

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Département de Génie Civil

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

THESE DE MAGISTER

Présentée par: Abdelouahed KRIKER

Ingénieur d'Etat Diplômé de l'E.N.P.

DURABILITE DU BETON A BASE DE LAITIER

Soutenue en Juillet 1992 devant le jury composé de:

MM. A. CHARIF	Professeur (E.N.P.)	Président
M.T. ABADLIA	Ph.D. (I.N.M.C.)	Examineur
S. BELKACEMI	Ph.D. (E.N.P.)	Examineur
R. BOUTEMEUR	Chargé de cours (E.N.P.)	Examineur
A. BALI	Professeur (E.N.P.)	Rapporteur
A. BOUIKNI	M.Phil. (I.N.E.S. Chlef)	Invité

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère des Universités et de la Recherche Scientifique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Département de Génie Civil

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

THESE DE MAGISTER

Présentée par: Abdelouahed KRIKER

Ingénieur d'Etat Diplômé de l'E.N.P.

DURABILITE DU BETON A BASE DE LAITIER

Soutenue en Juillet 1992 devant le jury composé de:

MM. A. CHARIF	Professeur (E.N.P.)	Président
M.T. ABADLIA	Ph.D. (I.N.M.C.)	Examineur
S. BELKACEMI	Ph.D. (E.N.P.)	Examineur
R. BOUTEMEUR	Chargé de cours (E.N.P.)	Examineur
A. BALI	Professeur (E.N.P.)	Rapporteur
A. BOUIKNI	M.Phil. (I.N.E.S. Chlef)	Invité

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

الإهداء

إلى التي هممتني وهنأ على وهن
إلى والدي الكريم الذي ما فتئ يشجعني و يخصني
بالعناية
إلى إخواني وأخواتي
إلى كل عائلتي
إلى أخي خبيستي
إلى كل أصدقائي وأساتذتي
إلى كل الذين آمنوا بالحق و صبروا في سبيله

إلى كل هؤلاء .. أهدى ثمرة جفندي

عبد الواحد كريك

REMERCIEMENTS

Il m'est particulièrement agréable d'exprimer à mon directeur de thèse, A. BALI, Professeur à l'E.N.P., ma profonde gratitude pour sa sollicitude, ses conseils efficaces et ses encouragements permanents qu'il m'a prodigués durant le déroulement de ce travail de recherche.

J'adresse mes remerciements à Monsieur N. EDEN, Ph.D., à Liverpool Polytechnic pour l'orientation du sujet de cette thèse.

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à Monsieur A. CHARIF, Professeur à l'E.N.P., d'avoir bien voulu accepter de présider le jury de cette thèse.

J'exprime également ma reconnaissance à Monsieur M.T. ABADLIA, Ph.D., (I.N.M.C. Boumerdès) et Monsieur R. BOUTEMEUR, Chargé de cours à l'E.N.P., dont les suggestions ont permis de parfaire ce document et je remercie Messieurs S. BELKACEMI Ph.D., à l'E.N.P. et A. BOUIKNI, M.Phil., à l'I.N.E.S. Chlef, d'avoir accepté de faire partie de ce jury.

Je tiens à remercier la direction du projet E.N.P./P.N.U.D., d'avoir permis le bon déroulement de ce modeste travail.

Je remercie également la Direction de la recherche appliquée (D.R.A.) d'El-Hadjar pour l'accueil chaleureux lors de mon stage.

Je tiens également à remercier le Directeur de l'U.R.E.G. de Boumerdès, ainsi que les Chefs de département "liant", et "documentation", pour leurs contributions.

Je remercie vivement les techniciens de laboratoire du Génie Civil de m'avoir aidé dans la réalisation du programme expérimental.

Je remercie enfin, pour leurs aides tous mes collègues Post-graduatant au sein du département de Génie Civil.

SOMMAIRE

CHAPITRE PREMIER	:	INTRODUCTION	1
CHAPITRE DEUXIEME	:	SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE	5
2.1		INTRODUCTION	5
2.2		HISTORIQUE SUR LA VALORISATION DU LAITIER	5
2.3		PRODUCTION ET UTILISATION DU LAITIER	6
2.3.1		Production	6
2.3.2		Domaines d'utilisation	9
2.4		COMPOSITION CHIMIQUE DU LAITIER	11
2.5		CLASSIFICATION MONDIALE DES LAITIERS	13
2.6		STRUCTURE VITREUSE DU LAITIER	17
2.7		HYDRATATION ET ACTIVATION DU LAITIER	20
2.7.1		Activation par la chaux.....	21
2.7.2		Activation par le clinker	21
2.7.3		Activation par traitement thermique	22
2.8		PROPRIETES DES CEMENTS PORTLAND AU LAITIER ...	22
2.8.1		Hydratation	23
2.9		PROPRIETES DES BETONS AU LAITIER	24
2.9.1		Béton frais	24
2.9.1.1		Ouvrabilité	25
2.9.1.2		Remontée d'eau et ségrégation	25

2.9.1.3	Chaleur d'hydratation	26
2.9.2	Béton durci	26
2.9.2.1	Résistance mécanique	26
2.9.2.2	Module d'élasticité	29
2.9.2.3	Retrait	29
2.9.2.4	Fluage	31
2.10	DURABILITE DES BETONS AU LAITIER	34
2.10.1	Perméabilité	34
2.10.2	Résistance à l'eau de mer	36
2.10.3	Résistance aux attaques sulfatées	41
2.10.4	Résistance à la carbonatation	42
2.10.5	Réactions alcalis-granulats	43
2.10.6	Conclusion sur la durabilité	45
2.11	CONCLUSION ET BUT DE LA RECHERCHE	45
CHAPITRE TROISIEME: CARACTERISATION ET METHODES D'ESSAIS		47
3.1	INTRODUCTION	47
3.2	LE LAITIER D'EL-HADJAR	48
3.2.1	Composition chimique	48
3.2.2	Qualité du laitier granulé	48
3.2.3	Traitement du laitier granulé	50
3.3	LE CIMENT PORTLAND	51
3.3.1	Composition chimique	51
3.3.2	Composition minéralogique	51
3.4	LES GRANULATS	52
3.4.1	Le sable	52
3.4.2	LE gravier	52

3.5	METHODES D'ANALYSES ET D'ESSAIS	
3.5.1	Type d'éprouvettes	54
3.5.2	Confection du béton et du mortier	55
3.5.3	Conservation des éprouvettes	58
3.6	ESSAIS PHYSICO-MECANIQUES	58
3.6.1	Essais sur les liants	59
3.6.1.1	Masse volumique apparente	59
3.6.1.2	Masse volumique absolue	59
3.6.1.3	Finesse de mouture (SSB)	59
3.6.1.4	Teneur en eau	60
3.6.1.5	Essai de prise	60
3.6.1.6	Chaleur d'hydratation	61
3.6.2	Essais sur béton frais	62
3.6.2.1	Mesure de la consistance	62
3.6.2.2	Mesure de l'air occlus	62
3.6.3	Essais sur béton et mortier durcis	62
3.6.3.1	Réctification et surfaçage	62
3.6.3.2	Essais de résistance	63
3.6.3.3	Module d'élasticité et Coefficient de poisson	64
3.6.3.4	Essai ultrasonique	65
3.6.4	Essai de durabilité	67
3.6.4.1	Porosité	67
3.6.4.2	Perméabilité	67

4.1 INTRODUCTION 68

4.2 ESSAIS DE PRISE ET DE CHALEUR D'HYDRATATION .. 68

4.3 ESSAIS SUR BETON FRAIS 70

4.4 ESSAIS SUR BETON DURCI 71

 4.4.1 Effet du régime de cure sur la
 résistance mécanique 71

 4.4.1.1 Résistance à la compression 71

 4.4.1.2 Résistance à la flexion 78

 4.4.1.3 Comparaison des 3 régimes de cure.. 81

 4.4.1.4 Comparaison avec les résultats
 de la littérature 84

 4.4.2 MODULE D'ELASTICITE 84

 4.4.1 Module d'élasticité dynamique 84

 4.4.2 Module d'élasticité statique 86

 4.4.3 Comparaison avec les résultats
 de la littérature 90

 4.4.3 MESURE DE L'ONDE LONGITUDINALE DU SON .. 90

4.5 DURABILITE DU BETON AU LAITIER 96

 4.5.1 Introduction 96

 4.5.2 Perméabilité et porosité 96

 4.5.3 Durabilité à l'eau de mer 98

4.6 CONCLUSION 104

CHAPITRE CINQUIEME: CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS 105

BIBLIOGRAPHIE 110

ANNEXE

CHAPITRE PREMIER: INTRODUCTION

INTRODUCTION

Le problème des sous-produits et déchets industriels est l'un des problèmes majeurs de notre civilisation industrielle, et l'avenir même de cette civilisation est largement conditionné par les solutions que nous pourrions apporter à ce problème. A cet effet, les travaux de Génie Civil, présentent des possibilités intéressantes pour la valorisation de ces sous-produits et déchets qui doivent être exploitées en profondeur.

La valorisation de ces résidus en Génie Civil, permet de résoudre les problèmes qui se posent sur le plan écologique et la pollution de l'environnement. Elle offre une solution économique en évitant l'extraction de la matière première donc préservation des sites.

L'activité économique, notamment la construction, a connu, en Algérie, ces dernières décennies, un développement exceptionnel. Cependant cette expansion connaît hélas d'énormes difficultés en termes de disponibilités de matériaux particulièrement le ciment et l'acier souvent importés de l'étranger. L'Algérie dépense ainsi chaque année, une partie de ses revenus en devises pour l'importation de ces matériaux de construction.

Pour remédier à cette situation, il est impératif de

songer à l'emploi, dans la construction, de matériaux locaux. La valorisation des déchets et sous-produits industriels dans le Génie Civil ne peut que donner des résultats encourageants aussi bien en termes d'économie, d'écologie, que de comportement.

On peut définir un sous-produit comme étant un résidu obtenu au cours de la production d'un produit principal, exemple, le laitier des hauts fourneaux est un sous-produit de la production de la fonte [1].

Un déchet industriel est par contre un résidu qu'on obtient à la fin du cycle de consommation du produit principal, exemple les pneumatiques usés [1].

Dans les pays industrialisés, les résidus valorisés dans le domaine du Génie Civil sont les suivants: [2]

- Le laitier des hauts fourneaux, qui est utilisé en cimenterie, en constructions routières, et comme granulats (sable ou gravier).

- Les cendres volantes, qui sont des sous-produits des centrales thermiques ou bien des déchets de combustion du charbon, qui sont utilisées dans les cimenteries.

- Les déchets de l'industrie de papier, utilisés dans les constructions de bâtiments (briques)

- les sulfates résiduels valorisés dans les constructions routières.

- le soufre, qui est un résidu provenant de la sulfuration des gaz naturels, est utilisé dans les mélanges au

bitume et les liants pour béton ou mortier.

- Divers déchets comme:

-Les enrobés concassés, utilisés dans les routes

-Les bétons concassés, utilisés dans les granulométries

-Les amiantes des mines valorisés dans la production des fillers

-La poussière des ciments, utilisée dans la production des panneaux et mousse de verre

-les chutes de câbles, valorisé dans la production d'acier.

Les possibilités de valorisation des sous-produits et déchets industriels dans le domaine du Génie Civil sont très larges.

L'Algérie dispose d'une quantité énorme de déchets et sous-produits industriels. A titre d'exemple, on peut citer le laitier, les scories, et le phospho-gypse, dont la valorisation est loin d'être satisfaisante [10].

L'objectif de notre travail de recherche est de mettre en évidence la possibilité de valoriser le laitier d'El-Hadjar en cimenterie, ce dernier est un sous-produit de la fabrication de la fonte au complexe sidérurgique (Annaba).

La production annuelle de laitier est de 680443 tonnes, dont 260000 tonnes sous forme de laitier granulé [10], qui ne trouve pas de réelle utilisation. Ce laitier est stocké sur des sites agricoles portant ainsi préjudice à l'équilibre écologique de l'environnement.

Dans un souci de sauvegarder l'environnement et de palier au déficit économique, nous avons envisagé d'étudier les possibilités d'élaborer un béton à fortes teneurs en laitier ayant des caractéristiques satisfaisantes, en particulier, la résistance mécanique et la durabilité.

L'investigation sur l'utilisation du laitier granulé d'El-Hadjar, dans le béton, a nécessité un programme expérimental bien défini.

Notre travail de recherche portant sur les propriétés des bétons à base de laitier, est de ce fait scindé, en deux grandes parties: Une synthèse bibliographique et une étude expérimentale.

Dans la partie bibliographique, nous avons exposé les résultats des travaux antérieurs effectués par différents auteurs, notamment sur les caractéristiques mécaniques et physiques, ainsi que la durabilité des bétons et mortiers à base de laitier pour mettre en évidence la possibilité d'utilisation du laitier granulé dans les cimenteries.

Dans la deuxième partie nous avons effectué des essais expérimentaux sur le laitier d'El-Hadjar en tant que liant hydraulique incorporé, dans une pâte de ciment (CPA), dans un mortier ou dans un béton.

Les résultats obtenus sont alors comparés à ceux rapportés dans la littérature.

CHAPITRE DEUXIEME: SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

2 LE LAITIER DES HAUTS FOURNEAUX

2 1 INTRODUCTION

Le laitier des hauts fourneaux est un sous produit de la production de la fonte dans les hauts fourneaux obtenue à partir du minerai et du coke métallurgiques [4].

Une importante production de laitier est enregistrée annuellement. Le stockage de ce laitier sous forme de collines artificielles, a posé de graves problèmes écologiques notamment la stérilisation des terres agricoles riches et la défiguration des sites.

Il est de ce fait urgent de valoriser ce sous-produit en l'utilisant judicieusement dans le Génie Civil.

2.2 HISTORIQUE SUR LA VALORISATION DU LAITIER

DUSSAR [1] rapporte que, BELIDOR et SVAB recommandaient dès le XVIII^e siècle, le laitier broyé comme masse d'addition au mortier de chaux. Au XIX^e siècle, VICAT avait entrevu les propriétés hydrauliques de ce produit, et ce n'est qu'en 1862 que HANGEN a pu confirmer ces propriétés par des essais effectués en Allemagne.

Au début du XX^e siècle une première utilisation du ciment au laitier a été entreprise en Allemagne, puis en France. Mais ce n'est qu'après la première guerre mondiale, suite à un usage massif en travaux maritimes, que le ciment au laitier a été utilisé en grande quantité [1].

A partir de 1928, en France, les ciments au laitier figurent dans les normes et les cahiers de charge types [3].

L'utilisation du laitier granulé dans le béton a commencé à la fin de 1950 dans plusieurs pays (Australie, Japon, Canada, etc ..) [6], tandis que son utilisation dans les constructions routières n'a commencé qu'en 1960 en France [7].

Actuellement l'utilisation des ciments au laitier est estimée à 20% de la production totale des ciments en Europe [5].

2.3 PRODUCTION ET UTILISATION DU LAITIER

2.3.1 PRODUCTION

Le laitier de haut fourneau résulte de la réduction du minerai de fer dans le processus de fabrication de la fonte. La figure 2.1 montre de façon schématique le procédé d'obtention du laitier.

A la partie inférieure du haut fourneau, et suite à la différence de leur masse volumique, le laitier flotte à la surface de la fonte en fusion. Les deux produits sont par la suite périodiquement coulés à une température de 1500°C. En ouvrant l'orifice inférieur ou supérieur du four on obtient respectivement le coulage de la fonte ou du laitier [6].

Suivant le mode de refroidissement on distingue trois catégories de laitier:

A) LE LAITIER COULE EN FOSSE OU CRISTALLISE

Ce laitier est refroidi lentement à l'air libre jusqu'à durcissement. Après extraction et concassage, il sera utilisé comme granulat. Ce laitier ne possède aucune propriété hydraulique et ne peut être employé en cimenterie comme adjuvant actif [1].

B) LE LAITIER VITRIFIÉ

le refroidissement brusque par un courant d'eau froide

transforme le laitier liquide en un granulat fin d'où le nom de laitier granulé, qui sera utilisé comme ajout au liant ou comme liant hydraulique [1].

C) LE LAITIER BOULETE

Une autre forme de production a été développée et consiste en un boulettage du laitier, qui donne d'une part un granulat léger et d'autre part sable 0-3 mm pouvant être utilisé dans la fabrication des liants hydrauliques. La Figure 2.2 montre l'installation de fabrication du laitier bouleté [8].

Le tableau 2.1 illustre la production mondiale du laitier en 1983 [8].

Les tableaux 2.1 et 2.2 donnent respectivement un aperçu sur la production et l'utilisation du laitier pour quelques pays [3].

Tableau 2.1: Production mondiale du laitier de hauts fourneaux pour l'année 1983 [8]

pays	production x 10 ⁶ tonnes	utilisation x 10 ⁶ tonnes
Chine	26.0	20.00
Japon	24.0	10.00
USA	13.0	0.50
Allemagne	11.0	2.80
G.B	05.6	0.16
Australie	04.7	0.17
Inde	04.0	0.00
Canada	02.9	0.20

Tableau 2.2: valorisation du laitier des hauts fourneaux [3]

pays	production ciments au laitier $\times 10^6$ tonnes	utilisation toute catégorie $\times 10^6$ tonnes
URSS	27.00	100.00
Japon	3.57	59.46
Roumanie	2.99	8.52
Italie	2.90	31.87
Allemagne	1.40	8.00
Belgique	1.25	-----
USA	0.36	70.40
G.B	0.02	18.14

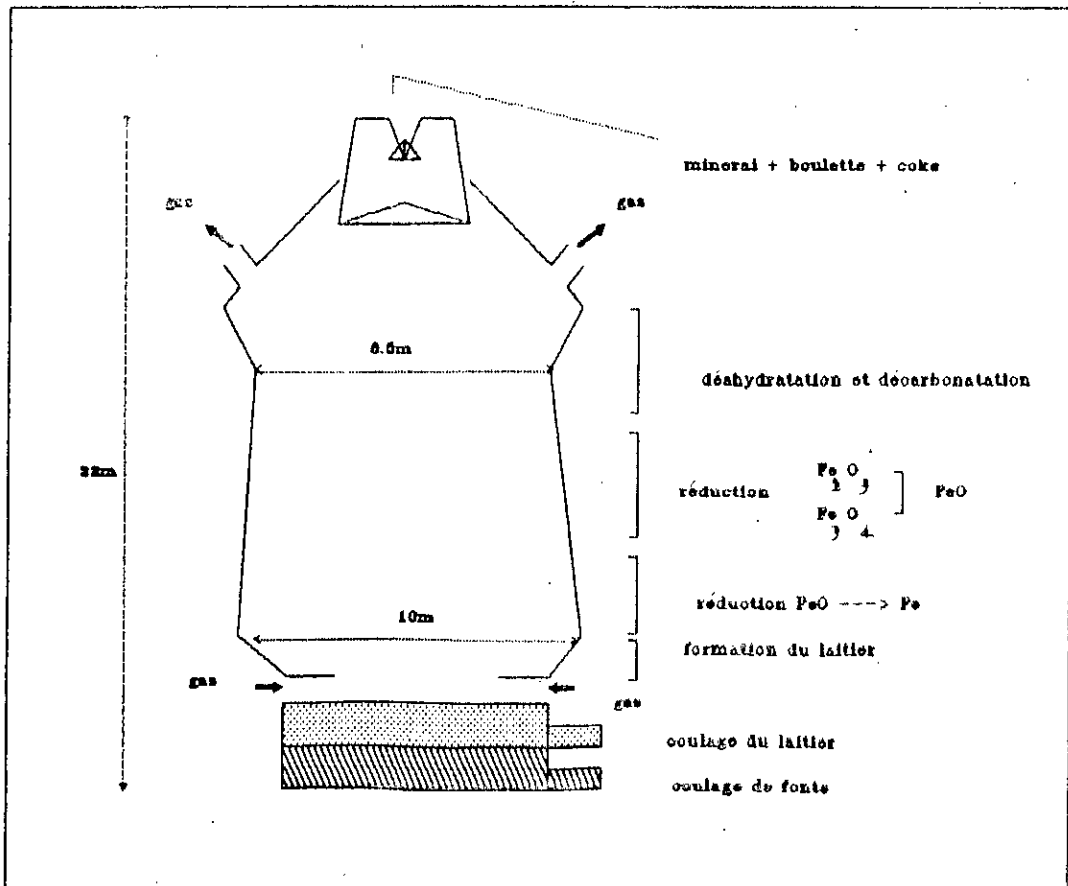
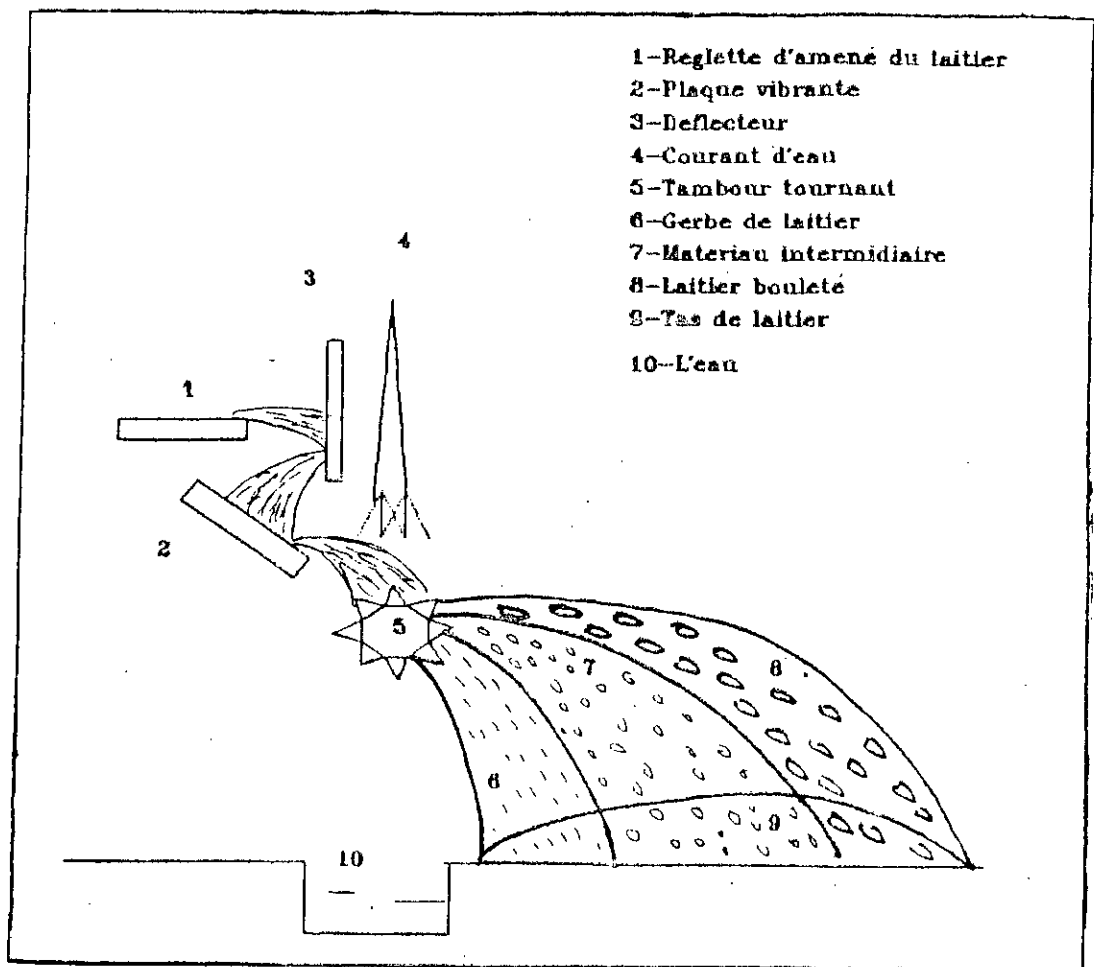


Fig. 2.1: Haut fourneau [8]



- 1-Reglette d'amené du laitier
- 2-Plaque vibrante
- 3-Deflecteur
- 4-Courant d'eau
- 5-Tambour tournant
- 6-Gerbe de laitier
- 7-Materiau intermédiaire
- 8-Laitier bouleté
- 9-Tas de laitier
- 10-L'eau

Fig. 2.2: Instalation de fabrication du laitier bouleté [8]

2.3.2 DOMAINES D'UTILISATION DU LAITIER

Depuis quelques temps le laitier est utilisé dans différents domaines.

2.3.2.1 EN CIMENTERIE

Le ciment portland au laitier (CPL) est le produit le plus couramment fabriqué en utilisant le laitier granulé [2].

Quand on ajoute au clinker portland 10% à 30% de laitier on obtient des ciments du type C.P.A.L (ciment portland au laitier) qui sont les ciments les plus utilisés en France. Ils sont employés dans tous les travaux aussi bien hydrauliques qu'agricoles (fosses à puris, sol d'étable...), dans les fondation et maçonnerie, et dans les travaux souterrains (égouts) [2],[70].

