,52(CP1)	-0,55(CP4)	0,90(CP4)	0,68(CP2)
	AF	-0,55(CP2)	-0,54(CP6)	-0,56(CP1)	0,61(CP3)
	GA	0,69 (CP5)	0,61(CP3)	-0,51(CP3)	-0,44(CP1)
	SP	-0,65(CP4)	0,64(CP2)	-0,68(CP2)	-0,42(CP1)
	EA	0,50(CP5)	-0,49(CP1)	0,76(CP5)	-
	E	0,50(CP3)	-0,43(CP3)	0,54(CP2)	0,45(CP1)
	T	0,72(CP6)	0,81(CP5)	0,73(CP6)	-0,44(CP1)
Résistance à la Compression	C	-0,64(CP1)	0,63(CP3)	0,57 (CP1)	0,51(CP1)
	A	0,55(CP1)	0,49(CP1)	-0,65(CP5)	-0,46(CP2)
	AF	-0,56(CP4)	-0,46(CP1)	-0,54(CP1)	-0,46(CP6)
	GA	-0,51(CP5)	-0,55(CP7)	-0,60(CP3)	0,56(CP6)
	SP	0,46(CP3)	-0,61(CP4)	-0,55(CP2)	-0,54(CP5)
	EA	0,56(CP6)	0,59(CP7)	0,77(CP7)	-
	E	-0,60(CP2)	-0,71(CP2)	0,58(CP3)	0,62(CP2)
	T	0,69(CP7)	0,83(CP6)	0,67(CP5)	0,59(CP4)
	C	0,78(CP5)	0,89(CP5)	0,88(CP6)	0,74(CP3)

Note : i : le numéro de chaque la composante principale ; A : Ajout

3.4.2.2. Phase du POST-ACP

Au cours de chaque processus d'apprentissage d'un RN, des performances de validation et de généralisation sur des ensembles de données de test et de validation ont été évaluées. Chaque vecteur de données de validation ou de test doit être post-traité à l'aide de la fonction POST-ACP avant de pouvoir être utilisé par un RN pour estimer ou prévoir la sortie (Fig. 3.2).

Comme la procédure du prétraitement, les données de validation ou le test $C_{val/test}$ ont été normalisées (moyenne 0 et de variance 1). Ensuite, ces données normalisées, $N_{val/test}$ ont été post-traitées en se basant sur la matrice de transformation TransMat (obtenu au cours de la phase de prétraitement) pour

produire une nouvelle matrice de données transformées, $N_{trans_{val/test}}$ composée d'éléments réduits et non corrélés. Pour tous les ajouts, chaque réseau entraîné utilise ces données réduites et non corrélées avec ses poids optimaux obtenus après l'apprentissage pour prévoir les propriétés des bétons de nouvelles formulations.

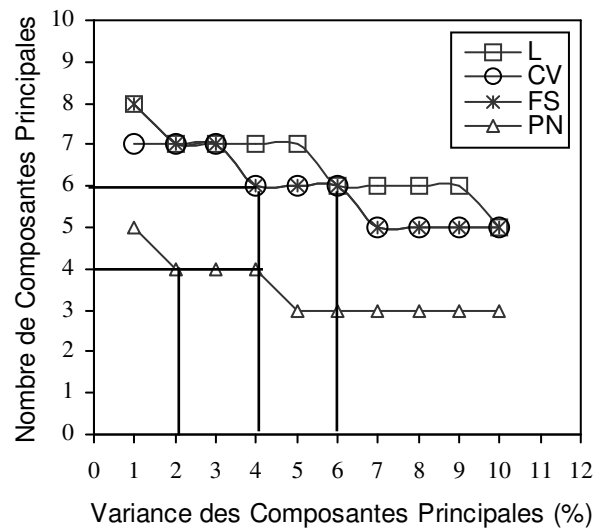
3.4.3. Apprentissage, test et choix du RN

Dans cette étude, huit modèles RNs ont été développés (tableau 3.4). Chaque RNA a été entraîné et testé avec son ensemble de données d'apprentissage, de test et de validation basé sur plusieurs valeurs de VCP, en utilisant l'algorithme de la Régularisation Bayésienne [255]. La raison d'apprentissage de plusieurs RNs est d'obtenir la meilleure architecture du RNs, ainsi que la valeur optimale de VCP. L'architecture optimale dans ce cas, signifie que le nombre optimal de neurones cachés qu'un RN doit avoir en sa couche cachée améliore la capacité de généralisation. La valeur optimale de VCP détermine le nombre optimal des composantes principales à retenir de chaque ensemble de données pour faciliter l'apprentissage du RN.

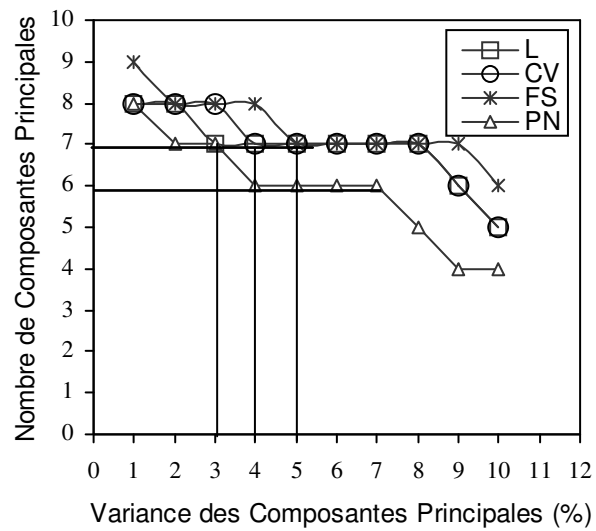
Comme mentionné précédemment, l'apprentissage et le test d'un RN étaient conduits simultanément. En d'autres termes, après l'apprentissage des réseaux, l'ensemble de test a été présenté au réseau à chaque cycle afin de sélectionner les meilleurs RNs. Pour se faire, les données de test ont été d'abord post-traitées ou normalisées à l'aide de la fonction POST-ACP. Après le post-traitement, un ensemble de données de test réduits et non corrélées a été produit et intégré dans le RN pour obtenir les valeurs de sortie correspondant à chaque ensemble de test. Ceci est basé sur le calcul de la somme des carrées d'erreurs qui a une tendance décroissante avec le nombre des cycles d'apprentissage. Elle est donnée par l'expression suivante :

$$SCE = \sum_{i=1}^N (d_i - y_i)^2 \quad (3.9)$$

Avec, SCE : la somme des carrées d'erreurs ; d_i : la sortie désiré du modèle i ; y_i : la sortie réel du modèle i et N : le nombre total de données.



a. Ouvrabilité



b. Résistance à la compression

Figure 3.4 : Variation du nombre des composantes principales avec différents VCP.

Ensuite, une fois les erreurs désirées ont été atteintes, les résultats de sorties obtenus pour chaque modèle ont été comparés avec les résultats réels correspondants. La comparaison a été faite en termes de calcul du coefficient de détermination R^2 et du facteur P_{value} . Généralement, le calcul de P_{value} permet de juger de la signification de la relation étudiée, car, même avec un coefficient de détermination élevé, si la valeur de P_{value} est supérieure à 0,1, la relation demeure non significative. La relation est considérée significative pour des valeurs de P inférieures à 0,001. Les valeurs idéales de P et R sont 0 et 1 respectivement.

3.5 Résultats et discussions

Le tableau 3.5 récapitule les différentes performances d'apprentissage et les architectures adoptées dans notre application. Les huit modèles ont été appliqués par l'introduction de l'ensembles des matrices de données non corrélées et réduites. Après l'apprentissage, les systèmes ont également fourni l'ouvrabilité et la résistance à la compression prévues du béton au laitier, aux cendres volantes, à la fumée de silice et aux pouzzolane naturelle selon les données des mélanges de béton basé sur des valeurs optimales de VCP et des meilleures architectures. Les modèles développés sont meilleurs pour la prévision des propriétés désignées pour tous les ajouts. Aussi les meilleurs résultats sont confirmés pour les modèles avec des vecteurs d'entrées compressés de 7 et 6 composantes principales pour tous les ajouts pour la prévision de la résistance à la compression et l'ouvrabilité du béton respectivement. L'application de tels réseaux conduit à une meilleure prédiction des deux propriétés désignées.

Enfin, il faut noter que le nombre d'entrées soit suffisamment optimal pour que le RN apprenne bien les caractéristiques distinctes entre les données et représente de meilleures performances d'entrée/sortie. Il a été observé qu'au-delà des VCP déterminées pour tous les modèles (Fig. 3.4), le nombre de composants d'entrée est réduit, générant un état de manque d'information ce qui empêche les modèles de bien généraliser. Les résultats globaux montrent qu'un RN généralise mieux quand le nombre de données d'entrées qui lui sont présentés est optimal et ne doit pas consister en trop de corrélations entre ses éléments.

Tableau 3.5 : Architecture et paramètres des modèles développés.

Ajouts	Entrée (X)	Paramètres de l'ACP			Architecture		Paramètres du RNPG					Sortie (Y)
		PCC	VCP	NCP	NCC	NNCC	ITR	E	R ² A	R ² T	P	
L	8	93,26	0,06	6	2	3/10	450	0,030	0,96	0,94	10 ⁻⁴	Ouvrabilité (mm)
CV	8	95,97	0,06	6	2	5/5	800	0,004	0,98	0,93	0	
FS	8	95,02	0,04	6	2	3/9	521	0,050	0,94	0,94	10 ⁻⁶	
PN	7	97,64	0,02	4	2	4/6	994	0,020	0,96	0,97	0	
L	9	95,06	0,03	7	2	9/11	812	0,040	0,98	0,96	0	Résistance en Compression (MPa)
CV	9	96,58	0,04	7	2	5/3	224	0,020	0,92	0,92	0	
FS	9	95,34	0,05	7	2	10/5	240	0,040	0,91	0,90	10 ⁻⁴	
PN	8	94,57	0,04	6	2	7/12	410	0,034	0,98	0,98	0	

Note : PCC : Pourcentage Cumulés des Composantes, VCP : Variance des Composantes Principales, NCP : Nombre des Composantes Principales, NCC : Nombre des Couches Cachées, NNCC : Nombre de Neurone dans chaque Couche Cachée, ITR : Nombre d'Itérations ou Cycles, R² Coefficient de détermination, E : Erreur d'apprentissage. A : Apprentissage, T : Test.

3.6. Comparaison avec les modèles de régression multiple

L'exécution des modèles des RNs développés a été comparée à une approche de régression multiple avec le modèle mathématique statistique quadratique non linéaire. Le modèle a les coefficients de régression $a_0, a_1, \dots, a_n$.

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_1^2 + a_3x_2 + a_4x_2^2 + \dots a_{2n-1}x_n + a_{2n}x_n^2 \quad (3.10)$$

Ici, $x_1, \dots, x_n$, sont des paramètres d'entrée du modèle (composition du béton). La valeur de n dépendra du nombre de ces paramètres et y représente le paramètre de sortie (propriétés). Les coefficients de la régression du modèle ont été calculés par minimisation de la somme des carrées des déviations donnée par l'équation suivante :

$$\sum_{i=1}^n (y_i - y'_i)^2 \quad (3.11)$$

Où y' est la sortie désirée (propriétés).

Tableau 3.6 : Coefficients de régression des modèles de régressions multiples.

Coefficients (Paramètres)	Ouvrabilité (mm)				Resistance à la Compression (MPa)			
	L	CV	FS	PN	L	CV	FS	PN
A_0	973,2	304,2	-1323,2	-3987,4	-104,5	-54,43	077,9	246,1
A_1/a_2 (C/C ²)	0,304/ -2,10-4	0,535/ 5 10-4	-1,23/ 0,00	-0,09/ 0,00	-0,289 /0,000	0,264/ -1,10-4	0,2047/ -4 10-4	0,162 -
A_3/a_4 (A/A ²)	0,262/ -3,10-4	0,451/ -7 10-4	-0,92/ 0,00	0,38/ 0,00	-0,213 /0,000	0,154/ 0,000	0,507/ -0,002	0,000 -
A_5/a_6 (AF/AF ²)	0,839/ - 6 10-4	0,181/ 1 10-4	-0,73/ 0,00	-0,57/ 0,00	-0,293 /0,000	0,249/ -1 10-4	-0,685/ -5 10-3	0,086/ 1 10-4
A_7/a_8 (GA/GA ²)	-1,561/ 6 10-4	0,0002/ 11,857	-0,76/ 0,00	1,53/ -0,00	-0,014/ -0,000	-0,406/ 0,0002	0,1001/ 3 10-4	-0,194/ 2 10-4
A_9/a_{10} (SP/SP ²)	9,005/ 0,066	0,0281/ 2 10-4	14,76/ -0,29	3,40/ 0,19	-1,600/ 0,099	0,651/ -0,030	-0,475/ 0,005	-0,593/ 3 10-4
a_{11}/a_{12} (EA/EA ²)	-0,007/ 0,000	-11,86/ 0,277	-0,02/ 0,00	-3,69/ 0,01	-0,006/ 0,000	0,049/ -0,0001	-0,027/ 0,00001	-1,394/ 0,539
a_{13}/a_{14} (E/E ²)	-3,056/ 0,007	-0,244/ 0,0003	-2,19/ 0,01	-	-0,627/ 0,001	1,168/ -0,004	0,231/ 0,0014	0,606/ -1,5 10-3
a_{15}/a_{16} (T/T ²)	-1,94/ 0,033	-10,66/ 0,0326	127,24/ 2,75	325,5/ -7,35	0,987/ -0,016	0,108/ 0,005	1,874/ -0,027	-0,072/ 3 10-4
a_{17}/a_{18} (J/J ²)	-	31,60/ -0,878	-	-	1,092/ -0,008	0,697/ -4,610-3	1,336/ -0,011	0,445/ -2,110-3

Note : C : Ciment ; A : Ajout ; AF : Agrégats Fins ; GA : Gros Agrégats ; SP : Superplastifiant ; EA : Entraîneur d'Air ; Eau ; T : Température ; J : Jours ;

La performance du modèle peut être évaluée par le coefficient de détermination (R^2) et le coefficient de détermination ajusté (R^2 ajusté). Par conséquent, huit modèles de régression multiples ont été développés pour la prévision de l'ouvrabilité et la résistance à la compression des bétons aux ajouts désignés.

Ces modèles ont été testés sur l'ensemble des données originelles non traitées par l'ACP. Les coefficients de détermination de ses modèles sont déterminés par la méthode des moindres carrée (tableau 3.6).

Le tableau 3.7 représente la comparaison des résultats de l'utilisation du modèle de régression multiple au moyen du logiciel STATISTICA 7.0 [256] et les résultats des modèles de réseaux de neurones. Cette comparaison a été faite en termes du coefficient de détermination R^2 et du facteur P_{value} .

La comparaison entre les coefficients de détermination R^2 du modèle du réseau de neurones et celui de régression multiple prouve que les modèles de RNs sont mieux soutenus par des données expérimentales que l'analyse de régression.

Tableau 3.7 : Comparaison entre les modèles RNs et des régressions multiples

Modèles		Réseau de Neurone		Régression Multiple		
		R^2	P_{value}	R^2	R^2 ajusté	P_{value}
Ouvrabilité (mm)	L	0,99	10^{-4}	0,722	0,693	0
	CV	0,98	0	0,626	0,560	0
	FS	0,96	10^{-6}	0,494	0,434	0
	PN	0,98	0	0,954	0,923	0
Résistance à la compression (MPa)	L	0,96	0	0,775	0,767	0
	CV	0,90	0	0,411	0,3836	0
	FS	0,94	10^{-4}	0,816	0,811	0
	PN	0,97	0	0,887	0,876	0

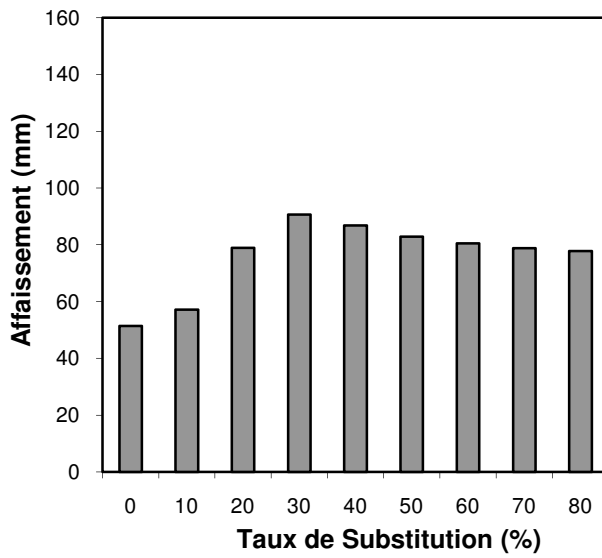
3.7. Exploitation des modèles RN

Les modèles RN développés sont utilisés pour simuler les effets de certains paramètres sur l'affaissement et la résistance à la compression du béton. L'analyse a conduit aux résultats de simulation montrés sur les figures 3.5 et 3.6. Ces figures montrent l'effet important du taux de substitution du laitier, des cendres volantes, de fumée de silice et de pouzzolane naturelle sur l'affaissement et la résistance à la compression des mélanges de béton réalisés (Tableau 3.8).

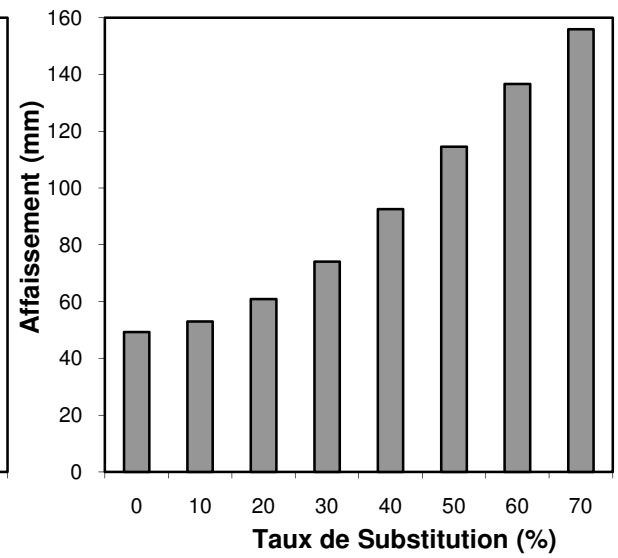
Tableau 3.8 : Données d'analyse de la résistance à la compression et l'ouvrabilité.

Composantes	Proportion des Mélanges				
	Mélange 1 (contrôle)	Mélange 2 L (0-80%)	Mélange 3 CV (10-0%)	Mélange 4 FS (5-20%)	Mélange 5 PN (10-50%)
Rapport E/C	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Ciment (kg/m ³)	350	350	350	350	350
Ajouts (kg/m ³)	0	(35-280)	(35-245)	(17-70)	(35- 150)
Eau (kg/m ³)	175	175	175	175	175
Superplastifiant (l/m ³)	0	0	0	4	0
Gros Agrégats (kg/m ³)	1075	1075	1075	1075	1075
Agrégats Fins (kg/m ³)	700	700	700	700	700

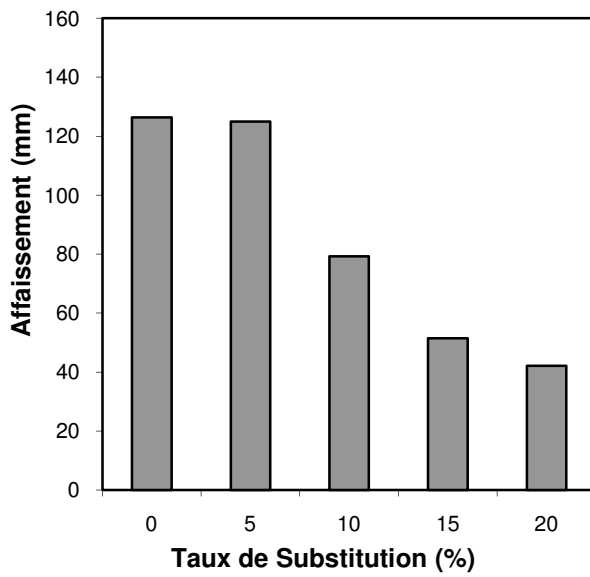
Les conclusions tirées de ces figures sont conformes avec certaines règles de conception des mélanges de béton déjà proposés par plusieurs chercheurs et reflètent bien l'incidence de ses ajouts sur le béton [257]. En plus, ses résultats indiquent que les modèles développés montrent de meilleures performances.



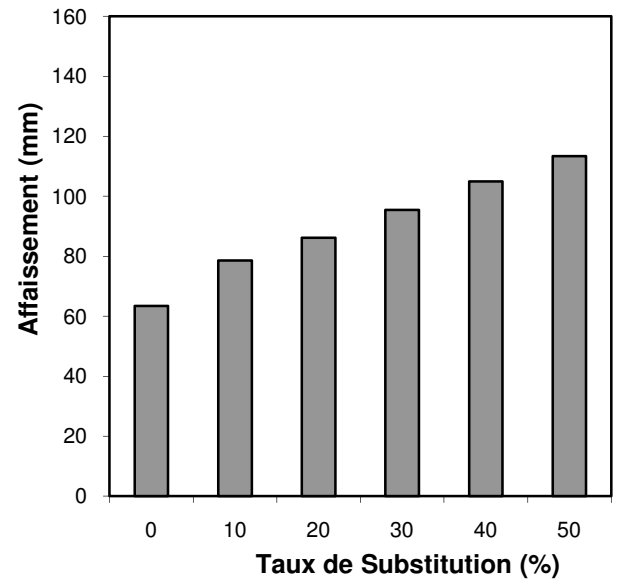
a. Laitier



b. Cendres Volantes

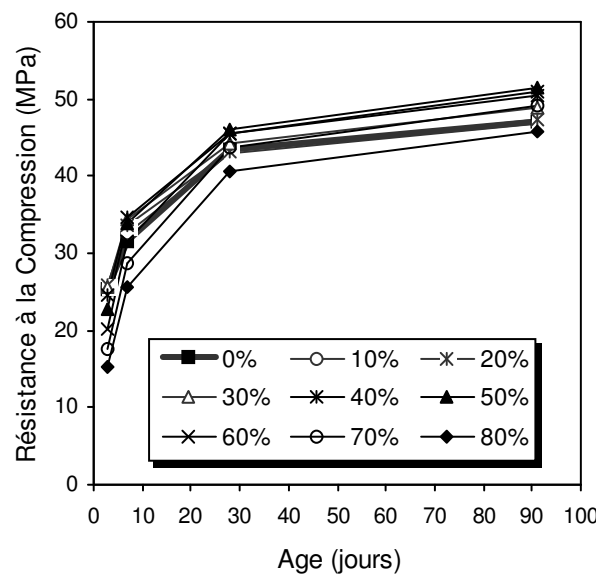


c. Fumée de Silice

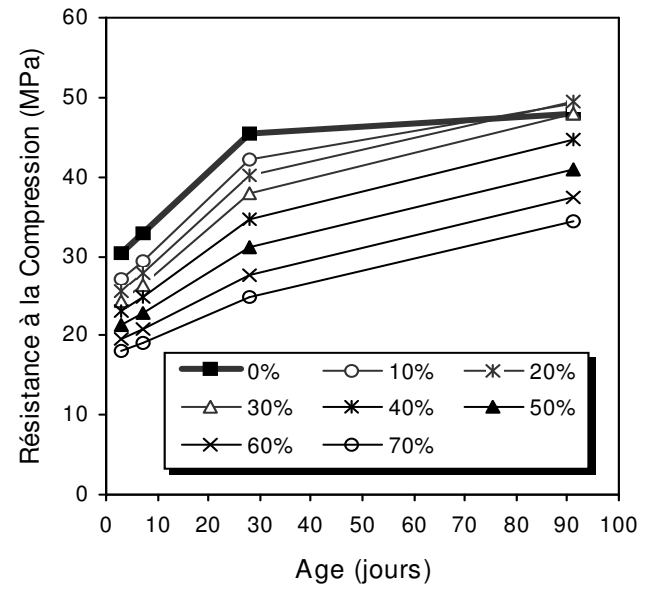


d. Pouzzolane Naturelle

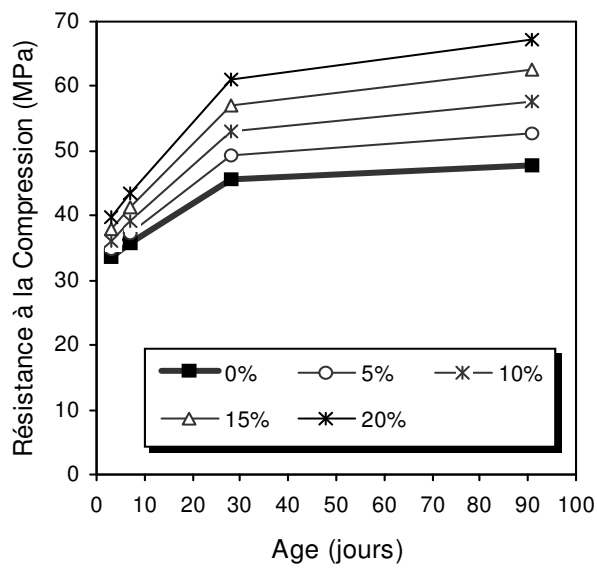
Figure 3.5 : Effet des taux de substitution de différents ajouts cimentaires sur l'ouvrabilité des bétons.



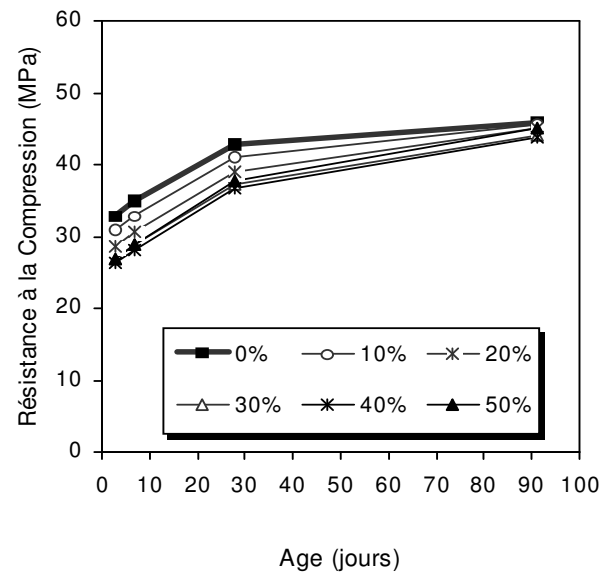
a. Laitier



b. Cendres Volantes



c. Fumée de Silice



d. Pouzzolane Naturelle

Figure 3.6 : Effet des taux de substitution de différents ajouts cimentaires sur la résistance à compression des bétons.

