

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et
de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



وزارة التعليم العالي
و البحث العلمي
المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات

Département de Génie Civil

Laboratoire Construction et Environnement
THESE DE DOCTORAT D'ETAT EN GENIE CIVIL

OPTION: MATERIAUX

Présentée par:
BOUIKNI Ammar

COMPORTEMENT DU BETON A BASE DU LAITIER D'ELHADJAR
SOUS DIFFERENTES CURES

Dirigée par :

Pr. A.BALI et

Professeur a l'école National Polytechnique d'Alger

Pr. R.N.Swamy

Professeur a l'Université de Sheffield Angleterre

Soutenue Publiquement le 25/12/2010 devant le jury:

N. MESRATI	Professeur, Ecole Nationale Polytechnique	Président
A.BALI	Professeur, Ecole Nationale Polytechnique	Promoteur
R.N. SWAMY	Professeur, Université de Sheffield	Co-Promoteur
M.T. ABADLIA	Professeur, Université de Boumerdes	Examineur
R. KETTAB	Maître de conférence, Ecole Nationale Polytechnique	Examineur
B. MENADI	Maître de conférence, Université de Blida	Examineur

Promotion: 2009/2010

ENP, 10 Avenue Hassen Badi – El Harrach, Alger.

ملخص: إن أهم الجوانب الإيجابية لإضافة الخبث إلى الخرسانة مرتبطة بترقية نوعية ومتانة الخرسانة, وحماية مصادر مدخرات الطاقة وحماية البيئة, ناهيك عن تخفيض التكلفة. هذه الأطروحة تدخل في إطار البحث عن تأثير الخبث على خصائص ونوعية ومتانة الخرسانة.

ينقسم البرنامج التجريبي إلى قسمين: يهتم القسم الأول باستعمال نسبة 50% و 65% من خبث الأفران المطحون, بهدف الحصول على مقاومة 50 N/mm^2 في 28 يوم. أما القسم الثاني فيتعلق باستعمال نسبة 50% للحصول على مقاومة 40,30 و 50 N/mm^2 في 28 يوم. بينت نتائج هذه الدراسة أن في حالة المعالجة, لوحظ إن خرسانة خبث الأفران تتأثر أكثر مقارنة بخرسانة الإسمنت العادي خاصة إذا كانت كمية الخبث كبيرة. من جهة أخرى فإن للمعالجة في الماء تأثير كبير على المقاومة و توزيع الشقوق. من هنا يتبين أن عمق التفحيم أهم من العينات التي توجد في الهواء الطلق بدون علاج خاصة إذا كانت كمية الخبث مختلطة مع الخرسانة. يتبين كذلك أن الخبث عديم الفعالية للتخلص نهائياً من ASR, بالرغم من استعمال كمية قد تصل إلى 65%. كما بينت النتائج أن الخرسانة ذات الخبث المكونة من إسمنت متواضع من 200 Kg/m^3 , وبوزن متعادل مع كمية الخبث قد تصل المقاومة فيه إلى 50 N/mm^2 في 28 يوم. في ظروف المعالجة في الماء, نسبة كبيرة من الخبث في الإسمنت تعطي إرتقاع محسوس في المقاومة بين 54 و 78% ابتداء من 28 يوم إلى سنة. بعد إضافة الماء للخرسانة الموجودة في ظروف جافة تتجدد مقاومة الضغط من جديد.

مفاتيح: مقاومة الضغط, الخبث, الخرسانة, معالجة, كربونات, مسامي.

RESUME

En plus de la réduction des coûts par rapport au béton classique à ciment portland, les avantages de l'incorporation du laitier dans le béton, sont essentiellement associées à l'amélioration de la qualité et de la durabilité des bétons à laitier. Ces avantages sont en particulier d'ordres économiques tels que l'épargne des ressources énergétiques et leurs conservations ainsi que la protection de l'environnement. Ce mémoire est une étude de laboratoire qui démontre l'influence du laitier sur les propriétés et la qualité du béton.

Le programme expérimental est subdivisé en deux parties. La première partie concerne la fabrication des mélanges en utilisant des remplacements en laitier de 50% et 65 % pendant 28 jours dans le but d'attendre une résistance à 28 jours de 50 N/mm^2 . La deuxième partie consiste à imposer un remplacement en laitier de 50%, pour obtenir des résistances de 30,40 et 50 N/mm^2 à 28 jours. Les résultats ont montré que la cure est plus importante pour les bétons au laitier comparé aux bétons normaux surtout pour les bétons à grand remplacement en laitier. Par ailleurs, la cure dans l'eau a une grande influence sur la résistance et la distribution des pores. D'après ces résultats il apparaît que la profondeur du front de carbonatation est plus important surtout pour les éprouvettes stockées à l'air libre sans cure, spécialement lorsqu'une grande quantité de laitier est mélangée au béton. Le laitier apparaît complètement inefficace pour éliminer complètement l'expansion provoquée par l'ASR même en utilisant des remplacements en laitier allant jusqu'à 65 %.

Les résultats montrent que le béton au laitier contenant un ciment modéré, de 200 kg/m^3 et avec un poids similaire en laitier peut atteindre une résistance de 50 N/mm^2 à 28 jours. Sous des conditions de cure humide, une quantité élevée du laitier dans le béton donne des augmentations de résistance comprises entre 54 et 78 % à partir de 28 jours jusqu'à une année. La réintroduction de l'humidité dans un béton stocké dans un environnement sec peut régénérer la résistance de compression.

Mots clés: Résistance à la compression, laitier, béton, cure, carbonatation, porosité.

SUMMARY

Apart from reducing cost compared to plain Portland cement concrete, the benefits of inclusion of slag in concrete are essentially associated with the improvements it brings about to the quality and durability of concrete, and in particular, to energy savings resources conservation, and environment protection. This thesis presents a laboratory study on the influence of slag on the properties and quality of concrete.

The experimental program consists of two parts. The first part involves mix design with 50% and 65% cement replacement by slag for 28 compressive strength of 50 N/mm^2 . The second part involves mix design of slag concrete mixes, having 28 day compressive strength of 30, 40 and 50 N/mm^2 with 50% slag replacement. The results showed that curing for concrete incorporating slag is more critical than for normal concrete, especially when a large amount of slag is mixed with concrete. Also water curing had great influence on strength and pore size distribution. It is apparent from the results that the depth of carbonation for specimens stored in air without curing was greater when a large amount of slag is mixed with concrete. Slag appears to be not effective, even at 65% replacement levels, in completely eliminating ASR expansion. Concrete with a moderate cement content of 200 kg/m^3 and similar weight of slag, can achieve strength of 50 N/mm^2 at 28 days, under continuous wet curing. High slag content concrete gives strength increase of 54 -78% from 28 days to one year.

Rewetting slag concrete that had been subjected to prolonged dry curing can regenerate compressive strength.

Keywords: compressive strength, slag, concrete, curing, carbonation, porosity.

Remerciements

Mes premiers remerciements vont à mon directeur de thèse, Monsieur **A.BALI** qui m'a dirigé tout au long de ces dernières années. J'ai bénéficié, grâce à lui, d'un professeur non seulement sur le plan scientifique, mais aussi sur le plan humain. Ce travail n'aurait jamais pu aboutir sans lui. Qu'il trouve ici l'expression de mes sincères gratitude.

Je tiens à remercier Monsieur **R.N.Swamy**, Professeur émérite à l'université de Sheffield en Grande Bretagne, qui a accepté d'encadrer cette thèse et pour avoir su avec tant d'enthousiasme et de pédagogie partager sa connaissance approfondie du sujet. Sa démarche scientifique restera pour moi un modèle.

Je tiens à exprimer ma sincère reconnaissance à:

Monsieur **Nadir MESRATI**, Professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique: **Président de jury.**

Monsieur **Med Tahar ABADLIA**, Professeur à l'Université de Boumerdes: **Examineur.**

Madame **Ratiba KETTAB**, Maître de conférence à l'Ecole Nationale Polytechnique: **Examineur**

Monsieur **Belkacem MENADI**, Maître de conférence à l'Université de Blida: **Examineur.**

Mes remerciements vont aussi à monsieur **A.Kasser**, Maître de conférence à l'école Nationale de polytechnique, qui m'a fait l'honneur de s'intéresser à ce travail malgré ses lourdes charges. Ses idées me seront sans doute très utiles pour la suite de cette recherche.

Je remercie monsieur **Djerbib youcef**, Dr à l'Université de Sheffield en grande Bretagne de m'avoir fait bénéficier de ses connaissances, de son expérience et de ses résultats dans le domaine du matériau de construction.

Enfin, je tiens à exprimer tout au fond de mon coeur mes reconnaissances à ma famille et tout particulièrement à ma femme qui m'offre toujours un appui sûr par son soutien et son encouragement. C'est grâce à son amour éternel que je peux franchir les obstacles les plus difficiles non seulement durant la thèse mais aussi dans la vie.

TABLE DES MATIERES

Résumé	i
Remerciements	ii
TABLE DES MATIERES	iii
Liste des Figures	viii
Liste des Tableaux	x
Liste des photos	xii

INTRODUCTION

✓ Introduction Générale	1
✓ Objectifs de cette recherche	4
✓ Plan de la these	5

CHAPITRE I: REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

1.1	Introduction	7
1.2	Laitier de haut fourneau	8
1.2.1	Definition	8
1.3	Fabrication et Utilisation	8
1.3.1	Fabrication	8
1.3.2	Utilisation	11
1.3.2.1	Agrégat refroidit a l'air	11
1.3.2.2	Agrégat expansive	11
1.3.2.3	Laitier pour ciment	11
1.3.3	Composition chimique des laitiers des hauts fourneaux	12
1.3.4	Caractéristiques minéralogiques	14
1.3.4.1	Laitier cristallise	14
1.3.4.2	Laitier vitrifie	15
1.3.4.3	Activité hydraulique	16
1.3.5	Indices de basicité Module Chimique- Indices d'Activité	16
1.4	ciment au laitier	18
1.4.1	Fabrication	18
1.4.2	Broyage Simultané	18
1.4.3	Broyage Séparé	18
1.4.4	Spécification et Règlement	19
1.4.5	Hydratation de Ciment de laitier	22
1.4.6	Influence de la finesse du laitier et de la quantité de verre	24
1.4.7	Influence de la température	24
1.5	Formulation du mélange et Développement de la résistance	24
1.6	Propriété des bétons aux laitiers à l'état frais	26
1.6.1	Ouvrabilité	26
1.6.2	Temps de prise et la perte de l'ouvrabilité	27
1.6.3	Ressuage et ségrégation	28
1.6.4	Chaleur D'hydratation	29
1.7	Propriétés des bétons aux laitiers à l'état durci	31

1.7.1	Développement de la résistance	31
1.7.2	Effet de la cure sur la résistance et sur les autres propriétés	35
1.7.3	Module d'élasticité	35
1.7.4	Retrait	36
1.7.5	Fluage	38
1.8	Durabilité	38
1.8.1	Perméabilité et porosité	39
1.8.2	Résistance à l'eau de mer et aux attaques sulfatées	42
1.8.3	Résistance à la corrosion	42
1.8.4	Réaction Alkali Silice	45
1.9	Utilisation pratique de laitier de haut fourneau	50
1.10	Conclusion	54

CHAPITRE 2 : MATERIAUX, ET CONCEPTION DES MELANGES

2.1	Introduction	55
2.2	Programme expérimentale	55
2.3	L'objectif de la formulation du mélange	55
2.4	Matériaux	56
2.4.1	Ciment	56
2.4.2	Laitier	56
2.4.3	Agrégats	56
2.4.4	Ciment avec des alkalis élevée	57
2.4.5	Silice fondue amorphe	57
2.4.6	Super plastifiant	57
2.5	Conception du mélange	58
2.5.1	Procédé et fabrication des éprouvettes	58
2.5.2	Etude préliminaire: Résultats et discussion	59
2.5.3	Ouvrabilité	59
2.5.4	Résistance à la compression	61
2.5.5	Développement de la resistance	62
2.6	Conclusions	62

CHAPITRE 3 : PROPRIETES DU BETON AU LAITIER CONTENANT UN SUPERPLASTIFIANT

3.1	Introduction	65
3.2	Protocoles expérimentaux	65
3.2.1	Caractéristiques et méthode d'essai	65
3.2.2	Detail des tests	65
3.2.3	Condition de cure	65
3.2.4	Confection des éprouvettes	65
3.2.5	Appareillage et procédure du test	66
3.2.6	Essais de la vitesse du son	66
3.2.6.1	Introduction	66
3.2.6.2	Detail de l'essai	67

3.2.7	Retrait et gonflement	67
3.2.7.1	Introduction	67
3.2.7.2	Détail des essais	67
3.2.7.3	Appareillage, Préparation de l'échantillon et Et procédure du test	68
3.3	Résultats du test et discussion	68
3.3.1	Resistance a la compression	68
3.3.2	Développement du gain de la résistance	69
3.3.3	Effet de la condition de cure	71
3.3.4	Comparison avec le béton normal	73
3.4	Resistance à la flexion	75
3.4.1	Comparison avec les résultats des littératures	81
3.5	Modulus d'élasticité	81
3.5.1	Resultants et discussions	81
3.5.2	Comparison du module d'élasticité avec les données de la littérature	84
3.6	Vitesse du son	85
3.7	Retrait et gonflement	89

CHAPTER 4 : QUELQUES ASPECTS DE LA DURABILITE DU BETON AU LAITIER

4.1	Introduction	91
4.2	Porosité	91
4.2.1	Introduction	91
4.2.2	Méthode de porosimetrie au mercure	92
4.3	Microstructure	93
4.3.1	Introduction	93
4.4	Carbonation	95
4.4.1	Le processus de carbonatation	96
4.5	Reaction alkali-silice	96
4.6	Programme experimental	97
4.6.1	But de cette étude	97
4.6.2	Type de mélange, Taille des éprouvettes et fabrication	97
4.6.3	Détails des tests	99
4.6.4	Appareillage, Préparation de l'échantillon et test	99
4.6.5	Microscope à balayage électronique (S.E.M)	101
4.7	Résultats du test et de discussion	104
4.7.1	Structure des pores du laitier	107
4.7.2	Microstructure	112
4.7.3	Conclusion	112
4.8	Carbonatation	127
4.8.1	Résultats de l'effet de la carbonatation sur la résistance à la compression	127
4.8.2	Comparison avec les données publiées	133
4.9	Incidence mécanique dans l'expansion R.A.S dans le béton	134

4.9.1	Introduction	134
4.9.2	Résultats du test et discussion	134
4.9.3	Mesure de la vitesse des impulsions	136
4.9.4	Influence de la RAS sur la propriété du béton	136
4.9.5	L'efficacité du laitier	138

CHAPITRE 5 : MATERIAUX, CONCEPTION DU MELANGE ET ETUDES PRELIMINAIRES POUR 50% DE LAITIER

5.1	Introduction	146
5.2	Objectifs de la conception du mélange.	147
5.3	Matériaux	147
5.3.1	Ciment	148
5.3.2	Laitier	148
5.3.3	Super plastifiant.	149
5.3.4	L'eau de gâchage	149
5.3.5	Sable	149
5.3.6	Gravier	150
5.4	Procède et confection du béton	150
5.5	Confection du béton.	150
5.6	Études de préliminaire : Résultats et discussion	152
5.6.1	Ouvrabilité	152
5.6.2	Densité du béton frais	153
5.6.3	Résistance a la compression: Uniformité des résultats	154
5.6.4	Diagramme de conception des mélanges	155
5.7	Conclusion	158

CHAPITRE 6 : LES CARACTERISTIQUES DU BETON A 50% DE LAITIER CONTENANT UN SUPERPLASTIFIANT

6.1	Introduction	159
6.2	Programme expérimental	159
6.2.1	Buts et grandes lignes du programme des essais.	159
6.2.2	Taille des spécimens	159
6.2.3	Conditions de traitement	160
6.2.4	Confection des éprouvettes	160
6.2.5	Instrumentation et procédure des tests.	160
6.2.5.1	Résistance à la compression, résistance à la traction et l'essai de la résistance à la flexion	160
6.2.5.2	modules d'élasticité	161
6.3	Résistance à la compression : résultats et discussion.	161
6.3.1	Résistance a la compression au jeune âge et à 28 jours	161
6.3.2	Effet de la condition de la cure sur la résistance à longs termes	165
6.3.3	Effet d'introduction d'humidité après un séchage prolongé	169
6.3.4	Comparaison avec le béton ordinaire	171
6.4	La résistance de traction.	173
6.4.1	Effet de l'âge et des conditions de cure	174

6.4.1.1	la resistance de traction par fendage	174
6.4.1.2	Résistance à la flexion	177
6.4.2	Relation entre la résistance de traction et la résistance de compression	180
6.4.3	Relation entre la résistance de la flexion et à la traction par fendage	181
6.4.4	Comparaison avec les informations publiées	186
6.5	Modules d'élasticité statiques	186
6.5.1	Module d'élasticité : résultats et discussions.	186
6.5.2	Relation entre le module d'élasticité et la résistance de compression.	188
6.5.3	Comparaison du module d'élasticité statique avec les résultats publiés	189
6.6	Conclusion	190

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES GENERALES

Conclusions et perspectives Générales	193
Recommandations pour les travaux ultérieurs	197

REFERENCES	198
-------------------	-----

GLOSSAIRES	208
-------------------	-----

LISTE DES FIGURES

Figure N°		
1	Réduction de l'émission directe de CO ₂ entre 65% et 90% (laitier considéré comme co-produit à zéro émission de CO ₂)	2
1.1	Coupe schématique d'un haut fourneau	10
1.2	Diagramme de Keil	14
1.3	Effet de perte de l'ouvrabilité de 50% binder ciment par rapport au ciment Portland à des températures différentes	28
1.4	Variation in concrete temperature at mid-height in foundation unit	30
1.5	L'influence du ciment au laitier sur l'élévation de la température adiabatique	31
1.6	Indicative cement strength development	33
1.7	Influence of slag on Strength Increases between 1 month and one year	33
1.8a	The effect of temperature on strength development of water cured concrete with and without slag	34
1.8b	Comparison of the strength development of concrete with and without slag, normal cured and heat cycled cured	34
1.9	Effet du remplacement du ciment au laitier de haut Fourneau Sur le coefficient de perméabilité à 28 jours	40
1.10	Effet du remplacement du ciment au laitier de haut fourneau sur le coefficient de perméabilité	41
1.11	Processus de corrosion dans le béton armé	44
2.1	Courbe granulométriques des différents granulats utilisés	57
3.1	Variation de la résistance à la compression avec l'âge (50% de laitier)	76
3.2	Variation de la résistance à la compression avec l'âge (65% de laitier)	76
3.3	Effet de la cure sur la résistance de compression avec l'âge (50% et 65% laitier)	77
3.4	Effet de la cure sur la résistance de compression avec l'âge (50% et 65% laitier)	77
3.5	Effet de (7F+L) sur la résistance de compression avec l'âge (50% et 65% laitier)	78
3.6	Variation de la résistance à la flexion avec l'âge (50% de laitier)	78
3.7	Variation de la résistance à la compression avec l'âge (65% de laitier)	79
3.8	Effet de l'âge sur la résistance à la flexion (50% et 65% de laitier)	79
3.9	Effet de la condition de cure dans le laboratoire sur la résistance de flexion	80
3.10	Effet de la cure de 7F+L sur la résistance à la flexion	80
3.11	Relation entre le module d'élasticité et la résistance de compression	85
3.12	Relation entre la vitesse du son et l'âge (50% de Laitier)	87
3.13	Relation entre la vitesse du son et l'âge (65% de laitier)	87
3.14	Relation entre la vitesse du son et la résistance à la compression (50% de laitier)	88
3.15	Relation entre la vitesse du son et la résistance à la compression (65% de laitier)	88
3.16	Retrait et Gonflement du béton au laitier avec 50% remplacement de laitier	89
3.17	Retrait et Gonflement du béton au laitier avec 65% remplacement de laitier	90
4.1	Dépression capillaire du mercure, montrant angle de contact	94
4.2	Représentation shématique du type de pore (Ink-Bottle)	94
4.3	Représentation shématique de porosimetre a mercure	101
4.4	Représentation du microscope électronique SEM	102
4.5	Microscope électronique utilisé pour les essais de microstructure du béton au laitier	103
4.6	Distribution de la taille des pores à 28 jours avec 50% de substitution de laitier	106
4.7	Distribution de la taille des pores à 6 mois avec 50% de substitution de laitier	107

4.8	Distribution de la taille des pores cure à l'eau à 28jours et 6 mois pour 50% de laitier	107
4.9	Distribution de la taille des pores avec 50% remplacement de laitier cure lab.	108
4.10	Distribution de la taille des pores avec 50% remplacement pour 7jours fog +lab.	108
4.11	Distribution de la taille des pores à 28 jours avec 65% remplacement de laitier	109
4.12	Effet du séchage sur la distribution de la taille des pores à 6mois pour 65% de remplacement de laitier.	109
4.13	Distribution de la taille des pores pour 65% remplacement de laitier	110
4.14	Effet du séchage sur la distribution des pores à 28jours et 6mois pour 65% remplacement	110
4.15	Distribution de la taille des pores pour 65% remplacement de laitier	111
4.16	Distribution de la taille des pores à 6 mois pour 50% et 65% remplacement de laitier	111
4.17	Distribution de la taille des pores a 6 mois 50% et 65% remplacement de laitier	112
4.18	Effet de la cure dans la chambre froide sur la distribution des pores à 6 mois pour 50% et 65%	112
4.19	Changement de la vitesse du son due à la réaction alcali silice	143
4.20	Expansion due a la réaction alkali silice du béton au laitier avec le temps	143
5.1	Courbe granulométrie du sable et du gravier	149
5.2	Formulation du mélange du béton au laitier traite dans la condition de cure à l'eau	157
6.1	Relation entre la résistance à la compression et le ratio Eau/C+Laitier	164
6.2	Influence de la quantité du ciment total sur la résistance à la compression	165
6.3	Variation de la résistance à la compression avec l'âge	167
6.4	Variation entre la résistance à la compression avec l'âge	167
6.5	Variation de la résistance à la compression avec l'âge	168
6.6	Effet de la réintroduction de l'humidité sur la résistance des éprouvettes exposé dans un traitement sec pour 2ans	171
6.7	Développement de la résistance de la traction par fendage avec l'âge	176
6.8	Développement de la résistance à la flexion avec l'âge	180
6.9	La Relation entre la résistance à la traction par flexion et la compression	182
6.10	La Relation entre la résistance de traction et la résistance de compression	183
6.11	La Relation entre la résistance à la flexion et la résistance à la compression	183
6.12	La Relation entre la résistance à la flexion et la résistance à la compression	184
6.13	La Relation entre la résistance à la flexion et la résistance de traction par fendage	184
6.14	La Relation entre la résistance à la flexion et la résistance de traction par fendage	185
6.15	La Relation entre la résistance de traction et la résistance de compression (Eau)	185
6.16	La Relation entre la résistance à la flexion et la résistance à la compression (Lab.)	186
6.17	La variation du module d'élasticité avec la résistance de compression	190

LISTE DES TABLAUX

Tableau N°	Titre	
1.1	Composition chimique élémentaire du laitier de haut-fourneau	13
1.2	Constituants des laitiers cristallisés	15
1.3	Les indices de basicités les plus utilisées	17
1.4	Comparaison des normes Britanniques entre le ciment Portland et le ciment granule de haut fourneau	20
1.5	ASTM C595 Pour Les Ciment Composes	21
1.6	Les 5 types de Ciments Courants et leur Composition	22
1.7	Résistance à la compression et la flexion (MPa)	37
1.8	Effectiveness of Slag in reducing expansion due to ASR in mortar and concrete	48
1.9	Mix proportions of concrete, time to cracking and 200-day expansion	49
2.1	Composition chimique du ciment et du laitier	60
2.2	Analyse granulométrique de la silice fondue (verre de silice)	60
2.3	Composition chimique de la silice fondue (verre de silice)	61
2.4	Détails des mélanges préliminaires	63
2.5	La résistance à la compression de notre mélange sélectionné	64
2.6	Le développement de la résistance exprimée comme pourcentage à 28 jours	64
2.7	Les mélanges sélectionnés et le développement de la résistance	64
3.1	Développement de la résistance à la compression du béton au laitier	70
3.2	Développement du gain de la résistance en pourcentage par rapport à la résistance à 28jours	70
3.3	Développement du gain de la résistance en pourcentage par rapport à 50N/mm ²	71
3.4	Effet de cure sur le ratio des résistances à la compression	73
3.5	Développement de la résistance du béton avec CPA	74
3.6	Développement de la résistance du béton avec CPA	74
3.7	Développement de la résistance du béton avec du CPA	75
3.8	Résistance à la flexion du béton au laitier	82
3.9	Module d'élasticité statique à 28 jours	83
3.10	Module d'élasticité statique à 6 mois	83
3.11	Module d'élasticité statique du béton avec OPC/CEMSAVE	83
3.12	Propriété de la Vitesse du son du béton au laitier	86
3.13	Retrait et gonflement du béton au laitier à différent âges	90
4.1	Détails du mélange	99
4.2	Profondeur de la carbonatation du béton au laitier avec 50% remplacement	128
4.3	Effet de l'âge et la condition de cure sur la profondeur de la carbonatation et la résistance carbonate avec 65% du béton au laitier.	128
4.4	Effet de la carbonatation sur la résistance à la compression	129
4.5	Mesures de l'expansion et de la vitesse des impulsions dans la série de tests 1	139
4.6	Mesures de l'expansion et de la vitesse du son dans la série de tests 2	140
4.7	Données comparatives sur la carbonatation	144
4.8	Changements de la résistance due à RAS	145
4.9	Temps requis pour les deux bétons pour atteindre une expansion donné	145
5.1	Composition chimique du ciment CPA	148
5.2	Détails et propriétés du béton à l'état frais	151
5.3	Mixes choisie et développement de la résistance.	152

5.4	Mesures de slump test et la masse volumique du béton au laitier	153
5.5	Développement de la résistance du béton au laitier	155
5.6	Taux du développement de la résistance de La compression	155
6.1	Développement de la résistance du béton au laitier	163
6.2	Gain de la résistance à la compression comme pourcentage a celle à 28 jours	164
6.3	Effet de la cure sur la résistance a la compression	168
6.4	Effet de réintroduction de l'humidité après une cure dans un environnement s sur la résistance du béton.	170
6.5	Développement de la resistance du béton avec un ciment ordinaire	173
6.6	Propriété de la résistance à la traction par fendage du béton au laitier	175
6.7	La résistance a la flexion du béton contenant 50% de laitier	179
6.8	Module d'élasticité statique à 28 jours	188
6.9	Module d'élasticité statique à 28 jours et un an	188

LISTE DES PHOTOS

PHOTO N°.

1.12		Canalisation utilisée pour le transport des eaux usées Breda (Pays-Bas)	51
1.13		Port de Casablanca (Maroc, 1954-55) Construction de la forme radoub et du bassin	51
1.14		Rotherham (Grande Bretagne), 1952 Poutre en béton	52
1.15		Tuyaux en béton utilisés pour les transports des eaux usées(Belgique)	52
1.16		(Barrage Beverly, Afrique du sud), 1954-57	52
1.17		Ciment au laitier il a été choisi pour la réalisation de l'Université de Metz	53
1.18		Ciment contenant du laitier et du calcaire. il a été utilisé lors de la construction de l'Aéroport de Nancy	53
4.1	MEB microstructure	50% de laitier cure dans l'eau, montre une structure très dense (agrandissement 40x)	115
4.2	MEB microstructure	50% de laitier cure dans la chambre humide, montre une structure très dense (Agrandissement 80x)	115
4.3	MEB microstructure	50% laitier condition de cure dans l'eau, (Agrandissement 320x)	115
4.4	MEB microstructure	50% de laitier condition de cure dans la chambre humide. (Agrandissement 640x)	116
4.5	MEB microstructure	65% de laitier cure dans l'eau, montrant une structure très compacte et dense. (Agrandissement 160x)	116
4.6	MEB microstructure	65% laitier cure dans la chambre humide, montrant une structure très compacte et dense, (Agrandissement 320x)	117
4.7	MEB microstructure	65% de laitier condition de cure dans la chambre humide, contenant probablement Une pochette remplie avec C.S.H (Agrandissement 320x)	117
4.8	MEB microstructure	50% de laitier condition de cure dans le laboratoire, contenant des fissures. (Agrandissement 40x)	118
4.9	MEB microstructure	50% de laitier dans la condition de cure dans le laboratoire Contenant des fissures et des capillaires pores. (Agrandissement 160x)	118
4.10	MEB microstructure	65% de laitier traité au laboratoire Contenant des pores non uniforme mal distribué avec des microfissures provoqué par le retrait (Agrandissement 40x)	119
4.11	MEB microstructure	65% de laitier condition de cure au laboratoire, (Agrandissement 40x)	119
4.12	MEB microstructure	65% de laitier dans la condition de cure au laboratoire, (magnification 80x)	119
4.13	MEB microstructure	50% laitier dans la condition de cure dans le laboratoire, (Agrandissement 40x)	120
4.14	MEB	50% laitier dans la condition de cure dans le	120

	microstructure	laboratoire. Avec possibilité de présence de l'hydroxyde de calcium (Agrandissement 320)	
4.15	MEB microstructure	50% de laitier condition de cure 7 Jours dans la chambre humide, montrant la frontière entre le laitier et le ciment (magnification 320x)	121
4.16	MEB microstructure	50% de laitier condition de cure 7 jours dans la chambre humide montrant la frontière entre le laitier et le ciment (Agrandissement 320x)	121
4.17	MEB microstructure	65% de laitier 7 jours dans la chambre humide, montrant la frontière entre le laitier et le ciment, et leur texture compacte et dense (Agrandissement 80x)	122
4.18	MEB microstructure	65% de laitiers 7 jours dans la chambre humide (Agrandissement 640x)	122
4.19	MEB microstructure	50% laitier traite 7 jours dans la chambre humide, montrant le lien entre le ciment et le laitier (Agrandissement 40x)	123
4.20	MEB microstructure	50% de laitier traité 7 jours dans la chambre humide (Agrandissement 80x)	123
4.21	MEB microstructure	50% % laitier 7 jours traité dans la chambre humide montrant le lien entre le laitier et le ciment, (Agrandissement 160x)	123
4.22	MEB microstructure	50% laitier traité à 7 jours dans la chambre humide, montrant la Texture du laitier avec des pores et des microfissures provoquées par le retrait. (Agrandissement 320x)	124
4.23	MEB microstructure	50% de laitier traité à 7 jours dans la chambre humide, montrant la Texture du laitier avec des pores et des microfissures provoquées par le retrait. (Agrandissement 320x)	124
4.24	MEB microstructure	50% de laitier traité à 7 jours dans la chambre humide, montrant la texture du laitier avec des pores et des microfissures provoquées par le retrait. (Agrandissement 1250x)	124
4.25	MEB microstructure	65% de laitier traité à 7 jours dans la chambre, contenant une pochette remplie probablement de C.S.H. (Agrandissement 320x)	125
4.26	MEB microstructure	représente la pochette au dessus agrandi à 640x	125
4.27	MEB microstructure	Représente la photo 5.25 agrandi à 1250x.	126
4.28	MEB microstructure	65 laitiers traité à 7 jours dans la chambre humide, montrant à droite de la Photos l'etrangite qui à la forme d'une aiguille (Agrandissement 320x).	126
4.1a	Carbonatation	Surface d'un prisme brisé avec 50% de remplacement de laitier et traité dans le lab. (durée 3 mois)	130
4.2a	Carbonatation	Surface d'un prisme brisé avec 50% de remplacement de laitier et traite 7jours dans la chambre humide	130

		(durée 3 mois)	
4.3a	Carbonatation	Surface d'un prisme brisé avec 50% de remplacement de laitier et traité dans le lab. (durée 6 mois)	131
4.4a	Carbonatation	Surface d'un prisme brisé 100 x 100 x 500 avec 50% de substitution de laitier traité à 7 jours dans la chambre humide. (durée 6 mois)	131
4.5a	Carbonatation	Surface d'un prisme brisé de 100 x 100 x 500 avec 65% de substitution de laitier et traité dans un laboratoire. (durée 3 mois)	132
4.6a	Carbonatation	Surface d'un prisme brisé de 100 x 100 x 500 avec 65% de substitution de laitier et traité 7 jours dans la chambre humide. (durée 3 mois)	132
4.7a	Carbonatation	Surface d'un prisme brisé avec 65% de substitution de laitier et traité dans le laboratoire. (durée 6 mois)	133
4.8a		Surface d'un prisme brisé 100x100x500 mm avec 65% de substitution traité 7 jours dans la chambre humide (durée 6 mois)	133
4.1b	RAS	Première fissure visible avec 50% de laitier	141
4.2b	RAS	Déformation de 1000 microfissurations avec 50% de laitier	141
4.3b	RAS	Première fissure visible pour 65% de laitier	141
4.4b	RAS	Déformation de 1000 microfissurations avec 65% de laitier	141
4.1(c)	RAS	Déformation en expansion de 2000 microfissurations avec 50% de laitier	142
4.2©	RAS	Déformation en expansion de 2000 microfissurations avec 65% de laitier	142
4.1(d)	RAS	Déformation de 3000 microfissurations avec 50% de laitier	142
4.2(d)	RAS	Déformation de 3000 microfissurations avec 50% de laitier	142

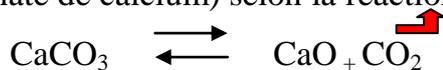
Introduction

✓ Introduction générale

Il est essentiel que la technologie de construction fasse attention à la qualité et à la longévité de la construction et aussi réfléchisse à la conservation de l'énergie, à la protection et à la conservation des ressources épuisables du monde.

La meilleure manière permettant de réaliser ces objectifs est d'utiliser les mélanges minéraux qui peuvent constituer un remplacement partiel du ciment. La production du ciment est actuellement possible dans presque tous les pays du monde en raison de la disponibilité des matières premières. Cependant, le coût de production du ciment est relativement élevé, et peut être réduit en utilisant des mélanges pouzzolaniques, ainsi que les déchets industriels ayant les propriétés pouzzolaniques. Ceci permettra d'aider en particulier quelques pays en voie de développement, où les besoins en logements et autres infrastructures à grande consommation en ciment sont immenses.

Le ciment le plus utilisé dans le monde est le ciment portland. C'est un produit dont la technologie est connue et maîtrisée par tous les acteurs de la chaîne de construction du bâtiment. En effet qui dit développement rapide dit souvent population importante et besoins croissants en logements et infrastructures, donc en ciment. Dans les 30 années à venir, la consommation de ciment de certains pays en voie de développement devrait doubler [1]. D'après une étude menée par "World Business council for Sustainable development", (WBCSD), l'industrie cimentière est responsable de 5% des émissions de gaz à effet de serre liées à l'activité humaine. Pour l'industrie du ciment ces émissions sont principalement de deux sortes: les émissions énergétiques liées à la production de l'énergie thermique nécessaire à la fabrication du clinker et les émissions du procédé dues au fait que le CO₂ fait partie des produits de la réaction chimique qui transforme le carbonate de calcium en clinker (décarbonation du carbonate de calcium) selon la réaction suivante:



Cette transformation est responsable de la majeure partie des émissions de CO₂ liées au processus de clinkérisation. Les émissions sont donc directement liées à la nature du ciment Portland et constituent 50% des émissions de l'industrie cimentière. Pour réduire les émissions du procédé, il faut diminuer la part du clinker dans le ciment ce qui

conduit à remplacer une partie de CaCO_3 par d'autres matériaux et donne ce que l'on appelle des ciments aux ajouts mélangés. Les matériaux de substitution les plus couramment utilisés depuis de nombreuses années sont les laitiers rejetés par l'industrie métallurgique et les cendres volantes issues de la combustion du charbon. Ces additions sont mélangées aux clinkers pour l'élaboration de nouveaux ciments.

L'utilisation la plus valorisante de ces ajouts reste toutefois leur incorporation dans le ciment qui met à profit leurs propriétés pouzzolaniques (cendres volantes) et ou hydrauliques latentes (laitier).

Du point de vue de cette incorporation, seul le laitier peut être substitué, au ciment Portland dans des proportions maximales puisqu'elles peuvent atteindre plus 95% en poids du ciment. A ce niveau de substitution, la valorisation en termes de limitations d'émissions directes de CO_2 est maximale. Le graphe ci-dessous, permet de comparer les différentes émissions de CO_2 théoriques, émises lors de la fabrication des différents types de ciments composés [2]. La proportion de laitier dans chaque type de ciment augmente de gauche à droite avec 0% en poids de laitier pour un ciment CEM I 52.5N et plus de 81% en poids de laitier dans un ciment CEM III/C ou ciment sursulfaté

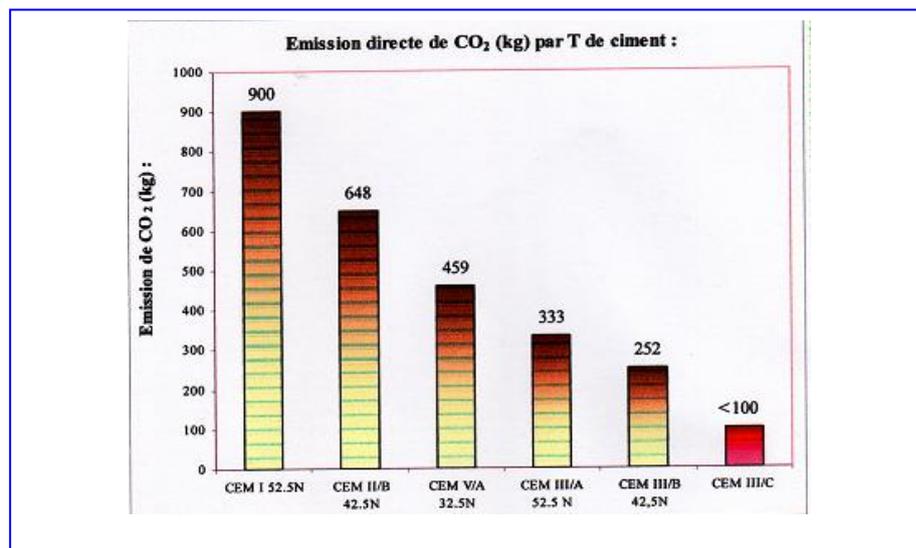


Fig.1 Réduction de l'émission directe de CO_2 entre 65% et 90% (laitier considéré comme co-produit à zéro émission de CO_2) [2]

Ce graphe nous permet d'apprécier facilement l'importance de soutenir le développement et la croissance des ciments au laitier (CEM III) Dans une politique cimentière de gestion et de réduction des émissions de gaz à effets de serre.

Les ciments avec ajout de laitier sont également plus faciles à utiliser. La densité faible des laitiers par rapport au clinker permet d'obtenir, pour un poids équivalent de ciment et pour une quantité identique d'eau, un volume de pâte plus élevé qui permet ainsi une meilleure maniabilité du ciment. Une augmentation de la quantité de laitier incluse dans le ciment augmente aussi le temps de prise du ciment. Un passage de 35% à 60% augmente de 60 minutes le temps de prise initiale et limite ainsi par exemple la vitesse de coffrage du béton. Un autre paramètre affecté est le ressuage du ciment, c'est-à-dire la quantité d'eau qui décante du ciment lors de la prise. Si les particules du laitier sont fines alors le ressuage sera plus faible. De plus, les laitiers possèdent également des propriétés physico-chimiques et des applications avantageuses telles que leur haute résistance aux attaques de sulfates, une très faible perméabilité, une faible chaleur d'hydratation (utilisation dans le béton de masse), un bon comportement dans le milieu agressif, une bonne résistance au gel, et une excellente durabilité.

Les adjuvants comme les super-plastifiants pour matériaux cimentaires sont relativement un nouveau type de mélange. Les superplastifiants, lorsqu'ils sont ajoutés au béton, peuvent produire des bétons maniabiles avec réduction de l'eau, ce qui permet d'avoir de haute résistance avec des ciments réduits dans le béton. L'utilisation des super plastifiants améliore ainsi la maniabilité, augmente la résistance au jeune âge et à long terme, et améliore la durabilité, le pompage, et l'imperméabilité.

Ces adjuvants ont le pouvoir d'améliorer facilement la fluidité, cela permet donc des remplacements élevés du ciment par du laitier. Dans ce cas, l'utilisation du laitier dans le béton peut devenir avantageuse et acceptable. Combiné avec un effet bénéfique dû à un développement de la résistance à long terme, une grande incorporation du laitier dans le béton contenant un superplastifiant peut être un avantage technique pour l'industrie de la construction et pour le béton futuriste.

✓ **Objectifs de la recherche**

La majorité des premiers travaux sur le béton au laitier était concentrée sur un faible pourcentage de substitution du ciment par le laitier. La majorité des travaux rapportent des taux de remplacement d'environ 20-30% de ciment. En algérie Quelques auteurs ont donné plus d'intérêt au remplacement du ciment par le laitier dans le béton. A L'exception de ceux-ci, il n'y a pas de références documentées concernant le béton contenant une grande quantité de laitier.

Malgré des avantages apparents obtenus par l'utilisation des laitiers granulés de haut fourneau, il y a une grande hésitation à étendre leur utilisation au béton à cause de certaines idées fausses et des rapports contradictoires de recherches. Ce travail à donc pour objectif de mettre en évidence des informations importantes sur les caractéristiques de performances du béton contenant une grande quantité de laitier et un superplastifiant. Le but et les objectifs de cette recherche sont:

- L'étude des propriétés du béton contenant 50% et 65% de laitier.
 - Quelques aspects de la durabilité du béton contenant 50% et 65% de laitier
 - L'étude des propriétés du béton contenant 50% de laitier pour les résistances de 30, 40, et 50N/mm².
- 1- Des mélanges avec 50% et 65% de substitution du ciment par du laitier ayant une résistance a 28 jours de 50N/mm². les mélanges doivent être tout à fait maniable (slump plus de 100 mm). Avec un faible ratio Eau/ciment composé pour assurer une bonne durabilité.
 - 2- Les propriétés de résistance en relation avec les effets de cure avec l'age: résistance de compression et de flexion sont les propriétés principales qui ont été testées pendant 6 mois.
 - 3- Module d'élasticité en relation avec les effets de cures et testé jusqu'a 6 mois.
 - 4- Vitesse de pulsation en relation avec les effets de cures et testé jusqu'à 6 mois
 - 5- Gonflement et retrait
 - 6- Quelques aspects de durabilité telles que: Porosité, Microstructure, Carbonatation, Résistance aux alcali-silice.
 - 7- Des mélanges du béton au laitier ayant une résistance a la compression à 28 jours de 30, 40, 50N/mm², ont été réalisés. Les mélanges doivent être tout à fait

maniabiles (plus de 100 mm affaissement), et pour obtenir une résistance initiale très élevée comparable à celle du béton sans laitier. Les bétons de structure ($> 30 \text{ N/mm}^2$) doivent aussi avoir des rapports eau/ (liant) assez bas pour assurer une bonne durabilité.

8- La résistance à court et à long terme des propriétés mécaniques, ainsi que l'établissement de relation entre plusieurs paramètres de résistance et d'élasticité.

9- La détermination des effets de la prolongation, et réintroduction de l'humidité après exposition dans un environnement sec, sur le béton au laitier.

Vue l'importance du champ de recherche et du facteur temps, la présente investigation ne peut en aucun cas être traitée comme une solution complète pour les problèmes associés aux propriétés du béton au laitier ainsi que son comportement dans des cas précis de structure au béton. Toutefois on espère que cette étude puisse combler le fossé et permettre l'utilisation du béton à haute teneur en laitier, et d'améliorer son aptitude pour la réalisation des éléments structuraux en béton spécialement en Algérie.

✓ **Plan de la thèse**

Le chapitre 1 présente une revue de la documentation sur les connaissances actuelles de l'effet de l'incorporation du laitier dans le béton. La revue est concentrée sur les informations actuelles et celles concernant les études présentées dans cette thèse.

Le chapitre 2 couvre les matières utilisées dans cette recherche et la formulation des mélanges. La résistance à court et à long terme sont présentées. Le chapitre 3 présente les propriétés mécaniques du béton à haute teneur en laitier, avec des résistances de compression à court et long terme, modules d'élasticité à court terme, vitesse du son, retrait et gonflement sont décrits. Les variables sont les trois conditions de cure.

Des aspects de durabilité du béton avec le laitier sont présentés dans le chapitre 4. Ainsi, l'effet des trois conditions de cure sur la distribution des dimensions des pores, la microstructure, la carbonatation, et la résistance à la réaction alkali silice sont présentés.

Le chapitre 5 présente la conception et la formulation des mélanges. Un abaque des mélanges est produit pour les bétons contenant 50% de laitier et ayant une résistance de compression allant de $30\text{-}50 \text{ N/mm}^2$. Les résistances à la compression à court terme de ces bétons ont également été présentées.

Le chapitre 6 met en évidence les propriétés mécaniques du béton à haute teneur en laitier, avec des résistances de compression à court et long terme, et modules d'élasticité à court terme. Les variables sont: trois résistances, 30 40, 50 N/mm², et trois conditions de cure.

Les conclusions sont montrées à la fin de chaque chapitre. Un sommaire des limites de ce travail, des conclusions générales et les recommandations pour les travaux futurs sont présentés.

CHAPITRE 1

1.1 Introduction

Les matériaux de substitution les plus couramment utilisés depuis des décennies sont les laitiers de haut-fourneau et les cendres volantes. Le laitier de haut fourneau est un sous produit de l'industrie sidérurgique qui peut être valorisé soit comme ajout au ciment (liant hydraulique), lorsqu'il est vitrifié et granulé, soit comme granulats, agrégats lorsqu'il cristallise. Quant aux cendres volantes, elles sont issues de la combustion du charbon dans les centrales thermiques. Elles peuvent être valorisées soit comme matière première dans le cru soit, également, comme ajout au ciment.

L'utilisation la plus valorisante de ces ajouts reste toutefois leur incorporation dans le ciment qui met à profit leurs propriétés pouzzolaniques (cendre volante) et/ou hydrauliques latentes (laitier).

Au point de vue de cette incorporation, seul le laitier peut être substitué, au ciment portland, dans des proportions maximales puisqu'elles peuvent atteindre plus de 95% en poids du ciment. A ce niveau de substitution, la valorisation, en termes de limitation d'émissions directes de CO₂ est maximale.

L'utilisation des laitiers granulés des hauts fourneaux est bénéfique à un grand nombre de propriétés de technologie des bétons à l'état frais et durci. De plus, si les ciments au laitier sont (respectueux) de l'environnement lors de leur production, ils possèdent également des propriétés physico-chimiques et des applications avantageuses telles que leur haute résistance aux attaques des sulfates, une très faible perméabilité, un bon comportement en milieu chimiquement agressif (utilisation en station d'épuration), une faible chaleur d'hydratation (utilisation dans le béton de masse), réduisent la demande et la remontée de l'eau, améliorent la résistance à long terme, résistent à la réaction d'alcali silice et la pénétration de chlorure et une excellente durabilité.

L'incitation la plus largement souhaitée pour l'utilisation des ciments aux laitiers granules pour le remplacement du ciment Portland est concernée par le besoin universel

de conserver les ressources, de protéger l'environnement et l'économie du mélange de béton final. L'importance de la consommation d'énergie, l'environnement sont tous des motifs justifiables pour d'inclusion des laitiers dans le béton mais l'amélioration qu'il provoque à la qualité du béton sans frais supplémentaires, est l'argument qui est sa faveur pour son utilisation.

Ce chapitre traitera quelques propriétés de technologie des laitiers de hauts fourneaux employés dans le béton. L'attention de lecteurs est attirée sur le grand nombre de revue_bibliographique (1-9).

1.2 Le laitier de haut-fourneau (LHF)

1.2.1 Définition

Le laitier est un matériau non-metallique, formé essentiellement de silicates et aluminosilicates de calcium. C'est un sous produit de l'industrie sidérurgique provenant de l'élaboration de la fonte. Il est constitué par la partie non ferreuse de la " charge", c'est-à-dire la gangue du minerai et par des constituants secondaire tels que les résidus de minerais de fer, de combustion du coke et de la carbonate de calcium (CaCO_3 , ou dolomite) [3].

1.3 Fabrication et Utilisation

1.3.1 Fabrication

Le haut fourneau est un réacteur à lit consommable à contre-courant. Les deux réactions principales qui s'y déroulent sont des réactions de réduction des oxydes et d'échange entre le métal et le laitier. On introduit par le gueulard alternativement du coke, du minerai et du fondant, qui sont les matières premières utilisées pour l'élaboration de la fonte.

Le lit de fusion comprend des couches alternées de coke, de minerai aggloméré et d'une faible quantité de fondant. Le coke, après combustion sous l'effet du vent chaud soufflé par les tuyères (1250°C), conduit à la fusion des matières premières introduites (appelées charges) et à la réduction du minerai. Les gaz de gueulard dépoussiérés sont utilisés pour

préchauffer le « vent » dans des récupérateurs de chaleur ou *cowpers*. Les temps de séjour moyens sont d'environ 8 heures pour les solides et de 3 secondes pour les gaz. Formé à partir des constituants du minerai, du fondant et des cendres du coke, le laitier est un silicate d'aluminium, de calcium et de magnésium. Il contient en outre d'oxydes de manganèse et de fer en faible quantité, ainsi que du sulfure de calcium. Le laitier a un rôle double :

- permettre l'élimination de la gangue à l'aide de caractéristiques de fusibilité et de fluidité convenables ;
- permettre les réactions d'échange avec le métal liquide agissant sur la composition de celui-ci.

On peut signaler que la fonte en fusion contient les éléments suivants : Fe, C, Si, Mn, P, S...et que le laitier en fusion en bas du haut fourneau contient les éléments SiO_2 , P_2O_5 , MnO , CaO , Al_2O_3 ...

Aux températures atteintes, tous les constituants non métalliques et non gazeux de la charge se liquéfient : la densité du liquide ainsi obtenu (le laitier) est d'environ 3 alors que celle de la fonte est de 7. Il y a donc séparation par gravité du laitier et de la fonte : le laitier surnage à la surface du bain de fonte dans le creuset du haut fourneau et rassemble les éléments provenant de la gangue, du fondant et des cendres de combustion. La séparation de la fonte et du laitier peut se faire par deux trous de coulées séparés (un trou de coulée haut permet d'assurer l'évacuation du laitier et un trou de coulée bas permet d'évacuer la fonte) ou par le même trou (un dispositif de siphonage permet leur séparation) voir Fig. 1.1.

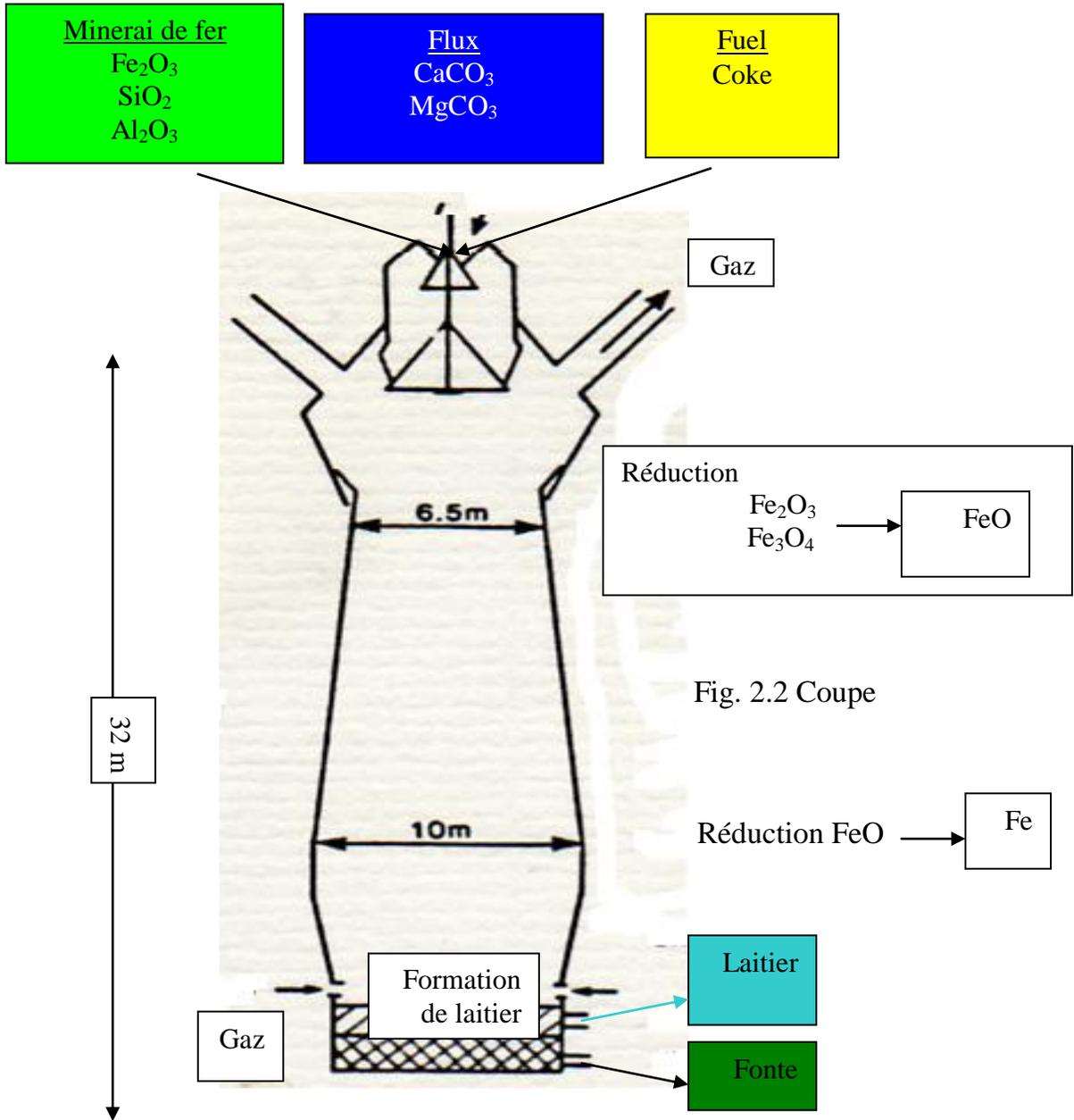


Fig. 1.1 Coupe schématique d'un haut fourneau [12].

1.3.2 UTISATION

Son utilisation dépend du traitement thermique qu'il a subi lors de son refroidissement depuis l'état liquide [4]. On retrouve le laitier de haut fourneau sous trois formes :

1.3.2.1 Agrégat refroidit à l'air

Cette méthode décrit la solidification lente du laitier liquide à l'air, qui conduit à un solide stable qui consiste en un système ternaire de silicates, particulièrement, la mellite (Ca- Al -Mg). Ce composé est une solution solide de gehlenite C_2AS et Akermanite C_3MS_2 . Cette méthode permet la production d'un produit de très haute densité. Après broyage et tamisage, le produit est employé principalement comme matériau de construction dans le terrassement des routes et pour la fabrication du béton.

1.3.2.2 Agrégat expansé

Ce processus fait intervenir l'introduction de l'eau sous des conditions contrôlées, à l'intérieur d'un cru cible à trous carrés dans lesquels se trouve du laitier liquide avec un rapport volumique assez bas d'eau/laitier. Le produit obtenu par cette méthode possède une structure poreuse de faible conductivité thermique à cause de la présence des gaz et vapeur dans les pores. Après broyage et tamisage, le matériau peut être utilisé dans la production des bétons légers.

1.3.2.3 Laitier pour ciment

Le laitier est obtenu à partir des décharges du haut fourneau pendant la fabrication de la fonte liquide. Sa transformation en un produit utile pour suppléer une fraction de ciment dans le béton est réalisée par une trempe rapide afin de lui donner un état vitreux. Deux méthodes de pulvérisation du laitier liquide sont employées

1 Désintégration à l'eau

2. Trempe à l'air

Le procédé le plus généralement utilisé et plus efficace pour la pulvérisation du laitier liquide est la désintégration à l'eau. Ce procédé produit de haut teneur en verre dans le laitier grâce à une trempe rapide à l'eau ce qui conduit du laitier liquide en fines

gouttelettes. Un rapport eau/laitier de 10 à 1 conduit à une solidification instantanée par refroidissement, cela assure une trempe complète et une teneur en verre approchant les 100%. Vu que la haute température améliore l'hydraulicité du laitier, la plupart des installations modernes de désintégration à l'eau du laitier sont construites à proximité des hauts fourneaux [5].

La méthode de trempe à l'air a été développée au Canada. Le laitier liquide est d'abord expansé par un traitement de jet d'eau contrôlé pendant qu'il est introduit d'une façon continue dans une plaque vibrante. Ceci casse vers le haut le laitier et projette le produit dans l'air pour transformer le produit sous la forme de granule. Le tableau 2.1 donne la production de laitier du monde en 1983 [6].

Le laitier bouleté de haut-fourneau est un sable artificiel de couleur beige obtenu par un traitement thermomécanique énergétique du laitier liquide issu du haut-fourneau. L'emploi exclusif d'eau douce pour la trempe procure une excellente qualité au produit. La structure vitrifiée ainsi obtenue et les caractéristiques physico-chimiques lui confèrent un grand potentiel hydraulique ; en présence d'un activant basique, le laitier bouleté devient un liant hydraulique de haute qualité.

Le laitier bouleté apparaît comme un laitier de classe 2 dans la norme NF P 98-106. Il est commercialisé sous deux formes - BSC et pré broyé, qui correspondent à des états distincts de division et de réactivité.

1.3.3 Composition chimique des laitiers des hauts fourneaux

De nombreuses études ont été effectuées pour déterminer la relation entre la composition chimique des laitiers et ses propriétés hydrauliques. Le laitier contient essentiellement quatre éléments dont l'expression en oxydes représente 95 à 97 % des constituants du laitier : chaux (CaO), silice (SiO₂), alumine (Al₂O₃), magnésie (MgO). Les autres phases sont des oxydes secondaires (FeO, MnO) et des composés sulfurés. Le tableau 1.1 présente la composition chimique élémentaire du laitier :

Tableau 1.1 : Composition chimique élémentaire du laitier de haut-fourneau [7]

Eléments	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	FeO	MnO	S
%	40 a 48	32 a 41	9 a 18	4 a 9	0.2 a 1	0.4a 0.7	0.6 a 1.5

Une classification chimique est proposée par les normes P 18 302 et NF P 98 106. Elle repose sur le calcul d'un produit, le produit C.A, dans lequel C représente la teneur en CaO et à la teneur en Al₂O₃. Ce produit représente une réactivité potentielle du laitier, mais cette dernière propriété est également influencée par la teneur en fines et par le taux de vitrification du produit. Trois types de laitier sont définis selon leurs caractéristiques chimiques d'après les normes P 18302 et NF P98 106 et en fonction de la valeur du produit C.A :

- type A comme **autres** : $C.A < 425$;
- type H comme **hématites** : $425 \leq C.A < 550$;
- type T comme **Thomas** : $C.A \geq 550$.

Le diagramme de Keil, diagramme triangulaire représentant le système ternaire chaux-silice-alumine (Figure 1.2), permet de situer le laitier de haut fourneau par rapport à d'autres liants utilisés en technique routière. Ce diagramme montre que les laitiers ont une composition relativement proche de celle du clinker du ciment Portland, même si celui-ci ne nécessite qu'un apport d'eau pour déclencher son hydraulité, alors que le laitier doit être activé.

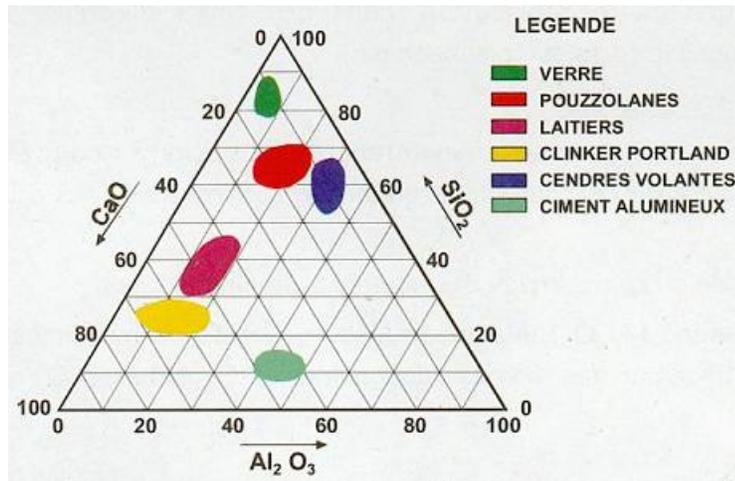


Figure 1.2 : Diagramme de Keil [8].

1.3.4 Caractéristiques minéralogiques

D'un point de vue minéralogique, les constituants des laitiers de haut fourneau sont essentiellement des silicates ou des silico-aluminates de chaux. Il s'agit d'une forme minéralogique stable.

1.3.4.1 Laitier cristallisé :

Le laitier cristallisé obtenu par refroidissement lent du laitier en fusion, le laitier cristallisé est composé de constituants cristallisés, essentiellement de silicate ou de silico-aluminate de chaux ainsi que des oxydes, des sulfures et exceptionnellement des nitrures issus essentiellement de la gangue et des fondants utilisés dans la matière première (minerai, fonte, acier,...). Le tableau 1.2 ci-dessous, présente les constituants des laitiers cristallisés.

Tableau 1.2 : constituants des laitiers cristallisés d'après [9]

Désignation	Composition minéralogique	Formule simplifiée
<i>Classe des silicates</i>		
Mélinite (mélange cristallin) :		
Gehlenite	$2 \text{ CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$	C_2AS
Akermanite	$2 \text{ CaO} - \text{MgO} - 2 \text{ SiO}_2$	C_2MS_2
Merwinite	$3 \text{ CaO} - \text{MgO} - 2 \text{ SiO}_2$	C_3MS_2
Silicate bicalcique (α = Bredigite) (β = Larnite) (γ)	$2 \text{ CaO} - \text{SiO}_2$	C_2S
Rankinite	$3 \text{ CaO} - \text{SiO}_2$	C_3S_2
β Wollastonite α	$\text{CaO} - \text{SiO}_2$	CS
Forsterite	$2 \text{ MgO} - \text{SiO}_2$	M_2S
Enstatite	$\text{MgO} - \text{SiO}_2$	MS
Monticellite	$\text{CaO} - \text{MgO} - \text{SiO}_2$	CMS
Anorthite	$\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - 2 \text{ SiO}_2$	CAS_2
Perovskite	$\text{CaO} - \text{TiO}_2$	

1.3.4.2 Laitier vitrifié

L'analyse des phases par diffraction des rayons X [10] fait apparaître, pour le laitier vitrifié, des raies de phases cristallisées (mélinite et merwinite). L'importance de la phase amorphe dépend du degré de vitrification : sur un laitier totalement vitrifié, seule la phase amorphe est représentée.

