

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Hassiba Ben Bouali de Chlef



(Faculté de Sciences et Sciences de l'Ingénieur)
(Département de Génie Civil)

Mémoire

En vue de l'obtention du
Diplôme de **Magister**
Spécialité: **Génie civil**
Option: **Géomatériaux**

Présenté par:

Mr: **MENAD MOHAMED**

Ingénieur en Génie Civil

Thème

**Modélisation de la prévision de la résistance en compression des
bétons à base de pouzzolanes.**

Soutenu le devant les membres de jury:

Khélifa HARICHANE	Maitre de Conférences (A), UHB de Chlef	Président
Mohamed GHRICI	Professeur, UHB de Chlef	Encadreur
Karim EZZIANE	Professeur, UHB de Chlef	Examineur
Tahar HASSANE-DAOUDJI	Maitre de Conférences (A), UHB de Tiaret	Examineur
Ahmed HALLAL	Maitre de Conférences (B), UHB de Chlef	Examineur

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier vivement en premier lieu mon Professeur Ghrici Mohamed pour m'avoir transmis de précieuses connaissances en géomatériaux et pour m'avoir conseillé et guidé avec bienveillance tout au long de ce travail.

Je voudrais remercier également Dr Khélifa HARICHANE, Maître de Conférences à l'Université Hassiba Ben-Bouali de Chlef, d'avoir accepté de présider le jury d'examen.

Je tiens à remercier aussi et à exprimer toute ma gratitude à Mr Karim EZZIANE, Professeur à l'Université de Chlef et Mr Tahar HASSANE DAOUDJI, Maître de Conférences (A) à l'Université de Tiaret et Mr Ahmed HALLAL, Maître de Conférences (B) à l'Université de Chlef, pour avoir accepté d'examiner avec toute l'attention voulue le présent travail.

Je tiens aussi à exprimer mes sincères remerciements à l'ensemble des enseignants du Département de Génie Civil à l'Université Hassiba Ben Bouali de Chlef et en particulier les enseignants de post graduation qui ont contribué à ma formation de Magister.

Je voudrais témoigner toute ma reconnaissance aux personnels du département de génie civil qui ont contribué d'une manière ou d'une autre à la réussite de cette thèse.

Un remerciement très particulier aux personnels du laboratoire de génie civil et d'hydraulique.

Je remercie très chaleureusement tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin à réaliser ce travail.

Je n'oublie pas mes collègues, je ne peux pas les nommer tous, je souhaite qu'ils trouvent ici toute ma reconnaissance.

Je remercie toute ma famille pour son soutien.

Résumé

Actuellement les ajouts cimentaires sont utilisés presque dans toutes les cimenteries algériennes. Ces cimenteries utilisent ces ajouts en se basant uniquement sur des essais de contrôle courants et aucune étude détaillée sur le développement des résistances mécaniques des bétons à base de ces ajouts tenant en compte de l'environnement local ne soit menée. ce thème de recherche propose, en première étape, de caractériser les ajouts cimentaires utilisés dans les cimenteries Algériennes. Cette étude est consacrée à l'élaboration des modèles mathématiques permettant l'évaluation de l'effet de la pouzzolane naturelle sur le développement de la résistance en compression des mortiers et bétons. La confrontation des résultats des modèles développés aux résultats expérimentaux et les résultats prédits par les modèles recommandés par le ACI-209 et le CEB-FIP montre clairement la fiabilité des modèles développés.

Mots clés : béton, pouzzolane naturelle, résistance en compressions,prévision, modélisation.

Abstract

Currently the mineral admixtures are used almost in all Algerian cement factories. These cement plants use these additions based only on tests of control currents without a detailed study on the development of mechanical strength of concreteis conducted. This research offers the first step to characterize the cement additives used in cement plants in Algeria. This study is devoted to the development of mathematical models for evaluating the effect of natural pozzolan on the development of compressive strength of mortars and concretes. Comparison of the results of the proposed models at the experimental results and the results predicted by the models recommended by the ACI-209 and the CEB - FIP clearly shows the reliability of the developed models.

Keywords: concrete, natural pozzolan, compression strength,prevision, modeling.

ملخص

نستعمل إضافات الاسمنت في كل مصانع الاسمنت فالجزائر , تستعمل هذه المصانع لهذه الإضافات مستندة فقط على المراقبة الحديثة دون دراسة مفصلة لتطورات المقاومة الميكانيكية للخرسانة على أساس هذه الإضافات مع اخذ بعين الاعتبار البيئة المحلية. هذا البحث يقدم الخطوة الأولى لتوصيف المواد الإضافية المستعملة في مصانع الاسمنت الجزائرية. تخص هذه الدراسة تطوير نماذج رياضية تسمح بتقييم البوزولان الطبيعي على تطوير مقاومة الانضغاط للملاط والخرسانة. مقارنة نتائج النماذج المطورة مع النتائج التجريبية ونماذج ACI-209 و CEB-FIP توضح استغلال النماذج المطورة.

TABLE DES MATIERES

Liste des figures

Liste des tableaux

INTRODUCTION GENERALE

Généralités	2
But de travail.....	3
Plan de travail	3

CHAPITRE I

Etude bibliographiques sur les propriétés des bétons avec ajout

1.1 Introduction.....	5
1-2 Constituants et spécifications du ciment.....	5
1.2.1 Composition chimique du ciment.....	5
1.2.2 Composition minéralogique du ciment.....	6
1.2.3 Propriétés du ciment portland.....	6
1.2.4 Classification et spécification des ciments.....	7
1.3 Hydratation des ciments.....	8
1.3.1 Conséquences de l'hydratation.....	10
1.3.1.1 Exotherme des réactions d'hydratations.....	10
1.3.1.2 Le retrait endogène.....	10
1.3.1.3 Evolution des caractéristiques mécaniques.....	11
1.4 Ajouts cimentaires	12
1.4.1. Classification des ajouts cimentaires.....	12
1.4.2 L'intérêt de l'utilisation des ajouts minéraux	13
1.4.3 L'utilisation des ajouts en Algérie	14

1.5 Paramètres influençant la résistance du béton	15
1.5.1 Effet de la composition du béton.....	15
1.5.1.1 Dosage en ciment et du dosage en eau (rapport C/E).....	15
1.5.1.2 Effet de la granularité.....	15
1.5.1.3 Processus de malaxage du béton.....	17
1.5.1.4 Processus de malaxage du béton.....	17
1.5.1.4.1 Effet de la fume de silice.....	17
1.5.1.4.2 Effet des cendres volantes.....	20
1.5.1.4.3 Effet du métakaolin.....	21
1.5.1.4.4 Effet du laitier.....	22
1.5.1.4.5 Effet de la pouzzolane naturelle.....	24
1.5.1.4.6 Effet du calcaire.....	27
1.5.2 Effet de l'environnement.....	28
1.5.2.1 Effet de la température.....	28
1.5.2.2 Effet de l'hygrométrie.....	29
1.5.3 Effet de l'âge	31
1.6 Conclusion	32

CHAPITRE 2

Synthèse des modèles proposés par différents chercheurs

2.1 Introduction.....	34
2.2 Prévision de la résistance du béton sans ajout.....	34

2.2.1	Modèle de Popovics (1985)	34
2.2.2	Modèle de Popovics (1990)	36
2.3	Prévision de la résistance à base des cendres volantes.....	37
2.3.1	Modèle de Slanicka (1991).....	37
2.3.2	Modèle de Hwang et al (2004).....	39
3.4	Prévision de la résistance à base de la fumée de silice.....	40
2.4.1	Modèle de Slanicka (1991).....	40
2.4.2	Modèle de Duval et Kadri.....	41
2.4.3	Modèle de Bhanja et Sengupta.....	43
2.5	Prévision de la résistance à base de laitier.....	45
2.5.1	Modèle De Larrard.....	45
2.6	Prévision de la résistance à base de calcaire.....	46
2.6.1	Modèle de Bentz et al.....	46
2.7	Conclusion.....	47

CHAPITRE 3

Elaboration d'un modèle de prévision de la résistance à la compression

3.1	Introduction	49
3.2	Modèle de résistance en compression.....	49
3.2.1	Le rapport eau –liant.....	49
3.2.2	Effet du dosage en ajout cimentaire.....	51

3.2.3 Effet de l'âge.....	52
3.3 Elaboration d'un modèle de prévision de la résistance à la compression avec la pouzzolane naturelle.....	52
3.3.1 Forme générale du modèle.....	53
3.4 Données de base.....	53
3.5 Développement du modèle de résistance en compression	56
3.6 Domaine de validité du modélé	57
3.7 Etalonnage des modèles.....	58
3.8 Conclusion	62

CHAPITRE 4

Validation expérimentale

4.1 Introduction	64
4.2 Etude en laboratoire.....	64
4.2.1 Matériaux utilisés.....	64
4.2.1.1 Ciments	64
4.2.1.2 la pouzzolane naturelle.....	65
4.2.1.3 Granulats.....	65
4.2.1.4 Sable.....	65
4.2.1.5 Eau de gâchage.....	65
4.2.1.6 Superplastifiant.....	65
4.2.2 Matériel utilisé.....	65

4.2.3 Déroulement de l'essai.....	67
4.2.3.1 Formulation du béton.....	67
4.2.3.2 Environnement de conservation.....	67
4.2.3.4 Procédure d'essais.....	69
4.2.4 Présentation et analyse des résultats	69
4.3 Conclusion	82
Conclusions générales et recommandations	84
Références bibliographiques	87

Liste des tableaux

Tableau 1.1- Composition chimique du clinker.....	6
Tableau 1.2- Types de ciments et domaine d'application selon EN 197 1.....	7
Tableau 1.3- Spécifications mécaniques et Physiques des ciments selon EN 197 1	8
Tableau 1.4- Classification des ajouts selon leur réactivité.....	13
Tableau 1.5- Utilisation des ajouts dans les cimenteries algériennes.....	14
Tableau 1.6- Principales qualités des bétons en fonction de G/S et de granularité.....	16
Tableau 3.1- Organisation de la Base de Données du Modèle de la Prévion de la Résistance à la Compression du mortier à la pouzzolane	54
Tableau 3.2. Organisation de la Base de Données du Modèle de la prévision de la Résistance à la Compression du béton à la pouzzolane	55
Tableau 3.3 Valeurs maximales et minimales des paramètres du modèle pour la résistance du béton.....	57
Tableau 3.4 Valeurs maximales et minimales des paramètres du modèle pour la résistance du mortier	57
Tableau 4.1- Composition chimique du ciment et de la pouzzolane naturelle utilisés dans le programme expérimental.....	64
Tableau 4.2- Formulations des bétons utilisés pour la confection des éprouvettes.....	67
Tableau 4.3 Résistance à la compression des éprouvettes.....	69
Tableau 4.4- Comparaison des résultats de notre modèle avec les résultats des modèles recommandés par le ACI et le CEB-FIP pour "E/L=0,6"	73
Tableau 4.5- Comparaison des résultats de notre modèle avec les résultats des modèles recommandés par le ACI et le CEB-FIP pour "E/L=.....	74
Tableau 4.6- Comparaison des résultats de notre modèle avec les résultats des modèles recommandés par le ACI et le CEB-FIP pour "E/L=0,4"	75
Tableau 4.7- Comparaison des résultats de notre modèle avec les résultats expérimentaux de Ezziane et al.....	79
Tableau 4.8- Comparaison des résultats du modèle avec les Résultats de Hossain	80

Liste des figures

Figure 1.1- Evolution du degré d'hydratation et de la résistance à la compression d'un mortier en fonction du temps de maturation.....	11
Figure 1.2- Relation entre le module d'Young et la résistance à la compression des éprouvettes de bétons pour différents E/C.....	12
Figure 1.3- Influence du rapport E/C sur l'évolution de la résistance à la compression du béton	15
Figure. 1.4- Variation de la résistance en compression à 28 jours en fonction du rapport G/S.....	16
Figure 1.5- Relation entre la résistance à la compression et le dosage de la fumée de silice.....	17
Figure 1.6- Développement de la résistance des bétons avec fumée de silice pour différent rapport "eau/ liant".....	18
Figure 1.7- Développement de la résistance en fonction du pourcentage en fumée de silice.....	19
Figure 1.8- Evolution de la résistance à la compression du béton à base de cendres volantes en fonction de l'âge.....	20
Figure 1.9- Résistance à la compression en fonction du pourcentage des cendres volantes.....	20
Figure 1.10- Comparaison entre les résistances du béton contrôle et le béton avec laitier.....	23
Figure 1.11- Influence du mortier de ciment au laitier sur la résistance à la compression du béton	23
Figure 1.12- Influence du mortier de ciment au laitier sur la résistance à la compression du béton	24
Figure 1.13- Effet du temps de cure sur la résistance à la compression des cubes de mortier de ciment portland contenant de la pouzzolane naturelle après 28 jours.....	25
Figure 1.14- Effet de la finesse sur la résistance du béton avec la	

pouzzolane naturelle	26
Figure 1.15- Effet de la source sur la résistance à la compression de la pouzzolane naturelle.....	26
Figure 1.16- Effet du dosage de la pouzzolane naturelle sur la résistance à la compression du béton.....	27
Figure 1.17- Influence du dosage en calcaire sur la résistance à la compression du béton.....	28
Figure 1.18- Effet de la température sur la résistance du béton.....	29
Figure 1.19- Effet de l'humidité sur l'évolution de la résistance à la compression.....	30
Figure 1.20- Influence du mûrissement hygrométrique sur l'évolution de la résistance à la compression d'un béton ordinaire.....	30
Figure 1.21- Relation entre l'âge et la résistance à la compression du béton.....	31
Figure 3.1- Comparaison des résistances expérimentales et théoriques du béton en Pouzzolane naturelle.....	58
Figure 3.2- Comparaison des résistances expérimentales et théoriques du mortier en pouzzolane naturelle.....	59
Figure 3.3- Evolution de la résistance à la compression du béton en fonction du pourcentage en pouzzolane naturelle.....	60
Figure 3.4- Evolution de la résistance à la compression du mortier en fonction du pourcentage en pouzzolane naturelle.....	61
Figure 3.5- Evolution de la résistance à la compression du béton à base de laitier en fonction du rapport E/L pour différents âges.....	62
Figure 4.1- Malaxeur à béton.....	66
Figure 4.2- Presse hydraulique.....	66
Figure 4.3- Conservation des éprouvettes avant démoulage.....	68
Figure 4.4- Conservation des éprouvettes après démoulage.....	68
Figure 4.5- Variation de la résistance à la compression en fonction de l'âge et du pourcentage de la pouzzolane naturelle pour différents rapport E/L".....	70
Figure 4.6- Comparaison des résultats expérimentaux aux résultats prédites par différents modèles pour E/L =0,6.....	76

Figure 4.7- Comparaison des résultats expérimentaux aux résultats prédites par différents modèles pour $E/L = 0,5$	77
Figure 4.8- Comparaison des résultats expérimentaux aux résultats prédites par différents modèles pour $E/L = 0,4$	78
Figure 4.9- Résultats expérimentaux de Ezziane et al	81
Figure 4.10- Résultats expérimentaux de Hossain.....	81

INTRODUCTION GENERALE

Généralités

Le béton est le matériau de construction le plus utilisé, à quelques avantages sur d'autres bien connus des matériaux structuraux, tels que le faible coût de production, la facilité de la mise en œuvre et la durabilité dans les environnements agressives. Toutefois, l'impact environnemental négatif de l'industrie du béton, associé au processus de production de ciment Portland, est un problème qui doit être résolu.

La pouzzolane naturelle est un matériau pouzzolanique le plus déposé en Chine. Elle peut être facilement extraite et traitée. Il a été rapporté que la production annuelle est environ 1200 millions tonnes de ciment en Chine, plus de 20 % du ciment a été mélangé avec de la pouzzolane naturelle. Cet ajout est aussi largement utilisé comme un matériau de remplacement du ciment dans la production des éléments structuraux en béton. Béton à haute résistance (plus de 80 MPa). La pouzzolane naturelle traitée peut également être utilisé pour produire le béton cellulaire, à empêcher l'expansion du béton due à la réaction alcali-granulats et de contrôler la perte d'affaissement des bétons.

La résistance du béton est le paramètre le plus important pour apprécier la qualité du béton. Pour cette raison, plusieurs chercheurs ont développé des modèles empiriques, reliant la résistance du béton à des paramètres de formulation du béton, qui implique le choix des proportions constitutives qui auront comme conséquence sur certaines propriétés désirées. Parmi ces paramètres on cite les ajouts cimentaires qui ont été utilisés en se basant uniquement sur des essais de contrôle courants sans qu'une étude détaillée sur le développement des résistances mécaniques des bétons à base de ces ajouts tenant en compte de l'environnement local.

Depuis plusieurs années, le LCPC a entrepris de rénover les méthodes de composition des bétons et d'autres matériaux cimentaires. De nombreuses recherches ont été lancés pour élucider les liens exacts existants entre la nature et les proportions des constituants, d'une part, et les propriétés des mélanges obtenus d'autre part. En effet, le béton est un matériau dont le comportement est assez complexe et dépend d'une multitude de facteurs.

Ces études ont notamment abouti à la création de logiciels permettant la simulation et l'optimisation automatique des mélanges. Ces logiciels permettant d'une part de prévoir les propriétés physiques et mécaniques d'un béton dont on donne la composition.

Pour parvenir à compléter les modèles existants, il s'agit donc d'étudier l'influence de la pouzzolane naturelle dans le béton.

But de travail

Le but principal de cette étude est de développer un modèle de prévision de la résistance à la compression à base de la pouzzolane naturelle. L'étude vise à comparer les résultats expérimentaux sur la pouzzolane naturelle avec ceux du modèle proposé.

Plan de travail

Ce travail de recherche s'inscrit dans une logique qui vise à résoudre la problématique expliquée ci-dessus et de ce fait, il est présenté selon la manière suivante :

Une introduction générale est donnée au début. Dans le premier chapitre on présentera, en premier lieu, le ciment portland et son hydratation. Ensuite, les ajouts cimentaires. En fin, on présentera les effets des différents paramètres sur la résistance à la compression des bétons. Le deuxième chapitre est consacré à la présentation des modèles, proposés par les différents chercheurs, pour la prédiction de la résistance à la compression des bétons contenant des ajouts cimentaires. L'élaboration des modèles de prévision des résistances mécaniques des mortiers et bétons à base de pouzzolane naturelle fait l'objet du troisième chapitre. Dans le quatrième chapitre, on s'intéresse à la validation expérimentale des modèles élaborés dans le chapitre trois, ainsi, que la confrontation des résultats prédits par ces modèles aux résultats prédits par les modèles recommandés par le ACI-209 et le CEB-FIP. Enfin ce travail est achevé par une conclusion regroupant les principaux résultats de cette étude ainsi que des recommandations pour des futurs travaux.

Chapitre 1

Effets des ajouts cimentaires sur les propriétés des bétons

1.1 Introduction

Le béton a pu donner au bâtisseur un matériau ayant à la fois la particularité d'être caractérisé par sa mise en œuvre ou plus communément par son ouvrabilité à l'état frais et par sa résistance à l'état durci au sens large du mot. Pour des conditions de durabilité, les ajouts minéraux ont été utilisés largement depuis longtemps car, ils ont l'avantage de supporter les attaques chimiques des environnements très agressifs.

Dans ce chapitre, des définitions sur le ciment, sa fabrication, sa classification, son hydratation, ses propriétés physiques et mécaniques sont données. Puis l'intérêt des ajouts cimentaires et notamment l'effet de la pouzzolane naturelle sur les propriétés du ciment à l'état frais et durcis.

1.2 Constituants et spécifications du ciment

Le ciment est un liant hydraulique qui durcit tant à l'air que sous l'eau. Il est obtenu par broyage fin du clinker avec une quantité nécessaire de gypse et un / ou des ajout(s) minéraux actifs (ciment composé), faite simultanément ou par malaxage minutieux des mêmes matériaux broyés séparément.

1.2.1 Composition chimique du ciment

Le ciment portland résulte du broyage du clinker qui se présente sous forme de nodules durs et cristallisés de teinte grise foncée. Le clinker est obtenu par cuisson vers 1450°C d'un mélange bien précis de calcaire (80%) et d'argile (20%) auquel on ajoute 5% de gypse ($\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$) destiné à régulariser la prise du ciment [1].

Les principaux oxydes **Tableau 1-1** est en % pondéral d'après l'analyse chimique par fluorescence X d'un clinker de ciment portland qui consiste à exciter l'échantillon à l'aide d'un tube à RX et d'analyser le spectre (en longueurs d'onde ou en énergie) de rayons X émis. Ce spectre est représentatif de la composition élémentaire de l'échantillon [2].

Tableau 1.1- Composition chimique du clinker [2].

Elément	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂
Fourchette(%)	62 - 68	18- 24	4- 8	2 - 5	0 -5	0 - 5	0 - 2	0 - 2	0 - 2
Moyenne(%)	66.6	21.9	6.3	2.5	1.0	0.8	0.2	0.2	0.2

1.2.2 Composition minéralogique du ciment

La composition minéralogique du ciment Portland est fonction du mélange (clinker + gypse) mais aussi de la température de cuisson du clinker et des conditions de son refroidissement (trempe à l'air) [3].

Il contient quatre principaux composants:

- le silicate tricalcique : 3CaO SiO_2 , qu'on l'on écrit C_3S
- le silicate bicalcique : 2CaO SiO_2 , qu'on l'on écrit C_2S
- l'aluminate tricalcique : $3\text{CaO Al}_2\text{O}_3$, qu'on l'on écrit C_3A
- L'alumino-fritte tétracalcique: $4\text{CaO, Al}_2\text{O}_3, \text{Fe}_2\text{O}_3$, qu'on l'on écrit C_4AF

1.2.3 Propriétés du ciment portland

- **La finesse du ciment** ou surface spécifique d'une masse de 1 kg de ciment. Elle est mesurée par le "perméabilimètre de Blaine", et généralement comprise entre 300 et 350 m²/kg
- **La consistance** est le pourcentage optimal d'eau de gâchage qui permet d'obtenir une pâte de consistance normale. Elle est mesurée en utilisant souvent l'appareil de Vicat équipé d'une sonde de consistance (cylindre de diamètre D=10mm). Une consistance normale correspond à un enfoncement de 5-6 mm dans la pâte de ciment de la sonde de consistance.
- **La prise** est le terme employé pour décrire le raidissement de la pâte de ciment. D'une façon générale, la prise se rapporte à un changement d'un état fluide à un état rigide accompagné par des changements de température. Pour mesurer de la prise, on utilise l'essai mis au point par Vicat.

- **La stabilité** vis-à-vis des agents expansifs sous forme de chaux ou de magnésie libre (CaO ou MgO). Cette stabilité se détermine par l'essai de Le Chatelier. Selon les normes, le gonflement sur pâte pure doit être inférieur à 10 mm.
- Au delà de ces propriétés physiques, les ciments ont aussi une propriété mécanique principale qui est la résistance à la compression à 28 jours dont la norme spécifie une limite inférieure. Elle est obtenue par des essais effectués sur prismes (4X4X16 cm) d'un mortier normalisé. (Norme NF P 15-433).

1.2.4 Classification et spécification des ciments

Dans les normes actuelles, les ciments portland sont classés en fonction:

- du type de ciment ,
- de la classe de résistance.

La nouvelle norme EN 197 1 [4] se substitue officiellement à l'ancienne norme depuis le 1^{er} janvier 1995. Selon la proportion des constituants qui entrent dans la composition du ciment, on peut classer les ciments en 5 grandes catégories (**Tableau 1.2**).

Tableau 1.2- Types de ciments et domaine d'application selon EN 197-1 [4]

Type de ciment	Notation	% Clinker	Autres composants	Principales utilisations
Ciment Portland	CPA-CEM I	Min. 95%	Max. 5% de filler	Bétons armés
Ciment Portland composé	CPJ-CEM II/A CPJ-CEM II/B	65 à 79 80 à 94%	Max. 35% de cendres volantes, pouzzolanes, fumées de silice, laitiers	Travaux de dallage, routes
Ciment de haut fourneau	CHF-CEM III/A CHF-CEM III/B CLK-CEM III/C	35 à 64% 20 à 34% 5 à 19%	De 35 à 80% de laitier de haut fourneau 81 à 95% de laitier de haut fourneau	Conviennent aux travaux peu soumis à une trop grande augmentation de chaleur : travaux hydrauliques souterrains, ouvrages massifs, travaux en eaux agressives. A éviter par temps froid.
Ciment Pouzzolanique	CPZ-CEM IV/A CPZ-CEM IV/B	65 à 90% 45 à 64 %	10 à 35% de Pouzzolane naturelles 36 à 55% de Pouzzolane naturelles	
Ciment aux laitiers, et aux cendres	CLC-CEM V/A CLC-CEM V/B	40 à 64% 20 à 39%	18 à 30% laitier, et 18 à 30% pouzzolanes ou cendres volantes ; 31 à 50% laitier, et 31 à 50% de cendres volantes ou pouzzolanes	

Trois classes de résistance sont définies : classe 32.5, classe 42.5 et classe 52.5. Pour toutes les classes de ciment, les résistances normales, et les limites garanties de résistance doivent satisfaire aux spécifications du **tableau 1.3**.

Tableau 1.3- Spécifications mécaniques et Physiques des ciments selon EN 197-1 [4]

Classe	Résistance à la Compression (N/mm ²)						Spécification Physiques			
	Au jeune âge		Normale		Valeurs limites garanties			Retrait CEMI, CEMII 28 jours (µm/m)	Temps de Prise (mm)	Stabilité (mm)
	2 jours	7 jours	28 jours		2 jours	7 jours	28 jours			
	Li*	Li*	Li*	Li*						
32.5	-	-	>32.5	<52.5	-	17.5	30	≤ 800	≥ 90	≤ 10
32.5R	>13.5	-			12	-	30			
42.5	>12.5	-	>42.5	<62.5	10	-	40	≤ 1000	≥ 60	
42.5R	>20	-			18	-	40			
52.5	>20	-	>52.5	-	18	-	50	-		
52.5R	>30	-			28	-	50			

Note : * L_i: Limite inférieure et L_s: Limite supérieure

1.3 Hydratation des ciments

Les constituants anhydres se transforment en composés hydratés. Deux mécanismes d'hydratation peuvent être observés [5]. Le premier se passe en solution, les composés cimentaires se dissolvent en ions dans la solution et de nouveaux composés se forment par précipitation. Le second correspond à des réactions à l'état solide, les composés réagissent avec les précipités en phase solide. Les principales réactions d'hydratation sont décrites ici :

- Silicates de calcium : au cours de la réaction des silicates tri- ou bicalciques (C_3S ou C_2S), des hydroxydes de calcium et un gel de silicate de calcium hydraté se forment.