Alors si le pourcentage de substitution en laitier est de 40% à 75% on obtient des C.H.F (ciment de hauts fourneaux) qui sont utilisés, dans les travaux de béton armé en milieux humides, dans les ouvrages massifs (fondations, piles, mur de soutènement) notamment pour leur faible chaleur de prise et dans les ouvrage souterrains, car ces ciments ont une très bonne tenue en présence d'agents agressifs (eaux de mer, eaux séléniteuses) [2],[70].

Enfin si le pourcentage de remplacement en laitier dépasse 80% on obtient alors des C.L.K (ciment de laitier au clinker) qui sont employés dans tous les travaux hydrauliques (fondations et ouvrages souterrains). Ces ciments ont généralement un bon comportement en milieux agressifs (eaux de mer ,eaux acides, eaux magnésiennes, eaux séléniteuses, eaux d'égout). Ils conviennent donc parfaitement pour la réalisation de silos d'usines chimiques, les réservoirs pour liquides fer-mentescibles et les ouvrage maritimes [2],[70].

2.3.2.2 DANS LA CONSTRUCTION ROUTIERE

A) COUCHE D'ASSISE

C'est vers 1960 qu'à commencer l'utilisation du laitier granulé dans les couches d'assises des chaussées sous forme de grave laitier. Cette dernière qui est un mélange fabriqué et homogénéisé dont la composition est la suivante: [7]

- 80% à 85% de granulats
- 15% à 20% de laitier granulé
- 1% de chaux.

Remarque: Le procédé de bouletage de laitier, nous permet d'obtenir comme le montre la figure 2.2 trois types de laitiers: un laitier granulé, un laitier bouleté et un mélange de laitier granulé et bouleté à la zone intermédiaire. Un criblage de ce dernier permet de séparer le laitier granulé du laitier bouleté. Le laitier granulé résultant de cette opération sera utilisé pour la production des graves laitier [7].

B) COUCHE DE FONDATION

le laitier coulé en fosse (rocheux), après concassage peut être utilisé dans les couches de fondation pour les routes [7].

2.3.2.3 COMME GRANULATS

Le laitier rocheux, après concassage peut être utilisé comme granulats dans les bétons. Le laitier bouleté entre dans la composition des bétons légers, alors que le laitier granulé peut être utilisé comme sable [2].

2.3.2.4 DOMAINES DIVERS

Le laitier peut être utilisé dans :

- Les remblais;
- Le béton expansé;
- Les chemins de fer comme ballast [2].

2.4 COMPOSITION CHIMIQUE DU LAITIER

Les caractéristiques chimiques des laitiers peuvent être élucidées en considérant le diagramme de fusion du système ternaire $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ (C-A-S), appelé diagramme de RANKIN et WRIGHT, représenté par la figure 2.3 [9].

La composition chimique du laitier varie suivant le rapport pondéral de chargement du haut fourneau en minerai, coke et fondant en général. On distingue deux sortes de laitier: Le laitier basique et le laitier acide

2.4.1 LE LAITIER ACIDE

C'est un laitier contenant en majeure partie de la silice (SiO_2) fondue de 50 à 60%, un peu d'alumine (Al_2O_3) et de 25 à 30% de chaux. Le rapport pondéral des principaux constituants (chaux et silice), pour un tel laitier est de $(\text{CaO}/\text{SiO} < 1.1)$ [4].

Ce laitier se vitrifie par refroidissement, même lorsque ce dernier est assez lent comme par exemple dans les fosses à laitier. Ce fait est dû à l'épuisement rapide de la silice fondue, qui ne permet plus les mouvements moléculaires nécessaires au rangement des molécules en vue de la formation de cristaux (la structure atomique des solides) [4].

Bien que le laitier ainsi vitrifié ait gardé sa chaleur de fusion, puisqu'il n'est pas passé à l'état cristallisé, ne possède pas de propriété hydraulique. En effet sa structure vitreuse n'est pas désordonnée (comme on va le voir au paragraphe 2.6) [4].

2.4.2 LE LAITIER BASIQUE

En général c'est un laitier ayant un rapport pondéral ($\text{CaO}/\text{SiO}_2 > 1.3$). Ce laitier a un bon pouvoir hydraulique [4].

Dans la production du laitier, un chargement correct du haut fourneau en minerai, coke et fondant conduit à une composition chimique du laitier parfaitement prédéterminée.

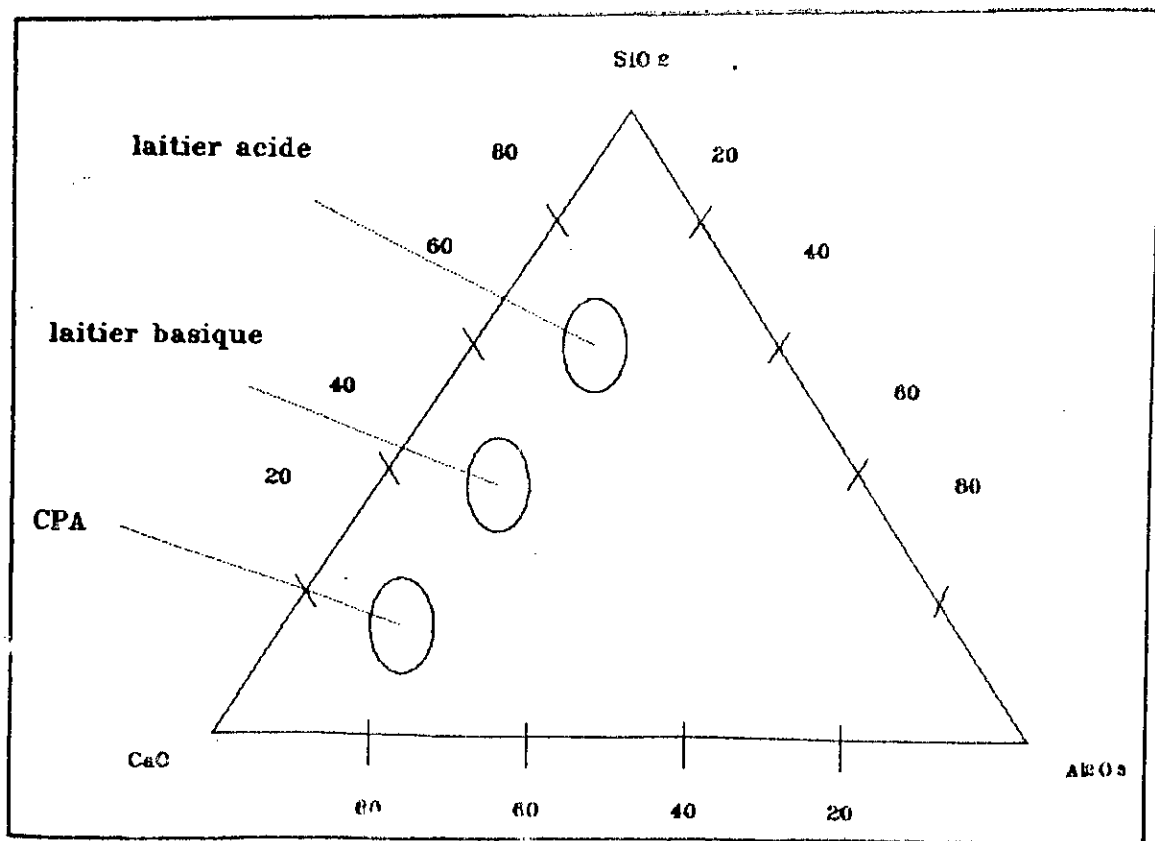
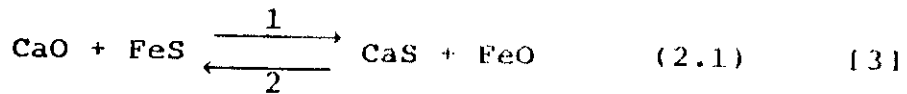


Fig. 2.3: Diagramme ternaire (C-S-A) [9]

L'obtention du laitier basique est fortement recommandée

En effet pour établir une bonne fonte, cette dernière doit avoir une teneur en soufre inférieure à 0.05%. L'élimination du soufre de la fonte ou la désulfuration de la fonte est très difficile. En fait le soufre dans la fonte se trouve sous la forme (FeS), qui réagit avec la chaux du laitier (CaO) suivant la réaction suivante:



La désulfuration de la fonte est la réaction dans le sens 1, qui n'est possible que si la concentration en chaux (CaO) est supérieure à celle du sulfure de calcium (CaS). Autrement dit il faut avoir un laitier riche en chaux, ou bien un laitier basique ($\text{CaO}/\text{SiO}_2 > 1.1$) [3],[11].

En conclusion, la composition chimique du laitier varie d'une coulée à une autre, et d'un pays à un autre. Cependant, il est important de produire un laitier basique pour assurer la désulfuration de la fonte. Un tel laitier n'est possible à obtenir que par un bon réglage du chargement du haut fourneau en minerai, fondant et coke.

Le tableau 2.3 montre les compositions chimiques des laitiers pour différents pays [6],[8],[56].

A titre de comparaison le tableau 2.4. montre la composition chimique des ciments portlands [3].

2.5 CLASSIFICATION MONDIALE DES LAITIERS

L'évaluation de la qualité des laitiers métallurgiques se fait par l'intermédiaire d'un certain nombre de modules représentant le rapport des constituants chimiques essentiels, SiO_2 , CaO, Al_2O_3 et MgO [13].

Divers indices ont été proposés, tirés de l'expérience ou d'essais sur les résistances mécaniques des ciments à base de laitier [9], exprimant soit la basicité soit l'hydraulicité du

Tableau 2.3: Composition chimique des laitiers granulés [6], [8], [10]

pays	Composant							Indice C/S
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	
G.B	41.6	35.9	10.1	---	0.25	0.24	0.25	1.16
FRANCE	43.0	35.0	12.0	8.0	---	---	0.40	1.23
U.S.A	42.0	40.0	17.0	19.0	2.20	1.50	1.00	1.05
JAPON	37.0	31.0	16.0	8.0	---	---	0.70	1.19

Tableau 2.4: Composition chimique des CPA [3]

pays	Composant							Indice C/S
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	
G.B	64.6	19.6	5.8	1.2	2.7	3.2	--	3.29
FRANCE	65.42	21.1	5.07	0.71	3.37	2.68	0.11	3.10

laitier. Dans l'interprétation de ces rapports et indices, les abréviations suivantes: $S=SiO_2$, $C=CaO$, $M=MgO$, $A=Al_2O_3$, Ib =Indice de basicité, Ih =Indice d'hydraulicité sont couramment utilisées.

Les indices de basicité "Ib" indiquent si un laitier est basique ou acide. Les indices de basicité les plus utilisés sont les suivants:

$$IB_1 = C/S \qquad IB_2 = (C+M)/S \qquad IB_3 = (C+M)/(S+A)$$

Pour plusieurs pays, un laitier basique doit avoir un indice de basicité Ib_1 compris entre 1.1 et 1.5 [4].

Cependant, il faut noter que ces indices de basicité expriment uniquement l'acidité du laitier. Ils ne sont pas assez valables pour définir l'hydraulicité de ce matériau, compte tenu du fait que l'alumine (Al_2O_3) n'est pas prise en considération, spécialement dans IB_1 et IB_2 . Il s'en suit que l'appellation "laitier acide" pour les laitiers à $IB_1 < 1.1$ n'est pas une limite au laitier hydraulique, si les teneurs en CaO plus faibles sont compensées par des teneurs plus fortes en MgO et Al_2O_3 [11].

Pour cette raison, l'hydraulicité du laitier est exprimée par l'intermédiaire d'un groupe d'indices appelés indices d'hydraulicité "Ih". ils sont présentés sous forme de formules empiriques reliant les différents constituants chimiques du laitier [11].

Les indices d'hydraulicité les mieux connus sont rassemblés au tableau 2.5 [11]. Les deux groupes Ih_1 à Ih_7 et Ih_{11} à Ih_{15} se rapportent seulement aux éléments majeurs du laitier de haut fourneau. Cependant, dans les indices Ih_8 à Ih_{10} , d'autres éléments mineurs tels que le manganèse (MnO), l'oxyde de baryum (BaO) et l'oxyde de fer (FeO) sont pris en considération. Plus précisément l'indice Ih_{10} a été proposé pour des teneurs en (MnO) allant jusqu'à 14% en poids. Alors que les indices Ih_{11} et Ih_{12} sont valables pour des teneurs croissantes de l'alumine (Al_2O_3) [11].

Ces indices d'hydraulicité ont une application propre à chaque pays.

Ainsi, en Allemagne, SMOLCZYK [11] rapporte que, l'indice adopté est le Ih_{11} qui doit être supérieur à 1. Cependant, en 1942 cet indice est remplacé par un autre (Ih_3) dont la valeur est supérieure ou égale à 1, par la suite un autre indice Ih_8 a été proposé [11] et est défini comme suit:

- * $Ih_8 > 1.9$laitier très bon
- * $1.5 < Ih_8 < 1.9$laitier bon

En France BEHIM [3] révèle que, l'indice Ih_{13} adopté est celui proposé par CLERET et LAGAVANT.

Selon cet indice Ih_{13} une classification des laitiers est établie:

- * Pour $12 < Ih_{13} < 15$ laitier médiocre
- * Pour $15 < Ih_{13} < 20$ bon laitier
- * Pour $Ih_{13} > 20$ excellent laitier

Cependant, dès 1910, un cahier de charge, imposait un autre indice noté Ih_{14} qui doit être supérieur à 1 [3].

Actuellement, en France, certains utilisateurs préconisent simultanément l'indice d'hydraulicité Ih_{15} et l'indice de basicité Ib_1 [11], de la façon suivante:

$$* 1.35 < Ib_1 < 1.45 \quad \text{et} \quad 0.45 < Ih_{15} < 0.55$$

Enfin au Japon et aux USA l'indice Ih_3 est adapté avec: $Ih_3 > 1.4$ [8].

En conclusion, dans les règles en vigueur de plusieurs pays, ces modules et indices sont donnés pour classer simplement les laitiers de haut fourneau en différentes classes et se sont avérés valables pour le contrôle du laitier des hauts fourneaux.

Par ailleurs, il est important de noter que dans les ciments au laitier ces indices d'hydraulicité ne suffisent pas pour caractériser la qualité d'hydraulicité. Car le type de clinker a une grande influence sur le développement des résistances des ciments au laitier. Parfois le faible pouvoir hydraulique sera compensé par un clinker hautement réactif.

Tableau 2.5: Les indices d'hydraulicité des laitiers [11],[13]

$Ih_1 = 100 - S$	$Ih_2 = (100 - S) / S$	$Ih_3 = (C + M + A) / S$
$Ih_4 = \frac{C + M + A - 10}{S + 10}$		$Ih_5 = \frac{C + 1.4M + 0.6A}{S}$
$Ih_6 = C + 0.5M + A - 2S$		$Ih_7 = \frac{6C + 3A}{7S + 4M}$
$Ih_8 = \frac{C + 0.5M + A + CaS}{S + MnO}$		$Ih_9 = \frac{C + 0.5M + A}{S + FeO + (MnO)^2}$
	$Ih_{10} = \frac{C + M + A + BaO}{S + MnO}$	
$Ih_{11} = \frac{C + M + 0.3A}{S + 0.7A}$		$Ih_{12} = \frac{C + M}{S + 0.5A}$
$Ih_{13} = 20 + C + A + 0.5MgO - 2S$		$Ih_{14} = \frac{C + M}{S + A}$
	$Ih_{15} = \frac{A}{S}$	

2.6 STRUCTURE VITREUSE DU LAITIER

Plusieurs recherches ont été entreprises pour déterminer la proportion des verres dans les laitiers afin de les caractériser du point de vue de leur valeur hydraulique.

la structure vitreuse du laitier peut être décrite par la théorie du réseau de ZACHARIASEN, rapportée dans KINDO et OHSAWA [14].

Selon cette théorie, le verre est un réseau à trois

dimensions plus ou moins déformées d'atomes formateurs de réseaux caractérisés par de petits rayons ioniques et par des valences ioniques les plus élevées possibles. Ils sont entourés de quatre atomes d'oxygène seulement pour former un tétraèdre. Le réseau est tel que les atomes d'oxygène appartiennent chacun à deux tétraèdres à la fois. Le silicium est le formateur de réseau type dans le verre du laitier, il forme des tétraèdres SiO_4^{4-} , de groupes $\text{Si}_2\text{O}_7^{6-}$, des chaînes SiO_3^{2-} et d'autres polymères [11].

Les principales présentations chimiques des différents groupes de réseaux sont [9]:

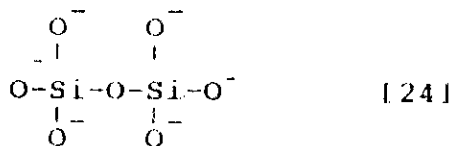
-Élément de ramification simple SiO_3^{2-}



-Élément tétraèdres SiO_4^{4-}



-Élément de terminaison de chaîne $\text{Si}_2\text{O}_7^{6-}$



-Exemple où l'aluminium est le formateur de réseau AlO_4^{5-}



La longueur des éléments de la structure vitreuse du laitier n'est pas uniforme comme dans un cristal. Elle dépend des ramifications de ces éléments et de la présence de cations tels que (Ca^{2+} , Na^+ , K^+ , Al^{3+} et Mg^{2+}) qui agissent pour une partie comme formateurs, remplaçant l'élément silicium (Si) du réseau, pour une autre comme modificateurs, entrant en réaction avec les ions O^{2-} du réseau cristallin [3].

Ainsi les valences négatives des réseaux seront neutralisées par les valences positives des cations [11].

Les tétraèdres SiO_4^{4-} sont d'autant plus isolés que la part des modificateurs de réseau (les cations) est grande, et le verre devient alors plus réactif chimiquement [3].

Le principal modificateur du réseau est le Ca^{2+} , tandis que l'aluminium et le magnésium, apparaissent dans les silicates au sein du laitier vitreux, comme formateurs de réseau (AlO_4^{5-} et MgO_4^{6-}), ou comme modificateurs de réseau (Al^{3+} et Mg^{2+}) [11].

Les éléments mineurs du laitier de haut fourneau comme le manganèse, le titane et le soufre entrent aussi dans la structure vitreuse du laitier [9],[11].

Ainsi la structure vitreuse du laitier est conditionnée par sa composition chimique. Cependant le refroidissement brusque (la trempe) est une condition nécessaire pour figer les oxydes et stopper le processus de cristallisation des composés de laitier [3],[9].

En effet, à la suite des études scientifiques de la structure vitreuse, on comprend mieux l'intérêt qu'on porte aux corrélations multiples récemment établies entre la résistance mécanique et la structure vitreuse, pour interpréter le pouvoir hydraulique du laitier [3].

Tous les experts s'accordent sur le point suivant: la structure du verre de laitier doit être la plus désordonnée possible pour obtenir une haute hydraulité. Une structure vitreuse désordonnée est celle qui contient le maximum de cations comme modificateurs de réseau [11],[9].

Un début de cristallisation peut se produire dans une structure vitreuse très désordonnée ce qui donne au verre de laitier une plus grande réactivité et un bon pouvoir hydraulique [9].

En conclusion, la structure vitreuse est fortement influencée par la composition chimique et la condition de refroidissement brusque du laitier. Ainsi pour obtenir une bonne réactivité du laitier il faut veiller à ce que la vitrification soit la plus désordonnée possible, et c'est justement là qu'intervient le rôle des sidérurgistes [11].

2.7 HYDRATATION ET ACTIVATION DES LAITIERS GRANULES

Les laitiers granulés des hauts fourneaux sont les matériaux hydrauliques latents les plus utilisés, car leurs propriétés sont très stables comparées à celles des autres sous produits industriels [11],[20].

Les facteurs déterminant l'hydraulicité du laitier granulé sont l'état vitreux, l'indice d'hydraulicité et les principales constitutions C_2S et C_2AS [11].

BEHIM [3], conclut que l'agent durcisseur était le C_2S , alors que l'hydraulicité dépendait de l'aluminium et de la chaux.

Cependant la présence de l'oxyde de fer dans le laitier fondu faciliterait la granulation mais abaisserait la quantité hydraulique. Ainsi il faut veiller à ce que la présence de l'oxyde de fer dans le laitier soit négligeable, cela est possible par une bonne opération de réduction comme le montre la figure 2.1 [3].

Par ailleurs la propriété latente de l'hydratation du laitier granulé peut être mise en évidence par la mesure du degré d'hydratation qui, à son tour, se détermine soit par:

- l'analyse qualitative des réactifs résiduels [14].
- la détermination de la quantité d'eau non évaporable, la chaux et le gypse libre [16].
- la mesure de la chaleur d'hydratation [15].

Toutes ces méthodes confirment la propriété latente de l'hydratation du laitier, nécessitant l'emploi d'un bon activant chimique ou mécanique.

Les principales activations du laitier granulé sont décrites ci-dessous.

2.7.1 ACTIVATION PAR LA CHAUX

BEHIM [3] rapporte que LENGEN 1862 a été le premier à observer qu'un mélange de laitier, d'eau et de chaux présentait de bonnes propriétés hydrauliques.

En France en 1880 on fabriquait déjà des ciments (CLX) constitués de 30% de chaux, d'au-moins 70% de laitier granulé et d'un ajout de sulfate qui jouait le rôle d'accélérateur de prise. Actuellement ces ciments sont de moins en moins fabriqués [3].

2.7.2 ACTIVATION PAR LE CLINKER

Les premiers essais des mélanges laitier-clinker furent réalisés en Allemagne en 1880, et ce n'est qu'en 1901 que la production industrielle d'un ciment à 30% de laitier eut lieu. En 1907 un autre ciment à 70% de laitier fut fabriqué. Actuellement l'activation du laitier granulé par le clinker est de plus en plus pratiquée [3],[17],[18].

Dans l'activation par le clinker, l'accroissement de la résistance mécanique de la pâte laitier-clinker est fonction de:

- La composition minéralogique du clinker, un bon clinker contient un taux élevé de C_3S et C_2A [3], [33].
- La finesse du laitier, plus elle est élevée plus l'activation est meilleure [3],[28],[33].
- La composition chimique et l'état vitreux du laitier [11].

2.7.3 ACTIVATION PAR TRAITEMENT THERMIQUE

Les travaux effectués par M.REGOURD [8] et E.GAUTIER reproduit par BEHIM [3], sur des ciments au laitier de hauts fourneaux (CHF) ont montré qu'il est possible d'activer ces ciments par étuvage comme traitement thermique. La figure 2.4 montre l'évolution des résistances en fonction du temps pour des éprouvettes en béton à base de laitier traitées en étuve. On conclut que l'étuvage induit une forte accélération de l'hydratation des ciments au laitier jeunes et une réduction de l'accroissement de résistance à long-terme [3].

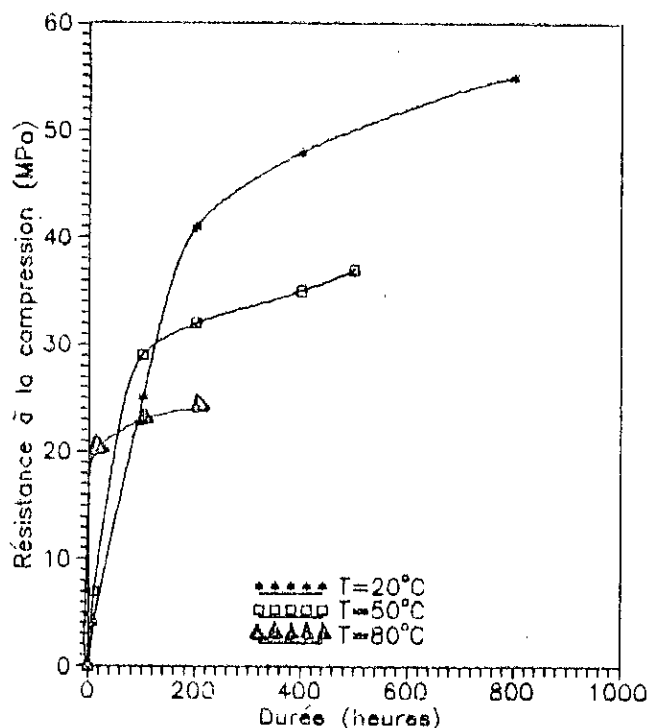


Fig. 2.4: Effet du traitement thermique sur la résistance à la compression des CHF [3]

2.8 PROPRIETES DES CEMENTS PORTLAND AU LAITIER

Le laitier granulé des hauts fourneaux est le plus utilisé dans la fabrication du ciment Portland au laitier [17].

Dans ce paragraphe on examine uniquement la propriété d'hydratation. Les propriétés communes au ciment et au béton seront examinées au paragraphe suivant.

2.8.1 HYDRATATION

SMOLCZYK (1978), rapporte que plusieurs chercheurs s'accordent à affirmer que l'hydratation des ciments au laitier est similaire à celle des ciments Portland [11].

Dans ce qui suit nous allons examiner séparément l'hydratation des (CPA) et des (CPA plus laitier).

a) HYDRATATION DES CPA

Les CPA sont constitués d'une part, de clinker et d'autre part de 3% à 5% de gypse [18].