1.3.4.3 Activité hydraulique.

Les laitiers possèdent des propriétés hydrauliques latentes ce qui signifie qu'il est nécessaire de les activer pour les rendre réactifs vis-à-vis de l'eau. Les termes les plus souvent utilisés pour qualifier ces propriétés des laitiers sont la réactivité, hydraulicité ou encore l'activité vis-à-vis de l'hydratation. Leur réactivité dépend de plusieurs facteurs corrélés entre eux [11,12]:

- Influence de la composition chimique
- Influence de la "structure" du verre
- Influence de la finesse de laitier

1.3.5 Indices de Basicité – Module Chimique- Indices d'Activité.

La composition chimique est un facteur simple et déterminant pour définir l'hydraulicité des laitiers. C'est pourquoi des modules et index chimique ou encore indices d'activité ont été établis dans le but d'évaluer ce caractère hydraulique des laitiers.

On peut diviser ceux-ci en trois groupes:

1. indices tenant compte des éléments majeurs uniquement avec Al_2O_3 soit au numérateur soit au dénominateur.
2. indice tenant compte des éléments majeurs donnant un rôle acide à l'alumine
3. indices tenant compte des éléments majeurs et certains mineurs.

De nombreuses études ont montré que ces indices définissent des limites, mais ne permettent pas d'établir une relation stricte avec l'hydraulicité [17]. Par exemple, deux laitiers de composition chimique et teneur en verre identiques peuvent avoir des hydraulicités différentes, ce qui signifie que d'autres facteurs sont à prendre en considération notamment la structure du verre. Toutefois, certains indices montrent de bonnes corrélations (composition chimique/hydraulicité) lorsque les relations tiennent compte de la composition chimique complète et du taux de cristallinité (pourcentage de verre) de laitier. Le tableau ci-dessous reprend les valeurs les plus utilisées.

Tableau 1.3 les indices de basicités les plus utilisées.

Indices de basicité*
C/S
$(C+M+A)/S$
$C+M+1/3A)/(S+2/3A)$
A/S)
I de Vicat: $(A+S)/C$
Fm de Keil:
$(C+CaS+1/2M+A)/(S+MnO)$
C de Langavant: $20+C+A+1/2M-2S)$
$(C+M)/S$
$A/(A+M)$
$C/(A+M)$
C/A
$A/(A+S)$

* **C= CaO, S= SiO₂, A= Al₂O₃, M= MgO**

Les indices de basicité C/S et ((C+M)/S) définissent le caractère basique ou acide des laitiers selon que ces rapports soient, respectivement, supérieurs ou inférieurs à l'unité. Certains auteurs ont, par définition, attribué un rapport C/S < 1.3 pour laitier acide [10,11]. Définit la propriété de fusibilité, viscosité et de désulfuration des constituants qui sont la fonte et le laitier. Ce rapport C/S devient critique lorsqu'il atteint 1.5 et est optimum aux alentours de 1.4 [1]. D'autres indices correspondant au Module de Tetmayer (non La mesure de cette basicité est également cruciale pour les métallurgistes qui utilisent l'indice C/S à cause du caractère relativement constant des autres constituants. Ces indices repris dans le tableau) et à l'indice I_h [13, 16, 18]. Leurs formules, reprises ci-dessous, définissent l'hydraulicité du laitier.

1.4 Ciment au laitier

1.4.1 Fabrication

Le ciment de laitier est fabriqué à l'usine de ciment en broyant et en mélangeant le laitier granulé, ciment Portland et sulfate de calcium ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Il y a deux processus qui sont largement répandus dans le monde, broyage simultané et broyage séparé.

1.4.2 Broyage Simultané

Dans ce procédé le clinker, le laitier granulé et le gypse sont broyé ensemble dans des broyeurs à boulets ou dans des moulins à ciment. Le produit est alors connu sous le nom de ciment portland des hauts fourneaux ou PBHC (Portland Blast Furnace Cément). La qualité du produit et les procédures de contrôle pour ce type de ciment sont régies par les différents règlements qui seront énoncés ultérieurement.

1.4.3 Broyage séparé

Ce procédé a été utilisé en 1933, comme procédé principal dans la construction de barrages. Le broyage séparé était connu en Afrique du Sud en 1958 sous le nom de laitier de ciment; et au Royaume-Uni le laitier granulé moulu est vendu sous le nom de cemsave depuis 1969.

La première méthode est largement utilisée dans le monde mais en Angleterre la deuxième méthode est favorisée. La recherche de Heggan et Meusel [11] effectuée en Afrique du Sud en collaboration avec les fabricant du ciment et le comité pour la recherche industrielle et scientifique a confirme l'avantage de la méthode du broyage séparé du laitier et comme un ingrédient additif séparé dans le béton. Selon celles-ci les avantages suivants sont mentionnés :

- Le procédé de broyage est plus efficace en empêchant un excès de broyage des composants mou, du clinker et du gypse.
- Un meilleur contrôle de la qualité de production et de la qualité du produit.

- dosage du ciment de Portland et du laitier moulu peuvent être choisies selon le choix de l'utilisateur, optimisant ainsi les proportions pour différentes conditions de travail.
- Avoir la possibilité de pouvoir préserver les propriétés du laitier.

1.4.4 Spécification et Règlements

Actuellement, tout progresse, tout se multiplie, tout foisonne, et nous nous trouvons devant tant de produit, que nous ne savons plus faire un choix. Il nous faut absolument établir des règles réduisant ce foisonnement et permettent un choix judicieux. Cette nécessité de simplification était déjà apparue au début du XX siècle et c'est alors que la normalisation a été vraiment reconnue et que l'on a commencé son exploitation systématiquement [13].

A) Règlement Britannique

- Le BS 146 fut le premier règlement britannique pour l'utilisation du ciment portland au laitier industriel (PBFC).
- En 1968, un second règlement BS 4246, qui contient entre 50 et 90% de laitier. Ce ciment a une faible chaleur d'hydratation (utilisation dans le béton de masse),
- En 1986 fut établie la norme BS 6699. Elle renferme les spécifications pour l'utilisation du laitier de haut fourneau avec le ciment portland. Tableau 1.3 compare les recommandations du ggbfs avec du ciment portland

Tableau 1.4: Comparaison des normes Britanniques entre le ciment Portland et laitier granulé moulu [13].

Requirement	OPC BS 12	PBFC BS 146	LH PBFC BS 4246	Ggbfs BS 6699
1) Slag content	None	Up to 65%	50-90%	100%
2) Minimum fineness (km ² /kg)	225	225	225	275
3) Minimum glass content	n/a	n/a	n/a	Pure glass 40%: glass particles 85%
4) Minimum concrete compressive strength : mean of 3 tubes (N/mm ²)				
Age (days) 3	13	8	3	3*****
Age (days) 7	--	14	7	--*****
Age (days) 28	29	22	14	22*****
5) Setting time				
Initial (not less than)	45 mins	45 mins	1 hour	45 mins*****
Final (not greater than)	10 hours	10 hours	15 hours	10 hours*****
6) Soundness : maximum expansion	10mm	10mm	10mm	10 mm {70% ggbfs combined with 30% OFC
7) Maximum insoluble residue	1.5%	1.5%	1.5%	
8) Maximum magnesium	4.0%	7.0%	9.0%	
9) Sulphur :				1.5%
a) Max present as sulphide	n/a	1.5%	2.0%	14.0%
b) Max present as SO ₃	3.0%	3.0%	3.0%	
10) Max loss on ignition :				2.0%
temperate climates	3.0%	3.0%	n/a	n/a
tropical climates	4.0%	4.0%	n/a	
11) Chemical modulus:				3.0%
a) $\frac{CaO + MgO + Al_2O_3}{SiO_2}$ not less than	n/a	n/a	n/a	4.0%
12) b) CaO ratio, not more than SiO ₂	n/a	n/a	n/a	1.0%
13) Maximum moisture content	n/a	n/a	n/a	
14) Maximum heat of hydration (meg)				1.4
7 days	n/a	n/a	250	1.0%
28 days	n/a	n/a	290	
				n/a
				n/a

B) Règlements Américains

Tableau 1.5 : ASTM C595 Pour Les Ciment Composes [13].

COMPOSITION	TYPE
Ciment de haut fourneau avec 25 à 70% de laitier	TYPE IS
Ciment à la pouzzolane avec 15 à 40% de pouzzolane	TYPE IP
Ciment à la pouzzolane avec 15 à 40% de pouzzolane Mais avec un développement de résistance plus faible que le type IP	TYPE P
Ciment de laitier avec minimum de 70% de laitier utilise avec de la chaux hydrate pour le mortier à maçonner	TYPE S
Ciment Portland à la pouzzolane contenant moins de 15% de pouzzolane	TYPE I (PM)
Ciment Portland au laitier contenant moins de 25% de laitier	TYPE I (SM)

La norme américaine autorise l'utilisation de pouzzolane et de laitier dans les ciments composés à condition de satisfaire aux spécifications de l'activité pouzzolanique. Notamment, la résistance a la compression du ciment composé doit atteindre au moins 75% du ciment portland de référence, voir tableau 1.3

C) Règlements européennes

Dans le cadre de l'Europe, les normes relatives aux produits de construction des différents pays européens doivent s'harmoniser et s'uniformiser sous la forme d'une norme européenne définitive remplaçant obligatoirement les normes nationales existantes. La prénorme européenne ENV 197-1 " Ciment, spécification et critères de conformité – Partie 1 : Ciment courant " a été adopte le 15 avril 1993. Etant donne les nouveautés introduite dans la prénorme, les commissions compétentes des instituts de normalisation nationaux européens ont décide de remplacer leur normes nationales par la prénorme européenne dans l'attente d'une harmonisation complète des normes nationales au sein de

la CEE sur la base de la norme EN 197 définitive. La prénorme ENV 197 – 1 définit 5 types de ciment dont la composition doit être conforme au tableau 1.6.

Tableau 1.6 : Les 5 type de Ciments Courants et leur Composition [13]

TYPE	NOTATION	CLINKER	CONSTITUANTS	SECONDAIRE
Ciment Portland	CEM I	95 - 100	-----	0 - 5
Ciment Portland Composé	CEM II A	80 – 94	6 – 20	-----
	CEM II B	65 -79	21 - 35	-----
Ciment de haut fourneau	CEM III A	35 - 64	36 – 65	0 – 5
	CEM III B	20 - 34 5	66 – 80	0 - 5
	CEM III C	5 - 19	81 - 95	0 - 5
Ciment pouzzolanique	CEM IV A	65 - 90	10 - 35	0 - 5
	CEM IV B	45 - 64	36 - 55	0 - 5
Ciment composé	CEM V A	40 – 64	18 – 30	0 - 5
	CEM V B	20 - 39	31 - 50	0 - 5

1.4.5 Hydrations de ciment de laitier

Pour comprendre comment le ciment Portland et le laitier qui sont utilisés ensemble influencent le béton, on doit comprendre leur composition individuelle, leur propriété et leur interaction en présence de l'eau.

Le ciment est un système qui est composé de nombreux minerais qui réagissent avec de l'eau à des taux différents, pour donner le produit d'hydratation de composition et de la cristallinité différentes, et influence les propriétés du produit final de différentes manières. En raison de la complexité, les réactions composé-eau sont souvent étudiées par des chercheurs sur des systèmes simples laitier-eau, mais qui restent toujours complexes.

Dans le ciment Portland mélangé au laitier tel que le ciment de cendre volante, le ciment pouzzalanic naturel ou le ciment au laitier, le principe est le même : la quantité, la réactivité, et l'interaction des différents composants de ciment régissent le développement des propriétés.

Ce fait est dû à leurs différentes réactivités, par exemple l'hydro solubilité et le taux d'interaction avec d'autres composants. La réactivité à son tour, dépend de leur forme

cristalline ; la vitrosité, la concentration des défauts structuraux et cristallins, la composition et concentration ionique de la phase liquide, le taux de cristallisation des hydrates de la phase liquide, la température, et autres.

Quant le laitier est seul, il montre un peu ou pas d'activité hydraulique, mais avec la présence des activateurs, il se comporterait en tant que ciment hydraulique ; les activateurs utilisés sont le ciment Portland, l'hydroxyde de calcium et le sulfate de calcium.

La complexité de l'hydratation du ciment de laitier a encouragé beaucoup de chercheurs à travailler dans ce secteur. Berry [16] a montré que le laitier en contact l'eau dégage des ions de calcium dans la solution, mais en raison du peu de concentration de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ lorsque comparé à celui du ciment de Portland, le laitier n'hydratera pas même après plusieurs mois. A partir de son étude sa conclusion était que le laitier montrera l'activité hydraulique quand il est placé dans la solution saturée de d'hydroxyde de calcium ($\text{Ca}(\text{HO})_2$). Fulton [17] a montré qu'en contact avec l'eau, hydratation du laitier est arrêté par la formation d'un gel acide imperméable sur les périphéries du grain du laitier. Il a conclu qu'en présence de l'hydroxyde de calcium, ces surfaces se briseront. Ceci a été lié à d'autres activateurs tels que $\text{Na}(\text{OH})$ et $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

L'hydratation du ciment au laitier est produite par la présence des activateurs, du gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) et de la portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Le dernier est dégagé de l'hydratation du ciment C_3S et C_2S :



Reground [12] a identifié les C-S-H , C_4AH_8 et C_2ASH_8 comme hydrate avec l'activation de $\text{Na}(\text{OH})$, C-S-H et C_4AH_{13} , comme le résultat de l'activation de la chaux. Ettringite produit par activation de sulfate. Une activation combine de gypse + de la chaux donne C-S-H et l'ettringite.

Pour comprendre l'activité du laitier sur l'hydratation du ciment avec du laitier granulé du haut fourneau ; on doit comprendre le procédé de libération de la chaleur.

Plusieurs auteurs, ont montré que la chaleur de l'hydratation du ciment de laitier provient principalement de l'hydratation de la partie du ciment. Regourd [11] a montré que le laitier du ciment de Portland s'hydrate plus rapidement que le laitier, mais tous les deux réagissent très tôt et ses mêmes résultats ont été aussi montrés par Roy et Idron [18].

Indépendamment de la présence de la chaux et du gypse il y a quatre autres facteurs qui régissent l'hydraulité du laitier.

1. La composition chimique, voir la section 1.3.3
2. Degré de vétrification "contenu de verre"
3. Qualité des laitiers et des clinkers
4. La température

1.4.6 Influence de la finesse du laitier et de la quantité de verre

La bonne vétrification du laitier n'est pas le critère de sa réactivité optimale dans le ciment de laitier [12]. Regourd [12] a prouvé que le laitier avec un contenu de C_3S élevé agit en tant qu'activateur efficace du laitier dans le développement de la résistance du ciment de laitier allant de 2 jours à 28 jours. Plus tard et jusqu'à une année, la qualité et la réactivité du laitier sont plus importantes que la nature du clinker.

1.4.7 Influence de la temperature

La température est en même temps un facteur thermodynamique et cinétique, qui a été utilement appliqués dans la détermination de la maturité du béton et de suivi de durcissement du béton [18]. Les énergies d'activation (apparentes) les plus élevées calculées pour un ciment de laitier par rapport aux ciments Portland étant la règle clairement établissent que le ciment du laitier peut tirer bénéfice de l'activation thermique [18].

1.5 Formulation du mélange et développement de la résistance

Le développement de la résistance du béton incorporant des laitiers est lié à la méthode utilisée pour sélectionner les proportions de mélange. Trois grandes approches

mixe proportion ont été développées en tenant compte de l'hydrations ont soit réduite ou a surmonter les difficultés pour obtenir une résistance acceptable au jeune l'âge.

La première méthode implique un remplacement direct de ciment par des laitiers. Ceci est habituellement fait sur un même remplacement poids par poids, ceci a comme conséquence la résistance a la compression et la flexion inférieure aux âges jeune : l'égalité avec béton normal et plus grand sera atteinte et au delà des 6 mois. Dans le béton non-armé c'est moins important en considérant les avantages obtenu par réduction de l'élévation de la température due à la chaleur de l'hydrations. Selon la Berry (16), les résultats de la recherche de CANMET liés au développement de résistance des bétons contenant des laitiers comme un remplacement direct de ciment de Portland a montré :

(a) - pour un rapport de mélange eau/ciment faible, la résistance de compression des bétons avec du laitier, indépendamment du pourcentage, était en général inférieure à ceux faits avec béton de ciment de Portland ayant la même résistance du début jusqu'à une année.

(b) - pour un rapport de mélange eau-ciment plus élevé, la résistance à la compression du béton avec laitier était inférieure à celle du béton ordinaire jusqu'à 28 jours ; à long terme, la résistance est atteinte mais pas souvent dépasse celle du béton ordinaire.

La deuxième méthode implique une addition de ciment de laitier. La teneur totale en cémentation du mélange est augmentée et l'ajustement du mélange est souvent fait en changeant le contenu des agrégats.

La troisième méthode nécessite le remplacement d'une certaine partie du ciment en augmentant la quantité par poids du laitier, avec des ajustements avec des granulats fins. Washingtonia [19] a prouvé qu'il n'y a aucune méthode pour la conception des mélanges de béton incorporant du laitier granulé du haut fourneau : la conception du béton avec laitier sera effectuée de la même manière que celle pour le mélange de ciment de Portland.

1.6. Propriétés des bétons aux laitiers à l'état frais

1.6.1 Ouvrabilité

Le résultat d'obtention du laitier par broyage est que les particules du laitier ont une forme irrégulière : sa texture de surface est, toutefois plus lisse que celle du ciment, qui entraîne, une amélioration des propriétés de l'ouvrabilité du béton contenant du laitier. Ce résultat a été rapporté par beaucoup de chercheurs [19,11]

Le deuxième résultat est que la densité du laitier est inférieure à celle du ciment qui signifie que le remplacement sur la base d'un poids égal aura comme conséquence une augmentation du volume de la poudre qui produit une augmentation de l'ouvrabilité. En mesurant l'ouvrabilité par l'essai d'affaissement il est difficile de connaître le taux d'amélioration : la plupart des investigateurs suggèrent que la mesure de l'ouvrabilité par la méthode standard en utilisant du laitier n'a aucun effet ou peu d'effet sur l'ouvrabilité [20,21]. Reeves [22] a prouvé que l'amélioration de l'ouvrabilité provoquée par l'addition du laitier est affectée seulement quand le béton est ouvrable. En réalité l'utilisation du laitier implique une réduction de la teneur eau pour les mêmes caractéristiques de cohésion, d'écoulement et de tassement en utilisant une pompe ou un vibreur mécanique.

Le remplacement d'une proportion de ciment par du laitier provoque une légère diminution de la teneur en eau pour la même ouvrabilité selon la quantité du laitier, du contenu du ciment et de la distribution de la dimension des particules des poudres (finesse). Fulton a indiqué qu'avec l'ouvrabilité constante la réduction de la teneur en eau est de l'ordre de 5 % avec probablement une augmentation de la résistance [19]. La forme sphérique et la distribution des particules du laitier de petite dimension influencent les propriétés rhéologiques de la pâte de ciment produisant la réduction de la quantité de l'eau exigée pour un degré donné d'ouvrabilité, comparé à celui de la pâte de ciment portland seulement.

L'utilisation du laitier granulé et moulu du haut fourneau avec des dimensions des particules correspondant à une surface spécifique de Blaine de 508 à 608 m²/kg, a montré qu'environ 6.4 pour cent de réduction de l'eau exigée pour l'écoulement standard (ASTM

C109) était possible pour un grand nombre de mélange du ciment Portland avec laitier contenant 0 à 65% de remplacement du ciment par le laitier [11]. Ellis rapporte que Wainwright [19] à prouver que le l'ouvrabilité à deux points développée par Tattersall est un indicateur meilleur pour l'ouvrabilité quand des laitiers sont ajoutées, que n'importe quels essais standards décrit dans le règlement BS.1981.

1.6.2 Temps de prise et Perte d'ouvrabilité

En ajoutant de l'eau au laitier, la réaction sera plus lente que celle du ciment Portland ce qui entraîne une augmentation du temps prise. Wainwright [19] a présenté une étude pour évaluer les temps prises du béton avec des remplacements de laitier allant de 0, 25% et 50%. Il a mesuré les temps de prise en utilisant l'essai de résistance à la pénétration sur des spécimens maintenus à 5°C, 15°C et 25°C. Sa conclusion est que a une température faible, le temps de prise est légèrement augmenter par incorporation du laitier mais a une température de 15° C et 25°C il y'a seulement une petite différence. Les tests effectués par Meusel et Rose [21] dans un laboratoire un utilisant un remplaçant de 0% et 50% percent dans un béton avec un affaissement de 150mm et maintenue a une température de 24°C et 27°C. Ils ont conclu qu'il n'y avait aucune différence significative dans le taux de réduction l'affaissement entre les différents bétons ; les données concernant la réduction de l'affaissement sont illustrées dans la figure 2.3. Banville [23] a rapporté, en utilisant l'essai de deux points de Tattersall, du béton avec le remplacement de 0, 40% et de 70% du ciment par des laitiers avec et sans un super-plastifiant. Cet essai a été effectué dans le laboratoire aux températures de 15°C et 18°C. Sa conclusion a confirmé qu'il n'y avait aucune différence dans la réduction de l'affaissement entre les deux bétons. Meusel et Hogan [11] ont constaté que les temps prise initial et final du ciment Portland des hauts fourneaux contenant 40%, de 50% et de 65% de remplacement en poids ont été retardés par environ une heure en comparaison avec ceux du ciment Portland ordinaire.

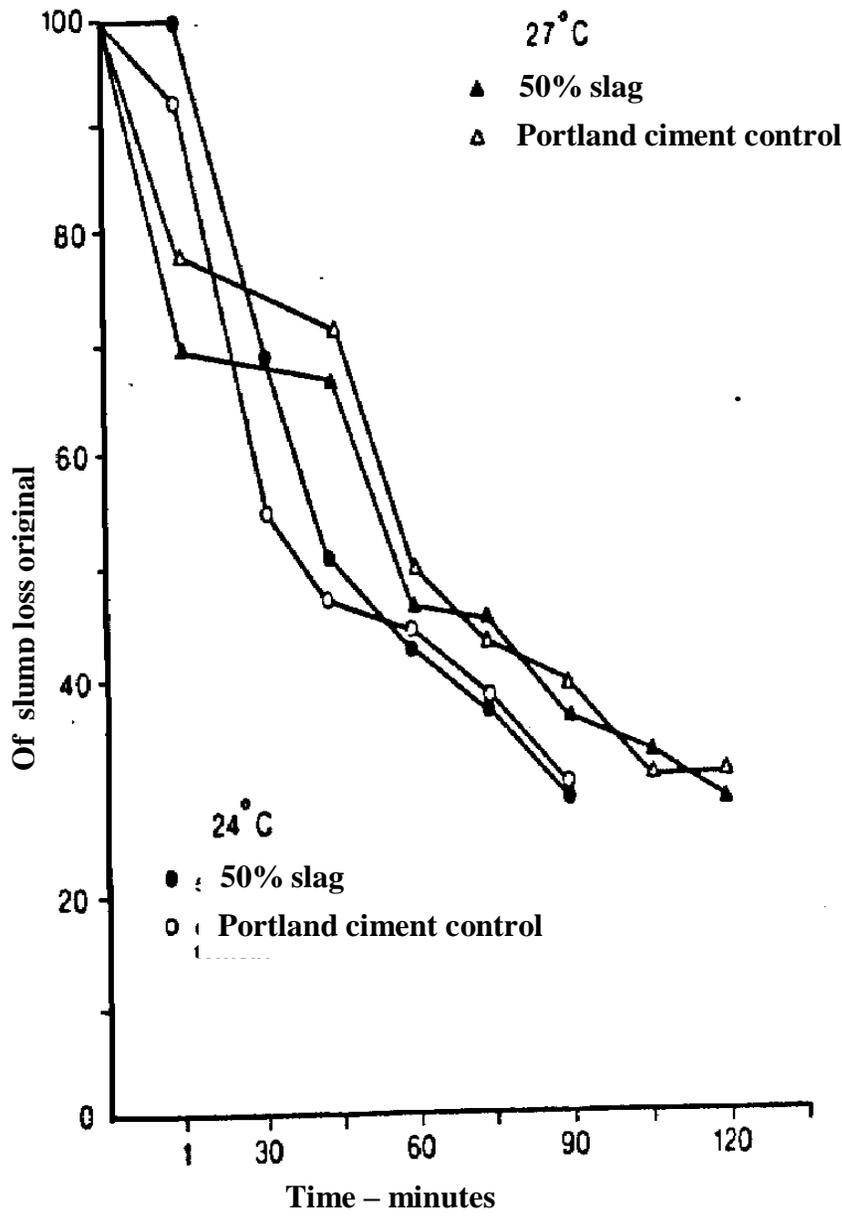


Fig.1.3 Effet de perte de l'ouvrabilité de 50% binder ciment par rapport au ciment Portland a des températures différentes [18].

1.6.3 Ressuage et ségrégation

Le ressuage est la séparation de l'eau claire de la pâte du ciment ou du mortier ou du béton. Les facteurs qui affectent le ressuage sont la distribution des dimensions, la forme et la texture de la surface de la poudre du ciment.

Wainwright [19] a montré que les propriétés des granulats gros et fins n'affectent pas le ressuage par comparaison au ciment portland. Les laitiers granulés moulus du haut fourneau (ggbfs) ont des particules de forme semblable, la taille et la densité à celle de CPA ils sont plus lisses dans la texture. La réaction lente d'hydratation des ggbfs montre une augmentation du ressuage par rapport à que celui de CPA [19]. Ce fait est confirmé par Wainwright [19] qui a conclu que le ressuage est affecté par la réactivité du matériau du ciment à cause du fait que l'hydratation précoce implique une limitation du mouvement de l'eau à la surface. Allard [24] a étudié le béton fait avec des ggbfs à partir d'une seule source et avec des niveaux de remplacement de 50% et 70% et une ouvrabilité constante. Sa conclusion était pour tous les laitiers testés pour le taux de ressuage a augmentée en augmentant la quantité des laitiers. Mansoor [25] a prouvé que le taux de ressuage a diminué avec l'augmentation du remplacement par poids des ggbfs du ciment ; le taux de ressuages a également diminué avec la réduction du rapport d'eau-ciment de 0.4 et 0.3. Selon Ramachandran [26] les laitiers, une fois ajoutés en tant que mélange minéral, au béton, améliorent la résistance au ressuage et la à ségrégation.

1.6.4 Chaleur d'hydratation

Le remplacement partiel du ciment par des laitiers conduit à une réduction de chaleur, d'hydratation, contrainte thermique et fissure. L'élévation de la température qui se produit en raison de l'hydratation dans un béton dépend d'un certain nombre de facteurs ; les facteurs qui affectent sont : pourcentage des laitiers, le type du ciment, température du site, et la condition de cure [27].

Selon Wainwright et Tolloczko [28] le centre de la grande masse, avec une teneur relativement élevé de ciment donne une réduction de l'ordre de 10°C pour le remplacement de 70%. Atwell [29] a effectué des essais sur site et au le laboratoire en utilisant le ciment de ggbfs. Il a conclu que la réduction de la température maximale

quand des laitiers ont été ajoutées dépendait de la température du site, du pourcentage des laitiers et de l'importance des pertes de chaleur. La mesure de la température maximale au centre était de 15% de moins par rapport au ciment ordinaire [27] et ceci est illustré par la figure 1.4. La durée de cette température maximale a montré qu'elle a augmenté en présence des laitiers [25]. Une étude japonaise en laboratoire rapportée par Wainwright [19] dans lequel la mesure de la température adiabatique a été faite. Il a été conclu qu'il y avait une réduction de la température seulement à des valeurs au-dessus de 70% mais la réduction est seulement devenue significative aux au-dessus de 90%. Selon Wainwright et Tolloczko [28] il n'y a aucun rapport entre le niveau de remplacement des laitiers et de la réduction de l'élévation de la température (voir la figure 1.5).

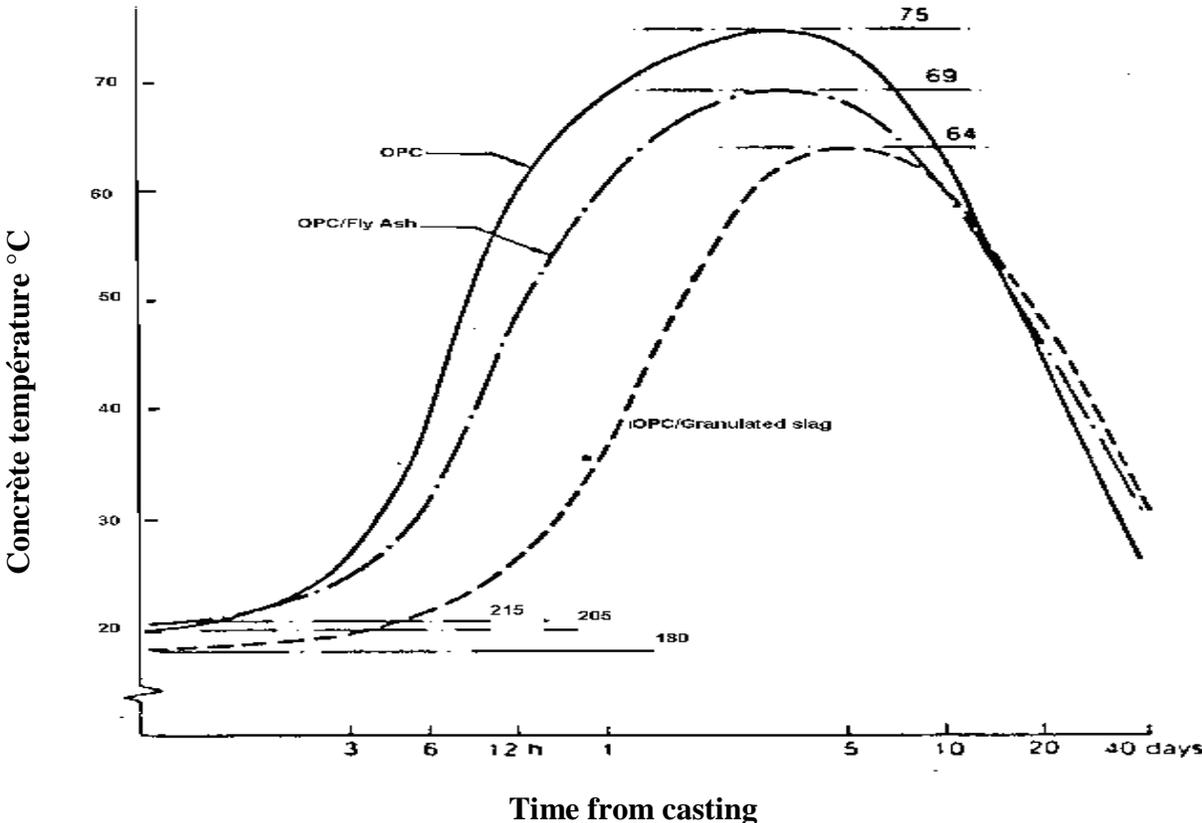


Fig. 1.4 Variation in concrete temperature at mid-height in foundation unit [27]

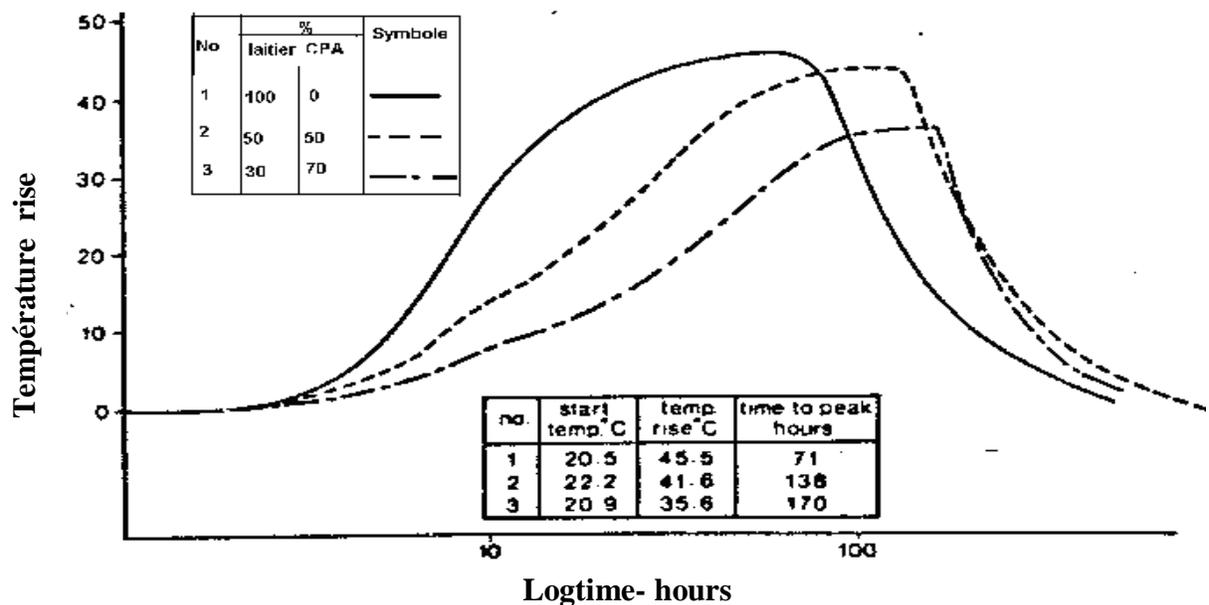


Fig 1.5 Influence of slag cement on adiabatic temperature rise [28]

1.7 Propriétés de béton aux laitiers à l'état durci

1.7.1 Développement de la résistance

Lorsque des laitiers sont ajoutés à l'eau rien ne se produirait en général, les laitiers possèdent les propriétés d'un matériau hydraulique latent comme tous les matériaux pouzolane. La qualité de pouvoir être hydraté dépend de sa composition chimique et minéralogique, de sa qualité et de sa structure en verre. L'hydratation des laitiers est plus lente que celle du ciment Portland ; par conséquent le développement de la résistance sera inférieur. Cette découverte est mentionnée dans beaucoup d'articles [19, 22, 30, 31, 32, 97, 100, 106, 109]. Cette différence entre les laitiers et ciment portland dépend de la composition des laitiers et de CPA, du pourcentage des laitiers, de la température et de l'humidité de l'environnement. La résistance est également affectée en augmentant la quantité de laitier ; en augmentant les laitiers, le taux de gain de la résistance est abaissé au début, mais le taux de gain de la résistance est supérieur à long terme [11, 22, 113, 117]. Reeves [22] a prouvé que les deux composants du laitier de CPA réagissent au début mais à température ambiante le laitier se déshydrate plus lentement que CPA.

Cependant il est possible de produire des ciments Portland et des laitiers de différents taux de réactivité en modifiant leur composition chimique et finesse. Il est alors possible de produire le ciment de laitier de haut fourneau de Portland avec une résistance égal à celle de CPA. La figure 2.6 montre l'utilisation des mélanges incorporant des laitiers de composition chimique différents avec un CPA. Le même auteur a montré que si le béton de ciment de laitier et le béton CPA étaient conçus pour avoir une même résistance à 28 jours il est nécessaire de concevoir le béton au laitier avec un contenu plus élevé en ciment. Cette découverte est montrée dans la Fig. 1.7. Meusel et Hogan [11] ont montré qu'avec le remplacement de 40% et de 50% et finesse de mouture de 608 m²/kg a donné environ une résistance de compression de 60 MPa la résistance à 60 jours tandis qu'à cet période le mortier de référence avait la résistance à la compression seulement de 47 MPa avec un rapport de ciment/eau de 0.4 ; mais avec un rapport eau-ciment de 0.38 le laitier a donné environ à une résistance de 55 MPa à 28 jours, par comparaison à 48 MPa pour le béton de référence. Pratas [33] a effectué un essai avec deux mélanges un avec CPA et l'autre avec le remplacement de 50% du ciment par des laitiers. Les échantillons ont été maintenus dans l'eau aux températures de 5°C, 20°C 30°C juste après démoulage ; ceci a montré que la résistance des laitiers est plus affectée par la température de 5°C que celle du ciment de Portland mais à la température de 30°C la tendance a été renversée (dans figure 2.8a). L'essai effectué par Wainwright et tolloczko [28] dans lequel le béton est soumis à l'élévation adiabatique de la température est montré dans la figure 2.8b. Dans cet essai, 0% ,50% et 70% de laitiers ont été utilisés avec le rapport de ciment-eau de 0.41 ; les chiffres montrent clairement que, dans la condition cyclique, les bétons au laitier ont montré la même résistance que celle du béton ordinaire ou même plus grande, mais à 20°C, la résistance des bétons contenant des laitiers a atteint celle de CPA à 168 jours. Price [31] a montré que ce béton qui est soumis à des hautes températures donne une résistance élevée au début, mais plus tard elle sera abaissée. Cette explication a été précisée par Pratas [33]. Neville [34] a précisé que le béton qui est soumis à la haute température affectera la structure de la pâte qui implique la formation de

produits avec la structure ouverte, mais ce fait est empêché par la présence du béton au laitier.

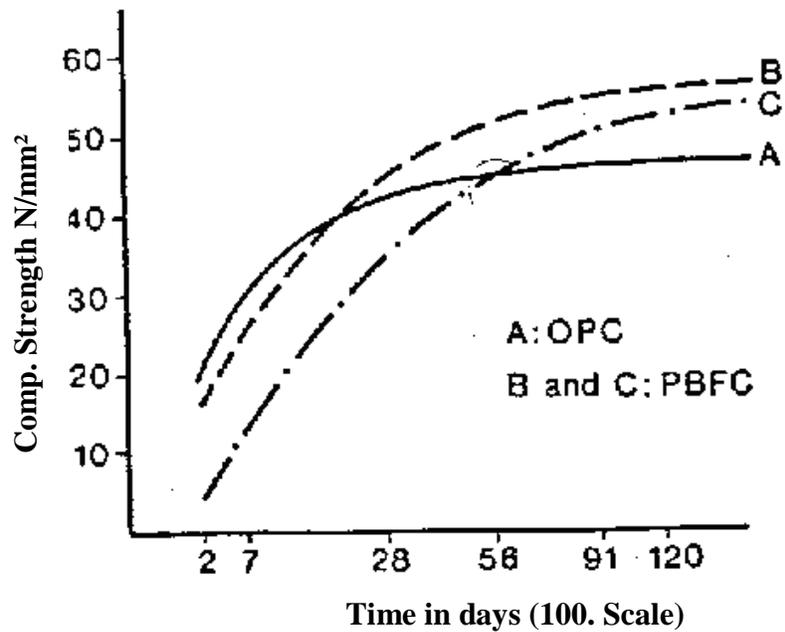


Fig.1.6: Indicative cement strength development [22]...

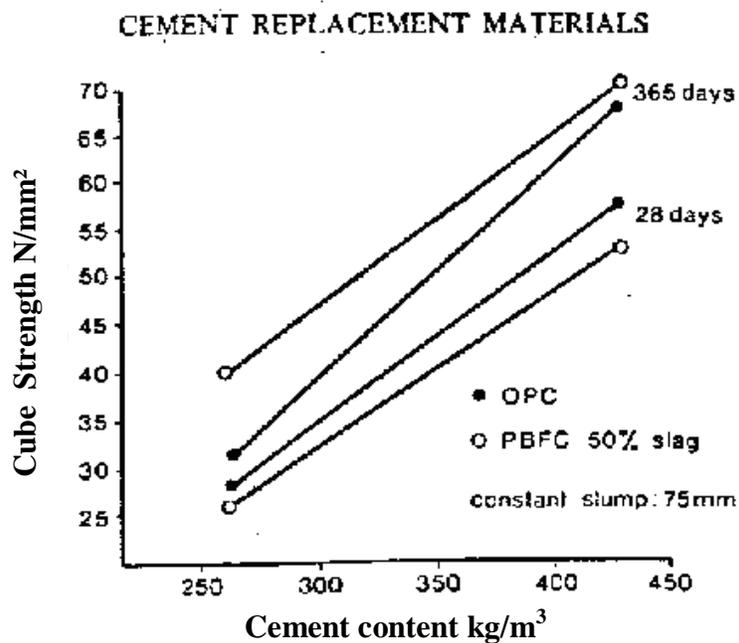


Fig. 1.7: Influence of slag on strength increases between 1 month and 1 year [22].

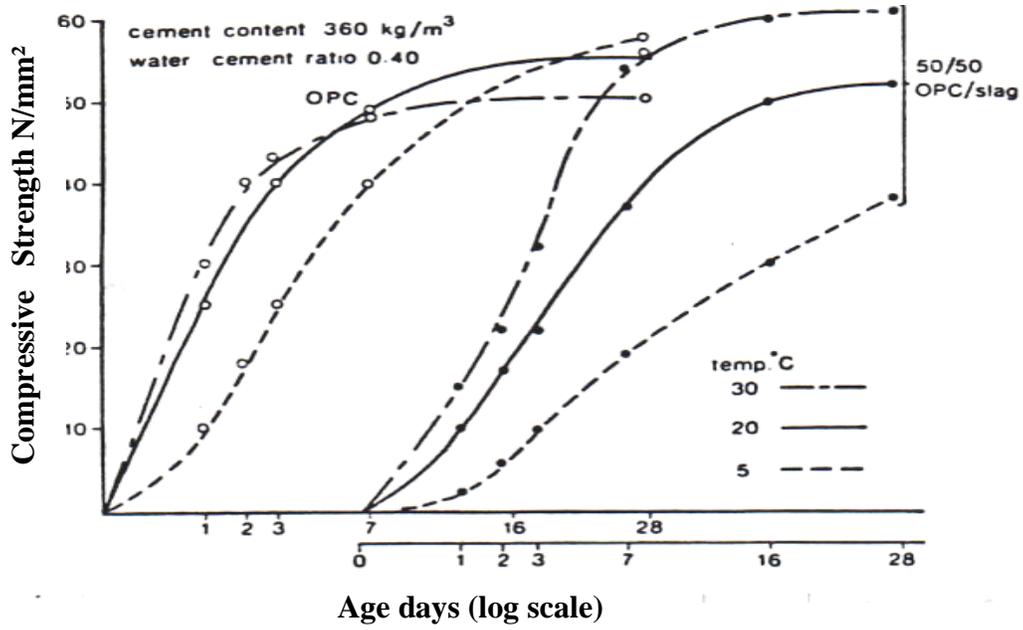


Fig 1.8a: The effect of temperature on strength development of water cured concrete

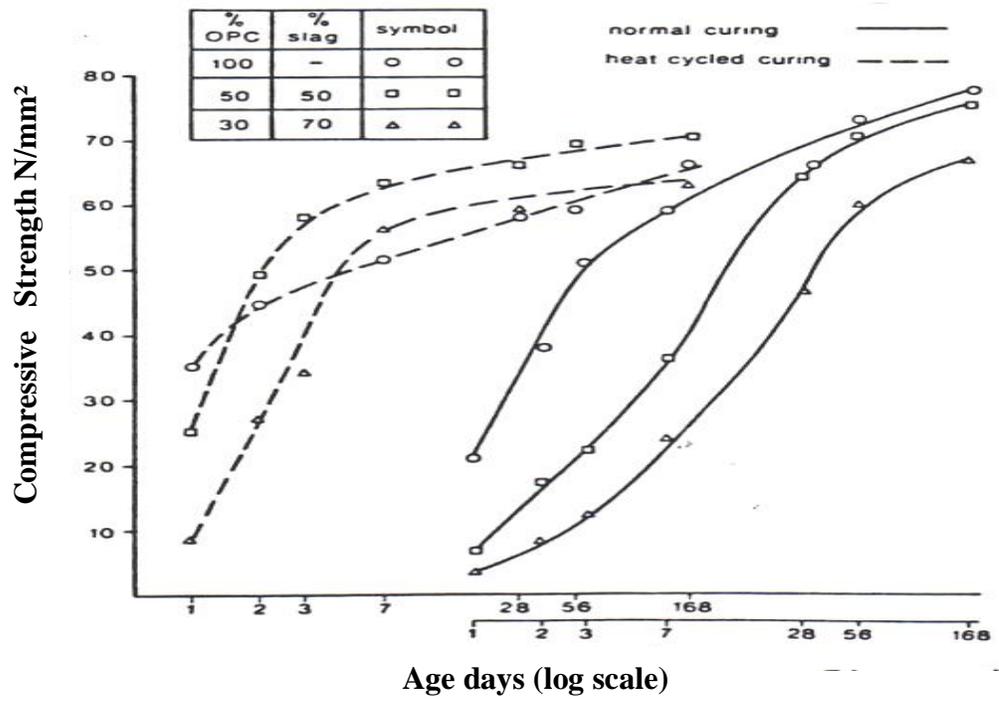


Fig 1.8b: Comparison of the Strength development of concrete with and without Slag, normal cured and heat cycled cured [33].

1.7.2 Effet de la cure sur la résistance et sur les autres propriétés:

En sachant que le ciment qui contient des laitiers réagit plus lentement que le ciment de Portland, il devrait être nécessaire de noter que la cure du béton avec laitier doit être maintenue plus longtemps que le ciment de Portland. Buttler [21] affirme que les mélanges de ciment du laitier du haut fourneau pour lequel le besoin de cure à l'eau semble être plus critique que la normale, mais l'inverse est vrai pour le béton normal du ciment de Portland (tableau 1.3).

Propics [35] a précisé que le béton avec CPA est plus résistant dans un état de cure à l'air que dans une cure à l'état humide. La longue période de cure requise pour les bétons au laitier implique une prolongation de coffrage mais il convient de noter que ce fait n'affectera pas le programme de construction et le problème de la période de cure [19]. Selon Rose [36] l'activité ou la variation de la résistance du béton contenant du laitier change en fonction de l'élévation de la température de la cure ce qui conduit à une élévation de la résistance au jeune âge et à long terme

1.7.3 Module d'élasticité

Beaucoup de recherches individuelles semblent montrer des données contradictoires sur le module d'élasticité. Le module d'élasticité est considérablement influencé par la résistance et la rigidité de l'agrégat.

Comme mentionné dans la section 1.6.1, le module d'élasticité sera affecté par les mêmes facteurs que la résistance (c.-à-d. l'âge, la cure) qui signifie qu'à la température de 20°C et plus, le béton développera son module d'élasticité plus lentement que le béton ordinaire est spécialement lorsque le pourcentage de laitier est augmenté, mais ce fait sera renversé lorsque le béton est chauffé [28]. Le béton au laitier montrera un module d'élasticité similaire ou légèrement supérieur que celui du béton CPA quand le béton est conçu à la même résistance de compression [19]. Selon beaucoup de chercheurs [27,17,38, 124] la différence dans le module élastique a changé entre 0 à 6 KN/mm². A la température de 20° C, le module d'élasticité des deux bétons montre une tendance similaire ou une faible différence avec des proportions de laitier entre 30% et 70% [19].

Selon Wainwright et Tolloczko [28] la résistance de compression inférieure ou égale à 30N/mm^2 donne un module d'élasticité inférieur à celui du béton de CPA. Fulton [17] a effectué un essai en utilisant le PBFS et Sutterheim [39] a utilisé des proportions de mélange de 50% de CPA et de 50% de ggbfs : ils ont conclu qu'il y a peu de différence entre les deux bétons.

Les travaux menés par Banforth [27] avec une proportion de laitier de 75% précisent que pour une résistance de compression donnée les bétons aux laitiers possèdent un module d'élasticité supérieur à celui du béton ordinaire. Selon Tattersall [20] en utilisant des remplacements de 0.50% et de 70% des laitiers par le ciment, il y a peu ou pas de différence entre les bétons.

1.7.4 Retrait

Il est en général rapporté que l'utilisation des laitiers dans le béton n'influence pas le retrait. La plupart des chercheurs ont effectué des essais dans des conditions différentes qui signifient que la comparaison des deux bétons permet de fournir quelques différences de leurs données. Selon Neville et Brooks [38] le mélange de 50% de laitier a montré un retrait inférieur à celui du ciment de Portland ; leurs échantillons ont été traités dans l'eau pendant 28 jours à une humidité relative de $60 \pm 5\%$. Selon Hogan et de Meusel [11] le béton contenant 40, 50 et 60% de laitier de haut fourneau en poids ont montré un retrait plus important que celui du béton ordinaire ; ces essais ont été effectués conformément à la norme ASTM C157 [40]. Banforth [27] a effectué le même essai que Neville mais la seule différence était l'humidité relative prise à 65%. Il a précisé qu'à 50 jours le béton contenant 70% de laitier avait un retrait inférieur à celui du ciment portland ordinaire, néanmoins, à le long terme (c.-à-d. jusqu'à 14 mois) la pente a été inversée. Selon Kobayashi [41] le béton avec du laitier qui est maintenu dans un environnement sec de température 20°C et avec humidité relative de 50% pendant 25 semaines après 7 jours dans l'eau, a montré que, avec le rapport ciment-eau de 0.4, le retrait était légèrement plus grand avec une augmentation de contenu du laitier, mais la tendance a été inversée avec un rapport eau-ciment de 0.65. Heaton [42] a précisé, en utilisant des laitiers après avoir

maintenu l'échantillon pendant 7 jours dans des conditions humide, qu'après 400 jours de séchage le béton au laitier présente un retrait plus grand que celui du béton ordinaire.

Table 1.7 Résistance a la compression et a la flexion (Mpa) Series1 [32]

Mesure type	COMPRESSIVE STRENGTH									FLEXURAL STRENGTH								
	3 days			7 days			28 days			90 days			7 days			28 days		
	W	A	C	W	A	C	W	A	C	W	A	C	W	A	C	W	A	C
1	12.7	10.6	11.2	17.7	14.2	16.4	23.7	16.8	21.7	26.5	16.4	19.7	3.0	2.2	2.7	3.6	2.9	3.1
2	11.1	10.6	10.9	16.8	12.9	14.8	22.4	17.5	18.3	22.8	15.0	17.0	2.8	2.3	2.3	3.3	2.7	3.1
3	11.9	9.8	10.3	14.9	13.8	14.3	26.6	16.7	18.4	30.1	15.7	18.6	2.5	2.6	2.8	3.2	2.9	3.0
4	10.3	9.8	10.3	15.3	14.6	15.6	28.1	16.9	20.1	14.3	16.0	18.1	2.5	2.3	2.5	3.7	3.6	3.2
5	9.0	8.7	8.8	13.9	12.5	15.4	30.1	15.5	19.9	33.4	13.6	16.8	3.1	2.6	2.9	3.4	3.1	3.6
6	13.5	10.7	11.7	18.8	15.4	17.8	34.9	18.6	23.1	40.0	18.5	22.8	3.2	3.0	3.3	3.9	3.2	3.5
CURING: W – Water AT 23±2°C. A – Laboratory air 19-29°C, RH 47- 76 C – COATED WITH CURING COMPOUND THEN IN AIR AT 19–29°C, RH 47–76																		

Mixture Quantities (kg/Cu. ., Aggregates S, S, D,).									
Mixture Type	Type "A" Cement	Fly Ash	Portland Blast-furnace Cement	Admix. (L/ CU.m)	Free Water(L /CU.m)	Aggregate		Slump (mm)	Air (%)
						Coarse	fine		
<u>Series 1</u>									
1	260	-	-	-	180	1080	820	80	1.6
								75	1.6
2	230	-	-	0.92	170	1070	835	70	2.9
								70	3.1
3	185	95	-	0.92	160	1100	825	80	1.5
								80	1.4
4	-	-	250	0.75	170	1080	825	75	2.2
								80	2.0
5	-	85	195	0.84	155	1100	825	85	1.5
								85	1.6
6	-	-	285	-	175	1090	829	75	1.5
								70	1.6

1.7.5 Fluage

Quand une charge est appliquée sur un échantillon de béton, elle montre une déformation instantanée qui est ensuite suivie d'un accroissement lent de déformation. Ceci a été découvert en 1907 par Watt et on l'appelle le fluage. Il y a beaucoup de facteurs sur lesquels le fluage et le retrait dépendent ; la source du fluage du béton est dans la pâte durcie du ciment.

Selon Neville [34] ceci peut être expliqué en termes du contenu de la pâte du ciment et du développement de la résistance. La plupart des chercheurs semblent montrer des données contradictoires, à cause des différentes conditions d'essai. Neville et Brook [38] ont montré, qu'après une cure initiale dans l'eau durant 28 jours à 20°C, un béton contenant 50% de laitier présentait un fluage inférieur à celui du béton ordinaire de l'ordre 40%. Bamforth [27] a montré qu'une réduction du fluage du béton d'environ 70% peut être obtenue quand 75% du ciment est remplacé par les laitiers granulés. Dans beaucoup de bétons des réductions similaires ont été observées par Neville et Brooks [38]. Fulton [17] a noté que l'augmentation mesurée du fluage peut ne pas être due aux différents types de ciment mais il peut être attribué au taux plus lent du développement de la résistance dans le béton au laitier. Wainwright [19] a effectué un essai avec les échantillons placés dans l'eau pendant 14 jours avant d'être scellés ; ils ont été alors placés à l'air dans le laboratoire et l'effort appliqué était d'environ 10N/mm^2 . Il a constaté que le béton au laitier a montré plus de fluage que le béton ordinaire avec des valeurs entre 40% et 70%. Neville et Brooks [38] cependant, ont précisé que le béton au laitier maintenu dans l'eau à 20°C et sous une humidité relative de 60% pendant 28 jours a montré l'opposé, c'est-à-dire, le fluage du béton au laitier est plus grand que celui du béton à base de ciment portland. Ross [43] ont observé des effets similaires.

1.8 Durabilité:

La durabilité du béton signifie la capacité du matériel de résister à la condition pour laquelle il a été correctement conçu, sans risque, sans détérioration et avec la sécurité appropriée. La défaillance d'une structure peut être provoquée par l'environnement dans lequel la structure est exposée ou par les causes internes qui peuvent être physique,

chimique ou mécanique, conditions météorologiques, haute température excessive, abrasion ou attaque chimique à partir des agents agressifs. Cela dépendra de la qualité du béton. Le facteur le plus important ce qui conduit à la détérioration du béton est la perméabilité [88, 95, 96, 98,99]

Le béton est largement utilisé comme matériau de construction dans un environnement agressif tel que l'action de l'eau de mer, ou pour enfermer les déchets nucléaires, les gaz et la vapeur, et placé en contact avec les sols contenant du sulfate et de l'eau acide. L'addition du laitier dans béton a été en grande partie utilisée à cause du rôle des laitiers qui permettent une augmentation de la durabilité du béton.

L'influence du laitier sur les propriétés du béton est vaste et complexe, et même à présent il y a un certain nombre de secteur où son rôle n'est pas complètement compris. Cette section traite quelques effets du laitier sur la durabilité du béton.

1.8.1 Perméabilité et porosité

La cause la plus importante de la détérioration de béton est sa perméabilité ; le béton perméable à un important effet sur la vulnérabilité du béton en contact avec le liquide, l'ion, le gaz, ou la fuite des produits dissous de réaction provenant du béton. Le béton perméable affecte également le taux de carbonatations, l'attaque par le sulfate et par d'eau de mer, et la réaction de la silice d'alcali.

Les facteurs qui affectent la perméabilité sont : le compactage, le rapport E/C, et l'efficacité de la cure. Beaucoup de chercheurs [44, 45, 106,112] ont rapporté que l'incorporation des laitiers provoque une augmentation du nombre de petits pores de gel qui à leur tour donne une pâte de ciment de très faible perméabilité. Manohan et al [45] ont prouvé que 30 ou 70 pour cent du laitier du haut fourneau ont efficacement réduit la dimension des grands pores en 28 jours de cure, donnant une pâte de très faible perméabilité. En général on accepte que le remplacement partiel du ciment par le laitier ont montre une perméabilité inférieure mais il y a peu de données expérimentales pour confirmer ce résultat. Le rapport d'une recherche sur la perméabilité et la porosité de la pâte de ciment de laitier a été effectué par Mansoor [25] en utilisant le remplacement

entre 0 à 80 pour cent de laitier avec un rapport E/C de 0.3 et 0.4 % à 28 jours et 270 jours ; la cure a été effectuée à la température ambiante. Il a conclu que, au-dessous de 40% du laitier de haut fourneau a montré peu d'effet sur la perméabilité, mais entre 40 et 80 pour cent le coefficient de perméabilité diminue progressivement, mais plus de 80 pour cent, elle a augmenté (figures 1.9 et 1.10).

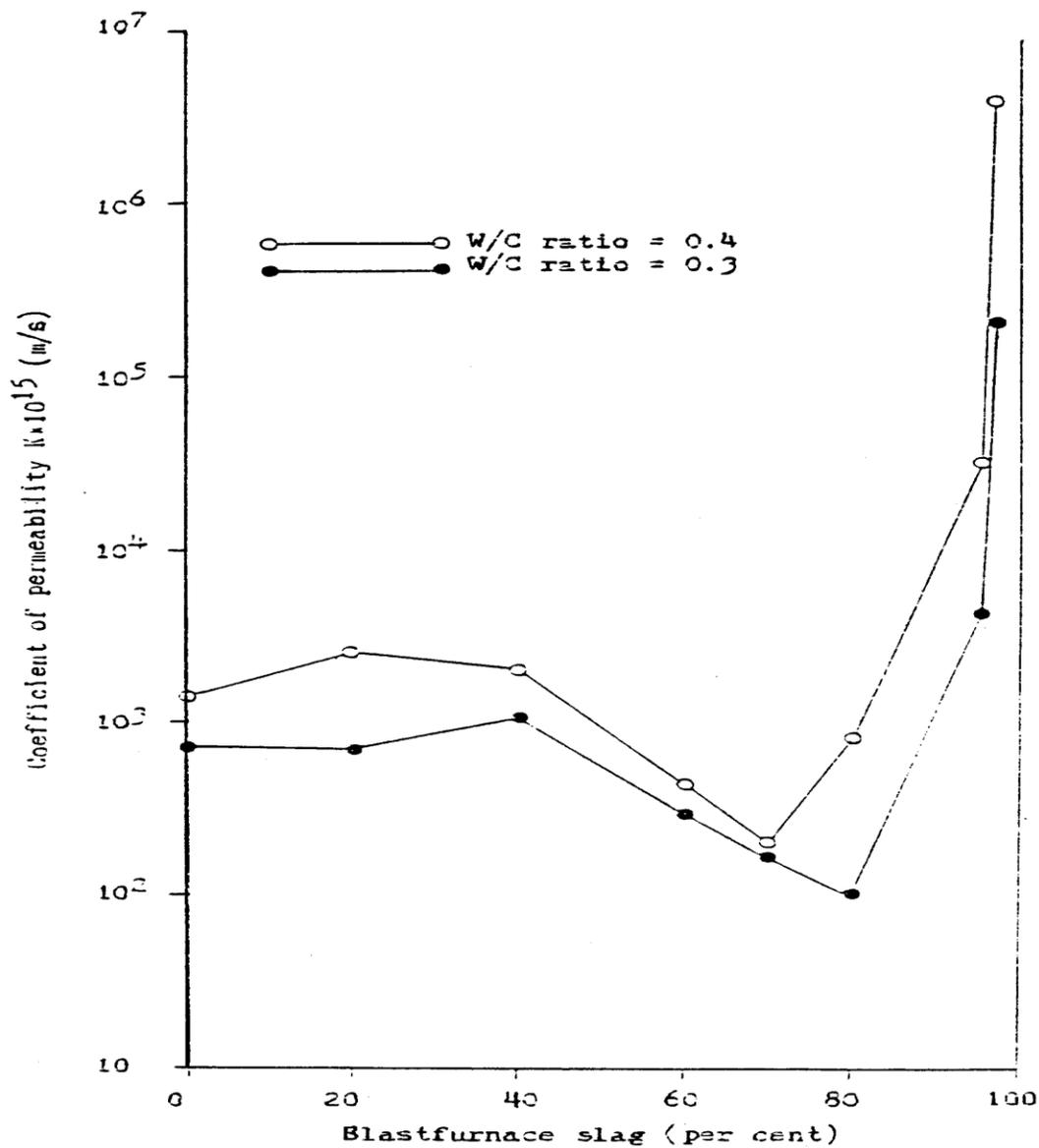


Fig. 1.9: Effet du remplacement du ciment au laitier de haut fourneau sur le coefficient de perméabilité a 28 jours [25].