C_3S

C-S-H

Portlandite



C_2S

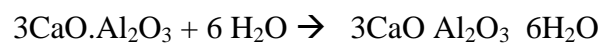
C-S-H

Portlandite

- Aluminates et Alumino-ferrites de calcium.

Les composés aluminates les plus courants sont l'aluminate tricalcique (C_3A) et l'alumino-ferrite tétracalcique (C_4AF). Ils réagissent avec l'eau de deux façons :

En l'absence de Gypse :



C_3A

C_3AH_6 (hydragamet)



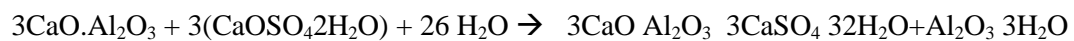
C_4AF

C_3AH_6

FH_x

portlandite

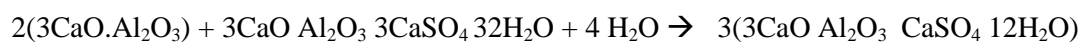
En présence de gypse :



C_3A

$3CSH_2$

$C_3AS_3H_{32}$ (ettringite)



$2C_3A$

$C_6AS_3H_{32}$

C_4ASH_{12} (monosulfate)

A la fin de l'hydratation du ciment, les principaux produits hydratés sont :

- les silicates de calcium hydratés ou CSH, généralement amorphes dont le ratio Ca/Si varie, ils constituent 60 à 70% en masse d'une pâte de ciment hydratée ;
- l'hydroxyde de calcium ou portlandite ou CaOH_2 , représente 20 à 30% en masse d'une pâte de ciment hydratée ;
- Les sulfo-aluminates de calcium, l'ettringite et le monosulfate constituent 5 à 15% de la masse totale.

1.3.1 Conséquences de l'hydratation

L'hydratation du ciment s'accompagne de plusieurs phénomènes chronologiques que nous présentons ci-dessous.

1.3.1.1 Exotherme des réactions d'hydratations

Les réactions d'hydratation sont exothermiques. De plus, le dégagement de chaleur est accéléré par la thermo activation de la prise. Après la prise, la dissipation de cette chaleur ralentit et le matériau cimentaire se refroidit en fonction de son épaisseur, de son isolation et de la température extérieure. Le matériau devenu rigide connaît une contraction, appelée retrait thermique, due à ce refroidissement.

1.3.1.2 Le retrait endogène

Le retrait endogène résulte de deux phénomènes : l'un chimique (retrait chimique) et l'autre physique (retrait d'autodessiccation). Le retrait endogène d'origine chimique a été découvert par Le Chatelier en 1900 et porte aujourd'hui son nom : la "contraction de Le Chatelier". Le Chatelier a montré que lors de l'hydratation, le volume des hydrates formés est plus petit que le volume initial d'eau et de ciment. Ce phénomène se produit avant la prise et provoque une diminution de volume comprise entre 8 et 10% de la somme des volumes initiaux du ciment et d'eau [6]. Pour la pâte de ciment, il est compris entre 8 et 12% [7]. Il faut noter que la contraction de Le Chatelier ne dépend pas du rapport E/C. Le retrait endogène dû à l'autodessiccation est une conséquence macroscopique du retrait chimique. Il est défini comme la contraction volumique de la pâte de ciment sans échange d'humidité avec le milieu extérieur en conditions isothermes [8].

I.3.1.3 Evolution des caractéristiques mécaniques

La formation progressive des C-S-H augmente les contacts entre les grains et diminue ainsi la porosité capillaire. Les propriétés mécaniques (résistances, module d'Young) augmentent alors au fur et à mesure de la formation de ces C-S-H.

La **figure 1-1** montre l'évolution du degré d'hydratation et de la résistance à la compression en fonction du temps de maturation. On constate que la résistance du matériau et le degré d'hydratation augmentent de manière similaire avec le temps au moins jusque 28 jours: l'augmentation de la résistance est donc due principalement à l'hydratation, la nature des hydrates formés ayant une influence moindre sur cette évolution.

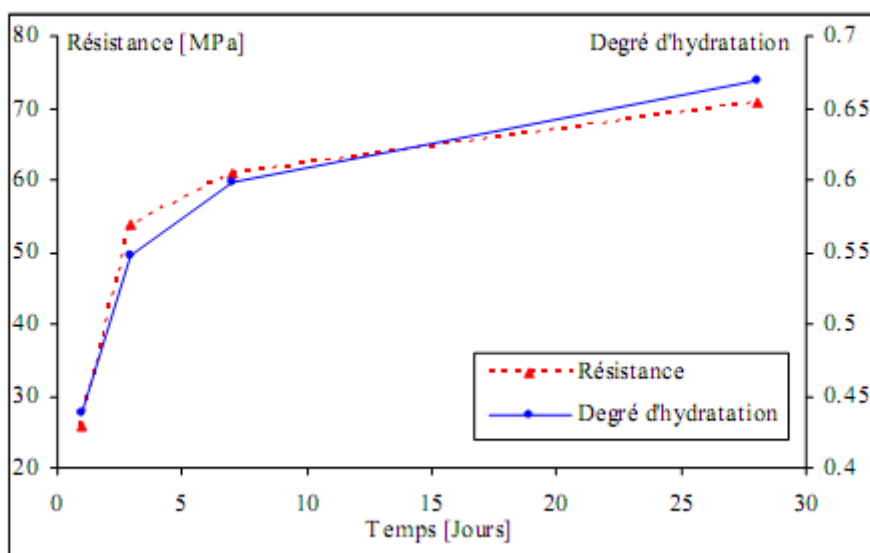


Fig. 1.1- Evolution du degré d'hydratation et de la résistance à la compression d'un mortier en fonction du temps de maturation [9].

Le module d'Young dépend, comme la résistance à la compression, de l'avancement de l'hydratation. La **figure I-2** présente la relation entre la résistance à la compression et le module d'Young des éprouvettes de béton, contenant divers ciments, de rapports eau/ciment égaux à 0,4 et 0,5, conservées à une humidité relative de 100 % et à une température de 23°C pendant 28 jours.

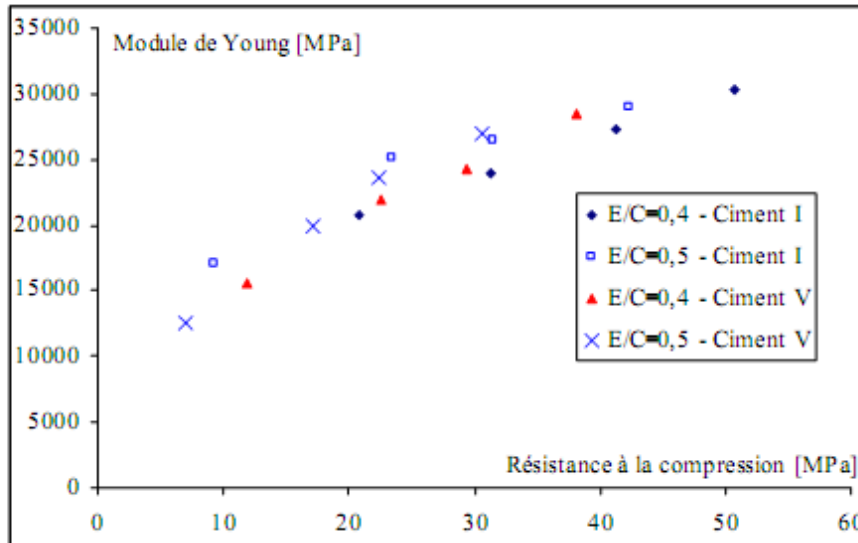


Fig. I.2- Relation entre le module d'Young et la résistance à la compression des éprouvettes de bétons pour différents E/C (d'après Kim [10]).

Cette courbe a été obtenue en réalisant des essais de compression simple à 1, 3, 7 et 28 jours. La relation ne semble pas dépendre du type de ciment utilisé ni du rapport eau/ciment. Néanmoins, contrairement à la compression, le module d'Young tend à se stabiliser rapidement. Cette croissance commune de la résistance et du module peut s'avérer fautive en cas de dessiccation [11, 12].

1.4 Ajouts cimentaires

1.4.1 Classification des ajouts cimentaires

Dans le but de modifier certaines propriétés des ciments, une gamme de produits connus sous le nom d'ajouts cimentaires de granulométrie très fine sont incorporés, soit en raison des conditions d'environnement, soit pour des raisons de performances mécaniques. Ces ajouts sont souvent meilleurs en marché que le ciment Portland et permettent d'obtenir un ciment composé plus économique.

Les ajouts peuvent être naturels ou artificiels, inertes ou actifs. Ils peuvent réagir en tant que matériau hydraulique, hydraulique latent ou pouzzolanique, ou encore sous forme de fillers. Ils se divisent selon leur réactivité comme le montre le **tableau (1.4)**.

Tableau 1.4- Classification des ajouts selon leur réactivité [13].

TYPE	REACTIVITE	MATERIAUX
Hydraulique	Fortement réactif	Ciments spéciaux-chaux hydraulique
Hydraulique Latent		Laitier granule-cendres volantes riche en calcium (calciques)
Pouzzolanique	Fortement réactif	Fumée de silice
	Moyennement réactif	Cendres volantes pauvre en calcium, pouzzolanes naturelles (verre volcanique, tufs volcanique, trass phonolithe, terres à diatomées)
	Faiblement réactif	Scories cristallines
Inerte	Non réactif	Fillers (farine calcaire,...) fibres, pigments colorants, matières expansives, dispersions synthétique

1.4.2 Intérêt de l'utilisation des ajouts minéraux

L'introduction des ajouts dans la confection du ciment présente un facteur bénéfique car la consommation en clinker diminue en fonction des taux d'ajouts. En effet, le clinker étant obtenu par transformation de la crue (argile + calcaire) nécessite une dépense d'énergie très importante pouvant être réduite par l'introduction des ajouts. La réaction pouzzolanique étant à base de produits de faible coût et la durabilité est garantie puisque les romains utilisaient déjà ce mécanisme chimique dans leurs ciments pour la confection d'ouvrages qui ont fait leur preuve depuis de nombreux siècles.

L'intérêt technique des ajouts réside en premier lieu dans le fait qu'ils permettent l'obtention d'un ciment dont les performances sont aussi bonnes que celles d'un CPA (ciment Portland) de même classe de résistance. Parfois la chute de résistance à court terme limite leur utilisation en préfabrication. En second lieu, les ciments composés (CPA + ajouts) présentent souvent l'avantage sur le CPA, d'une meilleure résistance aux agressions chimiques.

Certains avantages techniques que présente l'utilisation des pouzzolanes dans le béton ne peuvent pas être atteints lorsqu'un CPA est utilisé seul. Parmi ces avantages, mentionnons une plus grande ouvrabilité, une maniabilité accrue, une meilleure étanchéité à l'eau (l'ajout rend le béton plus compact), une réduction de la chaleur d'hydratation et des risques de fissuration sous l'effet de l'action thermique et une plus grande durabilité au milieu sulfaté ou acide.

1.4.3 L'utilisation des ajouts en Algérie

L'industrie cimentaire est d'importance primordiale pour l'Algérie comme tous pays en voie de développement. Cependant, parmi les moyens efficaces qui existent pour augmenter la production du ciment est celui d'utiliser des ajouts qui sont très peu coûteux et disponibles en grandes quantités en Algérie, comme le laitier d'El-Hadjar, le calcaire et la pouzzolane naturelle de Béni-Saf. Le **tableau (1.5)** donne une idée sur les ajouts utilisés dans les cimenteries algériennes.

Tableau 1.5- Utilisation des ajouts dans les cimenteries algériennes.

Entreprise	Cimenterie	Ajouts Utilisés
ERCE	Ain Touta	Pouzzolane
	Ain El Kebira	
	Hamma Bouziane	
	H'djar Essaoud	Laitier
	Tebessa	
ERCC	Meftah	Tuf/ Calcaire
	Raiss Hamidou	Poussière
	Sour EL Ghozlane	Calcaire/Tuf
ECDE	Chlef	Calcaire
ERCO	Beni Saf	Pouzzolane
	Zahana	
	Saida	

1.5 Paramètres influençant la résistance du béton

1.5.1 Effet de la Composition du béton

1.5.1.1 Dosage en ciment et du dosage en eau (rapport C/E)

Le ciment et l'eau sont deux facteurs essentiels à la confection du béton. Ils présentent deux effets totalement opposés sur sa résistance. Si l'augmentation du ciment favorise son accroissement, un surplus d'eau entraîne sa diminution. Ces deux effets sont le plus souvent rencontrés sous forme de rapport (E/C) Alors que plusieurs recherches et formulation faites par le passé utilisent (C/E) qui se Traduit par une fonction de résistance linéaire et croissante, et une plage de variation usuelle plus annoncée. (de 1,5 à 2,5 contre 0,4 à 0,66 pour E/C) (Fig. 1.3) [16].

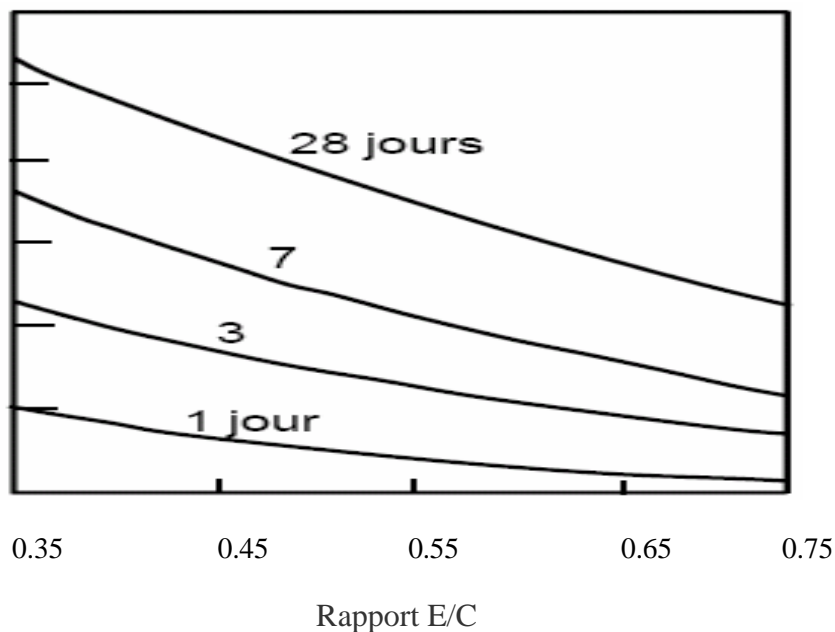


Fig. 1.3- Influence du rapport E/C sur l'évolution de la résistance à la compression du béton [16].

1.5.1.2 Effet de la Granularité

Les appréciations concernant l'influence des proportions relatives de sable et de gravier (rapport G/S) ainsi que la continuité ou discontinuité de la courbe granulométrique sur les différentes qualités des bétons sont résumées dans le tableau 1.6.

La valeur courante du rapport G/S (un poids S de sable et un poids G de gravier et que la coupure entre eux se fait au moyen du tamis de 5 mm) peut, en général, être prise égale à 2.0, mais on peut la faire varier entre 1.5 et 2.4 selon les caractéristiques du béton recherchées [17].

Tableau 1.4- Principales qualités des bétons en fonction de G/S et de granularité [17]

Désignation	Pour une bonne ouvrabilité	Pour une bonne résistance
Finesse du sable	plutôt fin	plutôt grossier
Rapport (G/S)	à diminuer	à augmenter
Dosage en eau	à augmenter	à diminuer
Granularité	Continue préférable	discontinue légèrement
D _{max}	Plutôt petite	Plutôt forte

La résistance à la compression où nous pouvons (voir **Figure 1.4**) que pour des valeurs de (G/S) supérieures à « 2.2 » la résistance à la compression augmente considérablement, une augmentation certainement positive mais prise sur le compte de l'ouvrabilité, parce qu'en pratique on ne dépasse pas les valeurs de 1.5 à 1.6 pour avoir un béton ouvrable [17].

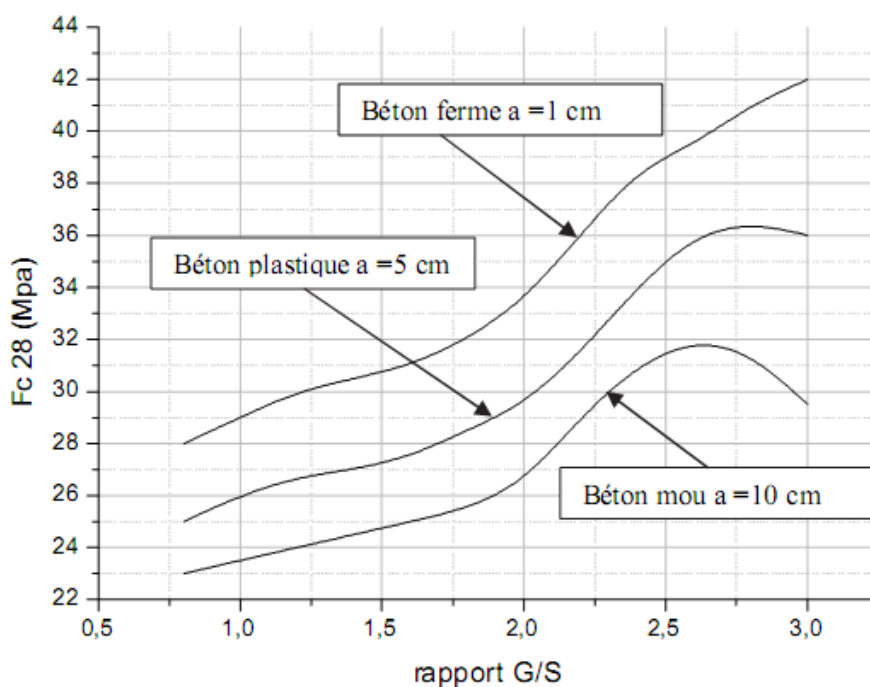


Fig. 1.4- Variation de la résistance en compression à 28 jours en fonction du rapport G/S. [17]

1.5.1.3 Processus de malaxage du béton

Le malaxage des matériaux est une phase cruciale, constitue la première opération irréversible de la construction de l'ouvrage et sa bonne exécution conditionne toutes les propriétés que le béton pourra acquérir. Il se fait, en général, à l'aide d'appareils mécaniques, et que la durée de malaxage doit être suffisante pour assurer une bonne homogénéité du mélange, ainsi que la vitesse de rotation des malaxeurs ne doit pas être trop grande afin d'éviter que sous l'effet de la force centrifuge, ne se produise un début de ségrégation.

1.5.1.4 Effets des ajouts cimentaire

1.5.1.4 .1 Effet de la fume de silice

La figure 1.5 montre les variations de la résistance à la compression du béton avec fumée de silice en fonction du pourcentage de remplacement en fumée de silice, les résultats indiquent que le pourcentage de silice optimal de remplacement des fumées n'est pas une unique mais a varié par rapport aux niveaux de remplacement de 15% à 25% [18].

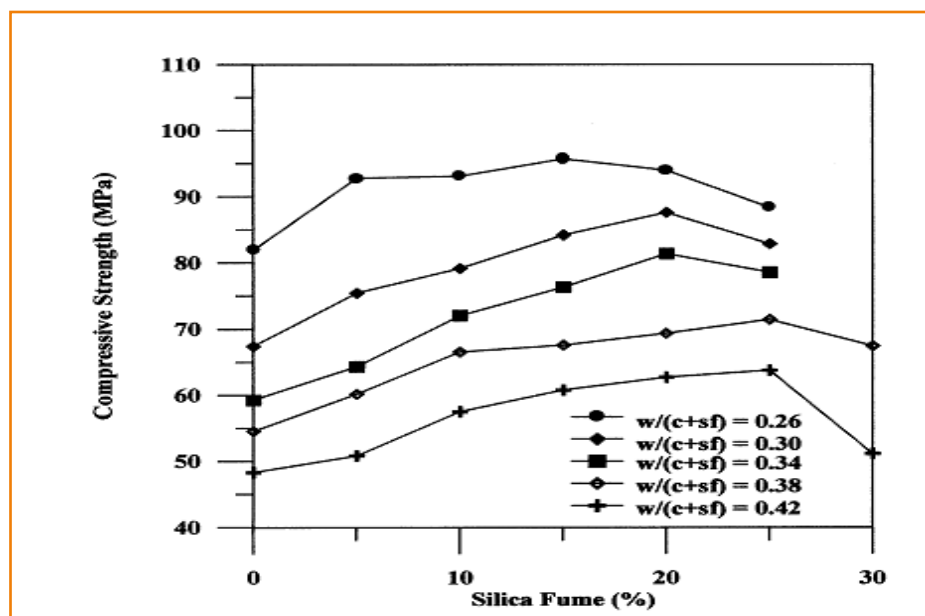


Fig. 1.6- Relation entre la résistance à la compression et le dosage de la fumée de silice [18].

Khedr et Abou Zeid [19] ont reporté que le pourcentage optimum en fumée de silice pour obtenir une résistance maximale est varié entre 10% et 20%.

L'évolution de la résistance à la compression pour les différents rapports "eau/liant" entre 1 et 180 jours est représentée sur la **figure 1.7**. Il est clair à partir des courbes de la **figure 1.7** que la résistance à la compression du béton renfermant des 10 et 20% de fumée de silice augmente par rapport au béton témoin, et la résistance est légèrement inférieure pour un pourcentage de 30% de fumée de silice [20].

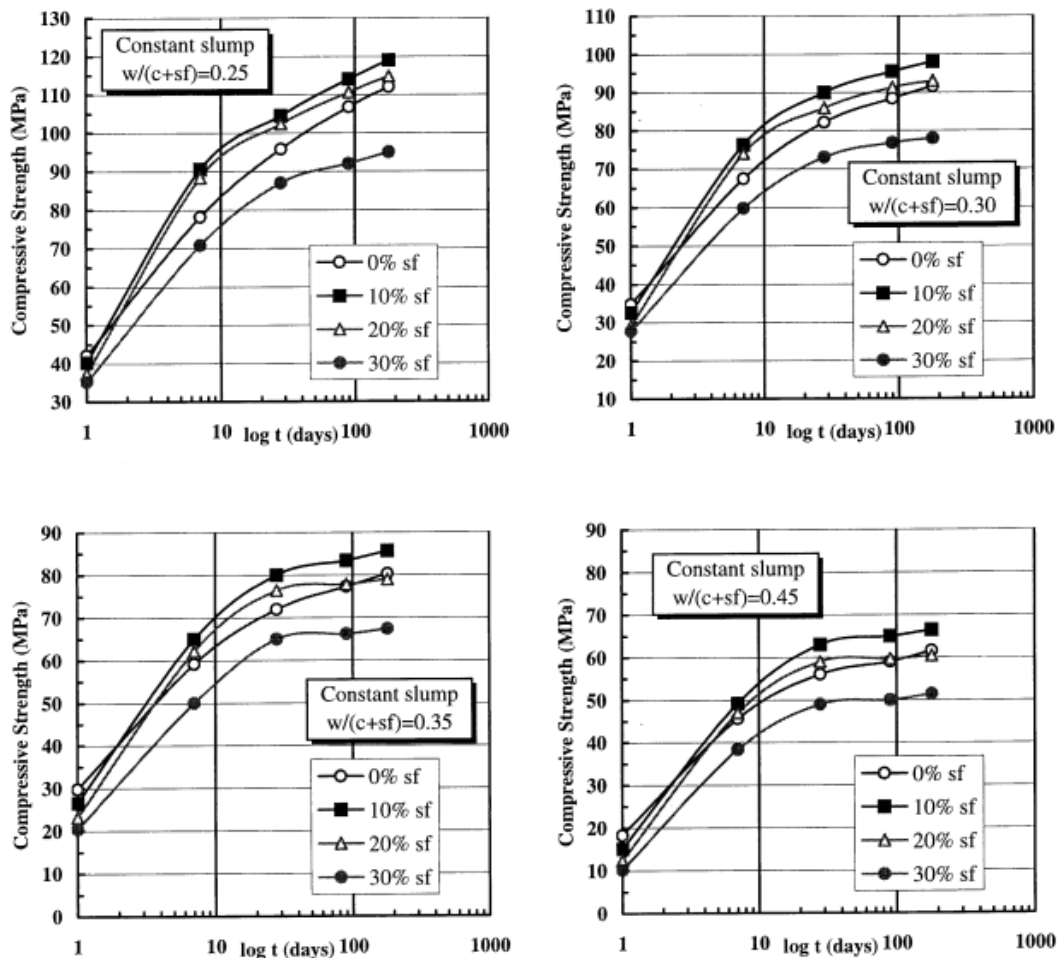


Fig. 1.7- Développement de la résistance des bétons avec fumée de silice pour différent rapport "eau/ liant" [20]

La figure 1.8 montre l'effet du remplacement des fumées de silice sur la résistance à la compression du mortier de ciment à différents âges d'hydratation (3,7, 28 et 120 jours). Elle montre que les mortiers contenant 5 et 8% en masse de remplacement des fumées de silice présentent une résistance élevée [21].