3.8. Conclusion

L'application de l'approche réseaux de neurones pour prévoir les propriétés du béton a permis de développer des systèmes avec une précision tout à fait satisfaisante [258]. En vue d'améliorer la capacité de prévision de ces systèmes, l'approche de l'analyse en composantes principale a été appliquée. L'introduction de cette technique a conduit à la compression des données d'entrée et à l'élimination des corrélations entre elles. C'est pourquoi on s'est intéressé dans ce travail à la combinaison de ces deux approches pour prévoir efficacement l'ouvrabilité et la résistance à la compression d'un béton contenant des ajouts cimentaires (laitier, cendres volantes, fumée de silice et pouzzolane naturelle). Deux types de traitement de données ont été mises en œuvre sous l'environnement du logiciel MATLAB pour permettre d'étudier les effets de chaque paramètre de la composition du béton sur les propriétés désirées. Par conséquent, huit modèles ont été développés. Ses modèles ont été comparées par confrontation de ses résultats prédites avec des résultats des modèles de régressions multiples développées. Les résultats prouvent que les modèles de RNs sont mieux soutenus par des données expérimentales que l'analyse de régression notamment avec les données réduites et non corrélées. Les résultats suggèrent aussi que la méthode de l'ACP pour le traitement des données est très utile pour l'amélioration de la performance de prévision avec les modèles développés. Pour démontrer l'utilité de la méthode proposée pour améliorer la performance des modèles de RN développés dans ce chapitre, les résultats des ses modèles seront comparés à ceux obtenus à partir des essais réels en laboratoire (chapitre 5).

CHAPITRE 4

MODÉLISATION DE L'EFFICACITÉ DES AJOUTS DANS LE BÉTON

4.1. Introduction

L'emploi fréquent des ajouts cimentaires (laitier, cendres volantes, fumée de silice, pouzzolane naturelle, etc.) a entraîné l'apparition de normes dont le but est l'uniformisation et la réglementation de leurs conditions d'utilisation. Leur incorporation comme additions minérales dans les matrices cimentaires a été étudiée dans différents pays par un nombre significatif de chercheurs appliquant différentes approches et donnant des résultats encourageants concernant les propriétés mécaniques et la durabilité du béton. On note par exemple l'approche de Smith [259], qui fut l'un des premières à définir un coefficient d'efficacité pour une addition dans le but de proposer une méthode rationnelle de formulation de béton contenant des cendres volantes. Des approches similaires ont été ultérieurement utilisées par plusieurs chercheurs [260-265]. Ces approches existent dans plusieurs pays, mais les valeurs des coefficients d'efficacité sont variables d'un pays à l'autre. Ainsi, la façon de caractériser par un seul paramètre l'activité d'une addition présente quelques dangers parce que ces coefficients uniques ne tiennent pas compte des conditions réelles d'utilisation du matériau.

Le but de ce chapitre est d'appliquer l'approche réseaux de neurones pour prévoir l'efficacité du laitier, des cendres volantes, de la fumée de silice et de la pouzzolane naturelle, lorsqu'elles sont introduites dans un béton. En se basant sur les résultats de la base de données expérimentales déjà organisée (chapitre 2) nous montrons que cette approche est très bénéfique car elle est basée sur des approximations qui permettent de tenir compte des facteurs essentiels qui sont la composition, le type et l'âge du béton.

4.2. Concepts et notions théoriques

4.2.1. Indice d'activité

La notion d'indice d'activité a été introduite pour quantifier l'influence de l'incorporation d'une addition minérale en remplacement d'une partie P (taux de substitution) de ciment sur la résistance des mortiers ou bétons. De façon générale, cet indice, noté i , est défini comme le rapport des résistances mécaniques en compression pour un rapport eau/ciment donné (E/C). Dans le cas général, on peut écrire:

$$i_p(t) = \frac{f_p(t)}{f_0(t)} \quad (4.1)$$

Où, $f_p(t)$ et $f_0(t)$ sont respectivement la résistance du mortier contenant une fraction p d'addition et la résistance du mortier témoin (sans addition).

4.2.2. Concept de liant équivalent

Pour spécifier les règles de substitution des additions minérales au ciment, le liant est comparé au ciment auquel l'addition peut se substituer, il convient donc, en premier lieu, de définir ce ciment, c'est à dire, préciser sa classe et son type. Il faut ensuite préciser pour quelle propriété le liant doit être équivalent au ciment (équivalence vis à vis de résistance et l'équivalence vis à vis des paramètres de durabilité : carbonatation pour un environnement marin ou en présence de sels fondants, pénétration des chlorures ou encore tenue au gel, etc.). L'équivalence dépend donc de l'addition considérée, du ciment et de l'environnement [264].

4.2.3. Coefficient d'efficacité

Quantitativement, l'équivalence vis à vis d'une propriété d'un ciment de référence est assurée par l'intermédiaire d'un coefficient χ affecté à l'addition. On définit la quantité de liant équivalent noté L_{eq} comme la somme d'une quantité C d'un ciment donné et d'une quantité A d'addition pondérée de son coefficient χ , soit :

$$L_{eq} = C + \chi A \quad (4.2)$$

Où L_{eq} , C et A sont exprimés avec les mêmes unités. Par définition, pour une addition qui aurait un comportement identique à celui du ciment, la valeur du coefficient χ est égale à 1, l'activité dépend donc des valeurs de χ (Fig.4.1). A priori, le coefficient d'efficacité dépend du ciment de référence, de l'âge du mortier et naturellement du type d'addition et de sa quantité.

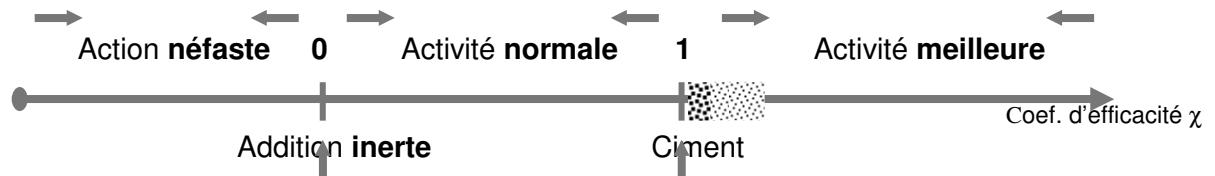


Figure 4.1 : Différentes classes d'activité selon le coefficient d'activité.

4.3. Modalités d'évaluation du coefficient d'efficacité

Le calcul du coefficient d'efficacité peut être effectué de différentes façons. Le mélange « ciment + addition » est remplacée par le liant équivalent, ce qui introduit l'indice d'activité dans l'évaluation du coefficient d'efficacité.

4.3.1. Approche expérimentale

Cette approche est utilisée par plusieurs auteurs, elle consiste globalement à déterminer expérimentalement (sur le mortier ou le béton contenant l'addition) le rapport E/L_{eq} qui permet d'obtenir la même résistance mécanique que le ciment sans addition. Également appelé le concept de ΔE défini par Schiessl [262] dans une évaluation sur le béton contenant différents ciments C_0 et une addition A (cendres volantes). Ce concept est connu par la réduction ΔE du rapport eau/ciment du béton aux cendres volantes $E/(C+\chi A)$ par comparaison au rapport E/C du béton de référence.

En outre, χ est défini de telle manière que le rapport E/C_0 de béton de référence et le rapport $E/(C+\chi A)$ de béton avec ajout soient identiques. Ce concept est appliqué pour les cendres volantes [266], la fumée de silice [267] et les laitiers [268] et a donné des résultats concluants.

4.3.2. Approche rationnelle

L'approche rationnelle utilise une loi empirique exprimant la résistance du béton (ou mortier) en fonction du rapport E/C_0 , où C_0 est la masse de ciment de référence sans addition. A partir des relations telles que celles développées par Bolomey, Férét ou Abrams, il suffit de remplacer la quantité de liant équivalent (éq.4.2).

Tableau 4.1 : Expressions des coefficients d'efficacité obtenues à partir des relations de Bolomey, Feret et d'Abrams.

Relation	Résistance f_c	Indice d'Activité i	Coefficient d'Efficacité χ
Bolomey	$f_c = k \left(\frac{C_0}{E} - 0,5 \right)$	$i^B = 1 - \frac{p(1 - \chi^B)}{1 - 0,5 \frac{E}{C_0}}$	$\chi^B = 1 - \frac{1 - i^B}{p} \left(1 - 0,5 \frac{E}{C_0} \right)$
Feret	$f_c = k_f \left(\frac{C}{C + E + V} \right)^2$	$i^F = \frac{1}{\lambda} \left(1 - \frac{0,5 d_c}{1 + 0,5 d_c - p(1 - \chi^F)} \right)^2$	$\chi^F = 1 - \frac{1}{p} \left(1 + 0,5 d_c + \frac{0,5 d_c}{\sqrt{\lambda i^F - 1}} \right)$
Abrams	$f_c = \frac{k_1}{k_2^{1,5 \frac{E}{C_0}}}$	$i^A = k_2^{1,5 \frac{E}{C_0}} \left(1 - \frac{1}{1 - p + p \chi^A} \right)$	$\chi^A = \left(\frac{1}{1 - \frac{\ln(i^A)}{1,5 \frac{E}{C_0} \ln k_2}} - 1 + p \right) \frac{1}{p}$

Note : P : taux de substitution, V : la masse d'eau équivalente au volume d'air occlus, C_0 : masse de liant égale à la masse de ciment dans le mortier témoin, E : masse d'eau, d_c : la densité de ciment, λ : terme fonction du d_c , k_2 : coefficient de la relation d'Abrams, nécessaire au calcul du facteur d'efficacité, est constante qui dépend principalement des propriétés du ciment utilisé, k : paramètre dépendant du type de ciment en MPa.

Comme le montre le tableau 4.1, le coefficient d'efficacité est alors exprimé en fonction de l'indice d'activité et des paramètres de la composition du mélange avec addition (rapport E/C_0 et dosage en addition P). Le coefficient χ est donc implicitement fonction du temps. En pratique, les relations de Bolomey, de Feret ou d'Abrams donnent des résultats comparables [264, 269, 270].

4.4. Revue sur la modélisation de l'efficacité des ajouts en béton

En raison de l'abondance des additions minérales et les grandes variations de leurs caractéristiques physiques et chimiques, le développement d'un concept général pour leur usage en béton est exigé. Dans cette partie, le concept du coefficient d'efficacité est appliqué comme une mesure de performance relative de ces matériaux comparés au ciment Portland. Ce concept a été proposé par Smith [259] et a été initialement appliqué à proportionner rationnellement des cendres volantes. Ainsi, le concept du coefficient d'efficacité a été facilement appliqué à d'autres ajouts, comme la fumée de silice et le laitier des hauts fourneaux. Des méthodes étaient proposées pour l'estimation de l'efficacité et par l'application de ces coefficients dans la composition des mélanges des bétons contenant ces ajouts (Tableau 4.2).

En 1993, Babu et al. [265] ont proposé un coefficient d'efficacité global χ pour un ajout qui est la somme de deux coefficients distincts, un coefficient général qui est constant pour tous les pourcentages de remplacement et un coefficient de pourcentage qui varie avec le taux de remplacement. Les auteurs ont ensuite utilisé ce modèle pour évaluer l'efficacité des fumées de silice, des cendres volantes et du laitier dans le béton [266-268]. Il a été constaté que ce coefficient d'efficacité change avec l'âge, le type et la quantité de ciment, les conditions de cure et la température. Plus tard, Papadakis et al. [271, 272] ont proposé une méthode pour évaluer le coefficient d'efficacité pour les différents ajouts naturels et artificiels en utilisant le concept de l'indice de l'activité vis-à-vis de la résistance à la compression, la pénétration des chlorures et la carbonatation. De plus grandes valeurs des coefficients d'efficacité ont été calculés vis à vis les chlorures par rapport aux valeurs correspondantes pour la résistance à la compression ($\chi = 2-2,5$ pour les cendres volantes et $\chi = 1$ pour les pouzzolanes naturelles). Les auteurs ont ensuite corrélié la valeur de χ avec la teneur en silice réactive des ajouts et une relation analytique a été obtenue [273]. Par comparaison expérimentale, cette relation s'est expérimentalement avérée valide pour les cendres volantes et les laitiers, tout en surestimant les teneurs en χ pour les pouzzolanes naturelles.

Tableau 4.2 : Historique des recherches sur l'efficacité des additions minérales.

Auteurs [Réf]	Année	Addition	Concept Utilisé	Propriété Étudiée
Smith (I.A) [259]	1967	Cendres volantes	Concept ΔE	Résistance à la compression
Babu et Prakash [266]	1995	Fumée de silice	Concept ΔE	Résistance à la compression à 28 jours
Hassabalah et Wenwel [275]	1995	Cendres volantes	Statistique	Résistance à la compression À 2, 7, 28, et 90 jours
Babu et Rao [267]	1996	Cendres volantes	Concept ΔE	Résistance à la compression à 7, 28, et 90 jours
Cyrs et al. [264]	2000	Cendres volantes, Fumée de silice et Calcaire	Liant Équivalent	Résistance à la compression à 28, et 180 jours
Lawrence et Ringo [269]	2000	Cendres volantes	Liant Équivalent	Résistance à la compression à 7, 28, 90, et 180 jours
Babu et Kumar [268]	2000	Laitier	Concept ΔE	Résistance à la compression à 28 jours
Papadakis et Tsmias [271]	2002	Cendres volantes, Laitier et Pouzzolane N	Concept ΔE	Résistance à la compression à 90 jours
Papadakis [272]	2002	Cendres volantes, laitier et Pouzzolane N	Chimique	Pénétration aux ions chlores, Carbonatation
Badogainnis et al. [281]	2004	Métakaolin	Résistance relative (Neville)	Résistance à la compression à 2, 7, 28 et 90 jours
Wong et Abdul Razak [282]	2005	Fumée de silice et Métakaolin	Résistance relative (Abrams)	Résistance à la compression à 28 et 180 jours
Ezziane et al. [278]	2006	Laitier	Liant Équivalent	Résistance à la compression
Bougara et al. [279]	2010	Laitier	Liant Équivalent	Résistance à la compression à 1, 7, 28 et 90 jours

Note : Concept ΔE : concept connu par la réduction ΔE du rapport eau/liant du béton aux ajouts $E/(C+\chi A)$ par comparaison au rapport eau/liant du béton de référence, N : Naturelles.

4.1.1. Efficacité des cendres volantes

Des difficultés ont été rencontrées pour la mesure de l'efficacité des cendres volantes en raison des nombreuses variables impliquées, en termes de caractéristiques des cendres volantes et du ciment. Des efforts postérieurs vers une évaluation efficace ont mené aux méthodes rationnelles [264]. Ceci a été fait en ajustant une quantité de cendres volantes présentée à remplacer le ciment par χ des cendres volantes. L'évaluation de ce facteur a été l'objet de plusieurs recherches (Tableau 4.3).

Tableau 4.3 : Facteur d'efficacité fonction du taux de substitution des cendres volantes.

Auteurs [Réf]	Coefficient d'efficacité χ	Taux de Substitution P%
Smith [259]	0,25	10 ÷ 25
Schiessl [262]	0,50	≤ 28
Babu et Rao [267]	0,30	10 ÷ 75
Norme Allemande	0,30	10 ÷ 25
Code Britannique	0,30	10 ÷ 50
Le code de CEB-FIP	0,40	15 ÷ 40
Norme Suédoise	0,50	-

Les informations ci-dessus prouvent clairement qu'une valeur simple d'efficacité (0,25 à 0,50) a été recommandée, limitant le taux de substitution à un maximum indiqué (10 à 75%).

Selon Sharma et al. [263] l'efficacité des cendres volantes dépend non seulement des caractéristiques physiques et chimiques des cendres volantes et du taux d'addition, mais est également influencée par les paramètres de la formulation : la gamme de résistance et l'âge. En revanche, une autre étude indique que l'effet du rapport E/C sur l'efficacité était mineur même pour différents types de ciment [274]. Hassaballah et Wenwel [275] ont proposé une méthode basée sur la résistance pour obtenir la valeur de χ pour les cendres volantes.

Cette méthode est basée sur la comparaison des résistances à la compression de deux mélanges de béton avec et sans cendres volantes. Si les deux mélanges ont une maniabilité similaire, alors il est prévu que la résistance à la compression à 28 jours du mélange (f_c') est supérieure que celle du second mélange (f_c). Par conséquent, la contribution totale de cendres volantes à la résistance à la compression est la différence entre f_c' et f_c . Les auteurs ont ensuite défini le rapport de cette différence du mélange contrôle en tant que le coefficient d'efficacité de l'ajout ($\chi = (f_c' - f_c) / f_c$). Par conséquent, selon cette méthode, les valeurs positives de χ indiquent un gain de résistance tandis que les valeurs négatives indiquent une perte de résistance.

L'étude de Babu et Rao [266] a été principalement concernée par la réévaluation de l'efficacité des cendres volantes à différents âges pour le béton traité à température normale. L'efficacité globale χ a été évaluée comme combinaison des deux efficacités différentes ($\chi = \chi_e + \chi_p$) où, χ_e est le facteur d'efficacité général et χ_p est le facteur d'efficacité de pourcentage. La combinaison de ces deux coefficients pour des substitutions entre 15 et 75% a prouvé que ce facteur varie de 0,95 à 0,13 à 7 jours, de 1,15 à 0,33 à 28 jours et de 1,25 à 0,43 à 90 jours. Ceci prouve clairement que le facteur d'efficacité global χ des cendres volantes ne peut pas être en juste proportion représentée par une valeur simple.

4.4.2. Efficacité du laitier des hauts fourneaux

Pour évaluer l'efficacité du laitier des hauts fourneaux dans les ciments, certains paramètres comme la composition chimique, la réactivité hydraulique et la finesse ont été soigneusement examinées par plusieurs chercheurs. Initialement, les chercheurs ont essayé d'exprimer la réactivité du laitier en termes d'indice d'activité ou indice hydraulique, vu sa composition chimique. Ce dernier est défini selon l'ASTM C989 [276] comme le rapport en pourcentage de la résistance moyenne à la compression des cubes de mortier du ciment contenant 50% du laitier à la résistance à la compression des cubes de mortier de ciment sans ajout à un âge indiqué. Swamy et Bouikni [277] ont proposé que la quantité du liant doit être augmentée par 10% pour le remplacement 50% du laitier et de 20% pour le

remplacement 65% pour atteindre une résistance comparable à celle d'un béton normal.

A partir d'une étude réalisée sur des résultats expérimentaux publiés par différents chercheurs, Babu [268] a évalué le coefficient d'efficacité du laitier en béton à 28 jours pour des taux de substitution de 10 à 80%. Il a été constaté que le coefficient d'efficacité global χ à 28 jours varie de 1,29 à 0,7. Ainsi, Ezziane et al. [278] ont déterminé le coefficient d'efficacité du laitier sous différentes conditions de cures par l'utilisation du concept de liant équivalent. Très récemment, Bougara et al. [279] ont évalué le coefficient d'efficacité du laitier granulé de haut fourneau selon le concept de liant équivalent. Ils ont obtenu que ce coefficient varie de -0,05 à 1,67 correspondant aux taux de substitutions optimales variant de 39 à 15% respectivement aux âges de 1 à 90 jours. Il a été également observé que le changement du rapport E/Léq de 0,33 à 0,27 ne modifie pas sensiblement les facteurs d'efficacité qui en résultaient.

4.4.3. Efficacité de la fumée de silice

Semblable à ce qui précède, des efforts de recherches ces dernières années ont été orientés pour obtenir l'activité de la fumée de silice en béton en termes de quantité de ciment remplacée par son coefficient d'efficacité. Selon Jaren [280], le coefficient d'efficacité de la fumée de silice se situe entre 2 à 5, et varie avec la teneur en fumée de silice et en ciment, l'âge, les conditions de séchage, le type et le dosage de superplastifiant et le type de ciment. Les études de Maage [261] sur l'efficacité de la fumée de silice en béton ont prouvé que le coefficient χ augmente pour des classes de résistances plus élevées de résistance. Cette étude a également inclus l'évaluation des efficacités basées sur les conditions de cure, la perméabilité, la carbonatation et, la pénétration de chlorures. Sellevold et Radjy [260] ont également proposé un autre coefficient d'efficacité χ_w qui tient compte de la demande en eau d'un mélange donné (résistance) et l'ont appelé coefficient d'efficacité à une ouvrabilité constante. Babu et Prakash [267], en utilisant le concept de ΔE a montré que:

- l'efficacité globale de la fumée de silice χ ne peut être représenté pas une valeur constante pour des substitutions allant de 3 à 40%;

- l'efficacité globale χ s'est avéré une multiplication du coefficient d'efficacité général χ_e constant à tous les pourcentages de remplacement et du coefficient d'efficacité de pourcentage χ_p changeant avec le pourcentage du remplacement. Généralement, le coefficient d'efficacité χ_e égal à 3 à tous les pourcentages de remplacement pour les résistances à la compression à 28 jours. Il a constaté que la valeur du χ_p et du χ varie de 2,28 à 0,37 et de 6,85 à 1,1 respectivement, pour des substitutions allons de 5 à 40%.

Plus récemment, Badoigiannis et al. [281] ont utilisé le concept de coefficient d'efficacité pour la prévision de la résistance à la compression du Métakaolin. Wong et Abdul Razak [282] ont proposé un modèle pour l'évaluation du coefficient d'efficacité par une approche alternative. Une investigation menée en laboratoire sur la fumée de silice et le Métakaolin a montré que les coefficients d'efficacité calculées varient avec le type de l'ajout, le taux de substitution et l'âge. A 28 jours, les valeurs de χ varient de 1,6 à 2,3 pour le Métakaolin et de 2,1 à 3,1 pour la fumée de silice.

4.4.4. Efficacité de la pouzzolane naturelle

L'évaluation du coefficient d'efficacité de la pouzzolane naturelle est très onéreuse et aucune méthode ou modèle ne donnent des résultats satisfaisants. Pour cette raison, l'approche réseaux de neurones est appliquée dans cette étude pour une estimation raisonnable de ce coefficient. Cette approche est initialement appliquée avec succès pour prévoir l'efficacité du laitier de haut fourneau et de bons résultats ont été obtenus [283].

4.5. Évaluation de l'efficacité des ajouts par l'approche réseaux de neurones

Pour l'évaluation du coefficient d'efficacité par l'application de l'approche réseaux de neurones, nous avons choisi les 4 additions minérales, le laitier, les cendres volantes, la fumée de silice et la pouzzolane naturelle qui étaient prises en considération dans le chapitre précédent pour la prévision de la résistance à la compression et l'ouvrabilité. Les coefficients d'efficacité de ses ajouts ont été calculés en se basant sur les modèles de résistance de Ferret, après avoir testé les modèles de résistance de Bolomey et d'Abrams. La base de données

expérimentales est celle préparée et organisée dans le chapitre 3. Les données étaient divisées en trois parties. Environ 60% de données sont employées pour l'apprentissage, 20% pour la phase de test et 20% pour la phase de validation. Le choix des paramètres d'entrée s'est fait selon leurs influences sur le coefficient d'efficacité comme noté lors des différentes applications dans les études antérieures. Ses paramètres représentent pour tous les ajouts la composition du béton à l'exception des agrégats (Ciment, Pourcentage d'Ajout, Eau/Liant, Température, et Age).

4.5.1. Méthodologie de développement des modèles RN

Les quatre modèles RN qui ont été développés pour la modélisation et la prévision de l'efficacité des ajouts désignés sont présentées. Les architectures de ces modèles sont décrites d'abord suivie de la détermination des paramètres d'apprentissage et les performances. Chaque modèle a été entraîné et testé avec son ensemble de données d'apprentissage, de test, et de validation en utilisant l'algorithme de rétro-propagation. Dans un premier temps, nous avons procédé à la détermination du nombre optimal de neurones dans les couches cachés. Le tableau suivant récapitule les différents paramètres d'apprentissage et les architectures des modèles RN développés dans cette application.

Tableau 4.4 : Architecture et paramètres du RN adoptés.

	Entrée (X_N)	Architectures		Performances					Sortie (Y)
		N.CC	N.NCC	N.ITR	E.A	E.T	R ² A	R ² T	
L*	(1) Ciment (kg/m ³)	2	7-7	1000	0,008	0,005	0,80	0,93	Coefficient d'Efficacité (χ)
CV	(2) Pourcentage d'Ajout (%)	2	5-4	207	0,01	0,01	0,87	0,86	
FS	(3) Eau/Liant	2	5-8	1000	0,04	0,02	0,79	0,87	
PN	(4) Température* (°C) (5) Age (jours)	2	3-7	1000	0,02	0,01	0,88	0,90	

Note : N. CC : nombre de couche cachée ; N.N. C.C : nombre de neurone dans la couche caché, N. ITR : nombre d'itérations, R² : coefficient de détermination, A : Apprentissage, T : Test, et E : Erreur. * : la température est un paramètre d'entrée concernant seulement le modèle de prévision de l'efficacité du laitier.

En regardant le tableau 4.4, on peut noter que les simulations numériques ont permis de déterminer les architectures optimales pour chaque ajout. Après la comparaison des résultats obtenus de l'application de ses architectures avec les résultats réels, on peut noter que les modèles donnent de meilleurs prévisions du coefficient d'efficacité avec des coefficients de détermination plus de 0,80 et des erreurs de moins de 0,04 autant pour la phase apprentissage que pour la phase de test. Ceci montre une performance satisfaisante des modèles.

4.4.2. Confrontation des résultats

On peut dire que la méthode proposée ci-dessus pour évaluer l'efficacité des ajouts s'est également avérée appropriée dans les quatre modèles développés. Une analyse de sensibilité a été effectuée avec ces modèles par la confrontation des résultats prédits avec des résultats d'autres chercheurs. Le tableau 4.5 présente les valeurs prédites de ces coefficients en fonction de l'âge du béton pour différents taux de substitution de chaque ajout. Selon ce tableau, on note que l'évaluation a prouvé que, ces coefficients d'efficacité suivent des valeurs décroissantes fonctions du taux de substitution pour tous les âges. Les figures 4.2, 4.3 et 4.4 représentent respectivement la comparaison de la variation du coefficient d'efficacité χ à 28 jours d'âge, du laitier, des cendres volantes, et de la fumée de silice calculés par les modèles RN avec les résultats trouvés par Babu et al. [268, 267, 266].