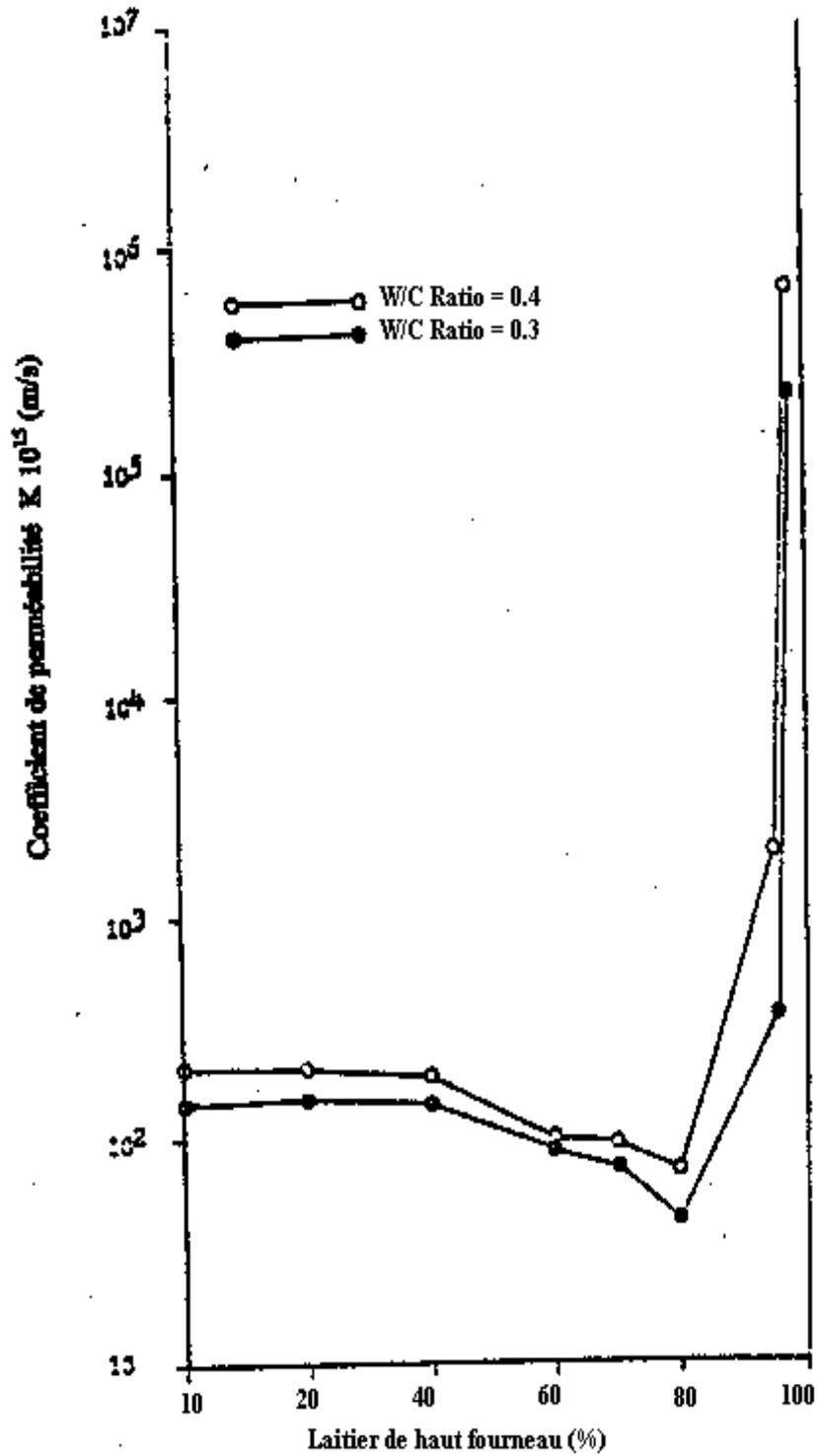


Fig. 1.10 Effet du substitution du ciment au laitier de haut fourneau sur le coefficient de permeabilite à 270 jours.

1.8.2 Résistance à l'eau de mer et aux attaques sulfatées

La résistance du béton de ciment au laitier à l'attaque par des sulfates et par l'eau de mer est un des aspects les plus importants du comportement des laitiers dans le béton, il y a beaucoup de données qui ont été éditées pour prouver cela [19, 46.28, 112,115,].

En Europe 70% du ciments type 1 ou plus sont remplacés par des laitiers pour la résistance aux sulfates, la recherche effectuée par Hooten et Al [47] sur les laitiers canadiens a confirmé que le remplacement du ciment type1 de 50% de laitier (teneur 12% C₃ A) donne une bonne résistance aux sulfates similaire au type V ciment de Portland résistant aux sulfates. Dans le passé on croyait que l'augmentation de la résistance au sulfate et à l'eau de mer est liée à la chaux libre et au contenu réactif d'alumine dus à la réaction pozzolanic. Wainright [19] rapporter de Huss et Reeves, de leur enquête réalisée en Allemagne qui ont étudié l'effet de ciment de laitier de haute alumine à 65% de remplacement de laitier, et de 35% de remplacement de ciment portland (10% C3A); leurs conclusions ont montré que, dans les condition sévère l'incorporation du laitier dans le béton montre une plus grande résistance aux sulfates. Comme il a été rapporte par Wainwriyth [19], les normes des Pays-Bas approuvent l'utilisation de 65% à 85% de remplacement du ciment par des laitiers pour la résistance contre le sulfate ; en Allemagne sa valeur minimale est 70%. En Grande Bretagne BS 146 [48] approuve l'utilisation des laitiers en relation avec la réactivité des composants du laitier et de CPA et peut être contiennent un faible pourcentage de laitier BS 4246 [49] recommande l'utilisation des remplacements élevé de laitier.

1.8.3 Résistance a la corrosion

La corrosion des armatures d'un matériau arme se produit à la suite du phénomène de carbonatation du béton d'enrobage et/ou de la pénétration de chlorures jusqu'au niveau des armatures. La carbonatation du béton induit une diminution du pH qui peut détruire la couche passive mince d'oxyde protecteur, et amorcer la propagation de la corrosion, avec la formation de produits expansifs entraînant des contraintes de traction dans le béton

d'enrobage. Ces dernières conduisent progressivement à la formation de fissures qui vont favoriser la pénétration d'agents agressifs, et générer à terme le décollement du béton d'enrobage voir figure

Cependant, l'origine des chlorures est le plus souvent extérieure ; ils proviennent de l'eau de mer ou des sels utilisés fréquemment pour le déverglaçage des chaussées en hiver. Dans ce cas-là, les ions chlorures pénètrent dans le béton par diffusion ou par absorption capillaire sous l'effet de différents phénomènes tels que séchage, gel-dégel, etc. Au cours du temps, ces chlorures diffusent dans la solution interstitielle du béton, atteignent les armatures. À une concentration suffisamment importante d'ions chlorures au niveau de l'armature [35, 93, 114, 115, 116, 118, 121], le passivant qui protège l'armature est détruit. Cette concentration limite est d'autant plus importante que le pH de la solution interstitielle est élevé. En outre, la destruction du film protecteur se produit localement sur les surfaces les plus sensibles. Ceci conduit à l'apparition de piqûres qui deviennent de petites anodes formant des piles électrochimiques (Fig. 1.11) de corrosion actives avec un pH très bas, d'environ de 4 à 5. Les zones anodique et cathodique de ces piles sont reliées par l'intermédiaire de la solution interstitielle. Les ions ferreux Fe^{2+} , passent en solution à l'anode (perte de section à l'anode) alors que des électrons libres se déplacent jusqu'à la cathode (autre section de la barre d'acier). Les électrons se combinent avec de l'eau et de l'oxygène pour former des ions hydroxyle. Les hydroxydes et les ions ferreux se déplaçant dans l'électrolyte, se combinent pour former de l'hydroxyle ferrique, qui se transforme par la suite en rouille qui se dépose sur l'acier. La figure 1.3 présente schématiquement le mécanisme de la corrosion des aciers dans le béton en présence de chlorures [36]. La corrosion des barres d'acier a principalement deux effets (Fig. 1.11). Le premier effet réside dans le fait que les produits de corrosion occupent un volume beaucoup plus grand que le volume initial de l'acier. En effet, une armature oxydée peut occuper un volume jusqu'à 9 fois plus grand que le métal initial. La formation de la rouille exerce une pression interne dans le béton, ce qui entraîne éventuellement une fissuration et un éclatement.

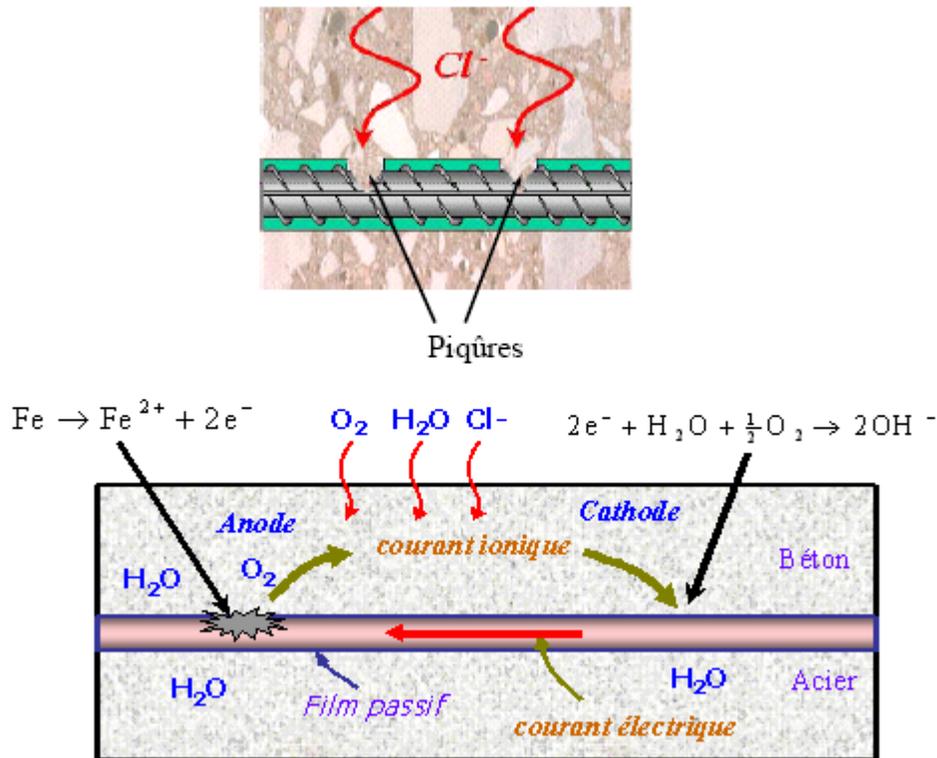


Figure 1.11: Processus de corrosion dans le béton armé [121]

Le taux de corrosion de l'acier incorporé dans le béton est fortement influencé par des facteurs de l'environnement : l'oxygène et l'humidité doivent être présents si la corrosion électrochimique doit se produire. Le béton armé avec un gradient significatif en ion de chlorure est vulnérable à la corrosion de macrocell, particulièrement quand il est sujet à des cycles de gel et dégel. D'autres facteurs qui ont un effet sur le niveau de la corrosion sont l'hétérogénéité du béton et de l'acier, le pH du béton, la proportion du mélange et la profondeur de couverture de l'acier.

La présence de l'eau et de l'oxygène et du pH est les facteurs de contrôle principaux pour la corrosion de l'acier. La réduction de pH implique la corrosion d'acier. Comme le béton à un pH supérieur à 12.5, c'est généralement un excellent milieu pour la protection de l'acier contre la corrosion mais dans des conditions extrêmes où la carbonisation s'est produite l'acier devient vulnérable à la corrosion. Beaucoup d'investigations [19.32.50, 128] ont suggéré que la carbonisation des laitiers moulus et granulés est plus affectée

par la cure que celle du béton ordinaire ; mais toutes les deux sont semblables quand le béton contenant des laitiers est suffisamment cure. La protection qui est assurée aux aciers par le béton a tendance à disparaître au cours du temps par la réaction des composés, basiques du ciment avec le gaz carbonique présent dans l'air. Cette réaction est appelée carbonatation

Il a été signalé que dans la pâte du ciment hydratée il y a la présence de 20% de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ pour donner la passivité de l'acier ; mais en ajoutant la réaction pozzolanique qui consomme $\text{Ca}(\text{OH})_2$, on peut obtenir une réduction de pH. Ce phénomène peut faire penser que la réduction du pH quand des matériaux pouzzolane sont incorporés dans le béton armé et précontraint peut présenter un danger pour la corrosion de l'acier. Massaza a remarqué que la carbonatation du béton n'est pas liée à la quantité de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dans la solution de pore ; elle est liée aux facteurs physiques tels que la perméabilité [26.52]. Massaza [51] a conclu que par l'incorporation des laitiers dans le béton, la carbonisation ne constituera pas un problème dans les bétons contenant les pouzzolanes.

1.8.4 Réaction alcalis silice

Depuis 1940, quand Stanton a découvert la destruction du béton par l'effet de la réaction alcali silice, il y a eu beaucoup de recherche sur ce sujet. Il a été rapporté qu'entre 1931 et 1975, plus de 100 structures en béton ont été probablement fissurées par cette réaction chimique, bien que ces structures aient été conçues avec une durée de vie de 120 ans. Des réparations considérables et parfois des remplacements totaux sont souvent nécessaires après seulement une fraction de temps de cette période. Ces endommagements ont été reportés dans plusieurs pays, comme le Canada, Danemark, et plus récemment dans le Moyen-Orient et l'Afrique du Sud.

La réaction Alcali silice est un mécanisme de détérioration du béton, dans lequel la solution alcaline, présente dans les pores du béton, réagit avec les granulats siliceux ; cette réaction produit un gel d'alkali silicate qui à son tour absorbe l'eau, se gonfle et cause des fissurations dans le béton. Généralement, la réaction alcalis silice entraîne une fissuration en faïençage.

Solution Alcaline + Silica = gelée Alkali – Silice + Eau = Gonflement.

Il semble qu'il y 'a un accord général sur le fait que la réaction alcali silice cause des endommagements seulement si les facteurs suivants sont présents : suffisamment d'humidité, assez d'alcali, et une quantité critique de silice.

Il y a des avis contradictoires dans la littérature sur le mécanisme qui peut endommager dû à la réaction alcali silice (A.S.R). Hasen [53] et Glasser et Katasko [54] ont montré que le gonflement du béton causé par A.S.R est dû à la pression osmotique. Par contre Hobbs [55] montra que le gonflement est le résultat de la pression mécanique exercée par la concentration croissante d'accroissement du volume de la concentration des produits de la réaction. De plus, il ajouta, qu'en général, à 0.05% de gonflement, le béton montre des petites fissures qui sont souvent visibles sur la surface.

Il est généralement admis que les laitiers sont bénéfiques pour protéger le béton contre A.S.R. B.R.E [56] Digest [258] précise que par l'introduction de 50% de laitiers dans le béton, réduit l'endommagement et les résultats seront similaires à ceux obtenues quand le ciment a faible alcali est utilisé.

L'efficacité des laitiers à réduire la détérioration due à l'expansion provoquée par A.S.R est souvent évaluée en utilisant l'essai d'A.S.T.M C441. Selon Hobbs, [55] cet essai est insuffisant car par comme les granulats naturels, le verre de Pyrex utilisé dans cet essai est non poreux et contient une quantité significative d'alcalis qui sont déchargés lentement dans la solution. L'essai recommande que des laitiers puissent être utilisés s'ils réduisent l'expansion de 75%. Hobbs [55] a conclu que ce fait n'est pas correct parce qu'il implique à utiliser des laitiers dans le béton même si la détérioration se produit.

Dahms et Springs comme cités par Hobbs [57] ont effectué des essais en utilisant le grès Opalin de Norther Allemagne et stocké à 40°C. Ils ont observé qu'aucune fissure due à la réaction d'alcalis silice ne s'est produite dans les cubes et prismes de béton quand le dosage du ciment était inférieure à 400 kg/m³. Lerch a rapporté que Hogan [58] a effectué des essais avec 30 mélanges de ciment contenant des laitiers de 23 à de 65%

qui ont montré que les alcalis dans les laitiers ne contribuent pas de manière significative à l'expansion des barres de mortier et que l'expansion a diminué rapidement lorsque la quantité totale de laitiers granulés a augmenté.

Hogan et Meusel [11] ont présenté des données en utilisant des laitiers de haute finesse ($5800 \text{ cm}^2/\text{g}$) en combinaison avec le ciment type 1 et 2 avec un alcali équivalent total de 0.51 comme Na_2O . Les niveaux de remplacement de 40, 50 et de 65% des laitiers étaient étudiés. Leur conclusion était qu'une diminution significative d'expansion ne peut être réalisée avec le remplacement de 40% des laitiers; une amélioration additionnelle mineure a été obtenue avec les niveaux élevés des laitiers.

Il y a beaucoup de recherche qui ont été effectuées avec les CPA/mortiers au laitier mais très peu de travail effectué en utilisant du béton. Swamy et Al-Sali [59] ont étudié l'utilisation des cendres volantes et des laitiers avec le ciment de haute alcalinité avec 1% d'oxyde de sodium et ont utilisé deux granulats réactifs, opale et silice amorphe synthétique. Ils ont conclu que l'efficacité des laitiers apparaît uniquement lorsque le niveau d'alcali est élevé. Swamy et Al-Asali [59] ont montré qu'à des températures élevées de $38\text{-}40^\circ\text{C}$, les laitiers tendent à devenir instables et à se décomposer facilement en libérant leur alcali chimiquement lié pour réagir avec de la silice.

D'une manière générale, la plupart des granulats sont inerte, mais il y a quelques impuretés dans les granulats qui portent quelques silicates [55] et ont la réaction alcali silice donné la liste d'agrégats et de leurs constituants minéraux qui sont connus pour réagir avec des alcalis dans le béton. Dans le béton aux Royaume-Unis qui ont eu des fissures causé par la réaction alcali silice, le constituant réactive trouvée est chert et flint particule. Hobbs [60] a montré que l'alcali peut être libéré par des laitiers dans la solution de pore et que l'alcali libéré probablement sera plus que celui avec le ciment de Portland.

Le mécanisme de la protection fournie par les laitiers de ciment contre la réaction des alcalis silice n'est toujours pas bien compris. Il y a des rapports contradictoires : Hobbs [60] a conclu que la résistance d'amélioration est due principalement à la

perméabilité réduite (physique) mais Hogan [58] a mis une théorie que les alcalis sont attachés avec des composants de laitier (produit chimique).

Malek et Roy ont rapporté que Hogan [58] a précisé que les effets physiques et chimiques expliquent la performance améliorée du ciment au laitier du haut fourneau. Les tableaux 1.3 et 1.4 [60] donne un résumé de l'efficacité des cendres et des laitiers en contrôlant l'expansion d'ASR.

Tableau 1.8 Effectiveness of Slag in reducing expansion due to ASR in mortar and concrete [60]

Author	Reactive aggregate	Mix proportions	Test temperature (°C)	Cement alkali content (%)	Slag alkali content (%)	Comments
MORTARS						
Pepper and Mather, 1959 ⁽²²⁾	10% Klufa opaline quartzite, 150-600 μm	a/(c + s) probably 2.25 s/(c + s) = 0 and 0.5 c + s ≈ 600 kg/m ³	38	1.07	0.97	50% slag reduced 1-year expansion from 8000 to 1800 μs. (Na ₂ O) _e ≈ 3.2 kg/m ³
Lerch, 1959 ^(34,37)	Saticoy sand	a/(c + s) = 2.25 s/(c + s) = 0 and 0.5 c + s ≈ 600 kg/m ³	38	0.90	1.81	50% slag reduced 6-month expansion from 3410 to 450 μs and 1-year expansion from 4700 to 1640. (Na ₂ O) _e ≈ 2.7 kg/m ³
Lenzner and Ludwig, 1978 ⁽²⁴⁾	4% opaline sandstone (Schleswig Holstein)	w/(c + s) = 0.5 a/(c + s) = 3.2 s/(c + s) = 0, 0.35 and 0.65 c + s ≈ 480 kg/m ³	25	0.9	0.92	35% slag reduced 1-year expansion from 13700 to 5000 μs. (Na ₂ O) _e ≈ 2.8 kg/m ³
					1.12	35% slag reduced 1-year expansion to 6700 μs
					1.80	35% slag reduced 1-year expansion to 5200 μs Mortars containing 65% slag did not exhibit deleterious expansion
Oberholster and Westra, 1981 ⁽²³⁾	Malmesbury hornfels plus greywacke	a/(c + s) = 1.5 s/(c + s) = 0 to 0.7 c + s ≈ 800 kg/m ³	38	0.97	2.60	30% slag reduced expansion at 550 days from 3600 to 1000 μs. (Na ₂ O) _e ≈ 5.4 kg/m ³ , 50% slag to 150 μs
Hobbs, 1982 ⁽¹⁸⁾	Opaline silica (Beltane opal), 150-300 μm	w/(c + s) = 0.41 a/(c + s) = 2.75 w/(c + s) = 0.53 a/(c + s) = 3.5 s/(c + s) = 0 to 0.5 c + s ≈ 550 and 450 kg/m ³	20	1.15	0.96	The slag acted as an alkali diluter of zero alkali content, deleterious expansion was not observed when (Na ₂ O) _e < 3.5 kg/m ³
Kawamura, Takemoto and Hasaba, 1984 ⁽³⁰⁾	Akase opaline rock, 0.6 to 1.2 mm	w/(c + s) = 0.4 a/(c + s) = 0.75 s/(c + s) = 0 to 0.3 c + s ≈ 1000 kg/m ³	38	0.75	0.51	30% slag reduced 6-month expansion from 4700 to 1500 μs
					0.59	30% slag reduced 6-month expansion from 4700 to 3800 μs
Kawamura, Takemoto and Hasaba, 1984 ⁽³⁰⁾	Opaline silica (Beltane opal), 0.6 to 1.2 mm	As above	38	0.75	0.51	30% slag increased 6-month expansion from 2500 to 4300 μs
Malek and Roy, 1984 ⁽³⁶⁾	Opaline silica	w/(c + s) = 0.4 a/(c + s) = 1.25 s/(c + s) = 0 and 0.65 c + s ≈ 830 kg/m ³	43	0.68	0.61	With 65% slag, expansion commenced at 90 days and reached 420 μs at 270 days. (Na ₂ O) _e ≈ 2.0 kg/m ³
Suderman and Soles, 1985 ⁽²²⁾	Lady Evelyn Lake	a/(c + s) = 2.25 s/(c + s) = 0 to 0.65 c + s ≈ 600 kg/m ³	38	1.01	0.30 and 0.64	65% slag reduced 6-month expansion from 560 to 280 μs. (Na ₂ O) _e ≈ 2.1 kg/m ³
CONCRETE						
Oberholster and Westra, 1981 ⁽²³⁾	Malmesbury hornfels plus greywacke	w/(c + s) = 0.5 a/(c + s) = 5.25 s/(c + s) = 0 to 0.70 c + s ≈ 350 kg/m ³	38	0.97	2.60	30% slag suppressed expansion. (Na ₂ O) _e ≈ 2.4 kg/m ³

Key: a = aggregate, c = cement, s = slag, w = water

Tableau 1.9: Mix proportions of concrete, time to cracking and 200-day expansion [60]

Expansion of concrete due to ASR: influence of pfa and slag.

<i>Binder</i>	<i>Teneur Alkali t* (Na₂O)₂ (Kg/m³)</i>	<i>C + P Or c+s (Kg/m³)</i>	<i>P/(C+P) or C+S</i>	<i>W/(C+P) or W/(C+S)</i>	<i>a/(C+P) or a/(C+S)</i>	<i>Teneur Reactive silica t (% par masse)</i>	<i>Time to cracking (days)</i>	<i>200-day Expansion (%)</i>
Portland cement	6.4+	530	0	0.41	3	2.0	3	0.50
	5.3+	440	0	0.43	4	1.5	4	0.37
	5.0	530	0	0.41	3	1.6	9	0.41
	4.6	495	0	0.44	3.33	1.4	17	0.07
	4.2	445	0	0.50	3.75	1.2	U	0.02
	4.2	440	0	0.43	4	1.2	U	0.02
	3.7	395	0	0.57	4.28	1.1	U	0.01
	3.9	410	0	0.46	4.44	1.0	U	0.01
Portland cement + pfa	4.5	530	0.1	0.41	3	1.4	12	0.32
	4.0	525	0.2	0.41	3	1.3	16	0.29
	3.5	520	0.3	0.41	3	1.1	16	0.22
	3.0	520	0.4	0.41	3	0.9	21	0.14
	2.5	515	0.5	0.41	3	0.8	117++	0.03
	5.0+	525	0.2	0.41	3	1.6	8	0.42
	4.4+	520	0.3	0.41	3	1.3	11	0.31
	3.7+	520	0.4	0.41	3	1.2	14	0.21
	3.1+	515	0.5	0.41	3	1.0	22	0.15
	4.1+	425	0.2	0.43	4	1.2	13	0.31
	3.6+	425	0.3	0.43	4	0.9	17	0.20
3.0+	415	0.4	0.43	4	0.8	27	0.08	
Portland cement + slag A	4.5	530	0.1	0.41	3	1.4	14	0.14
	4.0	530	0.2	0.41	3	1.2	26	0.15
	3.5	530	0.3	0.41	3	1.1	28++	0.21
	3.0	530	0.4	0.41	3	0.9	52.u	0.18 and 0.01
	2.5	530	0.5	0.41	3	0.8	U	0.01
	3.7	429	0.1	0.43	4	1.0	U	0
	5.1+	530	0.2	0.41	3	1.6	7	0.32
	4.4+	530	0.3	0.41	3	1.4	14	0.30
	3.8+	530	0.4	0.41	3	1.2	28++	0.31
	3.1+	530	0.5	0.41	3	1.0	60++	0.12
	4.1+	430	0.2	0.43	4	1.2	16	0.16
	3.6+	430	0.3	0.43	4	1.0	23++	0.18
	3.1+	425	0.4	0.43	4	0.8	U	0.01
Portland cement + slag B	3.9	650	0.3	0.35	2.25	1.3	25	0.22
	3.7	650	0.35	0.35	2.25	1.2	59.71	0.16
	3.4	650	0.40	0.35	2.25	1.2	46.58	0.13
	3.1	650	0.45	0.35	2.25	1.0	U	0.01
	2.5	650	0.55	0.35	2.25	1.0	U	0.005
	3.2	530	0.30	0.41	3	1.0	U	0.02
	2.5	530	0.45	0.41	3	0.8	U	0.01
	2.1	530	0.55	0.41	3	0.8	U	0.005
	2.1	530	0.55	0.41	3	1.1	U	0.005
	1.7	435	0.55	0.41	4	0.6	U	0.01

* Contribue by Portland cement.

+ increased by adding Na₂O as NaOH

++ Age when expansion reached 0.025%

U Uncracked at 200 days.

1.9 Utilisation pratique des laitiers du haut fourneau

L'excellent comportement des bétons contenant des laitiers a fait qu'il soit utilisé largement en tant que béton de construction. Au Royaume-Uni, le ciment pré mélangé a été utilisé depuis le début du siècle. En 1950, les laitiers du haut fourneau ont été utilisés dans la construction du barrage d'Avon. Au début des années 60 les laitiers granulés moulus étaient disponibles sous forme de poudre sèche et ont été utilisés pour la première fois dans des projets de construction des usines en acier. Les laitiers granulés et moulus ont été également utilisés en 1964 dans la construction du barrage humide de Sleddale dans le Cumbria.

Pendant les années 1970 des laitiers granulés et moulus ont été utilisés dans des projets principaux de génie civil, centrale nucléaire tels que le Humber Bridge, l Brighton marina, Hartlepool et de Heysham et M180.

Une des structures les plus récentes construite avec le ciment de laitier du haut fourneau (65% de laitier) est le pont au-dessus du fleuve le Rhin à Koln Allemagne de l'Ouest, avec du béton précontraint.

En France, les laitiers du haut fourneau sont utilisés dans les environnements agressifs, il y a beaucoup d'exemple comme : La centrale électrique Rance Fidal, le métro de Paris et le tunnel du Mont (sol contenant du sulfate).

A cause de la chaleur inférieure par rapport au ciment Portland, ce ciment est utilisé dans la construction de la structure en béton massive telle que le barrage et les fondations où la chaleur excessive causerait la fissuration du béton (voir les photos 1.12 à 1.18).



Photos 1.12 : Canalisation utilisée pour le transport des eaux usées Breda (Pays –Bas)



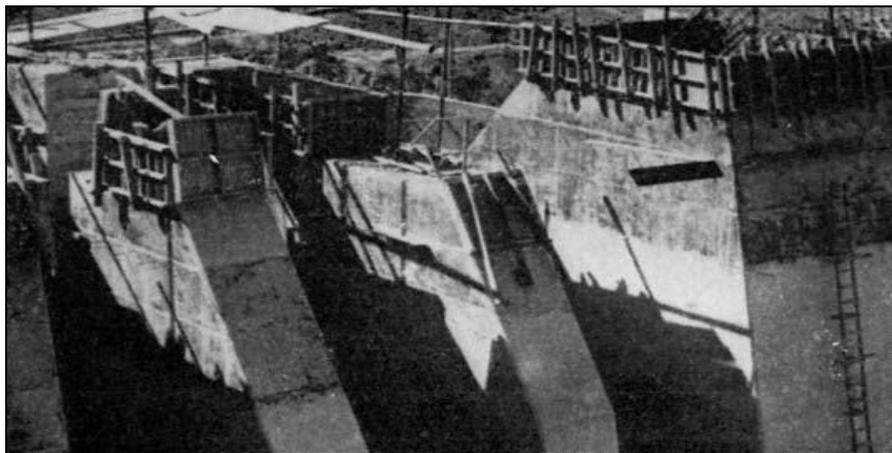
Photos 1.13 : Port de Casablanca (Maroc, 1954-55) Construction de la forme radoub et du bassin d'armement.



Photos 1.14 : Rotherham (Grande Bretagne), 1952 Poutre en béton précontraint.



Photos 1.15 : Tuyaux en Béton utilisés pour les transports des eaux usées (Belgique).



Photos 1.16 : (Barrage Beverley, Afrique du Sud), 1954-57



Photos 1.17 : Ciment au laitier II a été choisi pour la réalisation de l'Université de Metz.



Photos 1.18 : Ciment contenant du laitier et du calcaire. Il a été utilisé lors de la construction de l'Aéroport de Metz Nancy.

1.10 Conclusion:

Afin d'obtenir une bonne longévité du béton, il est important que les proportions correctes des différents composants du béton soient utilisées, car c'est de ces proportions que dépendra toute autre caractéristique du béton, telle que la résistance, la durabilité, l'ouvrabilité, la résistance à la corrosion et la résistance aux agents agressifs. L'idée la plus importante est de comprendre comment les laitiers influencent ces propriétés du béton.

CHAPITRE 2

Matériaux, et Conception Des Mélanges.

2.1 Introduction.

Le but de ce programme expérimental est la conception de deux mélanges avec 50% et 65% de remplacements du ciment par le laitier. Ces remplacements sont destinés à atteindre une résistance de compression de 50N/mm^2 sur des éprouvettes cubiques.

2.2 Programme expérimentale

Les objectifs de cette étude visent:

1. Conception d'un mélange avec 50% et 65% remplacement de ciment par le laitier pour une résistance de compression a 28 jours de 50N/mm^2 .
2. Effet de la cure avec l'âge sur les propriétés mécaniques: résistance a la compression et à la flexion sont les principales propriétés teste jusqu'à 6 mois.
3. Effet de la cure avec l'âge sur le module d'élasticité jusqu'à 6 mois.
4. Effet de la cure avec l'âge sur la vitesse du son jusqu'à 6 mois.
5. retrait et gonflement

2.3 L'objectif de la formulation du mélange

L'objectif principal de cette partie est développe un mélange lequel produire une résistance a 28 jours de 50N/mm^2 sous la condition de cure humide. Les mélanges doivent avoir les caractéristiques suivantes:

1. 50% et 65% de substitution de ciment par le laitier
2. ouvrabilité supérieure à 100 millimètres.
3. développement élevé de la résistance au jeune age, comparable à celui du béton normal d'OPC sans laitier.
4. Un rapport Eau/Composite très faible.

Pour atteindre ces objectifs, un super plastifiant a été employé pour tous les mélanges. Du point de vue économique, des quantités plus élevées de remplacement de ciment par laitier (50% et 65%), aurait comme eu conséquence un matériau moins cher.

2.4 Matériaux.

Cette section décrit les matières employées dans tout ce programme de recherche:

A savoir: Ciment Portland ordinaire, ciment portland avec des proportions élevées des alkalis, laitier, silice fondu amorphe ou verre de silice, sable, gravier, et superplastifiant.

2.4.1 Ciment

Nous avons utilisé un seul type de ciment pour confectionner les éprouvettes des bétons. Le ciment utilisé est un ciment portland ordinaire ayant comme source de production BS [61]. Une analyse chimique du ciment est donnée au tableau 2.1

2.4.2 Laitier

Le laitier de haut fourneau provient du complexe sidérurgique d'Elhadjer (Annaba). Etant refroidit brusquement avec l'eau, il se présente sous forme de grains de grosseur entre 0 et 6mm et de couleur jaunâtre. Le broyage a été effectué à l'université de Chlef dans un broyeur à boulets, suivant une finesse égale à environ 4500 cm²/g. la composition chimique de ce laitier est donnée au tableau 2.1

2.4.3 Agrégats

L'agrégat brut utilisé s'est composé du gravier normal de fleuve de taille maximum de 10mm. La qualité est la plupart du temps rond à angulaire dans la forme. Le sable utilisé est un sable de ravière séché et tamisé plusieurs fois par une tamiseuse électrique et laissé refroidir avant l'utilisation. Le sable et le gravier ont été pesés et testé d'après la norme BS 812 [62] et BS 882 [63].

L'Analyse granulométrie des graviers et sable est montrées dans la Fig.2.1. Les granulats fins ont eu un module de finesse de 2.4 et se conforment à la zone 3 des BS 882(63).

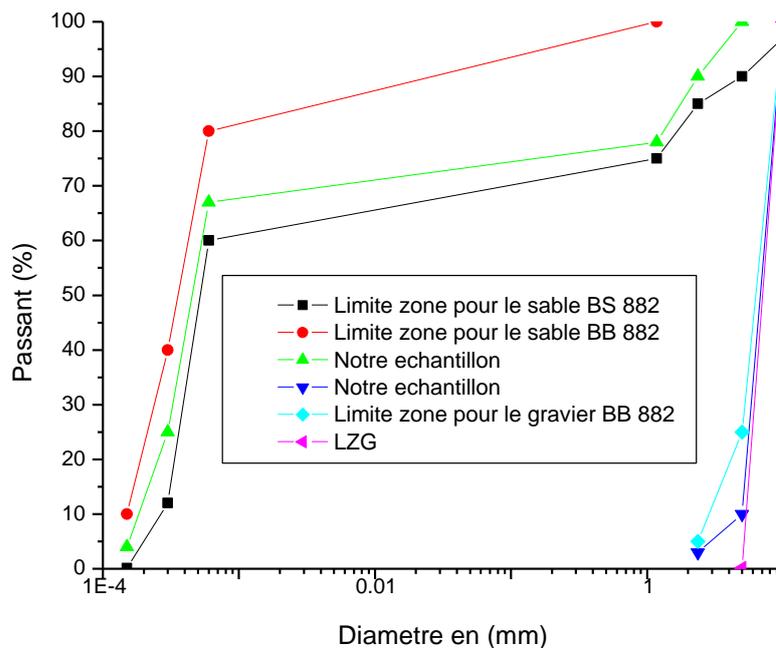


Fig. 2.1 Courbe granulométrique des différents granulats utilisés

2.4.4 Ciment avec des alkalis élevée

Le ciment avec des alkali élevé est utilisé pour les essais sur la réaction alcali silice. L'analyse chimique est donne dans le tableau 2.1. La quantité de l'alcali contenu dans le ciment à une quantité élevé des alkalis de :

$$\begin{aligned} \% \text{equiv Na}_2\text{O} &= \text{Na}_2\text{O} + (0.658 \times \% \text{k}_2\text{O}) \\ &= 0.37 + 0.658 \times 0.95 = 1.00\% \end{aligned}$$

2.4.5 Silice fondu amorphe

A cause de la difficulté pour obtenir l'opale, certains chercheurs [78] ont montré que le verre de silice peut être utilisé comme agrégat réactif pour l'essai de la réaction de l'alcali silice. Le verre de silice a généralement une distribution de particule de 150 à 600mm avec 94% passant le tamis de 600 um et 30% passant le tamis de 150 μm. La composition chimique et l'analyse granulométrique de verre de silice sont montrées dans les tableaux 2,2 et 2.3 respectivement.

2.4.6 Super plastifiant.

Le Super plastifiant, haut réducteur d'eau, conforme à la norme NF EN 934-2., est le Viscocrete 3045 (Sika France SA.,) à base de pycarboxylate modifies ; il se présente

sous la forme d'un liquide marron. Il permet de maintenir l'ouvrabilité du béton plus d'une heure et d'obtenir des résistances mécaniques élevées à court terme, améliore la stabilité, limite les risques de ségrégation. Sa densité est de 1.11, sa teneur en ions chlorés est inférieure à 0.1% et il possède 36,4% d'extrait sec. Son dosage peut varier de 0.25 à 2.5% de la masse de ciment selon l'effet souhaité.

2.5 Conception du mélange

Comme décrit dans la section 2.2, l'objectif de la conception du mélange est d'avoir une résistance à 28 jours dans une chambre humide de 50N/mm^2 avec des remplacements de 50% et de 65% de ciment par le laitier. Pour développer des mélanges de béton avec ces recommandations et autre comme indiquées dans la section 2.2, plusieurs mélanges sont conçus pour avoir une résistance à 28 jours de 50 N/ m^2 . L'avantage de l'utilisation d'un superplastifiant est d'avoir des mélanges avec une ouvrabilité supérieure à 100 mm, avec une quantité d'eau très faible dans les mélanges ; les mélanges sont montrés en détails dans le tableau 2.4.

2.5.1 Procédé et fabrication des éprouvettes

Dans le but de réduire le ressuage, il est conseillé [64] de mélanger les agrégats avec une quantité d'eau, et ensuite ajouté le ciment pour aider les graviers pour être enrobés avec une couche de pâte de ciment. Avant le malaxage, les différents matériaux ont été pesés et mélangés dans un malaxeur avec une capacité de 0.2 m^3 . Différentes combinaison des constituants ont été essayées mais la méthode suivante s'est avéré la mieux adaptée pour produire un mélange homogène et sans ségrégation. Le gravier et le sable ont été placés en première lieu, $1/4$ de la masse total de l'eau est ajoutée et malaxé pendant 30 secondes dans le malaxeur, suivi du ciment et du laitier et le sable ensuite est ajouter en dernier. Les matériaux étaient alors secs mélangés pour environ deux minutes. La moitié, et le reste de l'eau ont été alors ajoutés et mélangés pour une autre minute. Le Super plastifiant est ajouté directement au mélange car cette méthode a été trouvée la mieux adapte pour donner une meilleur plasticité que lorsque le mélange a été mélangé avec de l'eau. Le mélange est malaxé pour une autre minute. Le slump était mesuré immédiatement après la fin du malaxage à l'aide du cône d'Abrams. L'affaissement des mélanges est pris avant et après l'addition du superplastifiant.

Le béton est ensuite déversé dans des moules en acier dont les parois ont été auparavant légèrement humidifiées avec de l'huile. Une fois les moules à moitié remplis, la table vibrante à laquelle ont scellés ces moules est mise en marche pendant environ une minute. On remplit ensuite la deuxième moitié des moules et on laisse la table vibrer pendant une autre minute. Seulement la vibration externe était nécessaire en raison de grande ouvrabilité réalisée pour tous les mélanges (plasticité supérieure à 100 mm). Après, les éprouvettes étaient lissées. Tous les moules sont alors recouverts et placés dans le laboratoire pendant approximativement 24 heures avant le démoulage. Toutes les éprouvettes ont été traitées dans l'eau et examinées selon la norme BS 1881 [65], et à chaque âge trois spécimens ont été examinés.

2.5.2 Étude préliminaire : Résultat et discussion.

Après avoir obtenu les proportions adéquates de mélange pour les différentes résistances des bétons, plusieurs autres mélanges ont été moulés pour observer si les résultats obtenus jusqu'ici étaient reproductibles.

L'étude préliminaire est d'étudier et examiner les propriétés du béton à l'état frais et durcis jusqu'à l'âge de 28 jours. Les propriétés analysées sont la plasticité (ouvrabilité), et le développement de la résistance du béton durci par rapport aux différentes conditions de cure et âges, elles sont rapportées dans le chapitre 3.

2.5.3 Ouvrabilité

Une des conditions de la conception de mélange de béton de laitier est de produire un mélange ouvrable avec une plasticité supérieure à 100mm, de sorte que le mélange puisse être facilement placé et compacté. Pour atteindre cet objectif, un super plastifiant a été ajouté pour tous les mélanges de béton de laitier. L'ouvrabilité du béton de laitier a été déterminée par l'essai de cône d'Abrahms, avant et après addition de super plastifiant.

Tous les mélanges ont montré la bonne cohésion et aucune ségrégation n'a été détectée. Avant l'addition d'adjuvant, les plasticités des mélanges se sont étendus entre 0 et 10mm, après l'ajout de superplastifiant au béton, tous les mélanges ont été fluidisés et ont donné des slumps de 160-200mm. Un mélange a seulement un slump de 55 mm même après l'addition d'un superplastifiant et le mélange M5 a montré une ségrégation. Ce qui démontre que la plasticité du béton dépend de la proportion et de la température.

Bien que de tels mélanges avec une plasticité très grande puissent ne pas être nécessaires dans toutes les situations, et soient très souhaitables pour des mélanges incorporant les fibres en acier et les sections minces.

L'avantage de l'ajout d'un superplastifiant est de réduire le ratio Eau/ciment composé, ce qui conduit à un béton durable avec une faible perméabilité, faible porosité, diminuer le ressuage, et augmenter la résistance aux agents agressifs comme les chlorides, sels, et alcali.

Tableau 2.1: Composition chimique et essais physiques du ciment et du laitier

OXYDES	CPA (%)	OPC Avec alkali élevée	LAITIER (%)
SiO ₂	20.50	19.50	33.92
Al ₂ O ₃	0.27	5.60	11.86
Fe ₂ O ₃	2,60	3.40	1.31
C _a O	65.90	64.20	41.33
MgO	1.17	-	8.17
Mno	0.03	1.50	0.63
S ₀ ₃	2.86	2.90	1.44
K ₂ O	0,63	0.95	0.40
Na ₂ O	0,20	0.37	0.27
P ₂ O ₅	0.08	0.05	0.03
Total	98.91	98.47	100.81
Essais physiques			
Surface spécifique (m ² /kg)	380	-	450
Masse volumique absolue	3.2	-	2.9 approx

Tableau 2.2 : Analyse granulométrique de la silice fondue (verre de silice)

Tamis (µm)	Retenue %	Tamisât cumulée	% Retenue cumulée
600	6	94	6
300	36	58	42
150	28	30	70
Fond	30	0	100

Tableau 2.3 : Composition chimique de la silice fondue (verre de silice)

Composition chimique	% par poids
SiO ₂	99.71
Al ₂ O ₃	0.15
Fe ₂ O ₃	0.33
CaO	0.04
MnO	0.01
SO ₃	0.02
Na ₂ O	0.10
K ₂ O ₃	0.03
P ₂ O ₃	0.01
Total	100

2.5.4 **Résistance à la compression : Uniformité des résultats.**

Le tableau 2.5 montre les résultats du développement de résistance du béton de laitier obtenu pendant l'étude préliminaire. Tous les spécimens examinés pendant cette période ont atteint leurs résistances exigées à 28 jours. A partir de ces résultats les conclusions suivantes peuvent être tirées.

1. les données montrent que l'ensemble des mélanges a atteint leur résistance désirée à 28 jours; il est montré aussi que le béton aux laitiers peut être formulé pour donner des résistances élevées.
2. le dosage total du ciment plus le laitier est augmenté d'environ 10% pour 50% de remplacement et 20% pour le 65% remplacement ; le rapport Eau/Ciment + laitier est réduit.
3. la résistance au jeune âge est faible par rapport au béton ordinaire et en remarque que la valeur est de 50% pour le 50% remplacement et aux environs de 30% pour le remplacement de 65%.
4. la résistance à 3 jours et à 7 jours sont comparables a celle du mélange avec du ciment ordinaire

2.5.5 Développement de la résistance

Cette partie analyse l'évolution de la résistance du béton à une journée, à 3 jours, et à 7 jours, exprimés en pourcentage de la résistance de 28 jours, les résultats sont montrés dans le tableau 2.6.

A partir du tableau 2.6, on peut voir que le développement de la résistance augmente avec l'âge. Les résultats indiquent que les valeurs de la résistance aux jeunes âges du béton au laitier est faible comparée au béton normal sans le laitier. Cependant, l'incorporation d'un superplastifiant et une faible quantité d'eau peut assurer un développement à 3 jours et au-delà.

A un niveau de remplacement élevé, la résistance au jeune âge est moins visible que le béton ordinaire même avec 50% de remplacement de laitier. Mais avec le temps, il y'a une accélération due à l'hydratation du ciment au laitier. Le tableau 2.7 montre les deux mélanges choisis pour notre étude.

2.6 Conclusion

Les conclusions suivantes peuvent être tirées de ce travail :

1. Tous les mélanges ont montré une bonne ouvrabilité. Les plasticités mesurées étaient de l'ordre de 160-200mm. en dépit d'être très plastique, la cohésion et de l'uniformité exhibée par ces mélanges n'ont montré aucune ségrégation. .
2. Le béton au laitiers avec 50% remplacement développe une grande résistance au jeune âge que le 65% remplacement, mais avec le temps, les deux mixes montrent une résistance similaire.
3. La résistance du béton au laitier exprimé comme pourcentage à 28 jours varie de 9 à 16% aux premiers jours, 43 à 45% à 3 jours et 66 à 68% à 7 jours pour 50 et 65% remplacement.
4. En générale, l'hydratation du béton au laitier est lente aux jeunes âges. Mais après 3 jours, le taux d'hydratation s'accélère ce qui conduit à la libération du calcium hydroxyde de l'hydratation du ciment portland.
5. Le béton au laitier a développé 9-16, 44-56% et 61-71% de la résistance de 28 jours à 1, 3 et 7 jours respectivement à une vitesse plus rapide

6. Le béton au laitier avec un contenu modéré de ciment de 233 kg/m^3 et le poids semblable de laitier, peut produire des bétons de haute performance de 50 N/mm^2 à 28 jours.

Tableau 2 .4 : Détails des mélanges préliminaires

Gâchée	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
Remplacement (%)	0	50	50	50	65	65	65	65
CPA (kg/m^3)	360	205	200	200	154	150.5	147	147
Laitier (kg/m^3)	0	205	200	200	286	279.5	273	273
CPA+Laitier (kg/m^3)	360	410	400	400	440	430	420	420
Sable (kg/m^3)	700	700	700	700	650	700	700	700
Gravier (kg/m^3)	1011	1011	1011	1011	1078	1011	1011	1011
Sable+gravier (kg/m^3)	1711	1711	1711	1711	1728	1711	1711	1711
A/C*	4.75	4.17	4.28	4.28	3.93	3.98	4.07	4.07
S/S+G** (%)	41	41	41	41	41	41	41	41
E/C+L ***	0.55	0.40	0.45	0.43	0.46	0.40	0.40	0.40
Superplastifiant **	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8
Slump, mm	55	155	60	>160	>160	>160	>160	>160

* A/C = Sable + Gravier/Ciment

** S/S+G = Sable / (Sable+gravier)

***E/C+L = Eau/ (Ciment+Laitier)

** 1.80 Par poids du (Ciment + Laitier)

Tableau 2.5: Résistance à la compression du mélange sélectionné.

Age (jours)	développement de la résistance exprimée comme pourcentage à 28 jours							
1	37	21	11	16	10	9	9	8
3	55	46	40	45	-----	44	43	44
7	81	73	69	68	73	70	66	67
28	100	100	100	100	100	100	100	100
gâchée	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8

Tableau 2.6 : Développement de la résistance exprimée comme pourcentage à 28 jours

Age (jours)	Résistance à la compression (N/mm ²)							
1	17.40	11.70	6.03	9.00	4.80	5.40	4.90	4.40
3	26.10	25.80	21.50	25.40	-----	25.00	24.00	24.70
7	38.50	40.50	36.80	38.50	35.10	40.50	36.80	37.10
28	47.50	55.70	53.70	56.70	47.90	57.50	55.90	55.70
MIX	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8

Tableau 2.7 : Les mélanges sélectionnés et le développement de la résistance

Gâchée N ⁰	SP % (C + S)	W/C+S	Slump (mm)	Résistance à la compression (N/mm ²)			
				1	3	7	28
M4	1.80	0.43	>160	9.00	25.40	38.50	56.80
M7	1.80	0.40	>160	4.90	24.00	36.80	55.90

CHAPITRE 3

Propriétés du béton au laitier contenant un superplastifiant

3.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à l'étude des propriétés du béton au laitier avec un niveau de remplacement de 50% et 65% de laitier d'El-Hadjar avec une résistance désire à 28 jours de 50N/mm². Résistance à la compression et la flexion, module d'élasticité, vitesse du son, retrait et gonflement ont été étudiés. Toutes les propriétés ont été déterminées dans trois conditions de cure et à différent age.

3.2 Protocoles expérimentaux

3.2.1 Caractéristiques et méthodes d'essai

Le but de ce programme expérimental est d'étudier les variations de la résistance avec l'age dans trois conditions de cure. Les données sont collectées jusqu'à 6 mois. En plus du module d'élasticité, vitesse du son, retrait et gonflement sont aussi déterminés. Les résultats des figures et les tableaux sont la moyenne de trois éprouvettes.

3.2.2 Détail des tests

Les dimensions des échantillons utilisés sont:

- Cubes 100 x 100 x 100 mm pour les essais de compression.
- Prismes 100 x 100 x 500 mm pour les essais de flexions, vitesse du son, retrait et gonflement.
- Prismes 100 x 100 x 300 mm pour les essais de modules élastique statique

3.2.3 Conditions de cure

Pour déterminer les effets des conditions de cure, sur les propriétés du béton au laitier, trois conditions de cure ont été étudiées.

1. Cure dans la chambre humide à $20 \pm 2^\circ\text{C}$ (Fog).
2. Cure dans le laboratoire (Lab).
3. Cure 7 jours dans la chambre humide suivie d'une cure dans le laboratoire (7Fog + Lab).

3.2.4 Confection des éprouvettes

Toutes les éprouvettes sont remplies dans les moules à raison de deux couches; la vibration est utilisée seulement pour le compactage et le lissage de la surface extérieure.

Les moules sont ensuite recouverts par du polythène mouillé d'eau, et sont maintenues dans le laboratoire pendant 24 heures. Les éprouvettes sont ensuite démoulées et placées dans leurs cures respectives, jusqu'au jour du test.

3.2.5 Appareillage et procédure du test

- Résistance à la compression et la flexion

Les essais sont réalisés suivant les normes anglaises BS 1881:Part4 [65].

- Module d'élasticité statique

Les essais sont réalisées suivant les normes anglaises BS 1881:Part5 [65]. Pour chaque cure, trois éprouvettes sont testées à 28 jours et 6 mois. L'allongement est mesuré suivant l'axe longitudinal sur les deux côtes du prisme. Les lectures de l'allongement sont prises en utilisant à l'aide d'un appareil extensomètre muni d'un comparateur de 100mm de longueur, capable d'apprécier des variations de l'ordre de $16,0 \times 10^{-6}$ m/m.

3.2.6 Essais de la vitesse du son

3.2.6.1 Introduction

Les méthodes normalisées utilisées pour évaluer la qualité du béton dans les bâtiments ou les ouvrages ne prennent en compte que les essais destructifs sur des éprouvettes coulées au même moment. Les principaux désavantages de ces méthodes sont les suivants; les résultats ne sont pas obtenus immédiatement, le béton des éprouvettes peut être différent de celui de l'ouvrage car la cure ou le serrage peuvent être différents, les résistances des éprouvettes dépendent également de leurs dimensions et de leurs formes.

Plusieurs méthodes non destructives d'évaluation ont été mises au point. Ces méthodes sont basées sur le fait que certaines propriétés physiques du béton peuvent être reliées à la résistance et peuvent être mesurées par des méthodes non destructives. Ces propriétés physiques du béton comprennent la dureté (capacité de rebondissement), la capacité de transmettre les ultrasons, la capacité de résister à l'arrachement.

Le degré de compacité, le taux de fissuration ou la détection des dommages causés par le gel, le feu ou l'écart de température, ne peut être illustré que par un essai non destructif tel que l'essai ultrasonique. Cet essai est basé sur des mesures de temps de

parcours et d'énergie transmise. Le temps de parcours pour que l'onde traverse matrice et gravier est égal à la somme du temps de parcours à travers chaque composé, c'est-à-dire

$$T_c = T_p + T_a$$

Où T_c = c'est le temps de parcours qui traverse la matrice et gravier du béton

T_p = c'est le temps de parcours qui traverse la matrice

T_a = c'est le temps de parcours qui traverse le gravier.

3.2.6.2 Détail de l'essai

Le but de cette série de tests est de déterminer la relation entre la résistance et la vitesse du son du béton au laitier.

Les mesures de la vitesse du son ont été prises sur des prismes de 100 x 100 x 500 pour chaque mode de cure. Les lectures ont été réalisées à des intervalles réguliers. La vitesse du son a été mesurée à l'aide d'un appareil commercialisé comme (Portable ultrasonique non destructif digital indicating Tester), de précision de 0.1 microseconde. La lecture est prise au milieu de la section de 100 x 100 mm utilisant une paire de transducteur (émetteur, récepteur) de 50 mm de diamètre par la méthode directe. Avant la lecture une couche mince de graisse est utilisée pour faciliter la transmission des ultrasons entre la surface du béton et les faces du transducteur. La lecture est sélectionnée par l'application et la re-application du transducteur jusqu'à l'obtention d'un résultat minimum. La propagation des ultrasons est déterminée de la façon suivante:

$$V = L/T$$

L = longueur du parcours en m/s

T = le temps du parcours en μ s.

3.2.7 Retrait et Gonflement

3.2.7.1 Introduction

Les déformations endogènes d'une pâte de ciment ou d'un béton sont définies comme les déformations qui ont lieu en condition isotherme lorsque le matériau est isolé de tout échange hydrique avec le milieu extérieur. Ces déformations sont une conséquence directe de l'hydratation du ciment. En effet, le bilan volumique de la réaction d'hydratation se traduit par une diminution du volume absolu, le volume absolu des hydrates formés étant inférieur à la somme des volumes absolus initiaux du ciment anhydre et de l'eau. Ce phénomène est connu sous le terme de contraction Le Chatelier.

A partir d'un certain degré d'hydratation (dès que le matériau devient suffisamment rigide), cette diminution du volume absolu devient incompatible avec les déformations mécaniquement admissibles par le squelette minéral naissant : un volume gazeux apparaît alors dans la porosité de la pâte initialement saturée en eau. Ce phénomène, conséquence directe de la contraction Le Chatelier, est appelé autodessication. Il se traduit physiquement par une baisse de l'humidité relative interne du matériau et, mécaniquement, par un retrait global du matériau (retrait d'autodessication). Les déformations endogènes se traduisent donc, avant prise, par la contraction. Le Chatelier, puis, après prise, par le retrait d'autodessication. Le retrait d'autodessication dépend de l'état de liaison de l'eau avec le solide. L'étude des mécanismes de retrait revient à celle de la liaison eau/surface solide. Trois mécanismes permettent d'expliquer le retrait endogène. L'expansion ou le gonflement se produit lorsque le béton est traité continuellement dans l'eau, ou laisse dans un environnement humide, et tout ça est dû à l'absorption de l'eau par la pâte de ciment. Par conséquent le béton, augmente son poids et son volume.

L'importance du retrait dans les structures est directement liée aux fissures, et un pourcentage élevé des fissures dans le béton est maintenant reconnu, qui est provoqué par le retrait libre.

3.2.7.2 Détail des essais

Le but de l'essai pour ces tests était de déterminer la relation entre le temps et l'allongement sur le retrait libre

3.2.7.3 Appareillage, Préparation de l'échantillon et procédure du test

Les plots sont fixés au milieu de chaque face des quatre cotés des éprouvettes, juste après le démoulage. La surface est en première lisse avec du papier verre, et ensuite essuie avec de l'alcool acétone. Les plots sont fixés à l'aide d'un super colle, laquelle se durcit au environ de 15 minutes. La lecture de l'allongement initial est lue, après une heure du démoulage. Pour chaque mode de cure trois éprouvettes sont utilisées, les résultats des tableaux et les figures sont la moyenne de 12 lectures.

3.3 Résultats du test et discussion

3.3.1 Résistance à la compression

Avec des conditions de cure bien choisies, les mélanges du béton au laitier peuvent être obtenus quel que soit la résistance désirée. Des bétons aux laitiers de haut fourneau ont été employés dans la construction pendant des décennies, Jusqu'aux dernières décennies que ce béton a trouvé son utilisation dans les applications structurales, à cause de leurs hautes résistances. En raison du processus lent de l'hydratation du béton au laitier a conduit les entrepreneurs d'ignorer l'intérêt du béton au laitier tel que la durabilité. Au cours des années, plusieurs recherches ont été élaborées avec la comparaison de la résistance du béton au laitier et le béton ordinaire, ils ont conclu que le béton au laitier a une résistance très faible et un taux faible de gain de résistance. La fausse interprétation est due au fait que le béton au laitier et le béton ordinaire sont souvent comparés par rapport à la résistance inégale à 28 jours; pour que la comparaison soit raisonnable, il est important que les deux bétons soient comparés à des résistances égales à 28 jours.

Dans cette section, l'effet de la condition de cure sur la résistance à la compression du béton au laitier est discuté, et les résultats sont montrés.

Le développement de la résistance à la compression avec l'âge pour 50% et 65% de remplacement du laitier, traité sous trois conditions de cure, est montré dans les Figures 3.1 à 3.5 et Tableau 3.1 et 3.2.

- 1) à partir du tableau 3.1, on peut voir que tous les mélanges atteignent leur résistance désirée mise à part le mélange M4 et M7 traité dans le laboratoire.
- 2) Les résultats montrent que le mélange M4 traité dans le laboratoire atteint sa résistance désirée à l'âge de 90 jours et une légère augmentation à 180 jours
- 3) Les résultats aussi montrent que le mélange M7 traité dans le laboratoire n'a jamais atteint sa résistance désirée à tous les âges jusqu'à 180 jours.

3.3.2 Développement du gain de la résistance

La variation du gain de développement de la résistance exprimée en pourcentage à 28 jours est présente dans le tableau 4.2. Les résultats ont montré que, pour les éprouvettes traitées dans un environnement humide, le développement de la résistance au jeune âge du mélange M7 est faible par rapport au mélange M4 jusqu'à 3 jours. À 3 et 7 jours, le développement de la résistance des mélanges M4 et M7 est similaire. En se référant au développement de la résistance, ils sont similaires, mais en réalité il y a une

différence en pourcentage en gain. Par exemple, l'augmentation de la résistance du mélange M4 et M7, à partir de 1 jour jusqu'à 6 mois est de 7.3 et 15.6. L'augmentation de la résistance à 6 mois exprimée en pourcentage à 28 jours est presque semblable aux environs de 25%. Cela est dû largement à la combinaison de l'effet du traitement continue dans un environnement humide et la faible activité pouzzolanique du laitier. Pour les autres conditions de cure, les résultats montrent que le développement de la résistance du mélange M7 est faible compare à celle du mélange M4 jusqu'à 6 mois. De plus, pour le mélange M4 traite dans le laboratoire et le mélange traite à 7 jours dans un environnement humide et ensuite laisse à l'air libre 7Fog + LAB, continuent à montrer une augmentation de résistance jusqu'à 6 mois de 22 et 25% supérieure à la résistance a 28 jours. Cependant, le mélange M7 a montré une réduction pour les deux conditions de cure, la réduction de résistance à 6 mois était aux environ de 7 et 1%.

Tableau 3.1: Développement de la résistance a la compression du béton au laitier.

mélange	Temps Jours	Résistance a la compression N/mm ²		
		Fog	Lab	7Fog + Lab
M4	1	9.83	7.20	6.00
M7	1	4.40	4.10	4.30
M4	3	27.9	28.9	28.20
M7	3	23.90	19.00	23.73
M4	7	38.20	39.00	41.00
M7	7	36.60	27.40	37.60
M4	28	57.70	46.80	58.80
M7	28	54,60	34.20	57.00
M4	90	72.00	54.90	69.00
M7	90	66.90	38.20	59.40
M4	180	72.10	57.10	73.30
M7	180	68.70	36.47	57.63

M4 mélange pour un remplacement de 50% de laitier pour une résistance de 50N/mm²; E/C+S = 0.43
M7 mélange pour un remplacement de 65% de laitier pour une résistance de 50N/mm²; E/C+S = 0.40

Tableau 3.2 : Développement du gain de la résistance en pourcentage par rapport à la résistance à 28 jours.

AGES (JOURS)	MELANGE M4			MELANGE M7		
	Fog	Lab	7Fog+Lab	Fog	Lab	7Fog+Lab
1	17	16	10	8	12	13
3	48	62	48	44	55	13
7	66	83	70	67	80	66
28	100	100	100	100	100	100
90	125	117	117	122	112	104
180	125	122	125	126	107	101

Tableau 3.3 : Développement du gain de la résistance en pourcentage par rapport à 50 N/mm².

Ages (Jours)	M4	M7
	LAB	LAB
1	14	8
3	56	38
7	78	55
28	94	68

3.3.3 Effet de la condition de cure

Pour vérifier les effets de la condition de cure sur les propriétés de la résistance du béton au laitier, l'essai de compression est effectué jusqu'à 6 moi. Les résultats sont montrés dans les tableaux 3.1 et 3.2 et les Figures 3.1 à 3.5. Ces résultats montrent que le mode de cure a un effet important sur le développement de la résistance du béton au laitier. Sous la condition de cure humide, il y'a une augmentation continue de la résistance avec le temps pour 50% et 65 % de remplacement, les éprouvettes montrent aussi une augmentation au delà de 28 jours voir Figure 3.3.

Les résultats montrent aussi que les bétons traités dans un environnement sec conduit a la résistance la plus faible, cette remarque était plus significatif pour 65% de remplacement voir figure 3.4, ces résultats sont les mêmes que ceux trouves par Buttler (32). Figure 3.4 montre que les éprouvettes du béton au laitier traite continuellement à l'air libre après démoulage n'ont pas pu atteindre leur résistance désirée, sauf dans le cas avec 50% de remplacement.

Le développement du gain de la résistance comme pourcentage à 28 jours est montre dans le tableau 4.3. On peut voir que le béton continuellement traité dans le

laboratoire pour les deux mélanges M4 et M7 ont un différent développement de résistance pour tout les temps.

Le mélange M4 exposé dans le laboratoire a atteint 94% de sa résistance désirée a 28 jours, cependant le mélange M7 a atteint seulement 68% de sa résistance désirée. Tableau 3.1 montre que le béton traité à 7 jours dans les conditions humides et ensuite laisse dans un environnement incontrôlé montre la plus grande résistance, environ 2 a 6% plus que celle traite dans un environnement humide jusqu'à 6 mois et entre 22 et 50% plus que celle traite dans le laboratoire. Ces résultats montrent que le mode de cure traite dans la condition humide, même pour une durée assez courte période, a un effet bénéfique sur le développement de la résistance. Ces résultats sont similaires à ceux de Swamy et Alhamed [68] qui ont étudié l'effet de la condition de cure à 3 jours à l'eau sur le béton incorporant de la cendre volante. Ils ont montre que la résistance à la compression et la flexion augmente leurs résistances plus que celle traite dans un environnement humide. Aussi le béton avec 65 % de remplacement est incapable d'atteindre sa résistance désirée à tout les temps, sous la condition de cure dans un environnement sec, tous les autres étaient capables d'atteindre leurs résistances jusqu'à 6 mois. Pour avoir une augmentation de résistance continue, le béton au laitier incorporant du superplastifiant a besoin, comme le béton ordinaire, de présence de l'humidité au cours de sa vie pour continuer le processus de l'hydratation [32]. Les deux cures à savoir la cure dans l'environnement humide et 7 jours dans la cure humide suivie d'une cure à l'air atteignent leur résistance désirée à 28 jours.