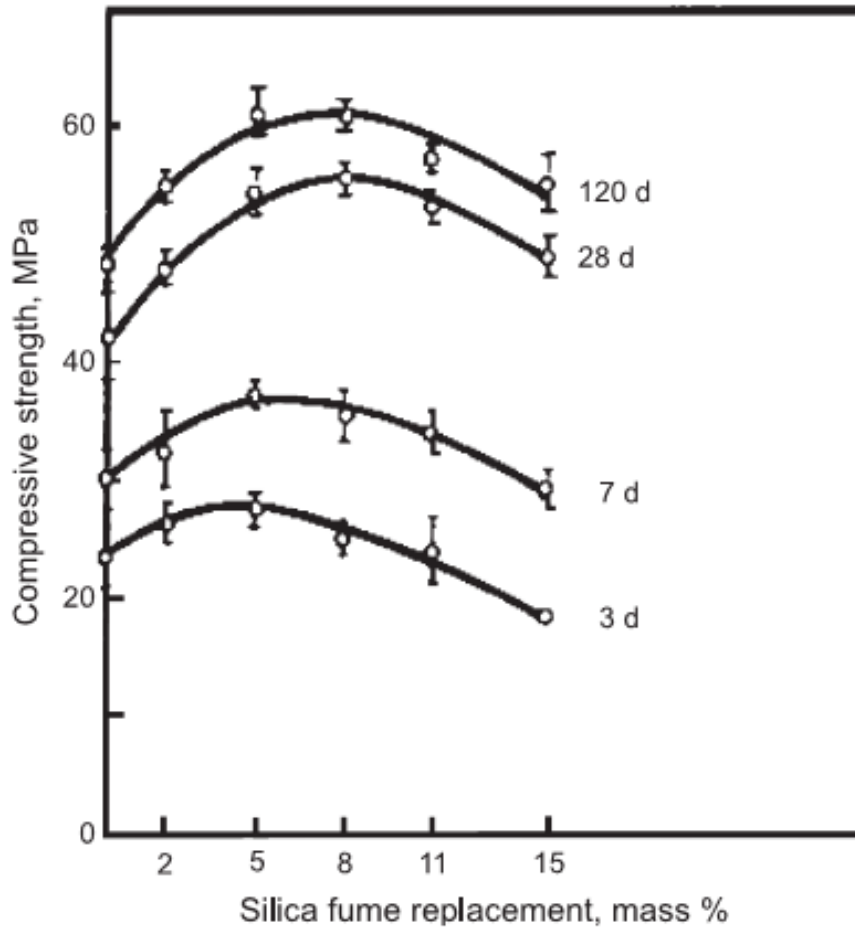


Fig. 1.8- Développement de la résistance en fonction du pourcentage en fumée de silice [21].

La figure 1.8 indique également que les résistances initiales du mortier au dessous de 7 jours pour un pourcentage de 15% en masse de remplacement des fumées de silice sont inférieures à ceux de mortier ne contenant pas de fumée de silice. Cependant, après 28 jours lorsque des nouveaux produits d'hydratation sont formés par la réaction pouzzolanique entre l'hydroxyde de calcium et de la fumée de silice, la résistance à la compression de ce mortier (15% de fumée de silice) augmente de façon notable et est plus élevée que dans le mortier de contrôle [21].

1.5.1.4.2 Effet des cendres volantes

Les figures 1.9 et 1.10 [22] montrent que les résistances à la compression du béton contenant de 10 à 50% de cendres volantes de sont plus élevés que celle du béton contrôle à tous les âges. Cependant, la résistance maximale à tous les âges se produit avec 50% de remplacement des granulats fins. Cette augmentation de la résistance est attribuée à l'action pouzzolanique des cendres volantes.

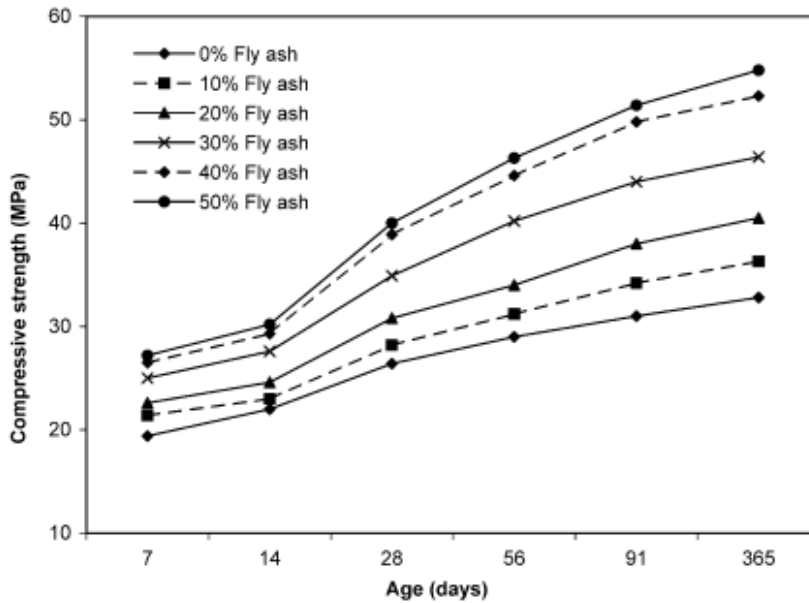


Fig. 1.9- Evolution de la résistance à la compression du béton à base de cendres volantes en fonction de l'âge [22]

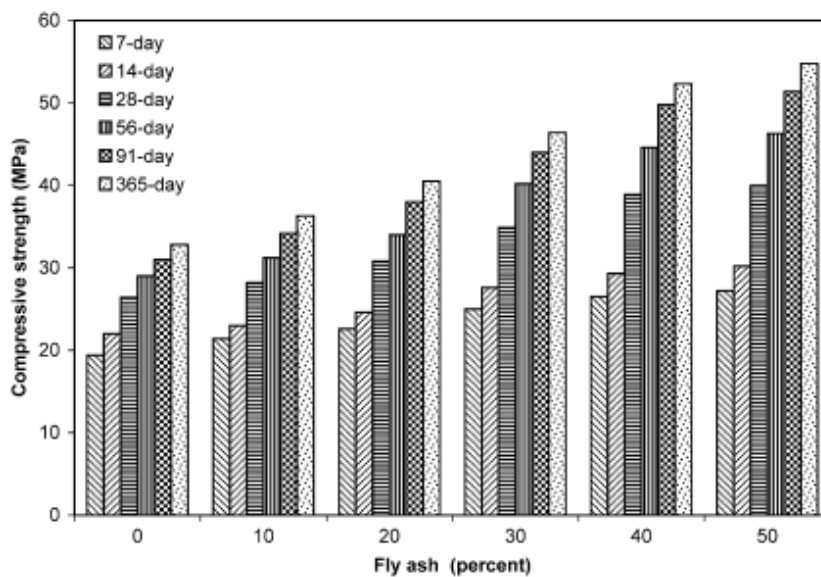


Fig. 1.10- Résistance à la compression en fonction du pourcentage des cendres volantes [22]

Au jeune âge, les cendres volantes réagissent lentement avec de l'hydroxyde de calcium libérée lors de l'hydratation du ciment et ne contribue pas de manière significative à la densification de la matrice de béton à un âge précoce. Le béton avec cendres volantes montre une plus grande résistance à un âge précoce parce que l'inclusion de cendres volantes en remplacement partiel de sable engendre la densification de la matrice de béton, et en raison de ceci, la résistance des bétons à base de cendres volantes est supérieure à la résistance du mélange de contrôle, même aux jeunes âges [22].

Maslehuddin [23] a effectué des recherches pour évaluer le développement de la résistance à la compression et la résistance à la corrosion des mélanges de béton dans lequel les cendres volantes ont été utilisé comme un ajout (quantité égale de remplacement du sable). Les bétons mélanges ont été faites avec 0%, 20 %, et 30% de cendres volantes, et les rapport eau-ciment de 0,35, 0,40, 0,45 et 0,50.

Des études antérieures sur le béton avec cendres volantes ont généralement confirmé que la plupart des mélanges qui contiennent des cendres volantes de classe F qui remplace le ciment Portland à un 1:1 (poids égal) , le gain du rapport de résistance à compression, ainsi que la résistance à la traction, plus lentement que mélanges usuels de béton aussi longtemps entre 60 à 90 jours. Au-delà de 60 à 90 jours, les bétons avec des cendres volantes de classe F dépassent finalement la résistance des mélanges sans ajout [24].

Bien que plusieurs études ont été réalisées sur l'utilisation des cendres volantes de classe F dans le béton [22-23]. Cependant, les études sur l'utilisation des cendres volantes de classe F en remplacement partiel des granulats fins, sont rares dans la littérature [23-25].

1.5.1.4.3 Effet du métakaolin

Dans ces dernières années le métakaolin (MK) extrait de la calcination du kaolin et ayant les propriétés pouzzolanique est utilisé comme additif pour le ciment Pera [26].

En ce qui concerne les études réalisés, la recherche portait sur le MK est basé sur la structure du kaolin, de la kaolinite et les modalités du traitement ainsi que le comportement pouzzolanique et ses effets sur les propriétés du ciment et du béton Batis et Badogiannis [27]

Les pâtes de ciment contenant de 5% à 20% de metakaolin présentent des résistances élevées à celles du béton contrôle entre 3 à 90 jours. Tandis que, la pâte contenant 10% de metakaolin développe une résistance maximale à tous les âges [28].

Lorsque le métakaolin remplace le sable, on obtient des résistances élevées que celle du béton contrôle à tous âges jusqu'à 90 jours. Par contre, lorsque le métakaolin remplace le ciment, son effet positif sur la résistance du béton commence généralement après 2 jours. [29].

1.5.1.4.4 Effet du laitier

Le développement de la résistance à la compression du béton au laitier dépend principalement du type, de la finesse, de l'indice d'activité et des proportions du laitier utilisé dans les mélanges de béton [30]. En plus du rapport E/C, les caractéristiques physiques et chimiques du ciment Portland et les conditions de la cure peuvent affecter les performances des bétons à base de laitier.

Le développement de la résistance du béton incorporant du laitier est lent entre 1 et 5 jour par rapport à celle du béton témoin. Entre 7 et 28 jours, la résistance est proche celle du béton de contrôle, au-delà de cette période, la résistance du béton au laitier dépasse la résistance du béton de contrôle [31]. Des études réalisées par plusieurs chercheurs [32, 33, 34], ont montré que l'utilisation du laitier très actif, permet l'obtention des résistances très élevées à 28 jours, même pour les dosages allant jusqu'à 65% de laitier.

La figure 1.11 montre le développement de la résistance à la compression des mélanges de ciment au laitier et du ciment Portland seulement [32].

En général, lorsque les résistances au jeune âge sont concernées, le taux de gain de résistance est inversement proportionnel à la fraction de laitier utilisé dans le mélange. L'effet de la proportion de ciment au laitier utilisé, sur la résistance et le taux de gain de résistance est représenté sur la figure 1.12.

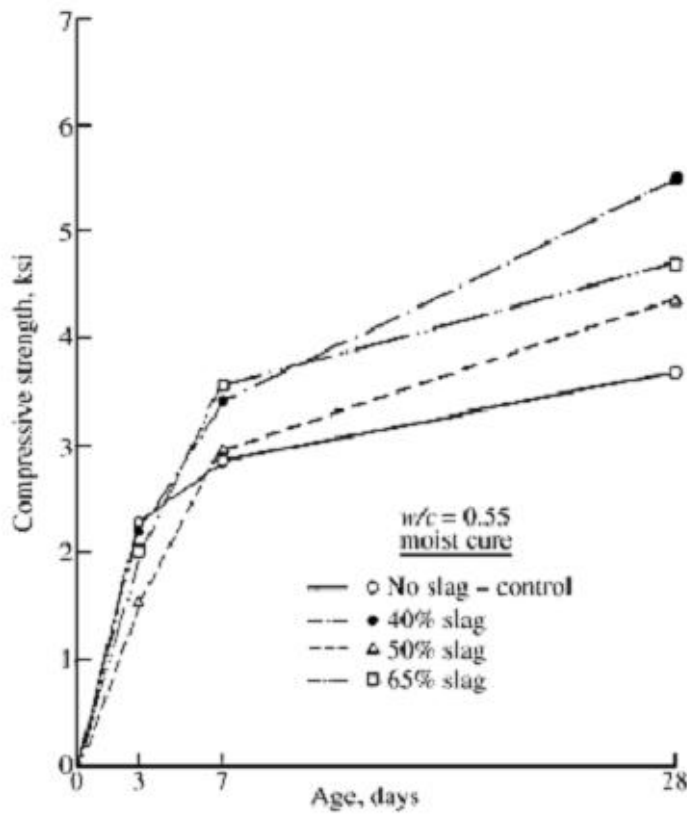


Fig 1.11- Comparaison entre les résistances du béton contrôle et le béton avec laitier [32]

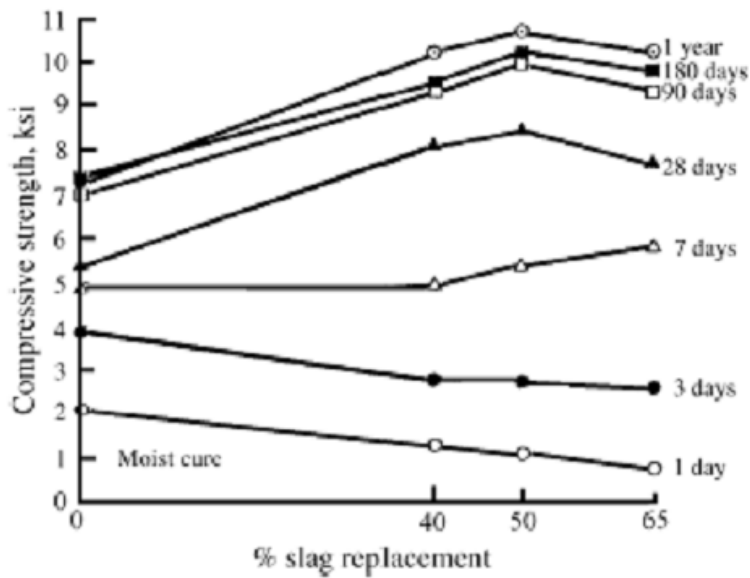


Fig. 1.12- Influence du mortier de ciment au laitier sur la résistance à la compression du béton [34].

La figure 1.13 montre que le gain de résistance, du béton à base de laitier par rapport au béton de ciment Portland, est plus grand dans les mélanges avec un rapport E/C élevé que dans les mélanges ayant un faible rapport E/C [32, 33].

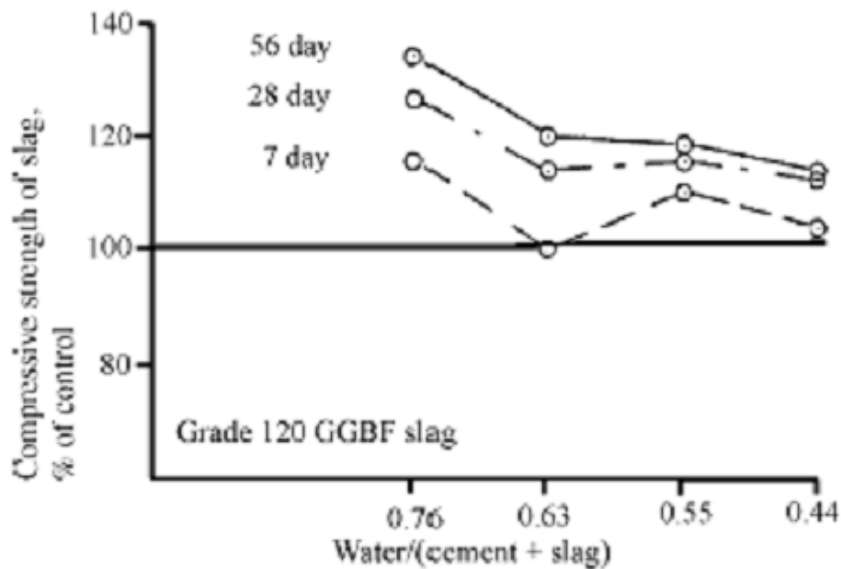


Fig. 1.13- Effet du rapport E/C sur la résistance à la compression du béton contenant 50% de laitier [32].

1.5.1.4.5 Effet de la pouzzolane naturelle

L'effet de la pouzzolane naturelle sur la résistance à la compression du béton peut varier en fonction de l'interaction chimique entre la pouzzolane naturelle et le ciment Portland lors de l'hydratation [35]. D'autre part, les pouzzolanes affectent la résistance en raison de leur caractère physique en termes de tassement des particules, le raffinement des pores et l'amélioration de la structure de la zone de transition [36, 37].

L'effet du temps de durcissement sur la résistance à la compression selon la norme ASTM C 109 sur des cubes de mortier, fait avec des ciments Portland contenant 10, 20, et 30% de pouzzolane, est représenté sur la Figure 1.14. Il ressort de ces résultats que la réaction pouzzolanique n'avait pas suffisamment progressé pour le développement de la résistance à la compression dans les sept premiers jours de l'hydratation, car la chaux qui est nécessaire à la réaction pouzzolanique vient après l'hydratation des composés de silicate de calcium du ciment Portland [38].

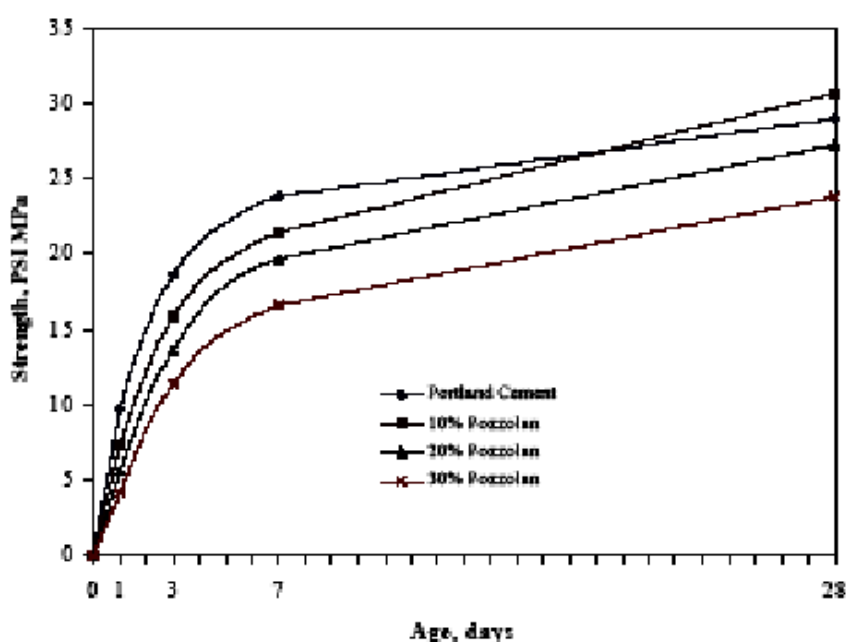


Fig. 1.14- Effet du temps de cure sur la résistance à la compression des cubes de mortier de ciment portland contenant de la pouzzolane naturelle après 28 jours [38].

La figure 1.15 montre que la résistance à la compression du béton contenant 15% de pouzzolane naturelle ayant des finesses de 1800 et 3400 cm^2/kg présentent les mêmes résistances similaires à 28 jours [39].

La figure 1.16 montre que la résistance du béton contenant 15% de pouzzolane naturelle de deux sources différentes, l'évolution de la résistance est la même à tous âges [39].

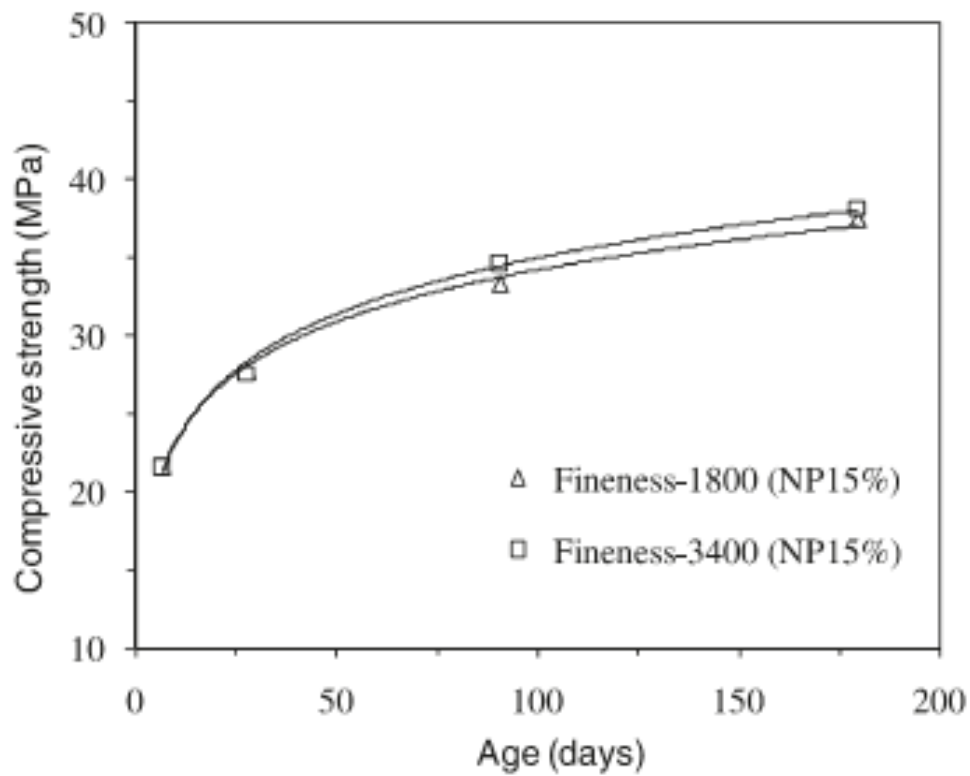


Fig. 1.15- Effet de la finesse sur la résistance du béton avec la pouzzolane naturelle [39].

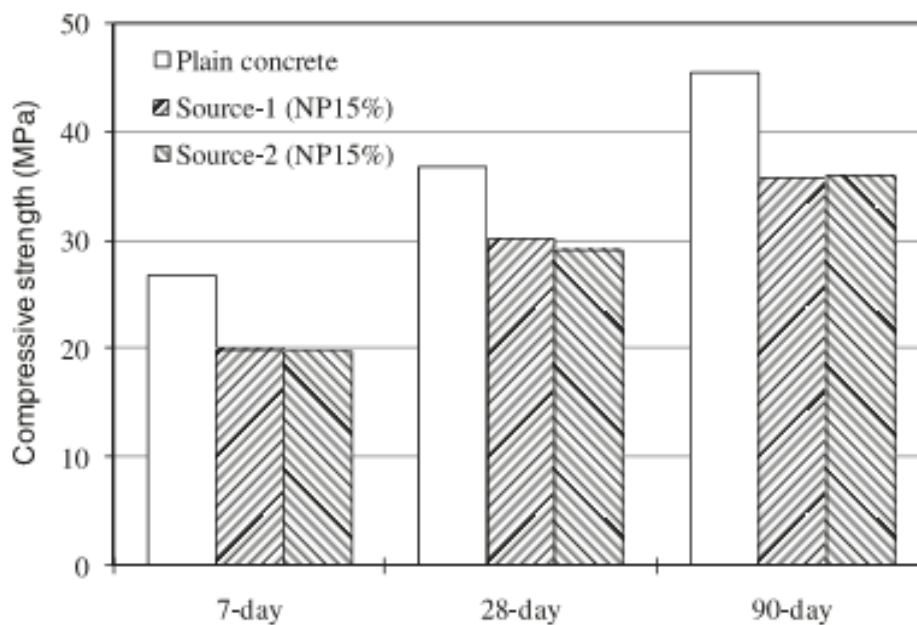


Fig. 1.16- Effet de la source sur la résistance à la compression de la pouzzolane naturelle [39].

La résistance à la compression du béton préparé avec différents dosage de pouzzolane naturelle est représentée sur la figure 1.17. On remarque d'après la figure que pour un dosage de 15% la résistance est inférieure à celle du béton contrôle à 90 jours et similaires à 180 jours [39].

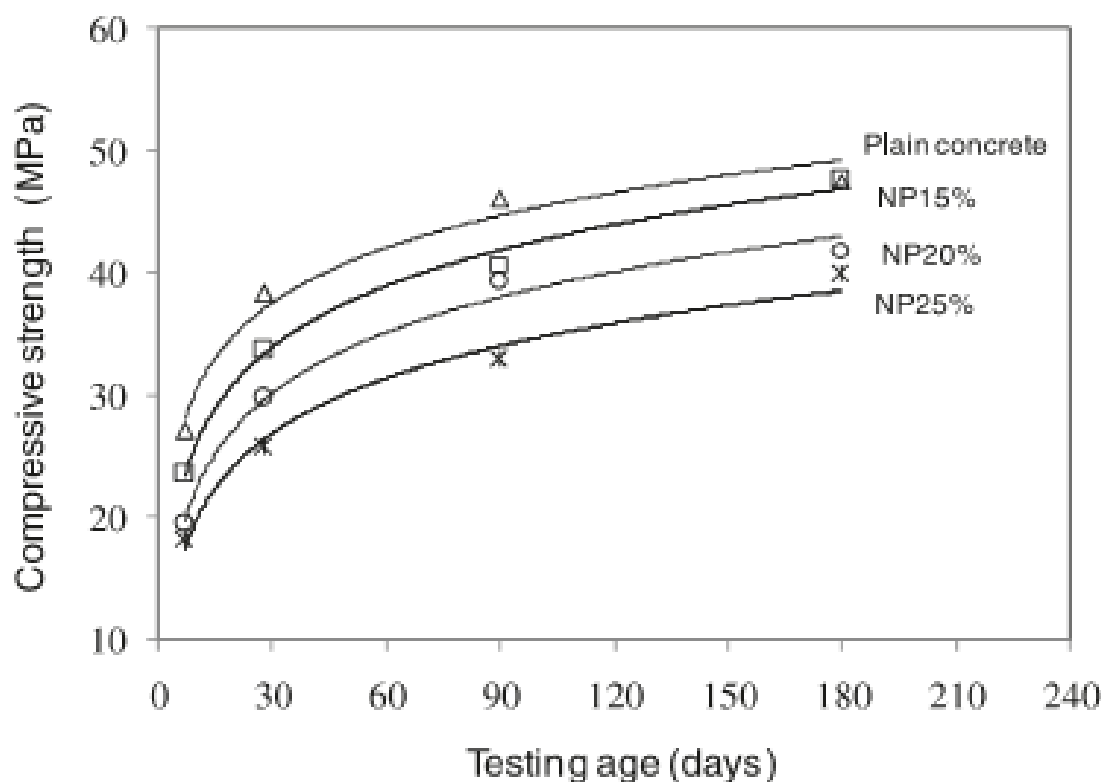


Fig. 1.17- Effet du dosage de la pouzzolane naturelle sur la résistance à la compression du béton [39].