Le clinker comprend essentiellement quatre composants minéralogiques qui sont:

- C_3S , silicate tricalcique	Ca_3SiO_5
- C_2S , silicate bicalcique	Ca_2SiO_4
- C_3A , aluminat tricalcique	$Ca_3Al_2O_6$
- C_4AF , aluminoferrite tétracalcique	Ca_4AlFeO_3

Le constituant le plus important en teneur (70% du pourcentage de clinker) est le C_3S , considéré comme l'élément responsable de l'hydratation et du développement de la résistance aux premiers âges [18].

L'hydratation et le durcissement des CPA suivent la théorie de LECHATELIER (1885); Les deux silicates C_3S et C_2S donnent le même hydrate C-S-H, seulement les C_3S s'hydratent les premiers en donnant C-S-H et un excès de chaux sous forme $Ca(OH)_2$ [17].

les C_3A réagissent très rapidement avec l'eau en donnant des hydrates sous forme C_4AH_n . Plus tardivement les C_4AF s'hydratent sous forme C_4AFH_n . Le gypse joue le rôle de régulateur de prise en contrôlant l'hydratation de C_3A [17].

La figure 2.5 montre la formation des fibres C-S-H et $Ca(OH)_2$ pour une pâte de silicate hydratée pendant 28 jours [18].

b) HYDRATATION DES CIMENTS AU LAITIER

Dans les CPA avec laitier, l'activant est le clinker qui apporte de la chaux nécessaire à la formation des hydrates stables [17],[18].

L'hydratation du laitier est plus lente que celle du ciment CPA. A cet effet, les premiers hydrates seront ceux du clinker, C-S-H et Ca(OH)_2 , qui recouvrent uniformément les grains du laitier et du clinker. Par la suite l'excès de la chaux active l'hydratation des grains de laitier avec une texture C-S-H semblable à celle des CPA [17],[18].

Ainsi, il faut noter que la teneur en (Ca(OH)_2) décroît avec l'augmentation de la teneur en laitier [17], [18].

En effet REGOURD [24], VANDEN et BOSCH [6] et IDORN [13], affirment que l'hydratation des ciments au laitier s'effectue en deux phases:

- la première phase très rapide, est due à la réaction des alcalins (calcium (CaO), potassium (K_2O) et sodium (Na_2O)) produits par l'hydratation des CPA.

- la deuxième phase très lente est due aux réactions d'hydroxyde de calcium (Ca(OH)_2) lors de l'hydratation du laitier.

2.9 PROPRIETES DES BETONS AU LAITIER

En Europe, les bétons au laitier sont utilisés depuis 1950. Actuellement ces bétons sont de plus en plus employés dans différents ouvrages en particulier dans les ouvrages maritimes où ces bétons présentent une bonne résistance. Dans ce qui suit nous allons examiner de plus près les propriétés de ces bétons.

2.9.1 BETON FRAIS

Les propriétés du béton durci sont largement influencées par les propriétés du béton frais qui sont principalement l'ouvrabilité et la chaleur d'hydratation.

2.9.1.1 OUVRABILITE

Plusieurs chercheurs, WOOD (1982) FULTON (1974) WU et ROY (1982) et MEUSEL et ROSE (1983), confirment que l'ouvrabilité des bétons au laitier est plus grande que celle des CPA [6].

FULTON (1974) attribuait cette plus grande ouvrabilité des bétons au laitier à l'augmentation de la viscosité de la pâte de ces ciments en fonction de l'accroissement du pourcentage de substitution en laitier [6].

WOOD (1982), rapporte que cette amélioration de l'ouvrabilité des bétons au laitier est due à la surface caractéristique des particules du laitier, qui sont en fait denses, lisses et n'absorbent pas beaucoup d'eau dans la phase initiale d'hydratation [6].

MEUSEL et ROSE (1983) ont montré que l'ouvrabilité est d'une part inversement proportionnelle à l'augmentation de la finesse du laitier et qu'elle est d'autre part proportionnelle à l'augmentation du rapport E/C. Les résultats de ses essais sont représentés sur les figures 2.6 et 2.7 [25], qui illustrent la variation de l'ouvrabilité du béton ordinaire et de celui renfermant 50% de laitier, en fonction respectivement de la variation du rapport E/C et de la finesse du laitier [25].

2.9.1.2 REMONTEE D'EAU ET SEGREGATION

Le durcissement du béton est en général accompagné du phénomène de remontée d'eau à la surface, surtout après ferme vibration [25].

Ce phénomène est influencé par la distribution des pores, la structure des particules du liant et la cinétique d'hydratation [25],[27],[30].

WAIWRIGHT [30] conclut que la remontée d'eau à la surface augmente avec l'élévation du pourcentage du laitier dans le béton. Ceci peut entraîner un risque de ségrégation et de

fissuration.

Une solution pratique pour diminuer ce phénomène, est, soit de réduire le rapport E/C, ou, d'utiliser des adjuvants convenables pour accélérer la prise [27].

Ainsi les bétons au laitier offrent une solution à ce problème, vu qu'ils présentent une ouvrabilité convenable pour un pourcentage élevé en laitier et un rapport E/C très bas.

2.9.1.3 CHALEUR D'HYDRATATION

Parmi les méthodes qui déterminent le degré d'hydratation d'un matériau, on distingue la méthode de la mesure de la chaleur d'hydratation.

WAINWRIGHT [30] a montré que les bétons contenant un pourcentage en laitier de 70% ont une chaleur d'hydratation inférieure à celle des bétons ordinaires, soit un écart de 10°C comme le montre la figure 2.8.

Par ailleurs, les travaux de ATWELL reproduits par BOUIKNI [27] confirment les résultats de WAINWRIGHT [30].

En outre, les ciments à haute teneur en laitier peuvent être convenablement utilisés dans les bétons de masse (mur de soutènement, fondation etc ...), pour leur faible retrait de prise dû à la chaleur d'hydratation très réduite.



Fig. 2.5— Ponts de Ca(OH)_2 et fibres de C.S.H. dans une pâte de silicate hydraté pendant 28 jours. [18]

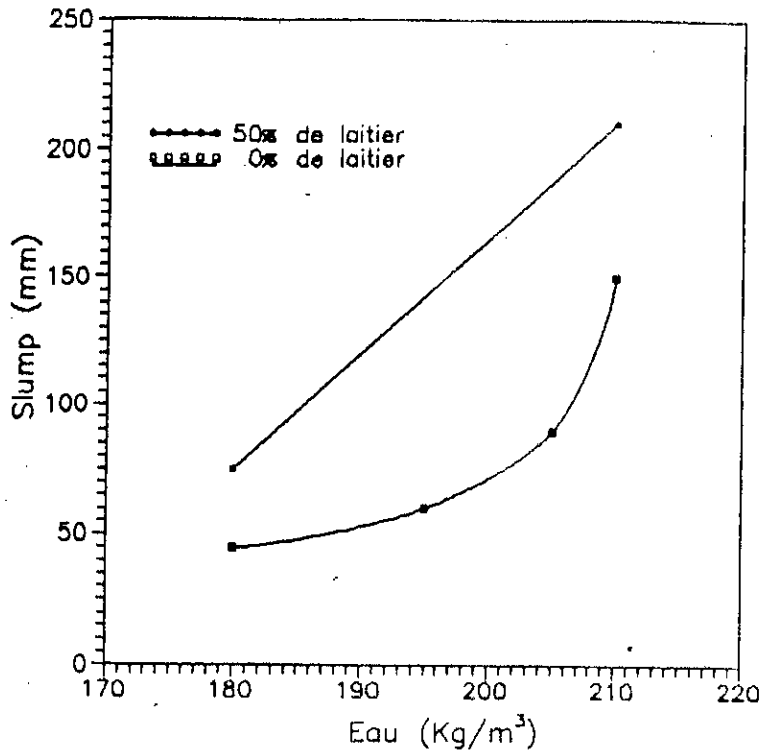


Fig. 2.6: Ouvrabilité des bétons au laitier en fonction de E/C [25]

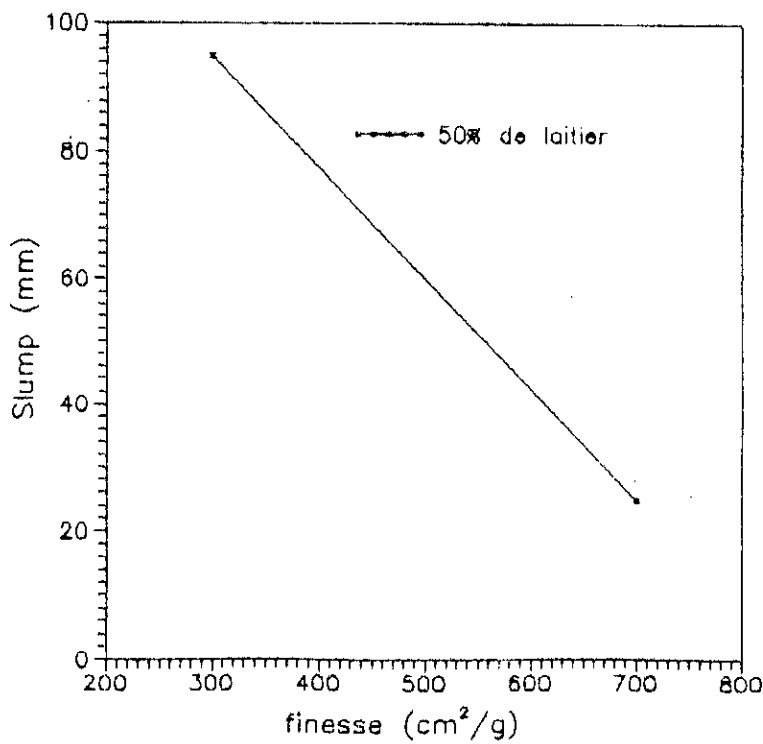


Fig. 2.7: Ouvrabilité du béton contenant 50% de laitier en fonction de la finesse de ce dernier [25]

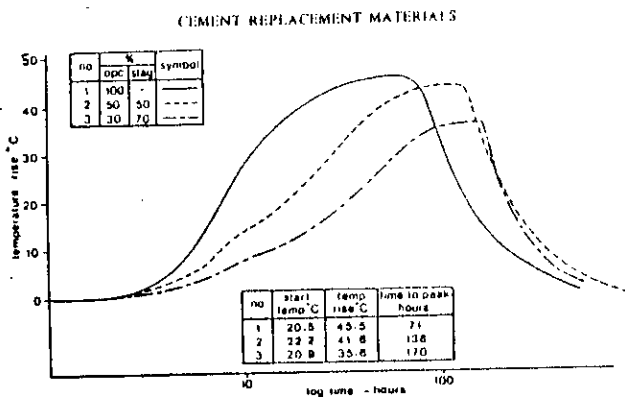


Fig. 2.8: Chaleur d'hydratation des ciments au laitier [30]

2.9.2 BETON DURCI

Dans la plupart des cas les qualités d'un béton sont déterminées par ses propriétés à l'état durci. Les principales propriétés du béton durci à étudier sont: la résistance, le module d'élasticité, le retrait et le fluage.

2.9.2.1 RESISTANCE MECANIQUE

Dans les mêmes conditions de cure, les bétons contenant de 30% à 80% de laitier en poids, en Allemagne, ou jusqu'à 70% en France, peuvent donner une résistance mécanique à 28 jours équivalente à celle du béton ordinaire confectionné avec du CPA de classe normale [61,181].

Les ciments au laitier ont cependant un développement de résistance très différent du ciment CPA. Aux premiers âges (jusqu'à 7 jours) les ciments au laitier ont une résistance inférieure à celle des CPA, mais au delà de 28 jours, elle augmente de façon plus rapide que pour les CPA [81, 1111, 1281,1291,1301,1311,1321].

Une explication à ce phénomène a pu être donnée par BERRY (1980) qui conclut que la résistance est directement proportionnelle à la finesse du laitier [281].

WAINWRIGHT [301] par contre attribue cette augmentation de la résistance à l'élévation de la température de la cure. Ses travaux ont montré qu'un cycle de température élevée diminue le développement de la résistance. Les résultats de ses essais

sont illustrés sur les figures (2.9, 2.10), et (2.11, 2.12). Les figures 2.9 et 2.10 montrent la variation de la résistance à la compression du béton ordinaire et du béton contenant 50% de laitier conservés dans l'eau en fonction de la température. Tandis que, les figures 2.11 et 2.12 présentent la variation de la résistance mécanique des bétons au laitier conservés dans l'eau pour une température constante et une autre cyclique.

Enfin BOUIKNI [27] rapporte que BUTTLER, relie la variation de la résistance aux méthodes de conservation. Ainsi un béton conservé dans de l'eau douce à 20°C développe une résistance plus grande qu'un béton conservé à l'air libre.

2.9.2.2 MODULE D'ELASTICITE

D'après les nombreuses recherches effectuées par différents auteurs [6], [27], [30], il apparaît qu'il n'y a pas de différence significative entre le module d'élasticité des bétons aussi bien ordinaire qu'au laitier.

Par ailleurs, Les travaux effectués par WAINWRIGHT [30] sur la résistance mécanique et le module d'élasticité des bétons au laitier, permettent de conclure qu'en fonction du temps ces deux propriétés varient dans le même sens.

BOUIKNI [27] rapporte dans sa thèse les travaux effectués par FULTON (1974) sur le béton ordinaire et le béton au laitier, qui confirme la similitude entre les modules d'élasticité de ces deux types de bétons.

Il apparaît donc de façon évidente que le module d'élasticité des bétons au laitier est très proche de celui du béton ordinaire.

2.9.2.3 RETRAIT

En général le phénomène du retrait dépend de l'environnement, de la durée de la cure et de la finesse du liant. Parmi les nombreuses recherches effectuées dans le but d'éclaircir ce phénomène on peut citer:

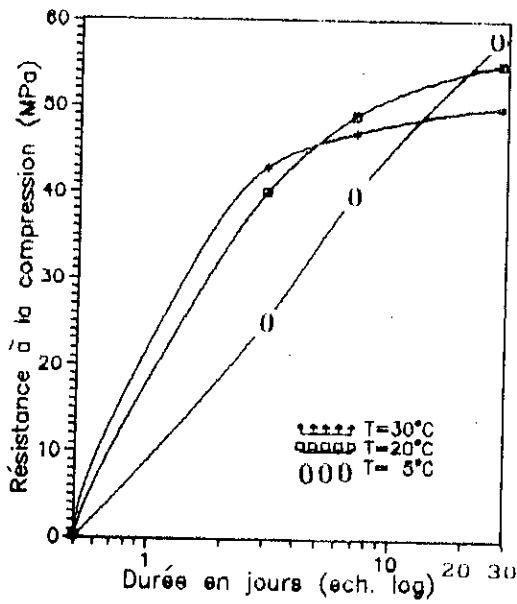


Fig. 2.9: Effet de la température sur le développement de la résistance à la comp. du béton ordinaire conservé dans l'eau douce à 20°C [30]

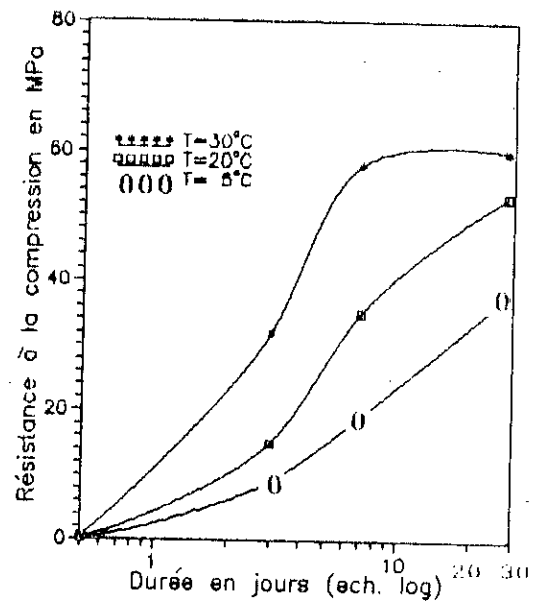


Fig. 2.10: Effet de la température sur le développement de la résistance à la comp. du béton contenant 50% de laitier conservé dans l'eau douce à 20°C [30]

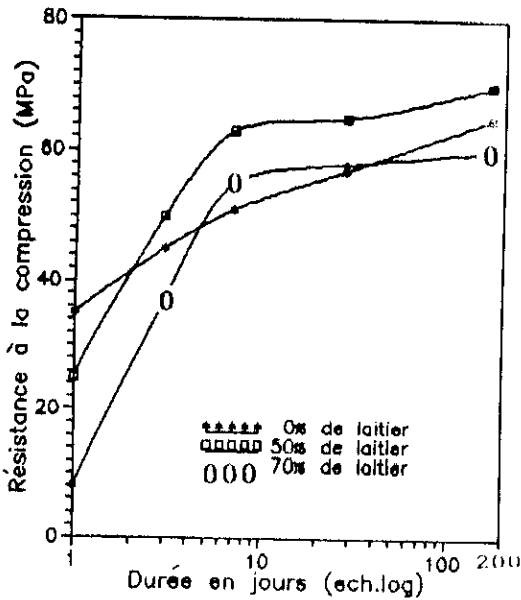


Fig. 2.11: Résistance à la compression des bétons au laitier conservés dans l'eau douce à 20°C [30]

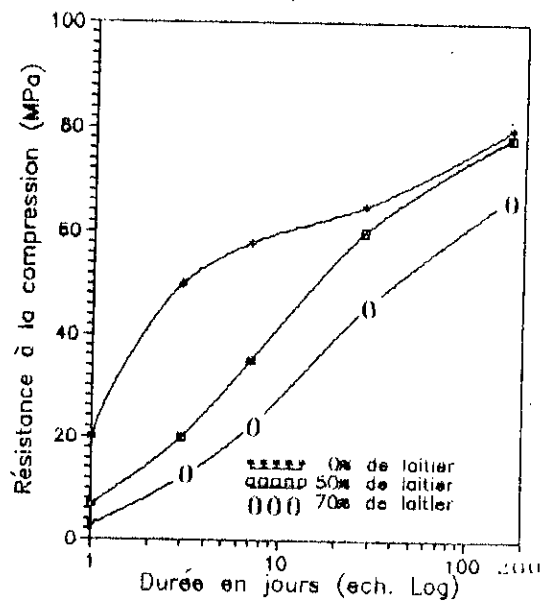


Fig. 2.12: Résistance à la compression des bétons au laitier conservés dans l'eau douce à une température cyclique [30]

- Les travaux de NEVILLE et BROOK [33], qui montrent que dans un environnement sec et après 28 jours de cure dans l'eau douce à 20°C, le retrait d'un béton ordinaire est supérieur d'environ 10% à celui du béton avec 50% de laitier.

BAMFORTH [35], qui a entrepris une étude rhéologique, conclut que pour une durée n'excédant pas 50 jours, un béton avec 70% de laitier présente un retrait inférieur à celui du béton ordinaire, alors qu'à long terme, pour une durée supérieure à 14 mois, le retrait du béton au laitier est plus important que celui du béton ordinaire d'environ 20%. Ces résultats sont confirmés par WAINWRIGHT [30].

La figure 2.13 montre la variation du retrait pour le béton ordinaire et le béton au laitier [30].

On peut donc déduire qu'à court terme, les bétons au laitier présentent un retrait inférieur à celui du béton ordinaire, alors qu'à long terme l'inverse se produit.

2.9.2.4 FLUAGE

Le phénomène du fluage du béton a été l'objet de nombreux travaux présentés dans la littérature [2], [5], [6], [26], [30], [33] jusqu'à [37]. Les résultats de ces recherches ont montré que le fluage du béton dépendait de plusieurs paramètres dont principalement:

- La cinétique d'hydratation
- La durée initiale de conservation
- La durée et la forme d'application du chargement
- La température et l'humidité de conservation et d'environnement.

On a ainsi constaté que les bétons au laitier conservés dans l'eau à une température pas trop faibles présentent un fluage inférieur à celui des bétons ordinaires.

NEVILLE et BROOKS [33], 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 de 40%. Ce résultat est illustré sur la

figure 2.14. Par contre si on augmentait la température de l'eau, l'écart de fluage entre le béton au laitier et le béton ordinaire dépasse 40%, comme le montre la figure 2.15.

Cependant, si les essais sont effectués à l'air libre, avec une humidité relative de 60% et une température de 20°C, le fluage des bétons au laitier est plus important que celui du béton ordinaire. La figure 2.16 reproduit le résultat de cette expérience.

Enfin l'application de la charge à court terme, provoque un fluage beaucoup plus important pour les bétons au laitier que pour les bétons ordinaires. En effet la cinétique d'hydratation du béton ordinaire est plus grande que celle des bétons au laitier [30].

Ainsi, pour réduire l'effet du fluage des bétons à base de laitier, il faut les conserver initialement pendant 28 jours dans de l'eau douce à une température de 20°C, dans un environnement très humide durant le chargement. Il est à noter qu'à l'air libre les bétons au laitier présentent un fluage supérieur aux bétons ordinaires.

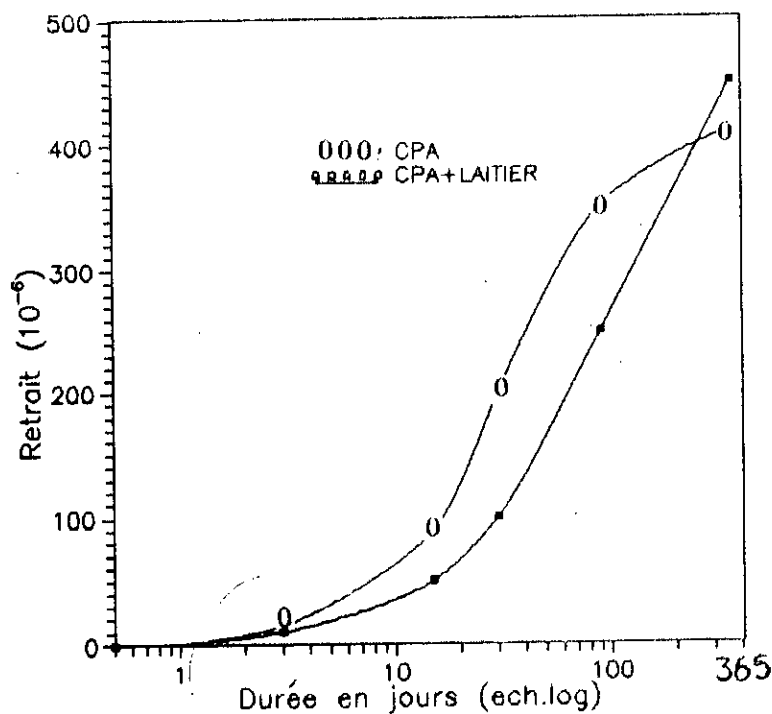


Fig. 2.13: Retrait du béton au laitier et béton ordinaire [30]

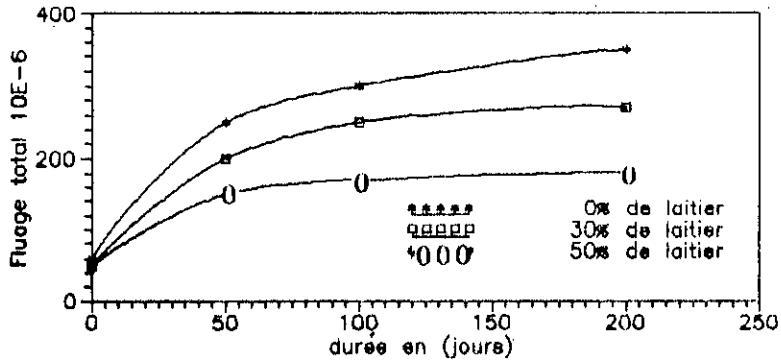


Fig. 2.14: Fluage des bétons au laitier conservés dans l'eau douce à 22°C, contrainte appliquée 10 MPa [33]

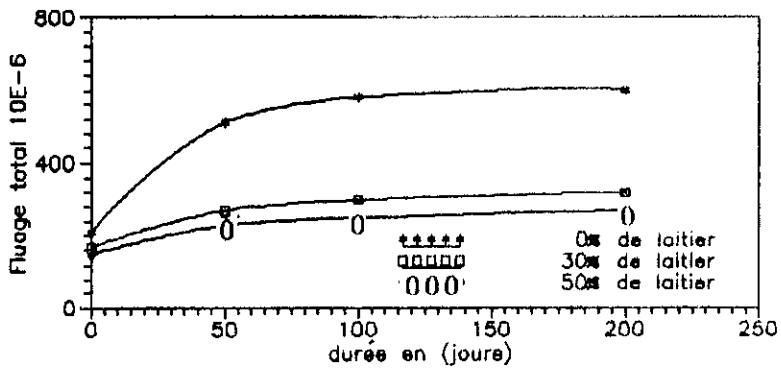


Fig. 2.15: Fluage des bétons au laitier sous 10MPa conservés dans l'eau douce à 45°C [33]

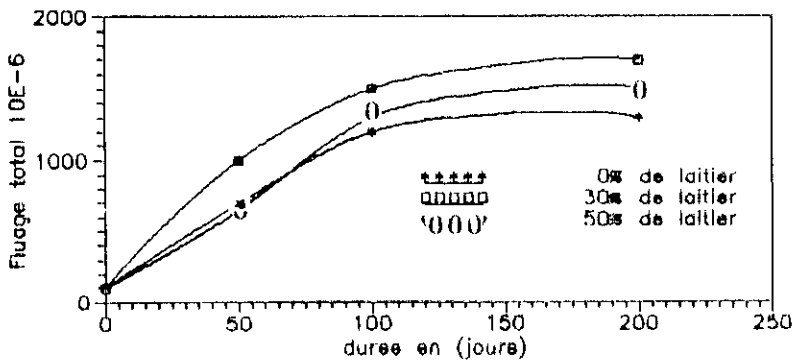


Fig. 2.16: Fluage des bétons au laitier conservés à l'air libre, humidité relative 60% température 22°C, contrainte appliquée 10 MPa [33]

2.10 DURABILITE DES BETONS AU LAITIER

Le béton est un matériau durable qui offre une résistance remarquable aux agressions lorsqu'il est correctement dosé et parfaitement mis en oeuvre. Néanmoins ses constituants (ciment, sable, ou gravier) peuvent tous subir des agressions à plus ou moins brève échéance.