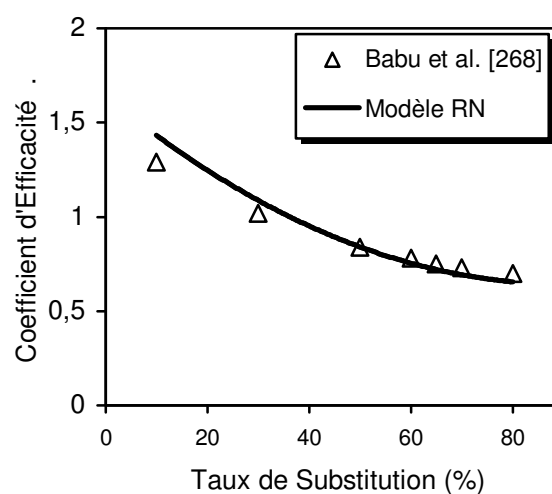


Fig. 4.2 : Comparaison des coefficients d'efficacité du laitier à 28 jours.

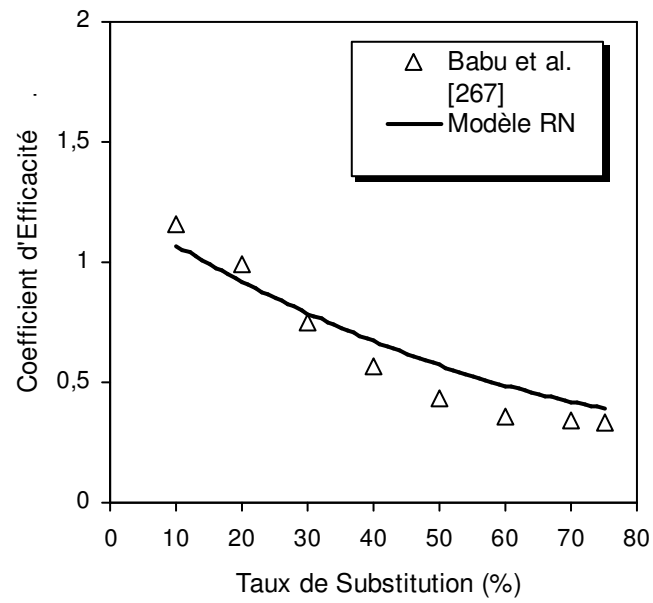


Fig. 4.3 : Comparaison des coefficients d'efficacité des cendres volantes à 28 jours

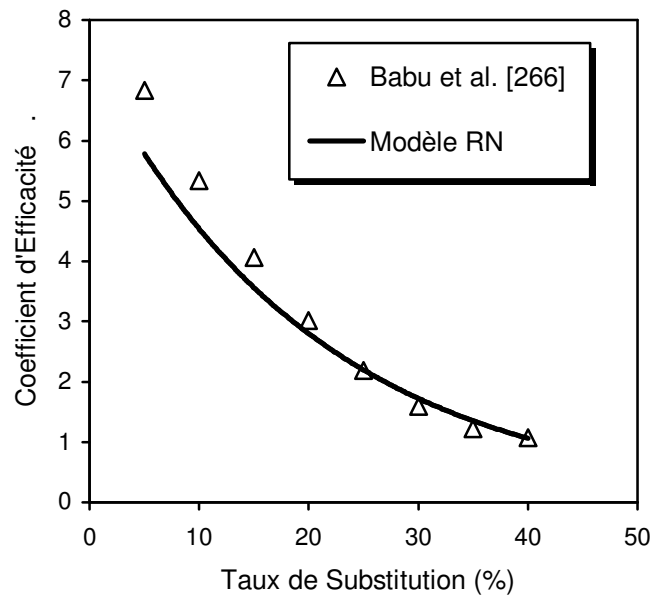


Fig. 4.4 : Comparaison des coefficients d'efficacité de la fumée de silice à 28 jours.

L'évaluation de χ à 28 jours du laitier a prouvé que ce coefficient varie de 1,42 à 0,64 pour les remplacements de 10% à 80% en comparaison aux valeurs 1,29 à 0,7 proposées par Babu et Kumar [268]. Également, il a été observé que pour avoir des résistances semblables à 28 jours, on doit augmenter le dosage en liant de 8,7% et 21,3% pour des pourcentages de substitution de 50% et 65%, respectivement [283]. Ceci est en accord avec les valeurs de 8,5% et 19,5% données par Babu et al. [268] et les valeurs de 10% et 20% données par Swamy et Bouikni [277]. La figure 4.3 montre clairement que l'efficacité des cendres volantes dépend du taux de substitution. Il a été observé qu'à 28 jours, le coefficient d'efficacité χ diminue de 1,06 à 0,36 pour des pourcentages de substitution allant de 10 à 75% [284]. Ces résultats sont comparables à ceux obtenus par Babu [267] (diminution de 1,15 à 0,33). En outre, à 75% de substitution, χ est égale à 0,36 et donc respectivement comparable aux valeurs 0,33 et 0,25 rapportées par les modèles de Babu [267] et Smith [259]. Les valeurs de χ pour la fumée de silice calculés par le modèle RN sont en accord avec les valeurs obtenues par d'autres chercheurs jusqu'à 25 % de substitution (Fig. 4.4). Selon Babu et Prakash [266], la valeur globale de χ varie de 6,85 à 1,1 respectivement, pour des substitutions allant de 5 à 40%. Une forte efficacité est obtenue jusqu'à 15% de substitutions en raison de la nature de la fumée de silice utilisée. Une autre étude a également cité une efficacité similaire pour un taux de substitution de 5% [282]. Malheureusement, il n'existe pas d'études sur l'évaluation de l'efficacité de la pouzzolane naturelle de façon raisonnable. La seule application est celle proposée par Papadakis et al. [273] qu'a trouvé par l'application de son modèle que cette efficacité est surestimée et beaucoup plus faible (0,3 à 0,4 pour les différentes pouzzolanes utilisées).

4.6. Influence du taux de substitution

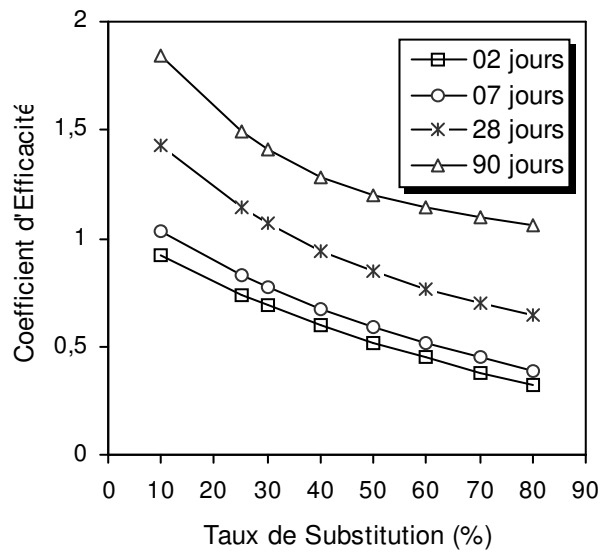
La méthode proposée ci-dessus pour évaluer l'efficacité des ajouts étudiés s'est également avérée appropriée dans les modèles développés. La figure 4.5 illustre la variation des coefficients d'efficacité à 2, 7, 28 et 90 jours des bétons contenant des dosages de 10% à 80% du laitier, de 10% à 75% des cendres volantes, de 5% à 40% de fumée de silice et de 10% à 50% de pouzzolane naturelle. Pour ces bétons, les coefficients d'efficacité augmentent avec le temps du

1^{er} jour jusqu'à 3 mois. Pour ces échéances, χ est une fonction décroissante du taux de substitution (Tableau 4.5). Toutefois, nous pouvons affirmer que le coefficient d'efficacité diminue lorsque la quantité d'ajout augmente. Par contre, quel que soit le dosage de l'ajout cimentaire, le coefficient d'efficacité augmente avec l'âge.

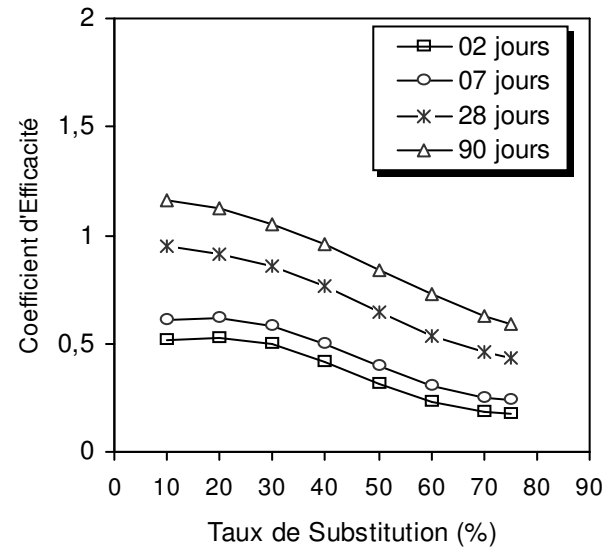
Un ajout cimentaire présente un gain si son coefficient d'efficacité est supérieur à 1. Donc, à partir de 28 jours le laitier présente un gain pour tous les dosages (activité supérieure à celle du ciment). Les cendres volantes jusqu'à 28 jours ne présentent aucun gain sauf pour le dosage de 10%. Mais, à 90 jours, ces dernières présentent un gain pour les dosages allant jusqu'à 30%. Ceci peut être expliqué par la lenteur de la réaction des cendres volantes. Pour la pouzzolane naturelle, un gain est présenté à partir de 90 jours pour les dosages allant jusqu'à 20%. Tandis que pour la fumée de silice, ces coefficients sont tous supérieurs à 1, à partir de 2 jours, et ils sont autour de l'unité au jeune âge à 30 %. Cette forte activité est attribuée à la réaction pouzzolanique développée entre le ciment et cet ajout. Elle est favorisée par les conditions de cure des bétons (conservation dans l'eau). Néanmoins, il y a noter qu'au-delà d'une teneur de 10%, l'utilisation de la fumée de silice est non recommandée à cause de son effet néfaste sur la maniabilité du béton [282]. Des efficacités négatives sont obtenues aux jeunes âges pour la pouzzolane naturelle. Ces efficacités deviennent équivalentes à celle du ciment à long terme jusqu'à 20% de substitution. Cela confirme que la réactivité pouzzolanique de la pouzzolane naturelle est très lente.

Tableau 4.5 : Valeurs des coefficients d'efficacité prédits des ajouts.

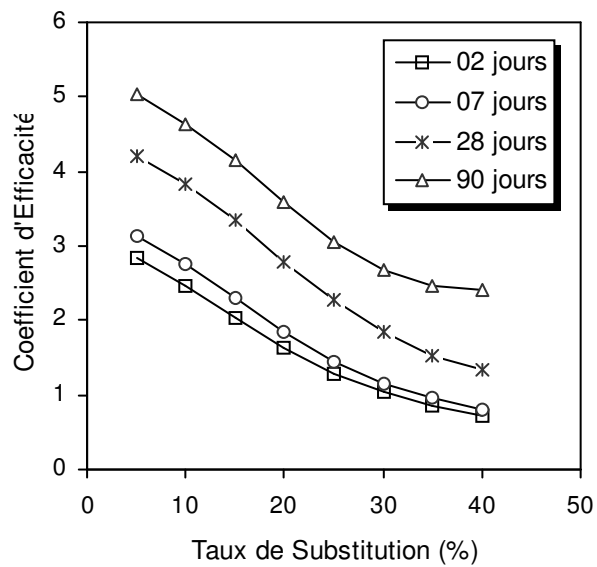
	Coefficients d'efficacités			
	2 jours	7 jours	28 jours	90 jours
Laitier (10-80%)	0,93-0,32	1,03-0,39	1,42-0,64	1,84-1,05
Cendres Volantes (10-75%)	0,51-0,18	0,61-0,24	0,94-0,43	1,16-0,59
Fumée de Silice (5-40%)	2,83-0,73	3,14-0,81	4,81-1,32	5,03-2,40
Pouzzolane Naturelle (10-80%)	0,25-(-0,10)	0,38-(-0,05)	0,80-0,30	1,10-0,55



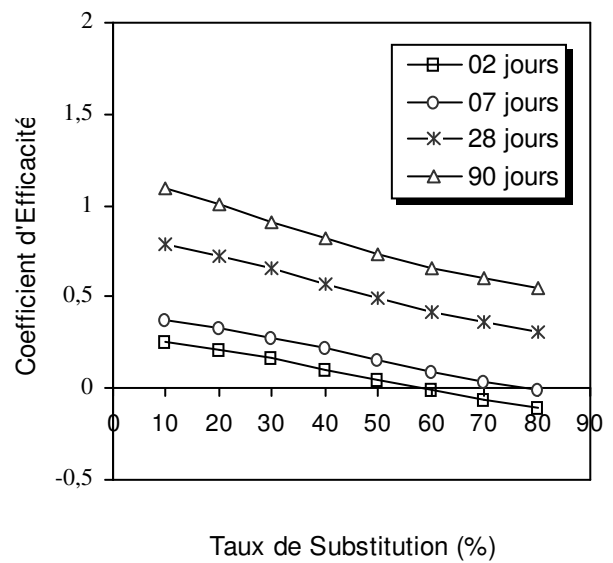
a. Laitier



b. Cendres Volantes



c. Fumée de Silice



d. Pouzzolane Naturelle

Figure 4.5 : Effet du taux de remplacement sur le coefficient d'efficacité à 2, 7, 28 et 90 jours.

4.5. Modèles Mathématiques

Sur la base des résultats obtenus par les quatre modèles développés dans la section précédente, nous pouvons développer quatre autres modèles mathématiques pour la prévision des coefficients d'efficacité par un ajustement de régression non-linéaire donné par l'équation suivante:

$$\chi(t, p) = (a_0 + a_1 t + a_2 t^2) \exp(a_3 p) \quad (4.3)$$

Où t et p représentent l'âge et le pourcentage de substitution de l'ajout respectivement, et a_0, a_1, a_2, a_3 sont les coefficients de régression (Tableau 4.6).

Tableau 4.6 : Coefficient de régression de chaque modèle développé.

	Coefficients de Régression				R^2
	a_0	a_1	a_2	a_3	
Laitier	0,910	0,014	-0,00002	-0,010	0,98
Cendres Volantes	0,540	0,027	-0,00021	-0,012	0,99
Fumée de Silice	2,89	0,091	-0,00058	-0,030	0,86
Pouzzolane Naturelle	0,098	0,036	-0,00025	-0,012	0,98

Aussi, les coefficients de détermination pour la prévision de l'efficacité du laitier, des cendres volantes, de la fumée de silice et de la pouzzolane ont été estimés respectivement à 0,98, 0,99, 0,86, et 0,98 à tous les âges.

Cette évaluation va permettre de bien formuler des bétons contenant un ajout cimentaire basé sur la proposition de ces simples modèles mathématiques exprimant la variation de ces coefficients pour chaque ajout en fonction de son taux de substitution et l'âge pour un proportionnement rationnel de ces ajouts.

4.8. Conclusion

L'influence d'une addition minérale sur le comportement mécanique d'un béton dans lequel elle est introduite ne peut pas être définie d'une façon réaliste par un seul coefficient, en ignorant les propriétés physico-chimiques de l'addition et de ciment, et les différents autres paramètres tels que l'âge, le taux de substitution et le type de ciment utilisé ainsi que les conditions de cure. Cette

conclusion incite à utiliser avec beaucoup de précaution les différentes approches que se soient pratiques ou rationnelles.

Dans un premier lieu, la définition des modalités d'estimation du coefficient d'efficacité d'une addition minérale est présentée. Puis l'efficacité des additions minérales désignées (laitier, cendres volantes, fumée de silice et pouzzolane naturelle) a été présentée. Dans une seconde partie, nous avons montré la possibilité de l'application de l'approche de RNs pour prévoir le coefficient d'efficacité de chaque addition à 2, 7, 28 et 90 jours dans un béton pour différent taux de substitution. Pour l'apprentissage et le test des modèles réseaux de neurones choisis, une description a été donnée quant à la façon dont ces modèles étaient construits (architecture) pour former l'ensemble des données d'entrée.

De nombreux facteurs comme la composition du béton, le taux de substitution, l'âge et la température de cure font qu'il n'y a pas unicité du facteur d'efficacité des additions. Basé sur des simulations par les modèles RN développés, l'étude de l'influence du taux de substitution sur l'efficacité en fonction de l'âge a permis de développer pour chaque ajout un modèle de prévision de son coefficient d'efficacité. Ces modèles vont permettre de bien formuler des bétons contenant un ajout cimentaire. De façon générale, l'approche présentée ici peut mener à une prévision plus précise et plus rapide de l'efficacité des ajouts cimentaires.

CHAPITRE 5

VALIDATION EXPÉRIMENTALE DES MODÈLES

5.1. Introduction

L'objectif principal de ce chapitre est d'évaluer la capacité des modèles RN développés à prédire les propriétés du béton contenant des ajouts cimentaires ainsi que l'efficacité de ces ajouts en termes de coefficients d'efficacité.

On présente ici, une étape incontournable de tout le travail de modélisation qui consiste en la confrontation des résultats de ces modèles avec les résultats expérimentaux:

- on réalise dans un premier temps, un programme expérimental dans le but de déterminer l'ouvrabilité et la résistance à la compression de vingt formulations de bétons avec de divers rapports eau-liant;
- ensuite, pour valider le travail de modélisation, les résultats de notre programme expérimental sont comparés aux résultats numériques des modèles développés (chapitres 3 et 4) et aux résultats numériques obtenus par l'utilisation du logiciel BétonlabPro 3 [8].

5.2. Programme expérimental

Le programme expérimental réalisé a consisté en la mesure de l'ouvrabilité et de la résistance à la compression à 3, 7, 28 et 91 jour sur différents mélanges de bétons avec divers rapports eau-liant. On s'est intéressé principalement à quatre types de bétons ordinaires (BO) dans lesquels on substitue partiellement le ciment par des quantités optimisées d'ajouts : 50% de laitier, 25% de cendres volantes, 15% de Métakaolin et 10% de fumée de silice. Des bétons à haute performance (BHP) ont été aussi réalisés par substitution en poids de ciment de

30%, 15% et 10% du laitier, de cendres volantes et de fumée de silice respectivement. Le programme expérimental est présenté dans le tableau 5.1. Les bétons produits pour chacun des ajouts y sont présentés. Les différents essais réalisés sur chacun de ces bétons produits dans le cadre de ce programme y sont également présentés. Plusieurs mélanges de bétons avec et sans entraineur d'air sont utilisés dans le cadre de ce programme.

Tableau 5.1 : Programme expérimental.

Type de béton				Essais de caractérisation du béton			
Eau/Liant	Désignation	Type d'Ajout	Entraîneur d'air (%)	Masse volumique	Teneur en Air	Affaissement	Résistance à la Compression
0,5	B1T	0	0	X	X	X	X
	B1TE	0	6	X	X	X	X
	B1L	50%L	0	X	X	X	X
	B1LE	50%L	6,8	X	X	X	X
	B1CV	25%CV	0	X	X	X	X
	B1CVE	25%CV	6,4	X	X	X	X
	B1FS	10%FS	0	X	X	X	X
	B1FSE	10%FS	6,5	X	X	X	X
	B1MK	15%MK	0	X	X	X	X
	B1MKE	15%MK	4,5	X	X	X	X
0,4	B2T	0	0	X	X	X	X
	B2L	50%L	0	X	X	X	X
	B2CV	25%CV	0	X	X	X	X
	B2FS	10%FS	0	X	X	X	X
	B2MK	15%MK	0	X	X	X	X
0,3	B3T	0	0	X	X	X	X
	B3L	30%L	0	X	X	X	X
	B3CV	15%CV	0	X	X	X	X
	B3FS	10%FS	0	X	X	X	X
	B3FSE	10%FS	6	X	X	X	X

Note :

T : Témoin, L : Laitier, CV : Cendres Volantes, FS : Fumée de Silice, MK : Méta-Kaolin ;
B1, B2 : Bétons ordinaires ; B3 : Béton à Haute Performance (BHP). E : Entraîneur d'air.

5.2.1. Matériaux et proportion des bétons étudiés

Les matériaux utilisés dans le programme expérimental sont :

1. Ciment Portland de Type 10 (ASTM type I, CEM I), Canada;
2. Ajouts (Laitier, cendres volantes, fumée de silice et Métakaolin) des régions locales du Canada;
3. Eau de robinet;
4. Super- plastifiant de type naphthalène-formaldéhyde condensat (ASTM C494), sa densité relative à 25°C est 1,21 avec un pourcentage en extrait sec de 40,5%;
5. Entraîneur d'Air : liquide dérivé d'hydrocarbures soluble à l'eau (ASTM C260), sa densité relative à 25°C est 1,0 avec un pourcentage en extrait sec de 5,0%;
6. Gros agrégats : 80% de granulats concassés de 5 à 14 mm et 20% de granulats concassés de 10 à 20 mm de densité 2,731 et 100 % de granulats concassés de 2,5 à 10 mm de densité 2,729 pour les BHP;
7. Sable naturel de rivière avec un module de finesse de 2,6, une absorption d'eau de 1,16 et une densité de 2,653.

Les caractéristiques physiques et chimiques du ciment et les ajouts utilisés sont résumées sur le tableau 5.2. La granulométrie des agrégats est également disponible dans le tableau 5.3. Le tableau 5.4 présente la composition de tous les mélanges utilisés dans cette étude expérimentale. Conformément aux exigences de la norme ASTM C 192, la méthode de Sherbrooke [285] a été utilisée pour la conception des mélanges des bétons ordinaires (BO) avec les rapports Eau/Liant (E/L) de 0,5 et 0,4 et des bétons de hautes performances (BHP) avec le rapport E/L de 0,3. A chaque rapport E/L, le pourcentage d'ajout cimentaire en poids de ciment est fixé à 50% de laitier, 25% de cendres volantes, 15% de Métakaolin et 10% de fumée de silice pour les BO et à 30% de laitier, 15% de cendres volantes et 10% de fumée de silice pour les BHP. Le contenu total des matériaux cimentaires utilisé pour tous les mélanges a été fixé à 350 kg/m³ pour les BO et 500 kg/m³ pour les BHP. La teneur en superplastifiant a été calculée avec l'intention de maintenir une maniabilité suffisante pour remplir les moules et d'éviter tout effet de la variation de cette teneur sur les propriétés du béton. Par conséquent, tout changement dans les propriétés du béton à un rapport E/L donné est principalement dû à la présence des ajouts.

Tableau 5.2 : Composition chimiques et propriétés physiques
du ciment et des ajouts

	Ciment	Laitier	Cendres Volantes	Fumée de Silice	Métakaolin
Composition Chimique					
SiO ₂	20,5	35	52	90	53
Al ₂ O ₃	5,4	12	23	0,4	43
Fe ₂ O ₃	2,6	1	11	0,4	0,5
CaO	63,9	40	5	1,6	0,1
MgO	3	9	0,8	0,4	0,1
Na ₂ O	0,61	0,3	1,0	0,5	0,05
K ₂ O		0,4	2,0	2,2	0,4
SO ₃	2,1	0,6	2,2	1,9	0,3
Propriétés physiques					
Densité	3,15	2,89	2,38	2,30	2,59
SSB (m ² /kg)	377,4	526	420	20000	1192

Tableau 5.3 : Granulométrie complète des gros agrégats et du sable.

					Mélange, tamisas (%)			
Tamis (mm)	Tamisas (%)				Diamètre max = 10 mm		Diamètre max = 20 mm	
	2,5-10 mm	5-14 mm	10-20 mm	Sable	100% 2,5-10	Fuseau CSA	80% 5-14 20% 10-20	Fuseau CSA
40	100,0	100,0	100,0	100,0	-	-	-	-
28	100,0	100,0	100,0	100,0	-	-	100	100
20	100,0	100,0	89,6	100,0	-	-	97,8	85 - 100
14	100,0	91,0	9,3	100,0	100	100	73,8	60 - 90
10	83,0	54,5	1,0	100,0	83	85 - 100	43,2	25 - 60
5	11,3	6,5	0,3	96,6	11,3	10 - 30	5,2	0 - 10
2,5	6,5	2,5	0,3	81,9	6,5	0 - 10	2,0	0 - 5
1,25	6,1	2,5	0,3	69,5	6,1	0 - 5	2,0	-
0,630	4,4	0,0	0,0	56,0	4,4	-	0	-
0,315	0,1	0,0	0,0	29,8	0,1	-	0	-
0,160	0,0	0,0	0,0	9,4	0	-	-	-
0,080	0,0	0,0	0,0	3,1	0	-	-	-
Densité	2,729	2,731	2,729	2,653				
Absorption (%)	0,52	0,47	0,34	1,16				
Module de Finesse	2,5-10	5	5,99	2,60				

Note : CSA : Canadian Standard Association

Tableau 5.4 : Composition des bétons étudiés.

Désignation	Ciment (kg/m³)	Ajout		Gros Agrégats (kg/m³)		Sable (kg/m³)	Adjuvants		Eau (kg/m³)
		Type	(kg/m³)	80%	20%		SP (%)	EA (ml/m³)	
				5-14 mm	10-20 mm				
B1T	350	T	0	860	215	715	0	0	175
B1TE	350	T	0	856	214	694	0	350	
B1L	175	L	175	910	228	737	0	0	175
B1LE	175	L	175	856	214	659	0	455	
B1CV	262,5	CV	87,5	912	228	738	0	0	175
B1CVE	262,5	CV	87,5	856	214	685	0	718	
B1FS	315	FS	35	915	228	741	0,7	0	175
B1FSE	315	FS	35	856	214	661	0,8	1400	
B1MK	297,5	MK	52,5	910	227	737	0,67	0	175
B1MKE	297,5	MK	52,5	856	214	719	0,5	1200	
B2T	350	T	0	957	239	775	0,9	0	140
B2L	175	L	175	955	238	773	1,1	0	140
B2CV	262,5	CV	84,5	950	237	769	0,6	0	140
B2FS	315	FS	35,0	957	239	775	1,3	0	140
B2MK	297,5	MK	52,5	963	240	779	1,2	0	140
B3T	500	T	0	1075		720	3,5	0	150
B3L	350	L	150	1075		704	3,7	0	150
B3CV	425	CV	75	1075		695	3,3	0	150
B3FS	450	FS	50	1075		703	4,5	0	150
B3FSE	450	FS	50	1075		577	4	1603	

5.2.2. Fabrication des bétons et préparation des spécimens

Les mélanges de béton ont été effectués au laboratoire du béton et ciment de l'université de Sherbrooke. Des éprouvettes cylindriques de dimension 100x200 mm² ont été confectionnées et compactées à l'aide d'une tige en trois couches uniformes pour les essais de résistance à la compression. Après 24 heures les éprouvettes ont été démoulées et conservées en salle humide de 100% d'humidité relative et à une température de 20±3°C jusqu'à le jour des essais.