1.5.1.4.6 Effet du calcaire

La figure 1.18 montre que pour la série(L) il ya eu une légère augmentation de la résistance lorsque la chaux Pierre amendes ont été ajoutés. Il pourrait être constaté que le dosage en calcaire jusqu'à 20% n'affecte pas les performances de résistance du béton. Pour la série (H) a été améliorée avec l'augmentation de calcaire contenu. Les résultats les plus prometteurs ont été obtenus avec des bétons incorporant 10% et 15% de calcaire. [40]

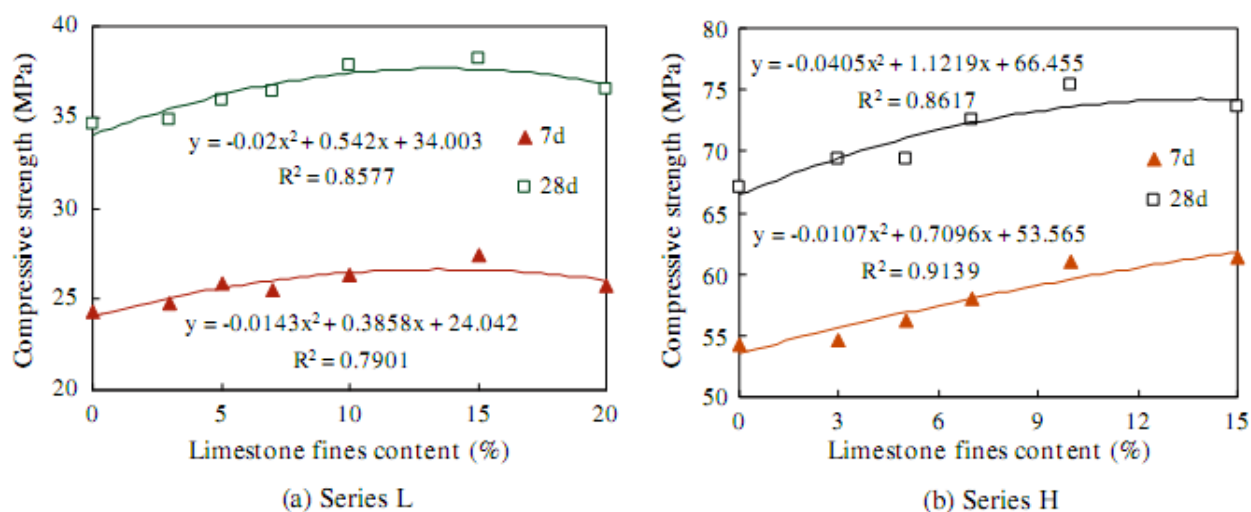


Fig. 1.18-Influence du dosage en calcaire sur la résistance à la compression du béton.

1.5.2 Effet de l'environnement

1.5.2.1 Effet de la température

La cure désigne les conditions appliquées aux bétons pour éviter le départ prématuré ou excessif de l'eau qu'ils contiennent. Une cure permet de maintenir l'eau nécessaire à l'hydratation du ciment. Elle permet également d'éviter certains phénomènes de fissuration. Enfin, elle est nécessaire pour obtenir des performances élevées en peau des bétons, ce qui est le cas pour toutes les propriétés liées à la durabilité : protection des armatures, résistance à la pénétration des chlorures, ...

L'objectif de la cure est de conserver le béton dans des conditions climatiques telles que l'espace intergranulaire de la pâte fraîche (pores capillaires) soit au maximum rempli par les produits d'hydratation.

L'ACI 308-01 [41] définit la cure du béton comme étant la procédure pour maintenir une humidité suffisante et une température favorable dans le béton durant l'hydratation jusqu'au développement des propriétés désirées du béton.

La figure 1.19 montre que la température de cure jusqu'à les réactions d'hydratation entraîne une plus grande résistance initiale du béton. Des températures plus élevées pendant et après le contact initial entre le ciment et l'eau réduit la durée de la période dormante de sorte que la structure globale de la pâte de ciment hydraté s'installe très tôt [42, 43].

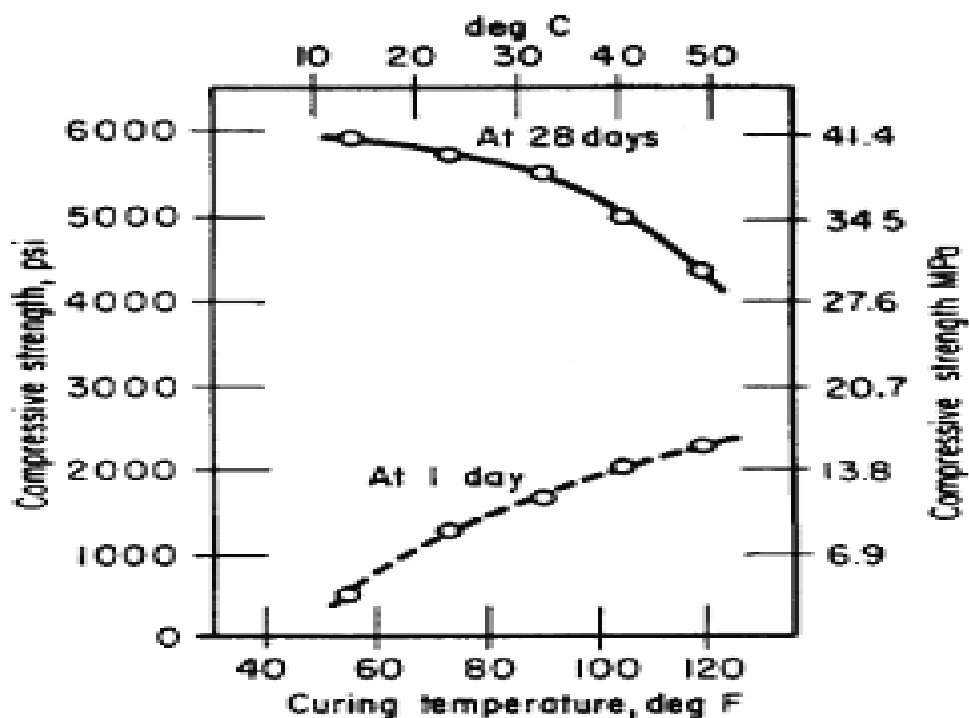


Fig. 1.19- Effet de la température sur la résistance du béton [41]

1.5.2.2 Effet de l'Hygrométrie

Le degré d'humidité du milieu de conservation a une influence importante sur l'évolution de la résistance du béton comme la montre la figure 1.20.

Laplante [44] rapporte que le mûrissement hygrométrique est un facteur très important dans l'évolution de la résistance des bétons. La figure 1.20 montre l'influence des conditions de mûrissement hygrométrique sur l'évolution de la résistance à la compression d'un béton ordinaire ($E/C=0.5$). De plus, plusieurs chercheurs ont observé que la réaction d'hydratation s'arrêtait en dessous d'une humidité relative interne égale à 80%. Donc, dans le cas, des

bétons à base de ciment pouzzolniques, une durée de cure humide initiale est indispensable (à cause de la lenteur de la réaction pouzzolanique).

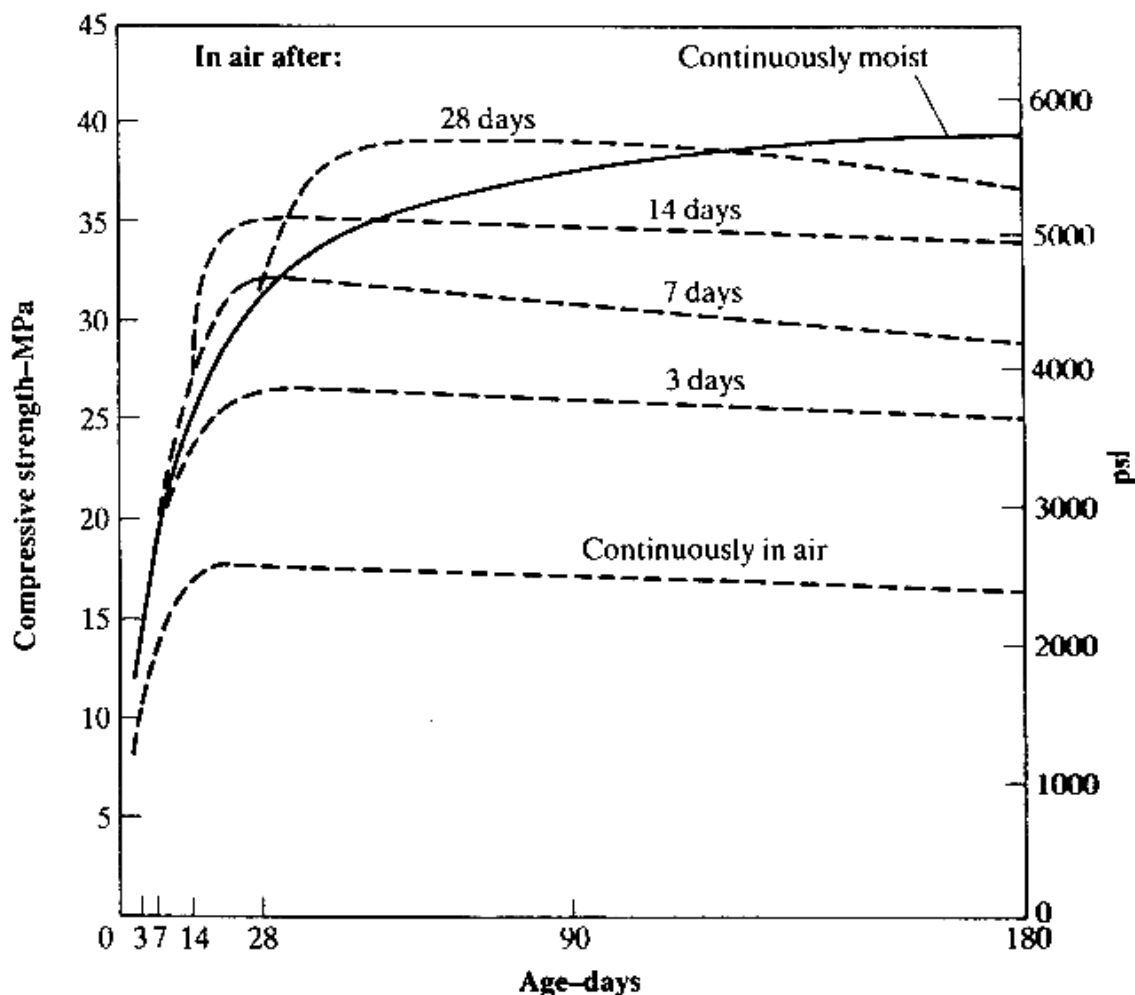


Fig. 1.20- Influence du mûrissement hygrométrique sur l'évolution de la résistance à la compression d'un béton ordinaire [45].

De toute façon, la dessiccation du béton est toujours défavorable essentiellement dans les premiers jours et un manque de protection peut provoquer sur une éprouvette de contrôle une chute de résistance de l'ordre de 10% ; alors que sur l'ouvrage, indépendamment de la baisse de résistance, des risques de fissuration sont en plus à craindre.

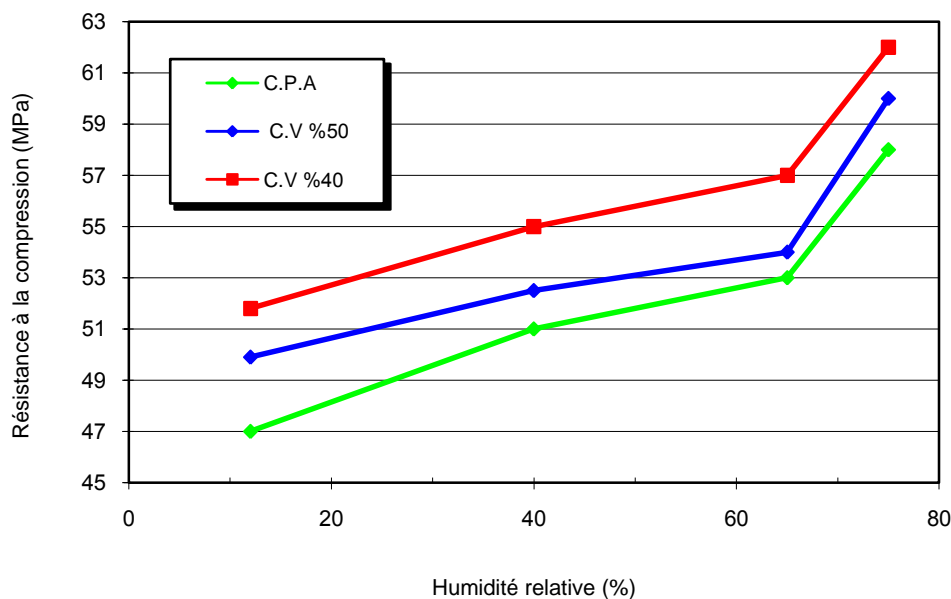


Fig. 1.21- Effet de l'humidité sur l'évolution de la résistance à la compression.

1.5.3 Effet de l'âge

Le béton est un matériau qui évolue dans le temps, dont les caractéristiques se modifient rapidement aux jeunes âges (environ 3 jours) [46]. Ensuite, on note un ralentissement dans le développement des propriétés, en particulier les propriétés mécaniques, ainsi, l'accroissement des résistances mécaniques devient faible au delà de 28ème jours, en effet, les réactions d'hydratations ralentissent avec le temps, à la fois avec la diminution de la disponibilité de l'eau dans le matériau et de l'accroissement de l'épaisseur d'hydrates autour des grains anhydres limitant par la même les échanges diffusionnels entre les cœurs des grains anhydres et la solution interstitielle.

Cependant les réactions d'hydratations peuvent se poursuivre pendant plusieurs années surtout pour des bétons de faible rapport E/C conservé en ambiance humide [46].

Il est conçu à partir de la figure.2.1 que plus la résistance à la compression augmente avec l'âge et atteint et elle est maximale avec un rapport w/c inférieur [47]

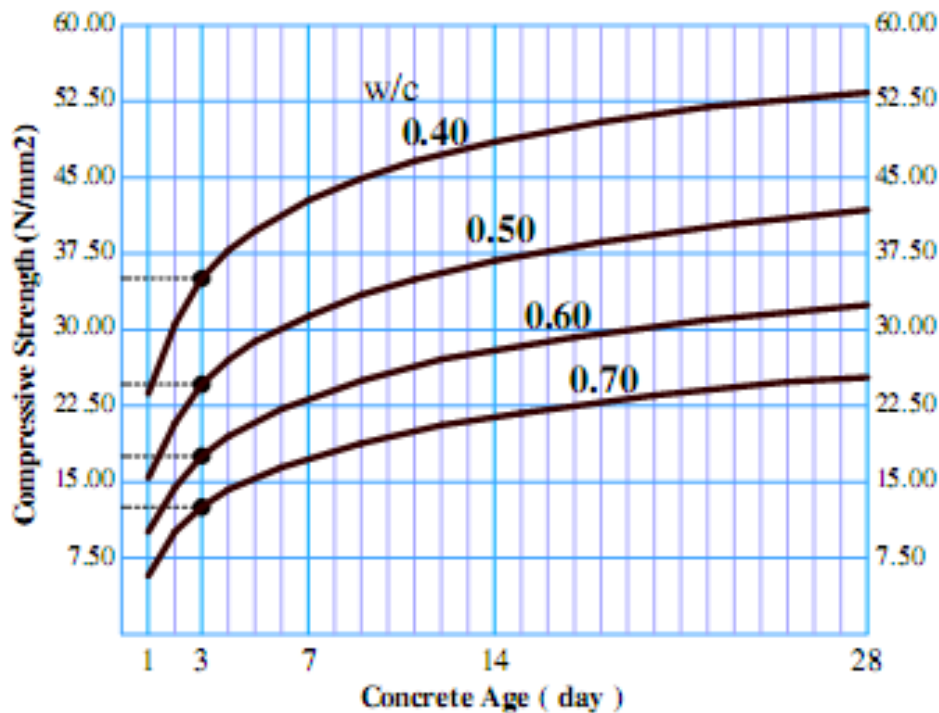


Fig. 1.21-Relation entre l'âge et la résistance à la compression du béton [47].

6 Conclusion

Les résultats des différentes recherches présentés dans ce chapitre montrent que les ajouts cimentaires améliorent significativement les résistances mécaniques des bétons à l'état durci. Mais, vu la lenteur de la réaction pouzzolanique, les résistances mécaniques des ciments à base d'ajouts cimentaires sont inférieures à celles des CPA. Cependant, il existe plusieurs méthodes pour surmonter cet inconvénient. Il est à noter que l'utilisation des ciments ternaires présente plus d'avantages par rapport au ciment binaire ou un CPA seul.

Chapitre 2

Synthèse des Modèles Proposés par Différents chercheurs

2.1 Introduction

La prévision des propriétés du béton est importante dans le domaine de Génie Civil. La résistance a été depuis longtemps considérée comme la qualité essentielle du béton parce qu'elle est liée directement avec la structure de la pâte de ciment. Elle est étroitement dépendante de certains facteurs de la composition du béton.

Ce chapitre présente l'utilisation des modèles pour la prévision de la résistance à la compression du béton avec ajouts cimentaires, ces modèles ont été ensuite comparés par les données expérimentales des différents chercheurs.

2.2 Prévision de la résistance du béton sans ajout

2.2.1 Modèle de Popovics (1985)

La réduction de la porosité dans un matériau solide, augmente sa résistance en général, et le béton, en particulier, qui est reconnu depuis longtemps. Il a été également découvert moins de cinquante ans auparavant, que la porosité a un rôle tout aussi important dans la résistance au gel du béton. En outre, la porosité joue un rôle dans la relation entre les propriétés mécaniques du béton, tels que la résistance à la compression.

En se basant de la formule 2.1 d'Abrams [48], Popovics [49] a développé un modèle de prévision de la résistance à la compression (Eq. 2.2).

$$f = \frac{A}{\frac{W}{B^C}} \quad (2.1)$$

$\frac{W}{C}$: Rapport eau/ciment dans la pâte de ciment frais

A: paramètre de la résistance extrapolée lorsque la porosité capillaire est nulle

B: paramètre caractérisant la porosité capillaire existant à l'âge indiqué dans la pâte de ciment à l'âge donné.

Lorsque la teneur en air est prise en considération l'équation (2.1) s'écrit

$$f = \frac{A}{B \frac{(W+Va)}{c}} = \frac{A}{B \frac{(W+10a)}{c}} \quad (2.2)$$

$V_a = 10.a$: volume d'air

On utilisant la formule donnée par Ryskewitsch [50] et Nurse et al. [51]:

$$f_{rel} = \frac{f}{f_0} = 10^{-\gamma a} \quad (2.3)$$

f_{rel} : la résistance relative

γ : paramètre expérimental indépendant de la résistance et l'âge du matériaux .

En combinant l'équation (2.1) et l'équation (2.3) on obtient l'expression suivante donnant la résistance:

$$f_c = f_0 \times f_{rel} = \frac{31,170}{38,94 \frac{w}{c}} 10^{-0,0384 a} = \frac{31,70}{38,94 \frac{w}{c}} \times 1,093^a \quad (2.4)$$

Le modèle a été comparé avec les résultats expérimentaux obtenus par Glanville et al. [52] montre que la valeur moyenne de l'écart est de 1 MPa.

Le modèle a été aussi comparé par les essais publiés par Ujhelyi [53] sur la résistance à la compression à 28 jours donne la résistance :

$$f_c = f_0 \times f_{rel} = \frac{166,7}{18,53 \frac{w}{c}} 10^{-0,0384 a} = \frac{166,7}{18,53 \frac{w}{c}} \times 1,093^a \quad (2.5)$$

La moyenne des valeurs absolues de l'écart entre les valeurs calculées par l'équation (2.5) et les valeurs expérimentales de Ujhelyi est de 1,6 MPa

Popovics [49] a développé un autre modèle exprimant la résistance en fonction du rapport E/C et la teneur en air pour le ciment de type II et l'âge entre 7 et 90 jours par :

$$f_c = \frac{20,500}{6,4 \frac{W}{C}} 10^{-0,0384a} \frac{1 - 0,4e^{-b_1 t} - 0,6e^{-b_2 t}}{1 - 0,4e^{-90b_1} - 0,6e^{-90b_2}} \quad (2.6)$$

b_1 et b_2 : sont des paramètres qui dépendent de la teneur de C_3S et C_2S , de la résistance et l'âge du béton.

Le modèle a été comparé avec les résultats expérimentaux obtenus par Klieger [54], montre que la valeur moyenne de l'écart est de 2 MPa.

2.2.2 Modèle de Popovics (1990)

En 1990 Popovics [55] a proposé un autre modèle basé sur la formule d'Abrams. L'équation (2.1) peut s'écrire sous la forme:

$$\log f = \log A - \frac{W}{C} \log B = b_0 + b_1 \frac{W}{C} \quad (2.7)$$

La forme générale de l'équation (2.7) :

$$\log f = b_0 + b_1 \frac{W}{C} + b_2 C + b_3 W + b_4 (W + C) + b_5 \log C + b_6 \frac{W^2}{C} + b_7 \left(\frac{W}{C}\right)^2 + b_8 C + b_9 \log C \quad (2.8)$$

C : mesure de la consistance

b_i : Paramètres expérimentaux

Si $b_i = 0$ pour $i > 1$

La formule (2.8) prend la forme :

$$\log f_c = 4,16 - 0,8586 \frac{W}{C} \quad (2.9)$$

La forme exponentielle de la formule (2.9) est la suivante:

$$f_c = \frac{14,42}{7,226^{\frac{w}{c}}} \quad (2.10)$$

Si $b_i = 0$ pour $i > 2$) le modèle prend la forme:

$$\log f_c = 4,43 - 0,792 \frac{W}{C} - 0,00111w \quad (2.11)$$

Les trois modèles ont été comparés avec les résultats expérimentaux de Walker et Bloem [56], montre qu'ils sont caractérisés par un coefficient de corrélation de: **0,84, 0,93, 0,93** respectivement.

Popovics [55] a développé le modèle donné par l'équation (2.8) en un modèle de la forme :

$$f = B_0 + \frac{B_1 w}{c} + B_2 c + B_3 w + B_4 (w + c) + B_5 C + B_6 \log C \quad (2.12)$$

Le modèle a été comparé avec les résultats expérimentaux obtenus par Walker et Bloem [56] Gruenwald [57], Kamenski [58] et Ujhelyi [53] montre que les valeurs des coefficients de corrélation allant de 0,82 à 0,95.

2.3 Prédiction de la résistance à base des cendres volantes

2.3.1 Modèle de Slanicka (1991)

Pour évaluer l'influence des cendres volantes sur la résistance du béton plusieurs auteurs ont employé la formule exponentielle d'Abrams et la formule de Bolomey. Slanicka [59] a proposé un modèle pour de prédiction de la résistance en utilisant la formule modifiée de Bolomey sous la forme suivante:

$$f_c = K \left[\frac{C}{W+A} K_i \left(\frac{F_i}{W+A} \right)^{q_i} - Z \right] \quad (2.13)$$

K et **Z** des constantes empiriques,

K_i: indice d'activité des cendres volantes

q_i: exposant empirique qui correspond au type des cendres volantes **F_i**

D'où :

$$f_c = 27,727 \left[\frac{C}{C+W} + K_i \left(\frac{F_i}{W+A} \right)^{q_i} - 0,63 \right] \quad (2.14)$$

La comparaison avec les résultats expérimentaux de cet auteur montre que l'équation 2.14 présente une erreur type de **4,86 MPa**.

Le modèle a été comparé avec celui donné on utilisant la formule d'Abrams:

- lorsque la teneur en air n'est pas prise en considération la formule (2.1) s'écrit :

$$f_c = \frac{136,93}{18,5^{exp}} \quad (2.15)$$

- lorsque la teneur en air est tenue en compte on obtient la formule (2.2) s'écrit :

$$f_c = \frac{158,32}{17,01^{exp}} \quad (2.16)$$

Les résultats obtenus montrent que la formule (2.15) est caractérisée par un coefficient de corrélation de **0,994** et un écart type $s = \pm 1,26$ MPa. Cela confirme sa bonne utilisation dans les cas où la teneur en air n'est pas considérée.

2.3.2 Modèle de Hwang et al (2004)

Hwang et al. [60] ont proposé un modèle de calcul de la résistance sans ajout donnée par:

$$f_c(t) = A(t) \left(\frac{C}{W} \right) + B(t) \quad (2.17)$$

$f_c(t)$: résistance à la compression à l'âge t (MPa).

C, W dosages en ciment et eau en Kg/m³

$A(t)$: fonction d'âge (t en jour)

$B(t)$: constante

Lorsqu'on introduit des cendres volantes l'équation (3.17) s'écrit :

$$f_c(t) = A(t) \left(\frac{\alpha FA + C}{W} \right) + B \quad (2.18)$$

α : La contribution des cendres volantes

FA : dosage en cendres volantes

$A(t)$ indique le développement de la résistance du béton avec le temps

Selon l'équation de l'ACI:

$$A(t) = \frac{t}{a + bt} \quad (2.19)$$

On remplace $A(t)$, α dans l'équation (2.18) on obtient:

$$f_c(t) = \left(\frac{t}{a + bt} \right) \left(\frac{\alpha_1 \cdot \alpha_2 FA + C}{W} \right) + B \quad (2.20)$$

α est exprimé par:

$$\alpha = k_1(t) \exp \left\{ k_2(t) \cdot \left(\frac{FA}{C} \right) \right\}$$

$k_1(t)$, $k_2(t)$: fonctions d'âge (jours)

$$k_1 = m_1 \{ 1 - \exp(-m_2 t) \} + m_3$$

$$k_2 = n_1 \{ 1 - \exp(-n_2 t) \} + n_3$$

$m_1, m_2, m_3, n_1, n_2, n_3$: Constantes expérimentaux

$$\alpha = \alpha_1 \cdot \alpha_2$$

α_1 : fonction de $\frac{FA}{C}$

α_2 : fonction de surface spécifique des cendres volantes

A partir des résultats expérimentaux concernant le développement de la résistance à la compression du béton avec cendres volantes, les auteurs ont identifié les paramètres du modèle mathématique développé (Eq. 2.20). L'équation peut exprimer le coefficient α , qui indique l'activité de cendres volantes en tant que liant, sous la forme d'une fonction de l'âge, de la teneur en cendres volantes et de sa surface spécifique.