Les principaux mécanismes de dégradation du béton sont :

- Les altérations chimiques externes qui sont dues essentiellement aux acides, aux bases et aux solutions salines qui dissolvent la chaux du ciment et en forment des composés nouveaux entraînant l'érosion, le gonflement et l'éclatement des bétons.

- Les altérations internes, dues à la formation de gel de silicate expansif au cours des réactions d'hydratation des alcalins (CaO , K_2O et Na_2O)

La nature et la qualité du liant joue un rôle très important dans la durabilité. Dans ce sens, de nombreuses recherches, [8], [11], [18], [21], [61] ont montré que l'incorporation, d'une teneur supérieure à 60% de laitier granulé, dans le mélange ciment CPA-laitier permet d'obtenir un béton très durable résistant aux agressions.

La durabilité du béton dépend de plusieurs paramètres dont principalement, La perméabilité et la capacité d'échange des ions.

2.10.1 PERMEABILITE

la principale cause de détérioration du béton est la perméabilité aux liquides ou aux gaz.

De nombreux Auteurs [39] à [63], rapportent que le béton au laitier est moins perméable que le béton ordinaire, et par conséquent il est le plus durable. Cependant les principaux facteurs qui influencent la perméabilité sont :

- la compacité du béton
- le rapport E/C

- le régime de cure
- la porosité

Une étude comparative de l'évolution des pores pour le CPA et les ciments au laitier effectuée par PING [12], montre que la porosité des mortiers au laitier est plus faible que celle des mortiers au CPA .

BAKKER [61] attribue cette diminution de la perméabilité des CPA+laitier par rapport aux CPA, à la différence de mécanisme d'hydratation entre ces deux ciments. Pour les CPA et les ciments au laitier il y a formation avec le temps de plus en plus des mêmes produits d'hydratation (C-S-H) mais de précipitations différentes: une précipitation d'hydroxyde de calcium ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) pour les CPA et une précipitation de silicate et d'aluminate de calcium hydraté pour les ciments au laitier. Les figures 2.17 et 2.18 montrent le processus d'hydratation et la formation des précipitations pour les CPA et les ciments au laitier [61].

Ces précipitations sont normalement destinées à obturer les grands pores. Cependant les précipitations des ciments au laitier sont fixes et imperméables alors que celles des CPA ne le sont pas. Par conséquent le béton ordinaire est plus poreux que le béton au laitier [61].

En ce qui concerne l'influence du régime de cure, BAKKER [61], rapporte que la perméabilité des bétons au laitier diminue avec l'augmentation de la température de l'eau de conservation, alors que le contraire est observé pour le béton ordinaire. En effet, le taux de précipitation croît avec une élévation de la température entraînant de ce fait une perméabilité plus importante pour les bétons ordinaires que les bétons au laitier.

Enfin RAMACHANDRA (1984), conclut de son côté que l'augmentation du rapport E/C entraîne un accroissement de la perméabilité. Il note une diminution de cette même perméabilité lorsque dans le béton, il y a présence de laitier à un taux pouvant atteindre 80%.

En conclusion la perméabilité diminue avec

l'accroissement du pourcentage d'incorporation du laitier dans le béton. En effet, la porosité et le rapport E/C diminuent avec l'augmentation du pourcentage du laitier dans les bétons, ce qui offre à ces derniers une bonne résistance dans les milieux agressifs (l'eau de mer, les eaux sulfatées, acide carbonique, etc ...).

Toutefois, les conditions initiales de conservation des bétons au laitier ont une très grande influence sur la perméabilité, du fait que l'hydratation de ces bétons dépend du type de conservation initiale. Une bonne perméabilité est remarquée pour les bétons au laitier subissant une cure initiale durant 28 jours dans l'eau douce à 20°C. [18],[24].

Dans ce qui suit l'effet de quelques agents agressifs sur les bétons au laitier, sera examiné.

2.10.2 RESISTANCE A L'EAU DE MER

L'action de l'eau de mer sur le béton est très complexe et très variable [3]. Elle peut être décrite comme suit:

- l'action biologique due aux micro-organismes (algues, bactéries, etc ...) dont les sécrétions acides ou les produits de décomposition peuvent attaquer le béton.

- l'action mécanique due aux chocs des vagues

- l'action physique due aux cycles séchage-humidification (phénomène de la marée) ou aux gel-dégels dans les régions froides

- l'action chimique due aux attaques par les ions les plus nocifs (chlorure, sulfate et magnésium).

Plusieurs auteurs [18], [24], [64] réalisent qu'en milieu marin, aucun des composés hydratés du CPA n'est stable. Le tableau 2.6 regroupe les principales réactions (CPA plus eau de mer). On constate que la dégradation des CPA est due principalement à:

- La substitution $Mg^{2+} \longrightarrow Ca^{2+}$, donc les silicates hydratés C-H-S se transforment progressivement en M-H-S, silicate de magnésium sans propriété liante, provoquant

une chute de résistance [18],[24],[64].

- L'insertion du chlorure dans le réseau C-H-S fait disparaître les fibres et crée une structure alvéolaire et il se forme un treillis dont les liaisons entre les mailles deviennent de plus en plus fragiles quand la quantité de chaux dissoute augmente [64]. La figure 2.5 montre les fibres C.S.H et les ponts $\text{Ca}(\text{OH})_2$ tandis que la figure 2.19 illustre la structure alvéolaire qui provoque l'éclatement et la fissuration de la pâte de ciment conservée dans l'eau de mer [18].

Par contre pour les ciments au laitier, des essais sur des éprouvettes contenant 80% de laitier conservées trois ans dans l'eau de mer révèlent qu'il n'y a ni dissolution de Ca ni diffusion des cations Mg^{2+} entraînant la non-formation de M-S-H [24].

Quant à la pénétration des ions chlorures, plusieurs chercheurs [18], [22],[24], [39], [42], [46] confirment que les ciments au laitier présentent une faible pénétration aux ions chlorure par rapport aux CPA

En effet la pénétration des ions est influencée par la température de l'eau de mer, la porosité et la capacité d'échange ions-cations entre le béton et l'eau de mer [39].

Les travaux de M. MOUKWA [39] ont montré que la pénétration décroît avec l'augmentation de la température de l'eau de mer. Mais le cycle réchauffement-refroidissement accroît la pénétration.

Dans la section 2.10.1, on a vu que la porosité des ciments au laitier est inférieure à celle des CPA. Par conséquent la pénétration aux ions est inférieure pour les bétons au laitier.

BAMFORTH [34], a indiqué que le facteur principal déterminant le taux de pénétration des ions est la capacité d'échange des réactions chimiques (liant-ions).

Des examens sur des ciments contenant un pourcentage supérieur ou égal à 60% de laitier [18],[24] ont montré que:

- La pénétration du chlore se traduit par la

formation du chloroaluminate ($C_3A.CaCl_2.10H_2O$) (voir tableau 2.6 2b). Elle est cependant limitée si on la compare à celle des CPA. En effet toute l'alumine (Al_2O_3) des grains de laitier ne se combine pas aux chlorures et aux sulfates (tableau 2.6 1b et 2b). Elle entre en solution solide dans le C-S-H qui reste compacte, donc pas de formation de l'ettringite ($C_3A.3CaSO_4.32H_2O$) qui provoque le gonflement et l'éclatement de la pâte.

- La cinétique et le mode de cristallisation de l'ettringite sont différents de ceux du CPA. Le trisulfoaluminate (ettringite) apparait par un processus relativement lent de passage en solution, sa teneur est aussi moindre en raison du faible pourcentage de $Ca(OH)_2$ qui pourrait donner naissance à du gypse secondaire ($CaSO_4$) (Tableau 2.6 1a). A cet effet, les ciments au laitier (pourcentage du laitier supérieur ou égal à 60%) ne présentent ni gonflement ni éclatement en contact avec l'eau de mer.

Par ailleurs, Les travaux effectués par STEOPOE [52], ont montré qu'à cause du contenu en oxyde de calcium (CaO) plus réduit pour les ciments au laitier par rapport au ciment Portland, un laitier lorsqu'il est mis en contact avec une solution saline celui-ci ne cède pas d'ions de calcium à la phase aqueuse mais absorbe ceux de la solution et forme à la surface un mélange de gels siliceux et alumineux résistant à la corrosion (Fig. 2.18). Une fois cette couche de gels est formée, aucun ion agressif ne peut pénétrer à l'intérieur du béton, lui procurant ainsi une bonne résistance à la dégradation.


Enfin, la variation des résistances à la compression d'éprouvettes de même type à 6 mois montre qu'un ajout de 60% de laitier au CPA permet d'accroître la résistance d'une façon très remarquable [18], [24].

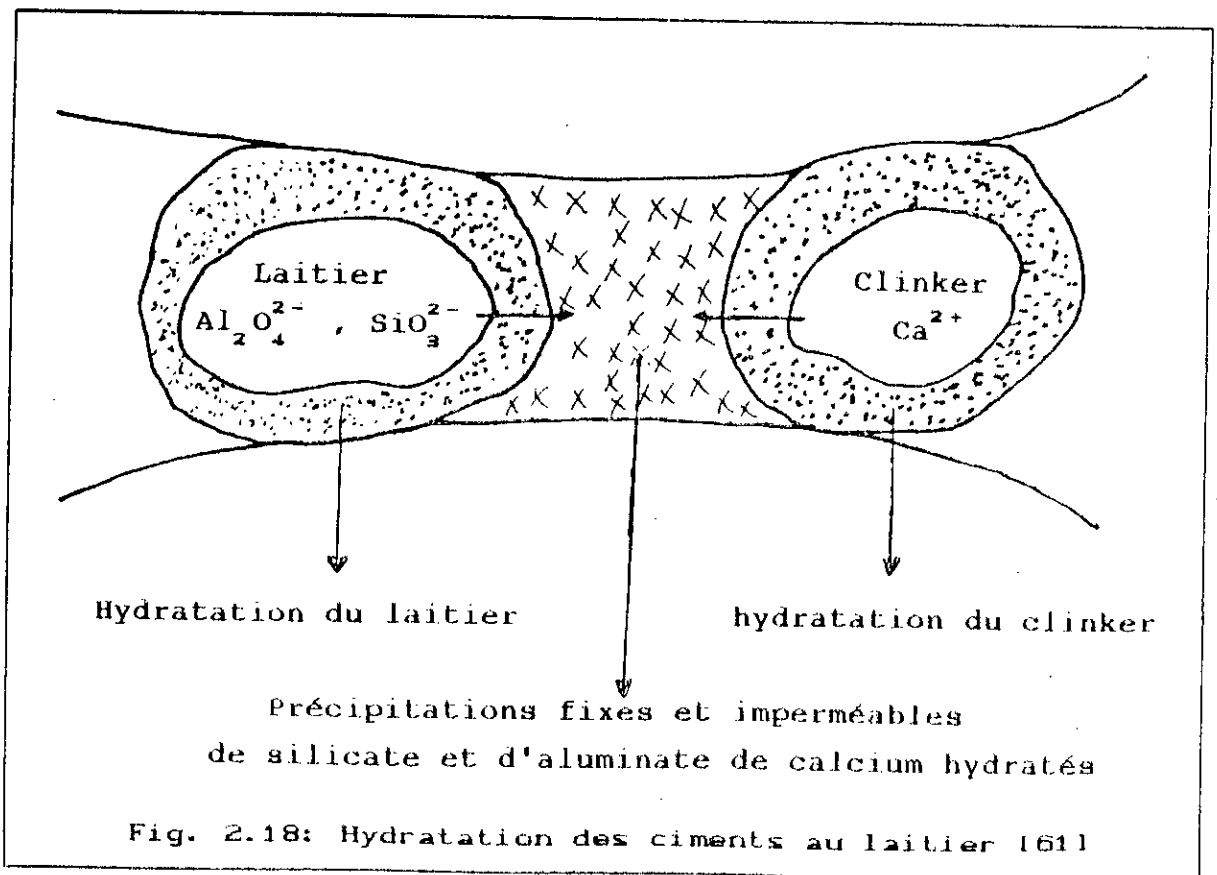
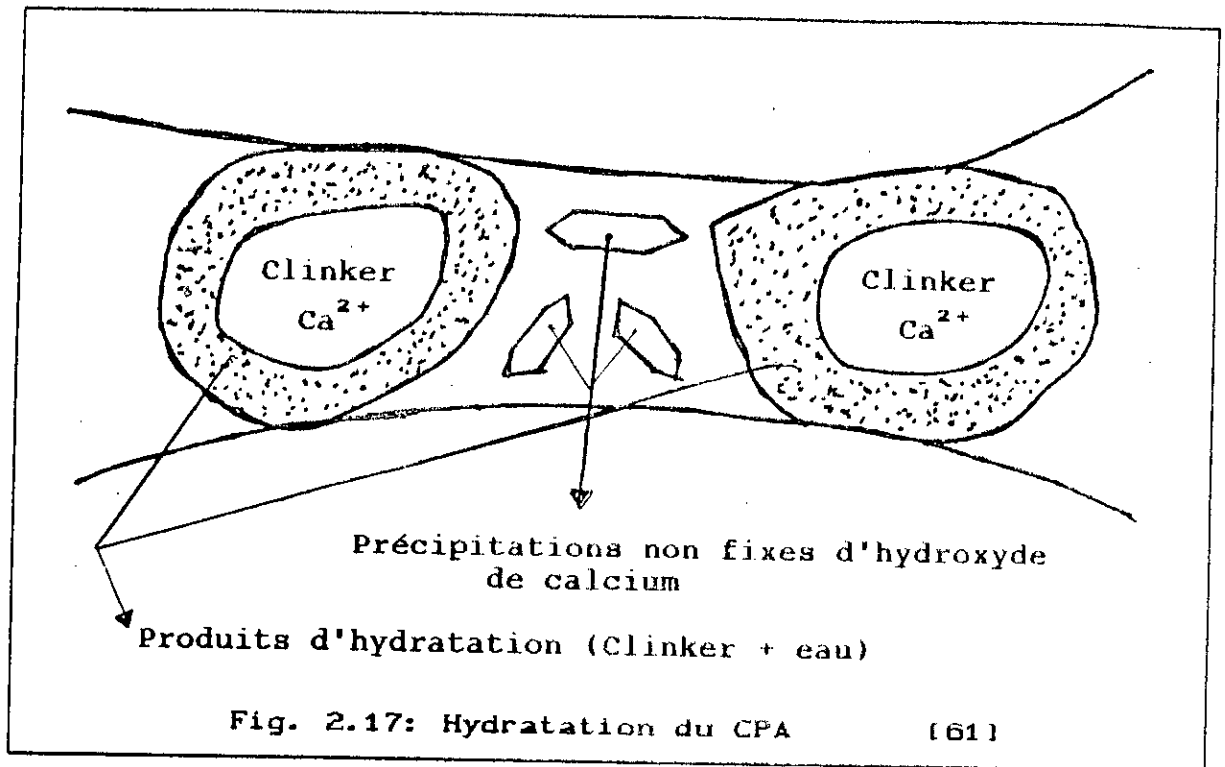
Ainsi, on conclut que les ciments à haute teneur en laitier présentent une bonne tenue à l'eau de mer. Cependant, leur comportement est très sensible aux conditions initiales de conservation. Certaines précautions sont nécessaires en milieu

marin telles que la protection des surfaces avant immersion dans l'eau de mer et un bon compactage du béton en question [18],[24].

Les normes Françaises, ont montré que tous les ciments renfermant un pourcentage en laitier supérieur ou égal à 60% résistent bien à l'eau de mer et peuvent être utilisés sans contrôle [64].

Tableau 2.6: Action de l'eau de mer [64]

<p><u>1. Action des sulfates</u></p> <p>substitution $Mg^{2+} \longrightarrow Ca^{2+}$</p> <p>a) $MgSO_4 + Ca(OH)_2 \longrightarrow CaSO_4 + Mg(OH)_2$ soluble 1.2g/l solide précipité gypse secondaire</p> <p>b) $CaSO_4 + C_3A + 32H_2O \longrightarrow C_3A.3CaSO_4.32H_2O$ ettringite GONFLEMENT</p>	
<p><u>2. Action des chlorures</u></p> <p>substitution $Mg^{2+} \longrightarrow Ca^{2+}$</p> <p>a) $MgCl_2 + Ca(OH)_2 \longrightarrow CaCl_2 + Mg(OH)_2$ soluble précipité</p> <p>b) $CaCl_2 + C_3A + 10H_2O \longrightarrow C_3A.CaCl_2.10H_2O$ (sel de friedel) Monochloroaluminate, instable donne en présence de sulfate $C_3A.3CaSO_4.32H_2O$ GONFLEMENT</p>	
<p><u>3. Action de C_2O</u></p> <p>a) $Ca(OH)_2 + C_2O + H_2O \longrightarrow CaCO_3 + 2H_2O$ précipité</p> <p style="text-align: center;">  arangite calcite </p>	



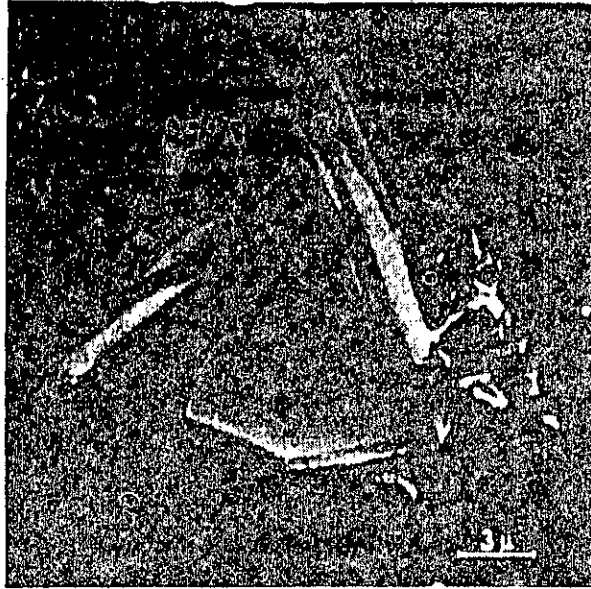
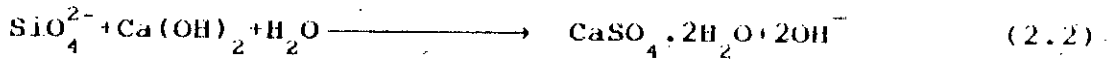


Fig. 2.19: Pâte de CPA hydraté pendant 90 jours dans l'eau de mer [18]

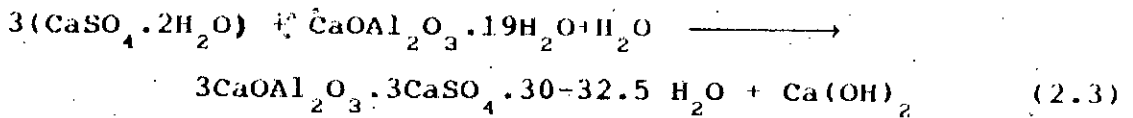
2.10.3 RESISTANCE AUX ATTAQUES SULFATEES

Plusieurs chercheurs [8], [30], [60], affirment que les bétons avec une teneur en laitier supérieure à 65% résistent mieux aux attaques sulfatées que les bétons ordinaires (avec CPA).

La réaction sulfatée peut être représentée par la réaction suivante:



et



Ainsi la différence de comportement des ciments au

laitier et les CPA vis à vis de l'attaque des sulfates réside dans les points suivants

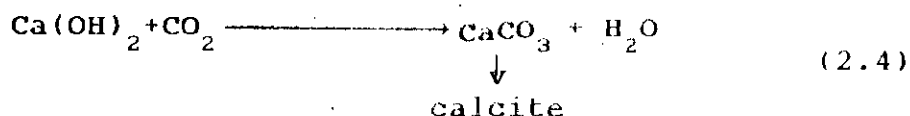
- La faible teneur en Ca(OH)_2 , sachant que l'hydroxyde de calcium (Ca(OH)_2) des CPA+L décroît avec l'augmentation du taux de substitution en laitier d'où une augmentation de la résistance aux attaques sulfatées [60].

- La teneur élevée en C_3A . En effet cette dernière est plus importante pour les CPA+L que pour les CPA et la résistance aux sulfates augmente avec l'accroissement de la teneur des C_3A [6].

- La perméabilité à l'eau est réduite: La perméabilité des CPA+L est plus faible que celle des CPA par conséquent les CPA+L résistent mieux aux sulfates [6], [60].

2.10.4 RESISTANCE A LA CARBONATATION

La diffusion du mélange gaz carbonique plus l'eau ($\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$) sous forme d'acide carbonique (H_2CO_3) dans le béton donne naissance à une réaction chimique avec les produits d'hydratation du béton, plus précisément avec l'hydroxyde de calcium (Ca(OH)_2). Cette réaction est appelée carbonatation, et se produit comme l'indique la relation suivante [51].



Une conséquence de la carbonatation, concerne le Ph du béton qui diminue de la valeur 12 à 8 aux régions affectées par ce phénomène (parties fissurées), ce qui décroît la passivité de ces endroits. Par conséquent si la couche d'enrobage des bétons armés présente des anomalies (fissures, cavités, pores) elle sera facilement attaquée par l'acide carbonique, ce qui provoque la carbonatation du béton et la corrosion des armatures [48],[49],[52].

Ainsi plusieurs Auteurs [48] à [60], [64], attribuent la

bonne résistance des ciments au laitier à la faible teneur en Ca(OH)_2 de ces ciments par rapport aux ciments Portlands (CPA).

En effet, au paragraphe 2.10.3 on a vu que la dissolution de la chaux s'accompagne de la formation de nouvelles précipitations. Les sels formés, s'ils sont solubles diminuent la résistance du béton. C'est le cas des CPA. Par contre, s'ils sont insolubles, ils peuvent se substituer à la chaux et former une couche protectrice qui augmente la résistance aux agressions. C'est le cas des CPA plus laitier (CPA + L) [64].

En conclusion, les ciments à haute teneur en laitier ont une bonne résistance à la carbonatation.

2.10.5 REACTIONS ALCALIS-GRANULATS

La réaction alcalis-granulats se produit entre les alcalins (le potassium K_2O , le sodium Na_2O et le calcium CaO) en solution dans la phase interstitielle aqueuse du béton et la silice réactive qui provient de certains types de granulats. Cette réaction constitue un gros problème technique et économique. Une fois qu'elle s'est développée elle peut mener à une dégradation précoce de la structure [23].

Selon REGOURD [64], la réaction alcalis-agrégats a été découverte aux ETAT- UNIS par STANTON (1940) dans des béton préparés avec des sables contenant des silices réactives. Cependant, en Europe, où la majorité des sables utilisés sont inertes, la réaction n'a été détectée que beaucoup plus tard au Danemark par IDORN (1956).

Le mécanisme des réactions alcalis-granulats est donné par le tableau 2.7 [64].