Le tableau 3.1 montre le rapport de la résistance de la compression des éprouvettes traitées dans un environnement à l'air libre et de 7 jours dans une cure humide. Ces résultats montrent que le rapport diminue avec l'augmentation des jours et spécialement pour les jours supérieurs à 28 jours; et un faible rapport pour le béton avec un remplacement du laitier élevé. Ces Résultats montrent aussi que les éprouvettes traitées à 7 jours dans les conditions humides suivi d'une cure à l'air ont des résistances après 7 jours de 5 a 28% et 37 a 67% supérieure a ceux traites dans les conditions non humide pour 50 et 65% de remplacement.

Tableau 3.4 : Effet de cure sur le ratio des résistances à la compression

mélange	Temps Jours	Résistance a la compression N/mm ²		
		Lab/Fog	(7Fog+Lab)/Fog	(7Fog +Lab)/Lab
M4	1	0.73	0.61	0.83
	3	1.03	1.01	0.98
	7	0.98	1.07	1.05
	28	0.81	1.01	1.25
	90	0.72	0.96	1.26
	180	0.79	1.02	1.28
M7	1	0.93	0.98	1.05
	3	0.83	0.99	1.25
	7	0.75	1.03	1.37
	28	0.63	1.04	1.67
	90	0.57	0.89	1.55
	180	0.53	0.83	1.58

3.3.4 Comparaisons avec le béton normal

Il est intéressant de comparer le développement du béton au laitier avec du béton ordinaire avec l'age et sous des conditions de cures différentes. Le tableau 3.5 représente quelques données de la condition de cure humide du béton ordinaire avec une résistance désirée à 28 jours de 60 N/mm² [69]. A partir des tableaux 3.5 et 3.1, on peut voir que dans la condition du traitement humide du béton ordinaire, la résistance du béton ordinaire augmente de 28 jours à une année de 18% pour le 60 N/mm². La valeur correspondante de l'augmentation du béton au laitier de 28 jours à 6 mois est de 25% et 26% pour le 50% et 65% remplacement voir (tableau 3.2). Quand le béton ordinaire est laissé dans la condition du traitement continue dans un environnement sec, il n'a pas pu atteindre sa résistance désirée a 28 jours de 25% compares a ceux du béton au laitier avec remplacement de 50% et 65% de laitier d'où leurs valeurs sont de 6.4 et 31.6% respective. Le 65% remplacement semble être le plus affecte par le séchage que le béton avec remplacement de 50% remplacement. A 6 mois le béton incorporant 50% du laitier est capable de maintenir sa résistance désirée, cependant le 65% remplacement est incapable d'atteindre sa résistance désirée. Ces résultats, montre que le béton avec 65% remplacement est pratiquement impossible de continue son processus d'hydratation. Les résultats dans les tableaux 3.1 et 3.5 indiquent que pour une mauvaise condition de cure, le béton ordinaire continuera sa résistance avec l'age, cependant le béton au laitier avec

50% remplacement dans telle condition, continu de s'hydrater. L'avantage de 50% remplacement du ciment par le laitier sous cette condition est évidente est claire. Le tableau 4.6 présentent des données de la laitier avec comme résistance désirée a 28 jours sur cube est de 45 N/mm² [28]. A partir des tableaux 3.1 et 3.6 on peut voir que sous le traitement humide a 7 jours le 50% et 65% remplacement du béton au laitier ont atteint 65% et 62% de la résistance du béton ordinaire respective, a 28 jours leurs valeurs sont de 87% et 83%. A 180 jours, le béton avec 50% et 65% remplacement du laitier ont atteint les valeurs de 93% et 89% de la résistance du béton ordinaire respective. La mauvaise interprétation est du aux faite a la comparaison des deux bétons a des résistances inégale a 28jours, le dosage du ciment et le rapport Eau Ciment sont aussi différent. Le tableau 3.7 présente des données sous la condition de cure humide, l'augmentation de 28 jours a 6 mois est de 16% pour 45 N/mm²; la valeur correspondante a l'augmentation du béton du laitier dont de 25% et 26% pour 50% et 65% remplacement respective (voir tableau 3.2).

Tableau 3.5 : Développement de la résistance du béton avec CPA [69]

Résistance Désirée	AGE	Rc		% à 28 jours	
		N/mm ²		Résistance	
N/mm ²	(jours)	Fog	DRY	Fog	Dry
60	7	49.5	38.7	81	88
60	28	61.0	44.0	100	100
60	90	69.2	46.0	113	105
60	360	71.9	44.0	118	100

Tableau 3.6 Développement de la résistance du béton avec CPA [28]

Résistance cubique à la compression grade 45 de cure 20 ⁰ C					
R1 0%		R2 50%		R3 70 %	
AGE (JOURS)	RC (N/mm ²)	AGE (JOURS)	RC (N/mm ²)	AGE (JOURS)	RC (N/mm ²)
1	20.5	1	6.5	1	3.5
7	59.0	7	36.0	7	24.0
31	66.0	31	64.0	31	46.5
56	73	56	69.5	56	60.0
171	77	171	75.5	171	67.0

R1 Ciment 437 Kg/m³ Eau/Ciment = 0.42 et Slump = 45 mm

R2 Eau/Ciment = 0.40 et Slump = 45 mm

Tableau 3.7 : Développement de la résistance du béton avec du CPA [70].

	100 %		40 % PBFC		50 PBFC		70% PBFC		% de la résistance à 28jours pour 100% CPA
E/C	0.43		0.43	0.42	0.42	0.41	0.43	0.41	
Age (JOURS)	Résistance a la compression sur cube (N/mm ²)								
1	27.0	11.5	13.5	13.5	8.5	10.0	3.5	4.0	51
2	36.0	21.5	25.0	25.0	17.0	20.0	8.5	10.5	69
3	39.5	26.0	30.0	30.0	23.0	26.0	13.5	16.0	75
7	47.0	40.0	44.5	44.5	36.5	42.0	28.5	34.0	89
28	52.5	58.5	64.5	64.5	56.5	62.5	49.5	52.5	100
56	59.5	61.0	66.5	66.5	63.5	69.0	53.0	59.5	113
90	61.0	64.5	70.0	70.0	68.0	68.0	56.5	66.0	116
180	61.0	66.0	73.0	73.0	69.0	66.0	61.0	67.0	116
365	67.0	70.5	77.5	77.5	73.0	76.5	66.0	72.0	116
Slump (mm)	40	80	45	45	75	40	85	45	-----

Grade 45 N/mm

Ciment 430 Kg/m³

Eprouvette traité dans l'eau

3.4 Résistance à la flexion

Les résultats de la résistance à la flexion du béton au laitier dans les trois conditions de cure sont montres dans le tableau 4.8 et dans les figures 3.6 à 3.10. Ces résultats montrent que les éprouvettes traites dans un environnement humide jusqu'à trois mois ont un maximum de résistance, et l'augmentation de la résistance à cet age exprimé comme pourcentage à 28 jours est de 9% et 1% pour 50% et 65% remplacement. Lorsque le béton est traite dans un environnement sec, la résistance pour le remplacement de 50% augmente jusqu'à 3 mois, aux environs de 3% aux de- la de la valeur de 28 jours. Apres en remarque une nette réduction, cependant la résistance pour le remplacement de 65% continu d'augmenter jusqu'à 6 mois.

Les tableaux 3.1 et 3.8 montrent que la résistance a la compression et la flexion se comporte d'une manière différente pour les éprouvettes traitées à 7jours dans un environnement humide, et ensuite expose dans le laboratoire. La résistance a la compression pour 50% de remplacement augmente jusqu'a 6 mois, cependant la résistance a la flexion augmente jusqu'à 28 jours après ça on remarque une nette réduction. Pour 65% de remplacement, les résistances à la compression et la flexion se comportent de la

même manière. Ces résultats montrent que, comme pour le béton ordinaire, la non-uniformité de la distribution d'humidité dans le béton au laitier n'influe pas sur les résistances à la compression comme elle influe sur les résistances à la flexion.

Les résistances à la compression et à la flexion sont montrées dans les figures 3.1 à 3.5 et 3.6 à 3.10 sous les trois conditions de cure. A partir de ces résultats on peut observer que le remplacement de 50% de laitier donne généralement de haute résistance que avec ceux de 65% remplacement pour tout les modes de traitements.

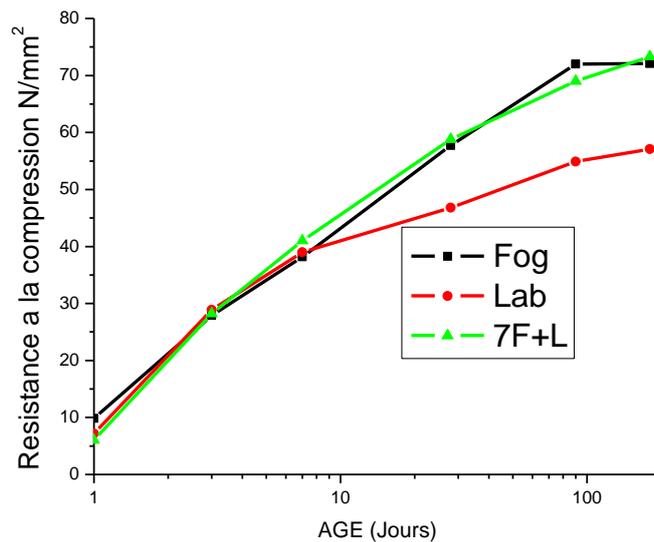


Fig 3.1. Variation de la résistance a la compression avec l'age (50% Laitier)

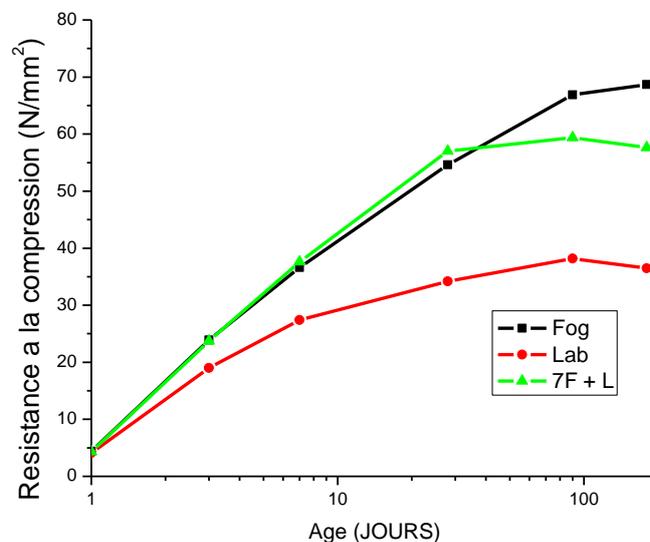


Fig.3.2 Variation de la resistance a la compression ave l'age (65% Laitier)

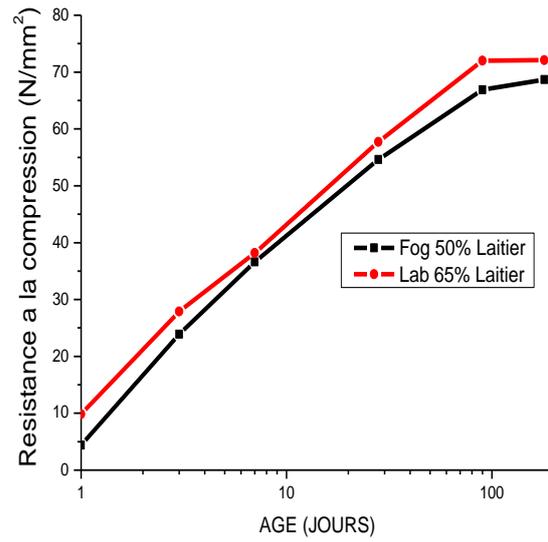


Fig. 3.3 Effet de la cure sur la resistance de compression avec l'age (50% et 65% Laitier)

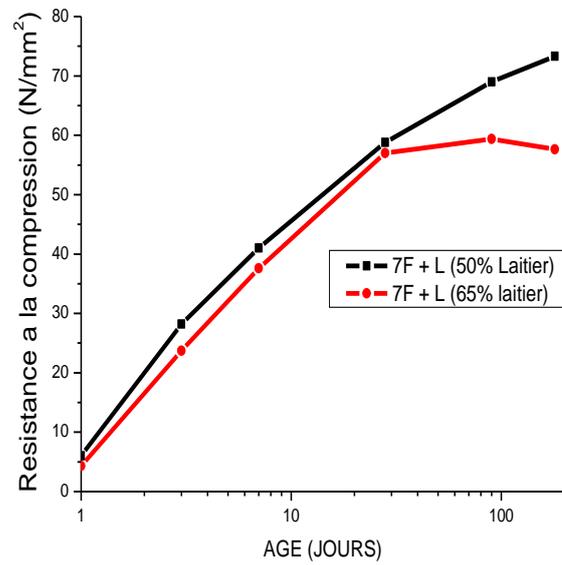


Fig. 3.4 Effet de la cure sur la resistance a la compression (50% et 65% Laitier)

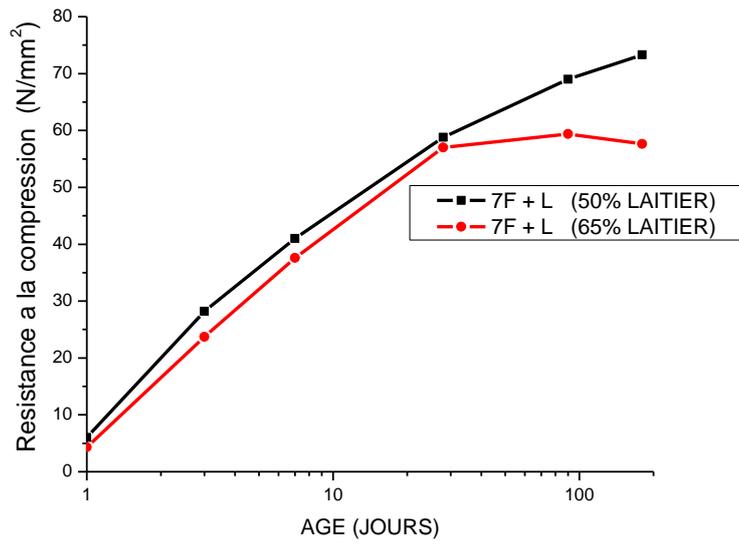


Fig. 3.5 Effet de 7F+ L sur la resistance a la compression (50% et 65% de laitier)

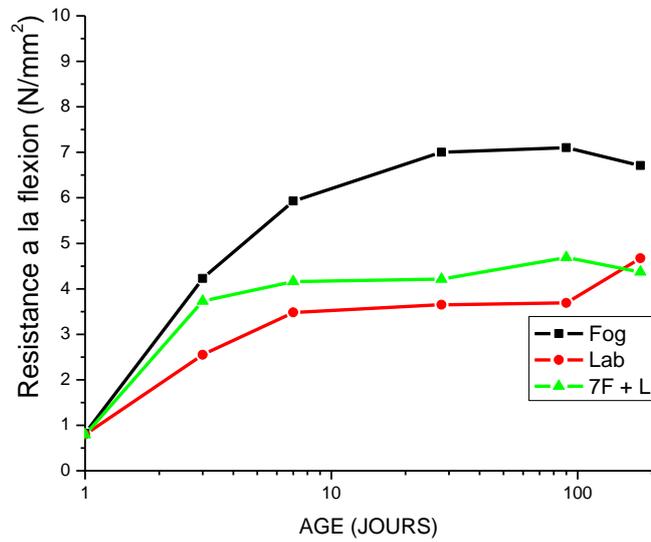


Fig. 3.6 Variation de la resistance a la flexion avec l'age (50% de laitier)

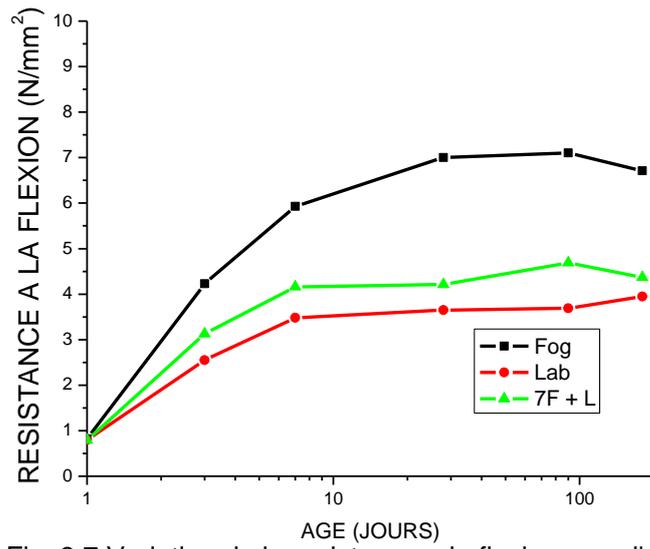


Fig. 3.7 Variation de la résistance à la flexion avec l'âge (65% Laitier)

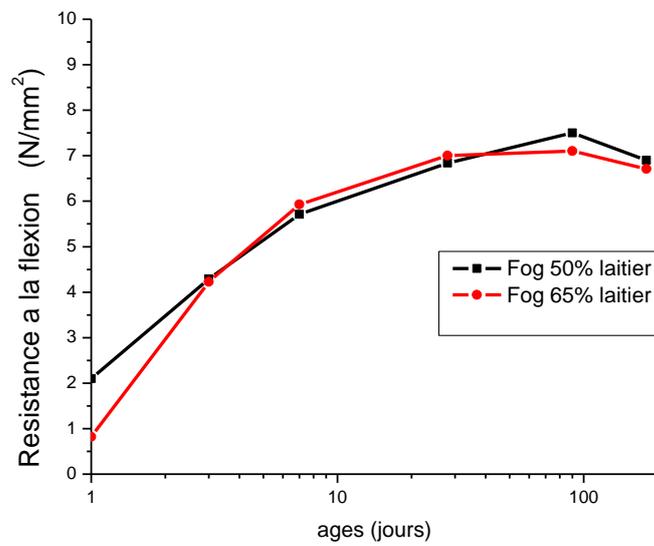


Fig. 3.8 Effet de l'âge sur la résistance à la flexion (50 et 65% de laitier)

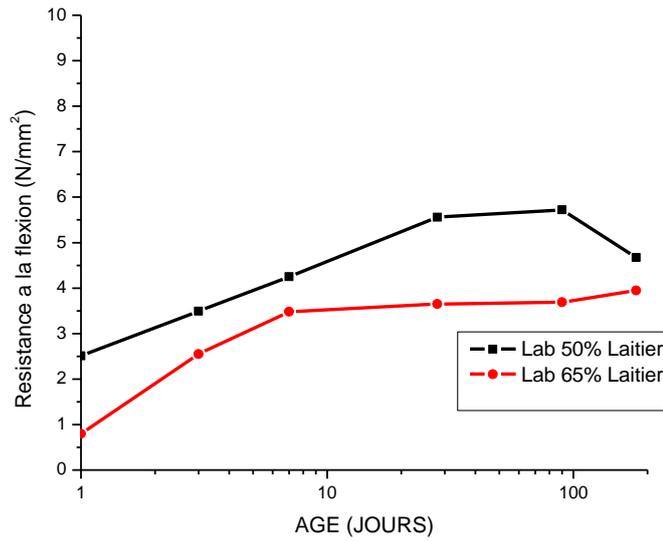


Fig. 3.9 Effet de la condition de cure dans le laboratoire sur la resistance a la flexion

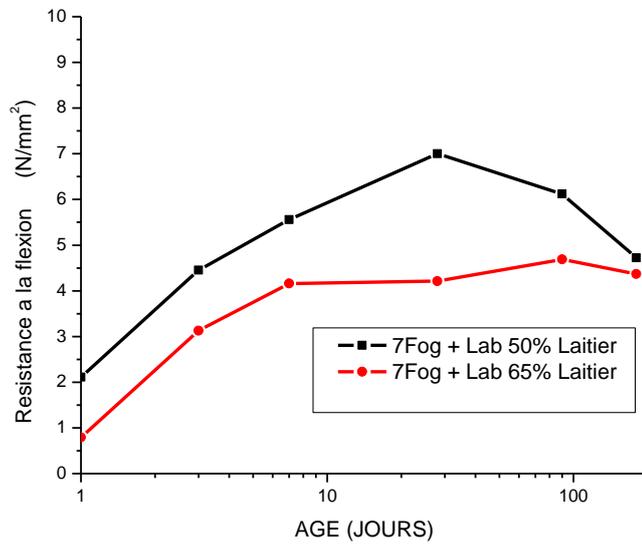


Fig. 3.10 Effet de la cure de 7Fog + Lab sur la resistance a la flexion

3.4.1 Comparaison avec les résultats des littératures

La majorité des essais étudiés dans les laboratoires pour les essais de la résistance à la flexion et de la compression sont représentés seulement au-delà de 28 jours. Des résultats sur le béton au laitier sont limités et jusqu'à maintenant on n'a pas des résultats qui couvrent les essais de la résistance dans la même période que celle choisie dans notre étude.

3.5 Module d'élasticité

Par définition, ce paramètre traduit l'aptitude à la déformation sous contrainte d'un béton. Il correspond au rapport de la contrainte à la compression à la déformation relative. Le module d'élasticité se mesure généralement par un essai d'extensométrie en compression. Après surfacage soigné et disposition de l'extensomètre dans la centrale de l'éprouvette, on applique sous la presse trois cycles de « chargement-déchargement » jusqu'au tiers de la charge de rupture (déterminée auparavant par un essai de compression sur une éprouvette de même mélange). La mesure de la déformation s'effectue lors du troisième chargement.

3.5.1 Résultats et discussions

Les valeurs des modules d'élasticité à 28 jours et à 6 mois sont montrées dans les tableaux 3.9 et 3.10. Le module d'élasticité statique à 28 jours sous trois conditions de cures est montré dans le tableau 3.9. Ces résultats dans ces tableaux montrent que le module d'élasticité statique des éprouvettes traitées dans la condition de cure humide est constamment plus élevé que ceux des autres cures. Une réduction nette du module d'élasticité est produite dans le traitement dans un environnement sec est de 20% pour 50% et 65% remplacement de laitier, pour les éprouvettes traitées à 7 jours dans un environnement humide et ensuite exposées à l'air produit seulement une réduction de 14%. Le module d'élasticité à 6 mois est présenté dans le tableau 3.10. Ces résultats recueillis montrent que la condition de cures pour les éprouvettes traitées dans un milieu humide conduit à un module d'élasticité élevé comparés aux autres traitements de cure. De nouveau, le développement du module d'élasticité suit le même comportement que ceux de la résistance à la compression. Le module d'élasticité augmente avec l'âge. Pour la condition de cure dans un environnement humide, le pourcentage d'augmentation après 6 mois par rapport à 28 jours est de 14 et 12% pour 50% et 65% remplacement de laitier.

Les éprouvettes traitées dans un environnement sec montrent une augmentation de 22 à 7% pour les mélanges M4 et M7, mais le module d'élasticité du béton aux laitiers continue à montrer une réduction de 2% et 4%. Ce phénomène est rapporté par Brooks et Neville [38] qui évoque que le module d'élasticité du béton aux laitiers diminue un peu avec la prolongation de la cure dans un milieu sec. Les éprouvettes traitées à 7 jours dans un milieu humide montrent une réduction de module d'élasticité même lorsque la résistance de compression augmente, cependant cette diminution à 6 mois est marginale. Ces résultats montrent que, exempt dans le cas de la cure dans un milieu humide, la résistance à la compression ne doit pas être prise au-delà de 28 jours, comme critère pour la qualité de béton. Puisque la résistance à la compression et la flexion aussi bien que le module d'élasticité varient d'une manière importante lorsque le béton aux laitiers commence à se sécher avec l'âge.

Tableau 3.8 : Résistance à la flexion du béton aux laitiers

Mixte	Age (Jours)	R_F (N/mm^2)			% de la résistance de 28 jours			R_F/R_C (%)		
		Fog	Lab	7F+Lab	Fog	Lab	7F+Lab	Fog	Lab	7F+Lab
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
M4	1	2.10	2.51	2.11	31	45	30	21	35	35
M7	1	0.82	0.80	0.79	12	22	19	19	19	18
M4	3	4.29	3.49	4.45	63	63	64	15	12	16
M7	3	4.23	2.55	3.13	59	70	74	18	13	13
M4	7	5.71	4.25	5.56	83	76	79	15	11	14
M7	7	5.93	3.48	4.16	83	95	99	16	13	11
M4	28	6.84	5.56	7.00	100	100	100	12	12	12
M7	28	7.00	3.65	4.21	100	100	100	13	10	7
M4	90	7.50	5.72	6.12	109	103	87	10	10	9
M7	90	7.10	3.69	4.69	101	101	111	11	12	8
M4	180	6.90*	4.67	4.72	101	84	67	10	8	6
M7	180	6.71*	3.95	4.37	96	108	104	9	11	8

* la chambre humide était non fonctionnelle le jour de l'essai.

Tableau 3.9 : Module d'élasticité statique à 28 jours

Mixe	Type De Cure	Résistance à la Compression (N/mm ²)	Module d'élasticité Statique E _c (KN/mm ²)
M4	Fog	57.7	35.3
M7	Fog	54.6	34.9
M4	Fog	46.8	28.6
M7	Fog	34.2	27.8
M4	Fog	58.8	30.4
M7	Fog	57.0	29.6

Tableau 3.10 : Module d'élasticité statique à 6 mois

Mixe	Type De Cure	Résistance a la Compression (N/mm ²)	Module d'élasticité Statique E _c (KN/mm ²)	Augmentation au de la de 28 jours exprimée en %	
				Rc	Ec
M4	Fog	72.1	40.1	25	14
M7	Fog	68.7	39.0	26	12
M4	Fog	57.1	28.0	22	-2
M7	Fog	36.5	26.0	7	-4
M4	Fog	73.3	30.1	25	-1
M7	Fog	57.6	29.1	1	-2

Tableau 3.11: Static Modulus of elasticity of OPC/CEMSAVE Concrete, 20°C [28]

Static Modulus of Elasticity – Grade 45 , Curing at 20°C								
R1 (0%)			R2 (50 %)			R3 (70%)		
Age (Jours)	Rc (N/mm ²)	Ec (KN/mm ²)	Age (Jours)	Rc (N/mm ²)	Ec (KN/mm ²)	Age (Jours)	Rc (N/mm ²)	Ec (KN/mm ²)
1	20.5	26.5	1	6.5	17.0	1	3.5	6.5
2	37.5	31.0	2	17.0	20.0	2	8.0	14.0
4	50.5	34.0	3	22.0	25.0	3	11.5	18.5
7	59.0	36.5	7	36.0	28.5	7	24.0	25.0
31	66.0	38.5	28	64.0	37.0	28	46.5	32.0
56	73.0	39.5	56.0	69.5	39.0	56	60.0	35.0
171	77.0	41.0	165.0	75.5	42.0	174	67.0	39.5

- Cement content 437 kg/m³ , sand 709 kg/m³ , Coarse aggregate 1088 kg/m³
- R1 Water – Cement ratio 0.42 , Slump = 45 mm
- R2 Water – Cement ratio 0.40, Slump = 45 mm
- R3 Water – Cement ratio 0.41 , Slump = 65 mm
- Specimen size 100 x 100 x 100 mm Columns
- Specimen cured in the water at 20°C

3.5.2 Comparaison du module d'élasticité avec les données de la littérature.

Le module d'élasticité avec l'âge pour 50% de remplacement de laitier teste dans trois conditions de cure est montrées dans le tableau 3.9 et 3.10. Il est intéressant de comparer les résultats du module d'élasticité de notre étude avec des bétons ordinaires traite dans un milieu humide (cure a 20⁰ C) [28] et la comparaison est aussi comparer avec la relation données dans le code anglaise BS 8110 : Part [2] : 1985. A partir des tableaux 3.9, 3.10 et 3.11, on peut voir que sous la condition de cure humide, il y'a une petite différence, si non, aucune différence dans le module d'élasticité entre le béton au laitier et le béton ordinaire. La relation donnée dans la norme Anglaise BS 8110 [71], est comme la suivante :

$$E_C = K_0 + 0.2 f_{cu} \quad (4.1)$$

E_C = est le module d'élasticité à 28 jours.

f_{cu} = est la résistance caractéristique sur cube à 28 jours (N/mm²)

K_0 = est la constant étroitement lie au module d'élasticité des graviers (prise comme 20 N/mm²).

En général, le code British Standart : Part [2] : 1985 [71] sous estime les valeurs du module d'élasticité dans la condition de cure dans un milieu humide d'une valeur de 8-10% et surestime le module d'élasticité traite dans un milieu sec entre 7-15%. Les valeurs prédire par BS 8110 [eq 3.1] suggère que le béton au laitier est de 8-10% supérieure que le béton ordinaire. Cette analyse est soutenue par Banfort [72] qui a trouve que le module d'élasticité du béton avec laitier est un peu supérieur de 8GPA et un effet similaire est rapporte par Neville et Brooks. [38].

Figures 3.11 représente les résultats de notre étude et ceux rapporte par Wainwright et Tolloczko [28] et l'équation prédire par BS 8110 [71]. D'où, on peut voir que les bétons conservent sous les conditions normales à la température de 200 C On a observé une petite différence entre niveau de laitier de 50% et 65% remplacement et l'équation prédire par BS 8110. Cependant, à des valeurs de la résistance de compression moins que 20.0 N/mm², le béton du ciment au laitier a une valeur petite que celle prédire par BS 8110. Aussi, les éprouvettes traites dans les laboratoires et celle traite a 7 jours dans les conditions humide montrent un faible module d'élasticité que ceux donné par BS 8110 pour la résistance de compression supérieure a 20N/mm².

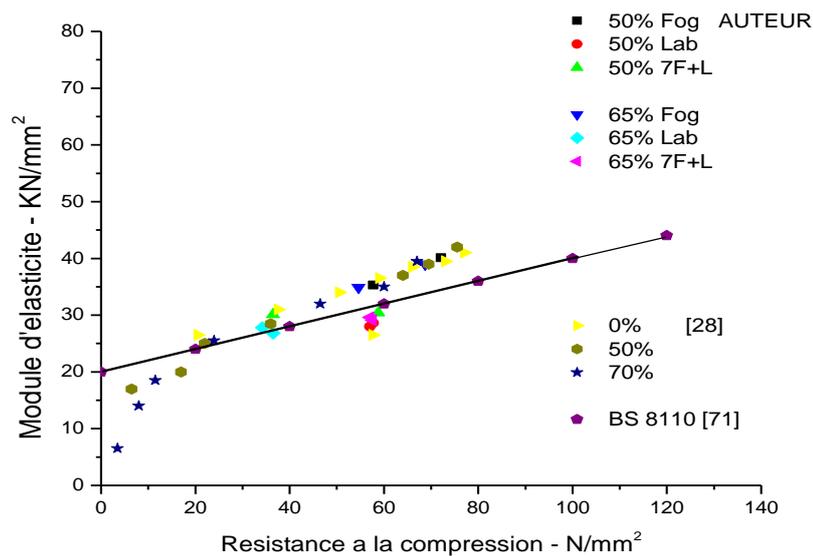


Fig. 3.11 Relation entre le module d'elasticite et la resistance a la compression

3.6 Vitesse du son

Les résultats des essais de la vitesse des ultrasons, sont montrés dans les figures 3.12 et 3.13 et le tableau 3.12 pour 50% et 65% remplacement du laitier. A partir de ces résultats, on peut voir que les éprouvettes traitées sous la condition humide, montrent une augmentation de la vitesse du son supérieure à tous les âges que ceux des autres éprouvettes.

1. 50% substitution

- Les éprouvettes traitées, dans le laboratoire et ceux dans le laboratoire après 7 jours dans la cure humide, montrent une perte de vitesse du son après 36 et 50 jours (voir Figure 3.12), cependant les résistances montrent une augmentation (voir Tableau 3.1)

2. 65% substitution

- Toute l'éprouvette traitée dans le laboratoire et celle traitée à 7 jours dans la condition de cure humide et les jours restant dans le laboratoire, montrent une perte de vitesse du son de nouveau, après 60 et 100 jours (voir Figures 3.13). une perte de résistance est montrée aussi, après 90 jours (voir Figure 3.13).
- Ces résultats informent que la vitesse à l'ultrason est plus sensible à la fissure que la résistance à la compression voir Tableaux 3.1 et 3.12, et figures 3.12 et 3.13.

La relation entre la vitesse du son et la résistance à la compression sont montrée dans les figures 3.14 et 3.15 et le tableau 3.12. A partir du tableau 3.12, on peut voir que la vitesse du son augmente très rapidement que celle de la résistance à la compression.

Au premier jour le remplacement de 50% et 65% de laitier dans le béton a atteint entre 76% et 88% de la vitesse du son de 28 jours pour tous les modes de cure, cependant aux mêmes ages la résistance a atteint seulement entre 8 et 17% de la résistance à 28 jours. La vitesse du son a 7 jours est entre 89 et 98% de la vitesse du son de celle de 28 jours, mais pour la même période, le développement de la résistance est de 66 a 83% de la résistance 28 jours. Il est noté que la vitesse du son au-delà de 28 jours est approximativement de 100%. Ces résultats montrent que la condition de cure humide, l'essai de ultrason ne donne pas une bonne estimation de la résistance à long terme. Cela est du aux faite qu'une large augmentation de la résistance, on a une petite augmentation de la vitesse du son (voir figures 3.14 et 3.15).

Tableau3.12 : Propriété de la Vitesse du son du béton au laitier

Mixes	Age (Jours)	Vitesse KN/Sec			Gain de la vitesse exprimée a 28 jours			Gain de développement de la résistance exprimée en pourcentage a 28 jours		
		N ⁰	Fog	Lab	7F+1	Fog	Lab	7F+1	Fog	Lab
M4	1	3.71	3.90	3.80	82	88	84	17	16	10
M7	1	3.43	3,50	3.52	76	83	80	8	12	13
M4	3	4.25	4.11	4.22	94	93	93	48	62	48
M7	3	3.69	3.60	3.65	82	85	83	44	55	42
M4	7	4.40	4.35	4.38	97	98	97	66	83	70
M7	7	4.20	3.85	3.95	93	91	89	67	80	66
M4	28	4.54	4.44	4.53	100	100	100	100	100	100
M7	28	4.50	4.23	4.42	100	100	100	100	100	100
M4	90	4.67	4.41	4.40	103	99	97	125	117	117
M7	90	4.56	4.00	4.36	101	95	99	125	112	104
M4	180	4.67	3.97	4.36	103	89	96	125	122	125
M7	180	4.68	3.93	4.20	104	93	95	122	107	101

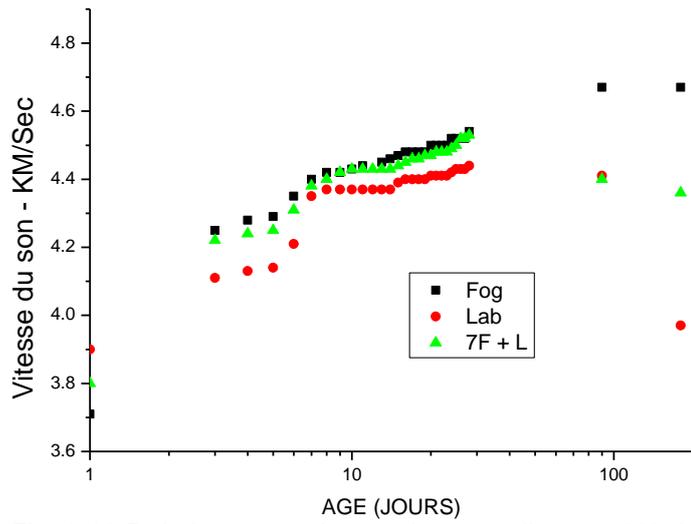


Fig. 3.12 Relation entre vitesse du son et l'age (50% de laitier)

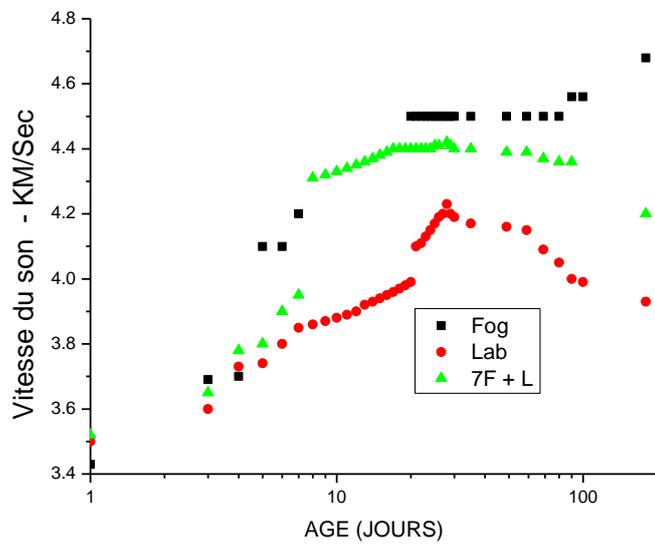


Fig.3.13 Relation entre la vitesse du son et l'age (65% de laitier)

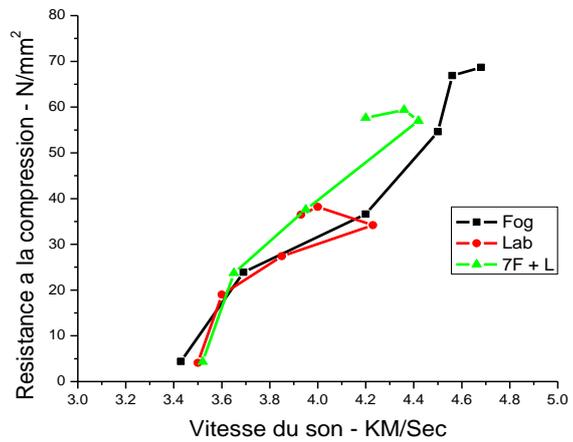


Fig. 3.14 Relation entre la vitesse du son et la resistance a la compression (50% de laitier)

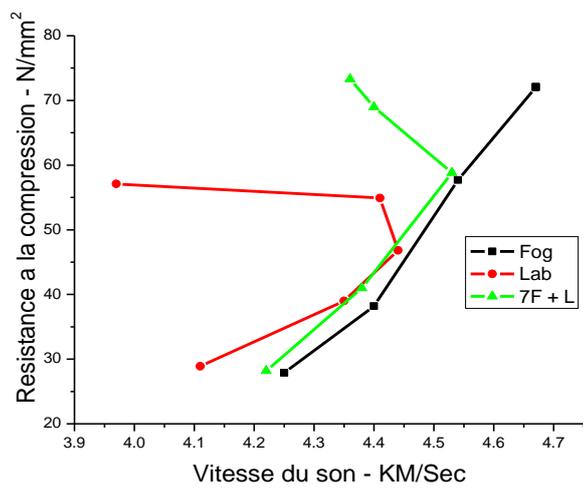


Fig. 3.15 Relation entre la resistance a la compression et la vitesse du son (65% de laitier)

3.7 Retrait et Gonflement

Le changement de l'allongement avec l'age est montre dans les figures 3.16 et 3.17 et dans le tableau 3.13.

A partir de ce tableau, on peut voir que le béton avec 65% remplacement de laitier montre un retrait très grand que ceux avec 65% remplacement jusqu'à 6 mois, cependant, les figures montres que le retrait avec 50% remplacement plus mois se stabilise, cependant l'allure de la courbe de retrait pour 65% remplacement montre une augmentation du retrait. Au jeune age, le béton avec 65% de remplacement montre moins de retrait mais a long terme ce béton peut montrée un retrait plus élevée, ce résultats est le même que les travaux effectues par Banfort comme la rapporte Wainwright [19], lequel a conclut que le béton incorporant 70% de laitier a un tau d'accroissement du retrait moins que ce du béton avec du ciment Portland mais a long terme 9 c'est-à-dire supérieur 14 jours) le taux de retrait est accélère par l'utilisation de laitier, Hogan et Meusel [15] ont aussi conclut que le retrait du béton traites dans environnement sec augment avec l'augmentation du laitier. Sous la condition humide, béton au laitier produit une déformation du au gonflement, la dernière mesure de 65% remplacement montre une expansion deus fois plus que le 50% remplacement approximative; est ça est du probablement a l'absorption de l'eau pour la réaction a long terme, du a la lenteur de la réaction pouzzolane, ce qui résulte par une augmentation du gonflement [12].

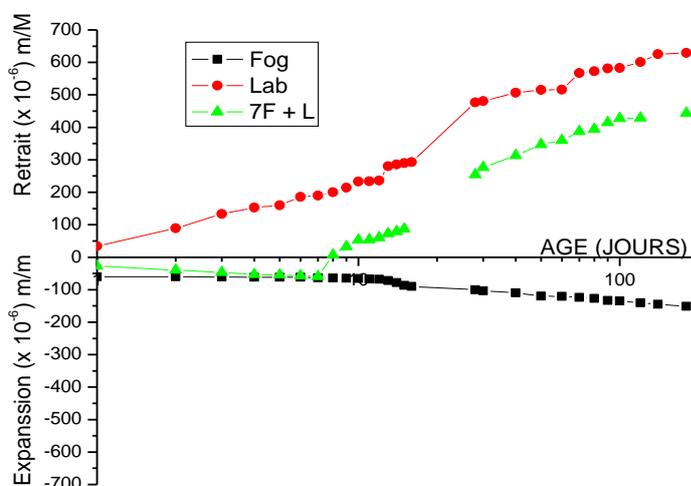


Fig. 3.16 Retrait et gonflement du beton au laitier avec 50% remplacement de laitier

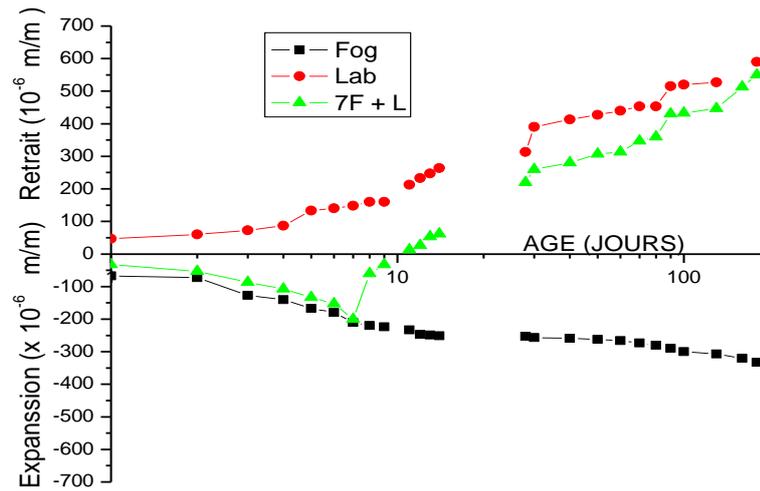


Fig. 3.17 Variation du retrait et du gonflement du beton au laitier avec 65% remplacement de laitier

Tableau 3.13 : Retrait et gonflement du béton au laitier à différents âges

Mixe Mixe	Mode de Cure	Retrait à Différent jours (TEMPS)					Gain du retrait (%)			
		7	14	30	90	180	(4/7)	(5/8)	(6/7)	(7/7)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
M4	Lab	186	286	481	581	629	30	46	77	92
M7	Lab	148	264	390	515	590	25	45	66	87
M4	7L+Lab	59	79	276	415	444	13	18	62	93
M7	7L+Lab	200	62	260	430	550	36	11	47	78
M4	Fog	63	78	103	133	151	42	52	68	88
M7	Fog	210	251	257	290	348	60	72	74	83

*Mixe M4 à un ratio Eau Ciment de 0.43

*Mixe M7 à un ratio Eau Ciment de 0.41

CHAPITRE 4

Quelques Aspects de la Durabilité du Béton de Laitier

4.1 Introduction

L'importance de la durabilité du béton est de lui permettre de résister aux conditions pour lesquelles il a été conçu de manière satisfaisante, sans détérioration et avec une sécurité suffisante. Les défauts dans la structure du béton peuvent être dus à l'environnement auquel le béton est exposé ou à d'autres causes telles que les attaques chimiques ou physiques par des agents agressifs. L'utilisation du laitier comme additif de cémentation augmente la résistance du béton à la réaction du sulfate et de la silice alcaline et la corrosion des armatures. Une grande partie de cette augmentation de la durabilité a été attribuée à la perméabilité réduite, résultant de la taille des pores plus fine.

Lors de l'hydratation du ciment Portland, de grands espaces des pores capillaires sont remplis de produits d'hydratation, et réduisent ainsi la taille de ces grands pores tout en augmentant le volume de gel des pores très fins. L'ajout de laitier dans le béton permet d'affiner la structure des pores par sa réaction avec l'hydroxyde de calcium libéré dans l'hydratation du ciment. En outre, ceci forme des produits d'hydratation secondaires dans le cadre de la pâte de ciment durcie.

L'objectif de ce travail est d'étudier certains aspects de la durabilité du béton en incorporant à la fois du laitier et un super-plastifiant. Ces études sont limitées AUX aspects les plus importants de la durabilité tels que la distribution de la taille des pores, la microstructure, la carbonatation, la résistance à la réaction Alkali silice.

4.2 Porosité

4.2.1 Introduction

Les propriétés mécaniques de la pâte de ciment durci sont largement déterminées par sa structure, en particulier sa porosité et la distribution de la taille des pores. Afin d'étudier le changement significatif des propriétés mécaniques induit par l'incorporation de super plastifiant et de laitier sous trois régimes de durcissement et d'âge, la mesure de la taille des pores dans le solide poreux a été déterminée.

4.2.2 Méthode de porosimétrie au mercure

Cette technique est basée sur le fait qu'un liquide qui ne mouille pas un solide, ne peut s'introduire dans les pores de ce solide qu'en lui appliquant une pression. Mansoor a montré que la quantité de travail, W nécessaire pour forcer un liquide dans les pores de rayon r et de longueur l est proportionnelle à l'augmentation de la surface exposée à ce liquide au niveau de la paroi du pore: Ainsi,

$$W_1 = 2 \pi r l Y \cos \theta \quad (4.1)$$

Où W_1 = Travail nécessaire pour forcer le liquide à entrer dans le pore de rayon r et de longueur l .

r = rayon du pore cylindrique.

y = tension de surface du liquide.

θ = angle de contact entre la surface solide et la paroi du pore

Une pression est nécessaire pour forcer le mercure à entrer dans les pores, si l'angle de contact entre le liquide et la paroi du pore est supérieur à 90° (voir figure 4.1), dans ce cas, le liquide ne mouille pas le solide. Toutefois, si une pression suffisante est appliquée, alors la restriction de tension de surface sera surmontée et le mercure va pénétrer dans les Pores capillaires de la pâte. La quantité de travail utilisée pour forcer un volume de mercure (V) à entrer dans des pores sous pression (P) est donnée par:

$$W_2 = P.V = P \pi r^2 l \quad (4.2)$$

À l'équilibre $W_1 = W_2$

$$\text{Ainsi: } P r = 2 Y \cos \theta \quad (4.3)$$

L'équation (4.3) est connue comme étant l'équation de Washburn, et montre que la pression nécessaire pour remplir un capillaire est inversement proportionnel à son rayon. La technique de porosimétrie au mercure a été décrite par Diamond et Orr. L'équation de Washburn est calculée sur l'hypothèse d'un modèle de pore cylindrique. Toutefois, lorsque ce n'est pas le cas, certaines sources d'erreurs existent, et celles-ci sont examinées dans les sections suivantes.

- 1) types de pores: Si une géométrie des pores autre que celle d'un cylindre droit est utilisée, l'effet sur la courbe de distribution de la taille des pores calculée est le

même que celui de la différence dans les angles de contact. Cela est attribué au mercure piégé dans les pores qui ont la forme d'une bouteille d'encre de l'échantillon. Ce type de pores possède un rayon d'entrée plus petit que celui du pore lui-même, et ne se remplissent que lorsque la pression est suffisamment élevée pour forcer le mercure à passer à travers le col étroit. La quantité de mercure introduite à travers ce type de pores dépend du rayon du cou qui est plus petit que le rayon réel du pore comme le montre la figure 4.2. En outre, il existe des pores qui ont une entrée plus petite que le diamètre minimal des pores pouvant être mesuré (dans cette étude 37°). Ces pores ne peuvent pas être mesurés par la pénétration de mercure.

- 2) Angle de contact: L'angle de contact dépend de la nature de la surface de la pâte de ciment est en réalité très difficile à mesurer. Winslow et Diamond ont utilisé la pâte de ciment durci et ont effectué des mesures directes de la pression nécessaire pour pénétrer 40 pores cylindriques. Ils ont trouvé des angles de contact de 117° pour la pâte séchée au four et 130° pour la pâte séchée et la tension de surface de mercure est de 484 dynes /cm (480×10^3 N/m). Puisque la nature exacte de la variation d'angle de contact décrite par Auskern et Horn, n'est pas connue, il est nécessaire de choisir une valeur unique. La Valeur recommandée par le fabricant de 141.3° a été utilisée tout au long de cette étude.

4.3 Microstructure

4.3.1 Introduction

On croit généralement que la microstructure du béton est l'un des plus importants facteurs régissant le comportement mécanique du béton. Afin de comprendre la nature et les effets du super plastifiant et du laitier sur la résistance du béton, sa microstructure a été étudiée sous trois conditions de durcissement.

Récemment, plusieurs méthodes ont été utilisées dans l'étude de la microstructure. Les plus courantes sont, la microscopie à balayage électronique (MEB), la microscopie optique, la microscopie électronique en transmission (MET), et les rayons X. La première est la plus largement utilisée, et son principe est illustré dans la section 4.6.5.

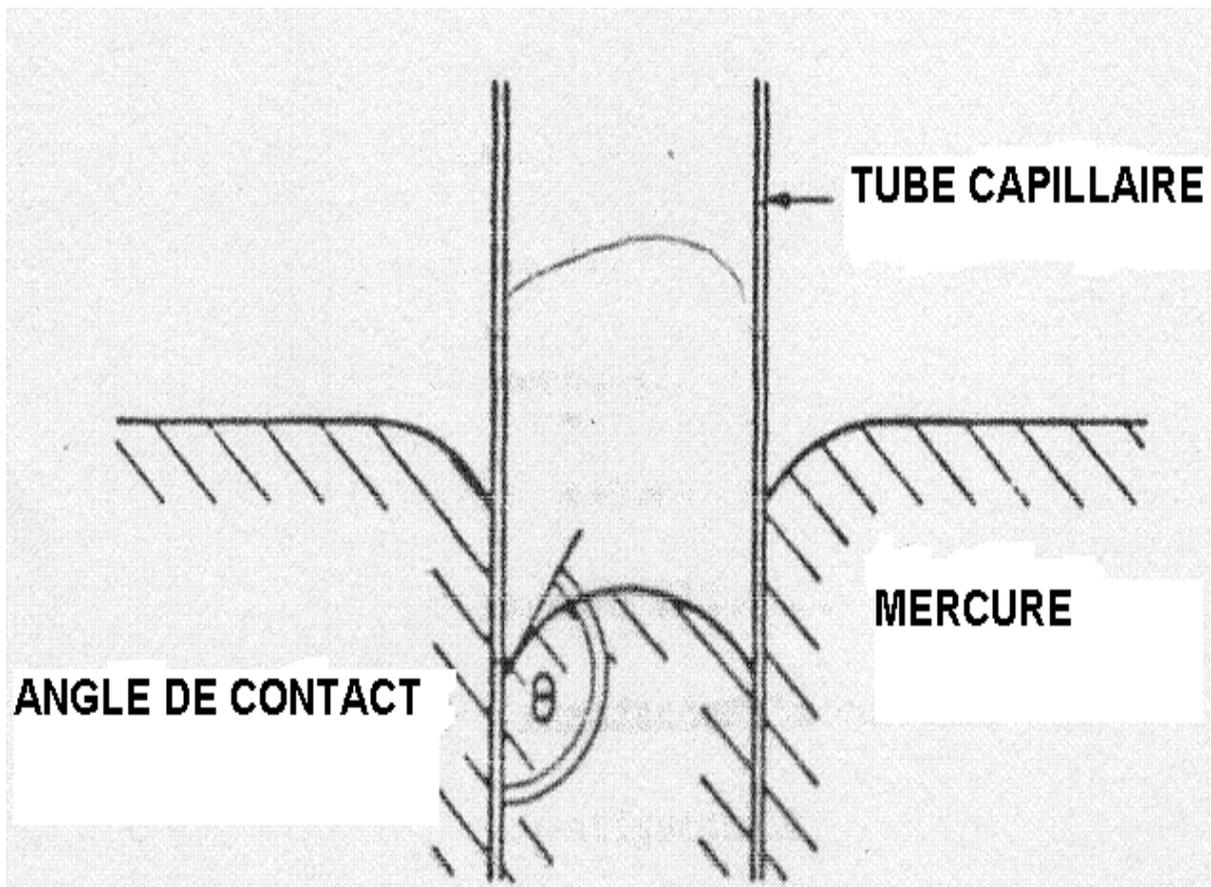


Fig. 4.1 : Dépression capillaire du mercure, montrant angle de contact [73].

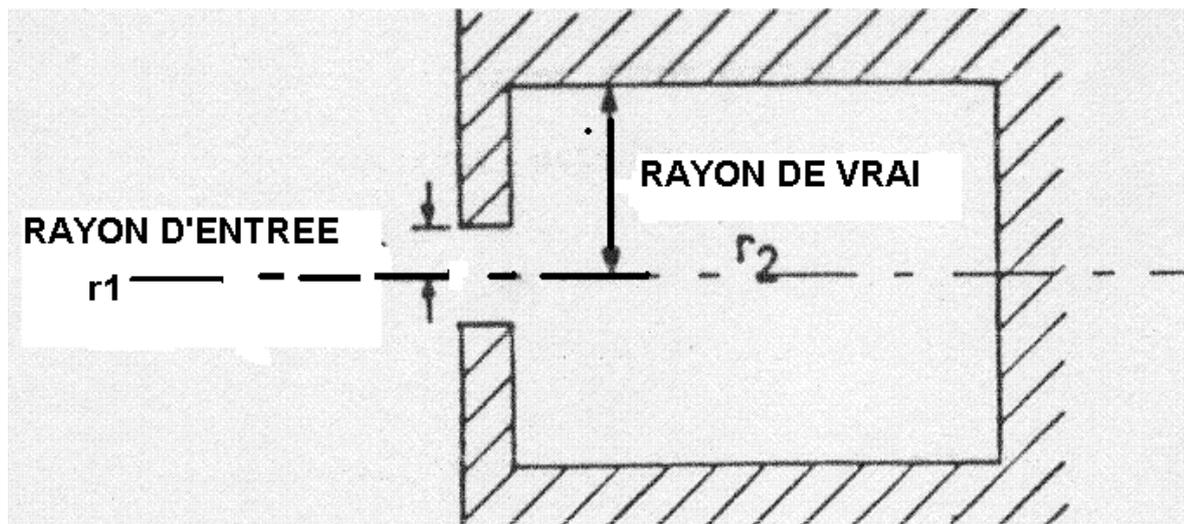


Fig. 4.2 : Représentation schématique du type de pore (Ink-Bottle) [73]

4.4 La carbonatation

Le béton est utilisé depuis longtemps comme matériau structurel dans l'industrie de la construction. Une détérioration précoce dans certaines structures minces en béton exposées à des conditions environnementales extrêmes, telles que les zones fortement industrialisées, ont accru les doutes dans le monde entier à propos de la durabilité des structures en béton. Le taux de corrosion de l'armature en acier coulé dans le béton est fortement influencé par des facteurs environnementaux et autres. L'oxygène et l'humidité doivent être présents si une corrosion électrochimique se produit; le béton armé, ayant un gradient importante de la teneur en ions de chlorure, est vulnérable à la corrosion macrocell, surtout lorsqu'elle est soumise à des cycles de mouillage et de séchage. D'autres facteurs pouvant affecter le niveau de corrosion sont des hétérogénéités dans le béton et l'acier, le pH de l'eau des pores du béton, la carbonatation de la pâte de ciment Portland, les fissures dans le béton, les proportions de mélange et la profondeur de la couverture en acier.

L'utilisation du laitier en tant que constituant du béton pour augmenter la résistance du béton à l'attaque du sulfate, à la corrosion de l'armature, et à la réaction alcali silice a été discutée dans le chapitre 1 ; l'augmentation de la durabilité en raison de l'utilisation du laitier a été attribuée à la perméabilité réduite, résultant de la structure poreuse plus fine, et la réduction du contenu d'hydroxyde de calcium facilement lessivé ou réactif contenu dans la fraction de la pâte de ciment durci. L'incorporation de laitier dans le béton permet d'affiner la structure des pores par la réaction de l'hydroxyde de calcium libéré lors de l'hydratation du ciment et la silice amorphe du laitier. En plus, ceci forme de produits d'hydratation secondaires dans le cadre de la pâte de ciment durci.

L'acier est protégé contre la corrosion par "passivation". La raison en est que l'hydratation produit l'hydroxyde de calcium, et également les oxydes de sodium et de potassium, donne au béton une haute nature alcaline avec un pH de 13 et plus en présence de ce milieu alcalin. La corrosion des armatures dans le béton est empêchée par la formation rapide d'un film mince d'oxyde de fer sur la surface du métal qui le rend passif. Ce film passivant peut être détruit par le processus de carbonatation.

Cette section concerne principalement le processus de carbonatation du béton de laitier, le but principal est d'étudier l'effet de trois régimes de durcissement sur la carbonatation en présence de laitier et de super plastifiant.

4.4.1 Processus de carbonatation

Quand le dioxyde de carbone se propage dans le béton, il se combine avec l'eau formant de l'acide carbonique qui attaquera ensuite l'hydroxyde de soude, le sodium, le potassium et le calcium pour former du carbonate. Le processus de carbonatation est généralement considéré comme étant l'appauvrissement de la couche d'hydroxyde de calcium de la matrice de pâte, en raison de la forte concentration d'hydroxyde dans le béton. La réaction qui se produit peut être représentée sous une forme simplifiée comme suit.



Ces réactions provoquent une réduction de l'alcalinité du béton et entraînent la corrosion de l'acier. Le véritable processus de carbonatation n'est pas facile à comprendre car il ne dépend pas uniquement des propriétés du béton, mais aussi du milieu dans lequel se trouve le béton. La profondeur du front de carbonatation peut être mesurée par différentes méthodes:

1. Par analyse thermogravimétrie,
2. Par analyse chimique,
3. Par un test de phénophtaléine,

Ce dernier est le test le plus simple et le plus répandu, et est effectuée par pulvérisation d'une surface fraîchement brisée de béton avec un mélange d'eau de phénophtaléine et d'alcool éthylique. Le test mesure la profondeur à laquelle l'hydroxyde de calcium a été appauvri, et dans cette région, le pH est voisin de 9. Pour les zones où le pH est supérieur à 9.2, la phénophtaléine vire au rose.

4.5 La réaction d'alcali silice (RAS)

Depuis 1940, quand Stanton a découvert la destruction du béton par la réaction alcali silice, il y a eu beaucoup de recherches sur ce sujet. La réaction Alkali silice (RAS)

n'était pas considérée comme un problème au Royaume-Uni jusqu'à récemment. Les granulats utilisés dans la fabrication du béton étaient jugés insensibles et invulnérables à une telle réaction conduisant à l'expansion perturbatrice et la détérioration consécutive du béton dans lequel des granulats ont été utilisés. Depuis 1976, cependant, plus d'une centaine de cas de RAS ont été identifiés, créant souvent de graves dommages structurels et nécessitant non seulement d'importantes travaux complémentaires visant à préserver la sécurité et la stabilité des structures concernées, mais aussi dans certains cas, le remplacement partiel. Cette situation a stimulé la recherche dans la compréhension du mécanisme de la RAS, et en particulier, sur ses effets sur le matériau et le comportement des structures de béton, et sur les méthodes de lutte contre une telle détérioration. L'utilisation du béton de laitier comme ajout cimentaire pour augmenter la résistance du béton à la réaction alcali silice a été discuté au chapitre 1.

Bien que des recherches approfondies ont été menées sur le mécanisme de la RAS aussi bien au Royaume-Uni qu'à l'étranger, les informations disponibles sur l'effet de la RAS sur les propriétés mécaniques du béton sont très limitées. Cette section présente une étude systématique sur l'effet de la RAS sur les propriétés mécaniques du béton de laitier telles que la résistance à la compression et à la flexion, et la vitesse des impulsions ultrasonores.

4.6 Programme expérimental.

4.6.1 But de cette étude

L'objectif principal de cette partie de recherche est d'étudier l'effet de la condition de cure sur la distribution de la taille des pores, de la microstructure, et la carbonatation du béton contenant du laitier. En outre, cette section présente également des données sur l'effet du laitier sur l'expansion et les propriétés physiques du béton lorsqu'il est soumis à la réaction alcali silice.

4.6.2 Type de mélange, Taille des éprouvettes et Fabrication

Les éprouvettes utilisées pour la porosité, la microstructure et la carbonatation étaient les mêmes que celles utilisées pour le test de flexion, à savoir 100 x 100 x 500 mm. Le programme expérimental exécuté pour la réaction Alcali-silice consistait en:

1-Série Test 1 RAS + 50% de laitier de remplacement

2- Série Test 2 RAS + 65% de laitier de remplacement

La proportion du mélange de béton utilisé tout au long de cette étude a été (1:1.8:2.5:0.43) et (1:1.7:2.4:0.40) (ciment + laitier:sable:granulats:eau) en poids pour respectivement 50% et 65% de laitier de remplacement. Les mélanges de béton avaient la teneur en ciment de 400kg/m^3 et 420kg/m^3 , et le béton avait une alcalinité de 2kg/m^3 et 1.5kg/m^3 pour respectivement 50% et 65% de laitier de remplacement. Le type de mélange de béton utilisé pour le test de réaction alcali silice était similaire au mélange décrit précédemment dans la section 2.5.1. Les granulats réactifs étaient un verre de silice amorphe qui a servi à remplacer les granulats fins d'une proportion égale à 15% du poids total des granulats. Le verre de silice a été ajouté à la fin du processus de mélange et ce dernier a été poursuivi pendant environ une minute jusqu'à ce qu'un bon mélange homogène soit obtenu. Les résultats de la baisse pour les deux séries de tests 1 et 2 sont indiqués au Tableau 4.1.