5.2.3. Essais sur le béton

Quatre essais sur les bétons confectionnés étaient réalisés au cours de ce programme:

- l'ouvrabilité de chaque béton a été déterminée par l'essai d'affaissement au cône d'Abrams selon la norme ASTM C 143;
- la masse volumique de chaque béton a été réalisée par la pesée et déterminée selon la norme ASTM C138;
- la teneur en air est par la suite déterminée par la méthode pressiométrique selon la norme ASTM C 231;
- les résistances à la compression ont été mesurées à 3, 7, 28 et 91 par l'essai à la presse hydraulique selon la norme ASTM C 39. Chaque mesure de la résistance à la compression représente la valeur moyenne de trois valeurs.

5.2.4. Présentation et analyse des résultats

L'ensemble des résultats des essais réalisés sur les propriétés physiques, l'affaissement et les résistances à la compression des mélanges de béton sont indiqués dans le tableau 5.5. Dans ce qui suit, une analyse de ces résultats obtenus selon chaque propriété est faite.

5.2.4.1. Propriétés physiques et ouvrabilité

Le tableau 5.5 montre que la masse volumique de tous les mélange de béton varie entre 2300 et 2400 kg/m³, tandis que la teneur en air varie selon que le béton est sans ou avec agent entraîneur d'air. Cette teneur en air varie de 0,8% à 1,7% pour le béton sans agent entraîneur d'air et de 4,5% à 6,8% pour le béton avec agent entraîneur d'air. Les affaissements avaient des valeurs comprises entre 40 à 175 mm, pour les BO, tandis que pour les BHP, elles étaient de l'ordre de 195 à 220 mm. Les mélanges contenant un entraîneur d'air ont présenté un affaissement plus élevé qu'aux mélanges sans entraîneur d'air car les bulles d'air aident à la lubrification du mélange et par conséquent l'augmentation de son ouvrabilité. Par conséquent, l'affaissement est systématiquement amélioré par l'introduction des ajouts cimentaires dans le béton à l'exception des FS. Il est à noter que la FS a causé une perte plus importante de l'affaissement par rapport au Laitier et au Métakaolin sans l'utilisation de superplastifiant. Cela est attribué à sa

surface spécifique extrêmement élevée.

Tableau 5.5 : Propriétés du béton à l'état frais et résistance à la compression.

Désign- ation	Propriétés Physiques			Affaiss- ement (mm)	Résistance à la compression (σ) (MPa)			
	MV (kg/m ³)	TA (%)	TB (°C)		3 jours	7 jours	28 jours	91 jours
B1T	2423	1,3	18,5	40	31,4 (0,5)	35,9 (0,8)	43,5 (0,5)	49,0 (0,4)
B1TE	2293	6,0	21,0	80	23,8 (0,8)	28,8 (1,4)	34,2 (0,2)	38,6 (0,5)
B1L	2421	1,4	20,4	40	18,9 (0,6)	29,5 (0,2)	45,9 (0,6)	52,4 (0,4)
B1LE	2265	6,8	18,2	90	11,6 (0,7)	19,0 (0,3)	29,7 (0,7)	34,3 (0,7)
B1CV	2402	0,9	20,1	65	19,5 (0,1)	24,1 (0,2)	39,9 (1,1)	49,1 (1,2)
B1CVE	2271	6,4	18,1	105	14,5 (0,3)	19 (0,3)	26,1 (0,6)	34,0 (0,5)
B1FS	2411	1,0	18,1	68	34,1 (0,4)	42,5 (0,8)	55,6 (0,7)	63,6 (0,7)
B1FSE	2293	6,5	18,5	180	24,6 (0,3)	32,6 (0,6)	47,1 (0,5)	57,1 (0,5)
B1MK	2389	1,4	18,3	165	33,7 (0,1)	45,5 (0,5)	55,4 (0,8)	61,6 (0,9)
B1MKE	2359	4,5	18,5	75	29,6 (0,5)	43,7 (1,0)	52,6 (1,3)	54,1 (1,2)
B2T	2473	1,7	19,2	75	43,0 (0,3)	48,5 (0,3)	57,9 (0,8)	67,9 (0,5)
B2L	2474	0,9	18,0	170	23,6 (0,3)	36,8 (1,0)	51,2 (1,3)	56,3 (2,1)
B2CV	2456	1,3	18,4	180	33,3 (0,5)	39,4 (0,1)	50,2 (0,6)	68,0 (0,7)
B2FS	2474	1,1	18,7	165	45,0 (0,4)	55,8 (0,5)	73,8 (1,4)	83,6 (1,1)
B2MK	2469	0,9	20,4	170	48,7 (3,1)	65,4 (1,2)	75,0 (1,1)	84,3 (0,2)
B3T	2477	1,6	19,9	195	49,4 (0,2)	55,0 (0,1)	65,4 (1,2)	81,1 (1,3)
B3L	2462	1,7	19,7	215	39,9 (0,2)	47,1 (6,0)	66,2 (1,2)	76,5 (0,8)
B3CV	2452	1,8	19,5	220	43,2 (0,5)	50,1 (0,3)	63,0 (1,1)	84,2 (1,7)
B3FS	2468	1,6	22,4	215	52,7 (0,6)	59,4 (1,2)	92,4 (2,6)	107,1 (3,4)
B3FSE	2378	6,0	20,1	200	44,4 (0,9)	56,1 (1,7)	69,9 (1,1)	83,9 (1,5)

Note : MV : Masse Volumique, TA : Teneur en Air, TB : Température de Béton, σ : écart type.

5.2.4.2. Résistance à la compression

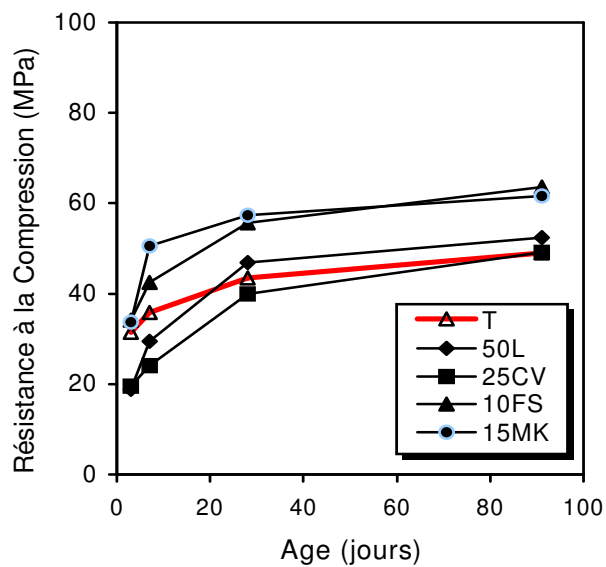
Le coefficient de variation moyen pour l'ensemble des mesures de la résistance à la compression est d'environ 1,9% à 3 jours, 2,2% à 7 jours, 1,8% à 28 jours et 1,5 % à 91 jours. Selon le tableau 5.5, on observe que l'introduction du

laitier et des cendres volantes ne produit pas une amélioration immédiate de la résistance à l'opposé de l'introduction de la fumée de silice et du Métakaolin qui produisent des résistances plus élevées que le mélange témoin. La perte de résistance aux jeunes âges, qui a été proportionnelle aux taux de substitution du ciment, est due à l'effet de dilution de l'ajout et aussi bien à la lenteur de la réaction pouzzolanique. En général, les résistances à la compression (Fig.5.1) ont été inversement proportionnelle avec le rapport E/C, ce qui en concordance avec la relation de Ferret (tableau 4.1).

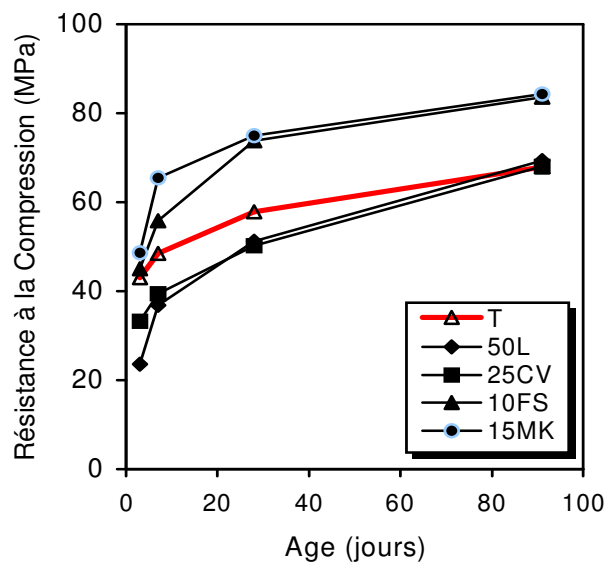
Toutefois, la réduction du rapport E/L de 0,5 à 0,4 produit une amélioration de la résistance dès le 1^{er} jour, Cela a été déjà reporté par plusieurs auteurs. Après 28 jours de cure, cette amélioration atteint 2%, 15,2% et 14,5 % pour les mélanges de béton à 50% de laitier, 10% de la fumée de silice et 15% de méta-kaolin respectivement. À 90 jours, les bétons à 25% de cendres volantes et 50% de laitier atteignent des résistances comparables au béton témoin.

Les BHP réalisés avec 10% de fumée de silice ont une meilleure résistance à la compression que ceux réalisés avec 30% de laitier, 15% de cendres volantes ou avec un béton sans ajouts. Pour les cendres volantes une légère amélioration de la résistance à la compression est développée à 90 jours de cure (Fig.5.1-c).

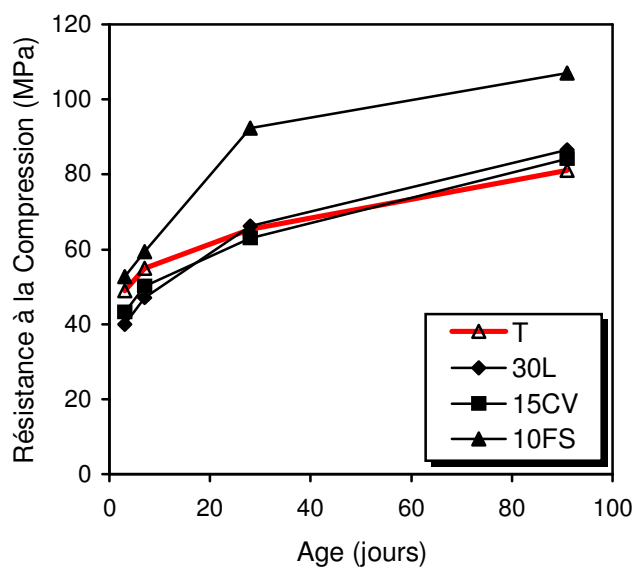
Par ailleurs, tous les bétons à air entrainé présentent une diminution de résistance en comparaison avec ceux sans air entrainé à tous les âges (Fig.5.2). Il est généralement admis que la présence de 1% d'air entrainé dans le béton provoquera une chute de résistance de 5% [286]. Dans notre étude, environ 6%, 6,8%, 6,4%, 6,5% et 4,5 % d'air entrainé pour les bétons à air entrainé ont provoqué des chutes des résistances environ 10,3 MPa, 13 MPa, 7,75 MPa, 4 MPa et 8,6 MPa à 3, 7, 28 et 91 jours respectivement. Sur la base de ces observations, étant donné que l'air entrainé augmente l'ouvrabilité du béton, il est à recommander de réduire le rapport E/L pour augmenter la résistance à la compression et la résistance au gel-dégel du béton.



a. E/L=0,5



b. E/L=0,4



c. E/L=0,3

Figure 5.1 : Évolution de la résistance à la compression des bétons étudiés en fonction du temps.

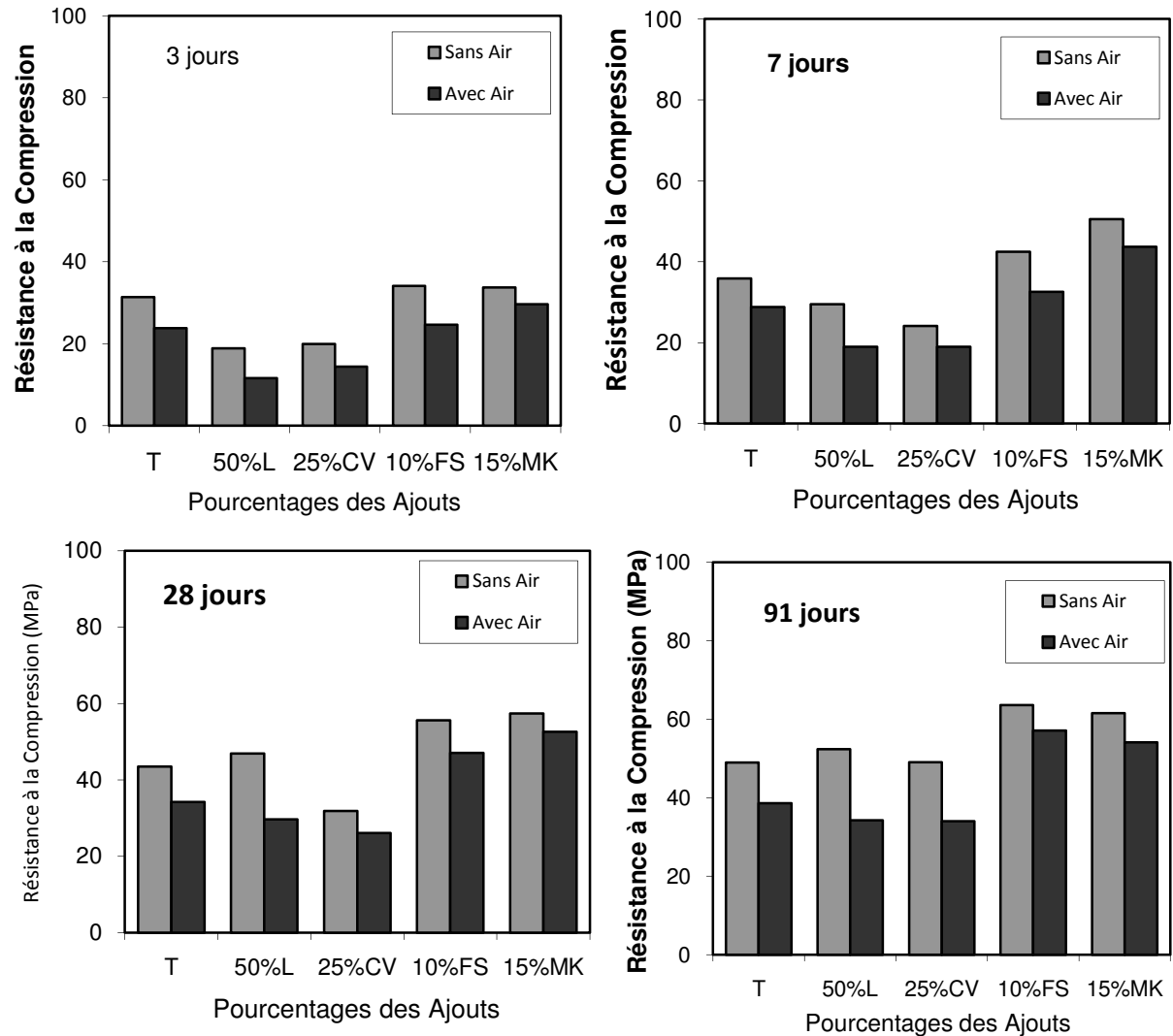


Figure 5.2 : Effet de l'entraineur d'air sur l'évolution de la résistance à la compression des bétons étudiés en fonction du temps

5.3. Validation des modèles développés

Pour évaluer la performance des modèles RN développés, les résultats des essais réalisés ont été comparés avec ceux prédits par ces modèles en leur introduisant les mêmes compositions des mélanges réalisés. Ainsi, une confrontation des résultats de ces essais aux résultats donnés par le logiciel BétonlabPro [8] a été réalisée. La validation consiste à minimiser les écarts entre les résultats expérimentaux et les résultats des modèles.

5.3.1. Modèles de prévision de l'ouvrabilité

Le tableau 5.6 montre la comparaison des affaissements expérimentaux avec ceux prédits en utilisant les modèles RN développés et le logiciel BétonlabPro [8]. On constate que les résultats obtenus par les modèles RN sont très proches des résultats expérimentaux (Fig. 5.3). Il faut noter que la précision de l'essai de l'affaissement est de ± 17 mm, ± 25 mm et ± 28 mm pour des affaissements de 30 mm, 85 mm et 160 mm respectivement conformément à la norme ASTM C 143. Selon cette norme, les précisions des essais de l'affaissement des bétons réalisés sont acceptables. Les modèles RNs entraînés et testés ont produit des prévisions raisonnables de l'affaissement avec un écart moyen de 15 mm par rapport aux valeurs expérimentales. Il est à noter que les prévisions des modèles RN sont relativement meilleures que les résultats de BétonlabPro [8].

5.3.2. Modèles de prévision de la résistance à la compression

Les résultats expérimentaux et les prévisions des modèles développés de la résistance à la compression sont donnés dans le tableau 5.7 on remarque qu'il y a une concordance acceptable entre les résistances à la compression obtenues expérimentalement et celles obtenues à partir des modèles développés.

L'analyse des écarts moyens montre qu'il est de 4,7 MPa lorsqu'on compare les modèles RN et les essais expérimentaux et il est de 2,9 MPa lorsqu'on compare les modèles RN et le logiciel BétonlabPro [8]. Ces deux écarts moyens sont considérés acceptables comparés à l'écart moyen de 2 MPa de l'ensemble des essais expérimentaux eux même. Par ailleurs, les modèles RN qui prennent en compte les bétons à air entrainé ont une tendance à sous-estimer la réalité. Cela est dû probablement au nombre moins élevé de l'ensemble des données d'apprentissage concernant les bétons avec agent entraineur d'air qui a été utilisé lors de l'apprentissage des modèles.

Selon la figure 5.4, les modèles RN s'avèrent fiables : il n'y a pas de dispersion de points par rapport à la bissectrice et les coefficients de corrélation sont supérieurs à 0,93.

Tableau 5.6 : Confrontation des affaissements des bétons

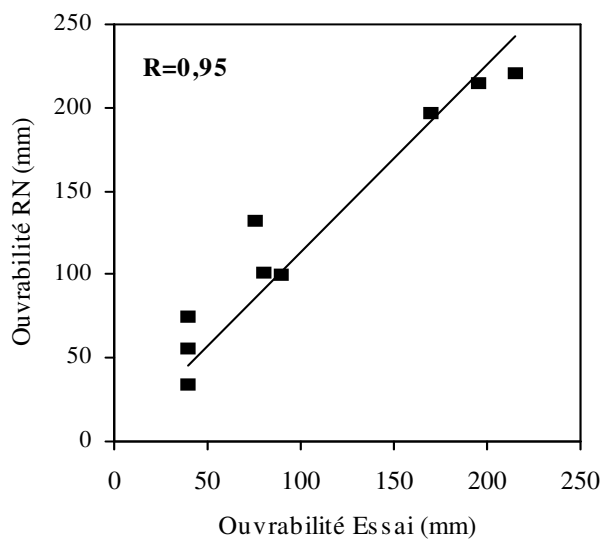
E/L	Désignation	Affaissement (mm)		
		Essai (P)	Modèle RN	BétonlabPro [8]
0,5	B1T	40 (± 25)	45,3	0
	B1TE	80 (± 28)	100,8	-
	B1L	40 (± 25)	55,5	0
	B1LE	90 (± 28)	98,9	-
	B1CV	65 (± 25)	48,1	0
	B1CVE	105 (± 28)	100,9	-
	B1FS	68 (± 25)	68,9	77
	B1FSE	180 (± 28)	202,6	-
0,4	B2T	120 (± 28)	70,6	35
	B2L	160 (± 28)	195,8	58
	B2CV	180 (± 28)	143,9	135
	B2FS	165 (± 28)	131,4	116
0,3	B3T	195 (± 28)	214,0	223
	B3L	215 (± 28)	220,4	223
	B3CV	220 (± 28)	213,9	239
	B3FS	215 (± 28)	202,6	250
	B3FSE	200 (± 28)	230,2	-

Note : P : Précision de l'essai de l'affaissement.

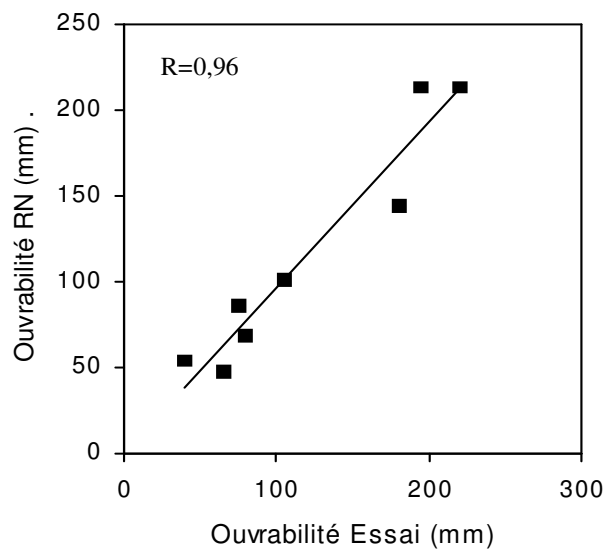
Tableau 5.7 : Confrontation des résistances à la compression des bétons.

E/L	Désignation	Résistance à la compression (MPa)									
		Essai				Modèle RN				BétonlabPro	
		3 j	7 j	28 j	91 j	3 j	7 j	28 j	91 j	7 j	28 j
0,5	B1T	31,4	35,9	43,5	49,0	33,1	34,9	47,3	48,0	32,7	38,5
	B1TE	23,8	28,8	34,2	38,6	22,5	27,9	34,8	37,9	-	-
	B1L	18,9	29,5	45,9	52,4	20,3	25,9	44,3	53,2	27,9	44,4
	B1LE	11,6	19	29,7	34,3	10,6	13,9	16,8	21,3	-	-
	B1CV	19,5	24,1	35,9	49,1	23,5	29,3	38,1	41,1	25	40,2
	B1CVE	14,5	19	26,1	34	13,2	15,8	17,4	14,7	-	-
	B1FS	34,1	42,5	55,6	63,6	33,3	42,8	56,9	62,6	42,8	62,9
	B1FSE	24,6	32,6	47,1	57,1	29,6	36,4	46,2	52,3	-	-
0,4	B2T	43,0	48,5	57,9	67,9	46,6	51,6	68,9	73,4	45,4	50,8
	B2L	23,6	36,8	51,2	69,3	16,4	27,4	57,2	70,6	40,4	56,7
	B2CV	33,3	39,4	50,2	68,0	31,2	39,3	55,5	88,7	39,2	53,9
	B2FS	45,0	55,8	73,8	83,6	41,4	54,9	72,7	80,3	59,7	79,3
0,3	B3T	49,4	55	65,4	81,1	44,0	53,4	72,1	70	61,9	70,4
	B3L	39,9	47,1	66,2	76,5	45,6	59,3	75,9	72,9	55,5	68,5
	B3CV	43,2	50,1	63,0	84,2	39,2	49,7	72	70,4	55,2	66,7
	B3FS	52,7	59,4	92,4	107,1	46,8	68,8	90,9	87,5	65	83,5
	B3FSE	44,4	56,1	69,9	83,9	36,4	51,7	74,7	82,0	-	-

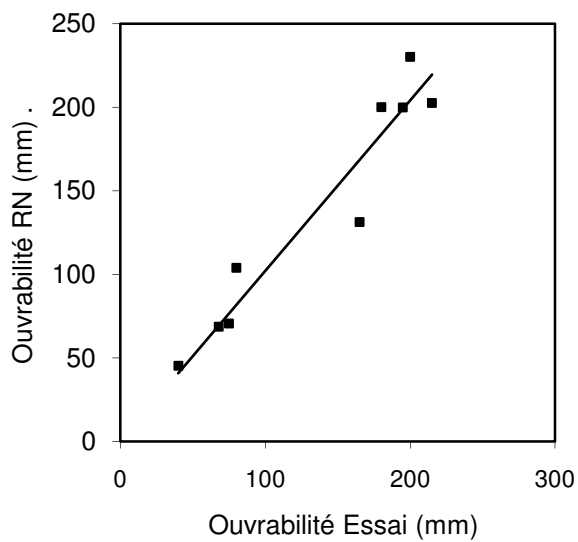
Note : j : jours



a. Laitier

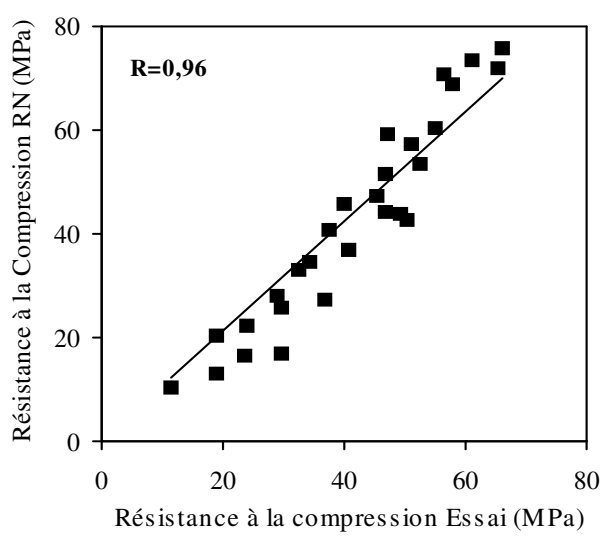


b. Cendres Volantes

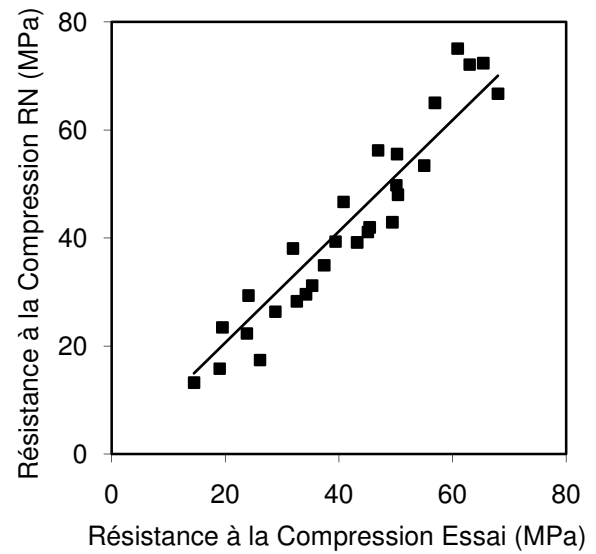


c. Fumée de Silice

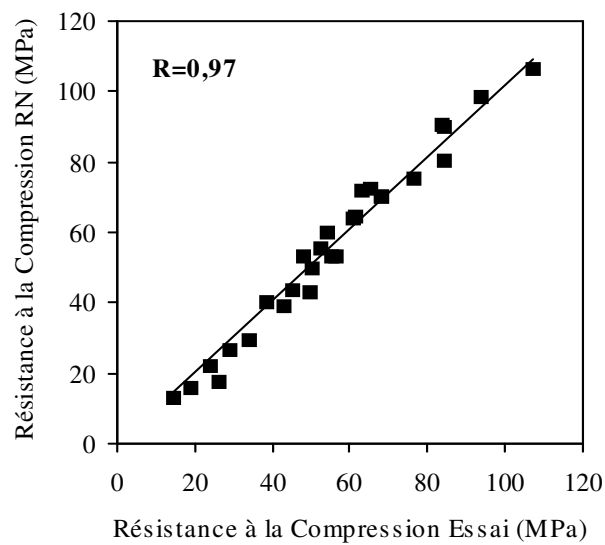
Figure 5.3 : Confrontation “Modèles/Essais expérimentaux” des affaissements.



a. Laitier



b. Cendres Volantes



c. Fumée de Silice

Figure 5.4 : Confrontation “Modèles/Essais expérimentaux”
des résistances à la compression.