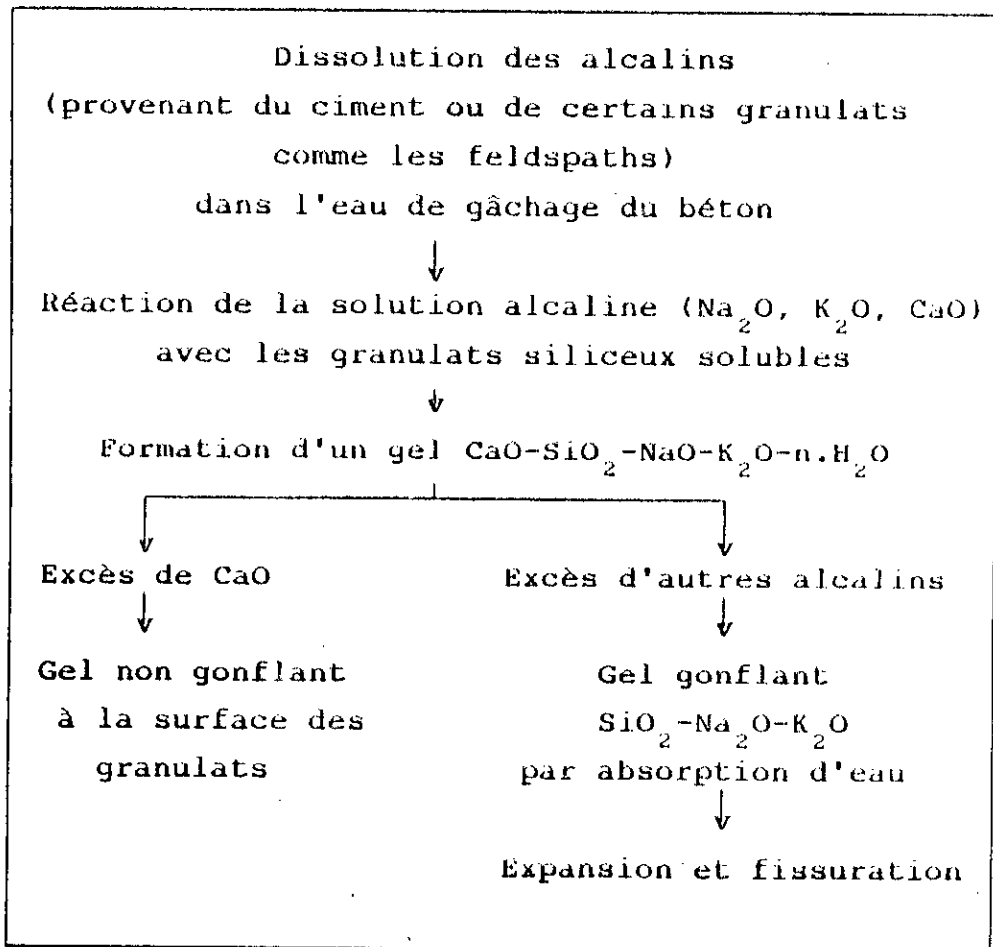
A cet effet, l'étude rapportée par BARONIO et BERRA [23] montre que le phénomène alcalis-granulats commence d'abord par occlure les diverses porosités du béton, pour déterminer ensuite à l'intérieur du béton durci des états de tension, tels qu'ils dépassent la résistance à la traction du béton lui-même, provoquant ainsi un éclatement et une fissuration du béton,

comme le montre le tableau 2.7.

Bien avant, REGOURD [24] rapporte les travaux entrepris par SMOLCZYK (1974) sur trente (30) ciments de types différents qui montrent que l'expansion due à la réaction alcalis-granulats décroît avec l'augmentation de la teneur en laitier. Ce résultat a été confirmé plus tard par BAKKER [60]. Cependant, il attribue la bonne résistance des ciments au laitier aux réactions alcalis-granulats par rapport au CPA, à la faible teneur en Ca(OH)_2 et à la perméabilité réduite à l'eau de ces ciments (CPA+L)

En conclusion, les ciments au laitier réduisent les réactions alcalis-granulats.

Tableau 2.7: Mécanisme des réactions alcalis-granulats



2.10.6 CONCLUSION SUR LA DURABILITE

D'après les résultats des études sur la résistance à l'eau de mer, aux eaux sulfatées, aux acides carboniques, et aux réactions alcalis-granulats, on peut dire que les bétons à haute teneur en laitier présentent un bon comportement à ces milieux agressifs. Par conséquent ces bétons auront une bonne durabilité.

Néanmoins, et vu l'hydratation latente des bétons au laitier, il faut veiller à ce que leurs conditions initiales de conservation soient convenables telles que la cure initiale dans l'eau douce à 20°C ou dans un milieu humide durant 28 jours, la protection des parois de béton avant exposition aux milieux agressifs et enfin le bon compactage pour minimiser le volume des vides et des cavités.

Suite à ces résultats, on comprend pourquoi les normes Françaises autorisent l'utilisation, sans contrôle, des ciments contenant plus de 60% de laitier dans les constructions maritimes [64]. De même, les normes Anglaises BS 4246 recommandent l'utilisation des ciments avec un pourcentage en laitier supérieur à 60% pour une meilleure résistance aux eaux sulfatées [27].

2.11 CONCLUSION ET BUT DE LA RECHERCHE

Un matériau tel que le laitier granulé présente de bonnes caractéristiques sur le plan économique, écologique, technique et mécanico-chimique. Sur le plan économique, le laitier est un produit connexe à la fabrication de la fonte donc l'élaboration des ciments au laitier est intéressante car elle permet l'utilisation d'un sous-produit à faible coût énergétique comparé au clinker qui nécessite plus de 106 Kg de fuel par tonne. Sur le plan technique, l'addition du laitier au ciment ne change pas les produits d'hydratation mais modifie seulement la cinétique de leur formation et diminue la chaleur d'hydratation. Sur le plan mécanique, les ciments au laitier

peuvent atteindre une résistance mécanique à 28 jours équivalente à celle du ciment Portland. Enfin, sur le plan mécanico-chimique les ciments à haute teneur en laitier ont un bon comportement en milieux agressifs.

Il est donc important d'étudier convenablement la possibilité d'utiliser ce laitier dans le Génie Civil, et d'effectuer plusieurs recherches pour surmonter ses défauts comme par exemple la faible résistance initiale.

Quant au but de notre projet, il consiste en la vérification des caractéristiques mécaniques et physiques du laitier d'El-Hadjar et l'étude des possibilités d'utilisation de ce dernier en cimenterie. Ce laitier se présente en grande quantité dans la région d'Annaba, dont la valorisation est pratiquement inexistante.

Nos objectifs portent sur l'étude des possibilités d'élaborer des bétons à de fortes teneurs en laitier ayant des caractéristiques satisfaisantes.

CHAPITRE TROISIEME: CARACTERISATION ET METHODES D'ESSAIS

CARACTERISATION ET METHODES D'ESSAIS

3.1 INTRODUCTION

Les méthodes d'essais et de confectionnement du béton et du mortier, ainsi que les caractéristiques de ces matériaux jouent un rôle très important dans la détermination de leur qualité ultérieure. En effet, hormis les conditions de conservation, les qualités fondamentales du béton ou du mortier sont largement marquées par divers facteurs tels que, la composition, le malaxage, la maniabilité, le remplissage, la vibration ainsi que la qualité du ciment et le type de sable et de graviers utilisés.

De ce fait, la normalisation des modes d'essais et de confectionnement, selon les normes en vigueur, devient une condition nécessaire pour l'obtention d'un béton ou d'un mortier normal et pour pouvoir comparer par la suite, nos résultats expérimentaux avec les résultats donnés dans la littérature.

Dans cet objectif, une étude détaillée sur le laitier d'El-Hadjar et sur le ciment CPA est présentée dans ce chapitre. Par la suite, les modes de confectionnement des bétons et des mortiers et leurs régimes de conservation ainsi que les principes des différents essais réalisés dans la partie expérimentale, sont décrits en détails.

Les deux normes en vigueur prises en compte dans le programme expérimental, sont les normes Anglaises BS 4550 [65], [66] et les normes Française AFNOR [67].

3.2 LE LAITIER D'EL-HADJAR

Le laitier d'El-Hadjar est un sous-produit de la production de la fonte du complexe sidérurgique d'El-Hadjar (Annaba). Sa production annuelle pour l'année 1988 est de 680443 tonnes. Suivant le mode de refroidissement on distingue deux catégories de laitier:

- Le laitier rocheux obtenu par refroidissement lent
- Le laitier granulé obtenu par refroidissement brusque.

Le laitier granulé utilisé dans notre étude a une forme de sable, de granulométrie 0-3 mm, de couleur claire, de masse volumique apparente de 1000 Kg/m^3 et de masse volumique absolue de 2900 Kg/m^3 . Ce laitier est relativement humide et sa teneur en eau est de l'ordre de 20%. Il possède par ailleurs, une teneur en Fer d'environ 4.5%.

La production annuelle de laitier granulé est de 260000 tonnes. Il faut noter que, pour une tonne de fonte liquide, on produit presque une tonne de laitier.

Actuellement le laitier granulé d'El-Hadjar est utilisé dans la cimenterie de Hadjar-Essoud comme ajout au ciment à raison de 20%. Tandis que le laitier rocheux est valorisé uniquement dans les routes de la région d'Annaba, mais en quantités très faibles.

3.2.1 COMPOSITION CHIMIQUE DU LAITIER GRANULE D'EL-HADJAR

La composition chimique du laitier d'El-Hadjar est donnée au tableau 3.1. La détermination de cette composition a été effectuée au laboratoire de l'UREG à Boumerdès.

3.2.2 QUALITE DU LAITIER GRANULE D'EL-HADJAR

En se référant à la section 2.5, le laitier d'El-Hadjar est classé comme l'indique le tableau 3.2

Tableau 3.1: Composition chimique du laitier

Elément	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	KO ₂	Na ₂ O	PF	MnO
%	42.2	5.85	1.9	42.2	4.72	1.54	.43	.12	.8	1.8

Tableau 3.2: classification du laitier d'El-Hadjar

indice	valeur	qualité du laitier
Ih ₈ (Indice de Keil Allemagne)	1.14	laitier normal
(Indice de Cleret et Lagavant France) Ih ₁₃	13.97	laitier médiocre
{ Ib ₁ (indices adoptés act- uellement en France) Ih ₁₅	{ 1 0.13	laitier très médiocre
Ih ₃ (Japon)	1.25	laitier médiocre
Ih ₁₄ (URSS)	0.98	laitier à la limite basique

Où Ib: Indice de basicité

Ih: Indice d'hydraulicité

Selon ces indices, le laitier d'El-Hadjar est un laitier de qualité médiocre du point de vue hydraulicité. Cependant, il faut préciser que pour les ciments au laitier (CPA plus

laitier) ces indices d'hydraulicité ne suffisent pas pour caractériser leur qualité hydraulique. En effet, la qualité de ces ciments dépend du pourcentage de substitution du clinker par du laitier et de la qualité du clinker. Le faible pouvoir hydraulique du laitier pourra être compensé par un clinker hautement réactif.

Pour une appréciation, seuls les essais de la résistance et de la durée de prise (essais mécaniques) sur ces ciments sont en mesure de les classer d'une façon plus exacte.

Dans la mesure où ces essais confirment la médiocrité de l'hydratation du laitier d'El-Hadjar, une solution technique pour l'amélioration de cette qualité est possible à réaliser.

Etant donné que, la composition chimique du laitier varie d'une coulée à une autre lors de sa production, une amélioration de sa qualité hydraulique est obtenue par un bon ajustement dans sa composition chimique. En effet, les indices d'hydraulicité donnés dans le paragraphe 2.5 dépendent essentiellement de la composition chimique de l'élément.

Un tel changement dans la composition chimique du laitier est obtenu, d'une part par un bon réglage pondéral du chargement du haut fourneau en coke, minerai et fondant comme il a été indiqué au chapitre 2, paragraphes 2.4, 2.5 et 2.6; et d'autre part par une bonne vitrification lors de l'opération de refroidissement.

3.2.3 TRAITEMENT DU LAITIER GRANULE

Le traitement du laitier granulé utilisé dans les expériences comporte les étapes suivantes:

a) Séchage dans une étuve à 105°C pendant 24 heures
b) Après un léger broyage durant 5 minutes on procède à une séparation magnétique (extraction du fer), par un séparateur magnétique.

c) Broyage jusqu'à une finesse de 3500 cm^2/g dans un broyeur à boulets. les mesures de la surface spécifique blanche

(SSB) sont effectuées en prélevant un échantillon toutes les heures.

Les résultats de mesure de la surface spécifique Blaine sont illustrés sur la figure 3.1. On constate que le laitier granulé est relativement dur par rapport au clinker. En effet le temps de broyage du laitier jusqu'à une finesse de $3500 \text{ cm}^2/\text{g}$ est relativement long. Il varie entre 7 à 8 heures.

3.3 LE CIMENT PORTLAND

Le ciment portland utilisé est un CPA 325, de surface spécifique Blaine de $3325 \text{ cm}^2/\text{g}$ et de densité 2.9 .

3.3.1 COMPOSITION CHIMIQUE DU CIMENT

La composition chimique du ciment est donnée au tableau 3.3. Ces analyses ont aussi pu être réalisées au laboratoire de l'UREG à Boumerdès.

Tableau 3.3: Composition chimique du ciment

Elément	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	KO_2	Na_2O	PF
%	20.5	4.99	2.81	60.9	0.95	2.34	.69	.15	5.82

3.3.2 COMPOSITION MINERALOGIQUE

En se basant sur la formule de BOGUE [4] les différents minéraux du CPA sont déterminés comme suit:

-Le silicate tricalcique (3CaO SiO_2): C_3S

$$\text{C}_3\text{S} = 4.07 \text{ CaO} - 7.6 \text{ SiO}_2 - 1.43 \text{ Fe}_2\text{O}_3 - 6.72 \text{ Al}_2\text{O}_3 \quad (3.1)$$

-Le silicate bicalcique (2CaO SiO_2): C_2S

$$\text{C}_2\text{S} = 2.87 \text{ S} - 0.75 \text{ C}_3\text{S} \quad (3.2)$$

-L'aluminate tricalcique ($3\text{CaO Al}_2\text{O}_3$): C_3A

$$\text{C}_3\text{A} = 2.65 \text{ Al}_2\text{O}_3 - 1.69 \text{ Fe}_2\text{O}_3 \quad (3.3)$$

-Le ferro-aluminate tétracalcique ($4\text{CaO Al}_2\text{O}_3 \text{Fe}_2\text{O}_3$):
 C_4AF

$$\text{C}_4\text{AF} = 3.04 \text{ Fe}_2\text{O}_3 \quad (3.4)$$

On aura donc:

$$\begin{array}{ll} - \text{C}_3\text{S} = 54.09\% & - \text{C}_3\text{A} = 8.47\% \\ - \text{C}_2\text{S} = 18.41\% & - \text{C}_4\text{AF} = 8.54\% \end{array}$$

3.4 GRANULATS

3.4.1 LE SABLE

Le sable utilisé est un sable de rivière dont l'analyse granulométrique est donnée au tableau 3.4 et sur la figure 3.2.

Le module de finesse M_f , de ce sable qui est par définition la somme des refus cumulés en pourcentage sur les tamis 0.16, 0.315, 0.63, 1.25, 2.5, et 5 est égal à 1.57, correspondant à un sable fin.

3.4.2 LE GRAVIER

le gravier utilisé est un gravier roulé ayant un D_{max} égal à 10 mm. Le tableau 3.5 donne l'analyse granulométrique de ce gravier.

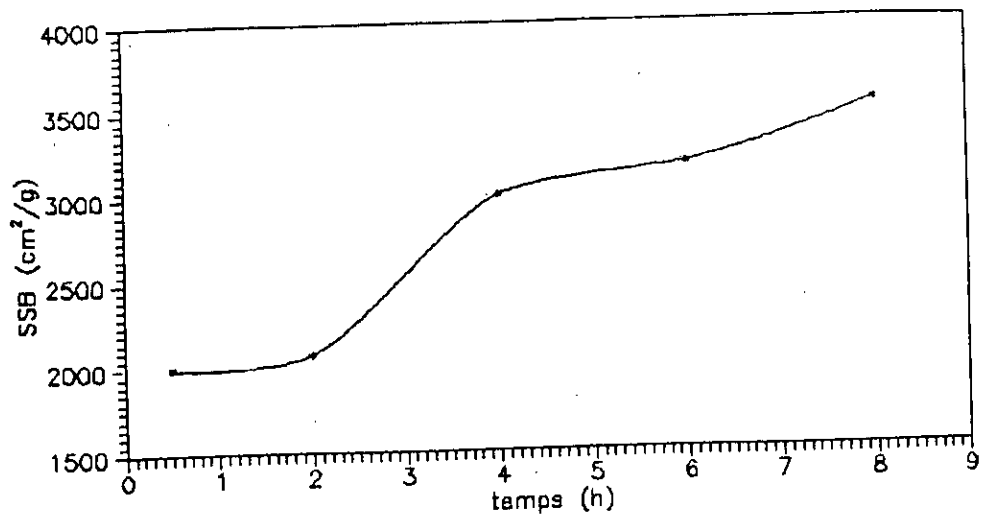


Fig. 3.1: Variation de la finesse (SSB) du laitier en fonction du temps

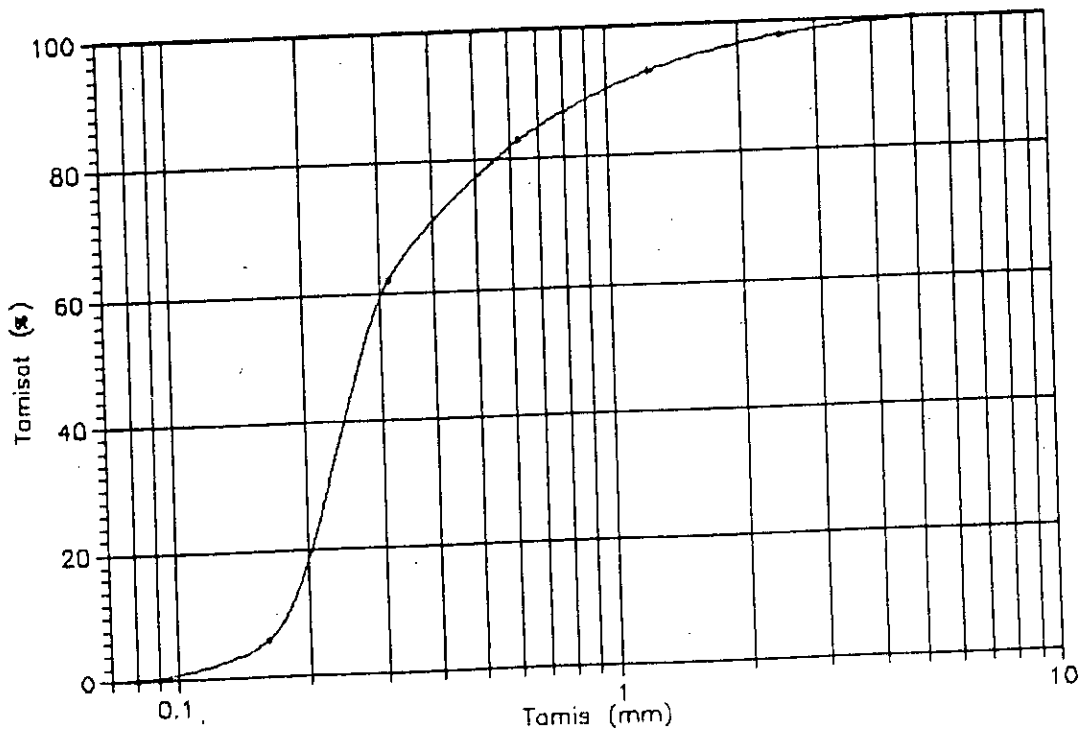


Fig. 3.2: Courbe granulométrique du sable 0/5

Tableau 3.4: Tamisage du sable 0/5

Tamis (mm)	% cumulé du tamisat
0.08	0.1
0.16	5.95
0.315	62.11
0.63	83.01
1.25	93.01
2.5	97.87
5	100

Tableau 3.5 Tamisage du gravier 5/10

passoire (mm)	% cumulé du tamisat
5	39.11
6.3	48.29
8	54.76
10	87.85

3.5 METHODES D'ANALYSES ET D'ESSAIS

3.5.1 TYPE D'EPROUVETTE

a) LE BETON

Les éprouvettes confectionnées sont les suivantes:

- 250 cubes (100 mm), pour les essais de compression et de perméabilité.

- 250 prismes (70x70x280)mm, pour les essais de flexion, l'essai ultra-sonique et l'essai d'absorption capillaire.

- 12 cylindres (ϕ 16, h = 32 cm), pour l'essai du module d'élasticité statique.

b) LE MORTIER

Les éprouvettes ci-dessous ont été utilisées

- 100 prismes (4x4x16)cm, pour l'essai de durabilité (résistance à l'eau de mer).

- 100 prismes (4x4x16)cm, pour l'essai de résistance dans l'eau douce et l'eau de mer.

Les essais mentionnés ci-dessus concernant le béton ou le mortier sont réalisés tous les 3, 7, 28, 90, et 180 jours. Et à chaque durée, trois éprouvettes seulement par essai sont testées.

3.5.2 CONFECTION DU BETON ET DU MORTIER

a) LE BETON

Le béton a été confectionné selon la méthode anglaise [66], qui se base sur le principe suivant:

En premier lieu, la spécification des données caractéristiques de base à savoir:

-La résistance à la compression qu'on veut obtenir à 28 jours (ou bien la résistance cible à 28 jours)

-Le type de ciment

- Le type d'agrégats
- Le rapport maximum eau sur ciment (E/C max)
- L'affaissement au cône d'Abrams
- Le diamètre maximum du granulat
- Les dosages maximum et minimum en ciment
- Le pourcentage du tamisage de sable sur le tamis 0.06mm

-La détermination de la composition du béton est obtenue en utilisant les abaques, les tableaux, et les équations empiriques.

Ainsi, se référant à cette méthode, deux types de bétons BI et BII sont confectionnés, ayant les caractéristiques suivantes.

Les caractéristiques communes sont:

- Le ciment est de type CPA
- Le type d'agrégats est donné par le paragraphe 3.4
- L'affaissement au cône d'Abrams est de à 5 cm
- Le E/C max est égale à 0.6
- Le pourcentage du tamisage du sable sur le tamis 0.06 mm est de 84.5% .

Cependant, les principales caractéristiques propres à chaque béton sont:

- La résistance cible à 28 jours qui est de 35 MPa pour le béton BI et de 40 MPa pour le béton BII.
- Le dosage maximum en ciment, du béton BI est de 350 Kg/m³ alors que celui du béton BII est de 400 Kg/m³.

Une fois ces caractéristiques fixées, la composition des deux bétons est alors déterminée.

Le tableau 3.6 donne un aperçu sur la composition des deux bétons en question.

Le malaxage du béton est conforme aux règles B.S 4550 Part. 3 [65], qui consiste à:

- Placer le sable, le liant (ciment + laitier) et le gravier dans le malaxeur.

- Malaxer à sec pendant 15 secondes.
- Ajouter l'eau d'une façon uniforme pendant les 15 secondes qui suivent. Continuer le malaxage durant 180 ± 5 secondes.
- remuer le béton à l'aide d'une truelle pour éviter le phénomène de ségrégation. Le malaxage étant terminé, on procède aux essais sur le béton frais, puis on remplit les moules à raison de deux couches. Le temps de vibration de chaque couche est de 60 secondes.
- Enfin araser et lisser la surface du béton à l'aide d'une truelle.

Les éprouvette sont ensuite maintenues dans le laboratoire pendant 24 heures, puis conservées dans l'eau à $20 \pm 2^\circ\text{C}$ ou bien dans une autre cure selon le type d'essai jusqu'à la date du test.

b) LE MORTIER

Le confectionnement et le malaxage sont effectués selon les règles B.S 4450 [66], qui consistent à:

- Préparer la composition suivante:
 - Sable.....3 parties (1350 gr).
 - Liant.....1 partie (450 gr).
 - eau0.4 partie (180 gr).
- Malaxer à sec pendant 60 secondes, ajouter l'eau pendant les 30 dernières secondes.
- Remplir les moules à raison de deux couches, 30 secondes de vibration pour chaque couche.
- Araser et lisser la surface avec une truelle.
- Conserver les éprouvettes dans le laboratoire durant 24 heures, puis dans la cure spécifiée par le type d'essai.

Il faut préciser que le pourcentage d'incorporation du laitier dans le mortier est de 0, 20, 40, 60, et 80% ; Alors que celui dans le béton est de 0, 15, 30, 45 et 60% .

Tableau 3.6: Composition du béton par m³

Type de béton	liant C+L (Kg)	sable (Kg)	gravier (Kg)	eau (Kg)	E/(C+L)	A/(C+L)
BI	350	628	1167	205	0.58	5.12
BII	400	560	1185	205	0.51	4.36

Où C+L: est le ciment plus laitier

E/(C+L): est le rapport l'eau sur ciment plus laitier

A/(C+L): est le rapport sable+gravier sur ciment plus laitier.

3.5.1.3 CONSERVATION DES EPROUVETTES

Les éprouvettes à tester ont été traitées préalablement avant les essais. Elles ont été conservées respectivement selon le type d'essai:

1- dans l'eau douce à $20 \pm 2^\circ\text{C}$ (en cure normale)

2- à l'air libre (condition du laboratoire) à $20 \pm 10^\circ\text{C}$

HR=65±2%.

3- en étuve à $40 \pm 5^\circ\text{C}$.

4- dans l'eau de mer.

3.6 ESSAIS PHYSICO-MECANQUES

3.6.1 ESSAIS SUR LES LIANTS

3.6.1.1 MASSE VOLUMIQUE APPARENTE EN g/cm³

La mesure de la masse volumique apparente consiste à verser le matériau pulvérulent à l'état sec en le disposant sans tasser par couches horizontales, dans un récipient de volume connu. L'excès est arasé à l'aide d'une règle, la masse volumique apparente est alors donnée par la formule suivante:

$$\rho_{app} = \frac{M}{V_{app}} \quad (3.5)$$

Avec:

- M = masse de l'échantillon en gr
- V_{app} = volume du récipient en cm³

3.6.1.2 MASSE VOLUMIQUE ABSOLUE EN g/cm³

La méthode utilisée est celle du densimètre Lechatellier, qui consiste à:

- Remplir le densimètre jusqu'au niveau "0" avec du benzène.