Les éprouvettes utilisées pour la réaction alcali-silice comportaient: six $75 \times 75 \times 300$ mm utilisés pour mesurer le degré de dilatation due à la RAS et huit prismes de $100 \times 100 \times 500$ mm utilisés pour trouver le module de rupture et la vitesse des impulsions et pour l'examen des fissures. Ces prismes ont également été utilisés pour les tests de cube modifiés.

Les éprouvettes ont été démoulées environ 24 heures après le coulage, puis les deux séries du test 1 et 2 ont été placées pendant 2 semaines dans le laboratoire, couvertes de feuilles de polyéthylène. Ceci a été suivi par 2 semaines en chambre de brouillard à $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ et $95 \pm 5\%$ RH. Elles ont ensuite été déplacées, après 28 jours de la coulée, dans la chambre chaude à une température contrôlée maintenue à 38°C et ont été couvertes avec des sacs mouillés. Les éprouvettes dans la chambre chaude ont été régulièrement humidifiées, puis recouvertes de nouveau par les sacs mouillés pour maintenir l'humidité dans les éprouvettes. Les deux séries d'épreuves 1 et 2 ont été transférées de la pièce chaude au laboratoire à l'expansion de 0.3% et 0.2% pour respectivement 50% et 65% de laitier de remplacement, pendant environ 2 mois, après quoi elles ont été ramenées à la pièce chaude jusqu'à la fin du test.

Tableau 4.1 : Détails du mélange

Séries de tests	Affaissement (mm)	Super plastifiant* (%)
50 % de laitier	100	2
65% de laitier	75	2

* En poids de la teneur totale de ciment (laitier + ciment)

4.6.3 Détails des tests

Les tests sur la porosité, la microstructure, et la profondeur de la carbonatation du béton de laitier ont été effectués comme suit:

- 1) La porosité à 28 jours et 6 mois.
- 2) La Microstructure à 6 mois.
- 3) La carbonatation à 3 mois et 6 mois.
- 4) Pour la réaction alcali silice jusqu'à 0.3 pour cent d'expansion.

Les tests de résistance à la compression et de flexion ont été effectués à 0.1%, 0.2%, et 0.3% d'expansion. L'expansion et la vitesse des impulsions ont été mesurées régulièrement pendant environ 8 mois après que la lecture ait été prise une fois par week-end.

4.6.4 Appareillage, Préparation de l'échantillon et procédure de test

a) Appareils pour la mesure de la taille de distribution des pores

Le prosimètre de la série Carlo Erba 2000 a été utilisé pour cette étude. Cet instrument a été en mesure d'enregistrer le volume cumulé introduit par le mercure automatiquement et la pression a été graduellement augmentée, passant de 1 à 20 kg/cm². Il est représenté schématiquement à la figure 4.3. L'appareil peut être divisé en trois parties: Le multiplicateur de pression, le dilatomètre et l'autoclave. Au début, la pompe est à une pression basse: la pompe fournit l'huile au multiplicateur de pression, qui amplifie la pression par un facteur 100 et l'envoie à l'éthanol; plus tard, il est passé à l'autoclave où il pressurise le mercure contenu dans un dilatomètre en verre. La fonction de l'appareil commence par l'abaissement de la tige avec l'aide du moteur électrique qui fait tourner un arbre vissé. Lorsque le contact est établi entre la tige et le mercure dans la

colonne du dilatomètre, un circuit électrique, transversal passant par le mercure, est complété, en ce moment le moteur s'éteint automatiquement et la pompe est en marche en augmentant la pression du mercure. Lorsque la pression aura augmenté, le niveau du mercure dans la colonne du dilatomètre va diminuer en raison de la pénétration du mercure dans l'échantillon. Après cette étape, le contact électrique entre la tige et le mercure sera perdu, la pompe s'arrête et la lecture de la pression est prise. Puis le moteur est mis en marche, par l'abaissement de la tige afin d'atteindre le mercure. Ce cycle se répétera jusqu'à ce que la pression maximale de 20 kg/cm^2 soit atteinte. L'assemblage de la tige de contact est calibré de façon qu'il puisse enregistrer un mouvement de 0.1 mm de niveau du mercure; Le diamètre d'alésage de la colonne est 03 mm, la pression est calibrée en kg/cm^2

b) **Procédure de test**

L'échantillon utilisé pour mesurer la distribution des pores était extrait du prisme de béton de 100 x 100 x 500 mm après le test de flexion; la très petite quantité du poids total entre 1 et 2 grammes a été utilisée après avoir pris grand soin de se débarrasser des particules de granulats. Toutes les éprouvettes pour mesurer les micropores ont été pesées et placées dans un four à 105° C pendant au moins cinq jours pour permettre à toutes les eaux évaporables d'être éliminées. L'échantillon séché était ensuite pesé et placé dans un dilatomètre en verre. Le dilatomètre fut alors rempli de mercure sous vide, avec l'échantillon totalement immergé dans le mercure et le vide a ensuite été libéré.

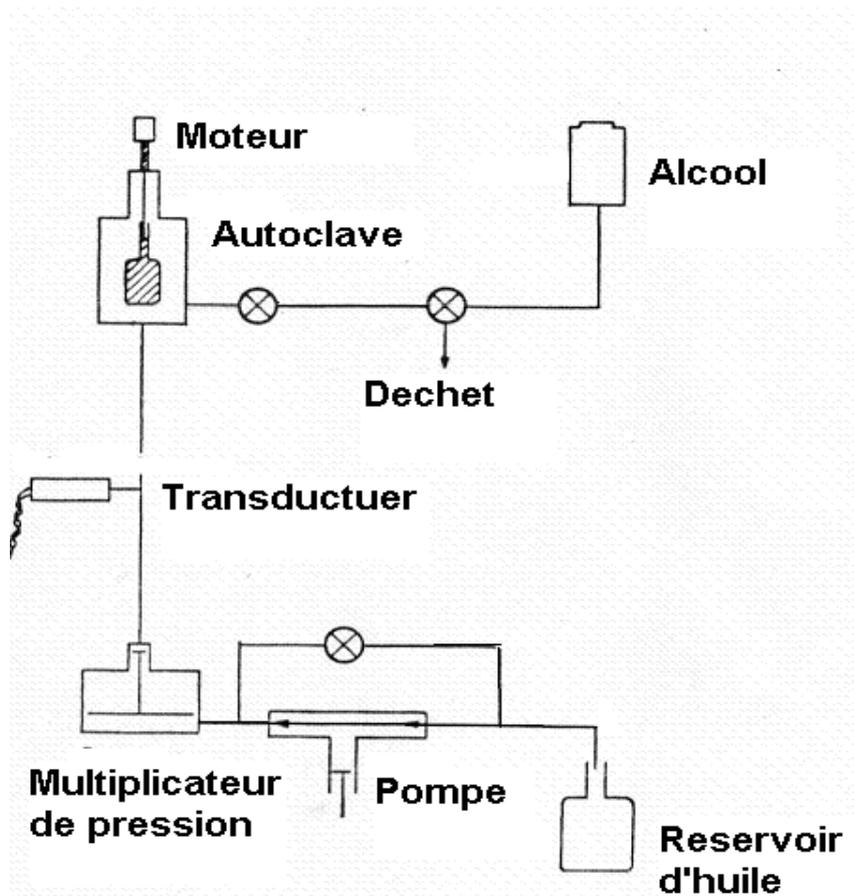


Fig. 4.3: Représentation schématique du porosimètre à mercure

4.6.5 Microscope à balayage électronique (S.E.M)

Le principe du microscope à balayage électronique est illustré dans la figure 4.4. Un faisceau d'électrons très limité accéléré à partir de filaments passe à travers des lentilles électroniques, D1, D2, D3 et sera concentré sur la surface d'un échantillon solide sous la forme d'une tache carrée, semblable à celle de la tache sur un écran de télévision commerciale. L'incidence du faisceau d'électrons sur la surface de l'échantillon provoque l'émission d'électrons secondaires. Ces électrons butent contre un capteur, et le courant qui en résulte est amplifié et utilisé pour moduler la luminosité du tube cathodique, par conséquent, une image de la surface de l'échantillon se met progressivement en place et offre une image (micrographie) de la disposition des particules sur l'écran du tube cathodique, comme une image de télévision. Puisque ce microscope est équipé d'une caméra, l'examen s'effectue généralement sur les enregistrements photographiques de l'écran. L'appareil offre un certain nombre d'avantages. Il possède une large gamme d'agrandissement (de 20 à 100000X), une résolution élevée (jusqu'à 3 nm) et accepte une

profondeur de champ (jusqu'à plusieurs mm) ce qui le rend possible de voir simultanément les grosses et les petites particules. La préparation des éprouvettes pour l'analyse SEM est assez simple. L'échantillon peut être sous la forme d'un cube d'environ 10 mm de côté. Le modèle utilisé dans la présente enquête est un Philips PSEM 500 montré à la figure 4.5.

a) **Procédure de test pour M.E.B**

L'échantillon utilisé pour mesurer la microstructure est extrait du prisme de béton de 100 X 100 X 500 mm après le test de résistance à la flexion, et possède une dimension approximative de 1cm x 1cm x 1cm. L'échantillon obtenu, est monté sur des gaines convenables par l'utilisation d'un composé d'étanchéité Apiezon parce que le béton n'est pas conducteur. Une bonne mise à la terre pour toutes les parties de la surface de l'échantillon est nécessaire pour les empêcher de se charger et d'augmenter l'émission d'électrons lorsqu'il est bombardé par le faisceau d'électrons. Ceci est réalisé en recouvrant la surface entière par de l'or-palladium sous vide pour obtenir un passage électrique entre la couche conductrice et la gaine, les rebords ont été peints avec une peinture d'argent à séchage rapide agar. La gaine contenant échantillon est ensuite placée dans la streoscan et est prêt pour l'examen. L'observation visuelle s'effectue d'abord à faible agrandissement, généralement 40x, de sorte que la structure d'ensemble du tissu pourrait être vue. Quelques caractéristiques ont ensuite été visualisées à agrandissement plus important, en le doublant à chaque fois, jusqu'à ce que l'image sorte du foyer (généralement pour un agrandissement de plus de 2500 et 5000X). Lorsque cela est jugé approprié, les micrographes sont photographies.



Fig. 4.4 Représentation du microscope électronique MEB [81]

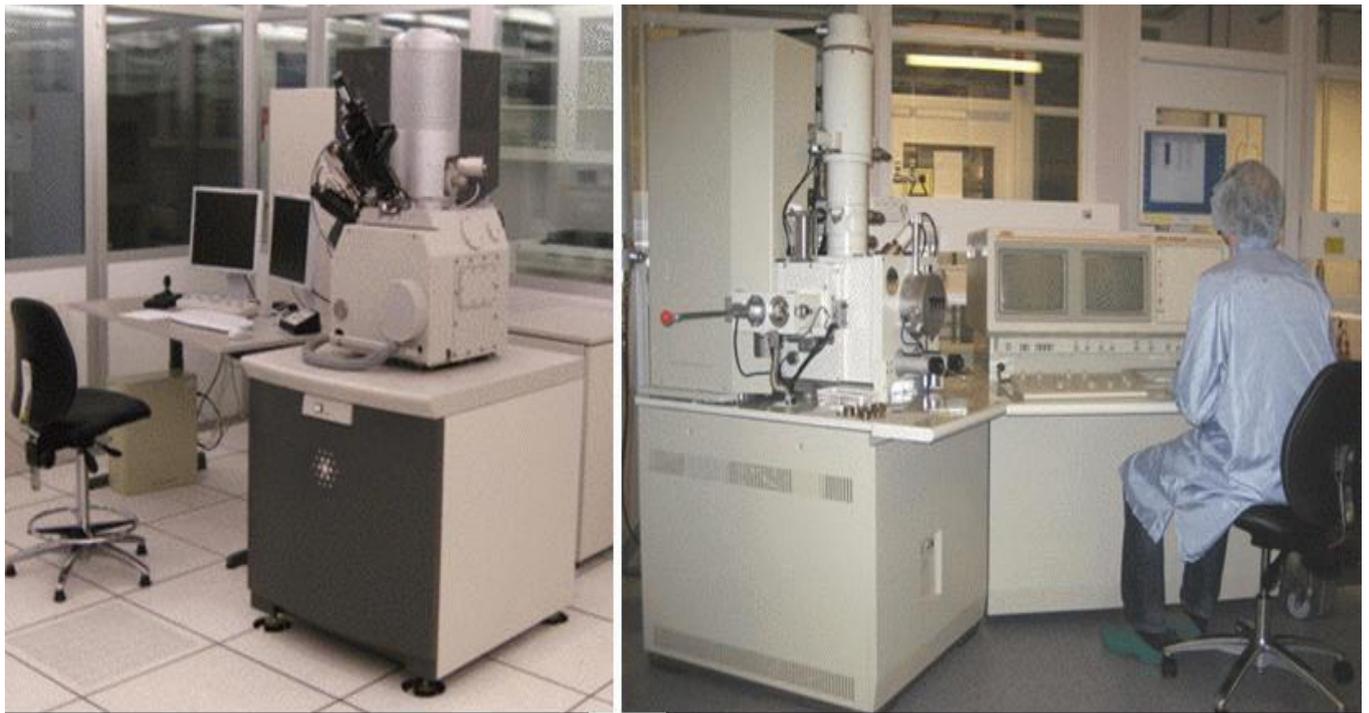


Fig. 4.5 : Microscope électronique utilisé pour les essais de microstructure du béton au laitier [81]

L'échantillon obtenu, est monté sur des gaines convenables par l'utilisation d'un composé d'étanchéité Apiezon parce que le béton n'est pas conducteur. Une bonne mise à la terre pour toutes les parties de la surface de l'échantillon est nécessaire pour les empêcher de se charger et d'augmenter l'émission d'électrons lorsqu'il est bombardé par le faisceau d'électrons. Ceci est réalisé en recouvrant la surface entière par de l'or-palladium sous vide pour obtenir un passage électrique entre la couche conductrice et la gaine, les rebords ont été peints avec une peinture d'argent à séchage rapide agar. La gaine contenant échantillon est ensuite placée dans la streoscan et est prêt pour l'examen. L'observation visuelle s'effectue d'abord à faible agrandissement, généralement 40x, de sorte que la structure d'ensemble du tissu pourrait être vue. Quelques caractéristiques ont ensuite été visualisées à agrandissement plus important, en le doublant à chaque fois, jusqu'à ce que l'image sorte du foyer (généralement pour un agrandissement de plus de 2500 et 5000X). Lorsque cela est jugé approprié, les micrographes sont photographiés.

b) Méthode de test pour la carbonatation

À la fin du test de retrait pour chaque condition de durcissement, trois prismes ont été testés pour la résistance à la flexion, la profondeur de carbonatation et la résistance de cube modifié. Les tests de carbonatation ont été effectués à la surface exposée, du prisme fraîchement brisé par pulvérisation avec de la phénophtaléine à 2% dans 70% d'alcool éthylique, tel que recommandé par Rilem [80]. La distance entre la surface extérieure du béton et le début de la coloration du béton a été mesurée comme profondeur de la carbonatation, 40 mesures ont été effectuées sur les quatre faces de chaque prisme brisé, et avec trois prismes, la profondeur de carbonatation était la moyenne de 120 lectures.

4.7 Résultats du test et de discussion

4.7.1 Structure des pores du laitier

Le test de porosimétrie par introduction de mercure a été effectué pour savoir comment la répartition de la taille des pores est affectée par des conditions différentes de durcissement. Les mortiers composés de CPA (ciment portland artificiel), de laitier et de super plastifiants ont été testés à deux niveaux de remplacement et soumis à trois régimes de durcissement. La distribution de la taille des pores a été déterminée à 28 et 180 jours. Pour chaque mélange au moins trois échantillons ont été testés. Les courbes de distribution de la taille des pores expérimentales sont présentées comme les courbes de distribution de la taille des pores cumulés. Le volume poreux cumulé de l'introduction de mercure est porté en ordonnée, et l'abscisse est marquée dans les échelles logarithmiques du rayon de pores. Les figures de 4.6 à 4.10 montrent le volume de pores cumulé pour laitier/CPA avec 50% de laitier de remplacement sous l'effet de trois régimes de durcissement, à 28 et 180 jours. Les figures 4.11 à 4.15 représentent le volume poreux cumulé pour laitier/CPA avec 65% de laitier de remplacement sous l'effet de trois conditions de durcissement, à 28 ans et 180 jours. Les figures, 4.16 à 4.18 représentent le volume poreux cumulé pour laitier/CPA avec 50 et 65% de laitier de remplacement sous les divers régimes de durcissement, à 180 jours. On peut voir à partir de figures 4.6 à 4.8 et 4.11 à 4.13 que le volume total introduit diminue avec le temps dans toutes les éprouvettes durcies dans la chambre de brouillard. Toutefois, les éprouvettes durcies dans le laboratoire et 7 jours dans la chambre humide + de laboratoire ont montré une relative augmentation de la porosité avec le temps (voir figures 4.9, 4.10 4.14, et 4.15) pour

respectivement 50% et 65% de remplacement. Presque toutes les éprouvettes durcies dans la chambre de brouillard ont montré une augmentation de la porosité à 28 jours, mais la différence est devenue inférieure à 180 jours (voir figures 4.8 et 4.13). D'autre part, les éprouvettes durcies en laboratoire et celles qui ont été transférés au laboratoire après sept jours de brouillard de durcissement ont montré une plus faible porosité à 28 jours alors que la différence de la porosité est devenue considérable à 180 jours (voir figures 4.9, 4.10 et 4.14, 4.15). A partir de ces résultats, il peut être établi que les éprouvettes durcies dans le laboratoire ont été les plus touchées: ce fut principalement causé par un manque d'eau produisant l'hydratation, et une forte proportion de laitier. La figure 4.16 montre le volume poreux d'éprouvettes durcies dans la chambre humide, avec deux niveaux de remplacement de 50% et 65% de laitier de remplacement. On peut constater que la porosité des éprouvettes laitier/CPA durcies dans la chambre de brouillard avec 50% de laitier de remplacement est plus petite que celle à 65% de laitier de remplacement, et, la différence en porosité n'est pas significative. La fig. 4.17 montre les éprouvettes durcies dans le laboratoire avec 50% et 65% de laitier de remplacement, on peut constater que les 65% de laitier de remplacement montrent une porosité plus élevée que celles de 50% de laitier de remplacement. Ces résultats concordent avec le fait que, dans le cas d'un taux de remplacement élevé, la chaux produite par l'hydratation de ciment portland normal n'est pas suffisante pour réagir avec la quantité excessive de matériau de remplacement, ce qui donne lieu à une augmentation du volume total poreux introduit. Cette augmentation de la porosité conduit à la diminution de la force comme le montre le tableau 4.1. La fig. 4.18 montre le volume des pores des éprouvettes transférées au laboratoire après sept jours dans la chambre de brouillard. De ces données, on peut constater que les 65% de laitier de remplacement montrent une porosité plus élevée que celle de 50% de laitier de remplacement. En général, le volume poreux total augmente avec l'augmentation du laitier de haut fourneau. L'augmentation de la porosité devient plus prononcée lorsque l'échantillon est soumis à un durcissement à l'air libre; la distribution globale est déplacée vers les tailles des pores plus fins quand l'échantillon est durci pendant de longues périodes dans une chambre de brouillard. Les Fig. 4.6 à 4.17 montrent que le volume des pores est concentré dans la taille des pores dans la gamme 37-400 Å°. Ces pores augmentent généralement avec l'augmentation du laitier

remplacement. D'après le tableau 4.1 et les figures 4.6 à 4.18, on peut constater que la force augmente avec la diminution de la porosité et diminue lorsque cette dernière augmente. Ceci est prévu car les deux paramètres dépendent de l'hydratation du ciment. La relation est cohérente dans l'ensemble de la gamme d'âge et des régimes de durcissement. Pour les laitier/CPA durcis dans la chambre de brouillard, il y a une augmentation de la résistance avec une diminution de la porosité tout au long de la gamme d'âge testée dans cette étude. Cette augmentation est provoquée par l'hydratation du ciment. Lorsque le ciment Portland est hydraté, les grands espaces des pores capillaires se remplissent de produits d'hydratation, entraînant ainsi la diminution de la taille de ces grands pores et en même temps l'augmentation du volume des pores de gel très fins. L'ajout de matériaux cimentaires permet ainsi d'affiner la structure des pores par réaction avec de l'hydroxyde de calcium (CH) libéré dans l'hydratation du C3S et du C2S dans le ciment portland. Formant ainsi ou des produits à base de ciment (CSH) additionnels ou secondaires dans le cadre. Le remplacement de 50% a montré une résistance plus importante et une porosité plus faible que celle de laitier de remplacement de 65% pendant tout le test et l'âge, ce qui indique la présence d'une quantité suffisante d'hydroxyde de calcium dans les 50% de laitier de remplacement. On peut voir d'après le tableau 4.1 et figure 4.15 que l'augmentation de la résistance pour les 50% est due à la porosité plus faible comparée à celle des 65% de laitier de remplacement. Le béton de laitier durci pendant 7 jours en chambre de brouillard a montré une plus grande force que celui durci dans le laboratoire continuellement ainsi qu'une plus faible porosité et ce fait montre le bénéfice qu'on peut tirer d'un durcissement humide initial.

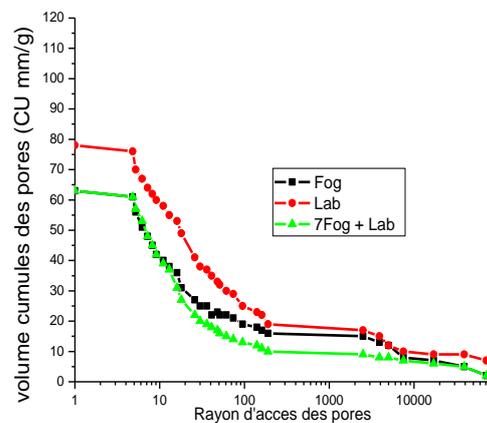


Fig.4.6. Distribution de la taille des pore a 28 jours avec 50% de substitution de laitier

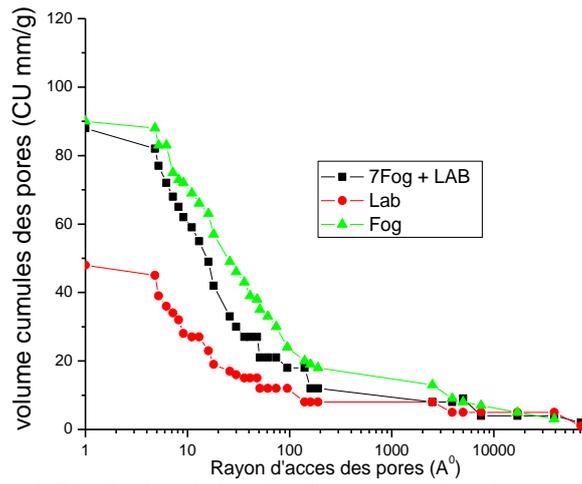


Fig. 4.7 Distribution de la taille des pores a 6 mois avec 50% de substitution de laitier

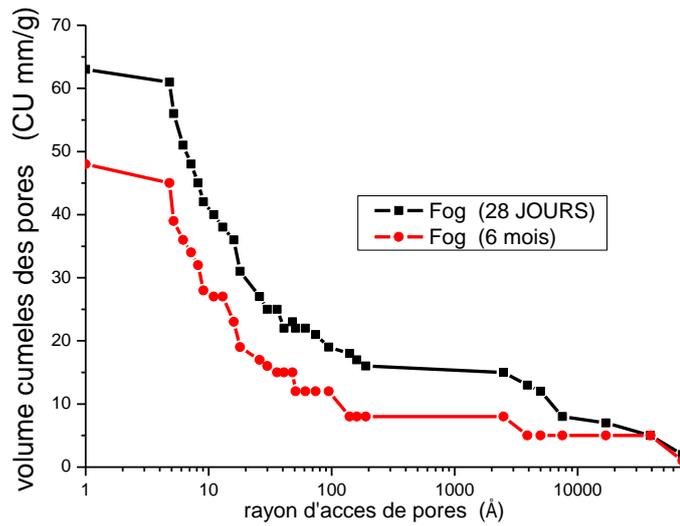


Fig. 4. 8 Distribution de la taille des pores. cure dans la chambre humide avec 50 % de substitution de laitier

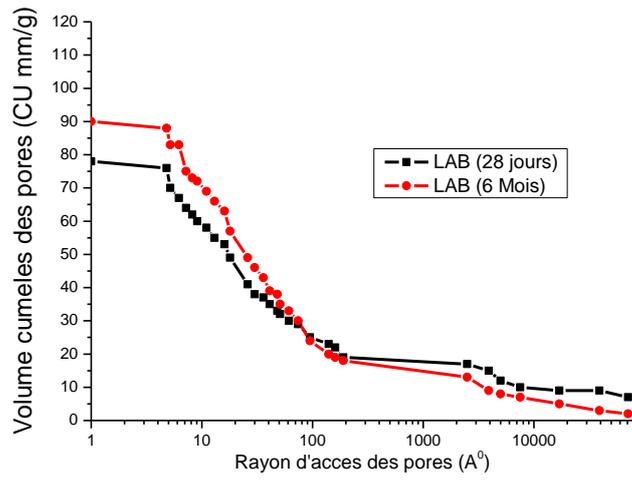


Fig. 4. 9 . Distribution de la taille des pores avec 50% de substitution de laitier.

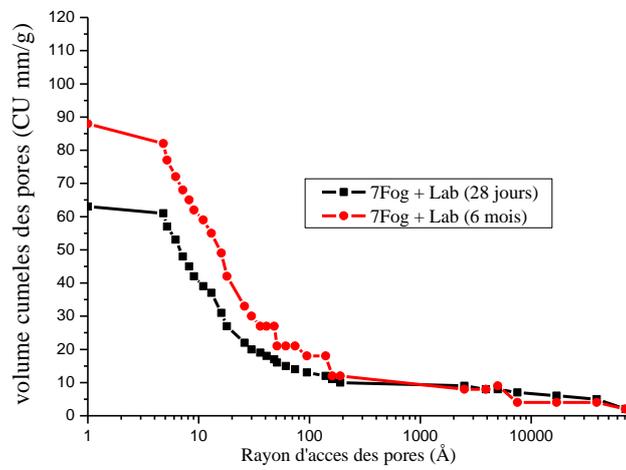


Fig.4 10 . Effet du sechage sur la structure des pores avec 50% de substitution de laitier.

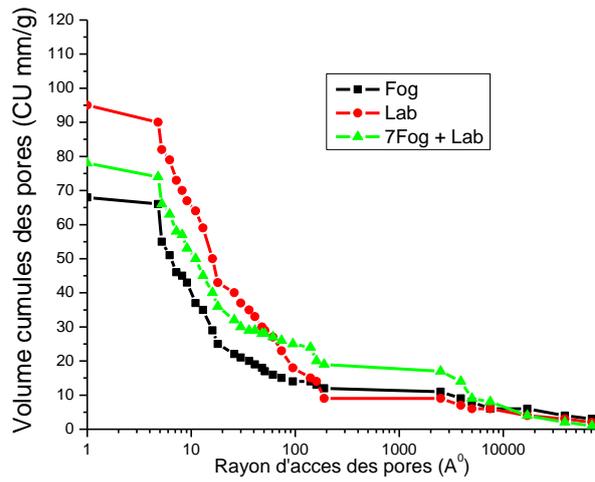


Fig. 4.11 Distribution de la taille des pores a 28 jours avec 65% de substitution de laitier

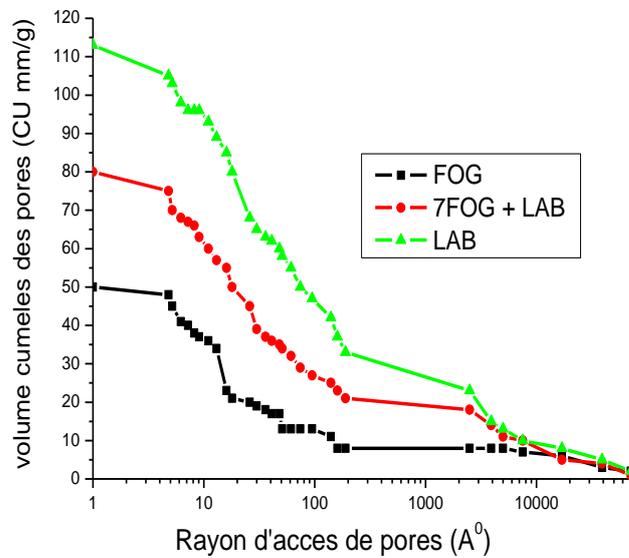


Fig. 4. 12. Effet du sechage sur la distribution de la taille des pores a 6 mois avec 65% de substitution de laitier.

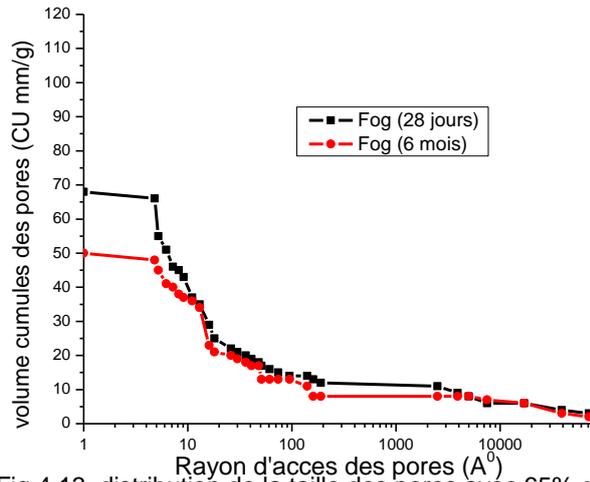


Fig.4.13. distribution de la taille des pores avec 65% de substitution de laitier.

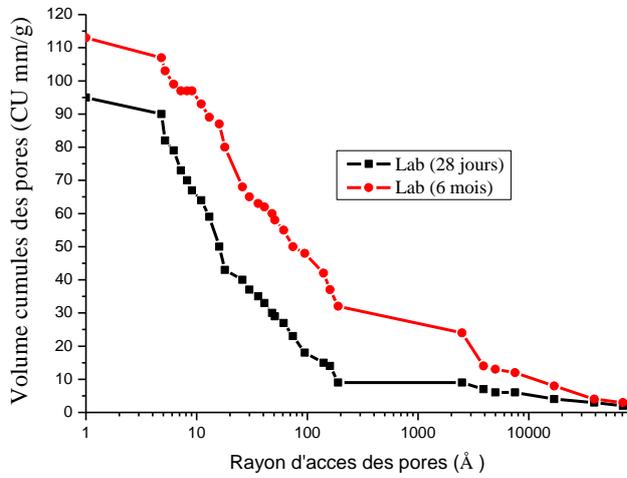


Fig. 4.14. Effet se sechage sur la distribution des tailles des pores a 28 jours et 6 mois avec 65% de substitution de laitier.

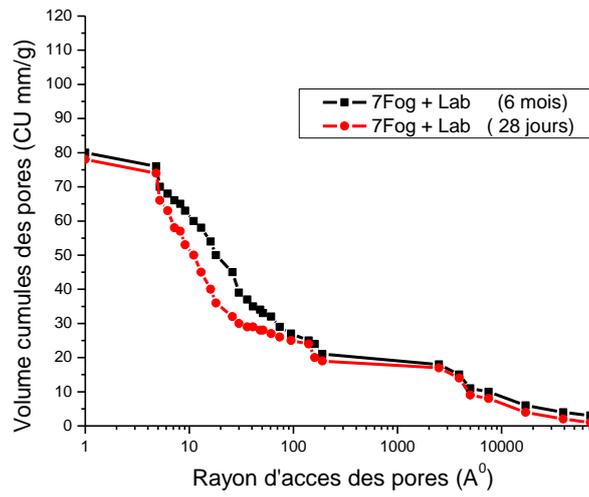


Fig. 4.15. Distribution de la tailles des pores avec 65% de substitution de laitier.

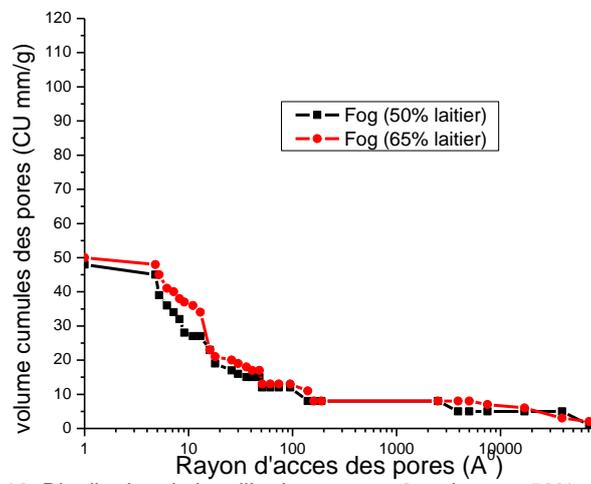


Fig. 4.16. Distribution de la taille des pores a 6 mois avec 50% et 65% de substitution de laitier.

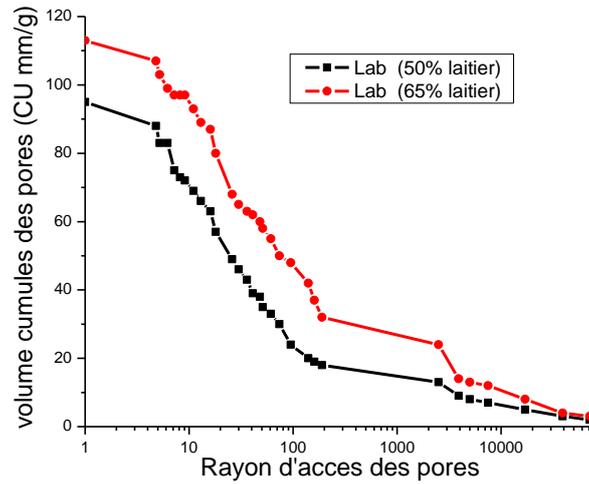


Fig. 4.17. Distribution de la taille des pores a 6 mois avec 50% et 65% de substitution de laitier.

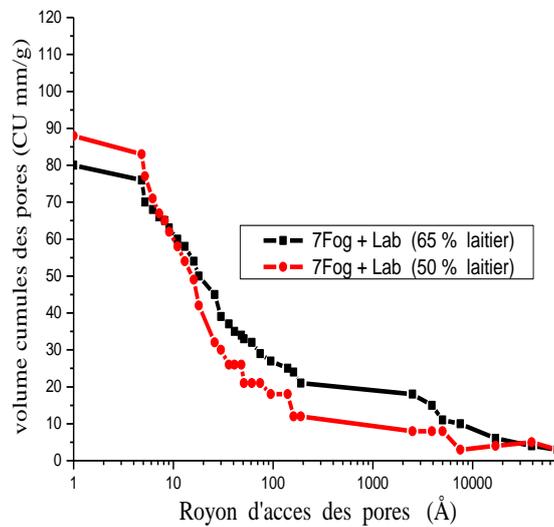


Fig. 4.18 Effet de la cure a l'eau sur la distribution des pores pour 50% et 65% a 6 mois

4.7.2 Microstructure

La microscopie à balayage électronique (MEB) a été utilisée pour étudier la microstructure du béton contenant du laitier et du super plastifiant sous les trois régimes de séchage. Les sections fissurées des prismes de béton ont été examinées par MEB à environ 6 mois. Il est souligné que ce n'est qu'une étude préliminaire. Au moment où les

études ont été menées, l'emplacement des microscopes a été changé. Par ailleurs le système EDAX était également hors service. Il n'était donc pas possible de tirer pleinement parti des études de MEB, néanmoins, les résultats, bien qu'insuffisants, sont conservés pour une exploitation future.

a) La chambre humide

La texture typique du béton de laitier durci dans la chambre de brouillard et contenant 50% et 65% de laitier de remplacement est montrée dans les figures de 4.1 à 4.6 pour 50% et 65% de laitier de remplacement, la microstructure a été jugée plus compacte et dense de texture. Cela a été confirmé par les résultats de la résistance à la compression et à la flexion (tableau 4.1). La résistance à la flexion avait diminué à 6 mois. Ceci peut être dû au lien étroit entre la pâte laitier / CPA et les granulats qui a créé beaucoup de tension provoquant ainsi des fissures, comme indiqué dans les photos 4.3 et 4.4. Avec une plus grande quantité de laitier, la surface de rupture est devenue plus dense de texture comme le montre la photo 4.6. La photo 4.7 montre un grand pore rempli de produit d'hydratation. Cette substance aide à affiner la taille de ces pores dilatés, et en même temps à augmenter le volume des pores de gel très fins. Cela a été confirmé par les résultats de la porosité.

b)- Régime de durcissement dans le laboratoire

La microstructure de la surface fracturée des éprouvettes durcies dans le laboratoire était la plus touchée comme le montrent les photos 4.8 à 4.12. Dans les photos de 4.8 à 4.12, on trouve quelques formes typiques des pores. Le béton avec 65% de laitier de remplacement contenait plus de pores que les éprouvettes à 50% de laitier de remplacement. Un certain nombre de fissures de rétraction a également été observé dans les éprouvettes durcies dans le laboratoire (photo de 4.10 à 4.12). Ce fait explique pourquoi il y avait une porosité plus élevée et une résistance plus faible (tableau 3.1). Les éprouvettes durcies dans le laboratoire avec 50% de laitier de remplacement ont montré une meilleure texture par rapport à celle de 65% de laitier de remplacement, comme indiqué dans les photos 4.11 et 4.13. Cela a été confirmé par les résultats de résistance à la compression et à la flexion (voir les tableaux 4.8 et 4.11). La photo 4.14 montre la présence probable de l'hydroxyde de calcium.

c)-7 jours dans la chambre humide ensuite transféré dans le laboratoire

La microstructure du béton de laitier durci pendant sept jours en chambre de brouillard suivi par le durcissement en laboratoire était plus compacte et dense de texture que celle soumise au durcissement en laboratoire, comme le montrent (photos 4.15 et 4.16). Pour de grandes quantités de laitier, la surface fracturée est devenue plus dense de texture, comme indiqué dans les photos 5.17 et 5.18. Les photos de 4.19 à 4.24 montrent des agrandissements différents de la surface fracturée prise à partir d'échantillons différents. Le lien entre le laitier / et la pâte CPA est très fort, comme indiqué dans les photos de 4.19 à 4.21. Un certain nombre de fissures de retrait dans la pâte de laitier a été observé comme indiqué dans les photos 4.13 et 4.24. Dans la photo 4.25, la surface fracturée était très lisse et contenait des poches remplies de produit d'hydratation. La surface intérieure de la poche est presque entièrement recouverte d'une texture très dense, comme le montrent les photos 4.26 et 4.27. La photo 4.28 montre quelques zones contenant de l'ettringite. L'analyse de la microstructure des échantillons soumis à un durcissement par humidité de sept jours a montré que cette période de durcissement humide ne suffit pas à donner une structure adéquate à la structure.

4.7.3 Conclusion

La microstructure de deux bétons contenant 50% et 65% de laitier de remplacement et un super plastifiant sous trois régimes de durcissement a été étudiée par le biais de MEB. La microstructure devient très dense en texture sous le durcissement par brouillard et avec l'augmentation de la quantité de laitier dans le béton. Il a été confirmé qu'une microstructure dense contribue de manière significative à l'amélioration de la résistance (qui augmente avec la quantité croissante de laitier dans le béton et également avec le temps) et la distribution de la taille des pores de béton (qui diminue avec la quantité croissante du béton de laitier). Basé sur les expériences menées avec des bétons de laitier, une quantité optimum de laitier de remplacement existe probablement. Cette quantité optimum de laitier dans le béton dépend de la quantité de ciment dans le béton, et semble être proche de 50% de laitier par poids de ciment.



Photo 4.1 Micrographie prises au MEB : 50% de laitier cure dans la chambre humide, montre une structure très dense (Agrandissement 40x).

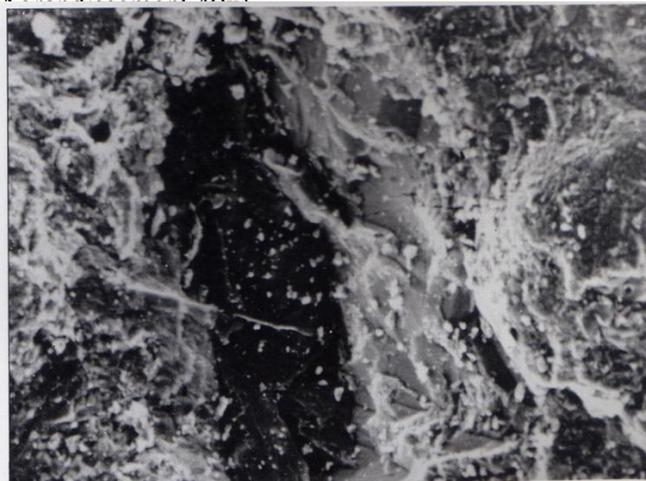
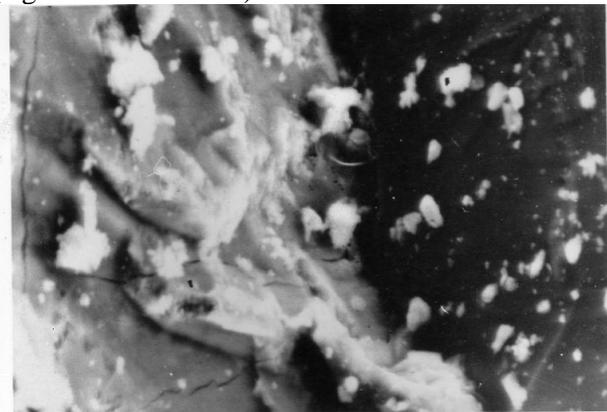
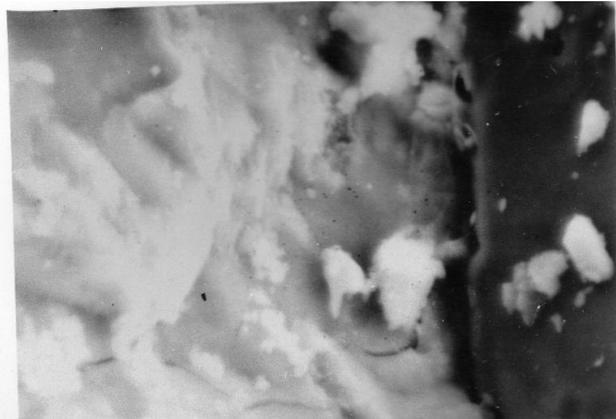


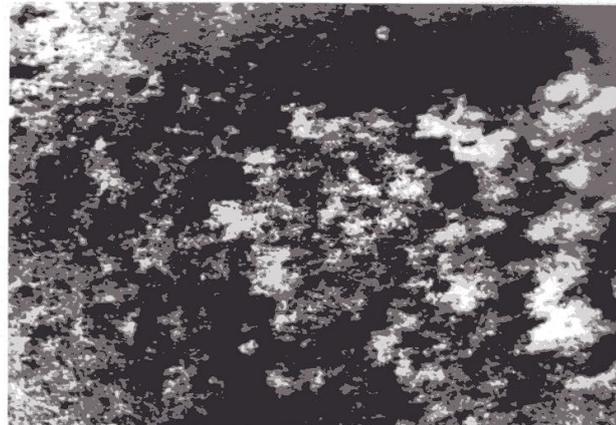
Photo 4.2 Micrographie prises au MEB : 50% de laitier cure dans la chambre humide, montre une structure très dense (Agrandissement 80x).



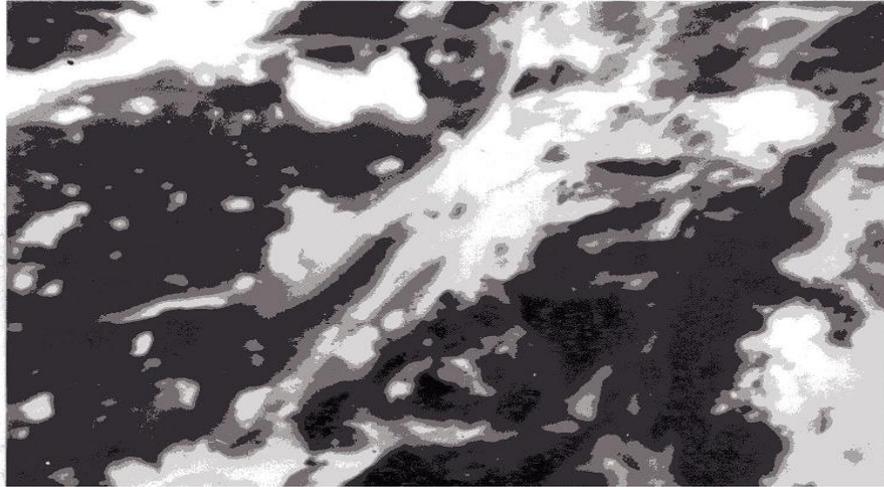
Photos 4.3 Micrographie prises au MEB: 50% laitier condition de cure dans la chambre humide, (Agrandissement 320x).



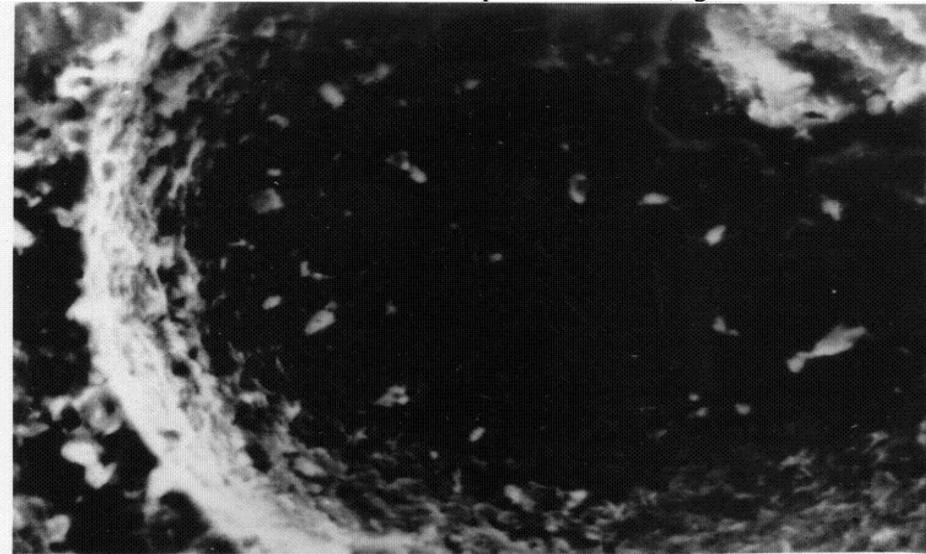
Photos 4.4 Micrographie prises au MEB: 50% de laitier condition de cure dans la chambre humide. (Agrandissement 640x)



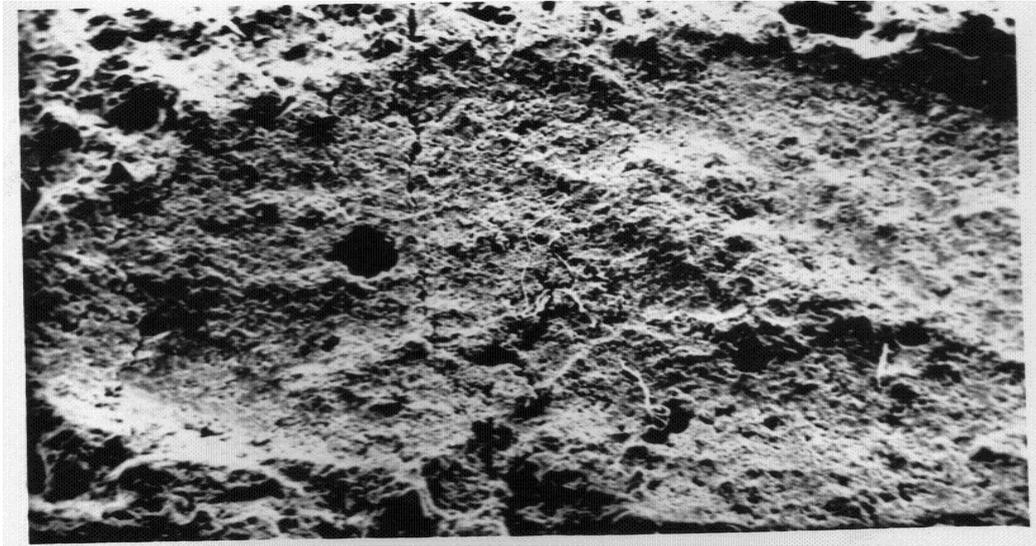
Photos 4.5 : Micrographie prises au MEB : 65% de laitier cure dans la chambre humide, montrant une structure très compacte et dense. (Agrandissement 160x)



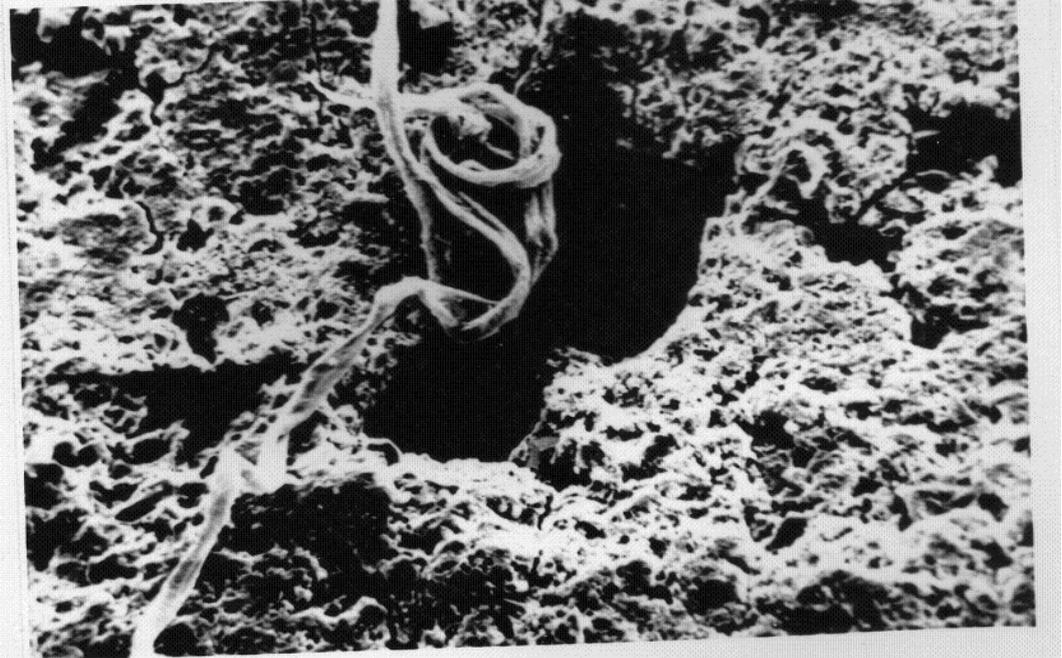
Photos 4.6 : Micrographie prises au MEB: 65% de laitier cure dans la chambre, humide montrant une structure très compacte et dense. (Agrandissement 320x)



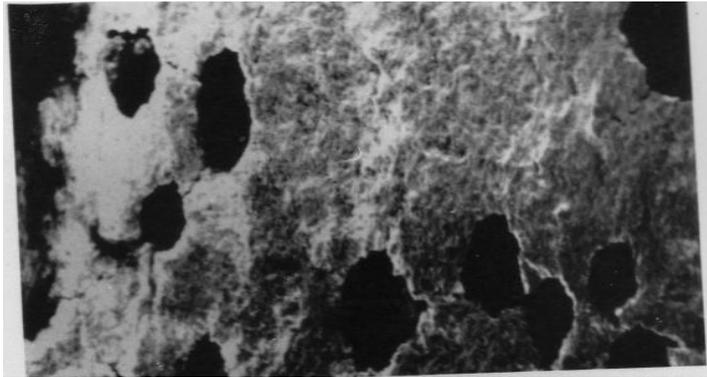
Photos 4.7 : Micrographie prises au MEB : 65% de laitier condition de cure dans la chambre humide, contenant probablement une pochette remplie avec C.S.H (Agrandissement 320x)



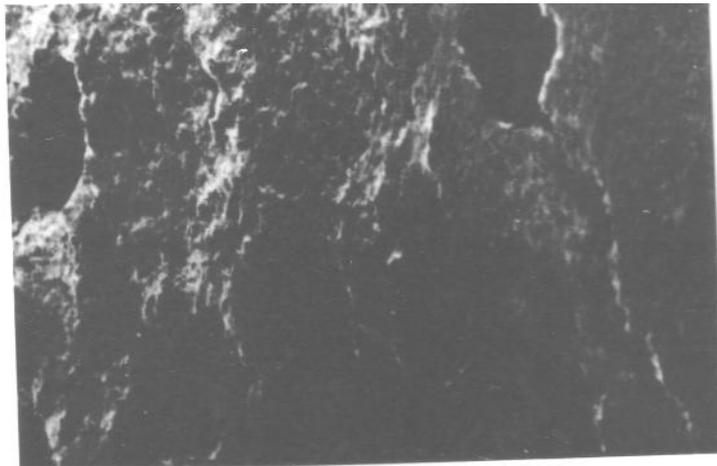
Photos 4.8 Micrographie prises au MEB : 50% de laitier condition de cure dans le laboratoire, contenant des fissures. (Agrandissement 40x)



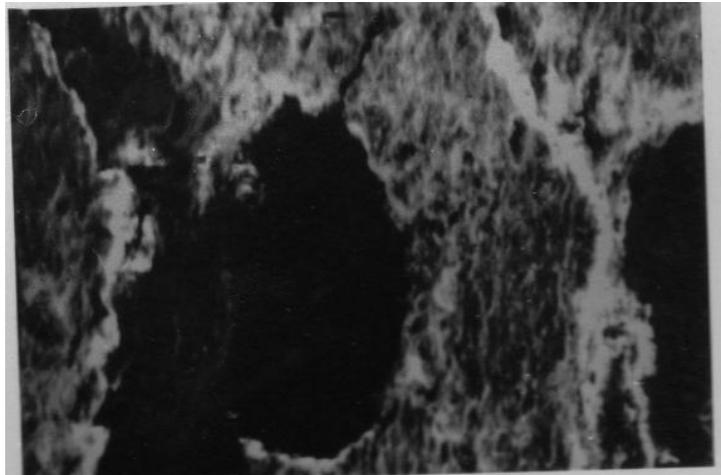
Photos 4.9 : Micrographie prises au MEB : 50% de laitier dans la condition de cure dans le laboratoire Contenant des fissures et des capillaires (Agrandissement 160x)



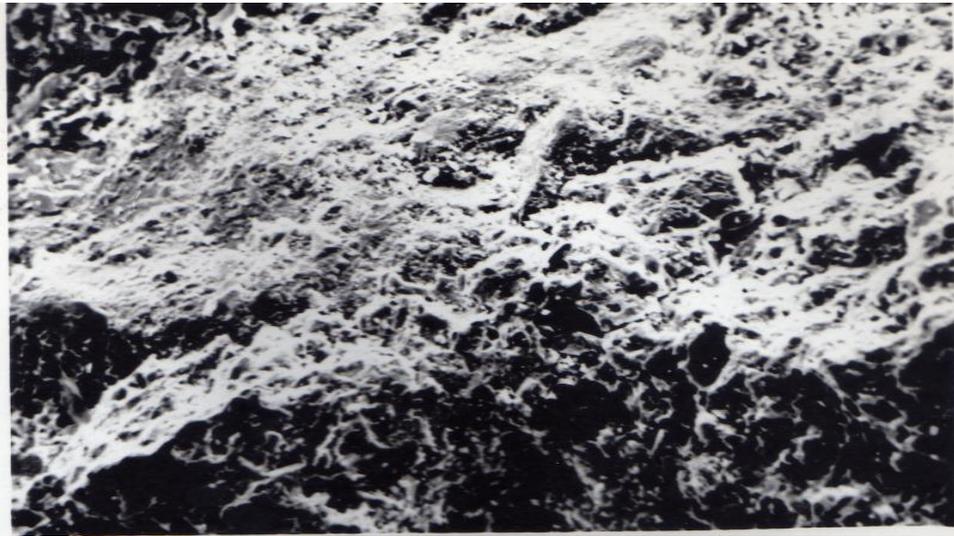
Photos 4.10 : Micrographie prises au MEB : 65% de laitier traité au laboratoire Contenant des pores non uniforme mal distribué avec des microfissures provoquées par le retrait (Agrandissement 40x)



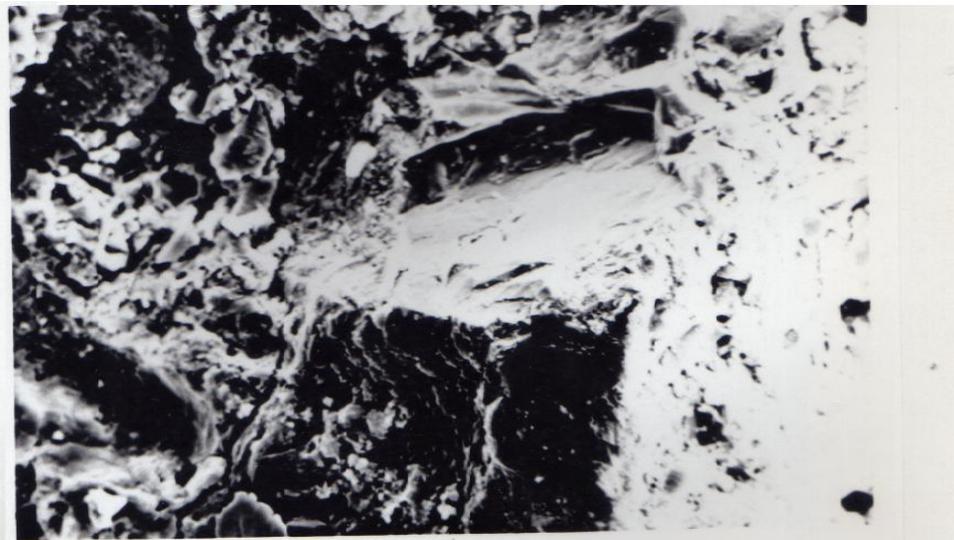
Photos 4.11: Micrographie prises au MEB : 65% de laitier condition de cure au laboratoire. (Agrandissement 40x)



Photos 4.12 : Micrographie prises au MEB : 65% de laitier condition de cure au laboratoire. (Agrandissement 80x)



Photos 4.13 Micrographie prises au MEB : 50% de laitier dans la condition de cure dans le laboratoire (Agrandissement 40x)



Photos 4.14 Micrographie prises au MEB: 50% de laitier dans la condition de cure dans le laboratoire. Avec possibilité de présence de l'hydroxyde de calcium (Agrandissement 320)

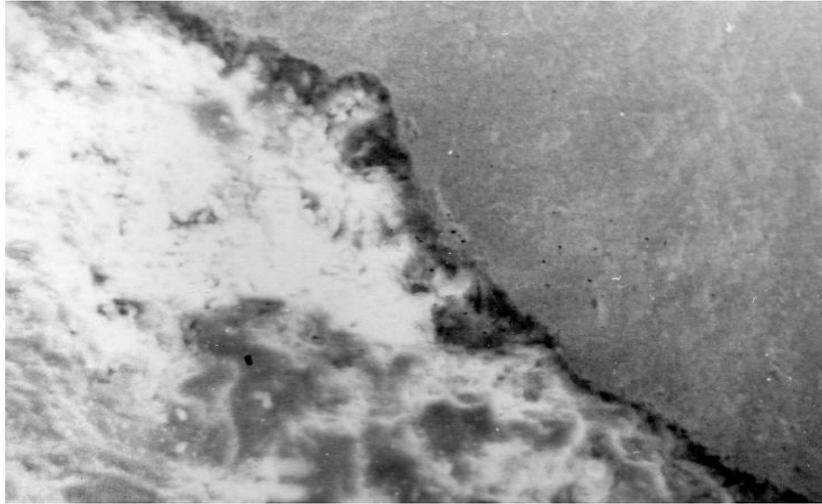


Photo 4.15 : Micrographie prise au MEB : 50% de laitier condition de cure 7 Jours dans la chambre humide, montrant la frontière entre le laitier et le ciment.
(Agrandissement 160x)

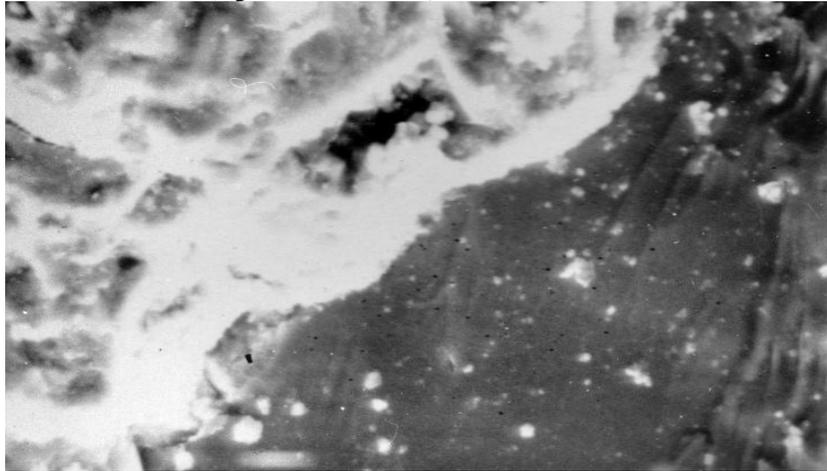
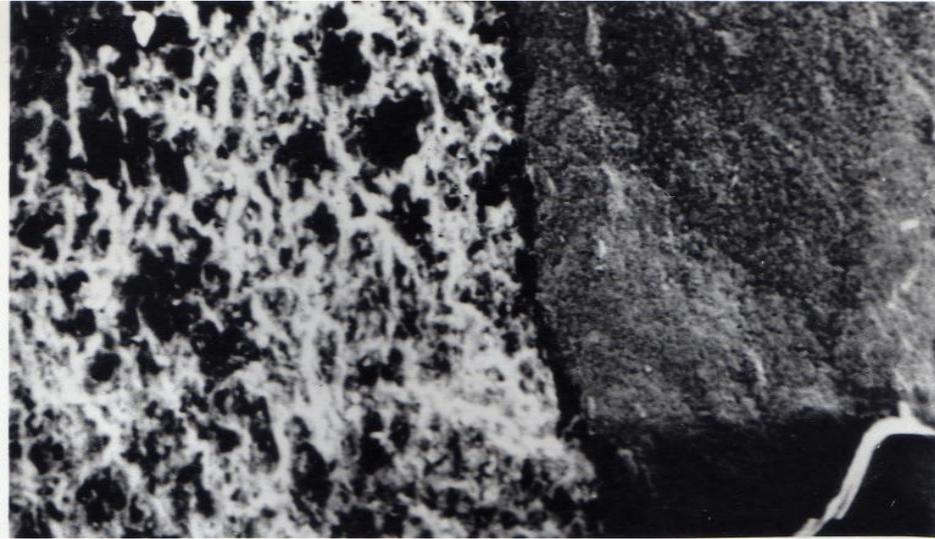


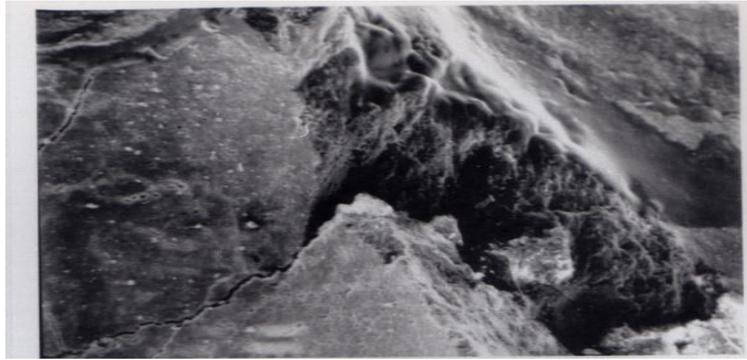
Photo 4.16 : Micrographie prise au MEB : 50% de laitier condition de cure 7 jours dans la chambre humide montrant la frontière entre le laitier et le ciment.
(Agrandissement 320x)



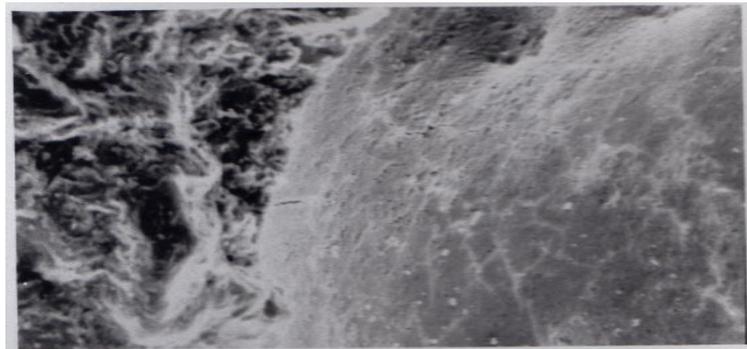
Photos 4.17 : Micrographie prises au MEB : 65% laitier 7 jours dans la chambre humide montrant la frontière entre le laitier et leur ciment, et leur texture compacte et dense t (Agrandissement 80x)



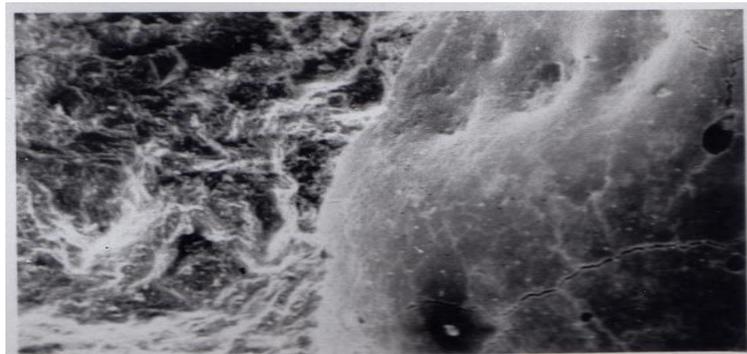
Photos 4.18 : Micrographie prises au MEB : 65% de laitier 7 jours dans la chambre humide (Agrandissement 640x)



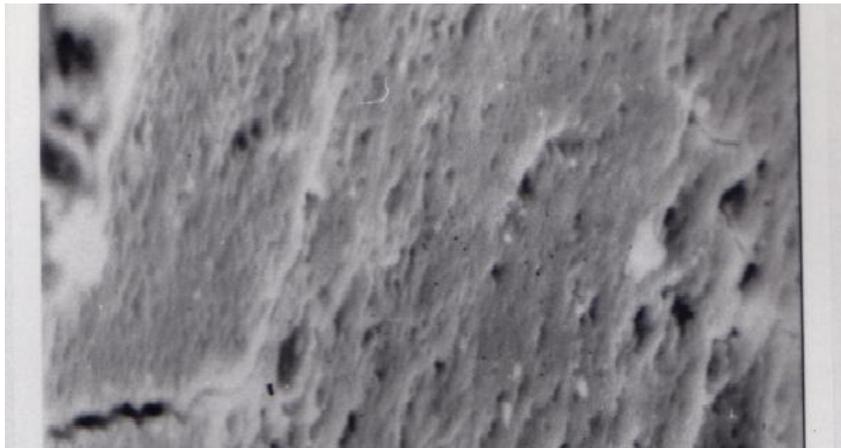
Photos 4.19 : Micrographie prises au MEB : 50% laitier traité 7 jours dans la chambre humide, montrant le lien entre le ciment et le laitier. (Agrandissement 40x)



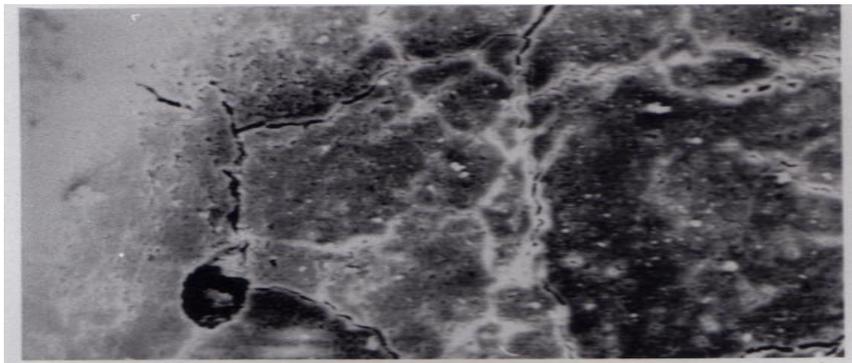
Photos 4.20 : Micrographie prises au MEB : 50% de laitier traité 7 jours dans la chambre humide (Agrandissement 80x)



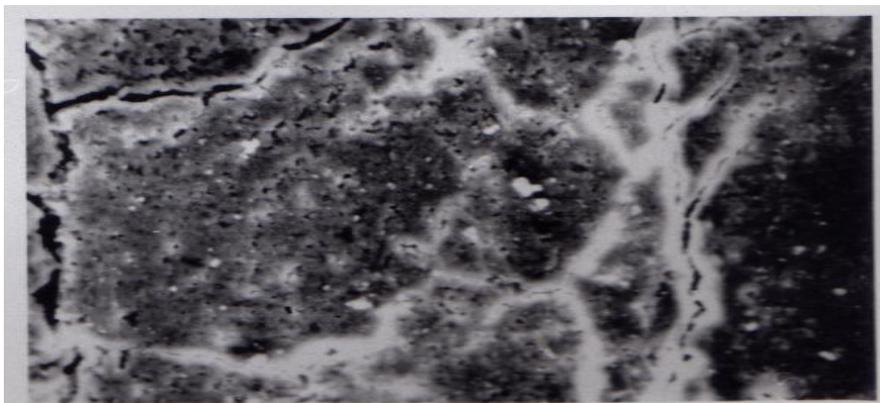
Photos 4.21 : Micrographie prises au MEB : 50% laitier traité 7 jours dans la chambre humide, montrant le lien entre le ciment et le Laitier. (Agrandissement 160x)



Photos 4.22 : Micrographie prises au MEB : 50% laitier traité à 7 jours dans la chambre humide, montrant la Texture du laitier avec des pores et des microfissures provoquées par le retrait. (Agrandissement 320x)



Photos 4.23 : Micrographie prises au MEB : 50% de laitier à 7 jours dans l'eau, montrant la Texture du laitier avec des pores et des microfissures Provoquées par le retrait. (Agrandissement 320x)



Photos 4.24: Micrographie prises au MEB : 50% de laitier traité à 7 jours dans la chambre humide, montrant la texture du laitier avec des pores et des microfissures provoquées par le retrait. (Agrandissement 1250x)



Photos 4.25 : Micrographie prises au MEB: 65% de laitier traité à 7 jours dans la chambre , humide, contenant une pochette remplie probablement de C.S.H. (Agrandissement 320x)



Photos 4.26 : Micrographie prises au MEB : représente la pochette au dessus agrandi à 640x.