3.4 Prédiction de la résistance à base de la fumée de silice

2.4.1 Modèle de Slanicka (1991)

Afin de mieux déterminer l'impact de la fumée de silice sur la résistance du béton avec un superplastifiant Slanicka [61] a utilisé les formules précédentes.

- Selon la formule modifiée de Bolomey, la formule (2.14) s'écrit :

$$f_c = 28,974 \left[\frac{C}{w+A} + 2,654 \left(\frac{S}{w+A} \right)^{0,673} - 0,41 \right] \quad (2.21)$$

La somme des carrés des écarts σ^2 entre les valeurs mesurées et les valeurs expérimentales de la résistance était de 15,14 et l'erreur s était de 0,917.

- Selon la formule d'Abrams, la formule (2.1) s'écrit:

$$f_c = \frac{164,51}{12,49^{exp}} \quad (2.22)$$

La somme des carrés des écarts σ^2 entre les valeurs mesurées et les valeurs expérimentales de la résistance était de 18,27 et l'erreur s était de $\pm 1,01$.

Les formes générales des modifications des formules d'Abrams et de Bolomey sont avérées efficaces dans les résultats d'autres tests.

2.4.2 Modèle de Duval et Kadri (1998)

Le modèle proposé par Duval et Kadri [20] est basé sur la formule de Bolomey (1935) donnée par:

$$f_{c28} = KR_{c28} \left(\frac{C}{E + V} - 0,5 \right) \quad (2.23)$$

C : Dosage en ciment

E : Dosage en eau

V : volume d'air

K : coefficient qui dépend des caractéristiques des agrégats

R_{c28} : résistance à la compression du mortier après 28 jours.

Lorsqu'on introduit la fumée de silice l'équation (2.23) s'écrit sous la forme suivante:

$$f_{c28} = KR_{c28} \frac{1}{\rho_c} \left(\frac{L}{E + V} \right) \quad (2.24)$$

ρ_c : représente la masse volumique du ciment

L : le contenu effectif du ciment = $C + \alpha \left(\frac{S_f}{C}\right)C$

s_f : Dosage en fumée de silice

Donc l'équation (2.24) peut s'écrire sous la forme suivante:

$$f_c 28 = KR_{c28} \frac{1}{\rho_c} \frac{C}{(E + V)} \left[1 + \alpha \left(\frac{S_f}{C} \right) C \right] \quad (2.25)$$

Si on prend $V=y.E$ et on remplaçant l'expression de $\alpha \left(\frac{S_f}{C}\right)$ dans l'équation (2.25) on obtient:

$$f_c(t) = KR_{c28} \frac{1}{\rho_c} \frac{C}{(y + 1)E} \left\{ A(t) + 1,36 - [2,1 \left(\frac{S_f}{C}\right)^2 - 0,6]^2 \right\} \quad (2.26)$$

Où: $\alpha \left(\frac{S_f}{C}\right) = 0,36 - [2,1 \left(\frac{S_f}{C}\right)^2 - 0,6]^2$

$A(t)$ est la fonction cinétique qui se détermine de la résistance à la compression du béton contrôle à l'âge t on considérant $A(t) = 0$ à 28 jours.

L'erreur entre le modèle et les données expérimentales est de 2.9 MPa avec un coefficient de corrélation de 0,991.

Le modèle a été ensuite comparé avec les résultats obtenus par Babu et Prakash [62] qui ont évalué l'efficacité de la fumée de silice dans le béton en tenant compte d'un «du facteur d'efficacité k_p » donné par la relation suivante:

$$k_p = 0,0015p_r^2 - 0,1223p_r + 2,8502$$

p_r : Pourcentage de la fumée de silice.

On remplace k_p dans l'équation (2.26) ce qui donne:

$$f_c(t) = KR_{c28} \frac{c}{(y+1)E} \left[A(t) + 1 + (0,0015p_r^2 - 0,1223p_r + 2,8502) \frac{sf}{c} \right] \quad (2.27)$$

L'erreur entre les valeurs théoriques et expérimentales est de 4,3MPa avec un coefficient de corrélation de 0.979.

2.4.3 Modèle de Bhanja et Sengupta (2002)

Bhanja et Sengupta [18] ont proposé un modèle de prévision de la résistance à la compression à 28 jours pour des rapports "Eau/liant" allant de 0,3 à 0,42 en utilisant la méthode statistique donné par:

$$\frac{f_{SF}}{f_c} = 1,063 + 0,0159(SF\%) + 0,0007(SF\%)^2 - 0,00003(SF)^3 \quad (2.28)$$

$SF(\%)$: Pourcentage de la fumée de silice

f_c : Résistance du béton à la compression sans ajout

f_{SF} : Résistance du béton à la compression avec fumée de silice

Le modèle est caractérisé par une erreur de 0,079 et un coefficient de corrélation de 0,842. Il a été comparé aux résultats expérimentaux de Hooton [63] sur des éprouvettes cylindriques et de Khedr, Abou-Zeid [19] sur des éprouvettes prismatiques, les résultats montrent que la variation se situe à moins de 7,5%.

Récemment, Bhanja et Sengupta [64], en utilisant la formule d'Abrams (2.1), ont proposé un autre modèle de prévision de la résistance du béton avec fumée de silice à 28 jours, donnée par:

$$\log S = b_1 + b_2 \left(\frac{w}{cm} \right) + b_3 \left(\frac{sf}{c} \right) \quad (2.29)$$

S : Résistance à la compression du béton à 28jours

b_1, b_2, b_3 : Constantes de la régression.

Les paramètres du modèle ont été identifiés statiquement par la méthode des moindres carrés, ce qui donne l'expression suivante:

$$\log S = 2,275 - 1,3366 \left(\frac{w}{cm} \right) + 0,2013 \left(\frac{sf}{c} \right) \quad (2.30)$$

Cette expression est caractérisée par un coefficient de corrélation de 0,93.

Bhanja et Sengupta [64] ont développé le modèle donné par l'éq. (2.29) en introduisant l'activité de la fumée de silice. D'où:

$$\log S = b_4 + b_5 \left(\frac{w}{cm} \right) + b_6 \left(\frac{k.sf}{c} \right) \quad (2.31)$$

k: Efficacité de la fumée de silice

b₄, b₅ et b₆: Paramètres de la régression.

Après l'identification des paramètres du modèle, Bhanja et Sengupta [64] ont obtenu l'expression suivante:

$$\log S = 2,225 - 1,299 \left(\frac{w}{cm} \right) + 0,1325 \left(\frac{k.sf}{c} \right) \quad (2.32)$$

Cette expression est caractérisée par un coefficient de corrélation de 0,98.

2.5 Prédiction de la résistance à base de laitier

2.5.1 Modèle De Larrard (2010)

On se basant de la formule développée de Féret, De Larrard [65] a proposé un modèle donnée par l'expression suivante:

$$f_{cm}(t) = 13,4R_{c28} \left[dt + \left(1 + \rho c \frac{e + a}{Ceq} \right)^{-2,85} \right] EMP^{-0,13} \quad (2.33)$$

ρc : Poids spécifique du ciment

Ceq : Ciment équivalent

L'expression (2.33) s'écrit sous la forme suivante:

$$f_{cm}(t) = 13,4R_{c28} \left[dt + \left(1 + \rho c \frac{e + a}{k_1 l + c(1 + 1,1[\exp(-k'_1 l/c)])} \right)^{-2,85} \right] EMP^{-0,13} \quad (2.34)$$

$$Ceq = k_1 l + c(1 + 1,1[\exp(-k'_1 l/c)])$$

L : : masse de laitier

C : masse de ciment

k_1, k'_1 : paramètres du modèle à déterminer

Le modèle est validé avec les résultats de Uomoto et al. [66] et de Hwang et al. [67], on l'erreur moyenne obtenue est de 0,51 MPa pour les résultats de Uomoto et al. et de 0,33 MPa pour les résultats Hwang et al. [67].

2.5.2 Modèle de Shariq et al (2011)

Shariq et al. [68] ont proposé des modèles de prédiction de la résistance à la compression du béton contenant de laitier et de la forme:

$$(f_c)_t = \left(\frac{t}{6,527+0,787t}\right) \left(\frac{W}{C}\right)^{-0,09} \exp(-0,061ps) (f_c)_{28} \quad (2.35)$$

$$(f'_c)_t = \left(\frac{t}{6,494+0,8t}\right) \left(\frac{W}{C}\right)^{-0,09} \exp(-0,048ps) (f'_c)_{28} \quad (2.36)$$

$(f_c)_t$: Résistance à la compression sur des éprouvettes cubiques à l'instant t (MPa).

t : Age (jours)

$\frac{W}{C}$: Rapport eau-ciment

ps : pourcentage en laitier

$(f'_c)_t$: à la compression sur des éprouvettes cylindriques à l'instant t (MPa).

Les résultats prédits par les modèles 2.35 et 2.36 ont été comparé avec les résultats expérimentaux des auteurs. Ils ont constaté que l'erreur est inférieure à $\pm 10\%$.

2.6 Prévion de la résistance à base de calcaire

2.6.1 Modèle de Bentz et al (2009)

En se basant sur la formule de Power [69] donnée par:

$$f_c = f_o \cdot X^n \quad (2.37)$$

f_c = Résistance à la compression (MPa)

f_o : Résistance intrinsèque qui dépend de la composition du ciment et de la taille des particules

n : Valeur entre 2.6 and 3.0.

X : Rapport gel-espace.

Bentz et al. [70], ont proposé un modèle de la forme suivante:

$$f_c = 75,75 \cdot X^{2,677} \quad (2.38)$$

Où:

$$X = \frac{0,68\alpha}{0,32\alpha + \frac{w}{c}}$$

α : Degré d'hydratation du ciment

La comparaison avec les résultats expérimentaux de Bonavetti et al. [71,72] et de Irassar [73] montre que la formule (2.38) présente un coefficient de corrélation de 0,95.

2.7 Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté quelques modèles de prévision de la résistance à la compression du béton sans ou avec ajout cimentaire tels que (fumée de silice, cendres volantes, laitier, calcaire) donnés par les différents chercheurs.

Il est à noter, que les études consacrées à la prévision de la résistance à la compression bétons à base de pouzzolane naturelle, sont rares dans la littérature. Pour cette raison, nous tentons, dans le chapitre 3, d'élaborer un modèle de prévision de la résistance à la compression des mortiers et bétons à base de la pouzzolane naturelle.

Chapitre 3

Elaboration d'un modèle de prévision de la résistance à la compression

3.1 Introduction

Ce chapitre décrit la méthodologie de l'élaboration d'un modèle pour la prévision de la résistance à la compression du béton à la pouzzolane naturelle, ainsi de modéliser la contribution de la pouzzolane naturelle à la résistance en compression des bétons afin de pouvoir intégrer ces matériaux dans un logiciel d'aide à la formulation des bétons. Cette étude vise à trouver une équation pour estimer la résistance en compression du béton.

3.2 Modèle de résistance en compression

Dans cette partie on présentera les différentes étapes de l'élaboration d'un modèle mathématique pour la prévision de la résistance à la compression du béton qui tient en compte le rapport eau-liant E/L , le dosage en pouzzolane naturelle p et le facteur temps t :

$$f_c = f\left(\frac{E}{L}, p, t\right) \quad (3.1)$$

3.2.1 Le rapport "eau/liant"

Le rapport E/C est l'une des valeurs caractéristiques les plus importantes du béton frais et du béton durci. Lorsque le rapport E/C augmente, le béton frais devient plus plastique et son ouvrabilité ainsi que sa compactibilité s'améliorent. Par contre, la qualité d'un béton après durcissement est d'autant meilleure que le rapport E/C est faible.

L'augmentation du rapport "Eau/Ciment" conduit à diminuer la résistance béton. La formule originale proposée par Abrams[55] est la suivante :

$$f_c = \frac{A}{B \frac{W}{C}} \quad (3.2)$$

W : Dosage en eau

C : Dosage en ciment

A, B : coefficients

Popovics [49] a développé un modèle de résistance de forme linéaire donné par:

$$f = A + \frac{W}{C} B \quad (3.3)$$

Le modèle a été comparé avec la formule d'Abrams sur des données expérimentales de quatre sources différentes, la comparaison a montré que le modèle linéaire présente de bons résultats que celui donné par Abrams[48].

Jee et al.[74] ont proposé une relation semblable à celle d'Abrams, mais il se rapporte à la résistance à la compression en fonction de C/E et non au rapport E/C. Selon ces auteurs, la résistance est proportionnelle à C/E et la forme générale du modèle est la suivante:

$$f = A + \frac{C}{W} B \quad (3.4)$$

Pour mettre en évidence l'effet du rapport E/C sur la résistance du béton avec cendres volantes Olukom[25] a transformé la formule d'Abrams comme suit:

$$\log(f_c) = \log(A) + \log(B) = a + \frac{W}{C} b \quad (3.5)$$

Des études similaires ont été faites par Slanika [61] pour montrer l'effet de la finesse des centres volants sur la résistance du béton en exprimant la résistance (3.2) par:

$$f_c = \frac{A}{B \cdot \exp \frac{W}{F+C}} \quad (3.6)$$

Selon Subrato et al.[75], La relation entre la résistance à la compression f_c et le rapport eau sur liant W/L ayant une forme exponentielle. Une relation similaire, lors de l'incorporation d'un ajout cimentaire peut être écrite sous la forme de l'expression suivante:

$$f_c = a \cdot e^{b\left(\frac{W}{L}\right)} \quad (3.7)$$

$\frac{W}{L}$: rapport eau-liant

a et b sont des constantes

L'équation (3.7) est en outre modifiée en considérant que $\frac{f_c}{f_m}$ est inversement proportionnelle à

$\frac{W}{L}$ dans la même manière que f_c varie avec $\frac{W}{L}$:

$$\frac{f_c}{f_m} = \alpha \cdot e^{\beta\left(\frac{W}{L}\right)} \quad (3.8)$$

Avec f_m : la résistance

3.2.2 Effet du dosage en ajout cimentaire

Bhanja et Sengupta[64] en se basant de la formule d'Abrams modifiée, ont développé un modèle de résistance à la compression en fumée de silice à 28 jours pour des valeurs de E/C allant de 0,3 à 0,4 comme suit:

$$\log f_c = b_1 + b_2 \frac{E}{L} + b_3 p \quad (3.9)$$

$\frac{E}{L}$: Rapport eau-liant

p : pourcentage en fumée de silice

3.2.3 Effet de l'âge

On se basant des travaux Jee et al.[74],Hwanget al. [60] ont proposé une relation de développement,de résistance à la compression du béton à base de cendres volantes,en fonction de l'âge par :

$$f_c(t) = A(t) \frac{\alpha FA + C}{W} + B \quad (3.10)$$

B: constante

α :L'indice d'activité des cendres volantes

$A(t)$ qui indique le développement de la résistance avec le temps est donnée Selon ACI 209[83] par:

$$A(t) = \frac{at}{bt + c} \quad (3.11)$$

avec: a, b, c constantes empiriques

3.3 Elaboration d'un modèle de prévision de la résistance à la compression

Considérant la contribution de la pouzzolane naturelle, d'après l'équation (3.9)

De l'équation (3.9) on écrit f_c comme suit :

$$f_c = a. \exp(b_1) . \exp\left(b_2 \frac{E}{L} + b_3 p\right) \quad (3.12)$$

Le rapport $\frac{f_c}{f(0)}$ est inversement proportionnelle à $\frac{E}{L} + p$ et par conséquent

$$\frac{f_c}{f(0)} = A. \exp\left(b_2 \frac{E}{L} + b_3 p\right) \quad (3.13)$$

$f(0)$: résistance à la compression sans ajout

3.3.1 Forme générale du modèle

Le problème abordé est la modélisation de la résistance à tout âge. Il s'agit de développer une relation ou delà de 1 jour.

En remplaçant A(t) (Eq. 3.11) dans l'équation (3.13), on obtient la forme générale du modèle:

$$f_c(p) = f(0) \frac{at}{bt + c} \cdot \exp\left(d \frac{E}{L} + e \cdot p\right) \quad (3.14)$$

f(0): résistance à la compression du bétonsans ajout

t : Age du béton en jour

E : Dosage en eau

L : Dosage en liant

p :pourcentage en pouzzolane naturelle.

a, b, c, d, e: paramètres du modèle peuvent être déterminés en utilisant le logiciel STASTICA.

3.4 Données de base

Les données concernant les bétons à la pouzzolane naturelle ont été extraits et rassemblés de projets de recherche et de la littérature (24 sources différentes pour construire la base de données. On a également utilisé les résultats, que l'on présente en détail ici, des études plus récentes sur des mortiers et bétons à la pouzzolane naturelle tableaux **3.1 et 3.2**. Toutes les résistances ont été mesurées et testées sur des cubes de 10 cm, tiers de prismes 4x4x16 cm et 7x7x28 cm, certains des mélanges ont été testés sur des cylindres 16x32 cm et 10x20 cm 15 x 15,15 x 30 sous des conditions de cures normales dont la majorité ont été curés dans l'eau.

Tableau 3.1- Organisation de la Base de Données du Modèle de la Prévision de la Résistance à la Compression du mortier à la pouzzolane.

Auteur (année) [Réf.]	Ciment (g/m ³)	Pouzzolane naturelle		w/L	Age	Nombre de point
		Origine	P %)			
Shannag et Yeginobali (1995)[76]	292,5-450	Turkey	25-35	0,6	3-90	8
Targan et al. (2003) [77]	315-450	Turkey	5-30	0,50	2-90	30
Uzal et Turanli (2003) [78]	202,25-450	Turkey	0-55	0,45	3-91	16
Turanli et al. (2004) [79]	202,5-450	Turkey	30-55	0,45	3-91	12
Turanli et al. (2005) [80]	202,5-450	Turkey	35-55	0,44-0,50	3-90	12
Ghrici et al. (2006) [81]	270-450	Algérie	10-40	0,50	2-90	16
Yetgin et çavdar (2006) [82]	292,5-450	Turkey	10-35	0,50	1-28	20
Erdem et al. (2007) [83]	315 -450	Turkey	20-30	0,50-0,52	2-91	96
Yilmaz et al. (2007) [84]	292,5-450	Turkey	5-40	0,50	1-28	16
Ghrici et al.(2007) [85]	315-450	Algérie	10-30	0,50	2-90	16
Fajardo et al. (2009) [86]	320,8-401	Mexique	10-20	0,65	28-56	4
Naseer et al. (2008) [87]	-	Pakistan	10-30	0,485	7-28	12

Tableau 3.2- Organisation de la Base de Données du Modèle de la Prévision de la Résistance à la Compression du béton à la pouzzolane

Auteur (année) [Réf.]	Ciment (kg/m ³)	Pouzzolane naturelle		W/L	Age	Nombre de point
		Origine	P (%)			
Shannag et Yeginobali (1995) [76]	241,15 -371	Turkey	15-35	0,61	7-90	30
Chan et Ji (1999) [88]	385 -550	Chine	5-30	0,28-0,45	7-28	8
Tagnit et al (2003) [89]	302 -432	Turkey	15-30	0,40	1-365	12
Pekmezci et Akyuz (2004) [35]	244-402	Turkey	13-40	0.45-0,81	28	12
Hossain et Lachemi (2004) [90]	280 -400	Turkey	5-40	0,45	28	5
Hossain et Lachemi (2006) [91]	208 -461	Turkey	2-75	0,40-0,58	7-91	112
Uzal et al (2007) [92]	200-400	Turkey	50	0,45-0,61	3-180	15
Hossain et Lachemi (2007) [93]	425 -500		5-20	0,30	28-56	8
Kaid et al (2009) [94]	336 -420	Algerie	10-20	0,4-0,44	3-270	32
Olawuyi et Olusola (2010) [95]	204,4-292		10-30	0,65	7-28	12
de Nili et Salehi (2010) [96]	327,2 -540	Iran	15-30	0,30-0,46	1-7	16
Pantawee [97]	-	Thailand	5-25	0,5	3-90	60
Khan et Alhozaimy (2001) [39]	-	Arabi Saoudite	17-25	0,55	7-180	18
Muga et al (2005)[98]	-		6,25-50	0,5-0,6	7-56	18
Naseer et al (2008) [87]	-	Pakistan	10-40	0,55	7-28	16
Khan et Alhozaimy (2005) [99]		Arabi Saoudite		0.55	7-90	12

Note :

P : Pourcentage de remplacement de la pouzzolane naturelle

$\frac{E}{L}$: Eau/Liant

3.5 Développement du modèle de résistance en compression

On peut modéliser la prévision de la résistance à la compression du béton en pouzzolane par l'expression suivante :

$$f_c \left(\frac{E}{L}, p, t \right) = f \left(\frac{E}{L}, 0, 28 \right) \frac{at}{bt + c} \cdot \exp \left(d \frac{E}{L} + e \cdot p \right) \quad (3.15)$$

t : âge en jour

E/L: rapport Eau/liant

$p(\%)$: pourcentage en pouzzolane naturelle

$f(E/L, 0, 28)$: résistance à la compression du béton sans ajout à 28jours (MPa)

A l'aide du Logiciel STATISTICA version nous avons déterminé les paramètres du modèle (Eq. 3.15).

L'expression de la résistance à la compression du béton contenant de la pouzzolane naturelle est donnée par :

$$f_c \left(\frac{E}{L}, t, p \right) = f \left(\frac{E}{L}, 0, 28 \right) \cdot \frac{126.25t}{87.7t + 341.75} \exp \left(-0.47 \frac{E}{L} - 0.009p \right) \quad (3.16)$$

L'expression de la résistance à la compression du mortier contenant de la pouzzolane naturelle est donnée par:

$$f_c \left(\frac{E}{L}, t, p \right) = f \left(\frac{E}{L}, 0, 28 \right) \cdot \frac{10t}{8.87t + 39.76} \exp \left(0.038 \frac{E}{L} - 0.0087p \right) \quad (3.17)$$

3.6 Domaine de validité du modélé

Les coefficients de corrélation obtenus sont de $R=0.96$ et $R=0.88$ pour les bétons et les mortiers respectivement. Il est à noter que les équations (3.16) et (3.17) sont valables dans les conditions suivantes (Tableaux 3.3 et 3.4):

Tableau 3.3- Valeurs maximales et minimales des paramètres du modèle pour la résistance du béton

Paramètre	Valeur minimale	Valeur maximale
t (jour)	1	365
$p(\%)$	2	75
E/L	0,27	0,81
$f(28)$(MPa)	12.2	85

Tableau 3.4- Valeurs maximales et minimales des paramètres du modèle pour la résistance du mortier

Paramètre	Valeur minimale	Valeur maximale
t (jour)	2	91
$p(\%)$	10	55
E/L	0,44	0,65
$f(28)$(MPa)	12	60,8

3.7 Etalonnage des modèles

Une optimisation du modèle a été comparée par les travaux de vingt et un chercheurs avec vingt huit jeux de données ont été utilisés. Ils ont permis d'obtenir six cent quarante quatre résultats de résistance à la compression. Trois cent quatre vingt six pour le béton à la pouzzolane naturelle et deux cent cinquante huit pour le mortier à la pouzzolane naturelle. Après étalonnage des modèles proposés l'erreur entre le modèle et les résultats expérimentaux est de 3.41 MPa avec un coefficient de corrélation de 0.92 pour le béton **figure 3.1**. En effet, l'erreur entre le modèle et les valeurs expérimentaux est de 4.3MPa un coefficient de corrélation de 94 pour le mortier **figure 3.2**.