5.3.3. Modèles de prévision des coefficients d'efficacité

Pour tester la validité des modèles RN développés pour la prévision de coefficients d'efficacité de chaque ajout, une comparaison quasi-expérimentale basée sur le calcul des valeurs des coefficients d'efficacité par l'application des relations développées à partir des relations de résistance de Ferret et de Bolomy (tableau 4.1) a été réalisée (tableau 5.8). On remarque que les coefficients d'efficacité calculés par les deux modèles de Ferret et Bolomy sont presque identiques. Ainsi, les résultats de ces modèles sont comparables avec les résultats des modèles RN. L'incertitude sur les coefficients calculés dépend de l'incertitude de l'indice d'activité qui dépend également de l'incertitude estimée sur des résistances des bétons témoins et avec ajouts. En général, il est constaté que ces coefficients d'efficacité augmentent avec l'âge en raison de l'augmentation de la résistance apportée par la réaction pouzzolanique et/ou hydraulique des ajouts. Toutefois, les résultats du calcul du coefficient d'efficacité montrent que ces coefficients d'efficacité sont variables d'un ajout à un autre.

Tableau 5.8 : Confrontation des coefficients d'efficacité des différents ajouts.

E/L	Désignation	Coefficient d'efficacité											
		Modèle Ferret				Modèle Bolomy				Modèle RN			
		3 j	7 j	28 j	91 j	3 j	7 j	28 j	91 j	3 j	7 j	28 j	91 j
0,5	B1L	0,36	0,71	1,10	1,12	0,40	0,73	1,08	1,10	0,60	0,87	0,89	1,17
	B1CV	-	-	0,43	0,76	-0,14	0,01	0,48	0,76	0,45	0,50	0,77	1,03
	B1FS	1,68	2,50	3,30	3,47	1,64	2,38	3,08	3,23	1,58	2,33	2,78	2,33
0,4	B2L	0,27	0,61	0,81	0,72	0,28	0,61	0,81	0,73	0,59	0,67	0,96	1,32
	B2 CV	0,26	0,39	0,56	0,99	0,28	0,40	0,57	1,01	0,46	0,51	0,77	0,96
	B2FS	1,36	2,22	3,27	2,90	1,37	2,20	3,19	2,85	1,83	2,43	3,42	2,33
0,3	B3L	0,48	0,61	1,03	0,84	0,46	0,59	1,04	0,84	0,52	0,59	0,84	1,19
	B3CV	0,31	0,50	0,79	1,20	0,29	0,49	0,79	1,21	0,60	0,64	0,90	1,27
	B3FS	1,53	1,63	4,48	3,66	1,57	1,68	4,51	3,72	0,95	1,7	2,71	2,99

Note : j : jours

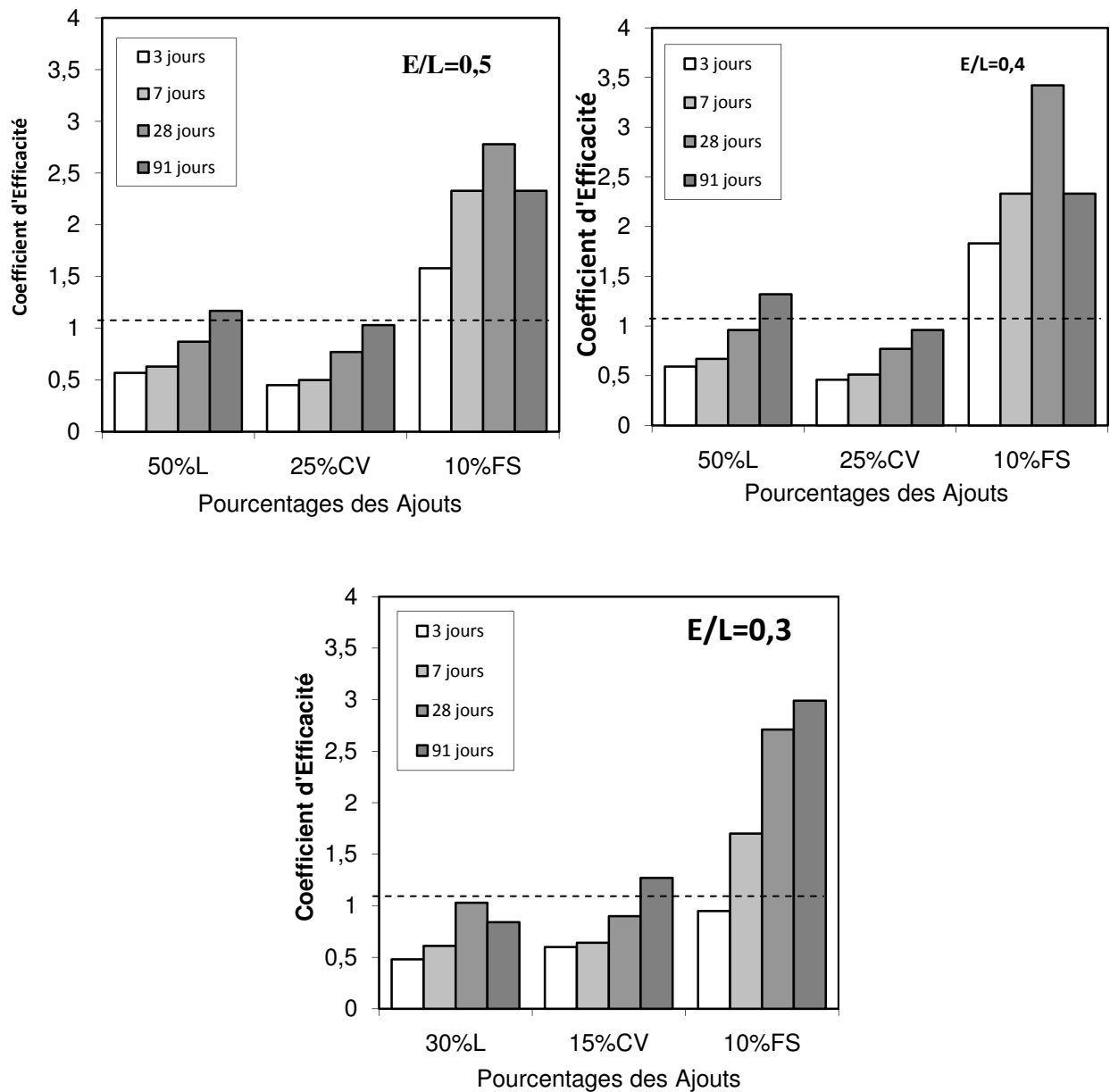


Figure 5.5 : Variation du coefficient d'efficacité avec le rapport E/L pour les bétons aux différents ajouts.

En général, les mélanges à 10% de SF ont les plus grandes valeurs de coefficients d'efficacité. En ce qui concerne les fumées de silice leur contribution à la résistance des bétons est significative dès les 1^{ers} jours. Pour la plus d'entre elles, le coefficient d'efficacité dépasse la valeur 1 à l'âge de 3 jours et il est de 2,7 à 3,42 à 28 jours. On constate par ailleurs, que ces coefficients varient légèrement d'un ajout à l'autre. Ils restent cependant à des niveaux bien inférieurs à ceux des FS : ils ne dépassent pas 0,45 à 3 jours, 0,96 à 28 jours et 1,32 à 90

jours. Les cendres volantes ont présentés un coefficient d'efficacité négatif au jeune âge pour les modèles de Ferret et Bolomy.

Ainsi, le rapport E/L n'affecte pas les valeurs du coefficient d'efficacité des ajouts et à tous les âges car il est lié directement avec la résistance à la compression. Par conséquent, les coefficients d'efficacité du laitier pour un dosage de 50%, des cendres volantes pour un dosage de 25% et de la fumée de silice de 10 % sont presque identiques à tous les âges avec le rapport E/L de 0,5 et 0,4 (Fig. 5.5-a et Fig. 5.5-b). De même pour le rapport E/L de 0,3, les coefficients d'efficacité du laitier pour un dosage de 30%, des cendres volantes pour un dosage de 15% et la fumée de silice pour un dosage de 10% sont comparables (Fig. 5.5-c).

5.4. Conclusion

Les modèles RN présentés aux chapitres 3 et 4 ont été validés à partir d'essais expérimentaux sur des bétons à base de ciment et des ajouts cimentaires réalisés au laboratoire. Vingt mélanges de bétons avec de divers rapports eau-liant ont été réalisés et testés et des résultats sur l'ouvrabilité et la résistance à la compression ont été obtenus. Basés sur ses résultats, les coefficients d'efficacité pour chaque ajout sont ainsi déterminés. Les résultats expérimentaux ont été injectés dans les modèles pour la simulation numérique de l'affaissement, de la résistance à la compression et du coefficient d'efficacité. Les tests de validation ont donné de bons résultats, ce qui montre la pertinence de ses modèles pour prévoir efficacement, l'affaissement et la résistance à la compression avec les précisions moyennes de ± 15 mm et de $\pm 4,7$ MPa respectivement conformément à la précision de l'essai de l'ouvrabilité et elle est très proche de la précision de l'essai de la résistance. De bonnes précisions ont été obtenues également pour prévoir les coefficients d'efficacité des ajouts en comparaison avec les modèles de Ferret et de Bolomy.

CHAPITRE 6

CONCEPTION ET IMPLÉMENTATION DU SYSTÈME SAICBA

6.1. Introduction

Après avoir développé la base de données pour les bétons aux ajouts (chapitre 2), les modèles RN (chapitre 3) et les modèles mathématiques (chapitre 4) pour la prévision des propriétés des bétons avec ces ajouts. Le présent chapitre concerne le développement d'un prototype de système SAICBA (Système Automatisé Intégré basé sur la Connaissance pour les Bétons avec Ajouts) par l'intégration de la base de données et les modèles développés. Le but de ce système est de prévoir l'ouvrabilité et la résistance à la compression d'un béton contenant les différents ajouts minéraux (laitier, cendres volantes, fumée silice et pouzzolane naturelle) à partir de la composition du béton. Le système procède ainsi à prévoir des coefficients d'efficacité de ces ajouts lorsqu'ils sont incorporés dans le béton. Le système n'est pas prévu pour remplacer les essais expérimentaux mais il peut réduire de manière significative l'ampleur de l'expérimentation.

D'abord, la conception et le développement du SAICBA est présentée en détail. Ensuite, l'implémentation de ce système est faite. Enfin, un exemple de l'application du SAICBA est décrit pour illustrer la diversité de la technologie.

6.2. Développement du SAICBA

Comme tout système intégré basé sur la connaissance, le développement du SAICBA implique les étapes principales suivantes:

- définition du but du système et les utilisateurs prévus;

- identification et développement de l'architecture du système;
- développement des composantes (modèles) du système ;
- implémentation des modèles du système;
- validation du système.

La fiabilité de ce système dépendra de la qualité de la connaissance qu'il contient.

6.2.1. But du système et utilisateurs prévus

Le but du SAICBA est de prévoir les propriétés à l'état frais (ouvrabilité) et à l'état durci (résistance à la compression) d'un béton contenant des ajouts minéraux (laitier, cendres volantes, fumée silice et pouzzolane naturelle) à partir du processus de proportion de mélange, ainsi que les coefficients d'efficacité de ces ajouts. Les utilisateurs prévus de ce système sont :

Les utilisateurs du niveau 1 (spécialistes et non spécialité du domaine du génie civil) peuvent seulement accéder aux différents menus du système par leurs recherches de prévisions. À ce niveau, l'utilisateur ne peut pas entrer ou mettre à jour les données de la base de données.

Les utilisateurs du niveau 2 (spécialistes et constructeurs du système) peuvent accéder à la recherche et à l'entrée des données dans la base de données du système. À ce niveau, l'utilisateur peut entrer ou mettre à jour les données de la base de données.

Les utilisateurs du niveau 3 (Constructeur et programmeur du système) peuvent accéder au programme entier. En plus de la recherche et l'entrée, les utilisateurs à ce niveau peuvent maintenir le programme.

6.2.2. Architecture de SAICBA

L'architecture appropriée du SAICBA est illustrée sur la figure 6.1.

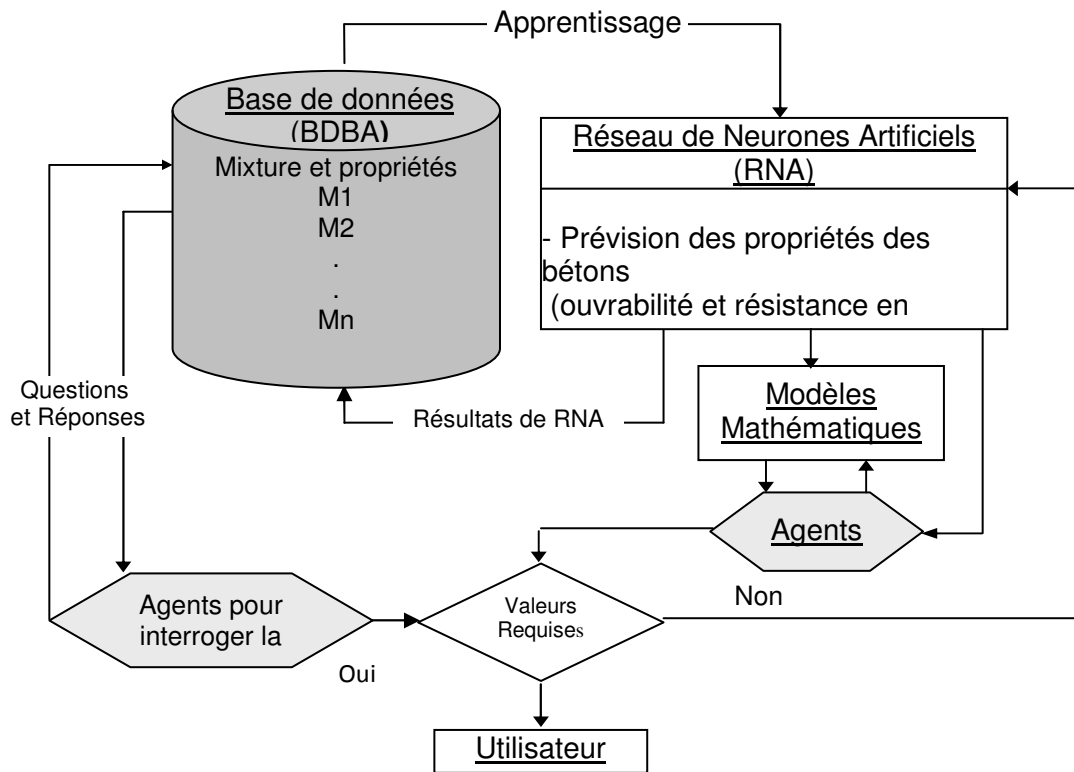


Figure 6.1 : Architecture de SAICBA.

6.3. Composants de SAICBA

Les composants du système qui sont inclus dans le SAICBA sont décrits dans cette section.

6.3.1. Base de données BDBA

La base de données ainsi développée dans le chapitre 2, incluse dans la version en cours du SAICBA est composée de deux sous bases de données. La première partie incorpore une base de données secondaire de recherche qui contient les différents articles publiés. Sa structure est semblable à une base de données bibliographique. La deuxième partie incorpore une base de données secondaire numérique qui contient les données numériques contenues dans les articles (proportions des mélanges et propriétés des bétons). Elle représente le noyau du SAICBA qui a été développé en utilisant le modèle relationnel et a été construit en utilisant le logiciel DELPHI 7 [241]. Des structures nécessaires de tables et des procédures convenables d'Entrée/Recherche ont été incorporées. En

utilisant les procédures de recherche dans le programme, les investigateurs peuvent rapidement personnaliser leurs recherches.

6.3.2. Modèles de réseaux de neurones artificiels

Les douze modèles qui ont été développés dans les chapitres 3 et 4 pour la prévision de l'ouvrabilité, de la résistance à la compression des bétons au laitier, aux cendres volantes, à la fumée de silice et à la pouzzolane naturelle et également de l'efficacité de ces ajouts sont intégrés dans SAICBA. Ils constituent le moteur de ce dernier. Tous ces modèles utilisent le réseau multicouche à Rétropropagation et sont élaborés et développés sur l'environnement du Logiciel Matlab 7 [254]. Ils sont produits pour implémenter la complexité de la relation non linéaire entre les données du réseau (composition du béton) et les résultats produits (propriétés du béton).

6.3.3. Modèles mathématiques

Basé sur une analyse statistique des résultats donnés par les modèles RN développés pour la prévision des coefficient d'efficacité des ajouts considérés ici, quatre autres modèles mathématiques sont développés. Ces modèles utilisent la notion d'estimation non linéaire entre les observations (variables affectant) et les résultats produits (coefficient d'efficacité) par ajustement d'une équation de l'analyse de régression non linéaire. L'identification des paramètres de ces modèles a été effectuée par l'utilisation du logiciel STATISTICA 7 [256].

6.4. Implémentation de SAICBA

Le SAICBA courant intègre la BDBA et un certain nombre de modèles précédemment développés dans un système cohérent simple.

6.4.1. Menu du système (Interface)

Le menu du système est développé par l'emploi de:

- outil de conception des menus du système et de la BDBA par DELPHI 7 [241];
- outil de conception des modèles de réseaux de neurones par MATLAB 7 [254];
- outil de conception des modèles mathématiques par STATISTICA 7 [256].

6.4.2. Procédures de SAICBA

Mettant en marche le programme, la page d'Accueil du système s'affiche comme le montre la figure 6.2. A l'aide du menu principal du système, l'utilisateur peut accéder aux différents points du système en cliquant sur une des options affichées de 1 à 5.



Figure 6.2 : Page d'accueil du SAICBA.

L'utilisateur peut alors:

- 1- consulter la base de données pour les bétons avec ajouts;
- 2- prévoir l'ouvrabilité d'un béton avec ajout;
- 3- prévoir la résistance à la compression d'un béton avec ajout;
- 4- prévoir le coefficient d'efficacité d'un ajout ;
- 5- prévoir la durabilité d'un béton contenant des ajouts (pas encore implémenter);

L'utilisateur peut ainsi, voir l'aide sur le système; se renseigner sur les licences d'utilisation du système; commenter le système et enfin quitter le système. Après la consultation de chaque point, l'utilisateur peut se retourner au menu principal par la sélection du Menu Principal.

La base de données du système peut être consultée par l'intermédiaire du point 1 du menu principal du SAICBA. La page d'accueil de cette base s'affiche comme le montre la figure 6.3. Selon le niveau de l'utilisateur, il peut effectuer des opérations sur la base de données dans un, deux ou chacun des deux modes (Recherche ou Entrée). Si l'utilisateur est du niveau 2, alors il est incité à donner son nom et mot de passe d'utilisateur.

Lors du choix du point 2, la page des proportions des mélanges s'affiche et l'utilisateur peut alors introduire les différentes données du mélange (Fig. 6.4). Une fois que tous les paramètres ont été indiqués, l'utilisateur clique simplement sur le bouton « Prévoir », l'ouvrabilité correspondante est retournée, après l'exécution du modèle RN correspondant intégré.

Basé sur les proportions du mélange, le programme renvoie également une valeur prévue pour la valeur de la résistance à la compression pour ce béton en fonction de l'âge par l'exécution du modèle correspondant. Ceci est accordé par le choix du point 2 du menu principal (Fig. 6.5).

Le coefficient d'efficacité d'un ajout peut ainsi être prévu en se basant sur un ensemble de données concernant le mélange et l'âge du béton. Cette prévision est faite par le choix du type du modèle (Mathématique ou Réseau de Neurones). Les valeurs prévues pour ces deux types se rapprochent sensiblement (Fig. 6.6 et Fig. 6.7). En plus, il existe deux types de prévision, la prévision simple pour une seule prévision et la prévision composée pour plusieurs prévisions dans le but de tracer et représenter graphiquement l'influence des différents paramètres sur la propriété prévue. L'utilisateur peut ainsi imprimer ses résultats (Fig. 6.8 et Fig. 6.9).



Figure 6.3 : Page d'accueil de la base de données.

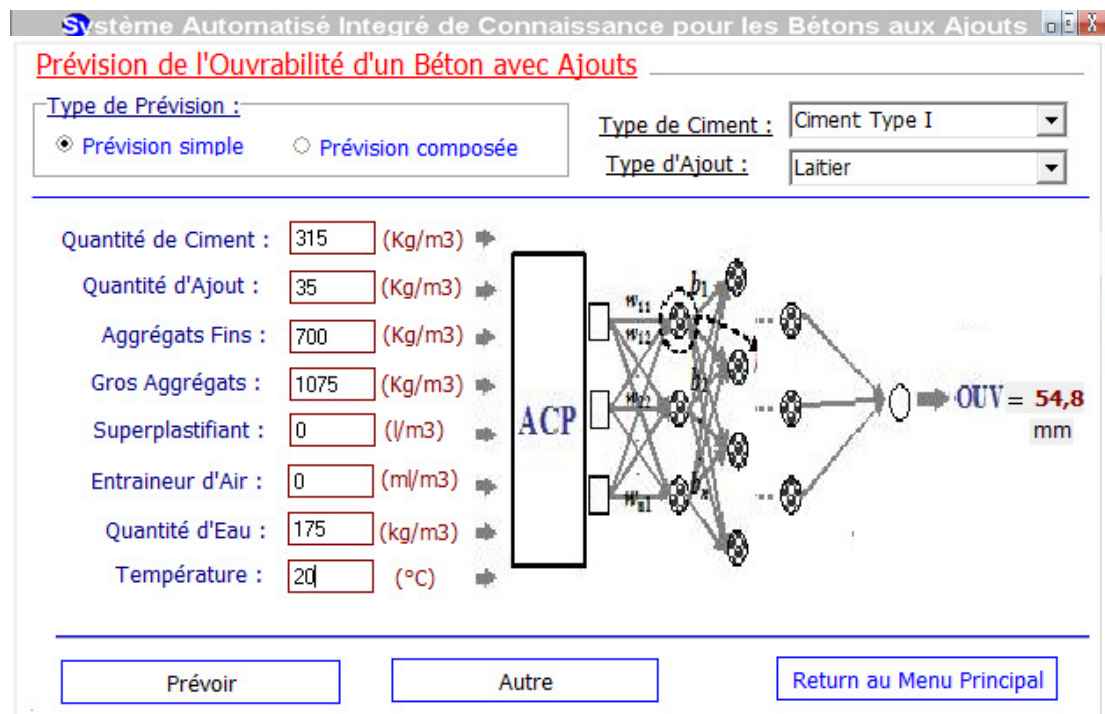


Figure 6.4 : Fenêtre de prévision de l'ouvrabilité.

Système Automatisé Intégré de Connaissance pour les Bétons aux Ajouts

Prévision de la Résistance à la Compression d'un Béton avec Ajouts

Type de Prévision : ☒ Prévision simple ☐ Prévision composée

Type de Ciment : Ciment Type I

Type d'Ajout : Laitier

Quantité de Ciment : 315 Kg/m3

Quantité d'Ajout : 35 Kg/m3

Aggrégats Fins : 700 Kg/m3

Gros Aggrégats : 1075 Kg/m3

Superplastifiant : 0 l/m3

Entraîneur d'air : 0 ml/m3

Quantité d' Eau : 175 Kg/m3

Température : 20 °C

Age : 28 Jours

ACP

RC = 57.42 MPa

Prévoir Autre Return au Menu Principal

Figure 6.5 : Fenêtre de prévision de la résistance à la compression.

Système Automatisé Intégré de Connaissance pour les Bétons aux Ajouts

Prévision du Coefficient d'Efficacité d'un Béton avec Ajouts

Type de Prévision : ☒ Prévision simple ☐ Prévision composée

Type d'Ajout : Laitier

Changer le modèle ...

Quantité de Ciment: 315 Kg/m3

Quantité d'Ajout: 10 %

Eau/Ciment: 0.5

Température: 20 °C

Age: 28 Jours

CE = 1.38

Prévoir Autre Return au Menu Principal

Figure 6.6 : Fenêtre de prévision du coefficient d'efficacité modèle RN.

Système Automatisé Intégré de Connaissance pour les Bétons aux Ajouts

Prévision du Coefficient d'Efficacité d'un Béton avec Ajouts

Type de Prévision : ☒ Prévision simple ☐ Prévision composée

Type d'Ajout : Laitier Changer le modèle ...

Prévoir

Autre...

Return au Menu Principal

Pourcentage d'Ajout : 10 (%)

Age : 28 (Jours)



Le Coefficient d'Efficacité de l'Ajout : **Laitier**

de pourcentage de : 10 %

à l'age de: 28 jours

est: **1,34**

Figure 6.7. Fenêtre de prévision du coefficient d'efficacité modèle statistique.

Système Automatisé Intégré de Connaissance pour les Bétons aux Ajouts

Prévision du Coefficient d'Efficacité d'un Béton avec Ajouts

Type de Prévision : ☒ Prévision simple ☐ Prévision composée

Type d'Ajout : Laitier Changer le modèle ...

Nombre maximum d'éléments: 4

Saisir votre données une à une dans ce tableau :

Quantité de Ciment (kg/m ³)	315	315	315	315
Pourcentage d'Ajout (%)	10	10	10	10
Eau/Ciment	0,5	0,5	0,5	0,5
Température (C°)	20	20	20	20
Age (jours)	2	7	28	90

Les Coefficients d'Efficacité prévus de ce Béton sont :

1	2	3	4
0,90	1,00	1,38	1,72

Prévoir

Autre ...

Graphique

Figure 6.8 : Fenêtre de prévision composée.