Photo 4.27: Micrographie prises au MEB: représente la photo 5.25 agrandi à 1250x.



Photo 4.28: Micrographie prises au MEB: 65% de laitier traité à 7 jours dans la chambre humide, montrant à droite de la Photos l'etrangite qui la forme d'une aiguille. (Agrandissement 320x).

4.8 CARBONATATION

Des résultats de la profondeur de carbonatation avec le temps pour le béton de laitier soumis à deux régimes de durcissement sont présentés dans les tableaux 4.2 et 4.3. Les données dans ces tableaux montrent la relation entre la profondeur de la carbonatation et les temps de moins de trois types de régimes de durcissement de 50% et 65% de laitier de remplacement. A partir de ces tableaux peut être vue l'importance du régime de durcissement du béton. La profondeur de la carbonatation pour les éprouvettes stockées dans l'air du laboratoire sans aucun durcissement par humidité était plus grande et est plus importante pour 65% de laitier de remplacement. Aucun apport supplémentaire en humidité et une éventuelle concentration de dioxyde de carbone plus importante dans le laboratoire ne peut être la raison de cette faible durabilité montrée par ces éprouvettes. Les éprouvettes durcies par 7 jours de brouillard atteignent une profondeur de carbonatation de 3.5 et 4.5 mm à 3 mois pour respectivement 50 et 65% de laitier de remplacement, et 5.1 et 7.8 mm, après seulement 6 mois. La différence est encore plus importante entre les éprouvettes durcies par 7 jours de brouillard et les éprouvettes durcies en laboratoire qui atteignent une profondeur de respectivement 4.6 et 5.1 mm à 3 mois et 9.8 et 11.6 mm à 6 mois pour les 50 et 65% de laitier de remplacement, Aucune trace de la carbonatation n'a été trouvée dans les éprouvettes stockées en permanence dans la chambre de brouillard. Cet aspect peut être clairement vu dans les photos 4.1a et 4.8a, où la différence de profondeur de la carbonatation entre 50 et 65% de laitier de remplacement est assez grande pour les éprouvettes sans durcissement par humidité, en outre, ces photos montrent l'importance des conditions de durcissement sur le taux de la carbonatation.

4.8.1 Résultats de l'effet de la carbonatation sur la résistance à la compression

Les résultats des résistances à la compression obtenues à partir de tests en cube équivalents sont fournis dans les tableaux 4.2 et 4.3. À partir de ces tableaux, on peut voir clairement que la carbonatation aide à augmenter la résistance à la compression de toutes les éprouvettes sous le brouillard et 7 jours de brouillard + conditions de durcissement en laboratoire. La résistance à la compression de 65% de laitier de remplacement a montré une diminution de la résistance à 6 mois quand il est soumis au durcissement de laboratoire, tandis que les autres ont montré une augmentation.

Tableau 4.2 : Profondeur de la carbonatation du béton au laitier avec 50% de substitution

Condition De cure	Temps (mois)	R _F (N/mm ²)	Equivalent cube N/mm ²	Carbonatation (mm)
LAB	100 Jours	5.7	45.8	4.6
	6 Mois	4.7	51.3	9.8
7FOG+LAB	3	6.1	65.8	3.5
	6	4.7	71.3	5.1
FOG	3	7.5	70.9	0.0
	6	6.9	71.3	0.0

+ Les résultats des résistances à la compression obtenues à partir de tests en cube équivalent obtenu à partir des tests de flexion.

Tableau 4.3: Effet de l'age et la condition de cure sur la profondeur de la carbonatation et la résistance carbonate avec 65% du béton au laitier

Condition de cure	jours (mois)	Résistance a la flexion. (MPa)	Résistance a la compression * (MPa)	Profondeur de la carbonatation (mm)
Lab	3	3.7	36.1	5.1
	6	3.9	33.9	11.6
7Fog+Lab	3	4.7	57.8	4.5
	6	4.4	59.7	7.8
Fog	3	7.1	64.5	0.0
	6	6.7	67.6	0.0

* Résistance a la compression sur cube d'un demi prisme obtenue lors de l'essai de l'éprouvette à la flexion

Tableau 4.4 : Données comparatives sur la carbonatation des bétons au laitier

	Dosage en Ciment (Kg/m ³)	Dosage en laitier (%)	résistance à 28jours (MPa)	Test (age)	Carbonatation Profondeur (mm)	
					Lab	7L+Lab
Butler et al (21)	260	0	23.0	23 W*	7.0	-
	250	250+	27.6	22 W	9.0	-
	260	0	23.4	9 W	5.0	-
	230	230+	19.1	7W	9.0	-
	350	0	41.1	10 W	4.0	-
	315	315+	37.8	9 W	5.0	-
Hobs (22)	370	0	56.0	1 An	4.8	-
	370	50	40.0	1 An	10.6	-
	280	0	33.0	1 An	8.6	-
	280	50	28.	1 An	13.0	-
Nos résultats	400	50	57.7	3 M**	4.5	3.5
	420	65	57.7	6 M	9.8	5.1
			54.6	3 M	5.1	4.5
			54.6	6 M	11.6	7.8

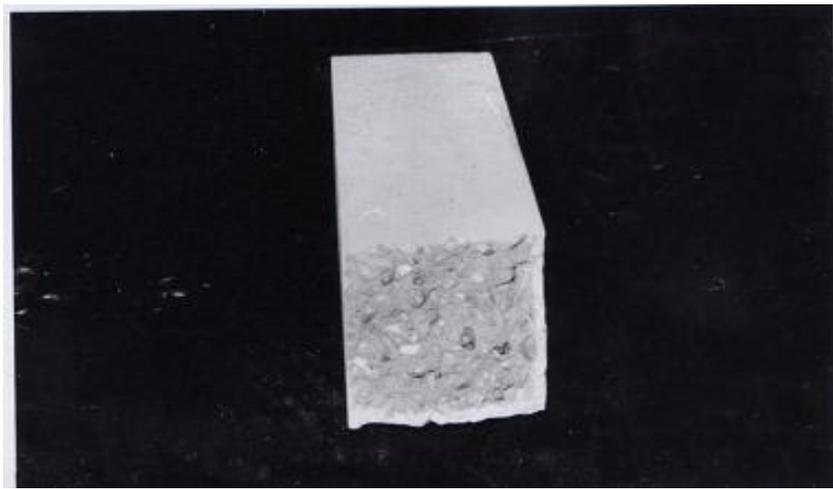
*Semaines

**Mois

+ Portland blast furnace cement (kg/m³)



Photo 4.1a : Surface d'un prisme brisé avec 50% remplacement de laitier et traité dans le laboratoire (durée 3 mois)



Photos 4.2a : Surface d'un prisme brisé avec 50% remplacement de laitier et traité 7 jours dans la chambre humide (durée 3 mois).



Photo 4.3a: Surface d'un prisme brisé 100 x 100 x 500 mm avec 50% de remplacement traité dans le laboratoire (durée 6 mois)

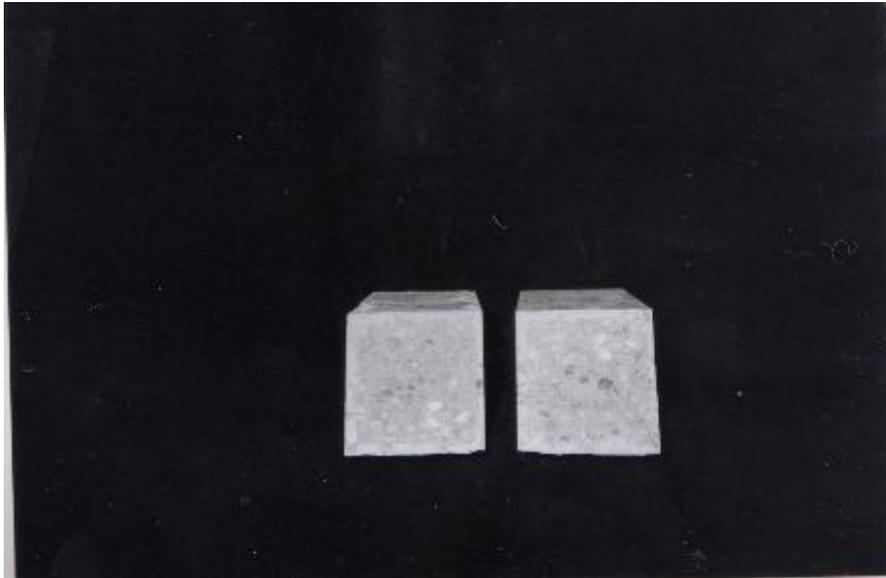


Photo 4.4a: Surface d'un prisme brisé 100 x 100 x 500 mm avec 50% de substitution traité à 7 jours dans la chambre humide (durée 6 mois).

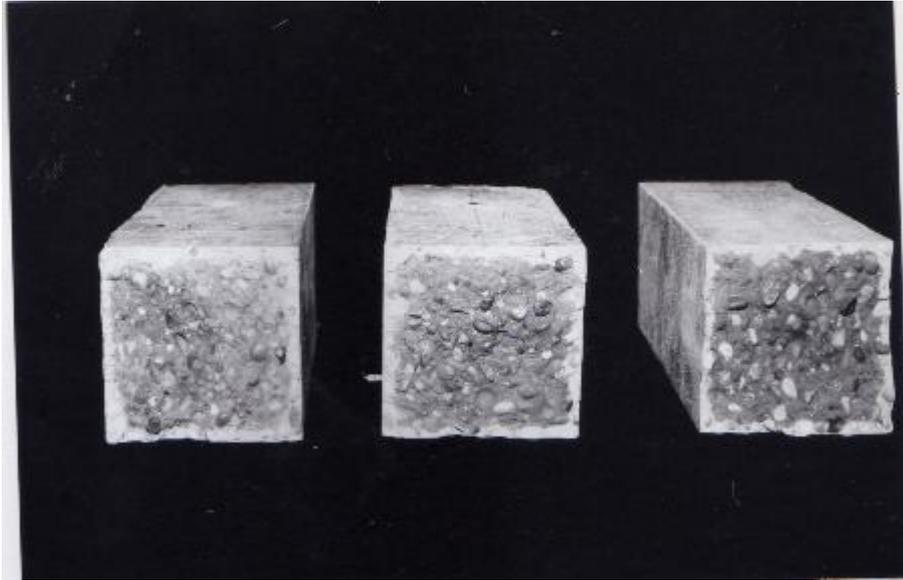


Photo 4.5a : Surface d'un prisme brisé de 100 x 100 x 500 mm avec 65% de substitution de laitier traité dans un laboratoire (durée 3 mois).



Photo 4.6a : Surface d'un prisme brisé de 100 x 100 x 500 mm avec 65% de substitution de laitier traité 7 jours dans la chambre humide (durée 3 mois)

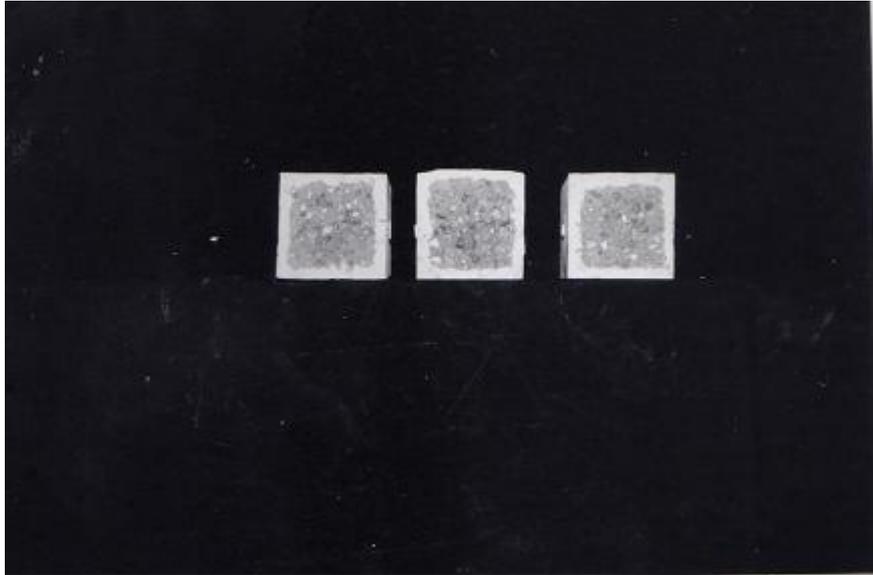


Photo 4.7a : Surface d'un prisme brisé de 100 x 100 x 500 mm avec 65% de substitution de laitier traité dans le laboratoire (durée 6 mois)

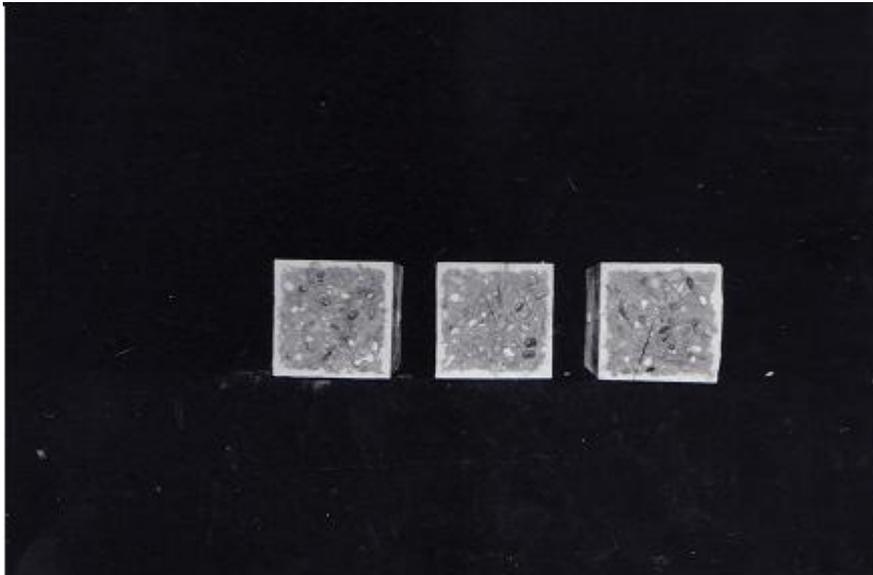


Photo 4.8a : Surface d'un prisme brisé de 100 x 100 x 500 mm avec 65% de substitution de laitier traité 7 jours dans la chambre humide (durée 6 mois)

4.8.2 Comparaison avec les données publiées

Le tableau 4.7 présente une comparaison entre les profondeurs de carbonatation obtenues dans cette étude avec celles des autres chercheurs. Les données de ce tableau révèlent une grande variation dans la profondeur de la carbonatation, principalement en raison de la façon dont les bétons étaient proportionnés, les différences sur le durcissement initial et le type de condition de durcissement et l'âge du test. En raison de la variable de tests différents, il est difficile d'interpréter les résultats des tests et de donner des conclusions définitives. On voit clairement à partir des données que les bétons soumis à la dessiccation, sont les plus susceptibles de souffrir durement de la carbonatation, et cela est encore plus vrai à plus forte proportion de laitier de

remplacement. L'importance du durcissement initial est aussi clairement démontrée par les données.

4.9 Incidence mécanique de l'expansion provoquée par la réaction alcali-silice (RAS) dans le béton

4.9.1 Introduction

L'effet de la RAS sur les propriétés du béton et l'efficacité du laitier dans la maîtrise de cette expansion sont discutés. Un ciment hautement alcalin avec 1 % d'équivalent d'oxyde de sodium et un granulat réactif, une synthèse de silice amorphe, a été utilisé pour initier la RAS dans le béton avec deux niveaux de laitier de remplacement. Les granulats fins utilisés dans le mélange de béton sont un sable naturel lavé et séché, tandis que les gros granulats grossiers étaient composés d'un mélange de matériaux arrondis et angulaires, obtenu à partir d'une seule source. Le ciment était de haute teneur en alcalis comme mentionné précédemment. Les granulats réactifs ont été utilisés comme remplacement partiel des granulats fins par une quantité égale à 15% en poids des granulats totaux. Les granulats réactifs, le verre de silice, est un matériau réactif efficace et efficient pour simuler l'expansion de la RAS dans le laboratoire. Le dosage des mélanges de béton a été effectué de manière à développer la même résistance à 28 jours que le béton sans granulats réactifs. Cela a nécessité l'utilisation d'un super plastifiant (le condensât de naphthalène de sulfonate de sodium) dans une quantité variée pour produire un mélange cohérent et réaliste.

4.9.2 Résultats du test et discussion

Pour chacun des tests des séries 1 et 2, l'expansion moyenne contre le temps est indiquée dans respectivement les tableaux 4.5 et 4.6. Les figures 4.19 à 4.21 illustrent la représentation graphique de ces résultats. Pour les deux séries de test 1 et 2, les éprouvettes ont été placées pendant deux semaines dans le laboratoire, et suivi de deux semaines dans la chambre de brouillard, ils ont ensuite été transférés à la chambre chaude jusqu'à ce qu'une expansion de 0.3% survienne. Les éprouvettes ont ensuite été ramenées au laboratoire, et après un mois, retournés à nouveau dans la chambre chaude. Sur les figures 4.19 et 4.20, on voit que pendant qu'elles étaient dans le laboratoire, les deux éprouvettes de tests des séries 1 et 2 ne présentaient qu'une légère expansion. Une autre petite expansion s'est produite après le transfert des éprouvettes dans la chambre de brouillard; mais à l'étape de la chambre chaude les éprouvettes de la série de tests 1

ont montré une accélération de l'expansion alors que ceux de la série 2 sont restés stables jusqu'à l'âge de 54 jours. L'expansion de la série de tests 1 a augmenté sensiblement, pour atteindre environ 0.144% après 38 jours à compter de la coulée; les prismes de la série de tests 2 avaient atteint seulement une expansion de 0.02% au même âge. L'expansion a ensuite plus que doublé en 74 jours et 133 jours pour les éprouvettes des séries 1 et 2 respectivement. Lorsque les éprouvettes ont été sorties de la chambre chaude et mis dans le laboratoire, ils ont montré une diminution de l'expansion, certainement due à la température plus basse et le manque d'humidité. Après avoir sortis les éprouvettes du laboratoire et mis dans la chambre chaude, on peut constater que l'expansion a augmenté rapidement à la température élevée de 38° C jusqu'à ce qu'elle atteigne le maximum de valeurs indiquées dans les tableaux 4.5 et 4.6, respectivement. Ce fait est du à l'effet de stockage de l'eau à 38° C sur la réaction causée par le verre de silice. Il est intéressant de noter que les éprouvettes de la série de tests de 2 atteignent une expansion plus importante après ce transfert (voir figures 4.20 et 4.21). Il est également intéressant de noter qu'après avoir mis les éprouvettes dans la chambre chaude la réaction a commencé à nouveau et l'expansion rapide s'est produite dans les éprouvettes de la série de test 2. Ceci est peut être probablement du à la décomposition de laitier. Outre l'augmentation du taux d'expansion, la température semble également le stabiliser bien plus tôt aux alentours de 6 mois. L'expansion maximale mesurée au cours de la campagne de tests était de 0.310% pour les séries de tests 1 et 0.328% pour la série de test 2. La vitesse des impulsions correspondantes est indiquée dans le tableau 4.5 et 4.6. Ensuite ils sont restés à peu près constants. Le tableau 5.7 montre le temps requis pour les deux bétons de laitier pour atteindre une certaine expansion. En observant le tableau, il peut être remarqué que le béton à 50% de laitier de remplacement atteint l'expansion de 0.1% à l'âge de 34 jours, tandis que les éprouvettes à 65% de laitier de remplacement atteignent la même expansion à un âge de 77 à 78 jours. L'expansion de 0.2% a été atteinte à l'âge de 46 et 82 jours pour respectivement 50% et 65% de laitier de remplacement. Ces résultats peuvent s'expliquer par la réaction du laitier avec de l'hydroxyde de calcium ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) et la libération consécutive de $(\text{OH})^-$. À 65% de laitier de remplacement la quantité de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ libérée par le ciment est très petite, entraînant une faible concentration d'ions

(OH) — présents dans la solution poreuse du béton ce qui provoque la diminution dans l'expansion du béton.

4.9.3 Mesure de la vitesse des impulsions.

Les mesures de la vitesse des impulsions ultrasonores de la série de tests 1 et 2 et des prismes contenant 15% de verre de silice sont indiquées dans la figure 4.20. Les deux séries de tests indiquent une tendance similaire des comportements en présentant une sensibilité élevée à refléter les changements dans l'état des éprouvettes du béton en détérioration. D'après la figure 4.20, la vitesse des impulsions de la série des tests de 1 et 2 a augmenté au début et puis a diminué progressivement après avoir atteint une valeur maximale. L'âge auquel la vitesse des impulsions maximale a été atteinte pour les séries de tests 1 et 2 est indiqué dans les tableaux 4.5 et 4.6. La diminution de la vitesse des impulsions est une indication de fissures internes, bien qu'à cette période, aucune fissure externe n'a pu être observée. Les chiffres de la vitesse d'impulsion contre l'expansion pour chacune des séries de tests sont présentés dans la figure 4.21. A partir de ces chiffres, on peut voir que la vitesse des impulsions augmente avec l'expansion au début, mais elle diminue avec l'expansion croissante après avoir atteint une vitesse d'impulsions maximum. Pour les tests des série 1 (50% de laitier) et 2 (65% de laitier), la vitesse des impulsions a commencé à diminuer à une expansion d'environ 0.05%. Les fissures extérieures pourraient être observées pour les prismes de 100 X 100 X 300 mm et 100 x 100 x 500 mm dans les séries de tests 1 et 2. Les types de fissures pour chaque série de tests sont indiqués sur les photos 5.1b à 5.9b pour les différents degrés d'expansion. L'âge de la première fissure externe et son expansion correspondante pour les séries de tests 1 et 2 est indiqué dans respectivement les tableaux 4.5 et 4.6.

4.9.4 L'Influence de la RAS sur les propriétés du béton.

Afin d'établir l'effet de l'expansion RAS sur les propriétés mécaniques du béton en détérioration, différents tests ont été effectués sur des éprouvettes de béton. Le béton utilisé dans ces tests avait une teneur en ciment identique à celle décrite au chapitre 3. Le verre de silice a été utilisé comme granulat réactif dans ces tests, remplaçant le granulat fin d'une quantité égale à 15% en poids du granulat total. Le test de cube équivalent, la vitesse d'impulsion et le module de rupture ont été effectués sur les prismes de 100 X 100

X 500 mm à 28 jours et à une expansion de 0.1%, 0.2% et 0.3%, et 0.1% et 0.2% d'expansion pour respectivement les séries de tests de 1 et 2. Les résultats du tableau 4.8 indiquent des résultats intéressants. On remarquera que ce n'est pas toutes les propriétés qui diminuent au même rythme ou proportion à l'expansion subie par le béton. Le béton perd de sa résistance à la flexion beaucoup plus vite que sa résistance à la compression, comme on pouvait s'y attendre dans un membre fissuré. Pour les séries de test 1, la perte de la résistance à la compression est d'environ 25% à 0.1% d'expansion, tandis que la perte à la flexion était d'environ 22%. À environ 0.2% d'expansion pour la même série de tests, la perte de la résistance à la compression était d'environ 15% comparativement à environ 41% de perte de la résistance à la flexion. Même quand l'expansion avait atteint 0.3%, la perte en résistance à la compression n'était que d'environ 8% par rapport à environ 66% de perte dans la résistance à la flexion de leur contrôle de résistance à 28 jours. Du même tableau, les résultats des tests de la série 2 montrent une augmentation de la résistance à la compression à 0.1% et 0.2% d'expansion par rapport à environ 41% et 49% de perte dans la résistance à la flexion par rapport à leur contrôle de résistance à 28 jours. Il est clair d'après les données, que la perte de la résistance à la compression n'est pas une bonne mesure de l'ampleur de l'expansion RAS. A environ 0,3% d'expansion une perte de résistance à la compression d'environ 8% pour la série de tests 1 n'affectera probablement pas les performances de charge d'un trottoir ou d'une poutre en béton armé, mais une perte de près de 66% de résistance à la flexion est suffisante pour affecter la performance des éléments porteurs de charge, notamment dans leur capacité à résister à la flexion accrue et de la déformation résultant de ces pertes. La série de tests 2 a montré une augmentation de 25% dans la résistance à la compression mais une perte de près de 49% dans la résistance à la flexion. A ce niveau de pertes de propriétés mécaniques majeures du béton, une défaillance n'est pas à exclure, d'autre part, dans le sens de pertes importantes dans la capacité portante, il est presque une certitude et ce ne serait qu'une question de temps avant que cela ne se produise. En outre, un membre fortement fissuré provoquera, dans des environnements hostiles et en présence de sels, la corrosion des armatures en acier.

4.9.5 L'efficacité du laitier

Les tableaux 4.8 et 4.9 montrent les propriétés du béton à une expansion de 0.1%, 0.2% et 0.3% pour respectivement les séries des tests 1 et 2. Ces tableaux prouvent que le remplacement du ciment, même aux niveaux 50% et 65%, par le laitier est peu susceptible d'éliminer les fissures dues à l'expansion RAS. Ce résultat est similaire à celui d'Al Asali [82] qui a montré qu'à un niveau d'alcalinité de 4kg/m³ l'alcali dans le laitier ne contribue pas à l'expansion. D'après les résultats présentés ici et avec le type de granulats réactifs utilisés la conclusion suivante peut être tirée.

1)-La RAS entraîne une réduction substantielle des propriétés mécaniques du béton à 0.3% d'expansion, par exemple, la perte de résistance à la compression n'est que de 8%, mais une perte de résistance à la flexion est d'environ 66% pour les tests de la série 1. Les tests de la série 2 ont montré une augmentation de la résistance à l'expansion à 0.2%, d'environ 25%, mais la perte de la résistance à la flexion était d'environ 49%.

2)-La résistance à la compression n'est pas un bon indicateur de début ou de progression de la RAS, en particulier avec la hausse de la quantité de laitier. Le module de test de rupture est une méthode sensible et fiable de test pour mesurer la dégradation du béton affecté par la RAS.

3)-La vitesse des impulsions pourrait donner une bonne indication de la détérioration du béton par la RAS.

Tableau 4.5 : Mesures de l'expansion et de la vitesse des impulsions dans la série de tests 1

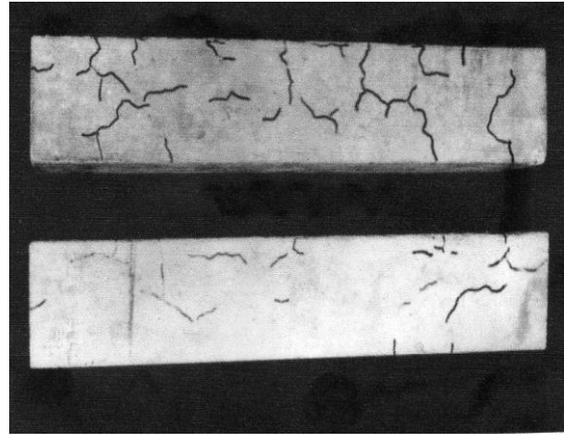
Age (jours)	Expansion (%)	Vitesse des impulsions (km/s)	Remarques résultats pris en Lab
1	0.000	3.68	
2	0.012	4.12	
3	0.018	4.32	
4	0.004	4.33	
5	0.010	4.32	
7	0.014	4.43	retrait à la chambre de
14	0.022	4.54	brouillard
28	0.020	4.61	retrait à la chambre chaude
33	0.088	4.53	Première fissure
38	0.144	4.16	
46	0.201	3.82	
81	0.310	3.03	Retrait au Lab
152	0.137	2.90	Retrait à la chambre chaude
257	0.220	2.98	dernière lecture

Tableau 4.6: Mesures de l'expansion et de la vitesse du son dans la série de tests 2

Age (jours)	Expansion (%)	Vitesse des impulsions (km/s)	Remarques résultats pris en Lab
1	0.000	2.71	
2	0.001	4.37	
3	0.001	4.41	
4	0.001	4.42	etrait à la chambre de
5	0.007	4.42	brouillard
7	0.008	4.44	retrait à la chambre chaude
14	0.015	4.57	Première fissure
28	0.023	4.65	
33	0.022	4.69	
38	0.022	4.70	Retrait au Lab
46	0.025	4.71	Retrait à la chambre chaude
52	0.030	4.72	dernière lecture
77	0.090	4.39	
78	0.160	4.28	
86	0.216	3.99	
100	0.167	3.96	
127	0.134	3.86	
200	0.328	3.72	



Photos 4.1b : première fissure visible avec 50% de laitier



Photos 4.2b déformation de 1000 microfissuration avec 50% de laitier



Photo 4.3b première fissure visible pour 65 % de laitier

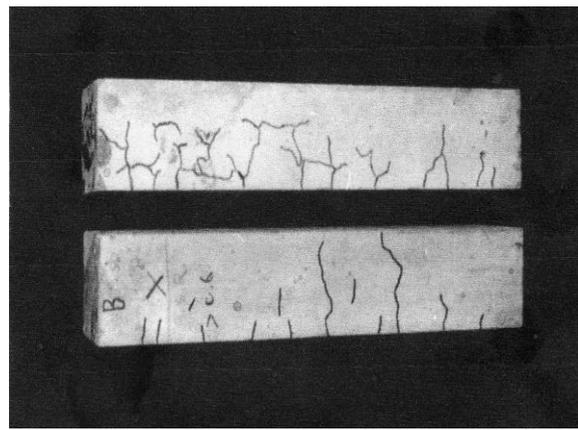
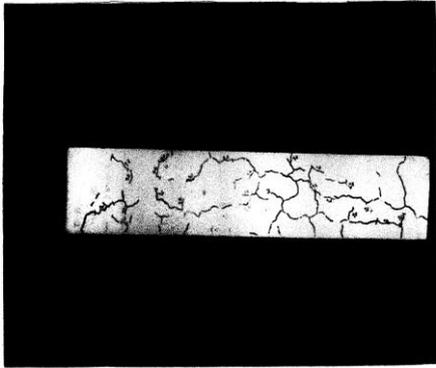
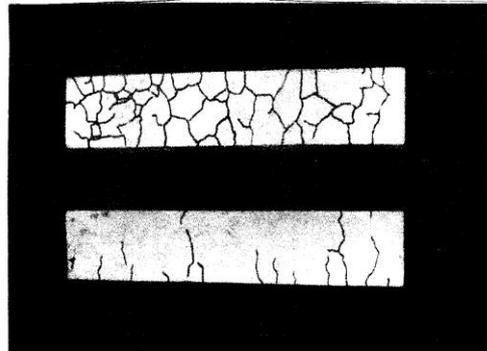


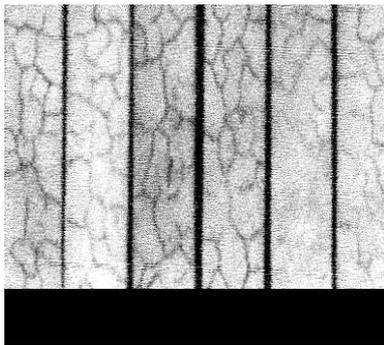
Photo 4.4.b déformation de 1000 micros fissuration avec 65% de



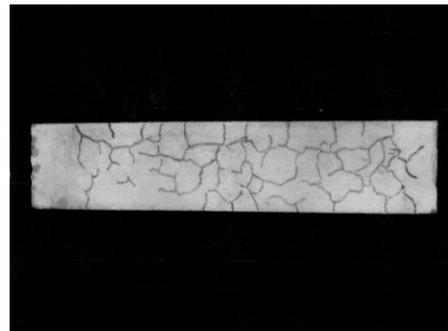
Photos 4.1(c) déformation en expansion de 2000 micro fissuration avec 50% laitier



Photos 4.2(c) déformation de 2000 micro fissuration avec 65% de laitier



Photos 4.1 (d) déformation de 3000 micro fissuration avec 50% de laitier



Photos 4.2 (d) déformation de 3000 microfissuration avec 65% de laitier.

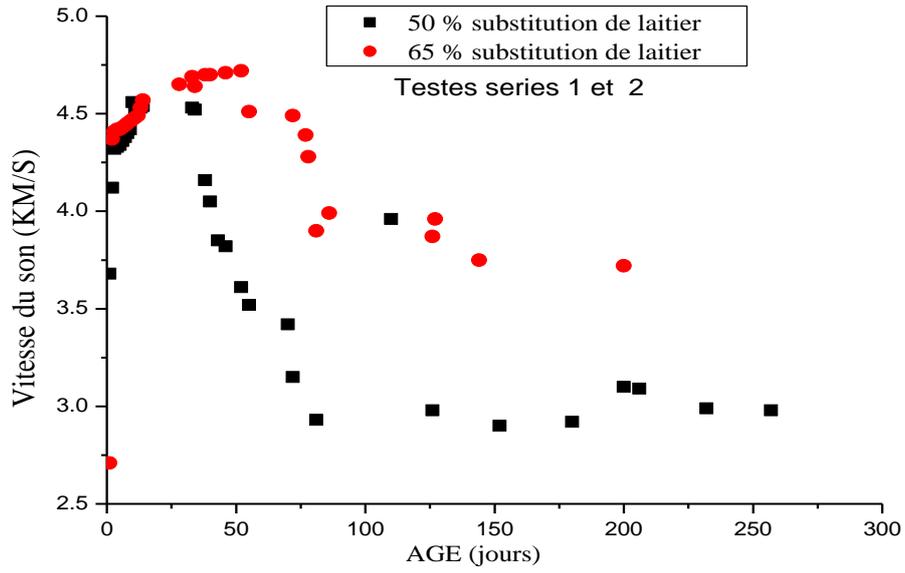


Fig. 4.19. Changement de la vitesse du son due a la reaction alkali silice

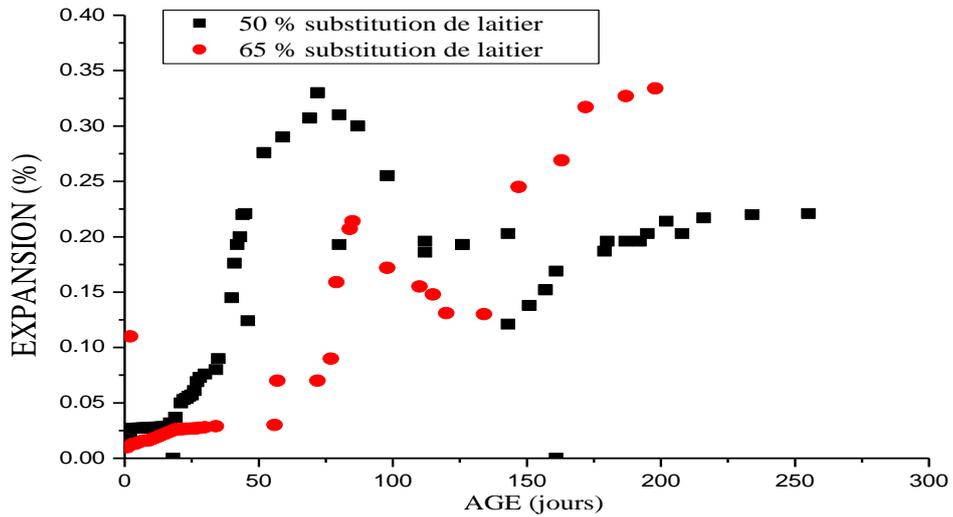


Fig. 4.20. Expansion due a la reaction alkali-silice du beton au laitier avec le temps

Tableau 4.7 : Expansion et changement de la vitesse de propagation dus à la réactivité de l'alcali-silice (ASR)

Exposure	Age (jours)	50% LAITIER		65% LAITIER	
		Exp (%)	Pv, (km/s)	Exp (%)	Pv, (km/s)
Laboratoire ***	1	0.000	3.68	0.000	2.71
	7	0.014	4.43	0.008	4.44
	14	0.022	4.54	0.015	4.57
Fog*** Chambre humide	28	0.020	4.61	0.023	4.65
Chambre chaude	38	0.144	4.16	0.022	4.70
	81,86*	0.310	3.03	0.216*	3.99*
Laboratoire	127	-	-	0.134	3.86
	152	0.137	2.90	-	-
Chambre chaude	200	-	-	0.328	3.72
	257	0.220	2.98	-	-

***Représente les conditions sèches.

** Représente les conditions humides

Tableau 4.8: Changements de la résistance dus à la réaction alcali-silice

Béton	Age (jours)	Expansion (%)	RC (MPa)	Rf (MPa)
50 % laitier	28	0.020	57.2	6.8
	38	0.144	45.7	5.3
	46	0.206	48.6	4.0
	81	0.310	52.4	2.3
65% laitier	28	0.023	53.2	6.6
	78	0.16	66.7	3.9
	86	0.216	66.5	3.4

Tableau 4.9: Temps requis pour les deux bétons pour atteindre une expansion donnée

Expansion (%)	50% substitution de laitier		65% substitution de laitier	
	Age	PV	Age	PV
	(jours)	(km/s)	(jours)	(km/s)
0.02	28	4.61	28	4.65
0.10	34	4.20	7	4.39
0.20	46	3.82	7-78	4.04
0.30	80	3.10	82	3.75

CHAPITRE 5

Matériaux, Conception du Mélange.

et Études Préliminaires.

Pour 50% de Laitier

5.1 Introduction

L'objectif de la conception de l'ensemble des proportions de tout le béton est de produire la combinaison la plus économique des matériaux disponibles qui seront conformes aux propriétés requises du béton à la fois, à l'état frais et durci. Le béton est normalement conçu pour donner une résistance à 28 jours, et le mélange devrait avoir la plasticité suffisante pour lui permettre d'être facilement placée et compacté. Les aspects de durabilité du béton doivent également faire l'objet de précision des mélanges par une contenance minimale de ciment et/ou un rapport Eau/Ciment maximal comme indique par CP 110(89).

Actuellement il n'y a pas de méthode de conception du mélange du béton au laitier. Wainwright [19], a suggéré que la méthode utilisée pour le béton ordinaire est probablement adoptée pour le béton au laitier. Berry [16] a montre que les différentes méthodes de dosage des mélanges du béton a base des cendre volante seront probablement utilisable pour le béton au laitier et ces méthodes ont été discutées dans le chapitres 2. En général, des laitiers ont été employés comme remplacement partiel des ciments, granulats fins, ou de granulats fin et gros. Le remplacement partiel du ciment par du laitier a été adopté dans cette investigation car il est le plus simple de toutes les méthodes de conception décrites précédemment. En plus d'être simple, cette approche présente deux avantages: (1) le volume de la pâte du ciment est augmenté en raison de la faible densité du laitier, ayant pour résultat une amélioration de la finition de surface du béton, et (2) les caractéristiques rhéologiques du mélange sont donc améliorées. Les grands avantages découlant de cette approche sont l'efficacité et l'utilité de l'incorporation des laitiers dans des conceptions des mélanges des ciments ordinaires peut être évaluée immédiatement. Les connaissances et l'expertise des technologues en béton peuvent être mobilisées pour régler les proportions des constituants du mélange pour satisfaire une exigence.

Les récentes recherches sur le béton de laitier (1.10) se sont concentrées sur des propriétés de béton au laitier ayant le remplacement de ciment de 40%, 50% et 65% par poids ou par volume. Des bétons contenant des laitiers au plus de 50% ont été utilisés généralement depuis des décennies, mais leurs applications dans des éléments structuraux sont limitées. Outre les références citées ci-dessus, aucune autre donnée n'est disponible pour le béton de ciment ayant un haut niveau de remplacement et couvrant une gamme de résistance. La nécessité d'une telle étude existe en béton et la présente recherche est menée pour obtenir une partie de ce grand besoin de données. L'objectif de cette partie de recherche est de produire un mélange de conception graphique pour le béton avec un remplacement de 50% de laitier et d'avoir une résistance à la compression à 28 jours allant de 30 à 50 N / mm². Sur la base de la conception graphique, les propriétés du matériau de base, sont présentées dans les chapitres suivants.

5.2 Objectifs de la conception du mélange.

L'objectif de la conception du mélange est de produire des résistances à la

Compression à 28 jours dans la condition de cure dans l'eau de 30, 40 et 50 MPa. Les mélanges doivent avoir les caractéristiques suivantes :

1. remplacement de 50% de ciment par un poids égal de laitier.
2. une ouvrabilité de plus de 100mm.
3. développement élevé de la résistance au jeune âge, comparable à celui du béton ordinaire sans le laitier.
4. Avec un rapport eau/composite très petit.

Pour atteindre ces objectifs, un super plastifiant a été employé dans tous les mélanges. Du point de vue économique, des remplacements élevés de ciment par laitier 50%, aurait comme conséquence un matériau moins cher. Ceci d'une manière générale 'équilibrer le coût 'accru ' dû à l'inclusion du plastifiant dans le mélange.

5.3 Matériaux.

Cette section décrit les matières employées dans tout ce programme de recherche.

5.3.1 Ciment.

Le ciment portland utilise est CPA 325, de surface spécifique 3500 cm²/g et de densité 3.2. Le tableau ci-dessous illustre la composition chimique et sa composition minéralogique du ciment produit a la cimenterie d'oued Sly (Chlef).

Tableau 5.1 Composition chimique du ciment CPA

OXDES	CPA	Laitier
SiO ₂	20.50	33.92
Al ₂ O ₃	4.93	11.86
Fe ₂ O ₃	2,81	1.31
CaO	60.90	41.33
MgO	0.95	8.17
Mno	0.95	0.63
SO ₃	2.34	1.44
K ₂ O	0,69	0.40
Na ₂ O	0,15	0.27
PF	5.82	
CaO libre	1.01	
Essais physiques		
Surface spécifique (m ² /kg)	350	450
Masse volumique absolue	3.2	2.9

5.3.2 Laitier

Le laitier utilisé dans notre recherche est un sous produit de la production de la fonte du complexe sidérurgique d'El-Hadjar (Annaba), a une forme de sable, de granulométrie 0-3 mm, de couleur claire, de masse volumique apparente de 1000 Kg/m³ et de masse volumique absolue de 2900 Kg/m³. Le laitier provient principalement de la granulation du laitier de haut fourneau, selon la qualité des fontes désirées et en fonction des minerais de fer enfournés, la composition chimique du laitier et la température de coulées du laitier varie dans les proportions sensibles. La composition chimique du laitier d'El-Hadjar est donnée au tableau 2.1. La finesse de mouture est (environ 4100 cm²/g) a été obtenu par un broyage dans un broyeur a boulets au laboratoire de MDC a l'université de Chlef.

5.3.3 Super plastifiant.

Le Super plastifiant, haut réducteur d'eau, conforme à la norme NF EN 934-2, le Viscocrete 3045 (Sika France SA.) à base de polycarboxylate modifiés, qui se présente sous la forme d'un liquide marron. Il permet de maintenir l'ouvrabilité du béton plus d'une heure et d'obtenir des résistances mécaniques élevées à court terme, améliore la stabilité, limite les risques de ségrégation. Sa densité est de 1.11, sa teneur en ions chlorés est inférieure à 0.1% et il possède 36,4% d'extrait sec. Son dosage peut varier de 0.25 à 2.5% de la masse de ciment selon l'effet souhaité.

5.3.4 L'eau de gâchage.

Pour la confection des bétons, nous avons utilisé de l'eau potable du robinet.

5.3.5 Sable

Dans la présente étude un seul type de sable provenant d'Oued de Baba Ali. Le sable a été séché et tamisé plusieurs fois par une tamiseuse électrique. La caractérisation du sable a été réalisée au sein du laboratoire de l'université de Chlef. L'analyse granulométrique du sable a été réalisée conformément à la norme NF P18-560 [122] dont les résultats sont présentés dans la figure 5.1. Le module de finesse de ce sable est de 2.4.

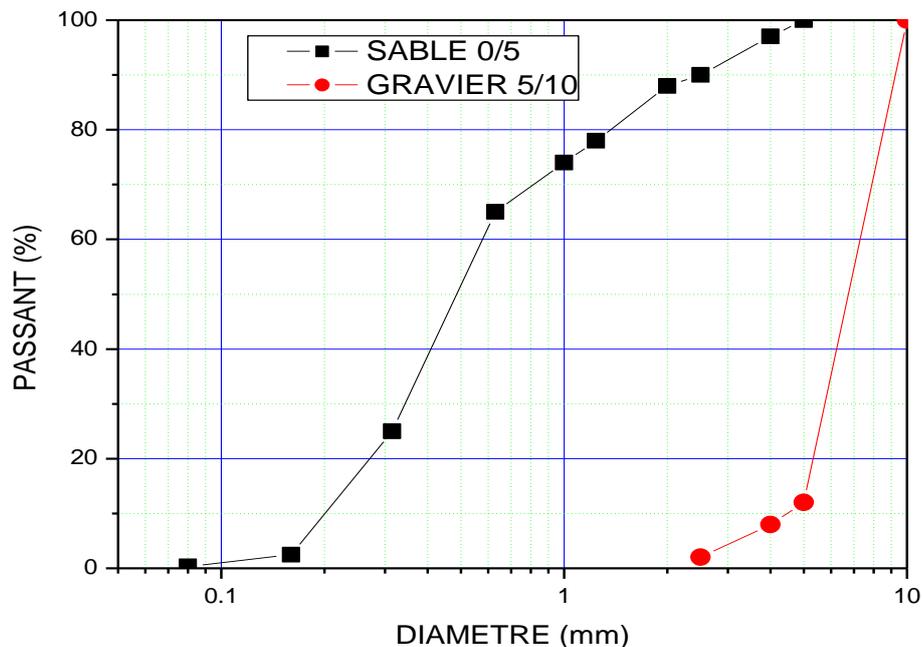


Figure 5.1 Courbe granulométrique du sable et du gravier

5.3.6 Gravier

Le gravier utilisé est un gravier de diamètre maximal 10 mm. Le gravier est dans la plupart du temps roulé à angulaire dans la forme.

5.4 Procédé et confection du béton

Les quantités calculées des différents matériaux ont été pesées et placées dans le malaxeur. Les différentes méthodes de combinaison des constituants ont été essayées mais la méthode suivante s'est avérée que le mélange produit est homogène et sans ségrégation. Le gravier est placé le premier dans le malaxeur suivi du ciment, le laitier, et les granulats fins sont ajoutés en dernier. Les matériaux étaient alors mélangés à secs pour environ une minute. Une moitié de la quantité de l'eau a été alors ajoutée et malaxer pendant environ une minute et le reste de l'eau a été alors ajouté et mélangé pour une autre minute, superplastifiant est ajouté directement au mélange car cette méthode donne une meilleure plasticité que lorsque le mélange a été mélangé avec de l'eau. Le mélange a été continué pour une autre minute. La plasticité des mélanges a été prise avant et après l'addition de superplastifiant.

Tous les bétons ont été remplis dans les moules en acier qui ont été légèrement huilés. Avant que les bétons ne soient transférés dans les moules et remplis à raison de deux couches égales, la densité fraîche du béton a été également prise, d'après le code BS 1881/partie 2 (95). Seulement la vibration externe était nécessaire en raison de la grande ouvrabilité réalisée pour tous les bétons (supérieure à 100mm). Après, les bétons étaient lisses. Toutes les éprouvettes sont ensuite couvertes de feuille de polythène et placées dans le laboratoire pendant approximativement 24 heures avant le démoulage. Toutes les éprouvettes ont été conservées dans l'eau et examinées selon les règles B.S 1881 (95), et à chaque âge trois des éprouvettes ont été examinées.

5.5 Confection du béton.

Comme décrit plus tôt dans la section 5.2, une des conditions pour la confection du béton est de produire une résistance à la compression à 28 jours dans la condition de cure dans l'eau de 30, 40 et 60 MPa" avec un remplacement de 50% de ciment par le laitier. Pour développer les mélanges de béton contenant du laitier pour satisfaire les conditions indiquées dans la section 5.2, on a effectué plusieurs tests et modifications aux proportions originales. Il est utile de remarquer que le fait de cette augmentation du laitier donne une diminution de la

résistance à la compression. Cependant, dans cette recherche, l'utilisation combinée de super plastifiant et de plus avec un remplacement de (50%) a permis d'égaliser la résistance au jeune âge et à long terme du béton sans ajout. L'autre avantage principal de l'utilisation du super plastifiant est l'augmentation de l'ouvrabilité des bétons (supérieure à 100mm), malgré la réduction de la teneur en eau. Les détails et les conceptions choisies du béton sont donnés sous forme de tableaux 5.2 et 5.3 respectivement.

Table 5.2 : détails et propriétés du béton à l'état frais.

Résistance	30 (MPa)	30 (MPa)	40 (MPa)	40 (MPa)	50 (MPa)	50 (MPa)
Remplacement	0	50	0	50	0	50
CPA	260	134	300	164	360	200
Laitier (kg/m ³)	0	134	0	164	0	200
CPA+Laitier (kg/m ³)	260	268	300	328	360	400
Sable (kg/m ³)	750	750	710	710	650	650
Gravier (kg/m ³)	1100	1100	1068	1068	1011	1011
Sable+gravier (kg/m ³)	1850	1850	1778	1778	1661	1661
A/C [*]	6.90	6.90	5.42	5.42	4.15	4.15
S/S+G ^{**}	40	40	40	40	39	39
E/C+L ^{***}	0.62	0.55	0.50	0.42	0.55	0.32
Sup ⁺	1.6	1.6	1.7	1.7	1.8	1.8
Slump, mm	55	155	60	>160	60	>160

*A/C = Sable + Gravier/Ciment

** S/S+G = Sable / (Sable+gravier)

*** E/C+L = Eau / (Ciment+Laitier)

Sup⁺ 1.80 du poids du (Ciment + Laitier)

Table 5.3: mixes choisie et développement de la résistance.

Mixe N°	SP (%)	E/C+L	Slump (mm)	Résistance à la compression (N/mm ²)			
				1j	3j	7j	28j
R30	1.7	0.61	160	9.3	14.8	25.2	35.8
R40	1.8	0.43	140	12.9	26.7	33.3	41.5
R50	1.8	0.31	165	15.6	27.9	38.2	57.7

5.6 Études de préliminaire : Résultats et discussion.

Après avoir obtenu les proportions du béton pour les diverses résistances plusieurs autres bétons ont été moulés pour observer si les résultats obtenus jusqu'ici étaient reproductibles. En plus de cela, les résultats étaient nécessaires également pour produire un diagramme de conception du béton pour faciliter la confection du mélange pour le reste du programme de recherche.

L'étude préliminaire nous a permis d'étudier et examiner les propriétés du béton à l'état frais et durcis jusqu'à l'âge de 28 jours. Les propriétés regardées étaient, ouvrabilité, densité et le développement de la résistance du béton durci. Les détails des propriétés mécanique de ce type de béton en relation avec différentes conditions de cure et âges est discuté au chapitre 6.

5.6.1 Ouvrabilité

Une des conditions de la conception du mélange de béton au laitier est de produire un mélange ouvrable supérieur de 100 mm, de sorte que le béton puisse être facilement placé et compacté. Pour atteindre cet objectif, tous les mélanges de béton de laitier contiennent un super plastifiant.

L'ouvrabilité du béton de laitier a été déterminée par l'essai de cône d'Brahm's, avant et après. Tous les mélanges ont montré une bonne cohésion et aucune ségrégation n'a été détectée. Avant que le super plastifiant ait été ajouté, l'ouvrabilité des bétons se sont étendues entre 0-10mm, après l'addition tous les bétons fluidifiés et ont donné un affaissement allant de 130-200 mm. Bien que l'ouvrabilité très élevée de ces bétons puisse ne pas être nécessaire dans toutes les situations, et soient très souhaitables pour des bétons incorporant les fibres en acier et sections minces. On l'accepte généralement que l'ouvrabilité du béton de laitier tend à être meilleur que celui du béton normal sans le laitier. Puisque les mélanges de béton utilisés dans la recherche ont été conçus sur le remplacement du ciment par le laitier sur une base égale de poids, le volume de pâte des mélanges augmente et par conséquent l'écoulement, des

caractéristiques des bétons a été augmenté. Indépendamment de celle, l'action roulement à billes des particules de laitier a également contribué a amélioré l'ouvrabilité des mélanges (section 1.5.1).

L'utilisation d'une teneur en eau minimum a beaucoup d'avantages parce qu'un béton durable peut être assuré par une très faible teneur en eau au commencement, réduira par conséquent la ségrégation, le retrait et la perméabilité. Une plus grande durabilité signifie également une plus grande résistance à l'acide et à l'attaque des sulfates et à la réaction alkali silice.

5.6.2 Densité du béton frais

La densité fraîche du mélange de béton de laitier également prise, selon B.S 1881 : Partie 2 (95). La densité fraîche de béton au laitier contenant un superplastifiant est environ de 2330-2355 kg/m³. Pour la conception, la densité fraîche du béton au laitier peut-être prise comme 2340 Kg/m³. Quelques résultats typiques de la densité fraîche des mélanges de béton de laitier sont montrés dans le tableau 5.4.

Tableau 5.4 : Mesures de slump test et la masse volumique du béton au laitier.