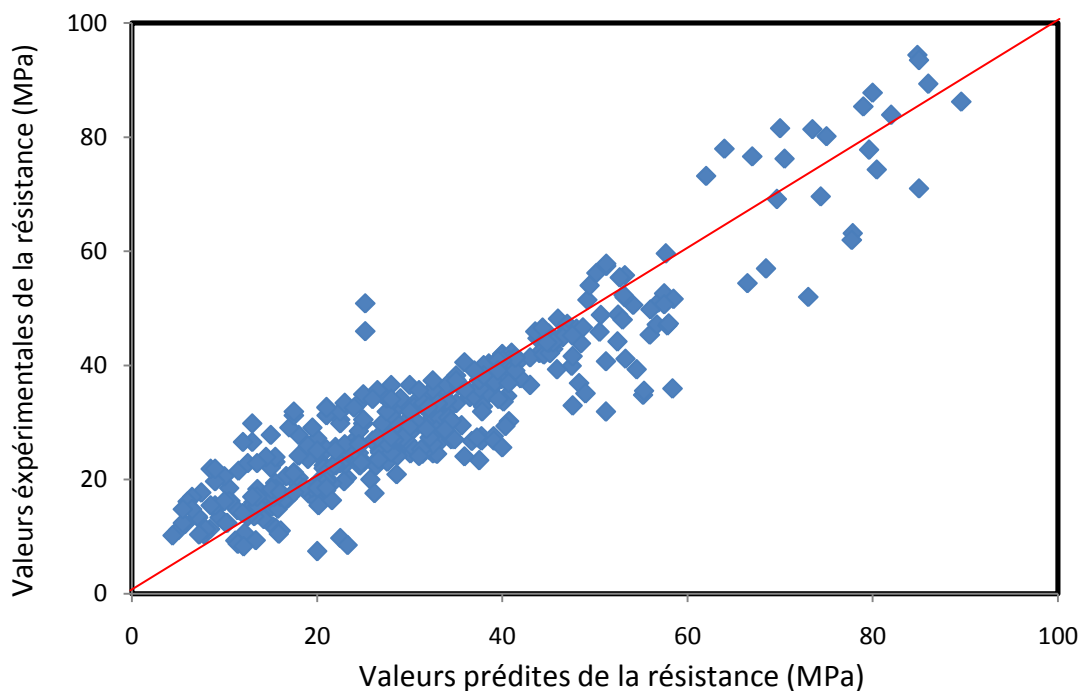


Figure 3.1-Comparaison des résistances expérimentales et théoriques
du béton en pouzzolane naturelle

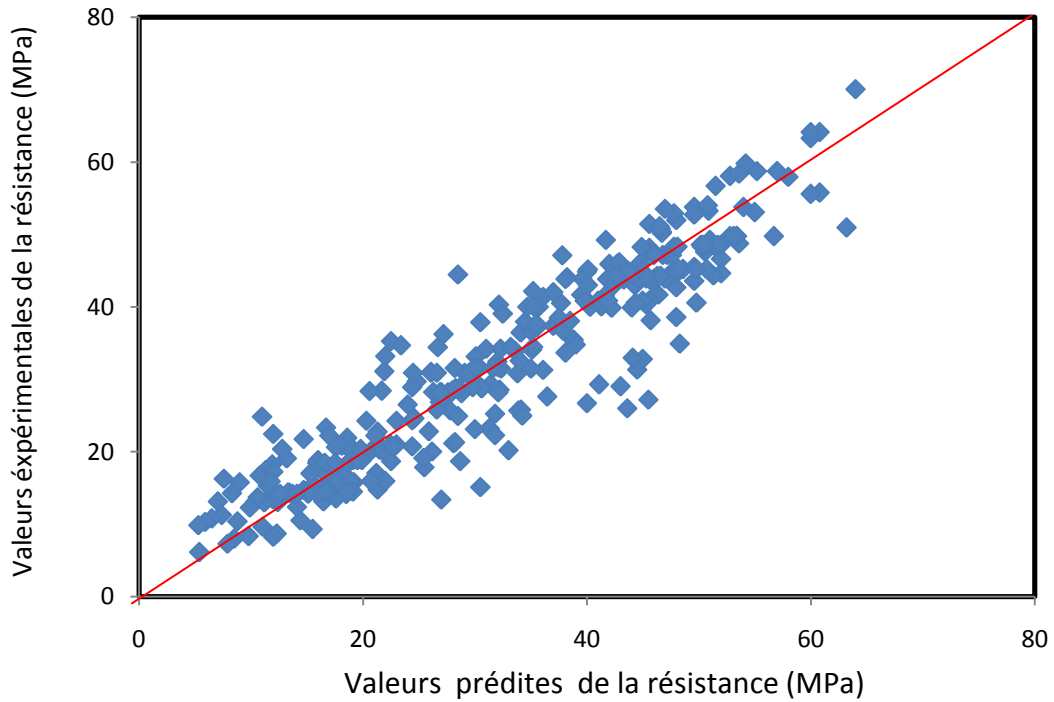


Figure 3.2- Comparaison des résistances expérimentales et théoriques du mortier en pouzzolane naturelle

Les figures 3.3 et 3.4 montrent l'évolution de la résistance pour des rapports E/C allant de 0,6 à 0,5.

On remarque la résistance est inversement proportionnelle avec le rapport E/C et que la résistance sont nettement inférieures à celle du béton contrôle et le mortier contrôle.

On note ainsi que la résistance diminue considérablement avec l'augmentation du pourcentage en pouzzolane naturelle.

Les figures montrent que les modèles présentent des réductions de résistances de 9%, 17% et 23% pour des taux de pouzzolane allant de 10%, 20% et 30% respectivement durant toute la période d'évolution par contre pour le mortier on remarque une réduction de la résistance de 8,3%, 16% et 23% pour les mêmes dosages en pouzzolane.

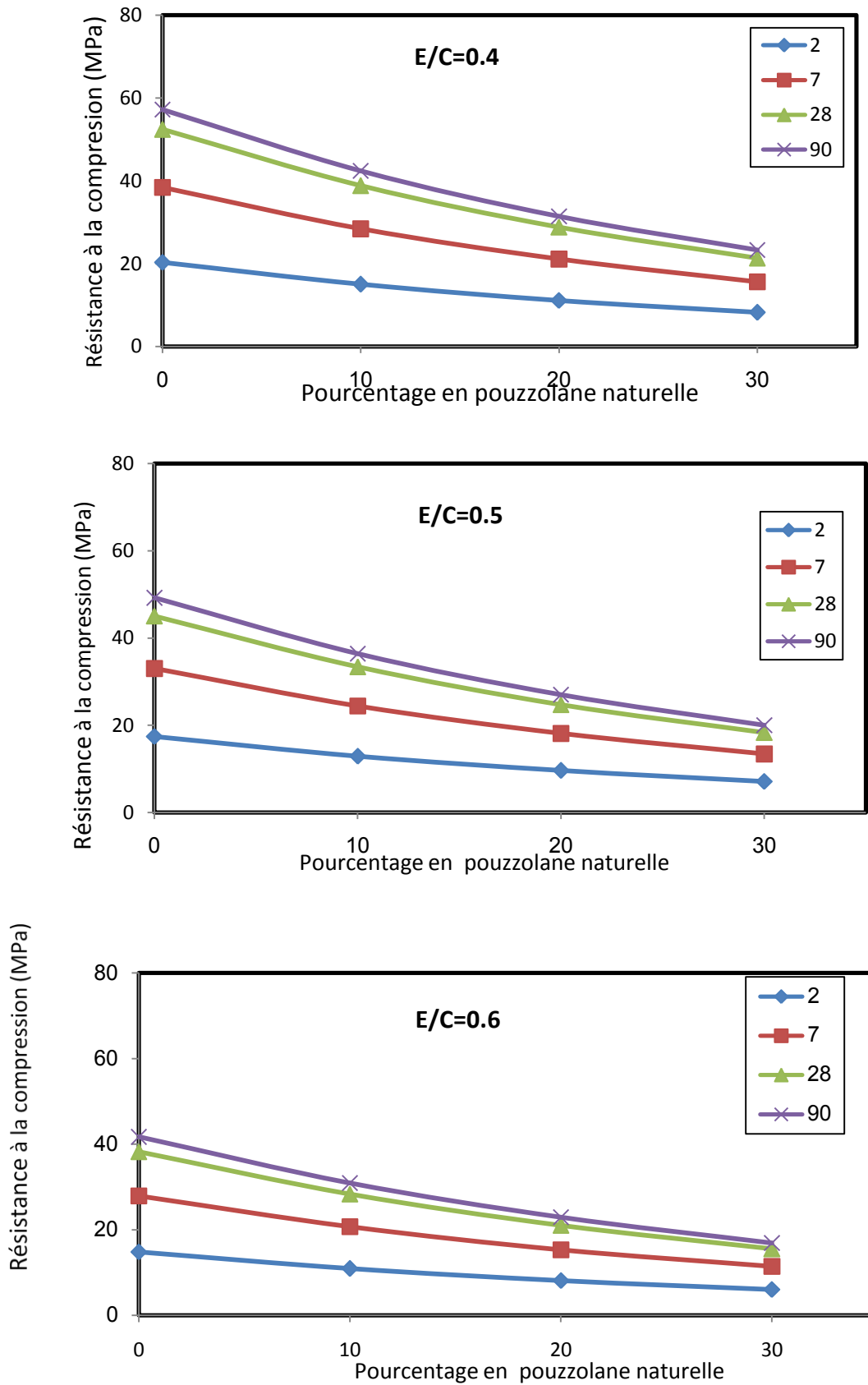


Figure 3.3- Evolution de la résistance à la compression du mortier en fonction du pourcentage en pouzzolane naturelle

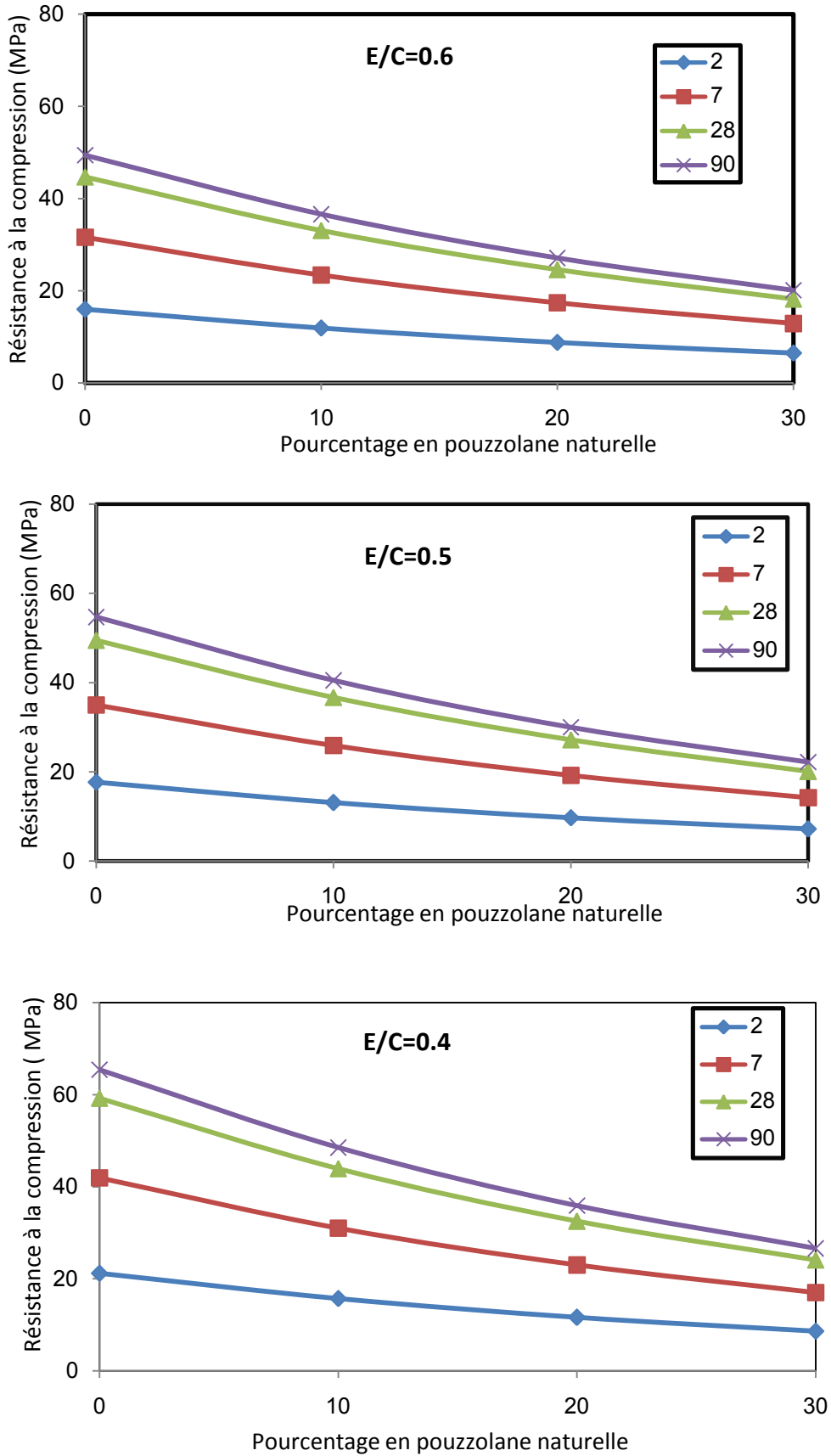


Figure 3.4- Evolution de la résistance à la compression du béton en fonction du pourcentage en pouzzolane naturelle

On constate que l'allure des courbes des figures 3.3 et 3.4 est semblable à celle de la figure 3.5 qui représente les résultats obtenus par Yeh [100] pour le laitier.

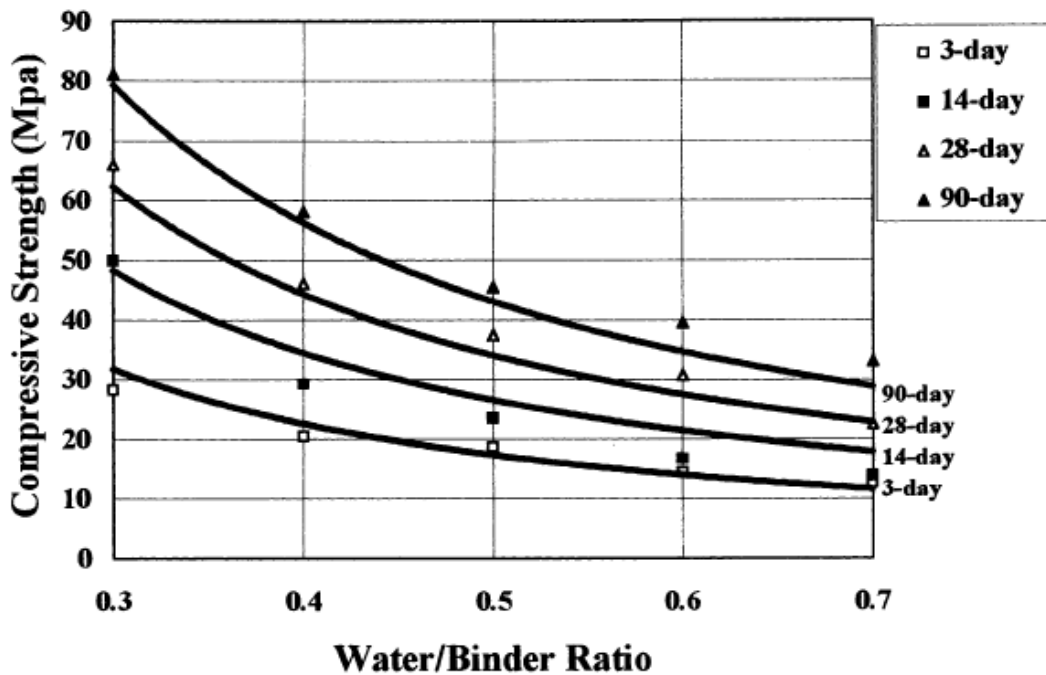


Fig. 3.5- Evolution de la résistance à la compression du béton à base de laitier en fonction du rapport E/L pour différents âges [100]

3.8 Conclusion

Dans ce chapitre, un modèle mathématique a été développé pour prédire la compression du béton ou du mortier contenant la pouzzolane naturelle.

Le modèle a une forme exponentielle dont les variables sont connues à partir du malaxage. Il a été validé sur 644 données provenant de l'expérimentation des auteurs, les résultats montrent que le modèle présente une valeur de corrélation de 0.94 et 0.92 avec une erreur de 3.41 et 4.3 MPa pour le mortier et le béton respectivement à l'âge de 1 à 91 jours pour le mortier et de 1 à 365 jours pour le béton.

Chapitre 4

Validation Expérimentale

4.1 Introduction

L'objectif principal de ce chapitre est d'évaluer la capacité des modèles développés à prédire la résistance à la compression du béton contenant de la pouzzolane naturelle

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

- on réalise dans un premier temps un programme expérimental dans le but d'obtenir des résultats expérimentaux sur la résistance à la compression à partir des essais réalisés sur 12 formulations de bétons avec de divers rapports eau-liant;
- dans un second temps, pour valider ce travail de modélisation, les différents essais effectués au cours du programme expérimental sont comparées aux résultats numériques du modèle développé et aux résultats numériques des modèles des règlements.

4.2 Etude en laboratoire

Les essais ont été effectués sur des spécimens confectionnés par différents types de bétons qui sont fabriqués au niveau de laboratoire et examinés à différents âges. Le béton à la pouzzolane naturelle à examiner est basé sur une variation de trois paramètres, en faisant varier le dosage en pouzzolane, le rapport E/L (0.6, 0.5, 0.4) ainsi que l'âge qui est de 2, 7, 28 et 90 jours, alors on obtient quatre types de bétons examinés à quatre âges.

4.2.1 Matériaux utilisés

4.2.1.1 Ciment utilisé

Le ciment utilisé est un ciment Portland CEMI 42.5 provenant de la cimenterie de SIG (Algérie). Ses compositions chimiques et physiques sont reportées au tableau 4.1.

Tableau 4.1- Composition chimique du ciment et de la pouzzolane naturelle utilisés dans le programme expérimental.

Liant	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	SSB (m ² /kg)
Ciment	22.07	6.41	4.16	63.83	0.21	-	-	1.49	310
Pouzzolane Naturelle	46.86	16.62	9.37	9.38	2.84	-	-	0.36	400

4.2.1.2 la pouzzolane naturelle

Une pouzzolane naturelle d'origine volcanique extraite du gisement de Bouhamdi situé au sud de Beni-Saf (Algérie) est utilisée dans cette étude. Cette pouzzolane présente une masse volumique apparente de $1,2 \text{ t/m}^3$, une masse volumique absolue de $2,6 \text{ t/m}^3$ et une humidité d'environ 30% d'où la nécessité d'un séchage préalable. Elle est broyée à une finesse de $4100 \text{ cm}^2/\text{g}$. L'analyse chimique de cette pouzzolane est donnée dans le tableau 4.1.

4.2.1.3 Granulats

Le gravier utilisé est un gravier concassé à deux classes granulaires provenant de la carrière d'Oued Chlef.

4.2.1.4 Sable

On a utilisé un sable naturel de rivière ayant un module de finesse de 2.6.

4.2.1.5 Eau de gâchage

L'eau utilisée pour le gâchage du béton est celle du robinet. Elle est considérée comme potable. Elle est exempte de toute impureté nuisible au béton.

4.2.1.6 Superplastifiant

Le Superplastifiant de type naphthalène-sulfonâtes. sa densité relative à 25°C est de 1.21 avec un pourcentage en extrait sec de 40.5%. La teneur en super plastifiant 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 la résistance du béton à un rapport E/L donné est principalement dû à la présence de la pouzzolane naturelle.

4.2.2 Matériel utilisé

Le béton à examiner a été confectionné dans des moules métalliques de forme cubique de 10 cm d'arête. On a utilisé un malaxeur de béton à axe vertical et à cuve fixe d'une capacité de 130 litres (Fig. 4.1). Les essais d'écrasement des éprouvettes ont été réalisés à l'aide d'une presse hydraulique de classe A et de charge maximale 3000 kN (Fig.4.2).



Fig. 4.1- Malaxeur à béton.



Fig. 4.2- Presse hydraulique.

4.2.3 Déroulement de l'essai

4.2.3.1 Formulation du béton

La composition des différents bétons étudiés à base de pouzzolane naturelle avec différents dosages en pouzzolane naturelle et différents rapports E/L est résumée dans le **tableau 4.2**.

Tableau 4.2- Formulations des bétons utilisés pour la confection des éprouvettes.

Désignation	Rapport E/L	Quantité d'ajout (%)	Quantité de ciment (Kg/m ³)	Quantité d'eau (L)	Adjuvant (%)	Granulats grossiers	Granulats fins
B1P0	0.6	0	350	210	0	1130	720
B1P10		10	305	210	0	1130	720
B1P20		20	280	210	0	1130	720
B1P30		30	245	210	0	1130	720
B2P0	0.5	0	400	200	1	1100	720
B2P10		10	360	200	1.2	1100	720
B2P20		20	320	200	1.5	1100	720
B2P30		30	280	200	1.9	1100	720
B3P0	0.4	0	450	180	1.8	1050	720
B3P10		10	405	180	2.1	1050	720
B3P20		20	360	180	2.5	1050	720
B3P30		30	315	180	2.8	1050	720

Note :

E/L : Rapport eau-liant

4.2.3.2 Environnement de conservation

Les différents types de bétons sont tous fabriqués dans l'environnement de laboratoire. Juste après la confection toutes les éprouvettes ont été couvertes afin d'éviter les risques

d'évaporation excessive et le retrait plastique (Fig. 4.3). Après 24 heures les éprouvettes ont été démoulées et conservées en bassin d'eau saturée de chaux à une température de $25\pm 3^{\circ}\text{C}$ jusqu'à le jour des essais (Fig. 4.4). Tous les essais ont été faits au laboratoire des matériaux de construction dans le département génie civil à l'université de Chlef.



Fig. 4.3- Conservation des éprouvettes avant démoulage.



Fig. 4.4- Conservation des éprouvettes après démoulage.

4.2.3.4 Procédure d'essais

Après avoir lavé et ensuite séché les granulats utilisés, tous les mélanges ont été gâchés dans un malaxeur. Les constituants ont été introduits dans l'ordre suivant: gravier, ciment, pouzzolane naturelle et sable. Après un malaxage à sec de l'ordre d'une minute, l'eau de gâchage est ajoutée et le malaxage se poursuit pendant au moins deux minutes pour obtenir un mélange homogène. Juste après chaque malaxage, l'ouvrabilité a été mesurée en utilisant le cône d'Abrams. Le serrage des éprouvettes a été réalisé par une table vibrante.

Les essais destructifs ont été effectués sur les éprouvettes à l'âge de 2, 7, 28 et 90 jours. Les essais ont été effectués par écrasement d'éprouvette sous une charge appliquée jusqu'à la rupture. Le résultat d'essai correspondant à chaque éprouvette est la valeur de la charge finale de rupture.

4.3 Présentation et analyse des résultats

L'ensemble des résultats des essais réalisés sur la résistance à la compression des mélanges de béton sont indiqués dans le tableau 4.3 et reportés sur la figure 4.5. Chaque mesure de la résistance à la compression représente la valeur moyenne de trois valeurs.

Tableau 4.3 Résistance à la compression des éprouvettes.

E/L	P(%)	Pouzzolane naturelle			
		2	7	28	90
0.6	0	18.1	29.7	39.5	41.5
	10	15.2	24.5	37.5	41.7
	20	11.7	22	32.5	40.3
	30	9.5	17.7	27.5	35.3
0.5	0	23.8	37	44.5	48.3
	10	21.2	35.2	41.5	45.8
	20	18.4	30.5	37.5	44.7
	30	13.2	25.7	36	40
0.4	0	26.3	43.8	54	57
	10	25	45	52	56
	20	20	35.8	51	53.8
	30	16.3	31.5	43.5	52

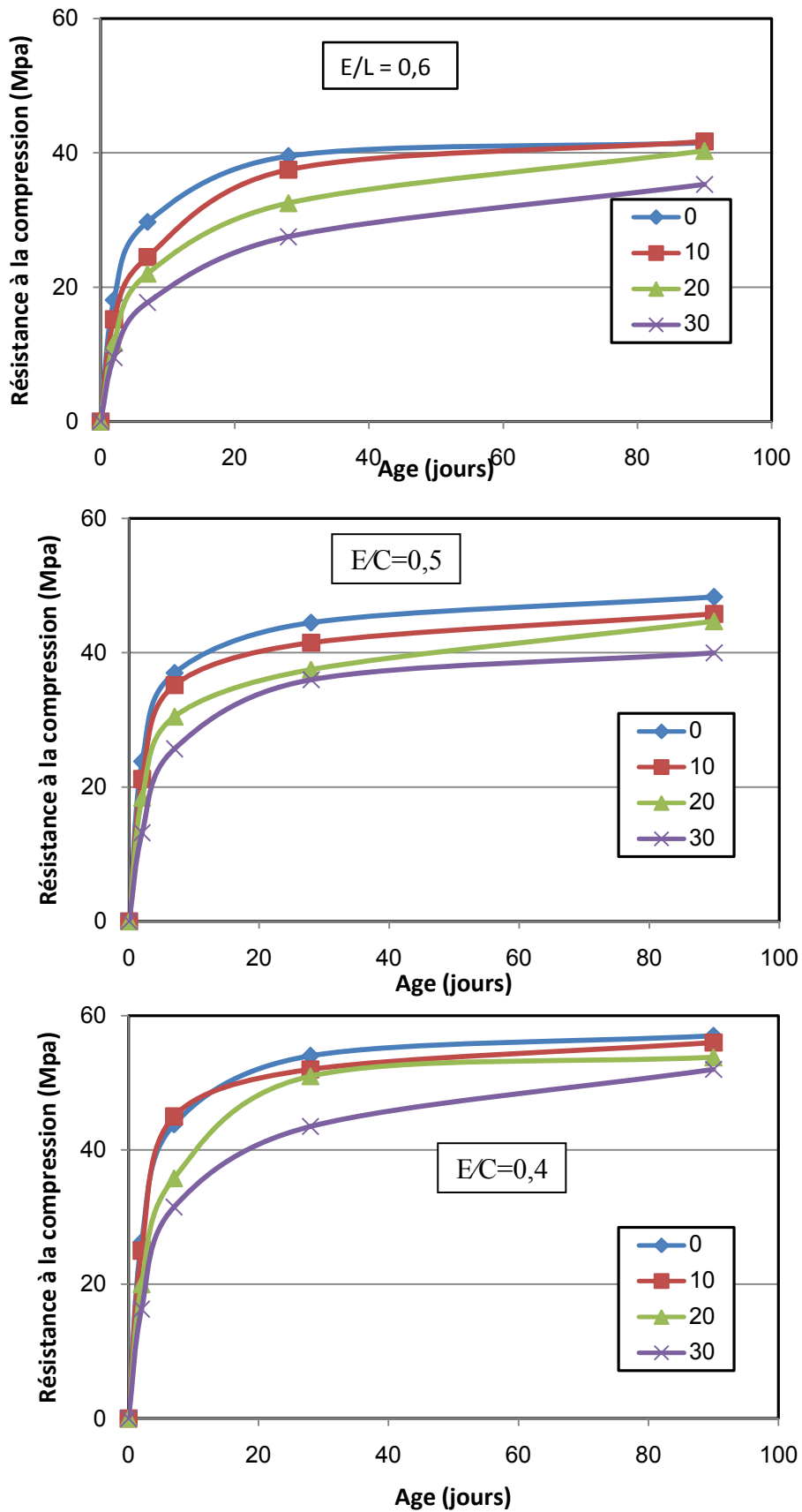


Fig. 4.5- Variation de la résistance à la compression en fonction de l'âge et du pourcentage de la pouzzolane naturelle pour différents rapport "E/L".