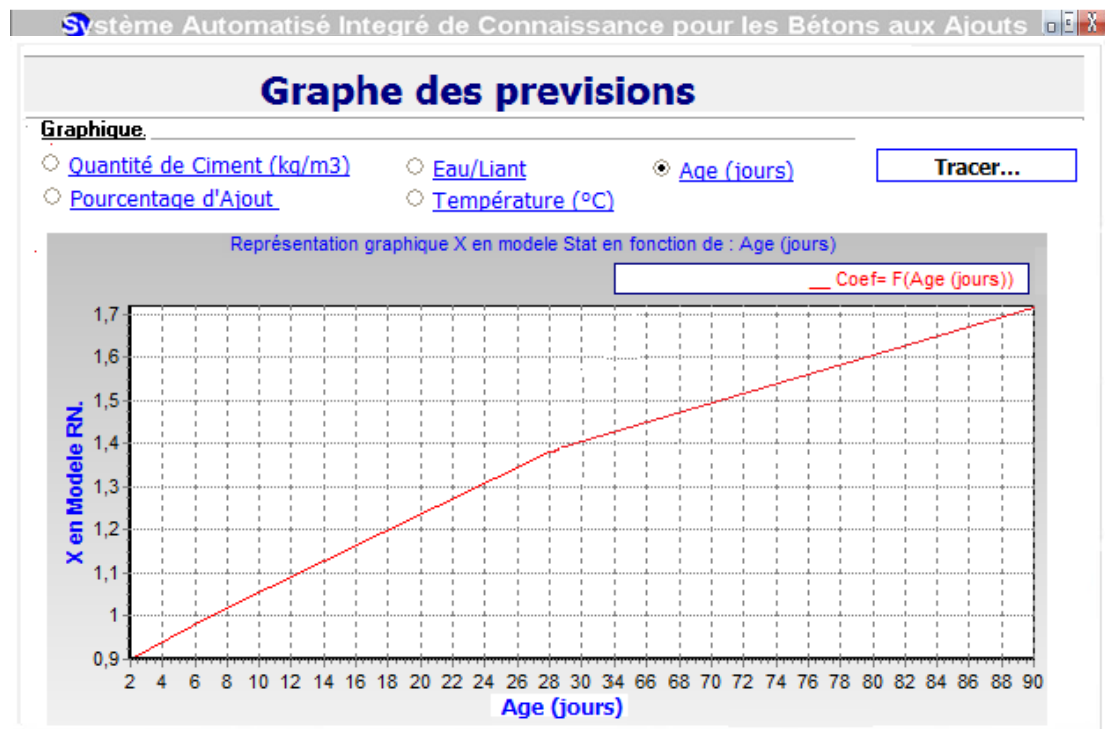


Figure 6.9 : Fenêtre représentation graphique.



Figure 6.10 : Panneau du point A PROPOS du système.

Système Automatisé Intégré de Connaissance pour les Bétons aux Ajouts

À BOUKHATEM Bakhta

N'HESITEZ PAS A ENVOYER VOS COMMENTAIRE , EN BAS DE CHAQUE BLOC
VOTRE COMMENTAIRE EST LIBRE ET PARFAITEMENT ANONYME, . ALORS,
CHERS COMPARTIOTES FAITES L'APPRENTISSAGE DE L'ECRITURE
SANS CENSURE , CRITIQUEZ ,FELICITEZ , EN TOTALE LIBERTE !

Envoyer Afficher la liste des commentaires

Votre Nom Obligatoire

Votre adresse e-mail Non Obligatoire

Grade Obligatoire

Message

Mémoriser ☒

[Return au Menu Principal](#)

Figure 6.11 : Panneau du point Commenter du système.

L'utilisateur peut se renseigner sur le système et les licences d'utilisation en cliquant sur le point « A PROPOS » du système (Fig. 6.10). Le point « COMMENTER » permet aux utilisateurs de noter leurs commentaires par inscription de leurs Noms, Prénoms, Grades et adresses email (Fig. 6.11).

6.5. Exemple d'une session d'utilisation

Les étapes de prévision des propriétés d'un béton avec ajout et la prévision du coefficient d'efficacité de ces ajouts sont décrites dans cette section. La première étape est d'obtenir un béton avec les proportions des mélanges choisis. L'utilisateur complète les formes représentées et le système retourne les résultats appropriés à l'utilisateur. La prévision du coefficient d'efficacité des ajouts incorporés dans ces bétons est basée sur les modèles développés (chapitre 4).

Le tableau 6.1 présente les résultats des prévisions possibles par le système en se basant sur une proportion d'un mélange donné comme exemple.

Tableau 6.1 : Exemple d'utilisation.

Proportions du Mélange			Propriétés Prévues								
Identifica- tion	Qts	A (%)	Ouv (mm)	Résistance à la Compression (MPa)				Coefficient d'Efficacité			
				2	7	28	90	2	7	28	90
C (kg/m³)	350	10	74,2	25,5	33,6	43,5	47,8	0,82	0,93	1,34	1,84
AF (kg/m³)	730	20	72,2	24,7	33,1	43,8	48,3	0,73	0,83	1,20	1,64
GA (kg/m³)	1075	30	70,3	23,4	32,2	43,5	48,2	0,65	0,75	1,08	1,47
		40	68,5	21,6	30,7	42,7	47,5	0,59	0,67	0,96	1,32
Adj (ml/m³)	0	50	66,9	19,4	28,7	41,3	46,2	0,53	0,60	0,86	1,18
E/L	0,5	60	65,5	17,1	26,3	39,4	44,2	0,47	0,54	0,77	1,06
TC (°C)	20	70	64,1	14,5	23,6	37,2	41,6	0,42	0,48	0,69	0,95
		80	62,8	11,8	20,3	43,3	38,4	0,38	0,43	0,62	0,85

Note : C : Ciment, AF : Agrégats Fins ; GA : Gros Agrégats ; Adj : Adjuvant ; E/L : Eau sur Liant ; TC : Température de Cure ; A : Ajout (Laitier) ; Ouv : Ouvrabilité

6.6. Conclusion

Le concept de développement et l'application d'un système intégré automatisé de base de connaissance pour les bétons avec ajout (SAICBA) sont présentés dans ce chapitre. SAICBA est défini comme un système intelligent intégré fournissant la connaissance pour résoudre des problèmes d'une gamme de complexités [287]. Les bases de connaissance qui peuvent être incorporées à ce système incluent une base de données, des modèles mathématiques et des systèmes de réseaux de neurones. Dans un système complètement intégré, le système obtient toute information nécessaire sur le problème spécifique, pendant une session interactive avec l'utilisateur, et les recommandations où les conclusions sont automatiquement présentées à l'utilisateur. Si le système est parfaitement interrogé, il pourra prévoir avec une grande précision l'ouvrabilité en termes d'affaissement et la résistance à la compression d'un béton contenant des ajouts ainsi que les coefficients efficacité de ces ajouts.

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

1. Conclusions générales

Les développements récents de la technologie de l'information ont eu un impact considérable sur la technologie du béton et en particulier sur l'optimisation et la prévision de ses performances. Ces techniques ont facilité le partage de données entre les chercheurs et les praticiens. Elles sont basées sur des systèmes à base de connaissance tels que les modèles informatiques, les systèmes interactifs d'aide à la décision, et les systèmes d'intelligence artificielle. Elles offrent des possibilités intéressantes pour former des systèmes intégrés de base de connaissance et de construire des laboratoires électroniques ou virtuels, qui permettent de gâcher du béton dans un environnement virtuel (bureau), et de prévoir ses propriétés et ses performances mécaniques. Ces nouveaux systèmes sont valables pour des spécifications et des normes intrinsèques à certains pays. Par conséquent, La conception d'un système qui couvre la majorité des données existantes sur les bétons aux ajouts avec des caractéristiques similaires d'une part, et de permettre de prendre en compte ces données pour le développement de modèles capables de simuler et de formuler ces bétons est nécessaire d'autre part. C'est pourquoi qu'on s'est intéressé dans cette recherche à la conception d'un système automatisé intégré de connaissance pour les bétons aux ajouts appelé SAICBA. Les ajouts considérés ici sont le laitier, les cendres volantes, la fumée de silice et la pouzzolane naturelle. Ce système est défini comme un système intelligent intégré fournissant la connaissance pour résoudre des problèmes d'une gamme de complexités. Les bases de connaissance qui peuvent être incorporées à ce système incluent une base de données, des modèles de réseaux de neurones et des modèles mathématiques.

En premier lieu, une méthodologie a été suivie pour la sélection et l'organisation des données de recherches existantes sur les proportions et les propriétés des bétons avec ajouts. Ensuite, un programme numérique de Base de Données pour les Bétons avec Ajouts appelé BDBA a été développé pour la numérisation de ces données. Ce programme a été construit en utilisant le modèle de base de données relationnelle et le logiciel DELPHI 7 et contient un système de menu et d'autres interfaces utilisateur qui guident l'utilisateur non expert en gestion de base de données. Le programme offre des possibilités de recherche sur la base de données basée sur des informations concernant la bibliographie, les constituants de mélanges des bétons utilisés, et les propriétés désirées. Dans cette étude la BDBA servirait de noyau pour le développement des modèles de réseaux de neurones du système SAICBA.

En second lieu, l'application de l'approche réseaux de neurones pour prévoir l'ouvrabilité et la résistance à la compression du béton a permis de développer huit modèles avec une précision tout à fait satisfaisante. En vue d'améliorer la capacité de prévision de ces systèmes, l'approche de l'Analyse en Composantes Principale a été appliquée. L'introduction de cette technique a conduit à la compression des données d'entrée et à l'élimination des corrélations entre elles. C'est pourquoi on s'est intéressé dans ce travail à la combinaison de ces deux approches pour prévoir efficacement l'ouvrabilité et la résistance à la compression d'un béton contenant des ajouts. Ces modèles ont été comparés par confrontation de ses résultats prédits avec des résultats des modèles de régressions multiples ainsi développés. Les résultats prouvent que les modèles de RN sont mieux soutenus par des données expérimentales que l'analyse de régression notamment avec les données réduites et non corrélées. Les résultats suggèrent aussi que la méthode de l'ACP pour le traitement des données est très utile pour l'amélioration de la performance de prévision avec les modèles développés.

L'approche RN a également été appliquée pour prévoir l'activité de chaque ajout dans le béton en termes de coefficient d'efficacité à 2, 7, 28 et 90 jours pour différents taux de substitution. En effet, quatre modèles ont été entraînés et testés basés sur des données non traitées par l'ACP. Les résultats de l'application de ses

modèles ont montré que cette démarche est importante en comparant avec les résultats précédents. De plus, de nombreux facteurs comme la composition du béton, le taux de substitution, l'âge et la température de cure font qu'il n'y ait pas d'unicité du coefficient d'efficacité des additions. Basé sur des simulations par les modèles RN, l'étude de l'influence du taux de substitution sur l'efficacité en fonction de l'âge a permis de développer quatre modèles mathématiques pour la prévision de l'efficacité de chaque ajout. De façon générale, l'approche présentée ici peut mener à une prévision plus précise et plus rapide de l'efficacité de chaque ajout et également de la quantité à utiliser dans la formulation du béton.

Dans une troisième partie, un programme expérimental a été réalisé au laboratoire dans le but de valider les modèles RN développés. Pour couvrir la gamme des matériaux utilisés dans les modèles, quatre types de bétons ordinaires ont été considérés, dans lesquels on a remplacé en poids de ciment les quantités : 50% de laitier, 25% de cendres volantes, 15% de méta-kaolin et 10% de fumées de silices par ces ajouts cimentaires. En plus, trois bétons à haute performance ont été aussi réalisés par substitution en poids de ciment de 30%, 15% et 10% du laitier de cendre volante et de fumée de silice respectivement. Au total, 20 mélanges de bétons avec de divers rapport eau-liant ont été réalisés et testés et des résultats sur l'ouvrabilité et la résistance à la compression ont été obtenus. Basé sur ses résultats, les coefficients d'efficacité pour chaque ajout sont ainsi déterminés. Les résultats expérimentaux ont été injectés dans les modèles pour la simulation numérique de l'affaissement, de la résistance à la compression et du coefficient d'efficacité. Les tests de validation ont donné de bons résultats, ce qui montre la pertinence de ses modèles pour prévoir efficacement, l'affaissement et la résistance à la compression avec les précisions moyennes de ± 15 mm et de ± 4.7 MPa respectivement et qui sont en accord avec les observations faites par le logiciel BétoLabPro [8]. De bonnes précisions ont été obtenues également dans la prévision des coefficients d'efficacité des ajouts en comparaison avec les modèles de Ferret et de Bolomy.

Enfin, le système SAICBA a été implémenté par l'introduction de la BDDBA et tous les modèles RN et mathématiques ainsi développés dans un système complètement intégré menu d'une interface utilisateur conviviale. Pendant une

session interactive avec l'utilisateur, le système pourra prévoir l'ouvrabilité en terme d'affaissement et la résistance à la compression d'un béton contenant des ajouts ainsi que l'efficacité des ces ajouts contenus dans ce béton en terme d'un coefficient d'efficacité. Bien que les utilisateurs primaires de ce système soient les principaux investigateurs internes au projet, on envisage que celui-ci peut également être utilisé par d'autres chercheurs et ingénieurs même avec peu d'expérience en informatique.

2. Recommandations

Nous recommandons d'améliorer l'efficacité du système proposé par plusieurs moyens. Le système est appelé à évoluer, de façon à bénéficier des apports de la recherche en développement. Il serait important de pouvoir le compléter:

- en établissant un système de maintenance et d'équipement d'explication au moyen de systèmes à base des règles, les systèmes experts ou la logique floue, offrent un meilleur choix;
- en complétant la base de données, par la mise à jour périodique;
- en optimisant les modèles RN par combinaison avec d'autres techniques comme les algorithmes génétiques et les méthodes probabilistes;
- en intégrant d'autres modèles pour la formulation des bétons aux ajouts ;

Il serait souhaitable que le système développé soit généralisé pour la prévision de:

- performances du béton contenant d'autres ajouts comme les poudres de verre et d'autres types de béton comme les bétons de fibres et les bétons auto-plaçant ;
- performances de la durabilité du béton par la prévision de propriétés telles que la perméabilité, la diffusivité des ions chlores, la vitesse de carbonatation, la résistance au gel/dégel ainsi que d'autres propriétés comme le retrait et le fluage.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. E.G. Garboczi, D.P. Bentz, G.J. Frohnsdorff, The Past, Present, and Future of the Computational Materials Science of Concrete, *Materials Science of Concrete Workshop*, Shelbyville, Apr. 2000, pp.27-29.
2. J. R. Clifton, G. J. C. Frohnsdorff, Applications of Computers and Information Technology, *Handbook of Analytical Techniques in Concrete Science and Technology: Principles, Techniques and Applications, Chapter 18*, Noyes Publications/William Andrew Publishing, LCC, NY, 2001, pp.765-799.
3. L. Moore, J. Miles, European Research on Intelligent Computing in Civil Engineering, *Journal of Computing in Civil Engineering*, Vol. 17, No. 3, 2003, 1p.
4. R. A. Issa Raja, A. Chimay, Computing and Information Technology (IT) Research in Civil Engineering Self-Fulfilling or Industry Transforming?, *Journal of Computing in Civil Engineering*, Vol. 21, No. 5, 2007, pp.301-302.
5. J. R. Clifton, D. P. Bentz, L. J. Kawtzel, Computerized Integrated Knowledge Based Systems for High Performance Concrete: An Overview, *Report NISTER 5947, National Institute of Standard and Technology*, 1997, 44p.
6. A. Jrade, S. Alkass, Système Intégré par Ordinateur Pour Estimer les Coûts de Projets de Construction, *Journal of Architectural Engineering*, Vol. 13, No. 4, 2007, pp.205-223.
7. J. Bullard, D. Bentz, E. Garboczi, C. Ferraris, N. Martys, P. Stutzman, The Virtual Cement and Concrete Testing Laboratory, *Materials and Construction Research Division Seminar*, NIST Gaithersburg, 16 Jun. 2005.
8. F. De Larrard, T. Sedran, Le logiciel BétonlabPro 3, *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées* No. 270-271, 2007, pp.75-86.
9. I-C. Yeh, Computer-Aided Design for Optimum Concrete Mixtures, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 29, No. 3, 2007, pp.193-202
10. D.P. Bentz, CEMHYD3D: A Three-Dimensional Cement Hydration and Microstructure Development Modeling Package Version 3.0, *Materials and Construction Research Division, BFLRL, NIST, Gaithersburg, MD 20899-8615*, Jun. 2005, 234 p.

11. D.P. Bentz, Three-Dimensional Computer Simulation of Portland Cement Hydration and Microstructure Development, *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 80, No. 1, 1997, pp.3-21.
12. W. Chen, H. J. H Brouwers, Z.H. Shui, Three-Dimensional Computer Modeling of Slag Cement Hydration, *Journal of Materials Science*, Vol. 42, No. 23, 2007, pp.9595-9610.
13. D.P. Bentz, S. Remond, Incorporation of Fly Ash into a 3-D Cement Hydration Microstructure Model, *NISTIR 6050, U.S. Department of Commerce*, Aug.1997, 55p.
14. E.J. Garboczi, J.F. Douglas, R.B. Bohn, A Hybrid Finite Element-Analytical Method for Determining The Intrinsic Elastic Moduli of Particles Having Moderately Extended Shapes and a Wide Range of Elastic Properties, *Mechanics of Materials*, Vol. 38, No. 8-10, 2006, pp.786-800.
15. C.-F. Chang, J.-W. Chen, Strength and Elastic Modulus of Carbonated Concrete, *ACI Materials Journal*, Vol. 102, No. 5, 2005, pp.315-321.
16. D.P. Bentz, A La percolation est un *processus physique critique* qui décrit pour un système, une transition d'un état vers un autre, *Cement and Concrete Research*, Vol. 38, No. 2, 2008, pp.196-204.
17. C. Ferraris, K. Obla, R. Hill, The Influence of Mineral Admixtures on the Rheology of Cement Paste and Concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, No. 2, 2001, pp.245-255.
18. C. Ferraris, N. Martys, De la Pâte de Ciment au Béton: Modélisation et Mesures Expérimentales des Propriétés Rhéologiques, *Proceedings du 36^{ème} Colloque du Groupe Français de Rhéologie sur la Rhéologie, Génie Civil et Environnement*, Marne la Vallée, France, Oct.10-12, 2001, pp.226-230.
19. S.E. Chidiac, F. Habibbeigi, Modelling the Rheological Behaviour of Fresh Concrete: An Elasto-Viscoplastic Finite Element Approach, *Computers and Concrete*, Vol. 2, No. 2, 2005, pp.97-110.
20. G. Chanvillard, L. D'Aloia, Prévion de la Résistance à la Compression au Jeune Age du Béton : Application de la Méthode du Temps Équivalent, *Bulletin de Liaison des LPC*, No. 193, 1994, pp.39-51.
21. R. Féret, Sur la Compacité des Matériaux Hydrauliques, *Annales des Ponts et Chaussées*, Série 7, Vol. 4, 1982, pp.5-164.
22. J. English, Predicting the Compressive Strength of High Performance Silica Fume Concrete by Bayesian Method, *Canadian Strategic Highway Research Program (C-SHRP), Transportation Association of Canada*, Oct. 1995, 150p.

23. K. Omine, H. Ochiai, Prediction of Strength of Cement-Treated Soil Column Based on Size Effect, *Proceedings 15th ICSMGE*, Istanbul, Vol. 2, 2001, pp. 1537-1540.
24. C.J. Haecker, D.P. Bentz, X.P. Feng, P. E. Stutzman, Prediction of Cement Physical Properties by Virtual Testing, *Cement International*, Vol. 1, No.3, 2003, pp.86-92.
25. Y. Lee, S.-T. Yi, M.-S. Kim, J.-K. Kim, Evaluation of a Basic Creep Model with Respect to Autogenous Shrinkage, *Cement and Concrete Research*, Vol. 36, No. 7, 2006, pp.1268-1278.
26. D.P. Bentz, A Virtual Rapid Chloride Permeability Test, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 29, No. 10, 2007, pp.723-731.
27. M. Castellote, RILEM Technical Committee TMC, Testing and Modelling Chloride Penetration in Concrete, *Proceedings Summaries of Invited Presentations, Summary 2.1*, Gaithersburg, USA Nov.9-10 1998, pp.3-4.
28. B. Mobasher, C.F. Ferraris, Simulation of Expansion in Cement Based Materials Subjected to External Sulfate Attack, Concrete Science and Engineering, *Proceedings, International RILEM Symposium*, Mar. 22-24, 2004, pp.1-12.
29. I. L. Kondratova, I. Goldfarb, Using the Internet to Transfer Knowledge on Concrete Durability: Improving and Fostering Knowledge Exchange, *Proceedings of the 2002 ECPPM, Work and Business in AEC, Conference*, Portoroz, Slovenia. Sep. 2002, pp. 9-11.
30. L.C. Kaetzel, M.A. Galler, Proposed Format for Data on Cement in a Material Properties Database, National *Institute of Standard and Technology, Building and Fire Research Laboratory, NISTIR 6034*, Jun.1997, 23p.
31. C.F. Ferraris, Guide to A Format for Data on Chemical Admixture in a Material Property Database, National *Institute of Standard and Technology, BFRL, NISTIR 5796*, Apr.1996, 28p.
32. ICONDA (CIB's International CONstruction DATAase), *Information Center for Regional Planning and Building Construction of the Fraunhofer Society*, Stuttgart, Germany. <http://www.irbdirekt.de/iconda/>
33. K. William, R. Chi, NCSU Concrete Materials Database, *Strategic Highway Research Program, National Research Council*, Washington, D.C., Nov.1993, 45p.
34. I. L. Kondratova, I. A. Goldfarb, T. W. Bremner, M. V. Malhotra, Computer Database for Concrete Specimens at a Marine Exposure Site, *Proceedings of the First International Conference on New Information Technologies for Decision Making in Civil Engineering*, Montreal, Canada, Vol. 2, Oct. 11-13, 1998, pp.803-811.

35. T. Noguchi, Database for Mechanical Properties of Concrete, *Noguchi Laboratory*, Japan, 2007. <http://bme.t.u-tokyo.ac.jp/researches/detail/concreteDB/index.html>.
36. K. Brady, J. Sullivan, Remote Database Access, *Computer Systems Laboratory, National Institute of Standards and Technology*, 1996.
37. R. Meo, P.L. Lanzi, M. Matera, D. Careggio, R. Esposito, Employing Inductive Databases in Concrete Applications, *Constraint-based mining and Inductive Databases*, Springer-Verlag LNCS, Berlin Heidelberg, Vol. 3848, 2005, pp.295-325.
38. J.C. Giarratano, G. Riley, Expert Systems: Principles and Programming, *Third Edition: Principles and Programming (Hardcover)*, 2005.
39. J. R. Clifton, B. C. Oltikar, Expert System for Selecting Concrete Constituents, *Computer Application in Concrete Technology*, ACI-SP, Vol. 98, No. 1, 1987, pp.1-24.
40. L.J. Kaetzel, J.R. Clifton, P. Klieger, K. Snyder, Highway Concrete (HWYCON) Expert System User Reference and Enhancement Guide, *Strategic Highway Research Program SHRP-C-406*, National Research Council, Washington DC, 1994.
41. James R. Clifton, Development of DURCON, an Expert System for Durable Concrete, National Bureau of Standards, National Technical Information Service, Department of Commerce, Gaithersburg, U.S., 1985.
42. J. Gomez Dominguez, C. E. P. Garay Mendoza, Durability of Reinforced Concrete Applying Some Expert Systems From the World Wide Web, *Proceedings of the International Conference on Achieving Sustainability in Construction*, London, 2005, p 299-306.
43. M.N. Islam, M.F.M. Zain, H. Basri, An Expert System for Making Durable Concrete for Chemical Exposure, *Computers and Concrete*, Vol. 2, No. 4, 2005, pp.293-307.
44. M. Abdullahi, H. M. A. Al-Mattarneh, A. H. Hassan, M. H. Abu Hassan, B. S. Mohammed, A Review on Expert Systems for Concrete Mix Design, *International Conference on Construction and Building Technology*, 16-20 June 2008, Kuala Lumpur, Malaysia, A - (21) - pp231-238.
45. M.F.M. Zain, Md. Nazrul Islam, Ir. Hassan Basri, An Expert System for Mix Design of High Performance Concrete, *Advances in Engineering Software*, Vol. 36, No. 5, 2005, pp.325-337.

46. G. Dreyfus, J.M. Martinez, M. Samuelides, M.B. Gordon, F. Badran, S. Thiria, L. Hérault, Réseaux de Neurones Méthodologie et Applications, *Ed. Eyrolles*, 2002, 386p.
47. I. Flood, N. Kartam, Neural Network in Civil Engineering: I Principals and Understanding, *Computing in Civil Engineering Journal*, Vol. 8, No. 2, 1994, pp.345-258.
48. O. Moselhi, Neural Network Applications in Civil Engineering , *Proceeding of the 2nd International Conference in Civil Engineering on Computer Applications Research and Practice, Vol. 1, Department of Civil and Architectural Engineering*, University of Bahrain, 1996, pp.7-13.
49. J. Tao, L. Tingwei, L. Xujian, A Concrete Mix Proportion Design Algorithm Based on Artificial Neural Networks, *Cement and Concrete Research*, Vol. 36, No. 7, 2006, pp.1399-1408.
50. K. B. Parka, T. Noguchib, J. Plawskya, Modelling of Hydration Reactions Using Neural Networks to Predict the Average Properties of Cement Paste, *Cement and Concrete Research*, Vol. 35, No. 9, 2005, pp.1676-1684
51. I-C. Yeh, Exploring Concrete Slump Model Using Artificial Neural Networks, *Journal of Computing in Civil Engineering*, Vol. 20, No. 3, 2006, pp.217-221
52. W.P.S. Dias, S.P. Pooliyada, Neural Networks for Predicting Properties of Concretes with Admixtures, *Construction and Building Materials*, Vol. 15, No. 26, 2001, pp.371-379.
53. P. Murat, E. Ozbay, A. Oztas, M. I. Yuce, Appraisal of Long-Term Effects of Fly Ash and Silica Fume on Compressive Strength of Concrete by Neural Networks, *Construction and Building Materials*, Vol. 21, No. 2, 2007, pp. 384-394.
54. V. Lambros, A. Androus, K.M.A. Hossain, K. Sennah, K. Raahemifar, M. Lachemi, Predicting the Modulus of Elasticity of High Performance Concrete using Artificial Neural Networks, *Proceedings of the Annual Conference of the Canadian Society for Civil Engineering*, Moncton, NB, Canada, Jun 4-7 2003, pp. 1967-1976 .
55. A.B. Gektepe, G. Inan, K. Ramyar, A. Sezer, Estimation of Sulphate Expansion level of PC Mortar using Statistical and Neural Approaches, *Construction and Building Materials*, Vol. 20, No. 7, 2006, pp.441-446.
56. A. A. Ramezaniapour, A.Tarighat, Neural Network Modelling of Concrete Carbonation, *Seventh CANMET/ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete*, ACI-SP, Vol. 199, No. 52, 2001, pp.899-915.