Mixe N°	Slump (mm)		Masse volumique (Kg/m ³)
	Avant Sp* . Addn.	Après Sp. Addn.	
R30-1	10	170	2300
R30-2	10	155	2335
R30-3	10	200	2310
R30	0	160	2310
R40-1	0	180	2350
R40-2	0	160	2335
R40-3	0	130	2335
R40	0	160	2335
R50-1	0	180	2335
R50-2	0	160	2345
R50-3	0	130	2345
R50	0	160	2350

Sp* - Superplastifiant

5.6.3 Résistance à la compression : Uniformité des résultats.

Le tableau 5.5 montre les résultats du développement de la résistance du béton de laitier obtenu lors l'étude préliminaire, sans exception tous les échantillons examinés pendant cette période ont atteint leur résistance requise à 28 jours. Les résultats ont montré que le béton de laitier peut être conçu pour donner des résultats très performants. Le taux du développement de résistance du béton de laitier est montré dans le tableau 5.6. , dont on peut voir que le taux de développement de la résistance du béton au 1, 3 et au 7 jour, exprimés comme pourcentage de la résistance de 28 jours, augmente à mesure que la résistance augmente. Les résultats indiquent que pour une proportion judicieuse du mélange du béton, un développement relativement élevé de résistance comparé à celui du béton conventionnel peuvent être atteint, ainsi elle remplit une des conditions de la conception de mélange de béton (voir la section 5.2).L'incorporation combinée d'un super plastifiant et d'un remplacement élevé de laitier dans un béton semble être bénéfique au développement de la résistance au jeune age et à long terme. On le croit que l'influence du super plastifiant doit améliorer la résistance à la compression au jeune age du béton de laitier, et l'activité pouzzolane lente des particules de laitier est un avantage supplémentaire pour les développements ultérieure de résistance (49). Le tableau 5.2 et 5.6 montrent également qu'avec une teneur modérée en ciment de 200 kg/m^3 et un poids semblable de laitier, il est possible de produire le béton de haute résistance de l'ordre de 50 N/mm^2 ou plus. Le point intéressant à note au sujet de ce béton est que l'ouvrabilité du mélange est supérieure à 100 mm (voir le tableau 5.4). Des résultats semblables ont été obtenus par Swamy et Mahmud (49) qui a employé une teneur en ciment de 233 kg/m^3 et de 233 kg/m^3 des cendres volantes dans leur étude. Ces résultats indiquent que la réduction de l'eau provoquer par l'addition des super plastifiant a entraîné une réduction du rapport eau/c+slag par rapport aux mélange du ciment ce qui montre que les particules de laitier produisent un meilleur effet de remplisseur qu'un hydrate des grains de ciment, ce qui contribue au développement de la résistance (49).

Tableau 5.5 : Développement de la résistance du béton au laitier.

Résistance recherche (N/mm ²)	Résistance à la compression exprimée en % de la résistance de 28 jours.			
	1j	3j	7j	28j
R30	28	50	68	100
R40	30	61	70	100
R50	33	49	71	100

Tableau 5.6 : Taux du développement de la résistance de La compression.

Mixe N ⁰	Résistance à la compression (N/mm ²)			
	1j	3j	7j	28j
R30-1	8.0	10.5	28.9	38.0
R30-2	6.2	7.9	14.3	31.1
R30-3	8.1	11.9	21.5	32.5
R30	7.3	12.5	22.4	32.4
R40-1	13.1	30.1	40.3	53.7
R40-2	10.9	27.1	38.7	50.3
R40-3	11.4	21.4	28.0	40.2
R40	12.8	25.9	31.3	42.5
R50-1	23.1	39.9	48.7	57.3
R50-2	19.5	29.2	40.3	51.0
R50-3	22.0	30.4	39.9	56.3
R50	17.8	26.0	37.8	53.5

5.6.4 Diagramme de conception des mélanges

Les essais des mélanges et des résultats obtenus en études préliminaires, ont montré qu'il était possible de produire un diagramme de conception de mélange pour faciliter le dosage du béton pour le reste de notre de recherches. Figure 5.2 est un exemple d'un diagramme typique, le résultat de toutes les données rassemblées pendant cette recherche.

Le diagramme est une approche graphique et tabulaire simple, conçue sur la base que tous les mélanges avaient au commencement peu ou pas d'etalllement (0-10). L'incorporation d'un super plastifiant est nécessaire pour obtenir n'importe quelle ouvrabilité désirée. Il serait possible de préciser que la variabilité entre différentes sources des laitiers, granulométrie des granulats, type de ciment, etc., signifie qu'il serait impossible de produire un diagramme simple de conception de mélange, pour toutes les différentes sources de laitier. Dans le meilleur des cas, différents diagrammes doivent être produits pour chaque source de laitier. Comme avec n'importe quel autre diagramme de conception de mélange, les mélanges d'essai initiaux sont nécessaires pour obtenir un béton avec une condition spécifique, et ce diagramme peut fournir une technique simple pour le dosage du béton.

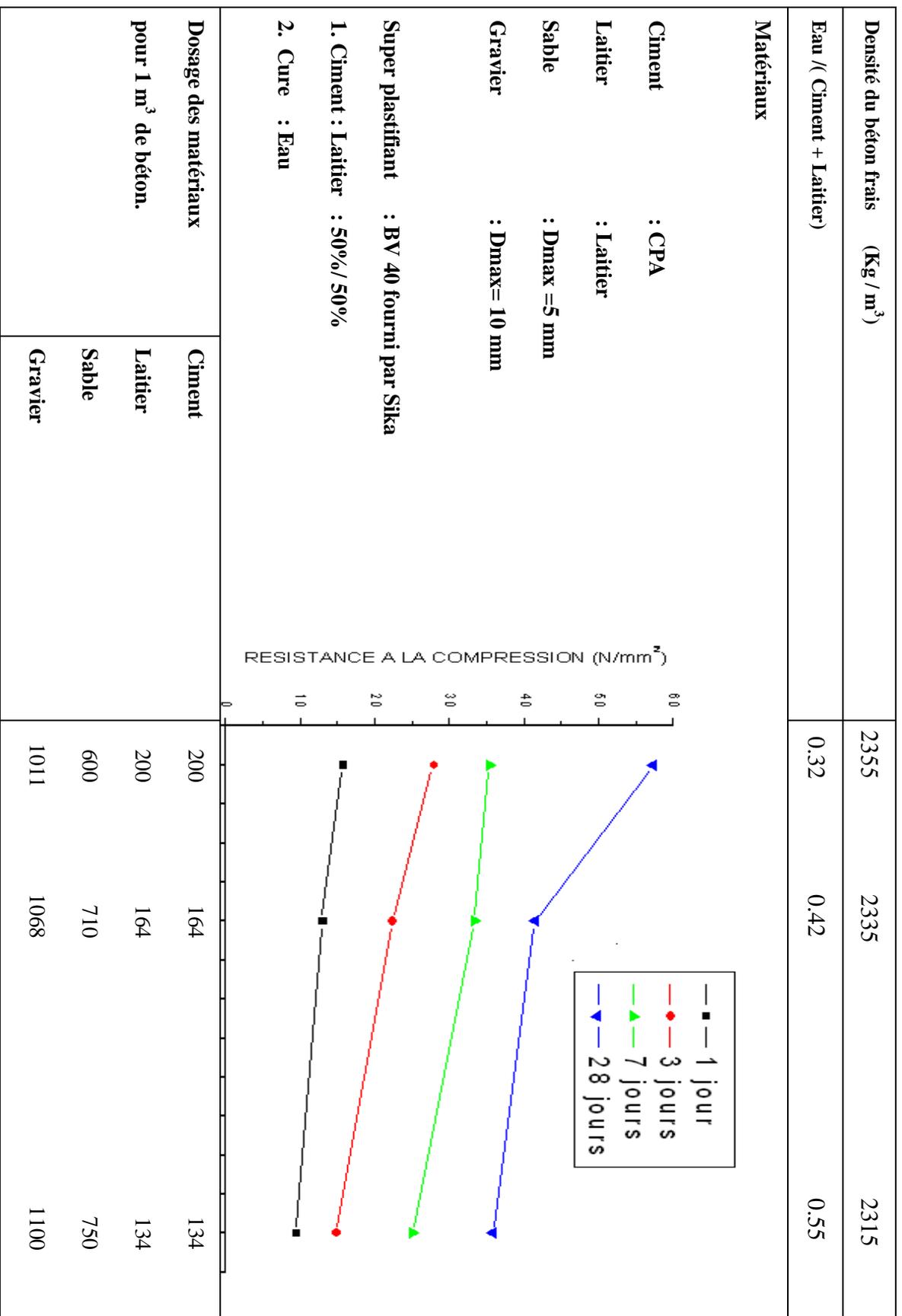


Fig.5.2 : Formulation du mélange du béton au laitier traité dans la condition de cure à l'eau

5.7 Conclusion

Les conclusions suivantes peuvent être déduites de ce travail :

1. tous les mélanges ont montré une bonne ouvrabilité. La plasticité mesurée était dans la gamme de 130-200mm. en dépit d'être réalisable, la cohésion et de l'uniformité exhibée par les mélanges n'a montré aucune ségrégation.
2. le contenu total de ciment est augmente d'environ 10%
3. la densité fraîche du béton au laitier est de, 2340 kg/m³.
4. le béton au laitier a développé 21-33%, 44-56% et 61-71% de la résistance de 28 jours à 1, 3 et 7 jours respectivement. En général, un béton durable développé une résistance élevé à une vitesse plus rapide.
5. béton au laitier avec un contenu modéré de ciment de 233 kg/m³ et avec l'augmentation du contenu total ciment de laitier, peuvent produire l béton de haute performance de résistance de 50 Mpa à 28 jours.

CHAPITRE 6

Les caractéristiques du béton à 50% de laitier Contenant un superplastifiant.

6.1 Introduction.

Dans le chapitre précédent, un diagramme a été développé afin d'obtenir des résistances de compression du béton à 28 jours allant de 30 N/mm^2 à 50 N/mm^2 .

Dans ce chapitre, les résultats du travail continu sont reportés, afin d'établir les propriétés mécaniques de ces bétons ayant un haut niveau de remplacement du ciment par le laitier. La résistance à la compression, traction, flexion, modules d'élasticité, retrait et gonflement à court terme et à long terme. Ces propriétés étaient en relation avec différentes conditions de cure.

La résistance à la traction est déterminée par des essais de traction par fendage sur des prismes et des tests de traction par fendage sur des cylindres. Les modules d'élasticité sont déterminés par des méthodes statistiques.

6.2 Programme expérimental.

6.2.1 Buts et grandes lignes du programme des essais.

Le but de cette partie de la recherche est d'étudier la variation de la résistance avec l'âge et sous des conditions différentes de cure.

Des informations sont collectées jusqu'à une année et des relations entre les différents paramètres de résistances sont établies. Les résultats relevés et classifiés sont la moyenne de la lecture de trois spécimens, sauf ceux autrement spécifiés.

6.2.2 Taille des spécimens.

Les éprouvettes sont testées conformément au code BS 1881 [65] : Les dimensions des éprouvettes sont les suivants :

- a) Cubes $100 \times 100 \times 100 \text{ mm}$ pour les essais de compression.
- b) Prismes $100 \times 100 \times 500 \text{ mm}$ pour les essais de flexions.

- c) Prismes 100x100x300 mm pour les modules statiques d'élasticité.
- d) 100x200 cylindres pour la traction par fendage.

6.2.3 Conditions de traitement.

Afin d'étudier l'effet des différentes conditions sur la résistance et propriété élasticité du béton au laitier avec un niveau de remplacement élevé, trois régimes de traitement ont été choisis :

- 1) Traitement Humide à $20 \pm 2^\circ\text{C}$ et $100 \pm 2\%$ R.H (Eau)
- 2) Des conditions de laboratoire internes incontrôlées (Lab)
- 3) Sept jours à l'eau suivis d'un traitement dans la condition interne incontrôlée (7Eau+ Lab)

Les tests de flexions, traction, et module d'élasticité sont faits sur des éprouvettes établis sous des conditions traitées (1) et (2).

6.2.4 Confection des éprouvettes.

Le matériel utilisé et la confection du mélange étaient les mêmes que ceux détaillés dans le chapitre précédent, section 5.4. La formulation du mélange est faite conformément au diagramme de la Fig. 3.2.

Tout les spécimens sont coulés dans des moules d'acier dans deux couches approximativement égales. Une vibration extérieure est seulement utilisée à cause de l'ouvrabilité élevée dans tous les mélanges (le slumps supérieure à 150 mm). Les moules étaient couverts par des couches de polythène humide et laissés dans le laboratoire pour une durée approximative de 24 heures. Puis, les éprouvettes sont sortis des moules et transportés vers leurs régimes en cours jusqu'à leurs test.

6.2.5 Instrumentation et procédure des tests.

6.2.5.1 Résistances à la compression, résistance à la traction, et l'essai de la résistance à la flexion.

Des tests d'écrasement de cubes pour obtenir la résistance de compression, et la résistance de traction sur des prismes et des tests de flexion sur des prismes sont faits conformément au code BS 1881 : part 4 (95). Des éprouvettes sont testées à 1 jour, 7jour et 28 jours, 6 mois, 9 mois et une année. Les résultats relevés et classifiés sont la moyenne de trois tests.

6.2.5.2 Modules d'élasticité

L'essai du module d'élasticité statique est conduit conformément au code B.S 1881: Part 5 [95]. Pour chaque résistance du béton, deux modules d'élasticité statique sont testés à 28 jours. Dans l'essai de module d'élasticité statique, les plots sont fixes à 100mm, le long de l'axe longitudinal sur les deux faces de chaque prisme. La lecture de l'allongement est prise à l'aide d'un comparateur de précision de 16.0×10^{-6} m/m allongement.

6.3 Résistance à la compression : résultats et discussion.

Sous des conditions de traitement standard, le béton au laitier peut être formulée pour avoir n'importe quelle résistance, et des résistances supérieure à 100 N/mm^2 sont récemment reportés (123).

Jusqu'à un passé proche l'incertitude a existé sur l'effet du le laitier sur le développement de la résistance. Au cours des années, plusieurs chercheurs ont fait des études comparatives sur le comportement entre le béton normal et le béton de laitier, ce dernier type de béton étant basé sur un remplacement partiel du ciment par le laitier dans le premier mélange. Ce qui a conduit a des rapports non- conclusifs montrant que l'ajout du laitier dans le béton donne une résistance plus faible et un taux de gain de résistance plus long. La raison de cela est que les deux bétons sont comparés sur une résistance inégale à 28 jours. C'est un age typique pour mesurer la résistance, alors il est nécessaire que la comparaison entre les bétons doive être faite sur des résistances égales et teste au même age.

Dans cette section, l'effet de l'age et les conditions de traitement sur la résistance à la compression du béton avec un niveau élevée de laitier sont discute et ou, des comparaisons sont faites avec un béton ordinaire de résistance similaire a 28 jours.

6.3.1 Résistance à la compression au jeune age et à 28 jours.

Une des exigences du design du mélange du béton du laitier, comme détaillé dans la section 2.2.1, est d'assurer un développement de résistance très élevée au jeune age, comparée à celui du béton ordinaire sans laitier. Le tableau 6.1 et 6.2 montrent les résultats sur la résistance à la compression et le taux de développement de la résistance du béton au laitier. Les résultats des tableaux ci-dessus indiquent que si la formulation

des mélanges est préparé dans cet objectif, la vitesse du développement de la résistance du béton contenant 50% de ciment par le laitier, peut être assurée comme étant similaire que celle du béton conventionnel. L'une des raisons de la haute résistance au jeune âge trouvée dans ce travail de recherche peut être attribuée au faible rapport Eau/Ciment composé des mélanges due à l'incorporation d'un niveau élevé de laitier, du superplastifiant et la finesse de mouture comme mentionné auparavant, les particules sphériques du laitier apportent une réduction importante en eau, ces effets peuvent être largement observés dans le béton de haute performance. L'utilisation d'un superplastifiant et la finesse de la mouture permettent de rassembler les particules ensemble en augmentant leur compacité ce qui conduit à l'augmentation de la résistance du béton au jeune âge. Cet aspect de la résistance au jeune âge, possède des applications pratiques en termes de démoulage, des charges appliquées au début de la construction, avant que la fissuration provoquée par les mouvements au jeune âge. Sachant que la chaleur d'hydratation du béton au laitier est beaucoup moindre que les bétons conventionnels, l'incorporation du laitier dans les bétons peut donner d'innombrables bénéfices pour les caractéristiques performantes du béton.

Les figures 6.1 et 6.2 montrent la relation entre la résistance à la compression à 28 jours et le ratio du total d'eau sur le ciment composé et la teneur en ciment composé. Les résultats montrent que pour n'importe quel ratio en eau sur le ciment, le béton traité pendant 7 jours dans l'eau, puis laissé dans un environnement interne incontrôlé, montre la plus grande résistance, environ 1 à 8% ou plus que le traitement continu dans l'eau et entre 11 et 6% sur ceux continuellement posés dans un environnement interne incontrôlé. Ces informations indiquent que le traitement par l'air précède par un traitement dans la condition humide, même pour une courte durée, à des effets positifs au développement de la résistance. Ces résultats sont égaux à ceux de Swamy et al (32) qui ont étudié l'effet d'un traitement initial de 3 jours sur le béton avec de la cendre volante. Ils indiquent que la résistance à la compression et la flexion était supérieure aux valeurs obtenues par un traitement continu en eau, même si les résultats sont modestes.

Le tableau 6.1 et les figures 6.2 et 6.3 montrent également que les spécimens du béton au laitier soumis à un traitement continu à l'air après l'enlèvement des moules, n'ont pas atteint leur résistance visée de 28 jours sauf dans le cas du béton 30 N/mm².

Les bétons 40 et 50 N/mm² n'ont pas pu atteindre leurs résistances demandées respectivement de 3 et 10%. L'importance du traitement en eau et le besoin d'empêcher la perte d'humidité au jeune âge est clairement indiquée par ces figures. C'est cela qui est pratiqué en général dans l'industrie de construction, où le coffrage est normalement tenu pour peu de jours avant le décoffrage et c'est pour cela que les bétons sont préservés dans l'humidité dans leurs premiers jours.

Tableau 6.1: développement de la résistance du béton au laitier.

Mixe N°.	Age (jours)	E/L+C	Résistance à la compression (N/mm ²)		
			Eau	Lab	7Eau+Lab
R30	1	0.55	7.3	5.2	4.00
R40	1	0.42	12.8	11.9	12.1
R50	1	0.35	17.8	15.1	16.1
R30	7	0.55	22.4	23.1	22.9
R40	7	0.42	31.3	31.3	31.1
R50	7	0.35	37.8	37.7	39.1
R30	28	0.55	32.4	28.9	33.2
R40	28	0.42	42.5	38.7	44.3
R50	28	0.35	53.5	48.8	54.1
R30	180	0.55	51.8	33.9	35.6
R40	180	0.42	63.4	43.4	47.1
R50	180	0.35	75.5	55.3	66.0
B30	270	0.55	54.3	40.2	46.3
R40	270	0.42	69.5	47.3	55.4
R50	270	0.35	78.8	58.5	66.7
R30	365	0.55	57.8	31.5	35.2
R40	365	0.42	75.3	48.7	53.1
R50	365	0.35	82.5	62.9	69.0

Tableau 6.2: Gain de la résistance à la compression comme pourcentage à celle a 28j.

AGE (Days)	R30 (%)			R40 (%)			R50 (%)		
	Eau	Lab	7Eau+Lab	Eau	Lab	7Eau+Lab	Eau	Lab	7Eau+Lab
1	22	18	12	30	31	27	33	31	30
7	69	80	69	74	81	70	71	77	72
28	100	100	100	100	100	100	100	100	100
180	160	117	107	149	112	106	141	113	122
270	168	119	112	163	122	112	147	116	123
365	178	123	106	171	120	120	154	119	122

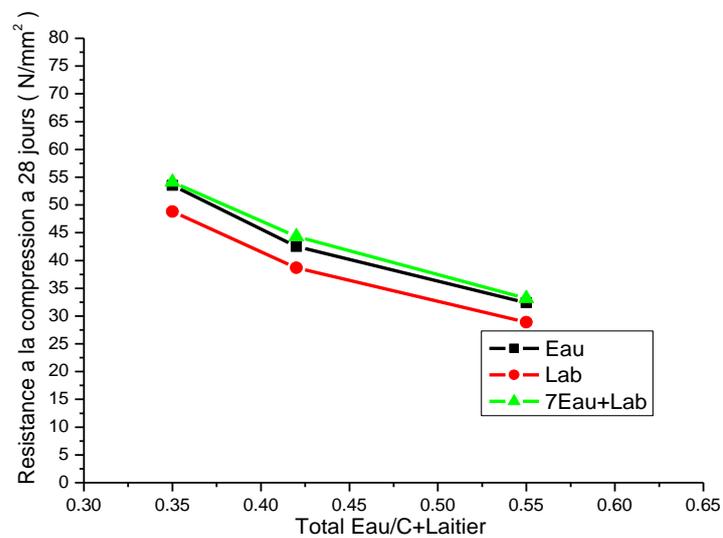


Fig.6.1 Relation entre resistance a la compression et total Eau/C + Laitier

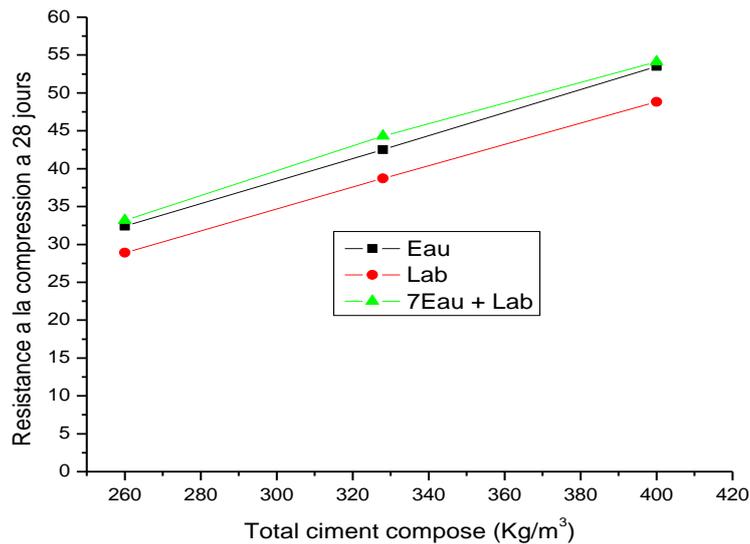


Fig. 6.2 Influence de la quantité de ciment total sur la résistance à la compression

6.3.2 Effet de la condition de la cure sur la résistance à longs termes.

Pour étudier l'effet de la condition de cure sur la résistance à longs termes des propriétés des bétons avec un niveau élevé du laitier, les essais de compressions sont testés durant une année. Les résultats sont présentés dans les tableaux 6.1 et 6.2 et dans les figures 6.3-6.5. Ces informations indiquent que le type de cure a des effets significatifs sur le développement de la résistance du béton avec un niveau élevée du laitier. Sous un traitement humide, il y a une augmentation continue de la résistance avec le temps et cela pour les trois bétons. Les spécimens montrent également une résistance plus importante avec l'âge (au-delà de 28 jours) plus que les deux autres conditions de cure. Ces observations indiquent le potentiel d'augmentation de résistance à longs termes pour le béton au laitier avec un contact continue avec l'humidité. Les deux autres régimes de traitement montrent également une tendance à la hausse d'environ 12 mois, à travers lesquels il y avait une rétrogression de la résistance. L'exception du béton 30 N/mm^2 traité dans un environnement interne incontrôlé, pour lequel une baisse de résistance était notée au 12^{eme} mois. Les informations collectées indiquent également que le béton continuellement traité dans le laboratoire dans un environnement sec, montre la plus faible résistance et représente l'effet des pires conditions de traitement possible dans la pratique, tous les bétons ont atteint leur résistance désirée en une année. Ces résultats ont plusieurs implications pratiques. Afin d'avoir une

augmentation de résistance continue et régulière, le béton à haute concentration de laitier et un superplastifiant doivent avoir, comme le béton ordinaire, la présence d'humidité durant leur vie afin de continuer le processus d'hydratation. Le traitement initial avec l'humidité durant sept jours peut résoudre ce problème, c'est également une méthode alternative que de couvrir le béton avec un composant traité. Dans l'industrie de construction, le coffrage est normalement tenu jusqu'à une semaine et de cette manière, on peut garder l'humidité initiale. Les éprouvettes traitées initialement avec l'humidité pour sept jours suivies par une cure à l'air et les éprouvettes traitées continuellement à l'humidité, ont atteint leurs résistances à 28 jours. Sans considération aux conditions de traitement, tous les bétons ont maintenu leur résistance demandée durant une année.

Les taux de développement de résistance exprimée comme un pourcentage de 28 jours sont établis dans les tableaux 6.2. Les données montrent que pour les éprouvettes traitées dans la condition humide ; avec un dosage élevé du ciment composé conduit à une résistance élevée, et une augmentation de la résistance jusqu'à 28 jours. Le contraire est vrai, après 28 jours, le béton le plus dense est le béton le plus faible en ce qui concerne le taux de développement de la résistance. Le pourcentage de gain en résistance du béton à haute résistance peut être plus bas que la résistance du béton avec faible résistance, cependant ; l'ordre de magnitude de gain de résistance est hautement plus important. Par exemple ; le facteur d'augmentation de résistance pour le 30 et 50 N/mm² du 1^{er} jour à une année est de 8 et 4.6, mais en termes d'augmentation de résistance, il est de 50.5 et 64.7 N/mm² respectif. La résistance augmente en une année comme pourcentage de 28 jours est de 78%, 71% et 54% pour la résistance de béton de 30, 40 et 60 N/mm² respectifs. Ceci est largement dû à l'effet combiné d'un traitement continu en humidité et leur activité latente du laitier. Dans le béton ordinaire sans le laitier, la figure est dans la région de 10 à 40% (102). Pour les deux autres régimes de traitement, bien qu'une réduction de résistance soit enregistrée après 09 mois, le béton montre une augmentation de résistance dans une année de 6 à 20% au-delà de la résistance de 28 jours. Le ratio de l'effet de la cure sur la résistance à la compression est montré dans le tableau 6.3. Le ratio de la résistance à la compression traité dans l'air sur celle traité dans le milieu humide et celle traitée 7 jours dans le milieu humide suivie d'un traitement dans l'air sont montrées dans la colonne 3 et 4. Les informations prises de ces deux colonnes

indiquent qu'il y a une relation entre la résistance et l'âge du béton. Les données montrent que indépendamment de la résistance du béton, le ratio diminue avec l'augmentation de l'âge et pour les âges dépassants 28 jours, le ratio augmente avec l'augmentation de la résistance. La colonne 5 réitère la nature imprédictible des spécimens traités dans l'air, spécialement après 9 mois et désormais aucune tendance à la hausse ne peut être constatée. Mais, les informations ont indiqué que les spécimens ayant 7 jours de traitement initial avec l'humidité suivis par une cure à l'air ont une résistance à tous les âges plus forts de 10 à 30% que ceux qui n'ont pas subi un traitement avec l'eau.

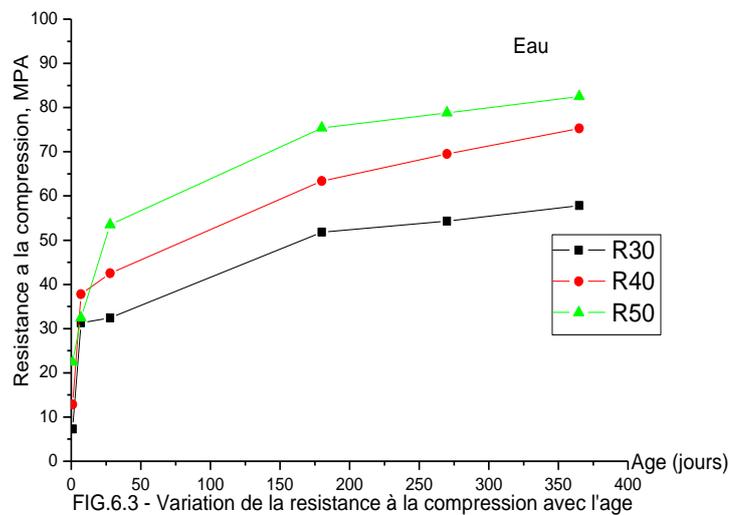


FIG.6.3 - Variation de la résistance à la compression avec l'âge

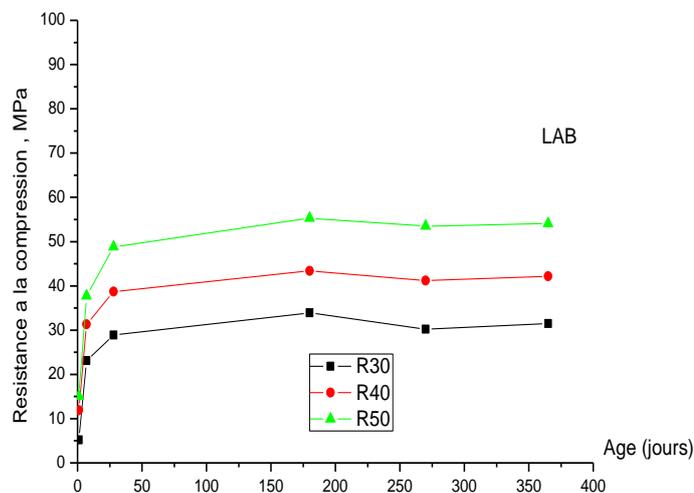


Fig. 6.4 Variation ente la résistance à la compression avec l'âge

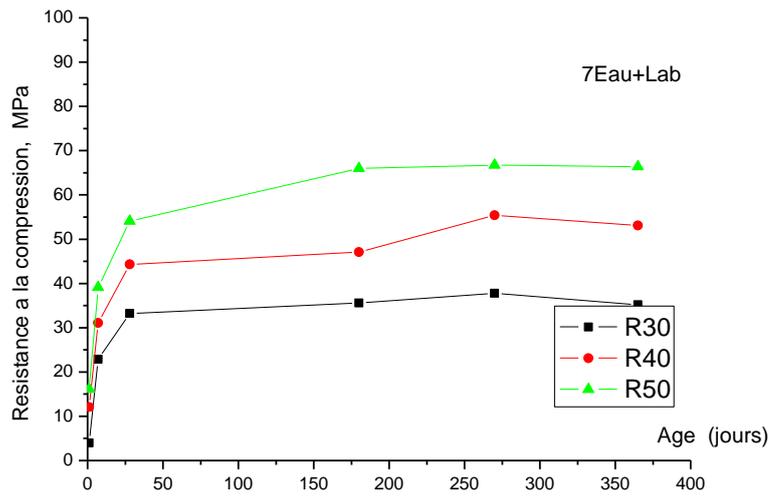


FIG. 6.5 Variation entre la résistance à la compression avec l'age

Tableau 6.3 : Effet de la cure sur la résistance à la compression

Mix N°	Age (Jours)	Resistance à la compression Ratio		
		Lab/Eau	7Eau+Lab/Eau	7Eau+Lab/Lab
R30	1	-	-	-
R30	7	1.07	-	-
R30	28	0.86	1.09	1.27
R30	180	0.59	0.64	1.09
R30	270	0.57	0.63	1.23
R30	365	0.49	0.59	1.22
R40	1	-	-	-
R40	7	0.95	-	-
R40	28	0.81	1.02	1.26
R40	180	0.73	0.82	1.13
R40	270	0.63	0.79	1.18
R40	365	0.65	0.67	1.04
R50	1	-	-	-
R50	7	0.98	-	-
R50	28	0.98	1.16	1.18
R50	180	0.70	0.83	1.18
R50	270	0.56	0.77	1.37
R50	365	0.56	0.72	1.28

6.3.3 Effet d'introduction d'humidité après un séchage prolongé.

Afin d'étudier l'effet d'introduction d'humidité après un séchage prolongé d'un béton contenant un niveau élevée de laitier, une investigation a été faite visant l'établissement du fait qu'une telle action peut conduire à la régénération de la résistance. Des testes étaient faits sur un béton de résistance 30 N/mm^2 . Les éprouvettes étaient initialement traitées dans l'eau durant 7 jours et, ensuite, laissés sécher dans un environnement interne incontrôlé pour 2 années et 3 mois environs. A la fin de cette période de cure, les spécimens étaient mis dans l'eau une seconde fois. A chaque phase de traitement, le développement de la résistance à la compression était surveillé et les résultats sont transcrits au tableau 6.4. Les résistances à la flexion du béton sujet aux mêmes conditions de traitement sont également incluses dans le tableau. Pour une fin d'identification, ce béton va être désigné par : R30.

On peut voir du tableau 6.4, qu'après l'âge de 2 ans et 6 mois, le développement de la résistance de ce béton suit un parcours similaire à celui du béton de 30 N/mm^2 traité pour 1 an dans un environnement incontrôlé (voir tableau 6.1) ce qui est attendu les deux bétons étant traités sous les mêmes conditions. Le béton R30 a atteint sa résistance désire a 28 jours et a maintenu cette résistance à 3 mois et à 2 ans et 5 mois. Ces résultats indiquent que le béton contenant un haut dosage du laitier peut maintenir sa résistance requise dans « l'absence » d'humidité durant une des longues périodes.

La Fig. 6.6 montre le développement de la résistance du béton R30. Le développement de résistance du béton de 30 N/mm^2 traité dans une cure à l'eau est porte sur la même figure, repris depuis la Fig. 7.4. Pour une fin d'identification, ce béton va être désigné par : LT30. La courbe de la Fig.6.8 montre des points d'observation intéressants :

- a) Entre les ages de 28 jours et 730 jours (2ans), le béton R20 était apte a maintenir sa force a 33 N/mm^2 i.e il n y a pas de réduction de résistance durant la période de séchage. Le béton de laitier s'hydrate à des taux faibles mais continuels.
- b) Comme il a été mentionne auparavant, a l'introduction de l'humidité, augmentation de la résistance de 56% était noté pendant tout les quatre mois qu'a duré la période d'arrosage.

- c) Lorsqu'on mouille pour la deuxième fois, le développement de la résistance du béton R30 suit de près la trajectoire prise par les éprouvettes LT30 de 30 N/mm² continuellement traités avec l'humidité. Ces résultats indiquent que la durée du béton traité dans la condition de cure sec n'est pas affectée, avec l'introduction de l'humidité, le béton au laitier va régénérer de la résistance et tenter de suivre la trajectoire de la résistance à la compression traité dans les conditions de cure à l'eau, c'est comme si rien n'est intervenu durant la période de la cure sèche.

Afin de vérifier la validité des résultats mentionnés et de voir si

L'expérimentation sur les éprouvettes séchées peut régénérer les résistances un béton à haute performance (i.e le 40 et 50 N/mm²), des essais sont conduits sur des éprouvettes faits sur des cubes d'un demi prisme de l'essai de la flexion qui ont subi un traitement dans la condition de cure sec durant une période d'un an. Les éprouvettes cassées étaient re-placées dans un traitement humide pour une autre année en plus et à la fin de cette période, des cubes de tests modifiés étaient testés. Les résistances obtenues après cette période sont, respectivement : 31.5, 48.7 et 62.9 N/mm². Les résistances des cubes d'une année de ce béton est de 31.5, 48.7 et 62.9 N/mm² (voir tableau 6.1). En dépit que ces résultats permettent quelques corrections dues aux parties des spécimens cassés, ils renforcent la conclusion disant que la réintroduction d'humidité aux spécimens traités dans un environnement sec, peut réhydrater les particules non hydratées du laitier, d'où la régénération de la résistance.

Tableau 6.4 Effet de réintroduction de l'humidité après une cure dans un environnement sec sur la résistance du béton

Age (jours)	réintroduction de l'humidité (mois)	R _c (N/mm ²)	Augmentation de la résistance pendant la période	R _f (N/mm ²)
1	-	8.3	-	0.98
7	-	16.6	-	2.70
28	-	31.4	-	3.94
94	-	32.7	-	3.98
730	-	33.0	-	3.40
760	1	40.1	21	-
790	2	45.3	37	-
910	6	41.6	56	4.58

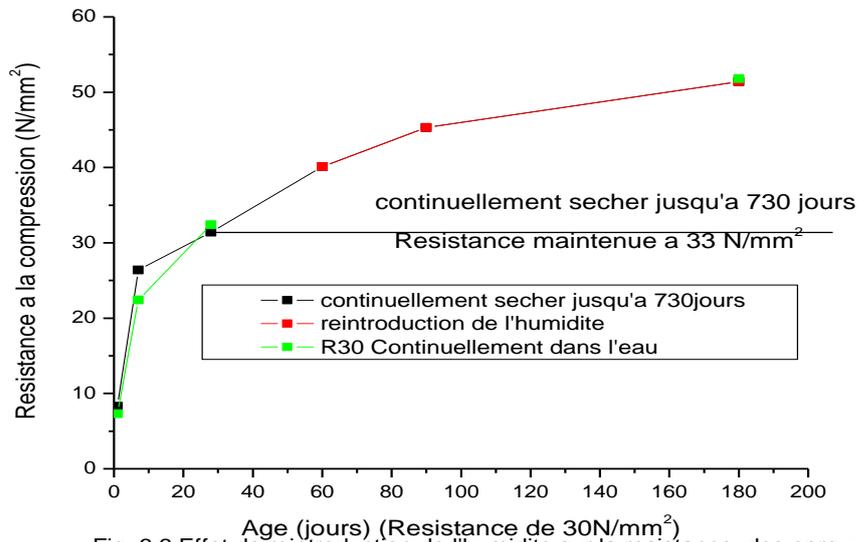


Fig. 6.6 Effet de reintroduction de l'humidite sur la resistance des eprouvette exposees dans traitement sec pour 2 ans.

6.3.4 Comparaison avec le béton ordinaire.

Les avantages et limitations du béton au laitier peuvent être clairement observés dans les tableaux 6.1 et 6.2. Les tableaux soulignent le besoin et le rôle du traitement avec l'eau dans le développement de la résistance d'un tel béton. Il sera alors intéressant de comparer le développement de résistance de ce béton avec le béton OPC ordinaire avec l'âge et les différentes conditions de traitement. Le tableau 6.5 donne des informations typiques de trois bétons OPC ordinaires conçus pour des cubes ciblés de résistance à 28 jours de 25, 40 et 60 N/mm² [123] dans la condition de cure humide. On peut constater du tableau que sous des conditions continues de traitement par l'humidité, l'augmentation de la résistance dès le 28^{ème} jour à 1 année est de 25%, 20% et 18% pour les bétons de 25,40 et 60 N/mm² respectivement. L'augmentation correspondante du béton hautement concentré en laitier est de 78%, 71% et 54% (tableau 6.2). Lorsque le béton avec du ciment portland est traité dans un milieu sec, aucun des bétons n'a atteint sa résistance au 28^{ème} jour. Ces bétons ont échoué d'atteindre leurs résistances visées par 15-27% comparé à seulement 3 à 4% pour le béton au laitier. A une année, tous les bétons étaient aptes à maintenir leurs résistances requises, et en réalité ils ont montré une augmentation modeste de leurs résistances visées (tableau 6.2). Ces résultats indiquent que : même sous un traitement de cure sec, le béton au laitier est capable de maintenir son processus d'hydratation, bien que à un taux faible. D'une autre part ; tous les bétons CPA, sans considération de leurs contenances en ciment, n'ont

particulièrement montré aucune augmentation de la résistance de 28 jours à 1 année, i.e ils agissent comme si l'hydratation est pratiquement arrêtée. La réduction de la résistance de ce béton à une année par rapport à la résistance visée, variée de 20 à 27%.

Les informations des tableaux 6.1 et 6.5 indiquent que pour un béton de mauvaise cure avec l'absence d'humidité, tous les bétons CPA vont continuer à perdre leurs résistances avec l'âge ; alors que le béton au laitier est plus capable à maintenir son processus d'hydratation même à un taux très lent. Le démoulage dans un jour et l'exposition à un séchage continu à l'air sont des conditions d'exposition extrêmes- ce qui ne peut pas arriver dans la pratique. Les avantages techniques de l'incorporation du béton au laitier dans de telles conditions sont clairement manifestes. Ce béton va assurer une longue durabilité.

Fig.6.4 et le tableau 6.1 montrent que le béton contenant 50% de laitier et un super plastifiant est capable de développer une résistance de compression 50 N/mm^2 à 28 jours et une assez haute résistance de $10-25 \text{ N/mm}^2$ de 2 à 3 jours. Un tel béton doit être capable d'atteindre toutes les exigences de résistances des bétons les plus renforcés dans les applications structurelles.

Une comparaison d'un béton de haute résistance dans la marge de 50 N/mm^2 avec des ratios E/C+L de 0.43 et 0.35 obtenu par l'auteur est transcrite dans fig. 6.9. La supériorité de résistance obtenue par l'auteur à tous les âges, peut être attribuée à l'effet combiné du haut niveau du remplacement par le laitier, du super-plastifiant, et la finesse de la mouture. Par exemple ; l'auteur était capable de produire des résistances de béton de 50 et de 80 N/mm^2 à 28 jours et en 1 an respectivement ; le slump de ce béton a atteint les 150mm. Les bienfaits de l'incorporation d'importantes quantités de laitier de 50% et du super-plastifiant sur les caractéristiques de la résistance du béton sont clairement manifestes. Des caractéristiques de longue durabilité peuvent être attendues grâce au faible ratio en Eau/ Ciment combiné et la finesse de mouture du laitier dans ce béton.

Tableau 6. 5 : Développement de la résistance du béton avec un ciment Ordinaire [123].

Résistance (Mpa)	Age, (jours)	Résistance à la compression, (Mpa)		% de la résistance à 28 jours	
		Fog	Dry	Fog	Dry
25	7	17.6	13.6	68	80
25	28	26.0	17.0	100	100
25	90	30.2	17.7	116	104
25	360	32.5	16.0	125	94
40	7	32.6	25.5	71	81
40	28	46.0	31.6	100	100
40	90	51.6	32.9	112	104
40	360	55.2	30.0	120	95
60	7	49.5	38.7	81	88
60	28	61.0	44.0	100	100
60	90	69.2	46.0	113	105
60	360	71.9	44.0	118	100

6.4 La résistance de traction.

La résistance de traction est l'une des propriétés de base du béton et sa valeur est exigée pendant la période de construction et la période de service. Dans l'investigation du comportement de la digue d'un barrage en béton durant les séismes, le facteur décisif dans la sécurité de la structure du béton est la résistance de traction, comme la structure va toujours connaître une baisse de tension avant qu'elle approche la capacité compressive. Dans la construction des routes et des chemins de fer, la résistance de traction est d'intérêt, puisque des défauts se produisent dans les lieux de type pavés ce sont le résultat d'une contrainte de flexion ou d'une traction direct

Le but de cette partie d'investigation est d'étudier la variation de la résistance de traction du béton de laitier avec l'âge sous des conditions de traitements différentes. Les relations entre la résistance de traction et la résistance de compression ; sont présentes. Des résultats sont comparés avec des informations publiées, dans les points appropriés.

6.4.1 Effet de l'âge et des conditions de cure.

6.4.1.1 La résistance de traction par fendage.

Les tableaux 6.6 et fig.6.7 montrent l'effet de l'âge et des conditions de cure sur la résistance de traction par fendage du béton de laitier. La Fig. 6.10 montre que la résistance de traction des éprouvettes traitées avec l'humidité augmente constamment jusqu'à l'âge de 1 an. Pour les éprouvettes traitées dans la condition de cure sec, une augmentation similaire jusqu'au 9^{ème} mois était notée dans laquelle il y avait une régression de résistance. L'exception est le béton de 50 N/mm² pour lequel une chute de résistance est enregistrée entre 9 et 12 mois. Sous un traitement continu avec l'humidité, la résistance augmente en 1 an comme un pourcentage de résistance à 28 jours est de 78, 71 et 54% pour le béton de 30,40 et 50 N/mm² respectif. Ces valeurs se comparent bien avec celles de la résistance de compression (78, 71 et 54% respectivement). Quant le béton fut sujet à un traitement continu dans la condition sec durant 1 an, tout le béton a maintenu ou montré une augmentation modeste au-delà de la résistance de 28 jours. Ces informations indiquent que la variation de la résistance de traction indirecte avec l'âge et les conditions de traitement sont similaires que celle observées avec la résistance de compression. Ces résultats sont similaires à ceux trouvés par d'autres recherches avec le béton avec ajout de la cendre volante [123].

Le développement de la résistance de traction par fendage du béton de laitier est indiqué dans les colonnes 6 et 7 et du tableau 6.6 jusqu'à l'âge de 28 jours, un béton plus dense développe une haute résistance à des taux plus rapides. Le contraire est vrai après cet âge ; le plus faible béton montre un gain en résistance plus rapide. Sous traitement humide, le taux de gain en résistance augmente rapidement entre 1 et 6^{ème} mois, et se réduit de 6^{ème} à 9^{ème} mois et accélère une fois encore jusqu'à 1 an. Comme exemple typique, le pourcentage d'augmentation pour le béton de 50 N/mm² durant ces trois cures est de 29%, 6% et de 20% respectivement. Le ratio de la résistance traitée dans la condition de cure sec sur celle traitée dans les conditions de cure humide a diminué, tant que l'âge augmentait. À 1 an, cette proportion est de 46%, 57% et 61% pour le béton à 30, 40 et 60 N/mm² respectivement.

Le ratio de la résistance de traction indirecte à la résistance de compression est intéressant. Plusieurs ingénieurs estiment que ce rapport est d'environ 10 et une valeur

de 10.8 est rapporte pour le béton ordinaire pour des spécimens testés de 7 jours à 1 an [103]. Pour le béton de laitier étudié, ce ratio est de 6.1 et 6.4 pour les spécimens testés au même age et sous un traitement de cure humide et de cure séc. Les Valeurs de 28 jours sont 7.2 et 8.1. Les valeurs les plus faibles trouvées durant cette recherche sont dues au développement de la plus haute résistance de compression, spécialement dans les ages avancés de ces bétons.

Tableau 6.6 : Propriétés de la résistance à la traction par fendage du béton au laitier

Mixes N ⁰	Age (jours)	R _t (N/mm ²)		4/3	%de la Résistance a 28jours		Rt/Rc %	
		Eau	Lab		Eau	Lab	Eau	Lab
1	2	3	4	5	6	7	8	9
R30	1	0.65	-	-	34	-	8.9	-
R40	1	1.00	-	-	31	-	12.8	-
R50	1	2.26	-	-	49	-	12.70	-
R30	7	1.05	0.97	92	54	54	5.0	4.2
R40	7	2.01	2.31	115	62	72	6.4	7.4
R50	7	2.96	2.85	96	65	69	7.8	7.9
R30	28	2.21	1.80	93	100	100	6.0	6.2
R40	28	3.44	3.16	99	100	100	7.7	8.2
R50	28	4.40	4.14	91	100	100	8.5	8.5
R30	180	3.40	1.88	55	176	104	6.6	5.5
R40	180	4.82	3.24	67	148	101	7.6	7.5
R50	180	5.89	4.35	74	129	105	7.8	7.9
R30	270	3.53	2.05	58	183	114	6.5	5.1
R40	270	4.92	3.38	69	151	105	7.1	7.1
R50	270	6.16	4.16	67	135	101	7.8	7.1
R30	365	3.94	1.80	46	178	100	6.7	5.7
R40	365	5.89	3.15	57	171	100	6.8	6.5
R50	365	6.79	4.13	61	154	100	8.2	6.7

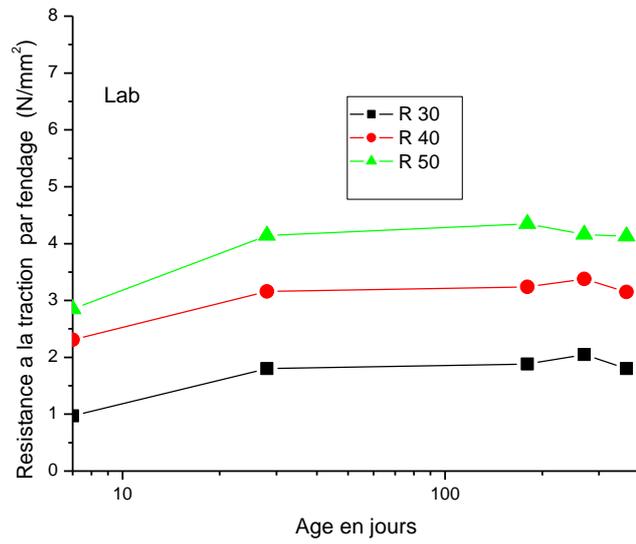
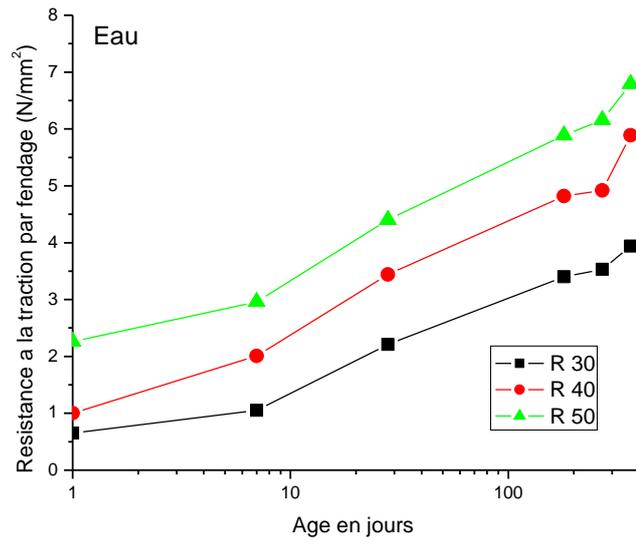


Fig. 6.7 Développement de la résistance de la traction par fendage avec l'âge

6.4.1.2 Résistance à la flexion

La fig.6.8 et le tableau 6.6 montrent que la résistance à la flexion testés par rupture d'une éprouvette prismatique, R_f , se comportent de la même manière que la résistance de traction par fendage, R_{tr} , pour les spécimens traités dans la condition humide et sec. Les deux types de traitement montrent des augmentations des résistances de traction jusqu'à 9^{ème} mois après lesquels une petite réduction dans la résistance était notée, l'exception étant le béton traité dans la condition sec de 30 N/mm², pour lequel une augmentation graduelle de résistance était observée jusqu'à 1 an. Comme dans les essais de résistance à la compression et de traction, le béton traité avec séchage à l'air montre une résistance plus faible comparé à un béton traité continuellement avec l'humidité.

Sous un traitement continu à l'humidité, une augmentation maximum de la résistance est notée à 9^{ème} mois. L'augmentation de la résistance à cet age comme pourcentage à 28 jours est de 90, 40, et 17% pour les bétons de résistance de 30, 40 et 50 N/mm². Ce comportement est similaire à celui de la résistance à la compression et les résistances de traction indirecte. Mais une baisse de résistance est observée après 9^{ème} mois, l'augmentation de résistance a 1 an a celle de 28 jours, est entre 15 et 43%, reste très important. Lorsque le béton est traité dans un traitement de cure continu sec, l'augmentation de la résistance est seulement dans les limites de 14 à 44%. Cette observation et celle de la résistance à la compression et de la traction indirecte indiquent que sans prendre en considération la résistance du béton, les bétons du laitier ont plus tendance à maintenir leur résistance de 28 jours jusqu'à des ages avancés. En effet, dans la plus part des cas, le béton au laitier a montre une augmentation modeste de résistance pour toutes les propriétés basiques de résistance, même dans « l'absence » de l'humidité. Cela est une contribution majeure, du béton de laitier a dépassé sa contrepartie le béton conventionnel.

Le taux de développement de la résistance de la flexion est plus important que celle de la résistance de traction indirecte jusqu'a 28 jours et sans prendre en considération les conditions de traitement, le béton ayant une grande résistance a montré un gain de résistance bien plus important. Dans des ages avancés, le comportement est

assez irrégulier. Au contraire de la résistance de traction, aucune tendance à la hausse ne peut être observée même pour les spécimens humides. La résistance augmente avec l'âge dans l'ordre de 30, 40 et 50 N/mm². Ces données montrent que, comme dans le béton ordinaire, la distribution non uniforme d'humidité sur le béton du laitier n'affecte point l'uniformité de la résistance de traction ni la résistance de compression, comme elle affecte la résistance de flexion.

À 28 jours, le ratio moyen de la résistance à la flexion et à la résistance à la compression est de 10.4 et 10.3 pour les spécimens traités dans la condition de cure humide et sec. Dans des âges avancés, ces ratios ne sont point consistants, indiquant que la relation entre les deux paramètres de résistance n'est pas linéaire. La proportion moyenne pour les spécimens traités avec l'humidité et le séchage entre les âges de 7 jours jusqu'à une Année est de 9.3 et 10.8 respectivement et sans autres informations disponibles, ce ratio peut être pris à 10 et 11 respectivement.

Plusieurs chercheurs [104-109] ont conclu que le ratio de la résistance à la traction à celle de la résistance à la flexion est entre 2/3 et 3/4. Les résultats de la présente recherche sur le béton ayant un niveau élevé en laitiers donnent des valeurs moyennes de 72.7% et de 67.5% (approximativement 3/4 et 2/3 pour les spécimens traités avec l'humidité et dans la cure sec) respectivement. L'âge d'essais varie de 7 jours à 1 an.

Le type de rupture était également noté dans les essais de traction dans notre étude. Au premier jour, la rupture était due à l'arrachement des graviers. Dans des âges plus avancés, la rupture était due à la cassure des graviers. Ces résultats indiquent que l'adhérence entre la matrice et gravier existe dans le béton.

Tableau 6.7 : Résistance à la flexion du béton contenant 50% de laitier

Mix	Age	Résistance à la flexion Rf (N/mm ²)		$\frac{(4)}{(3)}$	% de 28j Resistance (%)		$\frac{Rf}{Rc}$	
		Fog	Lab		fog	Lab	Fog	Lab
N°.	(jours)	(3)	(4)	(%)	(6)	(7)	(8)	(9)
R30	1	0.88	0.90	102	34	36	12.0	17.3
R40	1	1.80	2.10	117	39	54	14.1	9.2
R50	1	2.12	2.52	118	32	52	11.9	16.6
R30	7	1.90	1.80	105	73	70	8.5	7.8
R40	7	3.22	3.42	106	69	88	10.3	10.9
R50	7	5.92	4.25	72	90	76	15.7	11.3
R30	28	2.60	2.50	96	100	100	8.0	8.6
R40	28	4.66	3.90	84	100	100	11.0	10.1
R50	28	6.56	5.56	85	100	100	12.3	11.4
R30	180	4.65	3.01	65	176	123	9.0	8.9
R40	180	5.90	4.50	76	127	115	9.3	10.4
R50	180	7.2	6.14	84	110	109	9.5	11.1
R30	270	4.95	3.26	66	190	130	9.1	8.1
R40	270	6.70	5.70	85	144	146	9.6	9.7
R50	270	7.70	6.24	81	117	112	9.8	10.7
R30	365	4.80	3.66	74	185	143	8.3	11.4
R40	365	6.80	4.50	66	146	115	9.0	9.2
R50	365	7.72	5.70	76	117	103	9.3	10.8

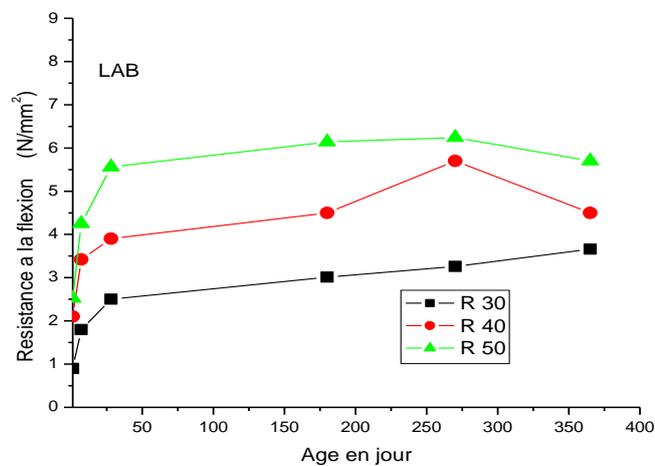
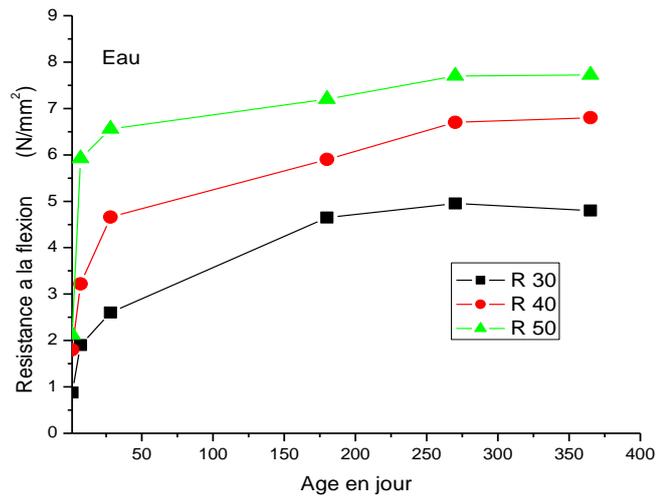


Fig. 6.8 Développement de la résistance à la flexion avec l'âge

6.4.2 Relation entre la résistance de traction et la résistance de compression.

La relation entre la résistance de traction (par flexion, par fendage) et la résistance de compression est de la forme suivante :-

$$R_t = a R_C^b \quad (6.1)$$

Où R_T est la résistance de traction N/mm^2 .

Et R_C est la résistance de compression sur cube d N/mm^2 .

Et a et b sont des constants.

La variation de la résistance à la flexion et la résistance de traction avec celle de la résistance à la compression, pour un béton ayant un haut dosage en laitier est présentée dans la Fig. 6.9-6.12, à des ages entre 1 et 365 jours.

La relation entre la résistance de traction, R_t et la résistance de compression, R_c dans la condition humidité et séc. Par coïncidence est la même pour les deux régimes de traitement. La relation entre les paramètres des deux résistances est curviligne puisque la résistance à la flexion est plus dépendante du gradient d'humidité.

6.4.3 Relation entre la résistance à la flexion et à la traction par fendage

La relation entre la résistance à la flexion et la résistance de traction pour les spécimens traités avec l'humidité et le séchage, à des ages variants entre 1 jour et 1 an, est présente dans les figures Fig. 7.13 et 7.14. Les valeurs montrées dans ces figures ont produit la relation suivante:

$$R_f = 0.69 R_t^{1.05} \quad (\text{humidité}) \quad (R^2 = 96\%) \quad (6.2)$$

$$R_f = 2.21 R_t^{0.60} \quad (\text{sec}) \quad (R^2 = 93\%) \quad (6.3)$$

La moyenne de ratio de R_t sur R_f tel décrite dans la section 6.4.1.2, est de 3/4 et 2/3 pour le traitement dans la condition humide et sec respective. Ces ratios « Faciles à se rappeler » sont très pratiques pour estimer la propriété de la résistance de traction. Plusieurs recherches [105-109] ont montre la préférence de l'utilisation de l'essai de traction que celle de l'essai de la flexion comme un moyen de mesure des propriétés de résistance de traction du béton. Les résultats des essais indirect montrent moins de dispersion, ils sont moins affectés par la distribution non uniforme d'humidité et donnent une valeur plus proche de la résistance de traction (104, 106).

Dans un rapport récent, RAPHAEL rapporté par [124] a analysé quatre séries de tests de traction, collectés sur une période de près de 40 années. Il a indiqué que la résistance de traction est plus proche de la résistance de traction réelle du béton que celle de la résistance de flexion. Cependant ; la résistance de traction du béton peut être mesurée par un essai de flexion mais sa valeur est d'environ 3/4 de la résistance de flexion. Il a expliqué que la théorie d'élasticité utilisée pour calculer la résistance de flexion ne présente pas le mode rupture du béton réelle puisque l'essai de la rupture de

L'éprouvette dans la zone de traction est comprimée jusqu'à une fraction de sa résistance ultime dans la zone comprimée. Avec cet esprit, la Fig. 6.15 est refaite à partir des Figures Fig. 6.9 et 6.11. La figure montre la relation entre la résistance de traction du béton et la résistance de compression des éprouvettes traitées dans la condition humide (eau), avec la résistance de traction du béton au laitier est prise comme $\frac{3}{4}$ de la résistance de flexion. Une relation similaire est faite pour les spécimens traités dans une cure sèche (Fig.6.16), mais la résistance de traction du béton au laitier est prise ici comme $\frac{2}{3}$ de la résistance de la flexion.