La figure 4.5 montre la variation de la résistance à la compression des mortiers en fonction des pourcentages de la pouzzolane naturelle pour différents âges et différents rapports "E/L". On remarque que les résistances de tous les mortiers augmentent régulièrement avec l'âge et ne présentent aucune chute de résistance. La résistance à la compression diminue avec l'augmentation du pourcentage d'ajout au jeune âge. Cette diminution de la résistance est considérable surtout à 2, 7 et 28 jours. Cette diminution de la résistance est attribuée principalement à la réactivité lente de la pouzzolane naturelle [6]. Ce phénomène s'explique par la lenteur de la réaction entre la silice réactive de la partie vitreuse de la pouzzolane et le Ca(OH)_2 libéré lors de l'hydratation du CPA. La réaction pouzzolanique n'est pas prédominante au jeune âge, ceci mène à une hydratation moins intense aux jeunes âges en induisant de faibles résistances. Dû au fait qu'à long terme, la réaction pouzzolanique continue son effet en formant des C-S-H supplémentaires qui améliorent l'interface pâte-granulat, ainsi qu'à la diminution de la porosité capillaire du mortier; alors, le degré d'hydratation augmente, donnant par la suite des résistances comparables et parfois élevées par rapport à celles du mortier contrôle à l'âge de 90 jours.

4.4 Validité des modèles élaborés

4.4.1 Validité du modèle de prévision de la résistance du béton

Pour la prévision de la variation de la résistance à la compression avec le temps plusieurs modèles ont été proposés par différents codes et règlements. Les modèles donnés par les équations 4.1 et 4.2 ont été recommandés par Le Comité ACI 209 [101] et le CEB-FIP [102] respectivement.

$$(f'_c)_t = \left(\frac{t}{4 + 0.85t} \right) (f'_c)_{28} \quad (4.1)$$

$$(f'_c)_t = \exp \left(0.25 \left(1 - \sqrt{\frac{28}{t}} \right) \right) (f'_c)_{28} \quad (4.2)$$

où :

- $(f_c)_t$ est la résistance à la compression du béton à l'âge t en MPa,
- t est le temps en jours,
- $(f_c)_{28}$ est la résistance à la compression à 28 jours en MPa.

Les Tableaux de 4.4 à 4.6 montrent la comparaison des valeurs expérimentales de la résistance à la compression avec les valeurs obtenues par les modèles de prédiction de l'ACI-209 (Eq. 4.1), du CEB-FIP (Eq. 4.2) et de notre modèle de prédiction (Eq. 3.16) pour tous les mélanges. Aucun écart considérable n'a été observé à un âge précoce. On constate des figures 4.6 à 4.8 qu'à l'âge précoce de 0 à 28 jours la résistance mesurée est presque identique à celle prévue par l'ACI-209, le CEB-FIP et notre modèle. Cependant, après 28 jours les résultats expérimentaux et ceux prédits par les modèles de l'ACI-209 et du CEB-FIP sont légèrement supérieur que les valeurs prédites par notre modèle.

Tableau N° 4.4- Comparaison des résultats de notre modèle avec les résultats des modèles recommandés par le ACI et le CEB-FIP pour "E/L=0,6"

E/L	Age (jour)	P(%)	R _{cexp} (MPa)	R _{c28(p)} (MPa)	R _{c28(0)} (MPa)	R _c ACI (MPa)	R _c CEB (MPa)	R _{c.mod} (MPa)
0,6	2	0	18,1	39,5	39,5	13,9	19,9	14,6
0,6	7	0	29,7	39,5	39,5	27,8	30,8	27,6
0,6	28	0	39,5	39,5	39,5	39,8	39,5	37,7
0,6	90	0	41,5	39,5	39,5	44,2	44,1	41,2
0,6	2	10	15,2	37,5	39,5	13,2	18,9	13,3
0,6	7	10	24,5	37,5	39,5	26,4	29,2	25,2
0,6	28	10	37,5	37,5	39,5	37,8	37,5	34,5
0,6	90	10	41,7	37,5	39,5	41,9	41,9	37,6
0,6	2	20	11,7	32,5	39,5	11,4	16,4	12,2
0,6	7	20	22	32,5	39,5	22,9	25,3	23,1
0,6	28	20	32,5	32,5	39,5	32,7	32,5	31,5
0,6	90	20	40,3	32,5	39,5	36,3	36,3	34,4
0,6	2	30	9,5	27,5	39,5	9,6	13,9	11,1
0,6	7	30	17,7	27,5	39,5	19,3	21,4	21,1
0,6	28	30	27,5	27,5	39,5	27,7	27,5	28,8
0,6	90	30	35,3	27,5	39,5	30,7	30,7	31,4

Tableau N° 4.5- Comparaison des résultats de notre modèle avec les résultats des modèles recommandés par le ACI et le CEB-FIP pour "E/L=0,5"

E/L	Age (jour)	P(%)	R _{cexp} (MPa)	R _{c28(p)} (MPa)	R _{c28(0)} (MPa)	R _c ACI (MPa)	R _c CEB (MPa)	R _{c.mod} (MPa)
0,5	2	0	23,8	44,5	44,5	15,6	22,4	17,2
0,5	7	0	37	44,5	44,5	31,3	34,7	32,6
0,5	28	0	44,5	44,5	44,5	44,8	44,5	44,5
0,5	90	0	48,3	44,5	44,5	49,8	49,7	48,6
0,5	2	10	21,2	41,5	44,5	14,6	20,9	15,7
0,5	7	10	35,2	41,5	44,5	29,2	32,3	29,8
0,5	28	10	41,5	41,5	44,5	41,8	41,5	40,7
0,5	90	10	45,8	41,5	44,5	46,4	46,4	44,4
0,5	2	20	18,4	37,5	44,5	13,2	18,9	14,4
0,5	7	20	30,5	37,5	44,5	26,4	29,2	27,2
0,5	28	20	37,5	37,5	44,5	37,8	37,5	37,2
0,5	90	20	44,7	37,5	44,5	41,9	41,9	40,6
0,5	2	30	13,2	36	44,5	12,6	18,1	13,1
0,5	7	30	25,7	36	44,5	25,3	28,0	24,9
0,5	28	30	36	36	44,5	36,3	36,0	34,0
0,5	90	30	40	36	44,5	40,2	40,2	37,1

Tableau N° 4.6-Comparaison des résultats de notre modèle avec les résultats des modèles recommandés par le ACI et le CEB-FIP pour "E/L=0,4"

E/L	Age (jour)	P(%)	R _{cexp} (MPa)	R _{c28(p)} (MPa)	R _{c28(0)} (MPa)	R _c ACI (MPa)	R _c CEB (MPa)	R _{c.mod} (MPa)
0,4	2	0	26,3	54	54	18,9	27,2	21,9
0,4	7	0	43,8	54	54	38,0	42,1	41,4
0,4	28	0	54	54	54	54,4	54,0	56,6
0,4	90	0	57	54	54	60,4	60,3	61,8
0,4	2	10	25	52	54	18,2	26,2	20,0
0,4	7	10	45	52	54	36,6	40,5	37,9
0,4	28	10	52	52	54	52,4	52,0	51,8
0,4	90	10	56	52	54	58,1	58,1	56,5
0,4	2	20	20	51	54	17,9	25,7	18,3
0,4	7	20	35,8	51	54	35,9	39,7	34,6
0,4	28	20	51	51	54	51,4	51,0	47,3
0,4	90	20	53,8	51	54	57,0	57,0	51,6
0,4	2	30	16,3	43,5	54	15,3	21,9	16,7
0,4	7	30	31,5	43,5	54	30,6	33,9	31,6
0,4	28	30	43,5	43,5	54	43,8	43,5	43,2
0,4	90	30	52	43,5	54	48,6	48,6	47,2

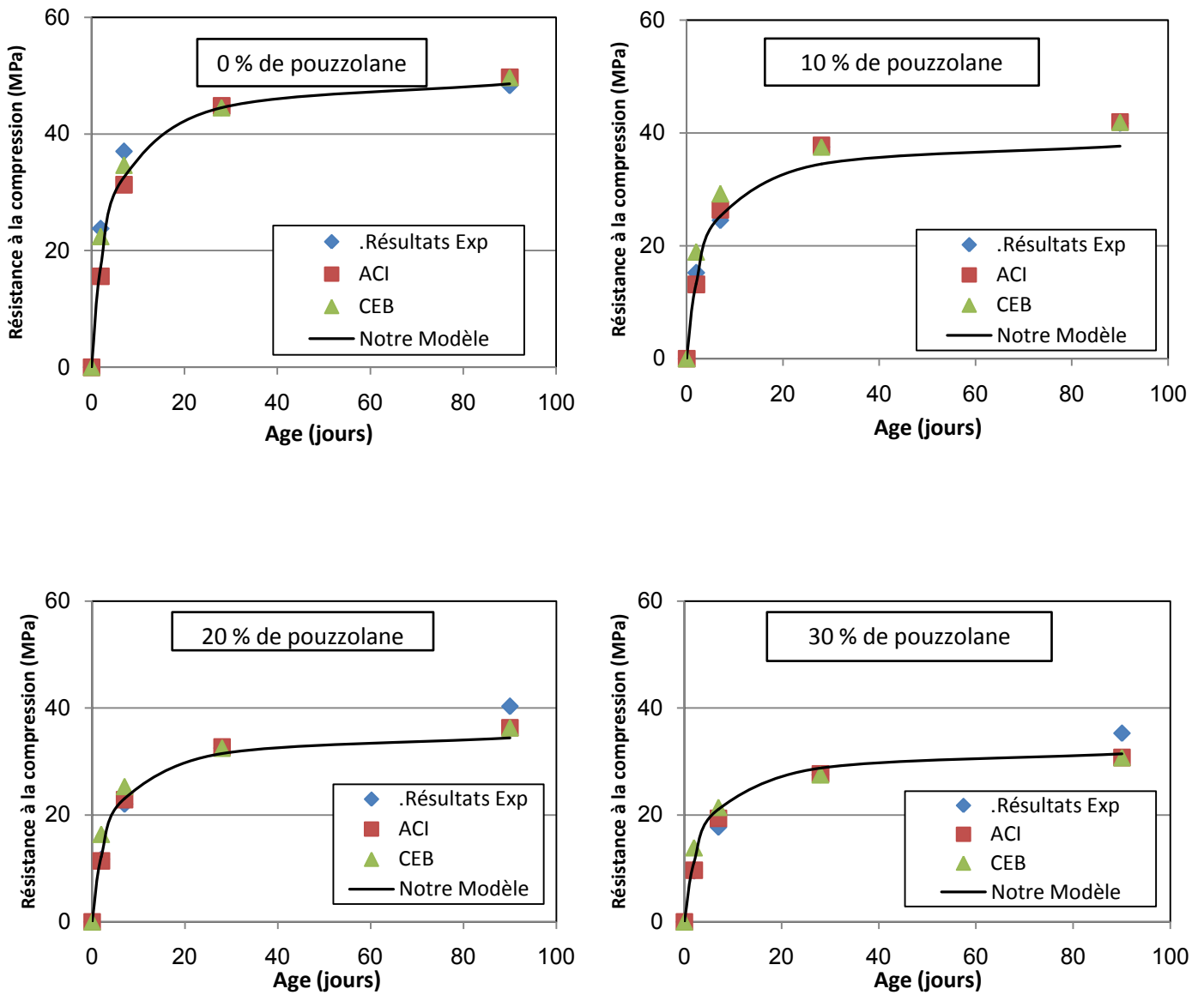


Fig. 4.6- Comparaison des résultats expérimentaux aux résultats prédites par différents modèles pour $E/L = 0,6$.

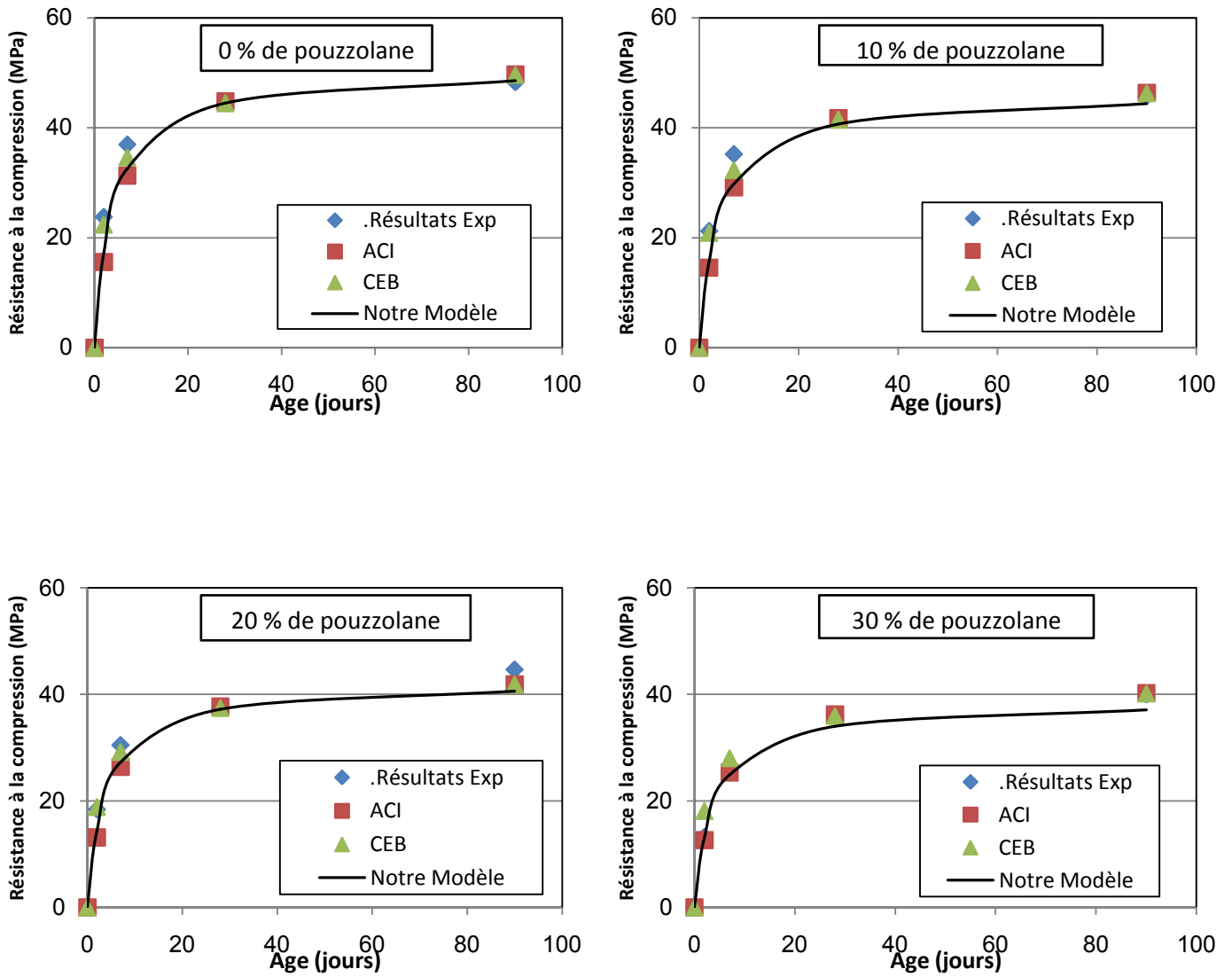


Fig. 4.7- Comparaison des résultats expérimentaux aux résultats prédites par différents modèles pour $E/L = 0,5$.

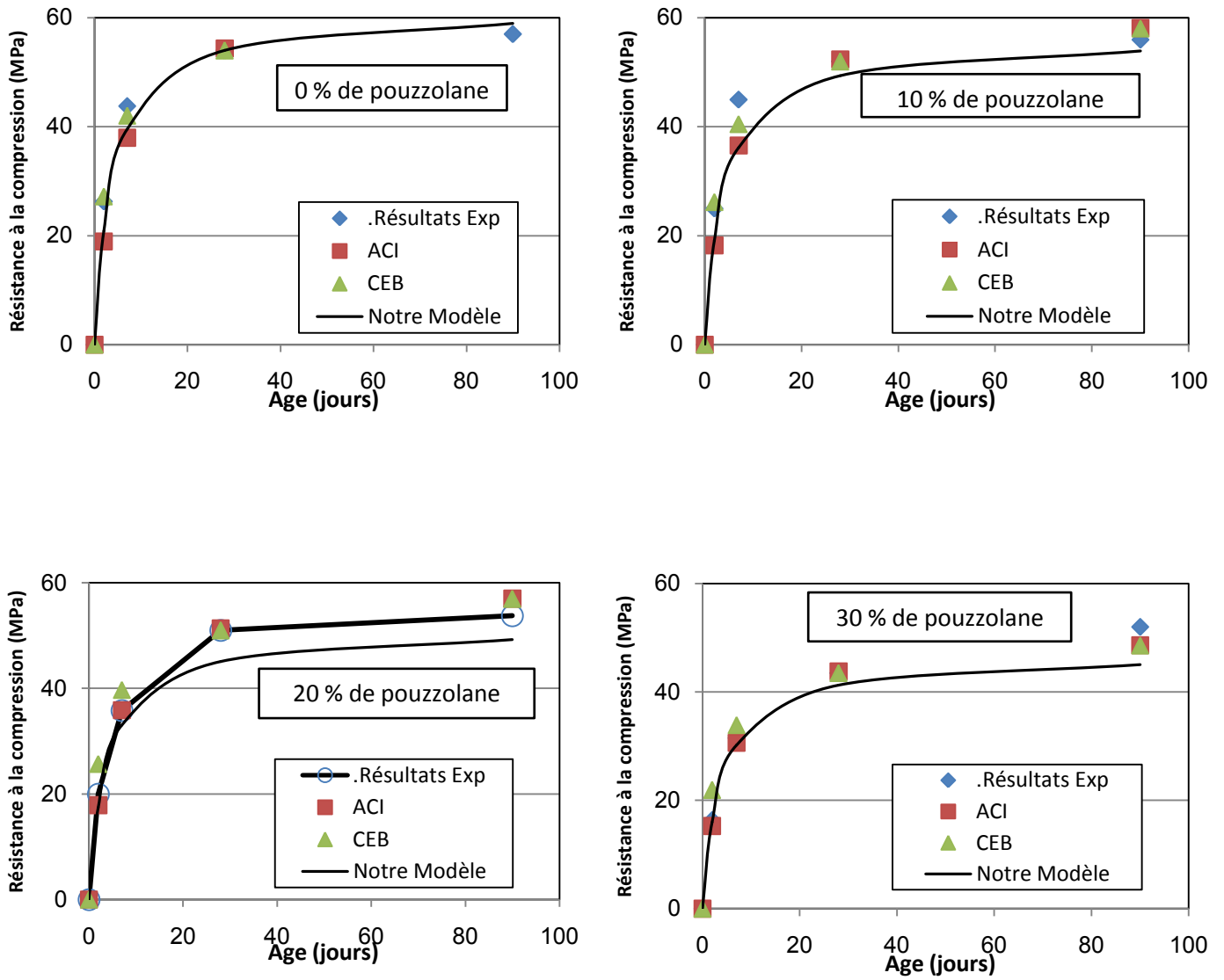


Fig. 4.8- Comparaison des résultats expérimentaux aux résultats prédites par différents modèles pour $E/L = 0,4$.

4.4.2 Validité du modèle de prévision de la résistance du mortier

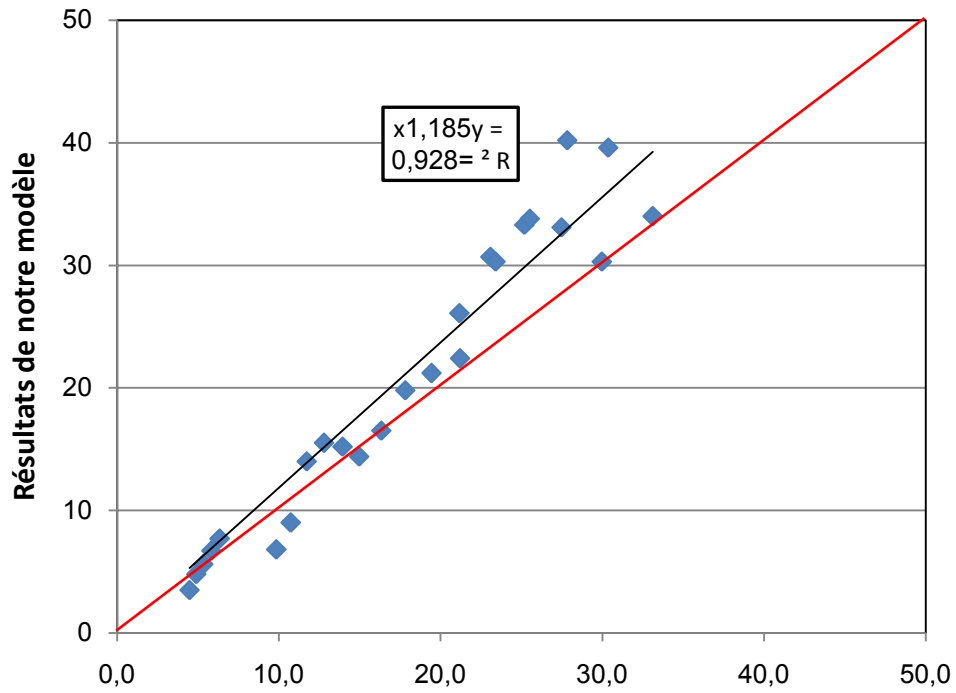
Le Tableaux de 4.7 et la figure 4.9 présentent la comparaison des valeurs expérimentales de la résistance à la compression des mortiers, obtenus par Ezziane et al. [103], avec les valeurs obtenues par notre modèle de prédiction de la résistance à la compression des mortiers à base de pouzzolane naturelle (Eq. 3.1). On constate que, jusqu'à l'âge de 28 jours, l'écart entre les résultats expérimentaux et les résultats prédits reste inférieure à 20%. Par contre, à 90 jours l'écart peut atteindre jusqu'à 33%.

Tableau N°4.7- Comparaison des résultats de notre modèle avec les résultats expérimentaux de Ezziane et al. [103]

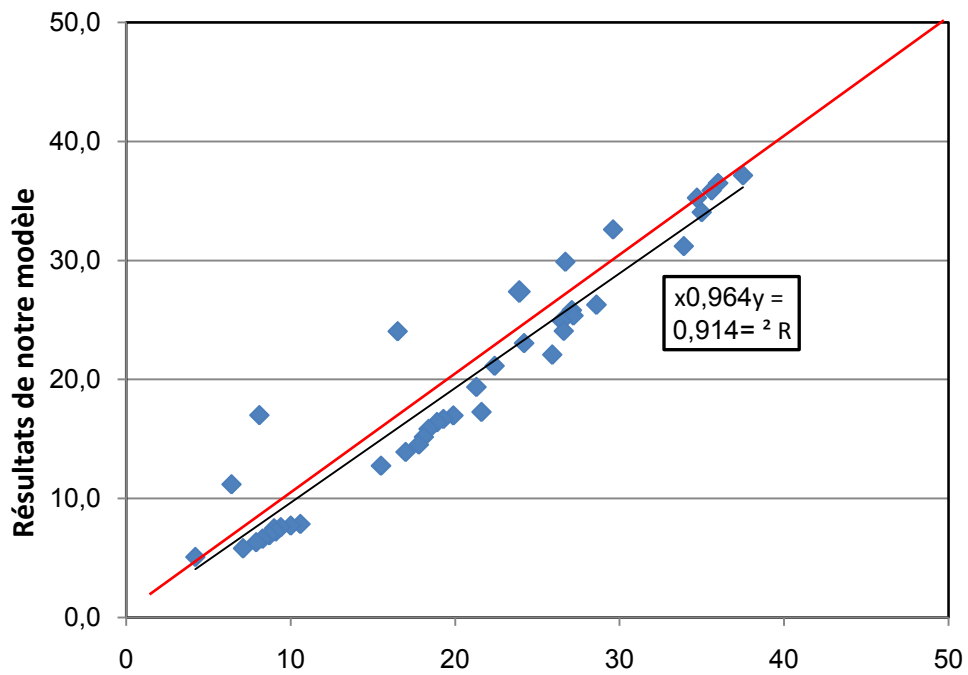
E/L	Age (jour)	P(%)	R _c Expérimentale	R _c Modèle	R _{cMod} / R _{cExp}
0,47	1	0	6,3	7,7	1,21
0,47	3	0	13,9	15,2	1,09
0,47	7	0	21,2	22,4	1,06
0,47	28	0	30,0	30,3	1,01
0,47	90	0	33,1	34	1,03
0,47	1	10	5,8	6,7	1,15
0,47	3	10	12,8	15,5	1,21
0,47	7	10	19,4	21,2	1,09
0,47	28	10	27,5	33,1	1,20
0,47	90	10	30,4	39,6	1,30
0,47	1	20	5,3	5,6	1,05
0,47	3	20	11,7	14	1,19
0,47	7	20	17,8	19,8	1,11
0,47	28	20	25,2	33,3	1,32
0,47	90	20	27,8	40,2	1,44
0,47	1	30	4,9	4,8	0,98
0,47	3	30	10,7	9	0,84
0,47	7	30	16,3	16,5	1,01
0,47	28	30	23,1	30,7	1,33
0,47	90	30	25,5	33,8	1,32
0,47	1	40	4,5	3,5	0,78
0,47	3	40	9,8	6,8	0,69
0,47	7	40	15,0	14,4	0,96
0,47	28	40	29,6	32,6	1,23
0,47	90	40	8,3	6,6	1,30

Tableau 4.8- Comparaison des résultats du modèle avec les Résultats de Hossain[104]

E/L	Age (jour)	P(%)	R _c Expérimentale	R _c Modèle	R _{cExp} /R _{cMod}
0,5	1	0	10,6	7,9	1,35
0,5	3	0	21,6	17,3	1,25
0,5	7	0	28,6	26,3	1,09
0,5	28	0	37,5	37,1	1,01
0,5	1	2	10,0	7,7	1,29
0,5	3	2	19,9	17,0	1,17
0,5	7	2	27,1	25,8	1,05
0,5	28	2	36	36,5	0,99
0,5	1	4	9,4	7,6	1,24
0,5	3	4	19,3	16,7	1,16
0,5	7	4	27,2	25,4	1,07
0,5	28	4	35,6	35,9	0,99
0,5	1	6	9	7,5	1,21
0,5	3	6	18,9	16,4	1,15
0,5	7	6	26,5	24,9	1,06
0,5	28	6	34,7	35,3	0,98
0,5	1	10	9,1	7,2	1,26
0,5	3	10	18,4	15,8	1,16
0,5	7	10	26,6	24,1	1,10
0,5	28	10	35	34,0	1,03
0,5	1	15	8,7	6,9	1,26
0,5	3	15	18,1	15,2	1,19
0,5	7	15	24,2	23,1	1,05
0,5	28	15	29,6	32,6	0,91
0,5	1	20	8,3	6,6	1,26
0,5	3	20	17,8	14,5	1,23
0,5	7	20	25,9	22,1	1,17
0,5	28	20	33,9	31,2	1,09
0,5	1	25	7,9	6,3	1,25
0,5	3	25	17,0	13,9	1,22
0,5	7	25	22,4	21,1	1,06
0,5	28	25	26,7	29,9	0,89
0,5	1	35	7,1	5,8	1,22
0,5	3	35	15,5	12,7	1,22
0,5	7	35	21,3	19,4	1,10
0,5	28	35	23,9	27,4	0,87
0,5	1	50	4,2	5,1	0,83
0,5	3	50	6,4	11,2	0,57
0,5	7	50	8,1	17,0	0,48
0,5	28	50	16,5	24,0	0,69



Fig·4·9–Résultats expérimentaux de Eziane et al.