57. E. Hewayde, M. Nehdi, E. Allouche, G. Nakhla, Neural Network Prediction of Concrete Degradation by Sulphuric Acid Attack, *Structure and Infrastructure Engineering*, Vol. 3, No. 1, 2007, pp.17-27.
58. W. Ji-Zong, N. Hong-Guang, H. Jin-Yun, The Application of Automatic Acquisition of Knowledge to Mix Design of Concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol. 29, No. 12, 1999, pp.1875-1880.
59. I. Flood, Next Generation Artificial Neural Networks for Civil Engineering, *Journal of Computing in Civil Engineering*, Vol. 20, No. 5, 2006, pp.305-307.
60. R. Gupta, M. A. Kewalramani, A. Goel, Prediction of Concrete Strength using Neural-Expert System, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 18, No. 3, 2006, pp.462-466.
61. K. K. Doo, J. L. Jong, H. L. Jong, K. C. Seong, Application of Probabilistic Neural Networks for Prediction of Concrete Strength, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 17, No. 3, 2005, pp.353-362.
62. M. Slonski, HPC Strength Prediction Using Bayesian Neural Networks, *Computer Assisted Mechanics and Engineering Sciences*, Vol. 14, No. 2, 2007, pp.345-52.
63. I. B. Topcu, M. Sardemir, Prediction of Compressive Strength of Concrete Containing Fly Ash Using Artificial Neural Networks and Fuzzy Logic, *Computational Materials Science*, Vol. 41, No. 5, 2008, pp.305-311.
64. A. Baykasoglu, T. Dereli, S. Tanis, Prediction of Cement Strength Using Soft Computing Techniques, *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, No. 11, 2004, pp.2083-2090.
65. S-C. Lee, Prediction of Concrete strength Using Artificial Neural Networks, *Engineering Structures*, Vol. 25, No. 7, 2003, pp.849-857.
66. M-Y. Hu, M-S. Tang, Use of Fuzzy Neural Network to Evaluate Effect of Composition of Fly Ash in Suppressing AAR, *ACI Materials Journal*, Vol. 103, No. 3, 2006, pp.161-168.
67. L.A. Zadeh, Fuzzy Sets, Fuzzy Logic and Fuzzy Systems: Selected Papers of Lotfi A. Zadeh, G. J. Klir and B. Yuan, Eds., *Advances in Fuzzy Systems - Applications and Theory*, Vol. 6, River Edge, NJ: World Scientific, 1996.
68. S. Yurkovich, K.M. Passino, A Laboratory Course of Fuzzy Control, *IEEE Transactions on Education*, Vol. 42, No. 1, 1999, pp.15-21.
69. Ch.-M. Lin, T.-K. Chu, T.-P. Chang, Cement Roller Mill Control by Fuzzy Logic Controller, *Journal of Control Systems and Technology*, Vol. 4, No. 2, 1996, pp. 133-138.

70. O. Unala, F. Demirb, T. Uygunoglua, Fuzzy Logic Approach to Predict Stress–Strain Curves of Steel Fiber-Reinforced Concretes in Compression, *Building and Environment*, Vol. 42, No. 10, 2007, pp.3589-3595.
71. A. Khanfar, M. Abu-Khousa, N. Qaddoumi, Microwave Near-Field Non-destructive Detection and Characterization of Disbonds in Concrete Structures Using Fuzzy Logic Techniques, *Composite Structures*, Vol. 62, No. 3-4, 2003, pp.335-339.
72. S. Akkurta, G. Tayfurb, S. Canc, Fuzzy Logic Model for The Prediction of Cement Compressive Strength, *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, No. 8, 2004, pp.1429-1433.
73. T. Uygunoglu, O. Unal, A New Approach to Determination of Compressive Strength of Fly Ash Concrete Using Fuzzy Logic, *Journal of Scientific and Industrial Research*, Vol. 65, No. 11, 2006, pp.894-899.
74. F. Demir, A New Way of Prediction Elastic Modulus of Normal and High Strength Concrete: Fuzzy Logic, *Cement and Concrete Research*, Vol. 35, No. 8, 2005, pp.1531-1538.
75. I. B. Topc, M. Sardemir, Prediction of Compressive Strength of Concrete Containing Fly Ash Using Artificial Neural Networks And Fuzzy Logic, *Computational Materials Science*, Vol. 41, No. 3, 2008, pp.305-311.
76. J.H. Holland, Adaptation in Natural and Artificial Systems, *MIT Press Cambridge, MA, USA*, 1992.
77. E. Lutton, Algorithmes Génétiques et Fractales, *Habilitation à Diriger des Recherches*, Université de Paris XI Orsay, 1999.
78. M.G. Sahab, A.F. Ashour, V.V. Toropov, A Hybrid Genetic Algorithm for Reinforced Concrete Flat Slab Buildings, *Computers and Structures*, Vol. 83, No. 8-9, 2005, pp.551-559.
79. T. Greenough, M. Nehdi, Modelling Shear Capacity of Reinforced Concrete Beams Using Genetic Algorithms, *Proceedings of the 33rd Annual Conference of Canadian Society for Civil Engineering, General Conference and International History Symposium*, Toronto, Canada, Jun. 2-4 2005, pp. 207-217.
80. M. Nehdi, H. El Chabib, A. Aly Saïd, Proposed Shear Design Equations for FRP-Reinforced Concrete Beams Based on Genetic Algorithms Approach, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 19, No. 12, 2007, pp.1033-1042.
81. C. A. Coello, F. Santos Hernandez, F. Alonso Farrera, Optimal Design of Reinforced Concrete Beams Using Genetic Algorithms, *Expert Systems with Applications*, Vol. 12, No. 1, 1997, pp.101-108.

82. S. Akkurta, S. Ozdemira, G. Tayfurb, B. Akyolc, The Use of GA–ANNS in the Modelling of Compressive Strength of Cement Mortar, *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, No. 7, 2003, pp.973-979.
83. C.-H. Lim, Y.-S. Yoon, J.-H. Kim, Genetic Algorithm In Mix Proportioning of High-Performance Concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, No. 3, 2004, pp.409-420.
84. A. Amirjanov, K. Sobolev, Optimal Proportioning of Concrete Aggregates Using a Self-Adaptive Genetic Algorithm, *Computers and Concrete*, Vol. 2, No. 5, 2005, pp.411-21.
85. B. Saini, V. K. Sehgal, M. L. Gambhir, Least-Cost Design of Singly and Doubly Reinforced Concrete Beam Using Genetic Algorithm Optimized Artificial Neural Network Based on Levenberg–Marquardt and Quasi-Newton Backpropagation Learning Techniques, *Structural and Multidisciplinary Optimization* , Vol. 34, No. 3, 2007, pp.243-260.
86. J. R. Clifton, D. P. Bentz, L. J. Kawtzel, Computerized Integrated Knowledge Based Systems for High Performance Concrete: An Overview, *Report NISTER 5947, National Institute of Standard and Technology*. 1997, 44p.
87. D.P. Bentz, J.R. Clifton, K.A. Snyder, A Prototype Computer-Integrated Knowledge System: Predicting Service Life of Chloride-Exposed Steel-Reinforced Concrete, *Concrete International*, Vol. 18, No. 12, 1996, pp.42-47.
88. J. R. Clifton, S. S. Sunder, Partnership for a National Computer-Integrated Knowledge Systems Network for High-Performance Construction Materials and Systems, *Workshop Report, NISTIR 6003*, 1997, 58p.
89. T.Y. Kurihara, Computer-Integrated Knowledge System (CIKS) Network, *Report of the 2nd Workshop. Network for High-Performance Construction Materials and Systems (NPCMS), NISTIR 6401*, Gaithersburg, MD, Dec. 1999, 58-63 pp.
90. NIST website: <http://ciks.cbt.nist.gov/monograph> and <http://www.bfrl.nist.gov/861/vcctl/>.
91. D. P. Bentz, E.J. Garboczi, K.A. Snyder, A Hard Core/Soft Shell Microstructural Model for Studying Percolation and Transport in Three-Dimensional Composite Media, *NISTIR 6265, Department of Commerce*, U.S, Jan. 1999.
92. D. P. Bentz, J. T. Conway, Computer Modeling of the Replacement of “Coarse” Cement Particles by Inert Fillers in Low w/c Ratio Concretes: Hydration and Strength, *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, No. 3, 2001, pp.503-506.

93. C.J. Haecker, D.P. Bentz, X.P. Feng P.E. Stutzman, Prediction of Cement Physical Properties by Virtual Testing, *Cement International*, Vol. 1, No. 3, 2003, pp.86-92.
94. ACI 211.1-91, Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight and Mass Concrete, *ACI Manual of Concrete Practice, Part I: Materials and General Properties of Concrete*, Detroit, Michigan, 1994, 38 p.
95. G. DREUX, Guide Pratique du Béton, *Collection de l'ITBTP*, 1970.
96. M.J. Simon, E.S. Lagergren, K.A. Snyder, Concrete Mixture Optimization Using Statistical Mixture Design Methods, *Proceedings of the PCI/FHWA International Symposium on High Performance Concrete*, New Orleans, Oct. 20-22, 1997, pp.230-244.
97. F. De Larrard, D. Fau, BETONLAB - Logiciel d'Aide à la Formulation des Bétons pour Micro-Ordinateurs PC et Compatibles, *Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées*, Version 3.0, 1995.
98. F. De Larrard, T. Sedran, Une Nouvelle Approche de la Formulation des Bétons, *Annales du Bâtiment et des Travaux Publics*, No. 6, 1996, pp.39-54.
99. B. Boukhatem, S. Kenai, A. Tagnit-Hamou, M. Ghrici, Application of New Information Technology on Concrete: An Overview, *Journal of Civil Engineering and Management: International Research and Achievements*, available online, Mai 2011.
100. P.J. Wainwright, J.J.A. Tolloczko, Early and Later Age Properties of Temperature Cycled Slag-OPC Concretes, *Second International Conference on the Use of Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in concrete*, ACI-SP, Vol. 91 No. 64, 1986, pp.1293-1321.
101. A. Bouikni, Influence of Slag on the Properties of Concrete, *Master Thesis*, University of Sheffield, 1987, 120p.
102. A. Issaad, OPC and Modified GGBFS Cured in Hot Climate, *Master Thesis*, Loughborough University of Technology, 1988, 216p.
103. A.M. Al-Amiri, Durability of Concrete in Hot Climate, *PhD Thesis*, Department of Civil Engineering, University of Leeds, 1988, 261p.
104. V.M. Malhotra, Mechanical Properties and Freezing and Thawing Durability of Concrete Incorporating a Ground Granulated Blast-Furnace Slag, *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 16, No. 2, 1989, pp.140-156.
105. E. Douglas, H. Wilson, V. M. Malhotra, Production and Evaluation of New Source of Ground Granulated Blast Furnace Slag, *Cement, Concrete and Aggregates*, Vol. 10, No. 2, 1988, pp.75-87.
106. G.J Osbone, Carbonation and Permeability of Blast Furnace Slag Cement Concretes from Field Structures, *Third International Conference on the Use*

- of Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete*, ACI-SP, Vol. 114, No. 59, 1989, pp.1209-1223.
107. D.E. Wimpenny, C. Ellis, C.M. Reeves, D.D. Higgins, Development of Strength and Elastic Properties in Slag cement Concretes Under Low Temperature Curing Conditions, *Third International Conference on the Use of Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete*, ACI-SP, Vol. 114, No. 62, 1989, pp.1283-1295
 108. W.H. Mirza, S.I. El-Noury, W.H. Al-Badawi, Temperature effect on strength of mortars and concrete containing blended cements, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 13, No. 3, 1991, pp.197-202.
 109. T. Uomoto, K. Kobayashi, Effect of Curing Temperature on the Hydration and Humidity on Strength Concrete Containing Blast Furnace Slag Admixture, *Third International Conference on the Use of Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete*, ACI-SP, Vol. 114, No. 65, 1989, pp.1345-1359.
 110. S. Kokubu, S. Takahashi, H. Anzai, Effect of Curing Temperature on the Hydration and Adiabatic Temperature Characteristics of Portland Cement Blast Furnace Slag Concrete, *Third International Conference on the Use of Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete*, ACI-SP, Vol. 114, No. 66, 1989, pp.1361-1377.
 111. E. Douglas, A. Elola, V.M. Malhotra, Characterization of Ground Granulated Blast Furnace Slag and Fly Ashes and their Hydration in Portland Cement Blends, *Cement, Concrete and Aggregates*, Vol. 12, No. 2, 1990, pp.38-46.
 112. L. Fernandez, V. M. Malhotra, Mechanical Properties, Abrasion Resistance, and Chloride Permeability of Concrete Incorporation Granulated Blast Furnace Slag, *Cement, Concrete and Aggregates*, Vol. 12, No. 2, 1990, pp.87-100.
 113. M.D. Luther, W.J. Mikols, A.J. DeMaio, J.E. Whitlinger, Scaling Resistance of Ground Granulated Blast Furnace (GGBF) Slag Concretes, *Third CANMET ACI International conference on Durability of Concrete*, ACI-SP, Vol. 145, No. 2, 1994, pp.47-64.
 114. A. Amrane S. Kenai, Propriétés Mécaniques et Durabilité du béton au Laitier en Climat Chaud, *Séminaire International : La Qualité du Béton en Climat Chaud*, Ghardaia, Mars 1994, pp.106-122.
 115. D. G. Mantel, Investigation Into the Hydraulic Activity of Five Granulated Blast Furnace Slag with Eight Different Portland Cement, *ACI Materials Journal*, Vol. 91, No. 5, 1994, pp.471-477.
 116. A. Kriker, Effet de la Cure sur la Résistance Mécanique des bétons au Laitiers d'El-Hadjar, *Séminaire International : La Qualité du Béton en Climat Chaud*, Ghardaia, Mars 1994, pp.45-54.

117. P.C. Ninamubanzi, M. Baalbaki, J. Bickley, P.C. Aitcin, L'Utilisation de Laitier de ECOTRADE pour la Fabrication des bétons à Haut Rendement, *Rapport Interne, Département de Génie Civil*, Université de Sherbrooke, 1994, 13p.
118. V.F. Rahhal, O. R. Batic, Mineral Admixtures Contribution to the Development of Heat of Hydration and Strength, *Cement, Concrete and Aggregates*, Vol. 16, No. 2, 1994, pp.150-158.
119. C.C. Videla, J.P.T. Covarrubias, J.M.D. Pascual, Behavior in Extreme Climates of Concrete Made With Different Types of Cement, *Proceeding of the International Conference on Concrete in The Service of Mankind : Appropriate Concrete Technology*, Vol. 3, University of Dundee, UK, 1996, pp.213-224.
120. A. Bougara, Etude de l'Activation du Laitier d'El-Hadjar, Activation Thermique, Mécanique et Chimique, *Mémoire de Magister*, Université de Chlef, 1999, 110p.
121. A.A. Silveira, W.A. Moura, D.C.C. Dal Molin, A.B. Masuero, Compressive Strength of Concretes Containing Mineral Admixtures, *Proceeding of the International Conference on Infrastructure, Regeneration and Rehabilitation Improving the Quality of Life Through Better Constructions*, University of Sheffield, UK, 1999, pp.371-380.
122. J. Deja, G. Loj, Effect of Cations Occurring in the Chloride Solutions on the Corrosion Resistance of Slag Cementitious Materials, *Proceeding of the International Conference on Infrastructure, Regeneration and Rehabilitation Improving the Quality of Life Through Better Constructions*, University of Sheffield, UK, 1999, pp.603-631.
123. A.Y. EL-Homsi, D.G. Montgomery, Activation of Slag Blended Cements Using Multi-Functional Admixtures, *Proceeding of the International Conference on Concrete 2000: Economic and Durable Construction Through Excellence*, University of Dundee, UK, Sep. 7-9, 1993, pp.511-523.
124. K. Sisomphon, A Chemical Analysis Method for Determining Blast-Furnace Slag Content in Hardened Concrete, *Construction and Building Materials*, Vol. 23, No. 1, 2009, pp.54-61.
125. W. Ling, T. Pei, Y. Yan, Application of Ground Granulated Blast Furnace Slag in High-Performance Concrete in China, *International Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology*, Beijing, May 20-21, 2004, pp.309-317.
126. C-S. Poon, S. Azhar, M. Anson, Y-L. Wong, Comparison of the Strength and Durability Performance of Normal and High-Strength Pozzolanic Concretes at Elevated Temperatures, *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, No. 9, 2001, pp.1291-1300.

127. M. Oner, K. Erdogdu, A. Gunlu, Effect of Components Fineness on Strength of Blast Furnace Slag Cement, *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, 2003, pp.463-469.
128. K. Torii, T. Sasatani and M. Kawamura, Application of Rapid Chloride Permeability Test to Evaluate the Chloride Test Penetration into Concrete, *Fourth CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete*, ACI-SP, Vol. 170, No. 21, 1997, pp.421-427.
129. S. J. Barnett, M. N. Soutsos, J.H. Bungey, S.G. Millard, Fast-Track Construction with Slag Cement Concrete: adiabatic Strength Development and Strength Prediction, *ACI Materials Journal*, Vol. 104, No. 4, 2007, pp.338-396
130. N.P. Rajamane, J. Annie Peter, J.K Dattatreya, M. Neelamegam, S. Gopalakrishnan, Improvement in Properties of High Performance Concrete with Partial Replacement of Cement by Ground Granulated Blast Furnace Slag, *Journal of the Institution of Engineers : Civil Engineering Division*, Vol. 84, No. 1, 2003, pp. 38-42.
131. V. Sivasundaram, V.M. Malhotra, Properties of Concrete Incorporating Low Quantity of cement and High Volumes of Ground Granulated Slag, *ACI Materials Journal*, Vol. 89, No. 6, 1992, pp.554-563.
132. T. Miura, I. Iwaki, Strength Development of Concrete Incorporating High Levels of Ground Granulated Blast-Furnace Slag at Low Temperatures, *ACI Materials Journal*, Vol. 97, No. 1, 2000, pp.66-70.
133. P.J. Wainwright, N. Rey, The Influence of Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBS) Additions and Time Delay on The Bleeding of Concrete, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 22, No. 4 , 2000, pp.253-257.
134. C.D. Atis, C. Bilim, Wet and Dry Cured Compressive Strength of Concrete Containing Ground Granulated Blast-Furnace Slag, *Building and Environment*, Vol. 42, No. 8, 2007, pp.3060-3065.
135. M. Oener, A Study of Intergrading and Separate Grinding of Blast Furnace Slag Cement, *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, No. 3, 2000, pp.473-480.
136. K.Y. Yeaua, E.K. Kim, An Experimental Study on Corrosion Resistance of Concrete with Ground Granulate Blast-Furnace Slag, *Cement and Concrete Research*, Vol. 35, No. 7, 2005, pp.1391-1399.
137. S.N. Lim and T.H. Wee, Autogenous Shrinkage of Ground-Granulated Blast-Furnace Slag Concrete, *ACI Materials Journal*, Vol. 97, No. 5, 2000, pp.587-593.

138. J.M. Khatib, J.J. Hibbert, Selected Engineering Properties of Concrete Incorporating Slag and Metakaolin, *Construction and Building Materials*, Vol. 19, No. 6 2005, pp.460-472.
139. L. Zeghichi, B. Mezghiche, R. Chebili, Study of the Effect of Alkalis on the Slag Cement Systems, *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 32, No. 2005, pp.934-939.
140. A. P. Baker, and J. D. Mathews, Concrete Durability Specification by Water/Cement or Compressive Strength for European Cement Types, *Third CANMET ACI International Conference on Durability of Concrete*, ACI-SP, Vol. 145, No. 62, pp.1135-1159.
141. P. Plante and A. Bilodeau, Rapid Chloride Ion Permeability Test: Data on Concrete Incorporating Supplementary Cementing Materials, *Third International Conference on the Use of Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete*, ACI-SP, Vol. 114, No. 30, 1989, pp.625-644.
142. M. Revest, N. Bouzoubaa, et V. M. Malhotra, Strength Development and temperature Rise in High Volume Fly Ash and Slag Concretes in Large Experimental Monoliths, *Eighth CANMET/ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete*, ACI-SP, Vol. 221, No. 52, 2004, pp.1135-1159.
143. S. Kumar, B. K. Rao, S. Misra, Chloride Penetration Resistance of Concrete Containing Blast Furnace Slag, *The Indian Concrete Journal*, Vol. 76, No. 12, 2002, pp.745-751.
144. W.M. Hale, T. D. Bush, Jr. B. W. Russell, and S. F. Freyne, Effect of Curing Temperature on Hardened Concrete Properties: Mixtures of Ground Granulated Blast Furnace Slag, Fly Ash, or a Combination of Both, *Journal of the Transportation Research Board*, No. 1914, 2005, pp.97-104.
145. O. Eren, Strength Development of Concretes with Ordinary Portland Cement Slag or Fly Ash Cured at Different Temperatures, *Materials and Structures*, Vol. 35, No. 253, Nov. 2002, pp.536-540.
146. P.K. Mehta, Studies on Portland Cements Containing Santorin Earth, *Cement and Concrete Research*, Vol. 11, No. 4 , 1981, pp.507-518.
147. A. A. Ramezaniapour, Engineering Properties of Mortars and Concretes Made with OPC and Trass-OPC, *Journal of Science and Technology*, Vol. 2, No. 8, 1987, pp
148. J.E. Ujhelyi, A.J. Ibrahim, Hot weather Concrete With Hydraulic Additives, *Cement and Concrete Research*, Vol. 21, No. 2-3, 1991, pp.345-354.
149. M. S. Akman, F. Mazlum, and F. Esenli, A Comparative Study of Natural Pozzolans Used in Blended Cement Production, *Fourth International*

Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans and Natural Pozzolans in Concrete, ACI-SP, Vol. 132, No. 27, 1992, pp.471-494.

150. V.F. Rahhal, O.R. Batic, Mineral Admixtures Contribution to the Development of Heat of Hydration and Strength, *Cement, Concrete and Aggregates*, Vol. 16, No. 2, 1994, pp.150-158.
151. M. Jamal Shannag, A. Yeginobali, Properties of Pastes, Mortars and Concretes Containing Natural Pozzolan, *Cement and Concrete Research*, Vol. 25, No.3, 1995, pp.647-657.
152. K. Erdobdu, M. Tokyay, H. Öztürk, Effects of Pozzolanic Additions on Grindability and Strength of Pozzolanic Cements with Different Fineness Values, *Proceeding of the Fourth International Conference : Concrete Technology for Developing Countries, Eastern Mediterranean University, North Cyprus*, 7-8 Nov. 1996, pp. 120-129.
153. L. Turanli, T.Y. Ecdogan, Investigation on the Effects of Natural Pozzolan Addition on Compressive Strength of Portland-Pozzolan Cement, *Proceeding of the Fourth International Conference : Concrete Technology for Developing Countries, Eastern Mediterranean University, North Cyprus*, 7-8 Nov. 1996, pp. 169-176.
154. C.C. Videla, J.P.T. Covarrubias, J.M.D. Pascual, Behaviour In Extreme Climates of Concrete Made With Different Types of Cement, *Proceeding of the International Concrete on Appropriate Concrete Technology Extreme Climates*, University of Dundee, UK, 1996, pp.213-224.
155. A. Tagnit-Hamou, N. Petrov, K. Luke, Properties of Concrete Containing Diatomaceous Earth, *ACI Material Journal*, Vol. 100, No. 1, 2003, pp. 73-78.
156. M. Khandaker, A. Hossain, Properties of Volcanic Pumice Based Cement and Lightweight Concrete, *Cement Concrete Research*, Vol. 34, No. 2, 2004, pp. 283–291.
157. S. Targan,, A. Olgun, Y. Erdotgan, V. Sevinc, Influence of Natural Pozzolan, Colemanite Ore Waste, Bottom Ash, and Fly Ash on the Properties of Portland Cement, *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, No. 8, 2003, pp.1175-1182.
158. M. Davraz, L. Gunduz , Engineering Properties of Amorphous Silica as a New Natural Pozzolan for Use in Concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol. 35, No.7, 2005, pp.1251-1261.
159. F. Massazza, Pozzolanic Cements: An answer to durability Problems, *Proceeding of the Third NCB International Seminar on Cement and Building Materials*, Vol. 4, New Delhi, 1991, pp.13-27.
160. G. Christodoulou, A Comparative Study of the Effects of Silica Fume, Metakaolin and PFA on the Air Content of Fresh Concrete, *Young*

Researchers Forum, Society of Chemical Industry Construction Materials Group, London, UK, 2000, 17p.

161. Y.N. Sammy, J. Chan Xihuang, Comparative Study of the Initial Surface Absorption and Chloride Diffusion of High Performance Zeolite, Silica Fume And PFA Concretes, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 21, No. 4 , 1999, pp.293-300.
162. L. Turanli, B. Uzal, F. Bektas, Effect of Large Amounts of Natural Pozzolan Addition on Properties of Blended Cements, *Cement and Concrete Research*, Vol. 35, No. 6, 2005, pp.1106-1111.
163. L. Turanli, B. Uzal, F. Bektas, Effect of Material Characteristics on The Properties of Blended Cements Containing High Volumes of Natural Pozzolans, *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, No. 12, 2004, pp.2277-2282.
164. M. Ghrici, S. Kenai, E. Meziane, Mechanical and Durability Properties of Cement Mortar with Algerian Natural Pozzolana, *Journal of Materials Science*, Vol. 41, No. 21, 2006, pp.6965-6972.
165. B.Y. Pekmezci, S. Akyuz, Optimum Usage of a Natural Pozzolan for the Maximum Compressive Strength of Concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, No. 12, 2004, pp.2175-2179.
166. M. Jamal Shannagt, A. Yeginobali, Properties of Pastes, Mortars and Concretes Containing Natural Pozzolan, *Cement and Concrete Research*, Vol. 25, No. 3, 1995, pp.647-657.
167. Ş. Yetgin, A. Çavdar, Study of Effects of Natural Pozzolan on Properties of Cement Mortars, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 18, No. 6, 2006, pp.813-816.
168. T.K. Erdem, C. Meral, M. Tokyay, T.Y. Erdogan, Use of Perlite as A Pozzolanic Addition in Producing Blended Cements, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 29, No. 1, 2007, pp.13-21.
169. S. Targana, A. Olgunb, Y. Erdoganb, V. Sevincc, Influence of Natural Pozzolan, Colemanite Ore Waste, Bottom Ash, And Fly Ash on The Properties of Portland Cement, *Cement and Concrete Research* Vol. 33, No. 8, 2003, pp.1175-1182.
170. B. Yilmaza, A. Ucarb, B. Oteyakab, V. Uza, Properties of Zeolitic Tuff (Clinoptilolite) Blended Portland Cement, *Building and Environment*, Vol. 42, No. 11, 2007, pp.3808-3815.
171. B. Uzal, L. Turanli, Studies on Blended Cements Containing a High Volume of Natural Pozzolans, *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, No. 11 2003, pp.1777-1781.