A partir des figures 6.15 et 6.16, on peut voir que la relation entre la résistance de traction du béton, R_t , et la résistance à la compression sur cube, R_c , est linéaire. Les analyses de régressions ont produit les relations suivantes :

$$R_t = 0.06 R_{cu} + 0.5 \quad (\text{humide}) \quad (R^2 = 90\%) \quad (6.4)$$

$$R_t = 0.09 R_{cu} + 0.9 \quad (\text{sec}) \quad (R^2 = 90\%) \quad (6.5)$$

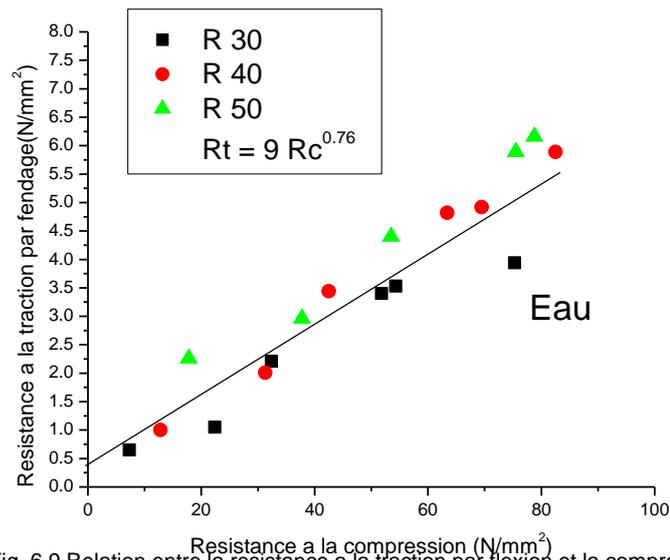


Fig. 6.9 Relation entre la résistance à la traction par flexion et la compression

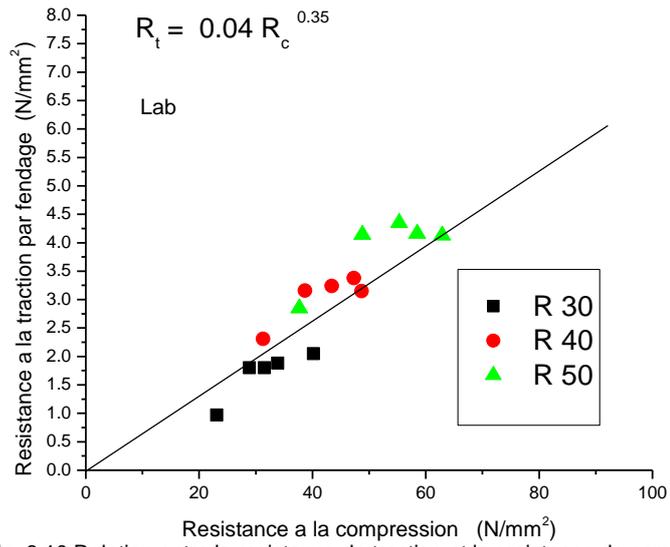


Fig. 6.10 Relation entre la resistance de traction et la resistance de compression

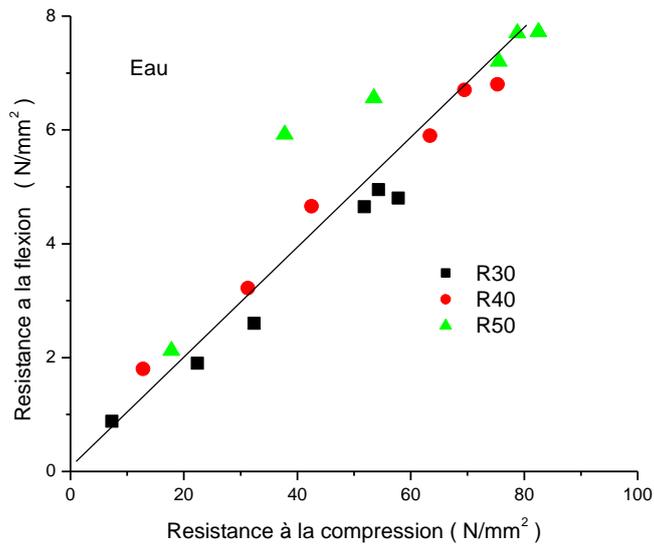


Fig. 6.11. Relation entre la resistance a la flexion et la resistance a la compression

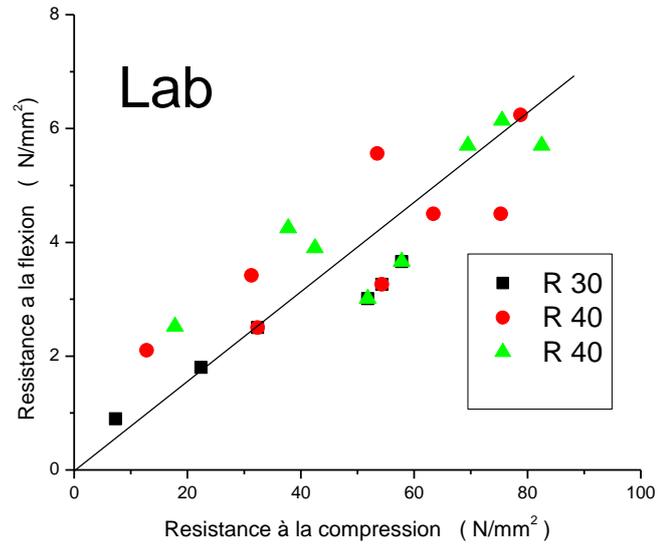


Fig. 6.12 Relation entre la resistance à la flexion et la resistance à la compression

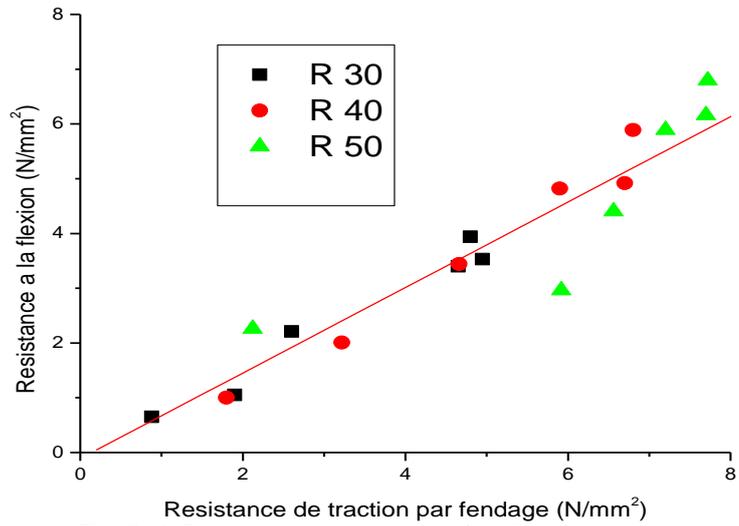


Fig. 6.13 Relation entre resistance à la flexion et resistance de traction par fendage (cure Eau).

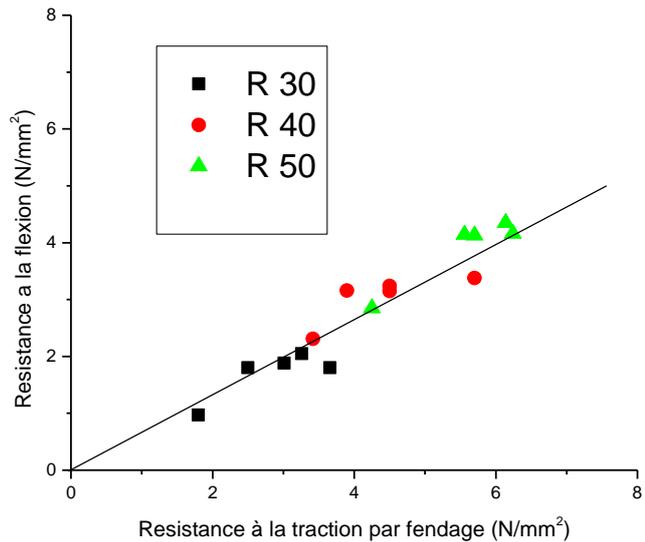


Fig.6.14 Relation entre la resistance à la flexion et la resistance à la traction par fendage. cure LAB

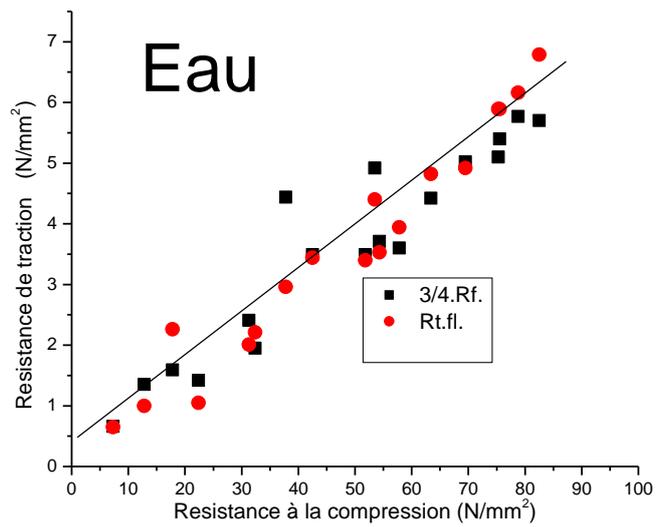


Fig. 6.15 Relation entre resistance de traction et la resistance de compression(N/mm²)

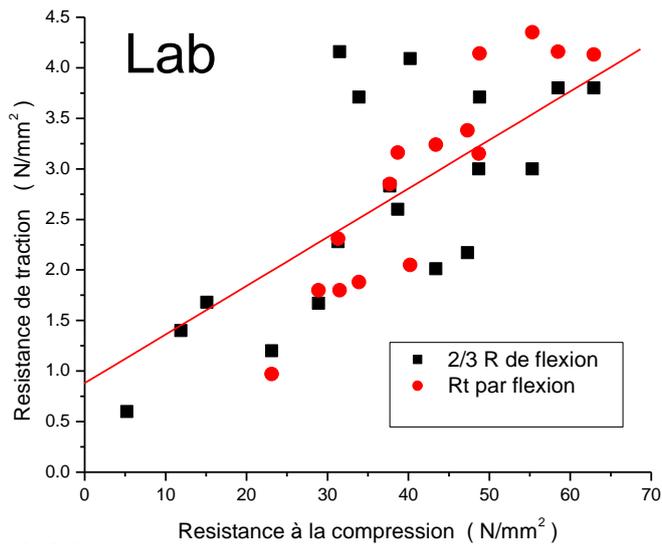


Fig. 6.16. Relation entre la résistance de traction et résistance de compression

6.4.4 Comparaison avec les informations publiées.

Alors que plusieurs résultats des testes effectuées au laboratoire sur la résistance de traction indirecte, la résistance a la flexion et la résistance a la compression du béton sont publiées, il y a seulement peu de publications où les trois propriétés du même béton sont testées et leurs relation est établie. La plus part des fonctions ont touché le béton conventionnels sont testées a des ages jusqu'à 28 jours.

Les informations sur le béton du laitier sont rares (123) il n'y point d'informations disponibles pour couvrir le rayon des résistances et des essais a des ages tels que celles obtenues dans notre étude.

6.5 Modules d'élasticités statiques

Le module d'élasticité du béton représente la réponse du béton à la déformation élastique. Une connaissance sur le module d'élasticité est essentielle pour déterminer la déflexion du béton renforcé et pré-stressé sous un chargement à court et long terme. En général, l'inclusion du laitier dans le béton augmente le module d'élasticité quand les bétons sont comparés sur une même résistance avec ou sans laitier [71, 27, 123,28].

6.5.1 Module d'élasticité : résultats et discussions.

Le module statique à 28 jours sous les deux régimes de traitement est détaillé dans le tableau 6.8 Les résultats montrent qu'une augmentation dans la résistance a résulté une augmentation dans le module d'élasticité, sans considération des conditions

de traitement. Comme dans Les études de la résistance de compression, l'effet, des conditions de traitement sur le module statique, est significatif. Les données du tableau 6.9 montrent que le module d'élasticité des spécimens traités avec l'humidité est considérablement plus fort que celui des spécimens traités avec le séchage. Le traitement à l'air a produit des réductions significatives dans le module statique d'environ 12% pour les bétons de 40 et 50 N/mm² mais elle est d'environ 18% seulement pour le béton de 30 N/mm² lors de la comparaison avec les spécimens traités par l'humidité.

Le module d'élastique statique d'une année est présenté dans le tableau 6.9 De nouveau, le développement du module d'élasticité statiques est similaire a celui de la résistance a la compression, bien que dans une infraction de l'augmentation de résistance. Sans considération des conditions de traitement, les modules statiques augmentent avec l'âge. Pour les spécimens traités avec l'humidité, le pourcentage d'augmentation d'une année à celui de 28 jours est entre 20-26% pour les résistances des trois bétons, environ 1/3 de la résistance de compression correspondante. Même pour les spécimens traités à l'air, une croissance modeste entre 6 et 9% était constatée. Cela confirme les résultats auxquels Swamy et Mahmud [124] qui ont trouvé que les modules statiques du béton à la cendre volante contenant un super- plastifiant, augmentent de 28 jours à 300 jours pour le traitement humide et sec.

La dernière colonne du tableau 6.8 montre que pour les éprouvettes traitées à l'humidité, 80-83% des modules d'élasticité statiques d'une année sont développés durant 28 jours, le béton le plus fort développe un taux de croissance plus rapide. Les valeurs des éprouvettes traités au séchage sont plus hautes, environ 97-103%, indiquant qu'après 28 jours, la croissance des modules statiques du béton a haut dosage de laitier est très faible voir négligeable. Pour des fins de design, les modules statiques de 28 jours des éprouvettes traités au séchage peuvent être pris comme valeur d'une année.

Tableau 6.8 : Module d'élasticité statique à 28 jours.

Mixe	Type de cure	Rc à 28-jour (N/mm ²)	Module D' élasticité- à 28-jour (KN/mm ²)	Augmentation De la résistance Au-delà De 28 jours (%)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
R30	Eau	32.4	30.1	78
R40	Eau	42.5	33.5	71
R50	Eau	53.5	35.6	54
R30	Lab	28.9	27.3	23
R40	Lab	38.7	30.7	20
R50	Lab	48.8	30.1	19

Tableau 6.9 Module d'élasticité à 28 jours et 1 an.

Mixe	Type de cure	Rc à 28 jour (N/mm ²)	Module D' élasticité statique KN/mm ² , (28-jours)	Rc, à (1-An) (N/mm ²)	Module d' élasticité, statique KN/mm ² (1-An) Ec	% de résistance Au-delà 28 jours		$\frac{E_{28}}{E_{365}}$
						RC (%)	Ec (%)	
R30	Eau	32.4	30.1	57.8	37.8	78	26	80
R40	Eau	42.5	33.5	75.3	40.5	77	21	83
R50	Eau	53.5	35.6	82.5	42.7	57	20	83
R30	Lab	28.9	27.3	31.5	28.1	9	2.9	97
R40	Lab	38.7	30.7	48.7	29.7	26	-3.3	103
R50	Lab	48.8	30.1	52.9	29.8	8	-0.1	101

6.5.2 Relation entre le module d'élasticité et la résistance de compression.

Le module d'élasticité est principalement dépendant de la résistance de la compression du béton, des modules d'élasticité des graviers, et des conditions de cure. Il est également influencé par l'âge du béton, les proportions du mélange et le type du ciment utilisé.

Il est de convenance d'estimer le module d'élasticité du béton via sa résistance de compression seulement. La relation entre les modules d'élasticité, E_c , et la résistance de compression, R_{cu} , est généralement faite par les deux équations de base suivantes :

$$E_c = a R_{cu}^b \quad (6.6)$$

$$\text{Ou : } E_c = c + d R_{cu} \quad (6.7)$$

Où a, b, c et d sont constants.

La logique suppose a ce que c de l'équation 6.7 soit égal a zéro si on veut que la relation doit être valide pour toutes les valeurs de R_{CU} . L'équation 6.7 est souvent

Simplifié pour une relation de racine carrée par $b=0.5$, afin de maintenir les calculs du design simples. A nos jours, la fonction exponentielle est plus utilisée pour donner des relations plus précises que la fonction de racine carrée adéquate.

L'équation de régression reliant les modules d'élasticité et la résistance a la compression sur cube, a partir des données montrées dans la fig. 6.17, sont données par :

$$E_C = 8.49 R_{CU}^{0.36} \quad (\text{humide}) \quad (R^2 = 99\%) \quad (6.8)$$

et $E_C = 12.34 R_{CU}^{0.24} \quad (\text{sec}) \quad (R^2 = 84\%) \quad (6.9)$

Pour le béton traité dans la condition humide, le module d'élasticité augmente Proportionnellement à la racine cubique de sa résistance. Comme les spécimens traités à l'humidité ont un module d'élasticité plus important que ceux traités au séchage, des équations distinctes sont recommandés pour évaluer le module d'élasticité pour les deux conditions de traitement. De plus chaque équation individuelle donne un facteur de corrélation bien plus important.

6.5.3 Comparaison du module d'élasticité statique avec les résultats publiés

La Fig. 6.17 montre la relation entre le module statique d'élasticité et la résistance à la compression. Une comparaison est également faite avec l'équation proposée par DHIR ET AL (52) et la relation pré -dictée par CP 110 (89), l'expression

Est la suivante :

$$E_C = 3.87 R_{CU}^{0.5} \quad \text{Dhir et Al [52]} \quad (6.10)$$

$$E_C = 9.10 R_{CU}^{0.33} \quad \text{CP 110 [89]} \quad (6.11)$$

$$\text{et } E_C = 20 (R_c/20)^{0.45} \times 10^3 \quad \text{Swamy [123]} \quad (6.12)$$

En général, les valeurs CP 110 [89] sous-estiment les valeurs de traitement par humidité de 6-10% mais surestiment les modules traités dans la condition de cure sèche de 8%. E_{qn} . 6.10 En général sous-estiment les modules d'élasticité traitée par humidité et séchage entre 8-10%. Les valeurs prédites par CP110 (E_{qn} . 6.11) proposent que les modules d'élasticité des bétons à haut dosage de laitier est d'environ 6-10% supérieure que le béton ordinaire.

Eqns.6.8et 6.9 sont préférées et recommandées pour la relation du module d'élasticité et la résistance à la compression sur cube pour la condition de cure humide et sec respectivement.

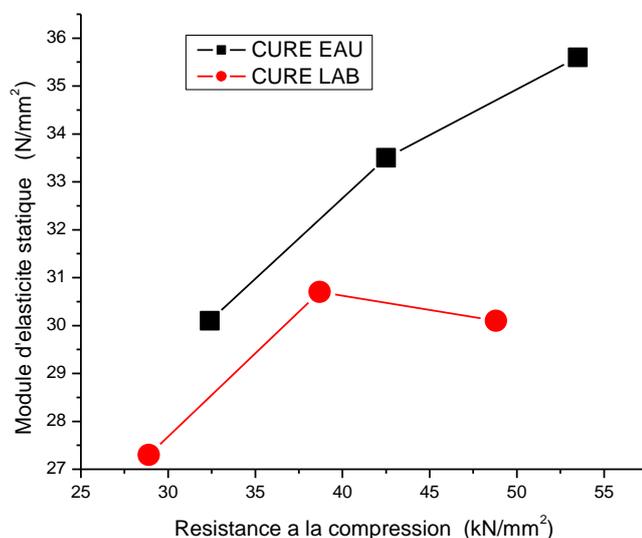


Fig. 6.17 Variation du module d'élasticité avec la résistance de compression

6.6 Conclusions.

De la présente recherche on peut tirer les conclusions suivantes :

1. Pour le béton ayant une haute concentration en laitier, les spécimens traités à l'humidité ont donné une résistance et des propriétés élastiques plus grandes que les spécimens traités dans la condition de cure sèche. Des équations décrivant la relation entre la résistance et les propriétés élastiques de ce type de béton donnent une bonne corrélation pour les spécimens traités à l'humidité et au séchage.
2. Sous un traitement de cure humide, il y a une augmentation continue de la résistance à la compression avec l'âge. La résistance à une année montrée comme un pourcentage des 28 jours varie entre 178 - 154%.
3. Le traitement au séchage présente les conditions de traitement les plus mauvaises pour le béton du laitier. Cependant, à 1 an, tous les bétons étaient aptes à maintenir leurs résistances de compression visées. La résistance à 1 an varie entre 123-119% de la résistance de 28 jours.

4. Le traitement à l'air après un traitement à l'humidité de 7 jours a des bienfaits sur le développement de la résistance de compression du béton à haute concentration de laitier. Ce type de traitement manifeste aussi des résistances plus grandes de 10 à 30% que le béton traité par séchage dans tous les âges.
5. L'introduction de l'humidité au béton de laitier qui a fait l'objet d'un séchage prolongé de 2.25 ans peut régénérer sa résistance. Cette dernière augmente de 21 et 56% dans les quatre premiers mois pour le béton de 30 N/mm². La réintroduction de l'humidité peut également régénérer une importante résistance des bétons traités dans la condition de cure sèche. (40 et 50 N/mm²).
6. Le béton ayant 50% de laitier et un super plastifiant sont capables de développer une résistance de 50 N/mm² à 28 jours et une résistance au jeune âge de 17-35 N/mm² à partir du 2^{ème} jour jusqu'à 3^{ème} jours. La résistance à 1 an de ce béton est dans les abords de 80 N/mm².
7. Pour les spécimens traités à l'humidité, la résistance de traction augmente régulièrement durant 1 an. La résistance augmente à 1 an comme pourcentage de résistance à 28 jours varie entre -185 à 117%. La résistance de traction par fendage des spécimens traités au séchage de 1 an a maintenue ou a montré une augmentation modeste plus que la résistance de 28 jours.
8. La résistance de flexion augmente régulièrement après neuf mois, après une mince rétrogression dans la résistance est observée. Cependant à 1 an l'augmentation de la résistance exprimée comme un pourcentage de 28 jours, de 27- 84% est de 14- 44% pour les spécimens traités à l'humidité et au séchage respectivement.
9. Sans prendre en considération les conditions de traitement, tous les bétons ont maintenu leur résistance de base requise à 1 an. L'effet positif du remplacement du ciment par le laitier dans le béton sujet à un traitement continu à l'humidité et au séchage, est indiqué.
10. La résistance de traction est de 76% et 67% (approximativement le 3/4 et 2/3) de la résistance de flexion pour les spécimens traités à l'humidité et au séchage respectivement. Les résultats indirectes des tests montrent moins de dissipation

et sont moins affecté par la distribution non uniforme de l'humidité que la résistance de flexion.

11. La relation entre la résistance de traction et la résistance de compression sur cube est linéaire. La résistance de traction est approximativement de 7% de la résistance de compression sur cube.
12. Le traitement à l'air a produit des réductions de 10- 20% et 8- 13% dans les modules statiques, lorsque les éprouvettes sont comparées dans la condition de cure humide.
13. Le pourcentage d'augmentation à 1 an à celui de 28 jours des modules statiques des spécimens traités à l'humidité est entre 14-36%. Seulement une augmentation marginale entre 2-7% peut être achevée pour les spécimens traités au séchage.
14. Les modules statiques d'élasticité du béton ayant un haut dosage élevé de laitier est entre 6-10% supérieure que le béton ordinaire. Le CP 110 (89) sous-estime les valeurs traité à l'humidité d'environ 6-10% et surestime les modules traités au séchage environ de 8%.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES GENERALES

Le but de ce travail de recherche est d'étudier les propriétés des matériaux et certains aspects de la durabilité du béton contenant 50 et 65% en laitier et un superplastifiant. Ce béton est désigné pour atteindre une résistance à 28 jours de 50N/mm^2 . Un autre béton avec 50% en laitier de substitution a également fait l'objet d'une étude pour atteindre des résistances de 30, 40 et 50N/mm^2 . Ce travail a été effectué pour déterminer les propriétés importantes nécessaires pour mettre plus de lumière sur le comportement du béton de laitier dans des applications pratiques. Il est à espérer que les résultats présentés ici contribueront à la compréhension de certaines des principales caractéristiques du béton de laitier.

Les principales conclusions à tirer de la présente étude sont les suivants:

- Une exposition prolongée à un environnement de séchage a augmenté le volume poreux pour toutes tailles de pores confondues et cette augmentation est marquante au remplacement à 65% de laitier. Même avec cet effet indésirable de séchage, le béton de laitier a montré une structure de pores beaucoup plus affinée que le béton CPA. Les changements dans la structure des pores sont reflétés dans des valeurs de résistance et de retrait.
- Le microscope électronique à balayage a confirmé que la cure dans un environnement sec est une cause majeure de l'augmentation de la porosité.
- Le béton à 65% de remplacement en laitier a toujours montré une plus grande pénétration de carbonatation que le béton à 50 % de laitier. Un environnement interne de séchage sans eau permet une plus forte pénétration de la carbonatation
- Compare à une résistance d'un béton non carbonate, le béton carbonaté n'a montré qu'une faible perte de résistance qui est de l'ordre de 5-10%.
- Bien que la présence du laitier réduise la capacité du béton à capter le dioxyde de carbone, ce béton possède une perméabilité beaucoup plus faible de sorte que le taux élevé de carbonatation est limitée seulement à la surface du béton, et une pénétration accrue de la carbonatation est considérablement ralentie.
- Les bétons à 65% de laitier prennent un temps double pour parvenir à une expansion ASR donnée par rapport aux bétons à 50% de substitution de laitier.
- Les changements dans la vitesse de propagation du son peuvent identifier l'ouverture des fissures et de surveiller les progrès d'expansion. Cependant, une fois la fissuration s'est

produite, l'ultrason ne peut pas refléter les changements des déformations avec la même sensibilité.

-Les bétons au laitier à 65% de remplacement résistent mieux aux effets de la fissuration due à l'ASR que les bétons de laitier à 50%.

-Une cure interne à l'eau d'environ 7 jours améliore toutes les propriétés associées à la durabilité et les avantages de la cure à l'eau ont été beaucoup plus prononcés avec un remplacement de laitier plus élevé.

-La méthode de dosage du mélange utilisé ici pour obtenir une résistance initiale élevée et avec un faible rapport d'eau-liant a contribué à minimiser les dommages aux propriétés du béton de laitier, exposés à des environnements défavorables, qui accélèrent la détérioration.

-Les résultats ont montré que la cure est plus importante pour les bétons au laitier comparé aux bétons normaux surtout pour les bétons à grande substitution en laitier. Par ailleurs, la cure dans l'eau a une grande influence sur la résistance et la distribution des pores.

-Les résultats montrent que le béton au laitier contenant un ciment modéré, de 200 kg/m^3 et avec un poids similaire en laitier peut atteindre une résistance de 50 N/mm^2 à 28 jours

-Sous des conditions de cure humide, une quantité élevée du laitier dans le béton donne des augmentations de résistances comprises entre 54 et 78 % à partir de 28 jours jusqu'à une année. La réintroduction de l'humidité dans un béton stocké dans un environnement sec peut régénérer la résistance de compression

- Le Béton de laitier ayant une résistance à la compression élevée et avec 50% et 65% de substitution de laitier peut être conçu de façon satisfaisante avec un très faible rapport Eau/Liant, une excellente maniabilité et un développement de la résistance comparable au béton ordinaire à compter du 3^{eme} jour.

- Pour développer la résistance à long terme afin d'assurer une bonne activité d'hydratation et pouzzolanique, le béton de laitier nécessite un durcissement à l'eau. Même les 7 jours de durcissement humide paraissent inadéquats car ils affectent la résistance à la flexion et la structure interne du béton.

- À un âge précoce, 50% de remplacement a montré un retrait plus important que le remplacement à 65%. Cependant, 65% de substitution à montre un retrait beaucoup plus élevé à long terme que le retrait à 50% de remplacement.

.- Basé sur les expériences menées avec du béton de laitier, une quantité optimale de laitier de remplacement existe probablement; cette quantité optimale de laitier dans le

béton dépend de la quantité de ciment dans le béton et semble être proche de 50% de laitier par poids de ciment.

-En général, l'hydratation du béton de laitier est lente à un âge précoce, mais après environ 3 jours, le taux d'hydratation s'accélère vers celui des mélanges de béton ordinaire en raison de la libération de l'hydroxyde de calcium à partir de l'hydratation du ciment Portland.

- Dans le cas de durcissement humide, il y'a une augmentation continue de la résistance à la compression avec l'âge. La résistance à 6 mois, exprimée en pourcentage de la résistance à 28 jours varie entre 25% et 26% pour 50% et 65% de substitution de laitier.

- Le durcissement à sec représente la pire condition de durcissement du béton de laitier surtout quand une grande quantité de laitier est utilisée: dans le cas de mélanges ces derniers atteignent la résistance voulue à 28 jours, sauf les mélanges durcis dans un milieu sec.

- Le durcissement initial humide, même pour quelques jours est bénéfique pour le développement de la résistance à la compression du béton de laitier. Ce type de durcissement a donné plus de résistance que le béton durci à sec à tous les ages.

- Indépendamment de l'état de durcissement, l'ensemble des bétons ont maintenu leur résistance de base requise à 6 mois et seul le mélange avec 65% de substitution de laitier durci en laboratoire n'a jamais atteint la résistance visée à n'importe quel age.

- Le durcissement à l'air a produit une réduction d'environ 20% dans le module d'élasticité statique, si on le compare aux éprouvettes humides durcies dans la condition humide continuellement. Le traitement de cure initiale a produit une réduction d'environ 14% du module d'élasticité par rapport aux éprouvettes durcies continuellement dans la condition humide.

- L'équation donnée dans la norme BS 8810 sous-estime le module élastique du béton de laitier à durcissement humide par 8-10%, mais il a surestimé le module du durcissement à sec de 7 à 15%.

- La vitesse d'impulsion ultrasonique est plus sensible à la fissuration que la résistance à la compression.

- Le béton avec 50% de laitier sous durcissement par air a montré un retrait élevé jusqu'à 6 mois.

- La microstructure est apparue très dense de texture avec l'augmentation de la quantité de laitier dans le béton. Il a été confirmé qu'une microstructure dense contribue de manière significative à l'amélioration de la résistance.

-Pour le béton ayant une haute concentration en laitier, les spécimens traités à l'humidité ont donné une résistance et des propriétés élastiques plus grandes que les spécimens traités dans la condition de cure sèche. Des équations décrivant la relation entre la résistance et les propriétés élastiques de ce type de béton donne une bonne corrélation pour les spécimens traités à l'humidité et au séchage.

-Sous un traitement de cure humide, il y a une augmentation continue de la résistance à la compression avec l'âge. La résistance a une année montrée comme un pourcentage des 28 jours varie entre 178 - 154%.

- Le traitement au séchage présenté les conditions de traitement les plus mauvaises pour le béton du laitier. Cependant, à 1 an, tous les bétons étaient aptes à maintenir leurs résistances de compression visée. La résistance à 1 an varie entre 123-119% de la résistance de 28 jours.

-Le traitement à l'air après un traitement à l'humidité de 7 jours a des bienfaits sur le développement de la résistance de compression du béton à haute concentration de laitier. Ce type de traitement manifeste aussi des résistances plus grandes de 10 à 30% que le béton traité par séchage dans tous les âges.

-L'introduction de l'humidité au béton de laitier qui a fait l'objet d'un séchage prolongé de 2 ans et 6 mois peut régénérer sa résistance. Cette dernière augmente de 21 et 56% dans les quatre premiers mois pour le béton de 30N/mm². La réintroduction de l'humidité peut également régénérer une importante résistance des bétons traités dans la condition de cure sèche. (40 et 50 N/mm²).

- Le béton ayant 50% de laitier et un super plastifiant sont capables de développer une résistance de 50 N/mm² à 28 jours et une résistance au jeune âge de 17-35 N/mm² à partir du 2^{ème} jour jusqu'au 3^{ème} jour. La résistance à 1 an de ce béton est dans les abords de 80 N/mm².

-Pour les spécimens traités à l'humidité, la résistance de traction augmente régulièrement durant 1 an. L'augmentation de la résistance à 1 an exprimée comme pourcentage de résistance à 28 jours varie entre 185 à 117%. La résistance de traction par fendage des spécimens traités au séchage de 1 an a maintenue ou a montré une augmentation modeste plus que la résistance de 28 jours.

-la résistance de flexion augmente régulièrement après neuf mois, après une mince régression dans la résistance est observée. Cependant à 1 an l'augmentation de la résistance exprimée comme un pourcentage à 28 jours, varie de 27- 84% et de 14- 44% pour les spécimens traités à l'humidité et au séchage.

-Sans prendre en considération les conditions de traitement, tous les bétons ont maintenu leur résistance de base requise à 1 an. L'effet positif du remplacement du ciment par le laitier dans le béton sujet à un traitement continu à l'humidité et au séchage, est indiqué.

-La relation entre la résistance de traction et la résistance de compression sur cube est linéaire. La résistance de traction est approximativement de 7% de la résistance de compression sur cube.

-Le traitement à l'air a produit des réductions de 10- 20% et 8- 13% dans les modules statiques, lorsque les éprouvettes sont comparées dans la condition de cure humide.

- Le pourcentage d'augmentation à 1 an à celui de 28 jours des modules d'élasticité statiques des spécimens traités à l'humidité est entre 14-36%. Seulement une augmentation marginale entre 2-7% peut être achevée pour les spécimens traités au séchage.

- Les modules statiques d'élasticité du béton ayant un haut dosage élevé de laitier est entre 6-10% supérieure au béton ordinaire. Le CP 110 (89) sous-estime les valeurs traités à l'humidité d'environ 6-10% et surestime les modules traités au séchage environ de 8%.

Recommandations pour les travaux ultérieurs

Au cours de cette étude, plusieurs points intéressants ont été constatés, mais n'ont pu être étudiés en raison du manque d'équipement pour réaliser des structures réelles. Une étude plus poussée dans les domaines suivants est donc suggérée.

- Augmenter la résistance et les propriétés élastiques pour une période de plus d'une année.

- les propriétés sus-citées peuvent être améliorées significativement en augmentant la surface spécifique du laitier jusqu'à des valeurs de 800 et 1200 m²/kg. Toutefois, la substitution en laitier ne doit pas dépasser 50%.

- Etudier la porosité et la distribution de leur taille dans les bétons réalisés avec les surfaces spécifiques du laitier propose ci-dessus.

- Etude de la pénétration des ions chlore qui sont responsable de la corrosion des armatures de la structure.

- Réaliser un élément structural (poutre) à l'échelle réelle et étudier toutes ses propriétés structurales et mécaniques.

- Etude du retrait et du fluage dans le béton à base de laitier.

REFERENCES

- [1] **Damien D.** Les enjeux du développement durable au sein de l'industrie du ciment: réduction des émissions de CO₂, Rapport Final, Atelier Changement Climatique, Oct. 2005-Fev. 2006, pp 1-44.
- [2] **Rompaey G.V.** étude de la réactivité des ciments riches en laitier, à basse température et à temps court, sous ajout chloruré, doctorat en sciences université libre de Bruxelles, janvier 2006.
- [3] **Mehta P.K.** Pozzolanic and cementitious by products as mineral admixtures for concrete, A critical review, proc., CANMET/ ACI first international conference on the use of fly silica fume, slag and other mineral by-products in concrete, ACI special publication SP-79, vol. 1, 1983, pp 1-35.
- [4] **Proc.** Canmet/ ACI Second International Conference on the use of Fly Ash, Silica fume, Slag and natural Pozzolans in concrete, ACI Special Publication SP-91, vol.1 and 2, 1986.
- [5] **Proc,** Joint ACI/ RILEM, Symposium on Technology of concrete when Pozzolans Slags and Chemical Admixture are used, Monterrey, Mexico, 1985.
- [6] **Proc,** Seventh international congress on the chemistry of cement, Paris, 1980.
- [7] International conference on slags and blended cement by school of engineering of Alabama, 18-19 February, 1982.
- [8] **Frohnsdorff G.** Blended Cements, ASTM, S.T.P 897, 1986
- [9] **Swamy R.N.** Cement Replacement Materials, Concrete Technology and Design, vol.3, 1986, pp.73-133
- [10] **Karl H. et al.** Slag and slag cement practices in Japan, Ref.7, pp 1-27.
- [11] **Hogan F.J. and Meusel F.J.** Evaluation for durability and strength development of à ground granulated blast furnace slag Cement, Concrete and Aggregate, vol.3, No1, Summer, 1981, pp 40-52.
- [12] **Regourd M.** Slags and slag cement, Ref 9, pp 73-99.
- [13] **Higgins D.D.** A Standards for ground granulated blast furnace slag, Journal of the concrete Society, vol20, No 8, August, 1986, pp 13-15.
- [14] **Skalny J. Iawed I. and Taylor H.F.W.** Studies on hydration of cement recent,

World Cement Technology, Sept.1978, pp 183-193

- [15] **Skalny I. and James E.** Hydration of Portland and blended cements, International conference on slag and blended cements, 18-19 February 1982, Birmingham, Alabama, pp 1-17.
- [16] **Berry E.E.** Concrete made with supplementary material, Progress in concrete Technology, Edited by V.M. Malhotra, June, 1980, pp 333-354
- [17] **Fulton F.S.** The properties of Portland cements containing milled granulated blast furnace slag, south Africa Portland cement institute Monograph, Johannesburg, 1974.
- [18] **Roy D.M. and Idorn G.M.** Hydration, structure, and properties of blast furnace slag cements, mortars and concrete, ACI journal, vol79, No6, November-December, 1982, pp 444-457.
- [19] **Wainwright P.J.** Properties of fresh and hardened concrete incorporating slag cement, concrete Technology and Design, Cement Replacement materials, vol 3, 1986, pp 100-128.
- [20] **Tattersall G.H. and Banfill P.F.G.** The Rheology of Fresh concrete, 1983. Pitman, London.
- [21] **Meusel J.W. and Rose J.H.** Production of granulated blast furnace slag at sparrows points, and workability and strength potential of concrete incorporating the slag. ACI Publication SP-79, vol.2, pp 867-890.
- [22] **Reeves C.M.** How to make today's concrete durable for tomorrow, inst. Of civil engineers, London, 8th May 1985, pp 37-54.
- [23] **Banfill P.F.G.** The effect of super plasticizer on the workability loss and strength development of OPC/Cemsave blended concrete, Workshop on blast furnace slag cements and concrete, York, England, 1985. Frodingham cement CO ltd, Scunthorpe.
- [24] **Allard A.J.** Bleeding, plaster settlement cracking and initial surface absorption of P.F.A and cemsave concrete, Msc. Dissertation, University of Leeds, England.
- [25] **Mansoor M.H.** The pore size distribution of cement paste containing varying proportions of fly ash and blast furnace slag, PhD Thesis, London, 1978.
- [26] **Ramachandran V.S.** Properties, Science and Technology Concrete Admixture Handbook 1984, pp 303-332.
- [27] **Ban forth P.B.** In situ measurement of the effect of partial Portland cement

replacement using either fly ash or ground granulated blast furnace slag on the performance of mass concrete, Proc. Instn. Civil Engrs. Part 2, 1980, vol. 69 Sept., pp 777-800.

- [28] **Wainwright P.J. and Tolloczko J.J.A.** The early and later age properties of temperature cycled OPC concrete”, 2nd Int. Conf. on the Use of Fly Ash, Silica Fume Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Madrid, Ottawa, vol.2, April, 1986, pp 1293-1321.
- [29] **Atwell J.S.F.** Some properties of ground granulated slag and cement, Proc. Inst. Civil Engrs. Vol.57, pp 233-250.
- [30] **Yanagida T. and Dota M.** Properties of concrete containing pulverized granulated blast furnace slag, Japan. US seminar, Sept. 1979, San Francisco, US, pp 15-17.
- [31] **Price W.H.** Factors influencing concrete strength, Proc. ACI Journal, vol. 47, 1951, pp 417-432.
- [32] **Buttler W.B. and Ashby J.B.** the influence of curing environment upon the properties of concrete made using a variety of Portland cement supplement, Ref 5, pp 197-217.
- [33] **Pratas J.D.** Early age strength development of slag cement concretes, Msc. Dissertation, university of Leeds, England.
- [34] **Neville D.M.** Properties of concrete, 3rd Edt. Pitman, London, 1981.
- [35] **Popovics S.** Effect of curing method and final moisture condition on compressive strength of concrete”, ACI Journal, July- August 1986, pp 650-670
- [36] **Rose J.H.** The influence of curing temperature on the strength of concrete containing granulated blast furnace slag, Ref 4, pp 445-466.
- [37] **SABS 973.** Standard form of specification for concrete work”, South Africa Bureau standards, Pretoria, South Africa, 1970.
- [38] **Neville A.M and Brooks J.J.** Time dependent behavior of cemsave concrete, March 1975, vol.9, pp 36-39.
- [39] **Stutterheim N.** Properties and uses of high-magnesia Portland slag cement concrete, A.C.I Journal, vol.56, 1960, pp 1025-1045.
- [40] American Society for Testing and materials, vol. 04-02, A.S.T.M. C157-80, “Method for length change if hardened cement mortar and concrete”,

Philadelphia U.S.A, pp 124-130.

- [41] **Kobayashi K. et al.** Partial replacement of Portland cement by ground granulated blast furnace slag, Japan, US science Seminar, San Francisco, U.S.A, Sept, 1979, pp 29-41.
- [42] **Heaton B. D.** Characteristics of concrete with partial cement replacement by fly Ash and ground granulated blast furnace slag, symp. On concrete cases and concepts, Camberra, Inst. Of Engrs. Of Australia, 1979, pp 26-30.
- [43] **Ross A.D.** Theo creep of blast furnace cement concrete”, Inst. Civ. Engrs. Journal, vol.8, 1938, pp 43-52.
- [44] **Giorv O. E and Vennesland O.** Diffusion of chloride ion from sea water cement and concrete research, vol.9, No2, March 1979, pp 229-238.
- [45] **Mawmohan D. and Mehta P.K.** Influence of Pozzolanic, Slag and Chemical Admixture on pore Size Admixture and Permeability of Hardened Cement Paste, A.S.T.M. No.1, 1981, pp. 63-67.
- [46] **Guyot R. Ranc R. and Varizot.** A. Comparison of the resistance to sulphate solution and to sea water of different Portland cement with or without secondary constituents, ACI Spec. Pub. SP79, Vol.1, 1983, pp 453-469.
- [47] **Hooten et al.** Sulfate resistance of slag cements, Proc. International conference on slags and blended cements, Mons. Belgium 1981.
- [48] **BS146.** Specification for Portland blast furnace cement, British Standards Institution, London, Part 2, 1973, pp 7.
- [49] **BS 4246.** Specification for low heat Portland blast furnace cement, British Standards institution, London, Part 2, 1974, pp12.
- [50] **Kasai Y. et al.** Air permeability and carbonation of blended cement mortars, Ref.2, Vol.1, pp 435-451.
- [51] **Massaza F.** Structure of pozzolans and fly ash and hydration of pozzolanic and fly ash cements, General Report, Proc. International congress on the Chemistry of cement, 4, 1980, pp 85-96.
- [52] **Dubovoy V.S. et al.** Effect of ground granulated blast furnace slag on some properties of paste, mortars and concrete, Blend cement A.S.T.M, pp 29-48.
- [53] **Hansen, W.C.** Studies relating to the mechanism by which alkali- aggregate reaction produces expansion in concrete, Proc. Amer. Concr. Inst. Vol.40, 1944, pp 213-227.
- [54] **Dent Glasser I.S and Kataoka.** The Chemistry of Alkali- Aggregate Reaction”,

Cement and concrete Research, Vol.11, 1981, pp 1-9.

- [55] **Hobbs D.W.** The alkali-silica reaction a model for protecting expansion in mortar, Magazine of concrete research, vol.11, 1981, pp 1-19.
- [56] Building Research Station. Alkali aggregate reaction in concrete, BRE Digest 258, Her Majesty Stationery office, London, 1982, pp 8.
- [57] **Hobbs D.W.** Influence of pulverized fuel ash and granulated blast furnace slag upon expansion caused by the alkali-silica reaction, magazine of concrete Research, Vol. 34, No119, June 1982, pp 83-94.
- [58] **Frank. I.H.** The effect of blast furnace slag cement on alkali aggregate reactivity, a literature review, American Society for Testing and materials, 1985, pp 100-107. Technical note.
- [59] **Swamy R.N. and Alasali M.M.** Engineering implication of A.S.R expansion in concrete and the effectiveness of the nature admixture”, University of Sheffield.
- [60] **Hobbs D.W.** Deleterious expansion of concrete due to alkali-silica reaction influence of PFA and slag, Magazine of concrete Research, Vol.38, No 137, December 1986, pp 191-205.
- [61] **British Standards institution.** Ordinary and rapid hardening Portland cement, BS 12, 1978.
- [62] **British Standards Institution.** Methods of Sampling and Testing of Mineral Aggregate, Sands and fillers, BS 812, 1975, London, 4 parts.
- [63] **British Standards Institution.** Aggregate from Natural sources for concrete, BS 882, parts 2, 1973, London, pp 16.
- [64] **Swamy R.N. and Falih F.M.** Development of a small aggregate concrete for structural similitude of slag column connections. Design of concrete structure-Theo use model analysis, Elsevier Applied Science Publishers, London, 1985, pp 25-34.
- [65] **British Standards institution.** Methods of testing Concrete. BS 1881, 1970, London, 6 parts.
- [66] **Malhotra V.M.** Strength and durability characteristics of concrete in incorporating a pelletized blast furnace slag. Ref 2, vol. 2, pp 891-921.
- [67] **Mather B.** Laboratory tests of Portland blast furnace slag cement. J. Am. Con. Inst., vol.29, No3, Sept, 1957, pp 205-223.
- [68] **Swamy R.N. Ali A.S.R. and Theodorakopoulos D.D.** Early strength fly ash concrete

for structural applications. ACI journal, Vol.80, No5, September- October 1983, pp 414-423.

- [69] **Swamy R.N. and Alhamed A.H.M.S.** The use of pulse velocity measurements to estimate strength of air dried cubes and hence in situ strength of concrete. Proc. Int. conference on in Situ/non destructive testing of concrete, ACI Special Publication SP-82, 1984, pp 247-276.
- [70] **Proc. CANMET/ ACI first International Conference on the use of Fly Ash, Silica fume, Slag and Natural Pozzolans in concrete**, ACI special publication SP-79, vol. 1 and 2, 1983.
- [71] **British Standards Institution.** Structural Use of Concrete. BS 8110, Parts 2, 1985, London.
- [72] **Cripwell J.B. Brooks J.J. and Wainwright P.J.** Time dependent properties of concrete containing pulverized fuel ash and a superplasticizer. Proc. Second Intern. Conf. on Ash Technology and Marketing, London, Sept. 1984, pp 313-320.
- [73] **Marsh B.K.** Relationship between engineering properties and micro structural characteristics of hardiness cement paste containing pulverized fuel ash as a partial cement replacement. PhD Thesis, Hatfield polytechnic, 1984.
- [74] **Diamond S.** A critical comparison of mercury porosimetry and capillary condensation pore size distribution of Portland cement pastes. Cement and concrete research, vol.1, 1971, pp 531-545.
- [75] **Orr C.** Application of mercury penetration to materials analysis. Powder technology, vol.3, 1970, pp 117-123.
- [76] **Washburn E.W.** Note on a method of determining the distribution of pore size in a porous material. Proceeding of the national academy of sciences, vol.7, 1921, pp 115-116.
- [77] **Winslow D.W. and Diamond S.** A mercury porosimetry study of the evolution of porosity in Portland cement, Journal of materials, 5, 1970, pp 564-585.
- [78] **Auskern A. and Horn W.** Capillary porosity in hardened cement paste, Journal of Testing and Evaluation, JTEVA, vol.1, 1973, pp 74-79.
- [79] **Hobbs D.W.** Carbonation of concrete containing slag. workshop on blast furnace slag cement and concrete, York, England, 1985, Frodingham cement Co. ltd, Scunthorpe.
- [80] **RILEM Draft Recommendation.** Measurement of hardened concrete

carbonation depth. Mat. And STR, vol.3, No102, Nov- Dec, 1984, pp 435-900.

- [81] **Hammoud F.** Residual strength of clays with reference to shaft adhesion of bored pile
Mphil Thesis, University of Sheffield, 1987.
- [82] **Swamy R.N and Alasali M.M.** Effectiveness of mineral admixture in
controlling expansion in concrete due to alkali silica reaction. To be published.
- [83] **Rasheeduzzafar dakhil F.H. and Al-Gahtani A .S.** Deterioration of concrete
structures in the environment of the middle east. Journal, American concrete,
1984, No. 1, pp.13-20.
- [84] **Ingvarsson H. and Westerberg B.** Operation and maintenance of bridges and
other bearing structures. Swedish transport research board, Stockholm, 1986, No
.42
- [85] **Alexandre J. Sebileau J.L.** le laitier de haut fourneau ; elabor traitement,
propriétés, emplois .CT.P.L(Ed), Paris 1988, France, 340 pp.
- [86] **Wallbank E.J.** the performance of concrete bridges, department of transport,
HMSO ? London 1989, pp .96.
- [87] **Brown J.H.** Factors affecting Steel corrosion in concrete bridge substructures
LABSE symposium, 1989, 2, pp. 450-464.
- [88] **Mehta P.K.** durability of concrete-fifty years of progress? ACI publication,
1991, SP-126, pp.1-32.
- [89] American society of civil engineers, ASCE news, American society of civil
engineers, Washington, USA, September 1998.
- [90] The state of the nation, new civil engineer, London, may 2000, pp. 15-17
- [91] American society of civil engineers, ASCE news, American society of civil
engineers, Washington, USA, 2001.
- [92] The state of the nation. new civil engineer, London, September 2002, pp. 18-19
- [93] **NGuyen T.P.** Modélisation physico-chimiques de la pénétration des ions
chlorures dans les matériaux cimentaires, doctorat, école national des ponts et
chaussés, université de paris, paris ,2007.
- [95] **Malhotra V.M.** Supplementary cementing materials for concrete, CANMET, Ottawa,
1987, pp. 428.
- [96] **Swamy R.N.** Fly ash concrete – potential without misuse , RILEM materials

and structures , 1990 , 23 , No 138 , pp . 397 – 411

- [97] **Swamy R.N.** concrete with slag : high performance without tears, proc 4 th int conf on structural failure, durability and retrofitting, Singapore concrete institute, july 1993, pp 206 -236
- [98] **Swamy R.N. nakamura N .and sakai M.** High strength with durability: the twin offsprings of fine slag cements, high strength concrete, Norwegian concrete association, 1993, 2, pp 962 – 971.
- [99] **Swamy R.N.** Design for durability and strength through the use of fly ash and slag in concrete, advances in concrete technology, ACI publ SP – 171, 1997, pp. 1- 72
- [100] **Swamy R.N.** The magic of synergy : chemical and mineral admixtures for high durability concrete, proc int conf on the role of admixtures in high performance concrete, Monterrey, Mexico, 21-26 march 1999, pp. 1-8
- [101] **Mahotra V.M.** role of supplementary cementing materials in reducing greenhouse gas emissions, proc int conf on infrastructure regeneration and rehabilitation – improving the quality of life through netter construction – A vision for the next millennium, Sheffield academic press, 1999, pp 27-42
- [102] **Swamy R.N.** Design – the key to concrete material durability and structural integrity , proc int conf on reinforced concrete materials in hot climates , united Arab emirates university , 1994 , 1 , pp 3-36
- [103] **Swamy R.N.** A global design management strategy to enhance corrosion – free durable service life of concrete construction, jurnal of Chinese corrosion engineering, 1995, 9, No 4 pp. 205 -214
- [104] **Swamy R.N. Oshiro T and Tanikawa S.** Global strategy to Enhance Service life of deteriorating structures , extending the life span of structures , proc int symp , IABSE, zurich , 1995 , pp 459 -462 .
- [105] **Swamy R.N and laiw J.C.** effectiveness of supplementary cementing materials in controlling chloride penetration into concrete , ACI publ SP – 153 , 1995 , 2, pp 657-674
- [106] **Swamy R.N.** High performance and durability through design , int workshop on high performance concrete , Bangkok , ACI publ SP – 159 , 1996 , pp 209-230
- [107] **Swamy R.N.** design for chloride contaminated harsh environment: concrete protection – the key to durable service life, the Arabian journal for science and engineering, 1998, 23, No 2 C, Dec, pp. 3-40

- [108] **Swamy R.N.** designing concrete and concrete structure for sustainable development, int symp on sustainable development of the cement and concrete industry , Ottawa , Canada , CANMET , 1998 , pp 245 – 255
- [109] **Swamy R.N.** design for durable service life – linchpin sustainability in concrete construction. High performance concrete – performance and quality of concrete structures, ACI publ SP-186, 1999, pp 765 -788.
- [110] **Swamy R.N.** Holistic design: key to sustainability in concrete construction, structures and buildings, 146, nov. 2001, issue 4, pp. 371-379
- [111] **Swamy R.N.** Holistic design of concrete technology – the only route to durability and sustainability in construction, cement and concrete technology in the 2000 s, second int symp, Istanbul, sept 2000, pp. 58-72
- [112] **Nakamura N. Sakai M. and Swamy R.N.** Effect of slag fineness on the engineering properties of high strength concrete blended cement in construction , Elsevier applied science publishers , London , 1991 , pp 302-336
- [113] **Swamy R.N. Sakai M. and Nakamura N.** Role of Superplasticizers and slag for high performance concrete, Superplasticizers and other chemical admixtures in concrete, ACI Publ SP – 148, 1994, pp 1-26
- [114] **Nakamura N. Akai M. and Swamy R.N.** Effect of slag fineness on the development of concrete strength and Microstructure, ACI publ. SP – 132, Vol .2, 1992, pp. 1343 – 1366
- [115] **Swamy R.N. Hamada H and Laiw J.C.** A critical evaluation of chloride penetration into concrete in marine environment. Proceedings of the international conference on corrosion and corrosion protection of steel in concrete, Sheffield, 1994 pp. 404 – 419.
- [116] **Tanikawa S.and swamy R.N.** Unprotected and protected concrete: on – site chloride penetration with time in an aggressive environment. Proceedings of the international conference on corrosion and corrosion of steel in concrete, Sheffield, 1994 pp. 1069 – 1080
- [117] **Swamy, R.N and suryavanshi A.K.** Durability of blended cement concrete structural elements of higher water-binder ratio against chloride and carbonation attack, the Arabian journal for science and engineering , 1998 , 23 , No 1 B ,pp . 17 – 32
- [118] **Mehta P.K. and Gerwick Jr B.C.** cracking-corrosion interaction in concrete exposed to marine environment, concrete international – design and

construction, 1982, 4 No, 4, pp. 45-51

- [119] **Beedy A.W.** cracking, cover and corrosion of reinforcement, concrete international – design and construction, 1983, 5, No. 2 pp. 35-40
- [120] **Satake J. kawamura M. shirakawa K., mikami N., and swamy R.N.** long term corrosion resistance of epoxy coated reinforcing bars, corrosion of reinforcement in concrete construction, ellis horwood ltd, chichester , 1983 , pp.359-377.
- [121] **Swamy R.N.** Resistance to chlorides if galvanized rebars, corrosion of reinforcement in concrete, Elsevier applied science, london, 1990, pp. 586-600.
- [122] **Swamy R.N.** Durability of rebars in concrete, durability of concrete, ACI publication SP-131,1992,pp .67-98
- [123] **Swamy R.N.** Sustainable concrete for the 21st century – concept of strength through durability, the Indian concrete journal, December 2007, pp 7 -15.
- [124] **Swamy R.N and Mahmud H.B.** Mix proportions and strength characteristics of concrete containing 50 per cent low-calcium fly ash , ACI publ SP -91 , 1986 , 1 , pp 413-432.
- [125] **Swamy R.N and Mahmud H.B.** Shrinkage and creep behavior of high fly ash content concrete, ACI publ SP-114, 1989, 1 pp 453-475.
- [126] **Malhotra V.M** CANMET. Investigations dealing with high-volume fly ash concrete, advances in concrete technology, second edition, 1994, pp 445 – 482.
- [127] **Swamy R.N. and hung H.H.** Engineering properties of high volume fly ash concrete, ACI publ SP -178, 1998, 1, pp 331-359.
- [128] **Hung H-H. and Swamy R.N.** Pore structure affecting the strength development of high volume fly ash concrete, proceedings of the international conference on infrastructure regeneration and rehabilitation – improving the quality of life
- [129] **Proc.** International Conference on Slags and blended cement, Mons, Belgium, Sept. 1981.

Glossaire

Adjuvant : matériaux autre que l'eau, les granulats et le ciment portland (incluant les ciments à air entrainé et de haut fourneau) qui utilisé comme ajout au mélange de béton. Cet ingrédient peut être ajouté avant ou pendant les opérations de malaxage.

Attaque aux sulfates : Réaction chimique ou physique entre certains composants du ciment et des sulfates se trouvant dans le sol ou dans l'eau contenue par le sol.

Béton : matériau composite constitué d'un liant dans lequel on trouve des particules ou des fragments de matériaux de remplissage inertes. Dans le béton de ciment portland, le liant est un mélange de ciment portland et d'eau, tandis que les matériaux de remplissage peuvent prévenir d'une grande variété de granulats naturels et artificiels.

Cendre volante : Résidu fin résultat de la combustion de charbon pulvérisé. Ce résidu est évacué de la chambre de combustion du four par le gaz qui s'en échappé. Ces poudres fines sont utilisées comme ajout minéral dans les mélanges de béton.

Chaleur d'hydratation : chaleur due aux réactions chimique d'une substance avec l'eau telle la chaleur lors de la prise et du durcissement du ciment.

Ciment hydraulique compose : ciment hydraulique qui est constitué d'un mélange intime et uniforme de haut fourneau et de chaux hydraté ou de ciment portland et des ajouts en commun, par le malaxage du ciment portland et des ajouts déjà broyés ou une combinaison de ces méthodes.

Ciment Portland : Produit commercial qui, une fois mélangé avec de l'eau uniquement ou de l'eau, du sable et des granulats, à la propriété de se combiner avec l'eau pour former lentement une masse solide. Le ciment portland est une poudre très fine de clinker broyé. Le clinker est produit par la fusion d'un mélange de chaux, fer, d'alumine et de silice à des températures très élevées et en proportions précises et il est ensuite broyé avec du gypse pour obtenir les propriétés désirées.

Ciment Portland Pozzolanique : ciment hydraulique composé d'un mélange intime et uniforme de ciment portland ou ciment portland au laitier de haut fourneau avec des pouzzolanes. Il est produit par le broyage ou malaxage du clinker du ciment portland ou du ciment portland au laitier de haut fourneau et des pouzzolanes, par le broyage ou malaxage du clinker du ciment portland et des ajouts cimentaires, ou une combinaison de ces méthodes.

Clinkérisation : Processus physico-chimique qui caractérise la transformation du cru en clinker lors de la fusion partielle du cru au cours de la cuisson.

Consistance : Capacité du béton ou du mortier frais s'écoule. Les essais pour caractériser cette valeur pour le béton sont l'affaissement ou l'essai de pénétration d'une balle, tandis que pour le mortier, on utilise l'essai d'étalement.

Cure : Conservation à une température et à une humidité constante du béton fraîchement mis en place. Cette période de temps définie assure une hydratation et un durcissement adéquat du béton.

Dosage : Sélection d'une proportion de composants de mortier ou de béton pour faire l'emploi le plus économique des matériaux locaux pour produire du mortier ou du béton de propriétés spécifiées.

Durabilité : Capacité du béton à conserver son état initial en condition de service (résistance aux intempéries, aux attaques chimiques et à l'abrasion).

Durcissement : Lorsque le ciment portland est mélangé avec suffisamment d'eau pour former une pâte, les composants du ciment réagissent avec de l'eau pour former des produits cimentaires qui adhèrent entre eux, au sable et au gros granulat tout en devenant très durs. Tant que l'humidité est présente, la réaction peut durer pendant des années, augmentant toujours la résistance.

Eau de gâchage : Eau dans un mélange frais de coulis de ciment, de mortier ou de béton en excluant l'eau absorbée par les granulats (exemple ; eau considérée dans le calcul du rapport eau/ciment. Voir aussi eau de malaxage et humidité de surface.

Essai de compression : Essai effectué sur un échantillon de mortier ou de béton pour déterminer la valeur de la résistance en compression. Les essais pour le mortier sont effectués sur des cubes de 50 mm de côté et pour le béton sur des cylindres de 100 mm de diamètre par 200 mm de hauteur.

Essai en flexion : Essai qui permet de mesurer la résistance en flexion du béton (module de rupture) en testant un échantillon normalisé non-armé ayant la forme d'une poutre.

Fog room (Fog) : Chambre humide

Fillers calcaires : Désigne les fines calcaires produites indirectement par l'extraction en carrière ou directement par broyage des calcaires grossiers. Ils sont généralement considérés comme ajouts inactifs, dans le sens où leur addition n'améliore pas de manière significative les propriétés physico-mécaniques. Par contre, s'ils possèdent une finesse adéquate, ils peuvent améliorer les propriétés rhéologiques.

Granulat : Matériau granulaire comme le sable, le gravier, la pierre concassée, le béton concassé ou le laitier de haut fourneau utilisé avec un ciment hydraulique pour fabriquer du béton ou du mortier.

Granulat Réactif : Granulat contenant des composés de silices ou de carbonates qui peuvent réagir avec les alcalis du ciment portland. Dans certains cas, cette réaction chimique peut produire une expansion nocive du béton.

Laitier de haut fourneau (LHF) : sous produit non-métallique composé essentiellement de silicates et d'aluminosilicates de calcium et d'autres bases, formé dans un haut fourneau à l'état fondu en même temps que le fer.

Laboratoire (Lab) : local aménagé pour faire des recherches scientifiques, des essais.

Microscope électronique à balayage (MEB) : Instrument d'optique composé de plusieurs lentilles, qui permet de voir des objets très petits.

Mortier : Béton ne comprenant aucun granulat de dimension supérieure à 5mm.

Pâte : composant du béton fait de ciment et d'eau.

Pâte de ciment : composant du béton ou du mortier formé d'eau et de ciment.

Porosité : rapport, exprimé en pourcentage, du volume de vides dans un matériau et le volume total de ce matériau (incluant les vides).

Pouzzolane : Matériau siliceux ou siliceux et alumineux qui possède peu ou pas de valeur cimentaire, mais qui, une fois finement divisé et en présence d'humidité, réagira chiquement avec l'hydroxyde de calcium à des températures ordinaires pour former des composant ayant des qualités cimentaires.

Prise : état de la pâte de ciment, du mortier ou du béton lorsqu'il perd de sa plasticité. On le mesure en termes de résistance à la pénétration ou à la déformation. La prise initiale est reliée au premier durcissement, tandis que la prise finale est reliée au durcissement final.

Prise du ciment : Développement du durcissement de la pâte de ciment, du mortier ou du béton résultant de l'hydratation du ciment. La pâte formée lorsqu'on mélange du ciment avec de l'eau demeure plastique pour une courte période, il est toujours possible de remalaxer le béton sans qu'il n'y ait d'effets nocifs. Cependant, plus la réaction évalué plus le béton perd de sa plasticité. Cette période de premier durcissement est appelée période de prise.

Rapport Eau-Ciment : Rapport entre la quantité d'eau (excluant l'eau absorbé par les granulats) et la quantité de ciment portland dans le mélange de béton ou de mortier et exprimé en décimale par masse.

Rapport Eau-Liant : Rapport entre la quantité d'eau (excluant l'eau absorbé par les granulats) et la quantité de ciment portland ainsi que tout autre matériau cimentaire (cendre volantes, pouzzolane,...) dans un mélange de béton ou de mortier et exprimé en décimale par masse.

Réaction Alkali-Silice (RAS) : Réaction entre les alcalis (sodium et potassium) du ciment portland et certaines phases siliceuses réactives présentes dans des granulats tel que l'opale, les cherts, le quartz à extinction roulante et le verre volcanique. Cette réaction peut causer une expansion anormale et la fissuration.

Résistance : terme qui qualifie la capacité d'un matériau à résister à des contraintes ou à une rupture due à des forces externes. Voir aussi résistance à la fatigue, résistance en flexion, résistance au cisaillement, résistance à la traction).

Résistance à la compression : Résistance mesurée d'un échantillon de mortier ou de béton sous chargement axial. Exprimé en MPa par rapport à la section transversale de l'échantillon.

Résistance à la flexion : propriété d'un matériau ou d'un élément d'une structure qui donne un indice sur sa capacité à résister à une rupture par courbure imposé. Voir aussi module de rupture.

Résistance à la traction : Contrainte maximale à laquelle peut résister un matériau sous charge axiale de traction. Cette valeur est basée sur l'aire de la section transversale de l'échantillon testé.

Résistance au jeune âge : Résistance développée peu de temps après la mise en place du béton, généralement durant les 72 premières heures.

Résistance aux sulfates : Habilité d'un granulat, d'une pâte de ciment ou d'un mélange de résister aux attaques des ions sulfates en solution.

Superplastifiant : Réducteur d'eau à haute efficacité utilisé pour fluidifier un béton.

Teneur en ciment : Quantité de ciment contenue dans un volume unitaire de béton ou de mortier généralement exprimée en kilogrammes, barils, sacs ou