- Y verser une masse de 64 g de l'échantillon.

- lire directement le volume, (v_{abs}) en cm³

La masse volumique absolue sera donnée par:

$$\rho_{abs} = \frac{M}{V_{abs}} \quad (3.6)$$

Avec:

- M = masse de l'échantillon en gr
- V_{abs} = volume absolu de l'échantillon en cm³

3.6.1.3 FINESSE DE MOUTURE (SSB) EN cm²/g

Pour la mesure de la surface spécifique le

perméabilimètre de Blaine est utilisé. Il consiste à calculer le débit d'air susceptible de passer dans la poudre préalablement ramenée à une certaine compacité.

La surface spécifique est calculée par la relation suivante:

$$SSB = K \frac{\sqrt{e^3} \sqrt{t}}{\rho (1-e) \sqrt{\eta}} \quad (3.7)$$

Avec:

Avec: -K= Constante de l'appareil (K=22.66)

- ρ = Masse volumique absolue en g/cm³

-e= Porosité (e=0.5)

- η = Viscosité de l'air à la température de l'essai en Poise

-t= Temps de passage de l'air dans la couche de la poudre en seconde

3.6.1.4 TENEUR EN EAU

la mesure de la teneur en eau consiste à:

- Peser une certaine quantité de l'échantillon (P1 en Kg)

- Le sécher dans l'étuve à 105°C jusqu'à poids constant (P2 en Kg)

La teneur en eau est alors donnée par l'expression suivante:

$$W = \frac{P1-P2}{P2} \times 100 \quad (3.8)$$

3.6.1.5 ESSAIS DE PRISE (NFP 15414 ET 431)

La mesure du début et fin de prise est couramment

réalisée pour avoir un aperçu sur le comportement ultérieur du ciment. L'appareil utilisé est celui de Vicat. L'essai se déroule en deux étapes.

-1^{ère} étape: C'est la détermination de la consistance normale. Elle est obtenue quand la pâte placée dans le moule tronconique, retient la sonde de consistance à une distance de $(6 \pm 1 \text{ mm})$ du fond du moule.

-2^{ème} étape: C'est la détermination de la prise. On relève les temps de début et fin de prise:

a) Début de prise

C'est le temps qui s'écoule entre l'instant où le ciment a été mis en contact avec l'eau de gâchage et celui où l'aiguille de vicat ne pénètre plus jusqu'au fond du moule.

b) Fin de prise

Elle se situe au moment où la pâte pure supporte le poids de l'aiguille sans que celle-ci ne laisse de trace visible.

3.6.1.6 CHALEUR D'HYDRATATION

Les essais de détermination de la chaleur d'hydratation peuvent être réalisés suivant les méthodes ci-dessous dites:

- De la bouteille isolante (calorimètre de LAGAVANT)
- De la chaleur de dissolution
- Du calorimètre adiabatique
- Du calorimètre à conduction

Notre choix s'est porté sur la première méthode, qui est la plus répandue et la moins coûteuse.

3.6.2 ESSAIS SUR BETON FRAIS

3.6.2.1 MESURE DE LA CONSISTANCE

La mesure de la consistance est obtenue grâce à l'essai d'affaissement au cône d'Abrams ou le Slump-test (NFP 18451), qui consiste à :

-Remplir le cône en trois couches piquetées à raison de 25 coups par couche avec un piquet de ϕ 16 mm

-Retirer le moule lentement et mesurer l'affaissement en (cm)

3.6.2.2 MESURE DE L'AIR OCCLUS

Elle se fait à l'aide d'un aéromètre sur une quantité de béton de 6 litres pour les bétons courants (norme NBN 748-02,03 et 20).

L'appareil est constitué d'un réservoir de forme évasé dans lequel est compacté le béton. Le couvercle, muni d'un tube gradué et d'un manomètre, est fixé hermétiquement sur le réservoir. De l'eau est introduite dans le tube jusqu'à un repère zéro. Une pression est ensuite appliquée à l'aide d'une petite pompe manuelle. Le pourcentage d'air total est lu directement sur le tube gradué.

3.6.3 ESSAIS SUR BETON ET MORTIER DURCIS

3.6.3.1 RECTIFICATION ET SUREFAÇAGE (ISO/DIS 4012)

Après le démoulage des éprouvettes, les surfaces libres sont rarement planes (ou lisses), entraînant un phénomène de concentration de contraintes lors de l'essai de compression et par la suite une rupture de l'éprouvette par fatigue. De ce fait, techniquement, l'opération de surfaçage suffit pour palier à ce problème de concentration de contraintes.

Cependant, si les surfaces libres présentent une forte rugosité, avant le surfaçage, une opération de rectification par sciage est réalisée à l'aide d'une machine tronçonneuse pour l'obtention d'une surface plus au moins plane.

Quant à l'opération de surfaçage, elle consiste à:

-préparer une composition renfermant deux volumes de soufre et un volume de sable fin ($\leq 0.5\text{mm}$).

-à porter le mélange à une température de 1350°C jusqu'à fusion, puis l'étaler sur la plaquette de l'appareil de surfaçage.

-Poser l'éprouvette perpendiculairement sur la plaquette et après quelque minutes soulever l'éprouvette, pour obtir une surface très lisse.

3.6.3.2 ESSAIS DE RESISTANCE

a) LE BETON

Conformément aux normes BS 4450 [66], l'essai de compression s'effectue sur des éprouvettes cubiques de 10 mm de coté. La presse utilisée est une machine de type "CONTROLS" à double quadrant, ayant une capacité maximale de 2000 KN. Sa mise en marche s'effectue avec une vitesse de chargement constante de 0.5 MPa par seconde (on rappelle que pour chaque essai trois éprouvettes sont écrasées).

Par contre l'essai de résistance à la flexion, est réalisé sur des éprouvettes prismatiques de 7x7x28 cm. L'essai est effectué sur une machine "SINTCO", d'une capacité de 200 KN, et ayant une vitesse de chargement de 0.1 ± 0.05 MPa par seconde (le nombre d'éprouvettes utilisées est de trois pour chaque test).

b) LE MORTIER

Selon les mêmes normes BS 4450 [66], l'essai de traction

par flexion est réalisé sur des éprouvettes en mortier de dimension 4x4x16 cm. L'essai est effectué sur une machine "Maurice PERRIER et C^{ie}", d'une capacité de 6000 N. Sa vitesse de chargement est de 0.5 N par seconde.

Par ailleurs l'essai de compression s'effectue sur une machine "FORM + TEST SEINDNER" d'une capacité de 50 KN. Les éprouvettes utilisées pour cet essai sont des demi-prismes de dimension 4x4x4 cm obtenus lors de l'essai de flexion sur les éprouvettes de 4x4x16 cm.

3.6.3.3 MODULE D'ELASTICITÉ ET COEFFICIENT DE POISSON

Compte tenu des progrès réalisés en extensométrie grâce à l'électronique, les mesures deviennent de plus en plus précises de nos jours.

Le module d'élasticité statique en compression est déterminé soit par la différence de valeurs des déformations obtenues par chargement successifs, (Projet RILEM et ISO), soit graphiquement en exploitant la courbe contrainte-déformation. Le module d'élasticité E est la valeur de la pente à l'origine de cette courbe. C'est la méthode que nous avons utilisée. Le module d'élasticité statique s'exprime par la relation suivante:

$$E_{st} = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (3.9)$$

Avec: - ϵ : la déformation
- σ : la contrainte en MPa

Les déformations longitudinales et transversales sont déterminées à l'aide d'un pont d'extensométrie numérique "DMD 20A" et d'un commutateur "UMK 10" pour pouvoir lire successivement les deux déformations. Le montage est réalisé en demi-pont à deux jauges, l'une active et l'autre de compensation. Les jauges utilisées sont de type PL100 et PL20,

de longueurs respectives 10 et 2 cm.

La section d'éprouvette (ϕ 16, H 32) étant connue on peut déduire facilement la contrainte à partir de la force lue directement sur le cardan de la machine d'essai.

Enfin le coefficient de POISON, qui exprime le rapport de la déformation transversale à la déformation longitudinale est donné par l'expression suivante:

$$\nu = \frac{\epsilon_t}{\epsilon_l} \quad (3.10)$$

Avec: $-\epsilon_t$ = déformation transversale
 $-\epsilon_l$ = déformation longitudinale

3.6.3.4 ESSAI ULTRASONIQUE

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 peuvent être illustrés que par un essai non destructif tel que l'essai ultrasonique par exemple. Cet essai consiste à mesurer la vitesse de l'onde longitudinale d'une impulsion sonore à travers le béton.

L'appareil utilisé fonctionne sur secteur ou sur batterie. Il comporte essentiellement une boîte de mesure, deux têtes (émettrice, réceptrice) et de la pâte de contact visqueuse qui facilite la transmission du son.

Deux méthodes sont possibles pour mesurer la vitesse du son.

a- Mesure en transparence

La meilleure façon de mesurer la vitesse de propagation est de faire la mesure à travers le béton. Cette mesure consiste à presser les deux têtes de mesures sur les points du béton, en vis à vis, en utilisant la pâte de contact. La surface du béton doit être raisonnablement plane et exempte de poussière.

Après avoir actionné l'appareil on lit le temps de propagation en micro-seconde (μ sec). La distance ^{entre} être les tête doit être connue avec une précision de 1% pour calculer la vitesse de propagation à l'aide de l'expression suivante:

$$V = \frac{S}{t} \cdot 10^6 \quad (3.11)$$

- où:
- V= Vitesse de propagation en m/s
 - S= distance entre les têtes en m
 - t= temps en μ .s

Pour un béton normal on enregistre une vitesse du son variant entre 4000 à 4800 m/s.

b- Mesure en surface

En cas d'impossibilité de mesure en transparence, on procède par une mesure en surface. Cette méthode consiste à maintenir la tête émettrice fixe et déplacer l'autre tête réceptrice sur la même face du béton de 5 ou 10 cm après chaque mesure.

Les résultats des mesures peuvent être reportés sur un diagramme distance/temps et la pente donnera la vitesse de propagation du son.

Par l'intermédiaire de la vitesse de propagation du son, on peut déterminer plusieurs paramètres intéressants, à titre d'exemple, la résistance à la compression et le module d'élasticité dynamique. Ce dernier est calculé par l'expression suivante:

$$E_{dyn} = \rho \cdot V^2 \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)} \quad (3.12)$$

- Où:
- V= Vitesse de propagation longitudinale du son en m/s
 - ρ = Masse volumique du béton en Kg/m^3
 - ν = coefficient de Poisson du béton

3.6.4 ESSAIS DE DURABILITE

3.6.4.1 POROSITE CAPILLAIRE

La détermination de la porosité capillaire consiste essentiellement en des mesures d'absorption d'eau à la pression atmosphérique. La mesure de l'absorption capillaire se déroule comme suit:

L'éprouvette déjà conservée à l'eau à $20 \pm 2^\circ\text{C}$, doit être déshydratée à l'étuve. Elle doit subir un sciage sur une face et un traitement imperméabilisant sur les autres faces à l'aide de résine, d'époxy ou de paraffine. Dans notre cas, la paraffine a été utilisée. L'éprouvette est après posée dans un bac contenant du sable saturé d'eau sur sa face sciée. On mesure ensuite en fonction du temps, l'accroissement du poids de l'éprouvette dû à la montée capillaire de l'eau par la formule:

$$AC = \frac{100 \cdot P}{S \sqrt{t}} \quad (3.13)$$

où:

- P= Poids d'eau absorbée en g
- S= Surface de la face sciée en cm^2
- t= temps en heures (t = 72 heures pour notre cas)

3.6.4.2 PERMEABILITE

L'essai consiste à placer l'éprouvette dans le perméabilimètre, et à appliquer ensuite, une pression de liquide sur la face de l'éprouvette. Le liquide est souvent du kérosène. Puis la perméabilité est déterminée par l'intermédiaire des deux caractéristiques qui sont, le temps d'apparition des premières gouttes sur la face opposée de l'éprouvette et le débit maximal.

CHAPITRE QUATRIEME: RESULTATS ET INTERPRETATIONS

CHAPITRE QUATRIEME

RESULTATS ET INTERPRETATIONS

4.1 INTRODUCTION

Dans le présent chapitre sont exposés les différents résultats expérimentaux effectués sur le laitier granulé d'El-Hadjar, incorporé dans une pâte, mortier ou béton, conformément aux modes opératoires mentionnés au chapitre III. Une interprétation des résultats et une comparaison avec ceux reproduits dans la littérature sont également présentées dans ce chapitre.

4.2 ESSAIS DE PRISE ET DE CHALEUR D'HYDRATATION

Afin de vérifier la propriété latente d'hydratation du laitier d'El-Hadjar, des essais de prise et de la chaleur d'hydratation ont été effectués sur une pâte (laitier plus CPA). Le pourcentage de laitier varie entre 0% et 100%.

Le tableau 4.1 illustre les résultats de prise tandis que la figure 4.1 donne les résultats de chaleur d'hydratation.

Tableau 4.1 Essais de prise sur le (CPA+laitier)

% de laitier	consistance normale	début de prise	fin de prise
0	0.27	2 h	7 h
20	0.25	2 h 5	7 h 10
40	0.24	2 h 20	7 h 25
60	0.23	2 h 40	7 h 35
80	0.21	3 h	8 h 10
100	---	---	> 48 h

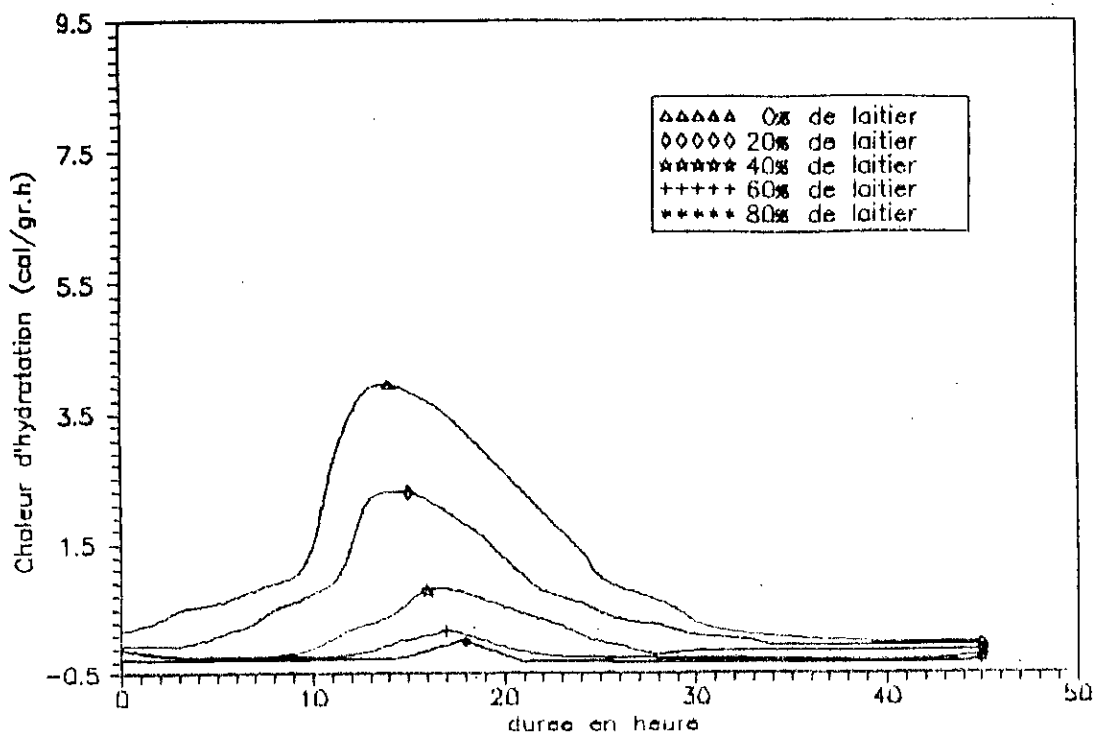


Fig. 4.1: Chaleur d'hydratation des ciments au laitier

4.2.1 DISCUSSION ET INTERPRETATION

Ces expériences confirment la propriété latente de l'hydratation du laitier d'El-Hadjar, puisque le temps de fin de prise augmente alors que le taux de chaleur d'hydratation diminue avec l'augmentation du pourcentage de laitier.

Cependant, nous constatons l'absence de la prise pour la pâte pure de laitier, et ce, même après 48 heures, confirmant ainsi la faiblesse du pouvoir hydraulique du laitier d'El-Hadjar qui nécessite de ce fait l'emploi d'un activant tels que le clinker ou la chaux.

Nous remarquons aussi que la consistance normale diminue avec l'augmentation du pourcentage du laitier. Ceci peut s'expliquer par le fait que les particules de laitier sont denses, lisses et n'absorbent pas beaucoup d'eau dans la phase initiale de l'hydratation, entraînant un glissement en plan sur des parties lisses dans la pâte (ciment plus laitier), ce qui augmente la plasticité et la fluidité de la pâte.

4.3 ESSAIS SUR BETON FRAIS

Les principaux essais effectués sur les deux types de bétons (B I) et (B II), conformément au mode opératoire décrit au paragraphe 3.6.2 sont les suivants:

- l'ouvrabilité déterminée par le cône d'ABRAMS
- le pourcentage d'air occlus déterminé par l'aéromètre
- la masse volumique mesurée par un récipient de volume connu.

Les résultats de ces essais sont donnés au Tableau 4.2.

Tableau 4.2: Résultats d'essais sur béton frais

	type du béton	pourcentage de laitier				
		0 %	15 %	30 %	45 %	60 %
dosage de ciment (Kg/m ³)	B (I)	350	350	350	350	350
	B (II)	400	400	400	400	400
E/(C+L)	B (I)	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
	B (II)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
slump test (cm)	B (I)	5	5	5.5	5.5	5.6
	B (II)	4	4	4.5	5.0	5.2
% d'air	B (I)	2.8	2.9	2.9	3.0	3.2
	B (II)	2.6	2.7	2.8	2.8	2.9
masse volumique (Kg/m ³)	B (I)	2350	2350	2350	2350	2350
	B (II)	2450	2450	2450	2450	2450

Remarque:

La convention adoptée dans l'appellation Internationale de béton au laitier implique que le béton confectionné contient un liant composé de ciment et de laitier. Un béton renfermant par exemple 30% de laitier indique que dans le dosage en liant 30% de ciment a été substitué par du laitier broyé.

4.3.1 DISCUSSION ET INTERPRETATION

A un rapport E/C constant, il a été constaté que la fluidité et le taux de l'air occlus dans le béton frais sont d'autant plus élevés que le pourcentage de laitier est grand comme il a été déjà relevé au paragraphe 4.2

4.4 ESSAIS SUR BETON DURCI

4.4.1 EFFET DU REGIME DE CURE SUR LA RESISTANCE MECANIQUE

4.4.1.1 RESISTANCE A LA COMPRESSION

Les éprouvettes utilisées sont des cubes de 100 mm de côté. Afin d'examiner l'influence de la cure sur la résistance à la compression, les bétons ont été traités de trois sortes différentes:

- cure normale dans l'eau douce à $20 \pm 2^\circ\text{C}$ (C.E)
- conservation à l'air libre à une température de 10 à 30°C (C.L)
- conservation en étuve à une température cyclique de 15 à 45°C et la durée du cycle est de 12 heures (C.U). Cet essai a été réalisé afin de simuler le climat saharien.

Dans ce qui suit nous allons examiner séparément l'effet de chaque cure, tout en adoptant les conventions: (C.E) conservation dans l'eau douce, (C.L) conservation à l'air libre (C.U) conservation en étuve

a) CONSERVATION EN CURE NORMALE DANS L'EAU DOUCE (C.E)

les résultats de résistance sont présentés au tableau 4.3 (Annexe) et sur les figures 4.2 et 4.3.

Dans ce type de cure, nous remarquons une augmentation continue de la résistance en fonction de l'âge. Mais à court terme (pour une durée inférieure à 3 jours), le béton ordinaire (contenant 0% de laitier) présente une résistance

mécanique supérieure à celle des bétons au laitier. Cependant après 28 jours, les bétons renfermant 15% et 30% de laitier développent une résistance supérieure au béton ordinaire. A long terme (pour une durée supérieure à 90 jours), la résistance mécanique des bétons au laitier (% de laitier 15, 30, et 45) est encore supérieure à celle du béton ordinaire.

Le tableau 4.4 (Annexe) donne le pourcentage du gain ou de perte de résistance des bétons au laitier par rapport au béton ordinaire, tout en adoptant la convention de signe suivante "+" pour gain et "-" pour perte.

Ces résultats confirment la propriété latente de l'hydratation des bétons au laitier, qui peut être interprétée comme suit:

A un âge jeune (durée inférieure à 5 jours), dans les bétons au laitier, l'hydratation du CPA se produit en premier lieu donnant les hydrates C-S-II et un excès de chaux qui active l'hydratation du laitier.

La nécessité de la présence de la chaux pour l'hydratation du laitier fait que ce dernier ne réagit que tardivement. Cependant, la cinétique de développement des produits d'hydratation des ciments au laitier est supérieure à celle du CPA, procurant aux bétons au laitier une résistance mécanique à long terme, plus élevée que celle des bétons ordinaires.

b) CONSERVATION A L'AIR LIBRE (C.L)

L'étude entreprise a été effectuée sur le béton (B11), qui présente une résistance plus élevée à long terme.

Le programme d'essais porte sur trois types de cures:

- conservation à l'air libre;
- conservation dans l'eau douce durant 7 jours puis à l'air libre;
- conservation dans l'eau douce durant 28 jours puis à l'air libre.

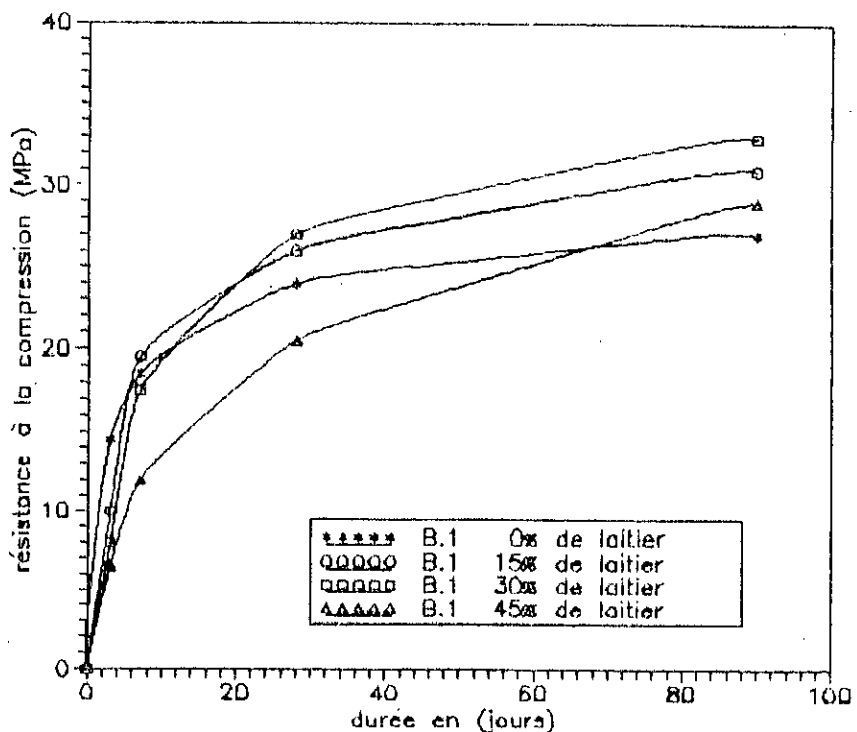


Fig.4.2: Résistance à la compression du béton (B1) en fonction de la durée de conservation dans l'eau douce

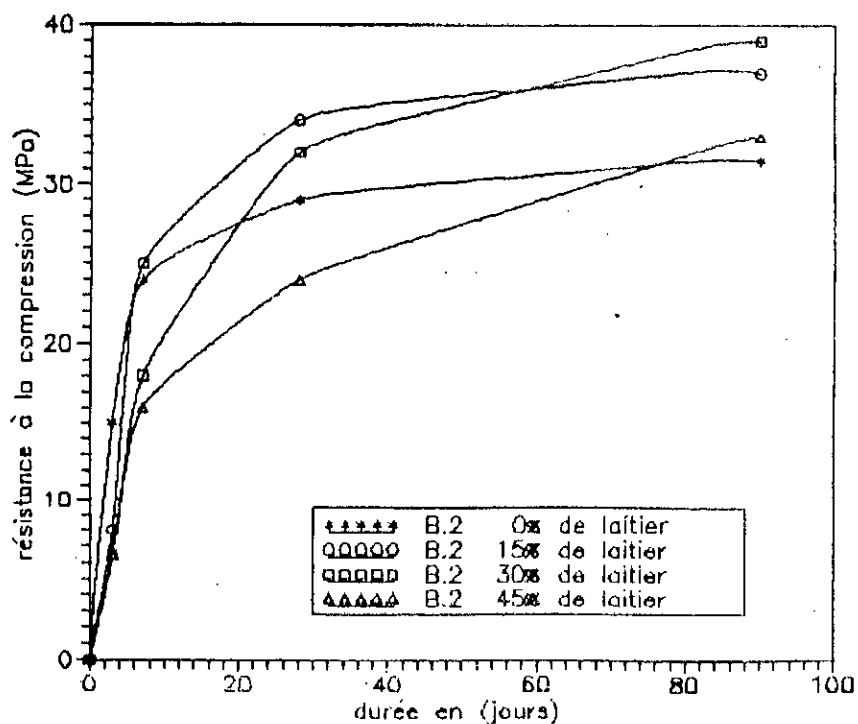


Fig.4.3: Résistance à la compression du béton (B2) en fonction de la durée de conservation dans l'eau douce

Les résultats sont présentés au tableau 4.5 (Annexe) et sur les figures 4.4 à 4.6 .