172. B. Ozer, M. Hulusi Ozkul, The Influence of Initial Water Curing on the Strength Development of Ordinary Portland and Pozzolanic Cement Concretes, *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, No. 1, 2004, pp.13-18.
173. S.K. Antiohos, S. Tsimas, A Novel Way to Upgrade the Coarse Part of a High Calcium Fly Ash for Reuse Into Cement Systems, *Waste Management*, Vol. 27, No. 5, 2007, pp.675-683.
174. C.S. Poon, L. Lam, Y.L. Wong, A Study on High Strength Concrete Prepared With Large Volumes of Low Calcium Fly Ash, *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, No. 3, 2000, pp.447-455.
175. A. Oner, T S. Akyuz, R. Yildiz, An Experimental Study on Strength Development of Concrete Containing Fly Ash and Optimum Usage of Fly Ash in Concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol. 35, No. 6, 2005, pp.1165-1171.
176. M.J. McCarthy, R.K. Dhir, Development of High Volume Fly Ash Cements for Use in Concrete Construction, *Fuel*, Vol. 84, No. 11, 2005, pp.1423-1432.
177. A. Bilodeau, V. Sivasundaram, K. E. Painter, V. M. Malhotra, Durability of Concrete Incorporating High Volumes of Fly Ash from Sources in the U.S., *ACI Material Journal*, Vol. 91, No.1, 1994, pp.3-12.
178. A. A. Ramezaniapour, V. M. Malhotra, Effect of Curing on the Compressive Strength, Resistance to Chloride-Ion Penetration and Porosity, of Concretes Incorporating Slag, Fly Ash or Silica Fume, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 17, No. 2, 1995, pp. 125-133.
179. R. Siddique, Effect of fine aggregate replacement with Class F fly ash on the mechanical properties of concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, No. 4, 2003, pp.539-547.
180. M. K. Gopalan, Efficiency, Skin Strength and Sorptivity of Fly Ash Concretes, *Materials and Structures*, Vol. 28, No. 4, 1995, pp.235-240.
181. Y-S. Yoon, J-P. Won, S-K. Woo, Y-C. Song, Enhanced Durability Performance of Fly Ash Concrete for Concrete-Faced Rockfill Dam Application, *Cement and Concrete Research*, Vol. 32, No. 1, 2002, pp.23-30.
182. P. Chindaprasirt, S. Homwuttiwong, V. Sirivivatnanonc Influence of Fly Ash Fineness on Strength, Drying Shrinkage and Sulfate Resistance of Blended Cement Mortar, *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, No.7, 2004, pp.1087-1092.
183. P. Chindaprasirt, C. Chotithanorn, H.T. Cao, V. Sirivivatnanon, Influence of Fly Ash Fineness on The Chloride Penetration of Concrete, *Construction and Building Materials*, Vo. 21, No. 2, 2007, pp.356-361.

184. I. Elkhadiria, A. Diouria, A. Boukharia, J. Arideb, F. Puertasc, Mechanical Behaviour of Various Mortars made by Combined Fly Ash and Limestone in Moroccan Portland Cement, *Cement and Concrete Research*, Vol. 32, No. 10, 2002, pp.1597-1603.
185. T. R. Naik, S. Singh, B. Ramme, Mechanical Properties and Durability of Concrete Made with Blended Fly Ash, *ACI Materials Journal*, Vol. 95, No. 4, 1998, pp.454-462.
186. N. Bouzoubaâ, B. Fournier, V.M. Malhotra, D.M. Golden, Mechanical Properties and Durability of Concrete Made with High-Volume Fly Ash Blended Cement Produced in Cement Plant, *ACI Materials Journal*, Vol. 99, No. 6, 2002, pp.560-567.
187. N. Bouzoubaa, B. Fournier, Optimization of Fly Ash Content In Concrete Part I: Non-Air-Entrained Concrete Made Without Superplasticizer, *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, No. 7, 2003, pp.1029-1037.
188. R. Siddique, Performance Characteristics of High-Volume Class F Fly Ash Concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, No. 3, 2004, pp.487-493.
189. L.H. Jiang, V.M. Malhotra, Reduction in Water Demand of Non-Air-Entrained Concrete Incorporating Large Volumes of Fly Ash, *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, No. 11, 2000 pp.-785-1789.
190. I.B. Topc, M. Saridemir, Prediction of Compressive Strength of Concrete Containing Fly Ash using Artificial Neural Networks and Fuzzy Logic, *Computational Materials Science*, Vol. 41, No. 3, 2008, pp.305-311.
191. C. S. Peon, Y. L. Wong, L. Lam, The Influence of Different Curing Conditions on the Pore Structure and Related Properties of Fly-Ash Cement Pastes and Mortars, *Construction and Building Materials*, Vol. 11, No.7-8.1997, pp.383-393.
192. B. Kumar, G. K. Tike, P. K. Nanda, Evaluation of Properties of High-Volume Fly-Ash Concrete for Pavements, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 19, No. 10, 2007, pp.906-911.
193. S.K. Antiohos, V.G. Papadakis, E. Chaniotakis, S. Tsimas, Improving the Performance of Ternary Blended Cements by Mixing Different Types of Fly Ashes, *Cement and Concrete Research*, Vol. 37, No. 6, 2007, pp.877-885.
194. K. Hwang, T. Noguch, F. Tomosawa, Prediction Model of Compressive Strength Development of Fly-Ash Concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, No. 12, 2004, pp.2269-2276.
195. J. Chai, K. Kraiwood, S. Vanchai, L. Theerarach, Use of Ground Coarse Fly Ash as a Replacement of Condensed Silica Fume in Producing High-Strength Concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol.34, No. 4, 2004, pp.549-555.

196. F. Burak, Utilisation of Turkish Fly Ashes in Cost Effective HVFA Concrete Production, *Fuel*, Vol. 85, No. 12-13, 2006, pp.1944-1949.
197. L. Lam, Y. L. Wong, C.S. Poon, Effect of Fly Ash and Silica Fume on Compressive and Fracture Behaviours of Concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol. 28, No. 2, 1998, pp.271-283.
198. N. J. Gardner, Effect of Temperature on the Early-Age Properties of Type I, Type III, and Type I/Fly Ash Concretes, *ACI Material Journal*, Vol. 85, No. 1, 1990, pp.68-78.
199. Y. Maltais, J. Marchand, Influence of Curing Temperature on Cement Hydration and Mechanical Strength Development of Fly Ash Mortars, *Cement and Concrete Research*, Vol. 27, No. 7, 1997, pp.1009-1020.
200. V. Sivaundaram, G.G. Carette, Properties of Concrete Incorporating Low Quantity of Cement and High Volume of Low-Calcuim Fly Ash, *Third International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolan in Concrete*, ACI-SP, Vol. 114, No.2, 1989, pp.45-72.
201. R. Sri Ravindrarajah, C. T.Tam, Properties of Concrete Containing Low-Calcium Fly Ash under Hot and Humid Climate, *Third International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolan in Concrete*, ACI-SP, Vol. 114, No.6, 1989, pp.139-155.
202. S. H. Gebler P. Klieger, Effect of Fly Ash on Physical Properties of Concrete, *Second International Conference on the Use of Fly Ash, Silica. Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete*, ACI-SP, Vol. 91, No.1, 1989, pp.1-50.
203. R. V. Raymundo, Effect of Temperature on the Properties of Mortars and Super-plasticized Concrete Congaing Low-Calcium Fly Ash, *Second International Conference on the Use of Fly Ash, Silica. Fume, Slag and Natural Pozzolan in Concrete*, ACI-SP, Vol. 91, No.9, 1989, pp.139-155.
204. T. R. Naik, S.S. Singh, M. M. Houssain, Permeability of Concrete Containing Large Amounts of Fly Ash, *Cement and Concrete Research*, Vol. 24, No. 5, 1994, pp.913-922.
205. T. R. Naik, S.S. Singh, and B. Ramme, Effect of Source and Amount of Fly Ash on Mechanical and Durability Properties of Concrete, *Fourth CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete*, ACI-SP, Vol. 170, No. 8, 1997, pp. 156-188.
206. N. Kawaguchi, K. Kohono. Y. Kawaguchi, K. Kohno, Y. Kurose and T. Bakosgi, Investigations on Durability of High-Volume Fly Ash Concrete, *Fourth CANMET/ACI/JCI Conference: Advances in Concrete Technology*, ACI-SP, Vol. 179, No. 42, 1998, pp.715-730.
207. A. Borsoi, S. Collepari, L. Coppola, R. Troli, and M. Collepari, Effest of Superplasticizer Type on Performance of High-Volume Fly Ash Concrete,

Sixth CANMET/ACI Conference on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete, ACI-SP, Vol. 195, No. 2, 2000, pp. 17-27.

208. C. Muller, R. Hardti, P. Schiessl, High-Performance Concrete with Fly Ash, Third CANMET/ACI International Symposium on Advances in Concrete Technology, ACI-SP, Vol. 171, No.7, 1997, pp.173-200.
209. T.R. Naik, B. W. Ramme, J. H. Tews, Use of High Volumes of Class C and Class F Fly Ash in Concrete, *Cement, Concrete and Aggregates*, Vol. 16, No. 1, 1994, pp.12-20.
210. M. K. Gopalan, M.N. Haque, Effect of Curing Regime on the Properties of Fly Ash Concrete, *ACI Material Journal*, Vol. 84, No. 1, 1997, pp.14-19.
211. S. Antiohos, K. Maganari, S. Tsimas, Evaluation of Blends of High and Low Calcium Fly Ashes for Use as Supplementary Cementing Materials, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 27, No. 3, 2005, pp.349-356.
212. J-H. Wu, X-C. Pu, F. Liu, C. Wang, High Performance Concrete with High Volume Fly Ash, *Key Engineering Materials*, Vol. 302-303, 2006, pp.470-447.
213. V. Sivasundaram, G.G. Garette, V. M. Malhotra, Mechanical Properties, Creep, and resistance to Diffusion of Chloride Ions of Concretes Incorporating High Volumes of ASTM Class F Fly Ashes From Seven Different Sources, *ACI Material Journal*, Vol. 88, No. 4, 1991, pp.407-416.
214. R. N Swamy, H. B. Mahmud, Mix Proportions and Strength Characteristics of Concrete Containing 50 Percent Low-Calcium Fly Ash, *Second International Conference on the Use of Fly Ash, Silica. Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete*, ACI-SP, Vol. 91, No. 19, 1986, pp.413-432.
215. C. Bilim, C.D. Atis, H. Tanyildizi, O. Karahan, Predicting the compressive strength of ground granulated blast furnace slag concrete using artificial neural network, *Advances in Engineering Software*, Vol. 40, No. 5, 2009, pp.334-340.
216. R J. Detwiler, P.K. Mehta, Chemical and Physical Effects of Silica Fume on the Mechanical Behaviour of Concrete, *ACI Material Journal*, Vol. 86, No. 6, 1989, pp.609-614.
217. Y.N.C. Sammy, J. Xihuang, Comparative Study of the Initial Surface Absorption and Chloride Diffusion of High Performance Zeolite, Silica Fume and PFA Concretes, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 21, No. 3, 1999, pp.293-300.
218. C.S. Poon, S.C. Kou, L. Lam, Compressive Strength, Chloride Diffusivity and Pore Structure of High Performance Metakaolin and Silica Fume Concrete, *Construction and Building Materials*, Vol. 20, No. 10, 2006, pp.858-865.

219. M.F.M. Zain, Md. Safiuddin H. Mahmud, Development of High Performance Concrete Using Silica Fume at Relatively High Water/Binder Ratios, *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, No. 9, 2000, pp.1501-1505.
220. A. A. Ramezaniapour, Effect of Curing on the Compressive Strength, Resistance to Chloride-Ion Penetration and Porosity of Concretes Incorporating Slag, Fly Ash or Silica Fume, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 17, No. 2, 1995, pp.125-133.
221. L. Lam, Y. L. Wong, C.S Poon, Effect of Fly Ash and Silica Fume on Compressive and Fractures Behaviours of Concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol. 28, No. 2, 1998, pp.271-283.
222. M. Mazloom, A.A. Ramezaniapour, J.J. Brooks, Effect of Silica Fume on Mechanical Properties of High-Strength Concrete, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 26, No. 4, 2004, 347-357.
223. R Gagné, A. Boisvert, M. Pigeon, Effect of Superplasticizer Dosage on Mechanical Properties, Permeability, and Freeze-Thaw Durability of High-Strength Concrete With and Without Silica Fume, *ACI Material Journal*, Vol. 93, No. 2, 1996.
224. M.H. Zhang, C.T. Tam, M.P. Leow, Effect of Water-to-Cementitious Materials Ratio and Silica Fume on the Autogenous Shrinkage of Concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, No. 10, 2003, pp.1687-1694.
225. H.S. Wong, H. Abdul Razak, Efficiency of Calcined Kaolin and Silica Fume as Cement Replacement Material for Strength Performance, *Cement and Concrete Research*, Vol. 35, No. 4, 2005, pp.696-702.
226. Vagelis G. Papadakis, Experimental Investigation and Theoretical Modelling of Silica Fume Activity in Concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol. 29, No. 1, 1999, pp.79-86.
227. S. Wild, B.B. Sabir, J.M. Khatib, Factors Influencing Strength Development of Concrete Containing Silica Fume, *Cement and Concrete Research*, Vol. 25, No. 7, 1995, pp. 1567-1580.
228. C.D. Atis, F. O Zcan, A. Kılıc, O. Karahan, C. Bilim, M.H. Severcan, Influence of Dry and Wet Curing Conditions on Compressive Strength of Silica Fume Concrete, *Building and Environment*, Vol. 40, No. 12, 2005, pp.1678-1683.
229. S. Bhanjaa, B. Sengupta, Influence of Silica Fume on The Tensile Strength of Concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol. 35, No. 4, 2005, pp.743-747.
230. S. Bhanja, B. Sengupt, Investigations on the Compressive Strength of Silica Fume Concrete using Statistical Methods, *Cement and Concrete Research*, Vol. 32, No. 9, 2002, pp.1391-1394.

231. G. Appa Rao, Investigations on The Performance of Silica Fume-Incorporated Cement Pastes and Mortars, *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, No. 11, 2003, pp.1765-1770.
232. B. B. Sabir, Mechanical Properties and Frost Resistance of Silica Fume Concrete, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 19, No. 4, 1997, pp.285-294.
233. S. L. Mak, K. Toriit, Strength Development of High Strength Concretes With and Without Silica Fume under the Influence of High Hydration Temperatures, *Cement and Concrete Research*, Vol. 25, No. 8, 1995, pp.1791-1802.
234. S.A. Khedr, M.N. Abou-Zeid, Characteristics of Silica-Fume Concrete, *Journal of Material in Civil Engineering*, Vol. 6, No. 3, 1994.
235. V.M. Malhotra, Mechanical Properties, and Freezing and Thawing Resistance of Non Air-Entrained and Air-Entrained Condensed Silica-Fume Concrete Using ASTM Test C 666, Procedures A and B, *Second International Conference on the Use of Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete*, ACI-SP, Vol. 91, No. 53, 1986, pp.1069-1094.
236. P. A. Jahren, Performance of Concrete Incorporating Condensed Silica Fume and Superplasticizers, *Second International Conference on the Use of Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete*, ACI-SP, Vol. 91, No. 41, 1991, pp.896-892.
237. A. Bilodeau, G.G. Carette, Resistance of Condensed Silica Fume Concrete to the Combined Action of Freezing and Thawing Cycling and De-Icing Salts, *Third International Conference on the Use of Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolan in Concrete*, ACI-SP, Vol. 114, No. 47, 1989, pp.945-970.
238. T. Yamato, Y. Emoto, M. Soeda, Strength and Freezing and Thawing Resistance of Concrete Incorporating Condensed Silica Fume, *Second International Conference on the Use of Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete*, ACI-SP, Vol. 91, No. 54, 199, pp.1095-1117.
239. H. A. Toutanji, Z. Bayasi, Effect of Curing Procedures on Properties of Silica Fume Concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol. 29, No. 4, 1999, pp.497-501.
240. S-T. Yi, E-I. Yang, J-C. Choi, Effect of Specimen Sizes, Specimen Shapes, and Placement Directions on Compressive Strength of Concrete, *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 236, No. 2, 2006, pp.115-127.
241. DELPHI 7 *Developer's Guide*, Borland Software Corporation, USA, 2002, 1106p.
242. PARADOX 7. *Relationnel Database*, Corel Corporation, Canada, 1998.

243. G. Dreyfus, J.M. Martinez, M. Samuelides, M.B. Gordon, F. Badran, S. Thiria, L. Hérault, *Réseaux de Neurones : Méthodologie et Application*, Ed. Eyrolles, 2002, 386p.
244. R. Hecht-Nielsen, Theory of the Backpropagation Neural Network, *Neural network for Perception: Computation, Learning, Architectures*, Vol. 2, 1992, pp.65-93.
245. H. Geoffrey, Apprentissage et Réseaux de Neurones, *Pour la Science*, Vol. 181, 1992, pp.124-132.
246. C.M. Bishop, Neural Networks and their Applications, *Review of Scientific Instruments*, Vol. 65, No. 6, 1994, pp.1803-1832.
247. I. T. Jolliffe, Principal Component Analysis, *Second Ed.*, New York: Springer-Verlag, 2002, 486p.
248. K. Pearson, On Lines and Planes of Closest Fit to Systems of Points in Space, *Philosophical Magazine*, Series 6, No. 2, 1901, pp.559-572.
249. K. Kuźniar, Z. Waszczyszyn, Neural Networks and Principal Component Analysis for Identification of Building Natural Periods, *Journal of Computing in Civil Engineering*, Vol. 20, No. 6, 2006, pp. 431-436.
250. S.W. Shin, C.B. Yun, H. Futura, J.S. Popovics, Non-destructive Evaluation of Crack Depth in Concrete Using PCA-compressed Wave Transmission Function and Neural Networks, *Experimental Mechanics*, Vol. 48, No. 2, 2007, pp.225-231.
251. F.H. Bellamine, A. Elkamel, Model Order Reduction using Neural Network Principal Component Analysis and Generalized Dimensional Analysis, *Engineering Computations*, Vol. 25, No. 5, 2008, pp.443-463.
252. M.S. Junita, S.H. Brian, Improved Neural Network Performance Using Principal Component Analysis on MATLAB, *International Journal of the Computer, the Internet and Management*, Vol. 16, No. 2, 2008, pp.1-8.
253. S. Valle, L. Weihua, S.J. Qin, Selection of the Number of Principal Components: the Variance of the Reconstruction Error Criterion with a Comparison to other Methods, *Industrial and Engineering Chemistry Research*, Vol. 38, No. 11, 1999, pp. 4389-4401.
254. Neural Network for user with MATLAB Version 7.5, *The Math Works, Inc., Prentice Hall*, 2007.
255. D.J.C. MacKay, Bayesian interpolation, *Neural Computation*, Vol. 4, No. 3, 1992, pp. 415-447.

256. STATISTICA Version 7, User's Guide, *Stat Soft France, 2004, Electronic Text Book*: <http://www.statsoft.com/textbook/esc.html>
257. A. Astroun, M. B. Bouiaddjra, H. Trouaine, Influence des Ajouts Cimentaires sur le Comportement des Bétons, XXIII^{èmes} Rencontres Universitaires de Génie Civil - Risque & Environnement -, Grenoble les 26 & 27 mai 2005, 8 p.
258. B. Boukhatem, M. Ghrici, S. Kenai, A. Tagnit-Hamou, Principal Component Analysis and Neural Networks for Predicting the Properties of Blended Concrete, *Accepted for publication in Advances in Engineering Software*, 2010.
259. I. A. Smith, The Design of Fly Ash Concretes, *Proceedings of the Institute of Civil Engineers*, London, 1967, pp.769-790.
260. E. J. Sellevold, F. F. Radjy, Condensed Silica Fumes (Microsilica) in Concrete: Water Demand and Strength Development, *First International Conference on the Use of Fly ash, Silica Fume, Slag, and Others minerals By-Products in Concrete*, ACI-SP, Vol. 79, No. 35, 1983, pp.677-694.
261. M. Maage, Efficiency Factors for Condensed Silica Fume in Concrete, *Third International Conference on the Use of Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolanes in Concrete*, ACI-SP, Vol. 114, No. 37, 1989, pp.783-798.
262. P. Schiessl, R. Hardtl, Efficiency of Fly Ash in Concrete: Evaluation of Test Results, *Technical Report of Institute Für Bauforschung, RWTH, Aachen*, 1991.
263. R. C. Sharma, N. K. Join et S. N. Ghosh, Semi-Theoretical Method for the Assessment of Reactivity of Fly Ash , *Cement and Concrete Research*, Vol. 23, No.1, 1993, pp.41-45.
264. M. Cyr, Ph. Lawrence, E. Ringot, A. Carles-Gibergues, Variation des Facteurs d'Efficacité Caractérisant les Additions Minérales, *Material and Structures*, Vol. 33, No. 7, 2000, pp.466-72.
265. K. G. Babu, G. S. N. Rao, P. V. S. Prakash, Efficiency of pozzolans in cement composites, *Proceedings, Concrete 2000 Economic and Durable Construction through Excellence*, University of Dundee, UK, Vol. 1, Sep. 1993, pp. 497-509.
266. K. G. Babu, P. V. Surya Prakash, Efficiency of Silica Fume in Concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol. 25, No. 6, 1995, pp.1273-1283.
267. K. G. Babu, G. S. Nageswara Rao, Efficiency of Fly Ash in Concrete with Age, *Cement and Concrete Research*, Vol. 26, No. 3, 1996, pp.465-474.
268. K. G. Babu, V. Sree Rama Kumar, Efficiency of GGBS in Concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, No. 6, 2000, pp.1031-1036

269. Ph. Lawrence, E. Ringo, Prise en Compte des Addition Minérales dans le Calcul des Résistances de Mortier : Application aux Mortiers de Cendres Volantes, *Revue Française de Génie Civil*, Vol. 4, No. 4, 2000, pp.525-542.
270. M. Neville, Properties of Concrete, *Fourth and Final Edition*, Addison Wesley Longman, England, 1996, 844p.
271. V. G. Papadakis, S. Tsmias, Supplementary Cementing Materials in Concrete Part I : Efficiency and Design, *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, No.10, 2002, pp.1525-1532.
272. V. G. Papadakis, Efficiency Factors (k-values) of Supplementary Cementing Materials Regarding Carbonation and Chloride Penetration, *Fifth CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete*, ACI-SP, Vol. 192, No. 11, 2002, pp. 173-187.
273. V. G. Papadakis, S. Antiohos, et S. Tsmias, Supplementary Cementing Materials in Concrete Part II: A fundamental Estimation of the Efficiency Factor, *Cement and Concrete Research*, Vol. 32, No. 10, 2002, pp.1533-1538.
274. J. Bijen, R. Van Selst, Cement Equivalence Factor for Fly Ash, *Cement and Concrete Research*, Vol. 23, No.5, 1993, pp.1029-1039.
275. A. Hazzabalalah, T. H. Wenwel, A strength Definition of the Water to Cement Material Ratio, *Fifth CANMET/ACI International Conference on the Use of Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete*, ACI-SP, Vol. 153, No. 24, 1995, pp.417-437.
276. ASTM C989-05, Standard Specification for Ground Granulated Blast-Furnace Slag for Use in Concrete and Mortars, Historical Standard, 2005, 5p.
277. R N. Swamy, A. Bouikni, Some Engineering Properties of Slag: its Development, Use and Future, *ACI Material Journal*, Vol. 87, No. 3, 1990, pp.210-220.
278. K. Ezziane, A. Bougara, A. Kassoul, E. Kadri, Determination of the Efficiency Coefficient of Slag Under Various Mixing and Curing Conditions, *Advances in Cement Research*, Vol. 18, No. 3, 2006, pp.103-110.
279. A. Bougara, E. Kadri, K. Ezziane, Efficiency of Granulated Blast Furnace Slag Replacement of Cement According to the Equivalent Binder Concept, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 32, No. 3, 2010, pp.226-231.
280. P. Jaren, Use of silica fumes concrete, *Fly Ash, Silica Fume, Slag and Other Mineral By-Products in Concrete*, ACI-SP, Vol. 79, No. 32, 1983, pp.625-642.
281. E. Badogiannis, V.G. Papadakis, E. Chaniotakis, S. Tsivili, Exploitation of Poor Greek Kaolins: Strength Development of Metakaolin Concrete and

- Evaluation by Means of k-value, *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, No. 6, 2004, pp.1035–1041.
282. H. S. Wong, H. Abdul Razak, Efficiency of Calcined Kaolin and Silica Fume as Cement Replacement Material for Strength Performance, *Cement and Concrete Research*, Vol. 35, No. 4, 2005, pp.696-702.
 283. B. Boukhatem, M. Ghrici, S. Kenai, A. Tagnit-Hamou, Prediction of the Efficiency of GGBFS in Concrete Using Artificial Neural Networks, *ACI Material Journal*, Vol. 108, No. 1, 2011, pp.55-63.
 284. B. Boukhatem, M. Ghrici, S. Kenai, A. Tagnit-Hamou, Prévision de l'efficacité des Cendres Volantes dans le Béton par l'Utilisation d'un Réseau de Neurones Artificiel, *XXVIII^{èmes} Rencontres Universitaires de Génie Civil*, La Bourboule du 2 au 4 juin, France, 2010, pp. 499-508.
 285. P.C. Aitcin, Sherbrooke Mix Design Method, *Proceedings: The One-Day Short Course on Concrete Technology and High-Performance Concrete: Properties and Durability*, University of Malaya, Kuala Lumpur, Malaysia, 1997, pp.28-63.
 286. D.A. Whiting, M.A. Nagi, Manual on Control of Air Content in Concrete, *Portland Cement Publication*, , *Spanish publication*, Item Code: EB116, 1998.
 287. B. Boukhatem, S. Kenai, A. Tagnit-Hamou, M. Ghrici, Development of a Computer Integrated Knowledge System for Concrete with Additives, *14th World Multi-Conference on Systemics, Cybernetics and Informatics: WMSCI*, June 29th - July 2nd, Orlando, Florida, USA, 2010. 14p.