Fig·4·10–Résultats expérimentaux de Hossain

Le Tableaux de 4.8 et la figure 4.10 présentent la comparaison des valeurs expérimentales de la résistance à la compression des mortiers, obtenus par Hossain [104], avec les valeurs obtenues par notre modèle de prédiction de la résistance à la compression des mortiers à base de pouzzolane naturelle (Eq. 3.1). On constate que, jusqu'à l'âge de 28 jours, l'écart entre les résultats expérimentaux et les résultats de notre modèle reste inférieure à 20% pour un dosage de pouzzolane naturelle inférieur à 35%. Par contre, pour un dosage de 50% de pouzzolane naturelle l'écart peut atteindre jusqu'à 50%.

4.3 Conclusion

Les résultats obtenus à partir de cette étude peuvent mener aux conclusions suivantes:

- bien que la résistance à la compression au jeune âge des bétons est réduite par l'incorporation de la pouzzolane naturelle. Elle s'améliore en fonction du temps et atteint son optimum à long terme;
- la pouzzolane naturelle à un effet négatif sur la résistance à la compression lorsqu'elle est incorporée à un dose élevé;
- les modèles de prédiction de la résistance à la compression des mortiers et bétons, élaborés dans le chapitre 3, présentent une précision comparable a celles des modèles recommandés par le ACI-209 et le CEB-FIP

CONCLUSIONS GENERALES ET PERSPECTIVES

Ce travail s'intéresse au développement des modèles mathématiques de prévision de la résistance à la compression des bétons et mortiers à base de la pouzzolane naturelle.

Dans un premier temps, les principales caractéristiques des matériaux cimentaires ont été présentées. Les différents ajouts cimentaires et leur propriétés classification des ajouts cimentaires, L'intérêt de l'utilisation, et les Paramètres influençant la résistance du béton .Il a été mentionné que pour la plupart des ajouts cimentaires, il existe un dosage optimal qui donne des performances meilleures à un tel âge et un tel rapport eau/ciment, ce dosage optimal varie donc essentiellement avec le type de l'ajout cimentaire (propriétés physique et chimique), l'âge de l'éprouvette et le rapport E/C.

Plusieurs modèles ont été proposés par différents chercheurs pour la prévision de la résistance à la compression du béton sans ou avec ajout cimentaire tels que (fumée de silice, cendres volantes, laitier, calcaire) donnés par les différents chercheurs. Cependant, les études consacrées à la prévision de la résistance à la compression bétons à base de pouzzolane naturelle, sont rares dans la littérature.

La troisième partie a été consacrée au développement d'un modèle mathématique, de forme exponentielle, pour la prévision de la résistance à la compression du béton contenant de la pouzzolane naturelle. Les paramètres du modèle (rapport eau-liant, dosage en pouzzolane et l'âge) ont été déterminés à l'aide du logiciel STATISTICA version 7, en injectant les données expérimentales issues des travaux de 20 chercheurs. Les résultats obtenus montrent que le modèle présente une grande fiabilité caractérisée par un coefficient de corrélation de 0.92.

Dans la quatrième partie, un programme expérimental a été réalisé au laboratoire dans le but de valider le modèle développé. Pour couvrir la gamme des paramètres du modèle, quatre types de bétons ordinaires ont été considérés, dans lesquels on a remplacé en poids de ciment par: 0%, 10%, 20% et 30% de pouzzolane naturelle. En plus, trois rapports eau-liant: 0.4, 0.5 et 0.6 ont été utilisés. Au total, 12 mélanges de bétons avec de divers ont été réalisés et testés et des résultats sur la résistance à la compression ont été obtenus. Les résultats expérimentaux ont été injectés dans le modèle pour la simulation numérique de la résistance à la compression. Les tests de validation ont donné de bons résultats. De bonnes précisions ont été obtenues également dans la prévision de la résistance à la compression des bétons à base de

pouzzolane naturelle en comparaison avec les résultats des modèles recommandés par le ACI-209 et le CEB-FIP.

La confrontation des résultats, prédits par notre modèle de prédiction de la résistance à la compression des mortiers à base de pouzzolane naturelle, aux résultats expérimentaux de Ezziane et al. [103] et de Hossain [104], montre la fiabilité élevée de notre modèle de prédiction pour des dosages inférieurs à 50% de pouzzolane naturelle.

2 Recommandations

Nous recommandons d'améliorer la fiabilité des modèles proposés par plusieurs moyens. Il serait important d'optimiser ces modèles par la combinaison avec d'autres techniques comme les méthodes probabilistes.

Il serait souhaitable que l'approche utilisé ici soit généralisé pour la prévision de la des résistances mécaniques du béton contenant d'autres ajouts cimentaires comme le métakaolin, les cendres volantes, la fumée de silice ou le laitier.

Références Bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] **Venuat M.**, (1989), La pratique des ciments, mortiers et bétons. Tome 1. Caractéristiques des liants et des bétons, mise en œuvre des coulis et mortiers. édition2 – Collection Moniteur. 277p
- [2] **Baron J., Olivier J.P., Weiss J.C.**, (1997), Les ciments courant. in "Les bétons, bases et données pour leur formulation". Edition Eyrolles – 806p.
- [3] **Pliskin L.P.**, (1993). La fabrication du ciment. Éditions Eyrolles.
- [4] **EN 197-1.** (2001). Composition, Spécification et Critères de Conformité des Ciments Courants. Comité Européen de Normalisation.
- [5] **Skalny J., Young J.F.**, (1980), Mécanisme d'hydratation du ciment portland. Sous thème 7^{ème} congrès international de la chimie des ciments, vol 1, Paris.
- [6] **Acker P.**, (1992), Retrait et fissuration du béton .Association française pour la construction, 10-40.
- [7] **Aitcin P.C., Neville A., Acker P.**, (1998), Les différents types de retrait du béton. Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, N° 215, 41-51.
- [8] **Acker P.**, (1988), Comportement mécanique du béton : apport de l'approche physicochimique. Rapport de recherche, LPC N° 152. Laboratoire Centrale des ponts et Chaussées.
- [9] **Therrien J., Bissonnette B., Cloutier A.**, (2000), Early-age evolution of the mass transfer properties in mortar and its influence upon ultimate shrinkage . In Shrinkage of Concrete, Proc. Of the Int. RILEM Workshop, edited by Baroghel-Bouny V. and Aïtcin P.-C., RILEM Publications PRO 17, 247-268, Paris,
- [10] **Kim J.K., Han S.H., Song Y.C.**, (2002), Effect of temperature and aging on the mechanical properties of concrete Part I. Expérimental results. Cement and Concrete Research, Vol. 32, 1087-1094
- [11] **Yurtdas I.**, (2003), Couplage comportement mécanique et dessiccation des matériaux à matrice cimentaire: étude expérimentale sur mortiers. Thèse de doctorat de l'Ecole Centrale de Lille.
- [12] **Burlion N., Bourgeois F., Shao J.F.**, (2005), Effects of desiccation on mechanical behaviour of concrete .Cement and concrete composites, Vol. 27, N° 3, 367-379.
- [13] **Société Suisse des Ingénieurs et Architect, Norme SIA 215.** 1978. Liant minéraux. Zurich

- [16] **Ghrici M.**, (2008), Technologie avancée des bétons, Cours de Magister, Département de Génie Civil, Université de Chlef,
- [17] **Dreux G., Festa, J.**, (2002), Nouveau guide du béton et de ses constituants. Edition Eyrolles, 409p.
- [18] **Bhanja S, Sengupta B.** (2002), Investigations on the compressive strength of silica fume Concrete using statistical methods. Cement and Concrete Research 32, 1391–1394.
- [19] **Khedr S.A., Abou-Zeid M.N.**, (1994), Characteristics of silica concrete. Journal of .Materials Civil Engineering. Vol. 6, N°3, 357-375.
- [20] **Duval R., Kadri E.H.**, (1998), The influence of silica fume on the workability and the compressive strength of high –performance concrete. Cement and Concrete Research, Vol. 28, N° 4, 533–547.
- [21] **Zelic J., Rus D., Krstulovic R.**, (2004), A mathematical model for prediction of compressive strength in cement–silica fume blends. Cement and Concrete Research, Vol. 34, N° 12, 2319–2328.
- [22] **Rafat S.**, (2003). Effect of fine aggregate replacement with Class F fly ash on the mechanical properties of concrete, Cement and Concrete Research. Vol. 33, N° 04, 539–547.
- [23] **Maslehuddin M.**, (1989), Effect of sand replacement on the early- age strength Gain and long-term corrosion-resisting characteristics of fly ash concrete. ACI Materials Journal, Vol. 86, N° 1, 58–62.
- [24] **Bakoshi T., Kohno K., Kawasaki S., Yamaji N.**, (1998), Strength and durability of concrete using bottom ash as replacement for fine aggregate. ACI Spec. Publ. (SP-179), 159–172.
- [25] **Oluokun F.A.**, (1994), Fly ash concrete mix design and the water–cement ratio law. ACI Materials Journal, Vol. 91, N° 4, 362–371
- [26] **Pera J.**, (2001), Metakaolin and calcined clays. Cement and Concrete Composites. Vol. 23,130-136.
- [27] **Batis G., Badogiannis E.**, (2005), The effect of Metakaolin on the corrosion behaviour of cement mortars. Cement and Concrete Composites, Vol. 27, 125-130.
- [28] **Poon S.C., Lam L., Kou S.C., Wong Y.L., Wong R.**, (2001)., Rate of pozzolanic reaction of metakaolin in high –performance cement pastes. Cement and Concrete Research, Vol. 31, 1301–1306.

- [29] **Badogiannis E., Tsvilis S.**, (2009), Exploitation of poor reek kaolins: Durability of metakaolin concrete. *Cement and Concrete Composites*, Vol. 31, 128–133.
- [30] **Malhotra V.M.**, (1987), Properties of Fresh and hardened Concrete Incorporating Ground Granulated Blast Furnace Slag in Supplementary Cementing Materials for Concrete Ottawa. Canadian Government Publishing Center, 291-331.
- [31] **ACI 233R-03**, (2003), Slag Cement in Concrete and Mortar. *ACI Manual of Concrete Practice, Part 1: Materials and General Properties of Concrete*, Detroit, Michigan.
- [32] **Meusel J.W., Rose J.H.**, (1983), Production of Granulated Blast Furnace Slag at Sparrows Point, and the Workability and Strength Potential of Concrete Incorporating the Slag. Fly Ash, Silica Fume, Slag and Other Mineral By-Products in Concrete, SP-79, V. M. Malhotra, ed., American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., Vol. 1, 867-890.
- [33] **Fulton F.S.**, (1986), The Properties of Portland cement Containing Milled Granulated Blast Furnace Slag. Monograph, Portland Cement Institute, Johannesburg, 1974, 4-46-
Duboyov., V.S., et al. Effects of Ground Granulated Blast Furnace Slags on Some Properties of Pastes, Mortars, and Concretes, Blended Cements, Ed.G.Frohnsdorff, ASTM Sp. Tech. Publ. No.897, 29-48.
- [34] **Hogan F.J., Meusel J.W.**, (1981), Evaluation for Durability and Strength development of a Ground Granulated Blast-Furnace Slag. *Cement, Concrete, and Aggregates*, Vol. 3, N°1, 40-52.
- [35] **Pekmezci B.Y., Akyuz S.**, (2004), Optimum usage of a natural pozzolan for the maximum compressive strength of concrete. *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, 2175–2179.
- [36] **Philleo R.E.**, (1986), Freezing and Thawing Resistance of High-Strength Concrete. NCHRP Synthesis of Highway Practice 129: TRB, National Research Council, Washington D.C.
- [37] **ACI 232.1R-00**. Use of Raw or Processed Natural Pozzolans in Concrete. *ACI Manual of concrete Practice, Part 1: Materials and General Properties of Concrete*, Detroit, Michigan.
- [38] **Massazza F., Costa V.**, (1979). Aspects of the Pozzolanic Activity and Properties of Pozzolanic Cements. *II Cemento*, Vol. 76, 3-18.
- [39] **Khan M.I., Alhozaimy A.M.**, (2001), Properties of natural pozzolan and its potential utilization in environmental friendly concrete. *Canadian Journl Civil Engineering*. Vol. 38.

- [40] **Li Beixing., Wang Jiliang., Zhou Mingkai** (2009), Effect of limestone fines content in manufactured sand on durability of low-and high-strength concretes. *Construction and Building Materials* 23 (2009) 2846–2850
- [41] **ACI 308R-01.** (2001). Guide to curing concrete, 31p.
- [42] **Verbeck G.J. Helmuth R.A.,** (1968), Structures and Physical Properties of Cement Paste, Proc. 5th Int. Symp. On the Chemistry of Cement, Tokyo, Vol. 3, 1-32.
- [43] **Hermida G.,** Influence du volume de pâte et de la concentration en ciment sur la performance du béton : vers le développement d'un béton à contenu minimal en pâte. thèse de doctorat, Laboratoire Mécanique et Technologie, (ENS CACHAN/CNRS/UMR 8095) 61, avenue du Président Wilson, 94235 CACHAN CEDEX (France).
- [44] **Laplante P.,** (1993), Propriétés mécanique des bétons durcissants: analyse compare des bétons classiques et à très hautes performances''. Rapport de recherches des LPC, Paris, 299p
- [45] **Price W.H.,** (1951), Factors influencing concrete strength, *ACI Journal*, Vol. 47, 417-432.
- [46] **Neville A.M.,** (1981), *Properties of Concrete.* Longman Scientific and Technical, England.
- [47] **Alilou V.K.,** (2009), Designing a learning machine for prediction of the compressive strength of the concrete by using artificial neural networks. M.sc Thesis, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
- [48] **Abrams D.A.,** (1918), Design of concrete Mixtures. Bulletin No.1, Structural Research Laboratory, 20 pp, Lewis Institute, Chicago.
- [49] **Popovics S.,** (1985), New formulas for the prediction of the effect of porosity on, concrete strength. *ACI Journal proceeding*, Vol. 82, N°2, 136-146.
- [50] **Ryskewitsch E.,** (1953), Compressive strength of porous sintered Alumina and Zirconia-9th communication to ceramography. *Journal of the American Ceramic society*, Vol. 36. N°2, 65-68.
- [51] **Nurse, R.W.,** (1968), Cohesion and Adhesion in solids. The structure of concrete and its Behaviour under load, cement and concrete Association, London, 49-58.
- [52] **Glanville W.H., Collins A.R., Matthews D.D.,** (1938), The Gravity of Aggregates and Workability of Concrete. Road Research, Technical paper No.5, Department of Scientific and Industrial research, 42 pp, Ministry of transport, London.

- [53] **Ujhelyi J.**, (1980), The effect of air Content of concrete (A beton Leve gotarttalement hetese). Magyar Epitorpar (Budapest), N°8, 469-481.
- [54] **Klieger P.**, (1957), Long-time Study of cement performance in concrete. Chapter 10-progress Report of Strength and Elastic Properties of concrete. ACI journal, Proceedings Vol. 54, No.6, 481-504.
- [55] **Popovics S.**, (1990), Analysis of the Concrete Strength versus Water-Cement Ratio Relationship. ACI Materials Journal, Vol. 87, N° 5, 517-529.
- [56] **Walker S., Bloem D.**, (1961), .Effect of aggregate size on properties of concrete, ACI journal, proceedings, Vol. 57, No 9, 1248-1258.
- [57] **Gruevuwald E.**, (1956). Effect of slump on compressive strength of concrete of Constant Water-Cement ratio. ACI Journal, proceedings Vol. 53, No 2, 230-231.
- [58] **Kamenski M.F.**, (1958), Evaluation of concrete plasticizers and cement with finely divided mineral Admixtures. Dr..Ing.Dissetation, Hochschul fur Architektur and Bauwesen, Werimer, 107p
- [59] **Slanicka S.**, (1991), The influence of the fly ash fineness on the strength of concrete. Cement and Concrete Research. Vol. 21, 285-296.
- [60] **Hwang K, Takafumi N, Fuminiro T.** (2004). Prediction model of compressive strength development of fly-ash concrete ".Cement and Concrete Research 34, 2269–2276.
- [61] **Slanicka S.**(1991). The influence of the condensed silica fume on the concrete strength. Cement and Concrete Research. Vol. 21, 462-470.
- [62] **Babu K.G., Prakash. P.V.S.**, (1995). Efficiency of silica fume in concrete, Cement and Concrete Research, Vol..25, 1273-1283
- [63] **Hooton R.D.**, (1993), Influence of silica fume replacement of cement on physical properties and resistance to sulfate attack, freezing and thawing, and alkali–silica reactivity. ACI Materials Journal, Vol. 90, N° 2, 143–151.
- [64] **Bhanja S., Sengupta B.**, (2003), Modified water–cement ratio law for silica fume concretes. Cement and Concrete Research, Vol. 33, N° 3, 447–450.
- [65] **Mathias V., de Larrard F.**, Rôle des laitiers de haut fourneau dans la résistance en compression du béton. Laboratoire centrale des ponts chaussés, centre de Nantes. Route de Bouage 44341Bouguenais Cedex.
- [66] **Uomoto T., Kobayqshi K.**, (1989), Effect of curing temperature and humidity on strength of concrete containing blast fournaice slag admixture. in CANMET fly

Ash, silica fume Slag and Natural pozzolans in concrete. Proceeding third international conference, Trondheim, Norway, Volume 2.

- [67] **Hwang C.L., Lin C.V.**, (1986), Strength development of blended blast furnace slag cement mortars. in CANMET on fly ash, silica fume, slag and natural pozzolans concrete, proceeding second International conference, Madrid, Spain, Volume 2.
- [68] **Shariq M., Prasad J., Masood A.**, (2010), Effect of GGBFS on time dependent compressive strength of concrete. *Construction and Building Materials*, Vol. 24, 1469–1478.
- [69] **Powers T.C., Brownyard T.L.**, (1948), Studies of the Physical Properties of Hardened Portland cement Paste. *Journal of the American Concrete Institute*, 43 (multiple parts) 101, 249, 469, 549, 669, 845, 993, 1947, also published as PCA Bulletin 22, Research Laboratories of the Portland Cement Association, Chicago.
- [70] **Bentz P., Irassar F., Buche B., Weiss W.J.**, (2009), Limestone Fillers to Conserve Cement in Low w/cm Concretes, an analysis based on Powers' Model. *Concrete International*, Vol. 3, N° 11, 41-46.
- [71] **Bonavetti V., Donza H., Menéndez G., Cabrera O., Irassar E.F.**, (2003), Limestone filler Cement in Low w/c Concrete A Rational Use of Energy. *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, 865-871.
- [72] **Bonavetti V.L., Donza H., Rahhal V.F., Irassar E.F.**, (1999), High Strength Concrete with Limestone Filler Cements. . Proc. International Conference on High-Performance Concrete and Performance and Quality of Concrete Structures, V.M. Malhotra, et al. Eds., ACI SP-186, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 567– 580.
- [73] **Irassar E.F.**, (2009), Sulfate Attack on Cementitious Materials Containing Limestone Filler A Review. *Cement and Concrete Research*, Vol. 39, N° 3, 241-254.
- [74] **Jee N., Sangchun Y., Hongbum C.**, Prediction of compressive strength of in situ concrete based on mixture proportions. *J. Asian Architect. Build. Eng.*, Vol. 3, 9-16.
- [75] **Subrato C., Prabir C., Basu** (2010). Strength-Cementitious Material-Water Relationship for Proportioning of Fly Ash-Based Concrete. *ACI Materials Journal*, Vol. 107, N° 4.
- [76] **Shannag J., Yeginobali A.**, (1995), Properties of pastes mortars and concretes containing natural pozzolan. *Cement and concrete research*, Vol. 25, N° 3, 647-657.
- [77] **Targana S., Olgun A., Erdogan Y., Sevinc S.**, (2003), Natural pozzolan, colemanite ore waste, bottom ash, and fly ash on the properties of Portland cement. *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, 1175–1182.

- [78] **Uzal B., Turanli L.,** (2003), Studies on blended cements containing a high volume of natural pozzolans. *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, 1777–1781.
- [79] **Turanli L., Uzal B., Bektas F.,** (1995), Effect of material characteristics on the properties of blended cements containing high volumes of natural pozzolans. *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, 2277–2282.
- [80] **Turanli L., Uzal B., Bektas F.,** (2005), Effect of large amounts of natural pozzolan addition on properties of blended cements. *Cement and Concrete Research*, Vol. 35, 1106–1111.
- [81] **Ghrici M., Kenai S., Meziane E.,** (2006), Mechanical and durability properties of cement mortar with Algerian natural pozzolana. *Journal of Materials Science*, Vol. 41, 6965–6972.
- [82] **Yetgin A., Cavdar C.,** (2003), Study of Effects of Natural Pozzolanon Properties of Cement Mortars. *Journal of materials in civil engineering ASCE* 813
- [83] **Erdem T.K., Meral C., Tokyay M., Erdogan T.Y.,** (2007), Use of perlite as a pozzolanic addition in producing blended cements. *Cement Concrete and Composites* Vol. 29, 13-21.
- [84] **Yilmaz B., Ucar A., Oteyakab, U.V.,** (2007), Properties of zeolitic tuff (clinoptilolite) blended portland cement. *Building and Environment*, Vol. 42, 3808–3815.
- [85] **Ghrici M., Kenai S., Said-Mansour M.,** (2007), Mechanical properties and durability of mortar and concrete containing natural pozzolana and limestone blended cements. *Cement and concrete Composites*, Vol. 29, 542–549.
- [86] **Fajardo G., Valdez P., Pacheco J.,** (2009), Corrosion of steel rebar embedded in natural pozzolan based mortars exposed to chlorides. *Construction and Building Materials* Vol. 23,768–774.
- [87] **Naseer A., Abdul J., Khan A.N., Ali Q., Hussain .Z.,** (2008), Performance of Pakistan volcanic ashes in mortars and concrete. *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 35, 1435-1445.
- [88] **Sammy Y.N., Chan X.J.** (2009), Comparative study of the initial surface absorption and chloride diffusion of high performance zeolite, silica fume and PFA concrete. *Cement and Concrete Composites*, Vol. 21, 293-300.
- [89] **Tagnit A., Petrov N., Luke K.,** (2003). Properties of Concrete Containing Diatomaceous Earth. *ACI Materials Journal*, Vol. 100, N° 1,
- [90] **Hossain K.M.A., Lachemi M.** (2004). Residual Strength and Durability of Volcanic Ash Concrete Exposed to High Temperature” *ACI Materials Journal*, Vol. 101, N° 6,

- [91] **Hossain K.M.A., Lachemi M.** (2006). Development of Volcanic Ash Concrete: Strength, Durability, and Microstructural Investigations” ACI Materials Journal, Vol. 103, N°1,
- [92] **Uzal B., Turanli L., Mehta P.K.** (2007). High-Volume Natural Pozzolan Concrete for Structural Applications” ACI Materials Journal, Vol. 104, N°5,
- [93] **Hossain K.M.A., Lachemi M.** (2007). Strength, durability and micro-structural aspects of high performance Volcanic ash concrete. Cement and Concrete Research, Vol. 37, 759–766.
- [94] **Kaid et al.** (2009). Caractéristiques mécaniques de bétons contenant une pouzzolane naturelle face aux attaques à l’eau de mer et aux sulfates"1st International conference Built Environment Infrastructures in Developing Countries ENSET Oran (Alegria), 12-14.
- [95] **Olawuyi BJ, Olusola KO.** (2010). Compressive strength of volcanic ash/ordinary Portland cement laterized concrete. Civil Engineering Dimension, Vol. 12, N°1,23-28.
- [96] **Salehi N.**, (2009). Caractéristiques mécaniques de bétons contenant une pouzzolane naturelle face aux attaques à l’eau de mer et aux sulfates.1st International conférence Built Environment Infrastructures in Developing Countries ENSET Oran (Alegria) , 12-14.
- [97] **Pentawee S.**, .the use of natural pozzolans in kight weight concrete. Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand.
- [98] **Muga H., Betz K., Walker J., Pranger C., Vidor A.**, (2005), Development of Appropriate and Sustainable Construction Materials . Michigan Technological University (www.mtu.edu) Southern University and A&M College (www.subr.edu).
- [99] **Khan M.I., Alhozaimy A.M.**, (2005), Performance of concrete utilizing the natural pozzolanic material avabile in the kingdom of Saoud-Arabia. King Saoud University College of Engineering Research Center.
- [100] **Yeh I.C.**, (1998), modeling of strength of high-performance concrete using artificial neural networks, Cement and Concrete Research, Vol. 28, No 12, 1797–1808.
- [101] **ACI-209**, Prediction of creep and shrinkage, and temperature effects in concrete structures. Farmington Hills (MI): American Concrete Institute; (ACI Committee 209) 1999.
- [102] **CEB-FIP**, (1990). (CEB-FIP Model, London: Published by Thomas Telford.

- [103] **Ezziane K., Bougara A., Kadri A., Khelafi H., Kadri E.**, (2007), Compressive strength of mortar containing natural pozzolan under various curing temperature, *Cement & Concrete Composites*, Vol. 29, 587–593
- [104] **Hossain K.M.A** , (2003), Blended cement using volcanic ash and pumice, *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, 1601–1605.