Les résultats ainsi obtenus montrent que la résistance à la compression des bétons au laitier conservés à l'air libre augmente d'une façon continue jusqu'à l'âge de 28 jours. Dans cet intervalle de temps, le béton ordinaire présente une résistance mécanique plus élevée que celle du béton au laitier. Au delà de cet âge, la résistance des bétons contenant 60% et 45% de laitier, continue à augmenter tandis que celle des bétons avec 0% et 30% de laitier diminue.

L'explication à cela, est que, la chaleur d'hydratation des bétons contenant 0% et 30% de laitier est plus élevée que celle des bétons renfermant 45% et 60% de laitier, favorisant une diminution de la quantité d'eau dans la masse du béton. L'appauvrissement en eau par évaporation réduit la cinétique d'hydratation. C'est la raison pour laquelle, la résistance à la compression des bétons contenant 0 et 30% de laitier chute à long terme.

Par ailleurs, hormis la condition de la présence de l'eau dans la masse du béton, l'hydratation et l'augmentation de la résistance des bétons au laitier nécessitent une quantité suffisante de chaux en provenance de l'hydratation du clinker, comme activant. Et puisqu'à long terme, la quantité de chaux dans le béton renfermant 45% de laitier est supérieure à celle du béton avec 60% de laitier, la résistance mécanique du premier béton est la plus grande.

Afin d'éclaircir ces phénomènes nous avons conservé les bétons durant 7 et 28 jours dans l'eau douce avant de les exposer à l'air libre.

Les bétons au laitier ainsi traités, développent une résistance supérieure ou égale à celle des bétons conservés dans l'eau douce (C.E). Cette augmentation de la résistance est due au fait que les bétons se trouvent saturés d'eau. En

effet, le seul facteur responsable de l'évaporation de l'eau est la température ambiante du milieu extérieur. Cette dernière n'est pas trop élevée (elle varie entre 15°C et 20°C), entraînant ainsi une faible évaporation.

Par ailleurs, une conservation durant la même durée (7 à 28 jours) dans l'eau douce est suffisante pour qu'il y ait une quantité nécessaire de chaux pour activer les grains de laitier.

Ainsi, ces deux conditions, à savoir la présence de l'eau et de la chaux dans la masse de béton au laitier, sont nécessaires pour la continuité du processus d'hydratation et de l'évolution de la résistance mécanique.

Ceci explique que la chute de la résistance des bétons exposés directement à l'air libre est due à l'évaporation rapide de l'eau et à l'appauvrissement en chaux.

c) CONSERVATION EN ETUVE

L'étude a été effectuée sur le béton (B11), sous l'effet de deux types de cure. L'une directement en étuve, et l'autre d'abord dans l'eau douce durant 28 jours, puis dans l'étuve.

Les résultats sont donnés au tableau 4.6 (Annexe) et sur la figure 4.7 .

Les bétons traités dans l'étuve développent une résistance croissante avec l'âge jusqu'à 28 jours et au delà de cet âge, on constate une chute de la résistance pour les bétons contenant 0%, 30% de laitier. Par contre celle du béton avec 60% de laitier continue à augmenter, tandis que celle du béton contenant 45 % de laitier reste quasiment constante.

La cinétique de chute de résistance est interprétée par la vitesse d'évaporation de l'eau. L'évaporation rapide de l'eau engendre une chute rapide de la résistance.

Comme il a été préalablement exposé dans l'essai précédent, nous avons fait subir aux bétons une cure initiale

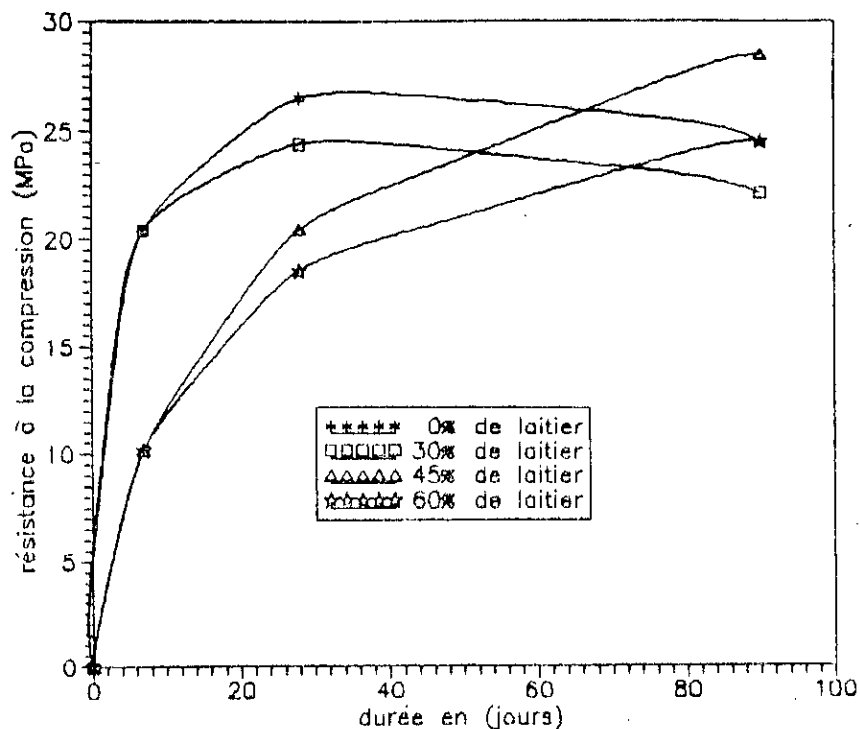


Fig. 4.4 : Résistance à la compression du béton (B2) en fonction de la durée de conservation à l'aire libre

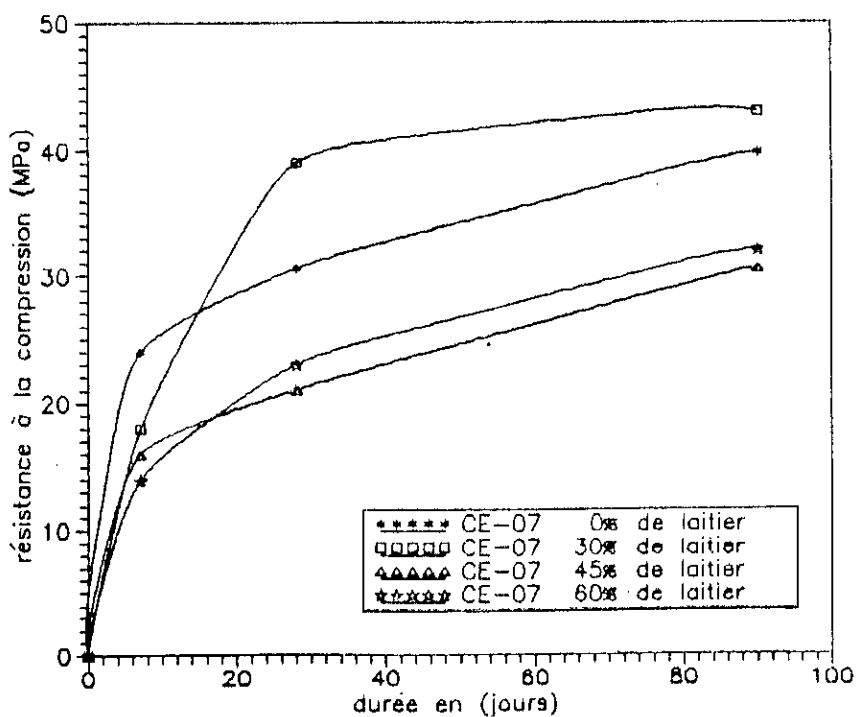


Fig. 4.5: Résistance à la compression du béton (B2) conservé 7 jours dans l'eau douce puis à l'air libre

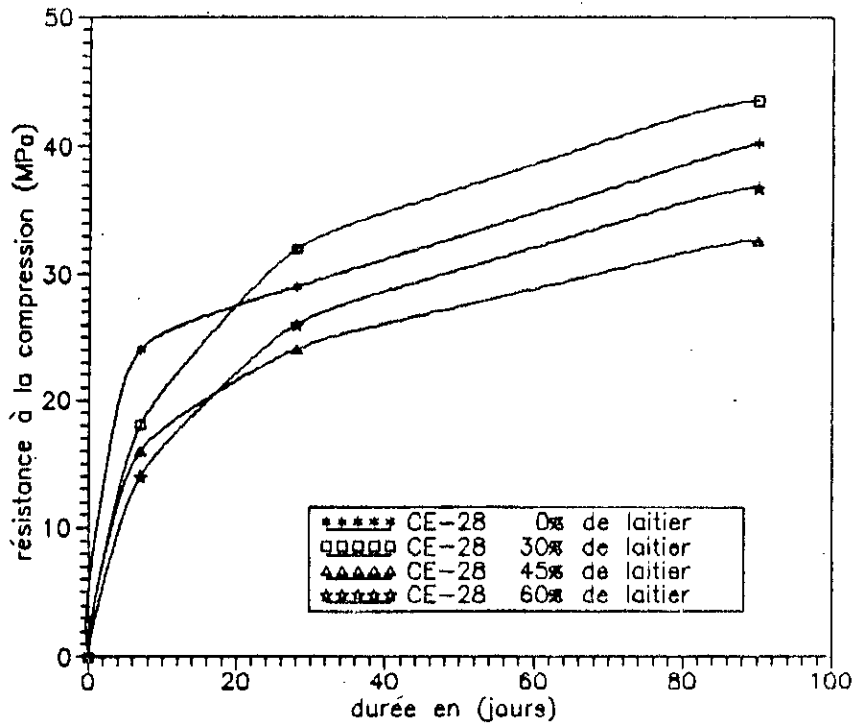


Fig. 4.6: Résistance à la compression du béton (B2) conservé 28 jours dans l'eau douce puis à l'air libre

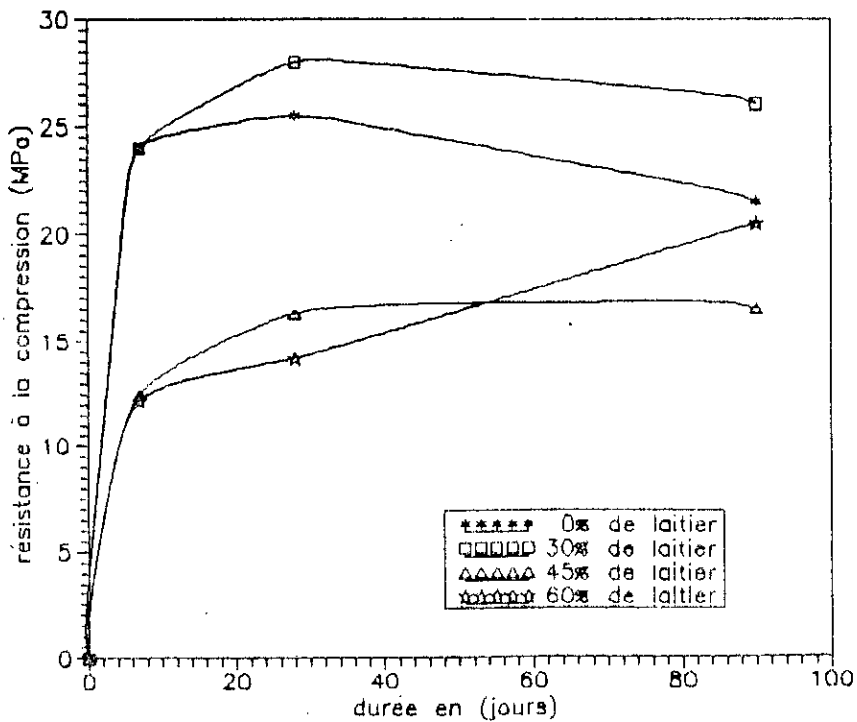


Fig. 4.7: Résistance à la compression du béton (B2) en fonction de la durée de conservation dans l'étuve

dans l'eau douce pendant 28 jours. A long terme, la résistance à la compression augmente avec l'accroissement du pourcentage de laitier. Cette élévation peut être interprétée comme suit: D'une part les bétons sont saturés d'eau, ce qui entraîne une continuité dans le processus d'hydratation et un accroissement de la résistance, d'autre part, l'activation thermique engendrée par la température élevée de l'étuve, contribue au développement de la résistance.

Dans cette condition de cure (28 C.E + C.U) le béton le plus résistant à long terme est celui contenant 60% de laitier.

4.4.1.2 RESISTANCE A LA FLEXION

Les éprouvettes utilisées sont des prismes (7x7x28 cm). Le mode de conservation utilisé est le même que celui décrit à la section 4.4.1.1.

a) CONSERVATION DANS L'EAU DOUCE (CURE NORMALE: C.E)

Les résultats de la résistance à la flexion sont donnés au tableau 4.7 (Annxe), et sur les figures 4.8 et 4.9

D'après ces résultats il apparaît que la variation de la résistance à la flexion est semblable à celle de la résistance à la compression.

A court terme (durée inférieure à 3 jours), le béton ordinaire est le plus résistant. A long terme (durée supérieure à 90 jours), les bétons contenant 30% et 15% de laitier développent une plus grande résistance à la flexion, de l'ordre de 12% et 8.5% respectivement, par rapport au béton contenant 0% de laitier (cas du béton B(II))

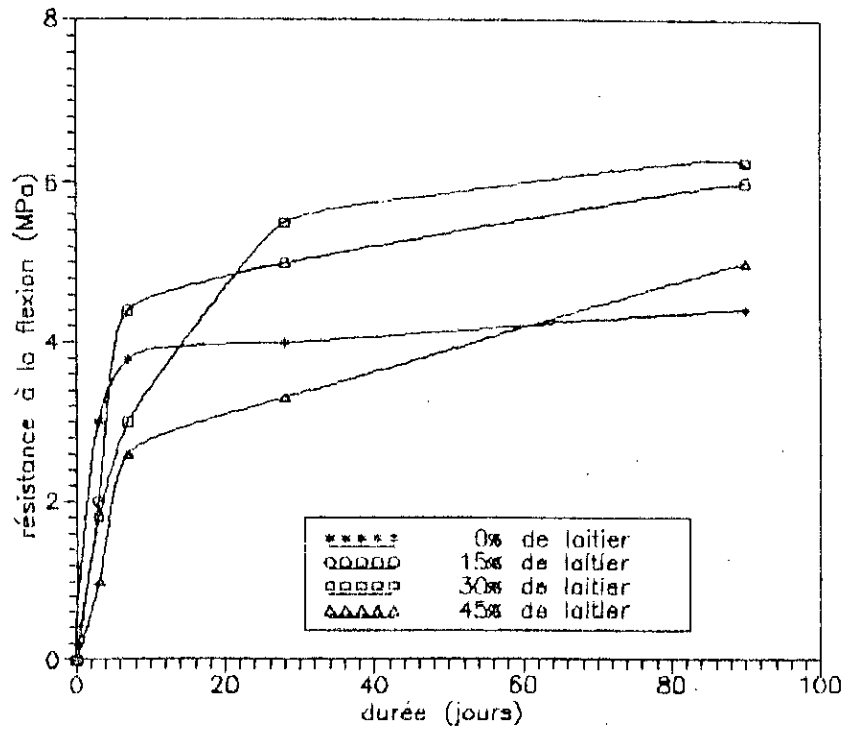


Fig. 4.8: Résistance à la flexion du béton (B1) en fonction de la durée de conservation dans l'eau douce

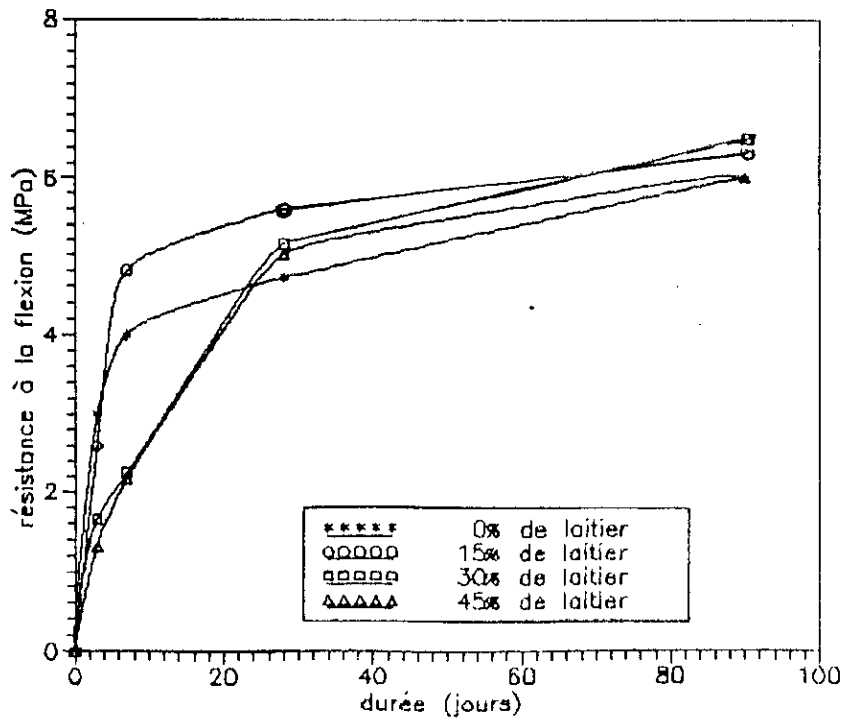


Fig. 4.9: Résistance à la flexion du béton (B2) en fonction de la durée de conservation dans l'eau douce

b) CONSERVATION A L'AIR LIBRE

Nous avons adopté le même programme d'essai que pour la résistance à la compression.

Les résultats sont donnés au tableau 4.8 (Annexe) et sur les figures 4.10, 4.11 et 4.12 .

Les résultats obtenus dans cette section indiquent clairement une augmentation de la résistance à la flexion en fonction de l'âge pour les bétons conservés à l'air libre, mais à un âge donné cette même résistance diminue avec l'augmentation du pourcentage du laitier.

On remarque aussi, que les résistances à la flexion des bétons au laitier conservés à l'air libre, sont inférieures à celles des même bétons, conservés dans l'eau douce.

Cette réduction de la résistance est due à l'appauvrissement en eau suite à son évaporation à l'air libre de la masse du béton, entraînant un abaissement de la cinétique d'hydratation qui provoque une diminution de la résistance.

Cependant, à l'air libre, la chute de la résistance à la flexion en fonction de l'augmentation du pourcentage du laitier est induite par la mauvaise répartition des produits d'hydratation entre les particules du laitier et celle du clinker provoqué par l'évaporation qui réduit la cinétique d'hydratation. En effet pour les ciments au laitier, si on réduit la cinétique d'hydratation, les produits d'hydratation (C-S-H) se trouvent alors localisés autour des grains de clinker, adhérant mieux à ces grains qu'aux grains de laitier. Ainsi l'adhérence dans la pâte diminue avec l'augmentation du pourcentage de laitier, entraînant la réduction de la résistance à la flexion.

Les bétons subissant une cure initiale dans l'eau douce de 7 à 28 jours présentent des résistances élevées dues à la quantité suffisante d'eau qui leur assure la continuité du processus d'hydratation, entraînant une élévation de la résistance.

c) CONSERVATION DANS L'ETUVE

Les mêmes conditions d'essai qu'en (b) ont été adoptées pour cette expérience.

Les résultats obtenus pour la résistance à la flexion sont reportés au tableau 4.9 (Annexe) et sur la figure 4.13.

En ce qui concerne le comportement de notre béton traité en étuve, la même constatation que pour la résistance à la compression peut être faite. En effet la résistance à la flexion augmente jusqu'à 28 jours, au delà de cet âge, elle diminue ou, se stabilise à 90 jours. L'évaporation rapide de l'eau est responsable de la chute de résistance.

Quant aux bétons subissant une cure initiale de 28 jours dans l'eau douce, la résistance obtenue augmente remarquablement. Les causes de cette élévation sont identiques à celles exposées à la section 4.4.1.1 C.

4.4.1.3 COMPARAISON DES TROIS REGIMES DE CURE

Il a été constaté que la variation en fonction de l'âge de la résistance aussi bien à la compression qu'à la flexion est similaire pour les trois types de conservation du béton au laitier. Pour l'analyse des résultats il suffira de prendre l'une des deux résistances. Dans notre cas nous considérerons uniquement la résistance à la compression.

Pour toutes les cures, jusqu'à 28 jours, la résistance augmente de façon continue. Au delà de cette durée et selon le type de conservation, il peut se produire une chute de la résistance.

Le tableau 4.10 présente une comparaison entre les résistances à la compression pour les trois types de conservation, exprimées en pourcentage d'une résistance de 35 MPa.

On constate d'après ces résultats que le béton renfermant 30% de laitier est le plus résistant pour presque

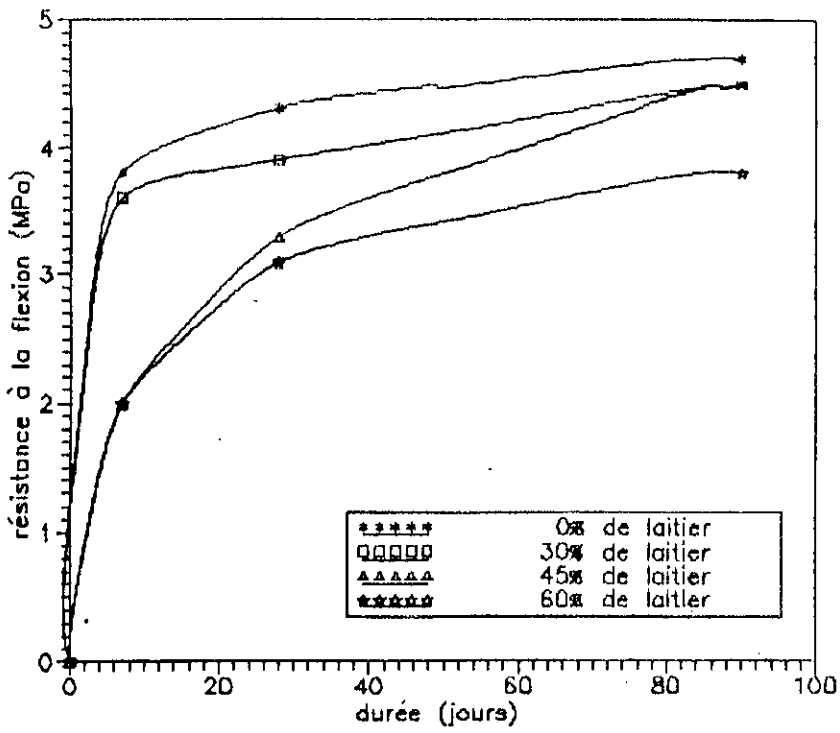


Fig. 4.10: Résistance à la flexion du béton (B2) en fonction de la durée de conservation à l'aire libre

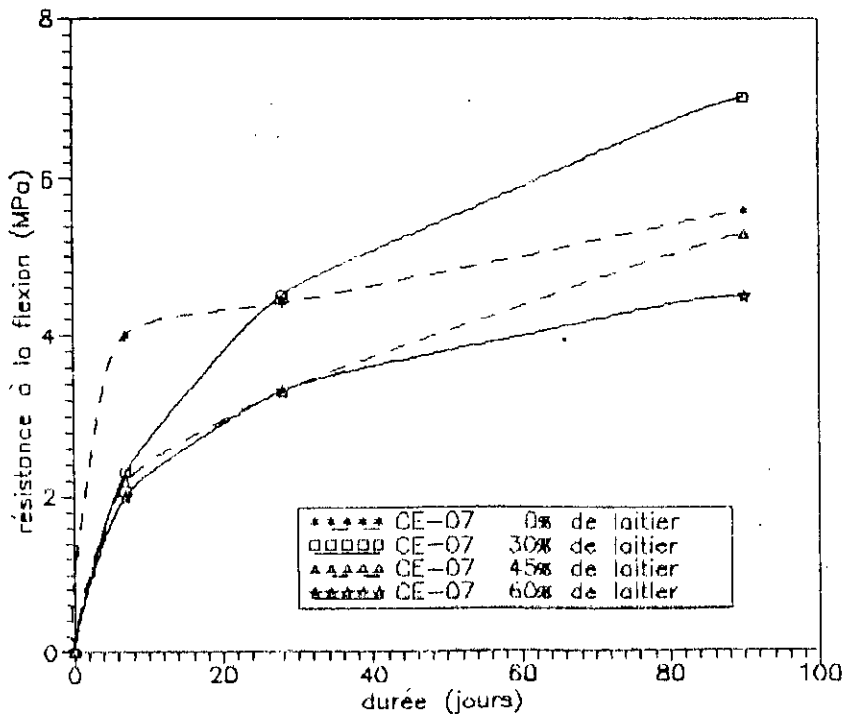


Fig. 4.11: Résistance à la flexion du béton (B2) conservé 7 jours dans l'eau douce puis à l'air libre

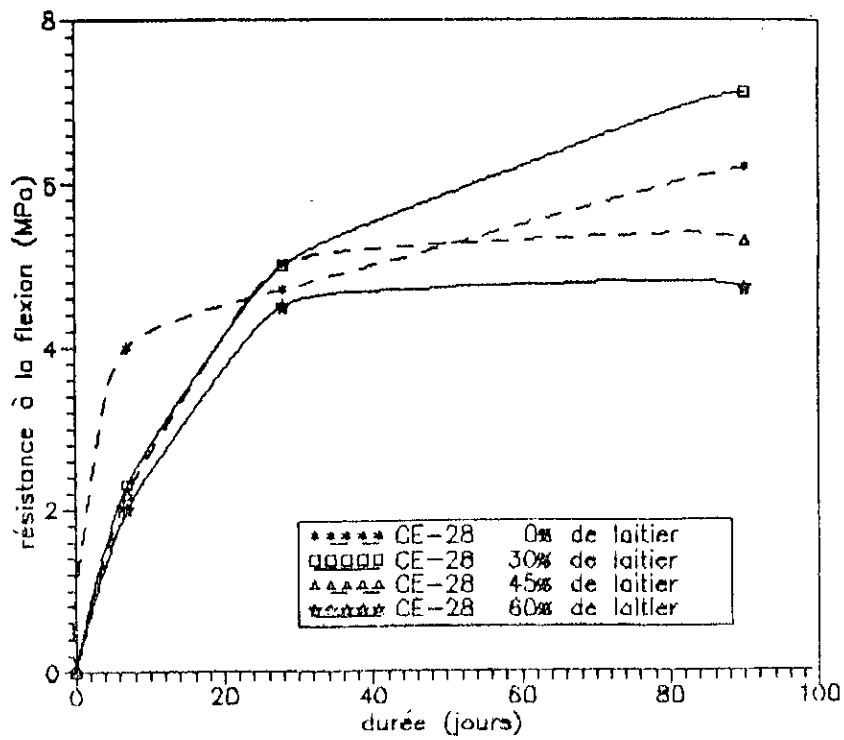


Fig. 4.12: Résistance à la flexion du béton (B2) conservé 28 jours dans l'eau douce puis à l'air libre

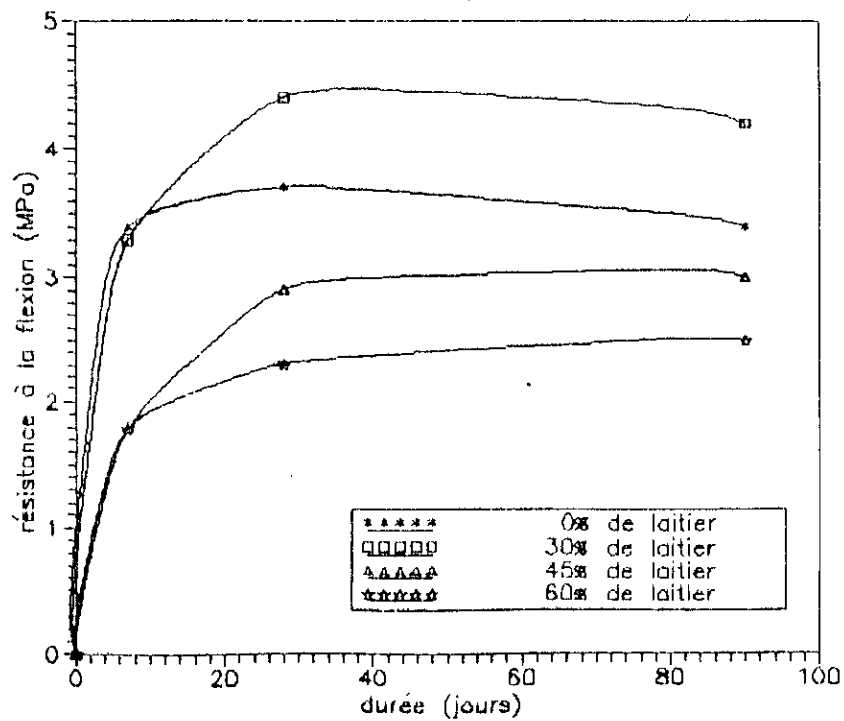


Fig. 4.13: Résistance à la flexion du béton (B2) en fonction de la durée de conservation dans l'étuve

tous les types de cure. Néanmoins, à l'air libre, le béton le plus résistant est celui contenant 45% de laitier. Cependant, en étuve le béton qui présente une plus grande résistance à long terme, est celui contenant 60% de laitier et conservé durant 28 jours dans l'eau douce puis étuvé.

Pour une durée supérieure à 90 jours, les bétons au laitier contenant 30, 45 et 60% de laitier et conservés dans l'eau douce, possèdent une résistance plus élevée que celle du béton ordinaire.

4.4.1.4 COMPARAISON AVEC LES RESULTATS DE LA LITTERATURE

Les références [6], [18] et [32], indiquent qu'en France ou en Angleterre des pourcentages élevés d'incorporation de laitier dans le béton, jusqu'à 70% ont été atteints. Avec une substitution en laitier aussi importante, les bétons ainsi confectionnés ont un remarquable comportement. Alors que dans notre cas, le meilleur béton obtenu avec le laitier d'El-Hadjar ne contient que 30% de laitier. On peut attribuer ce comportement à la propriété médiocre de l'activité du laitier d'El-Hadjar.

Cependant, le béton renfermant 60% de laitier d'El-Hadjar et conservé dans l'eau douce durant 90 jours, présente une résistance mécanique acceptable qui dépasse celle du béton ordinaire, mais elle reste inférieure à celle du béton contenant 30% de laitier.

Ainsi, pour atteindre des pourcentages d'incorporation élevés en laitier d'El-Hadjar, dans les bétons, il est nécessaire d'améliorer son activité, soit par l'ajout de certains catalyseurs ou par l'amélioration de son procédé de fabrication.

4.4.2 MODULE D'ELASTICITE

Dans ce qui suit, il sera présenté une étude sur les deux module d'Young à savoir le module statique et dynamique.

Tableau 4.10: Effet de cure sur la résistance à la compression exprimée en pourcentage de la résistance de 35 MPa

âge % de laitier cure	28 jours				90 jours			
	0%	30%	45%	60%	0%	30%	45%	60%
C.E	82.8	91.5	68.5	85.7	90	111	94.3	97
C.L	75.7	70	58.3	52.8	70	62.8	81.5	70
7 C.E + C.L	87	111.5	60	67	113	123	87.5	92.8
28 C.E + C.L	---	---	---	---	114	124	93	105
C.U	73	80	46.5	40.5	61.5	74.2	47	58.5
28 C.E + C.U	---	---	---	---	88.5	99	93	117

4.4.2.1 MODULE D'ELASTICITE DYNAMIQUE (E_{dyn})

La détermination du module d'élasticité dynamique est basée sur le calcul de la vitesse longitudinale du son dans le béton, qui est déterminée conformément à la méthode décrite au paragraphe 3.6.3.5.

Une fois que cette vitesse dans le béton est calculée le module d'Young dynamique est alors donné par la relation (3.8) suivante:

$$E_{\text{dyn}} = \rho \cdot V^2 \frac{(1-\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)}$$

Où ρ = la masse volumique du béton en kg/m^3
 V = la vitesse longitudinale du son en m/s
 ν = le coefficient de Poisson du béton

Les tableaux 4.11, 4.12 et 4.13 (Annexe) et les figures (Fig. 4.14 à Fig. 4.18), donnent l'évolution du module d'élasticité dynamique en fonction de l'âge et du régime de cure.

Une comparaison entre l'évolution de la résistance à la compression et celle du module d'élasticité dynamique en fonction du régime de cure et de l'âge, montre que ces deux propriétés varient de façon analogue. Ceci confirme les résultats rapportés par WAINWRIGHT, P.J., [30].

On constate de ce fait qu'à court terme (durée inférieure à 3 jours), le béton renfermant 0% de laitier présente le module d'élasticité le plus élevé. Par contre, pour une durée supérieure à 90 jours le module d'élasticité dynamique le plus élevé est obtenu pour des bétons renfermant 30% de laitier.

Cependant, et exceptionnellement dans le cas de la conservation à l'air libre, le béton contenant 60% de laitier présente à 90 jours un module d'élasticité dynamique plus élevé. En effet, dans cette condition de cure, ce dernier béton présente la plus grande teneur en eau ce qui augmente sa vitesse de propagation du son et par la suite son module d'élasticité dynamique.

4.4.2.2 MODULE D'ELASTICITE STATIQUE (E_{st})

Le module d'élasticité statique est déterminé conformément au mode opératoire décrit au paragraphe 3.6.3.4.

Les essais sont réalisés à trois mois, du fait que,

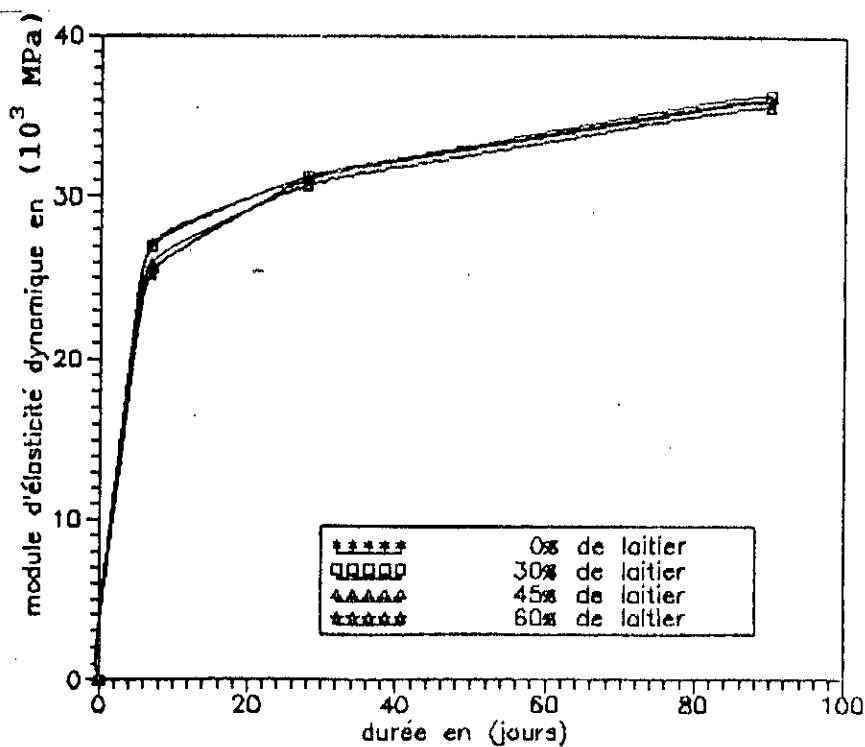


Fig. 4.14: Module d'élasticité dynamique σ du béton (B2) en fonction de la durée de conservation dans l'eau douce

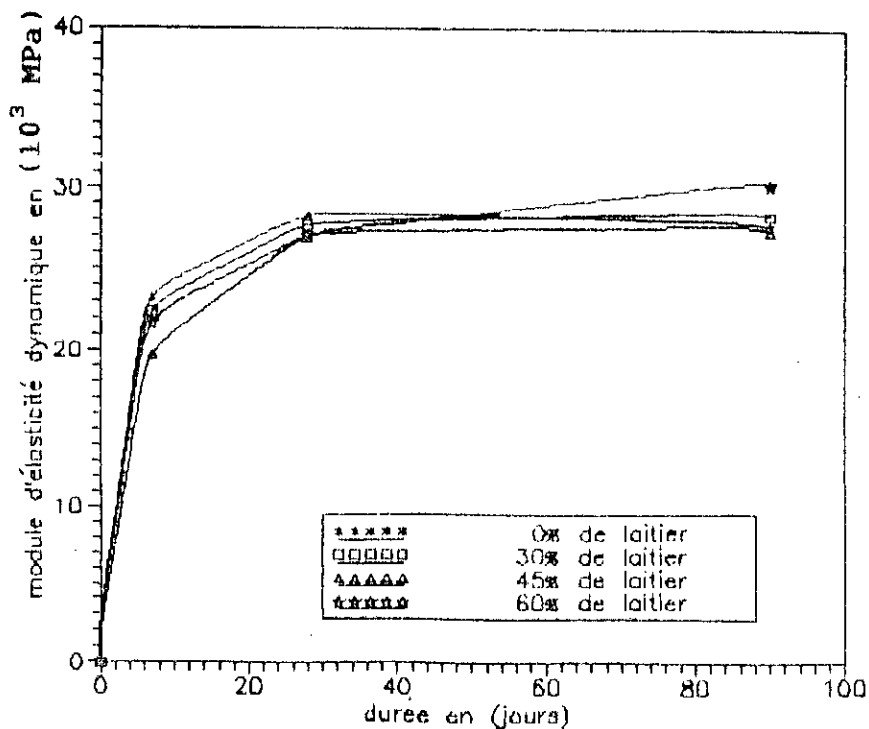


Fig. 4.15: Module d'élasticité dynamique σ du béton (B2) en fonction de la durée de conservation à l'air libre

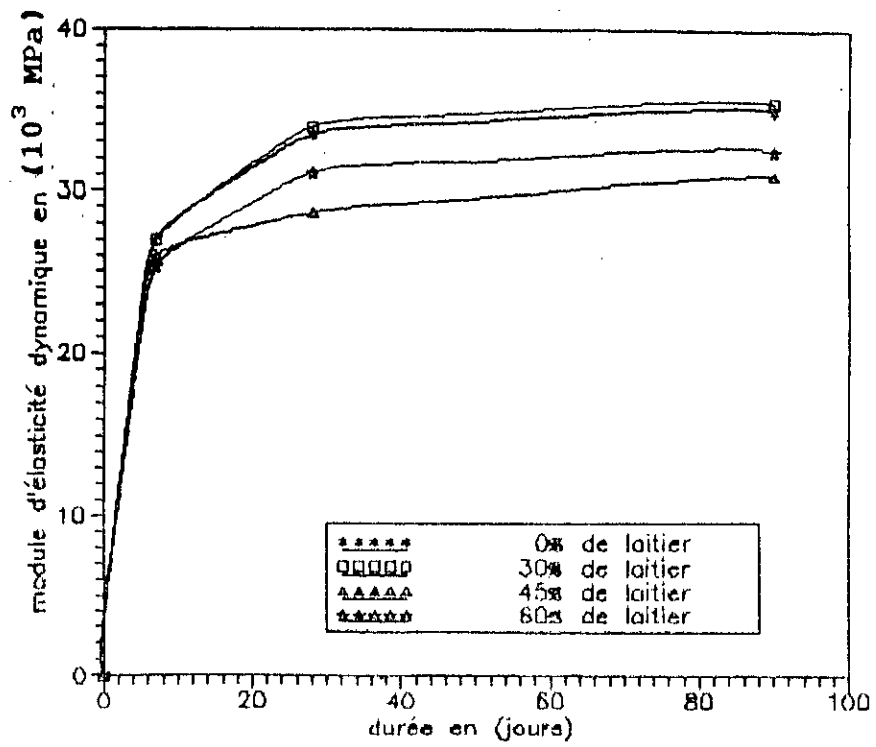


Fig. 4.16: Module d'élasticité dynamique \circ du béton (B2) conservé 7 jours dans l'eau douce puis à l'air libre

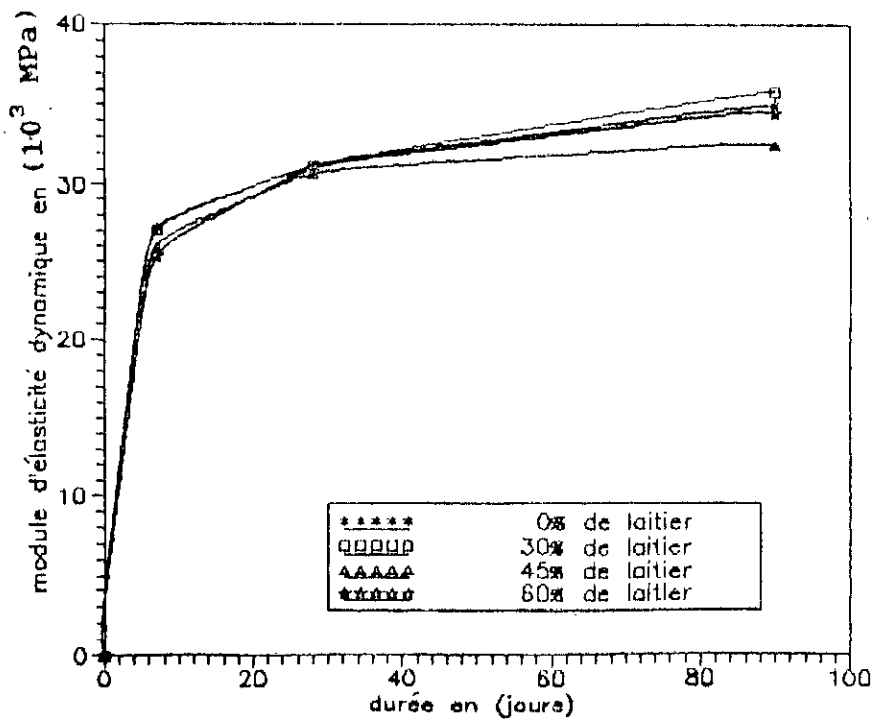


Fig. 4.17: Module d'élasticité dynamique \circ du béton (B2) conservé 28 jours dans l'eau douce puis à l'air libre

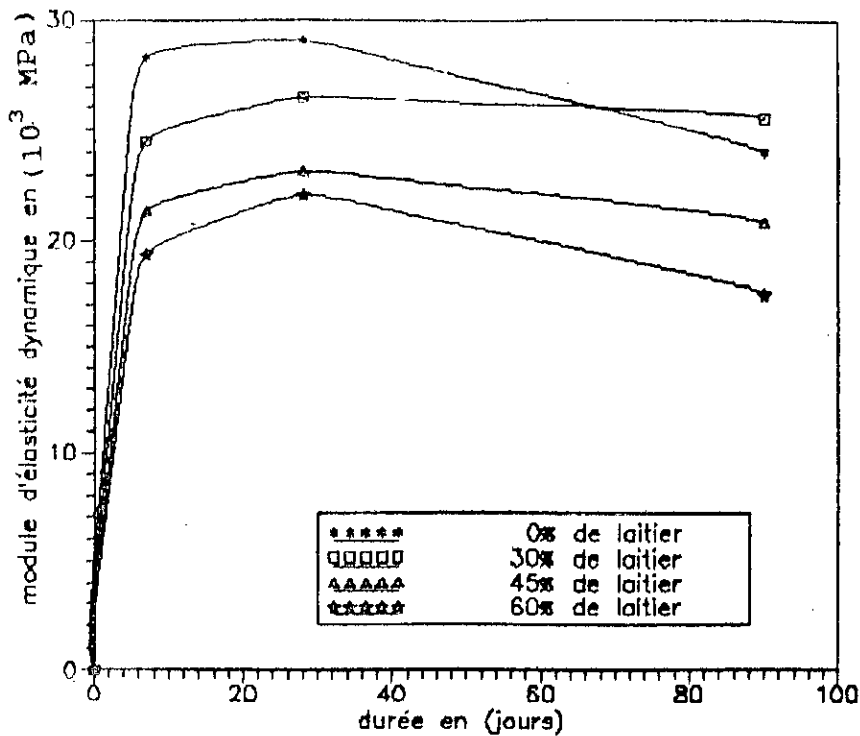


Fig.4.18 : Module d'élasticité dynamique du béton (B2) en fonction de la durée de conservation dans l'étuve

L'évolution du module d'élasticité statique (E_{st}) en fonction de l'âge peut être déduite de celle du module dynamique. En effet, il est évident que E_{st} augmente avec l'augmentation de la résistance mécanique. Par ailleurs, il a été remarqué, lors des essais sur le E_{dyn} , que ce dernier, a la même variation au cours du temps que la résistance mécanique. Il s'ensuit ainsi que, les deux modules d'élasticité auront la même variation en fonction de l'âge.

Cette constatation est confirmée par GORISS [67], qui affirme qu'en général, la variation en fonction de l'âge du module d'élasticité dynamique et statique est la même. Cependant, le module d'élasticité dynamique dépasse le module statique d'environ 10 à 20%. Ce qui est en accord avec nos résultats à trois mois.

Les résultats du module d'élasticité statique sont

donnés au tableau 4.11 (Annexe). Les figures 4.19 et 4.20 présentent les courbes contraintes-déformations du béton au laitier contenant un pourcentage de laitier variant de 0 à 60%. Le module d'élasticité statique E_{st} est obtenu dans notre cas en traçant les tangentes à l'origine aux courbes de la figure 4.19. Par ailleurs, le coefficient de poisson est déterminé par le rapport de la déformation transversale à la déformation longitudinale (ϵ_t/ϵ_l) des figures 4.19 et 4.20.

4.4.2.3 COMPARAISON AVEC LES RESULTATS DE LA LITTERATURE

Après une étude comparative entre les modules d'élasticité statique du béton ordinaire et des bétons au laitier établie selon les références [6], [27] et [30], on constate qu'il n'y a pas un très grand écart entre les modules d'Young de ces bétons. Ceci concorde parfaitement avec nos résultats.

Cependant, il est indiqué dans la littérature qu'à long-terme (pour une durée supérieure à 90 jours), le module d'élasticité du béton augmente avec l'augmentation du pourcentage de laitier jusqu'à 70% pour lequel $E_{st} = 35000$ MPa. Dans notre cas, le module d'élasticité statique le plus élevé a été obtenu avec le béton contenant 30% de laitier ($E_{st} = 33330$ MPa), cela est dû à la propriété médiocre de l'activité du laitier d'El-Hadjar.

4.4.3 MESURE DE L'ONDE LONGITUDINALE DU SON

La mesure par la méthode "en transparence" du temps t en secondes de l'onde longitudinale du son est effectuée dans le but de calculer la vitesse de propagation et de permettre d'évaluer le degré de fissuration ou d'endommagement du béton. Le mode opératoire de cette expérience est décrit à la section (3.6.3.5.a.).

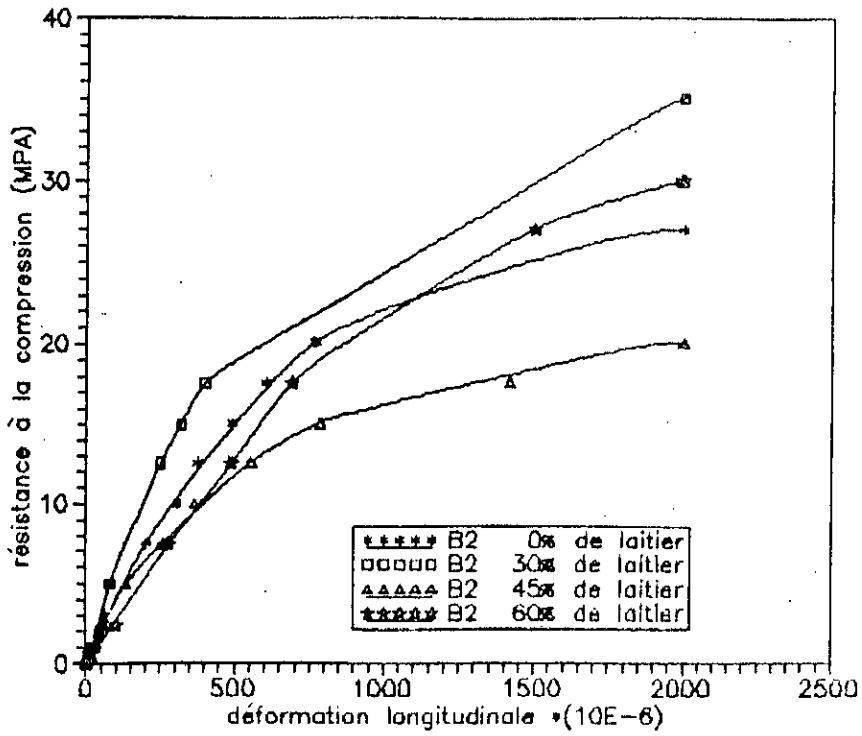


Fig. 4.19: Relation contrainte-déformation du béton (B2) après trois mois de cure normale

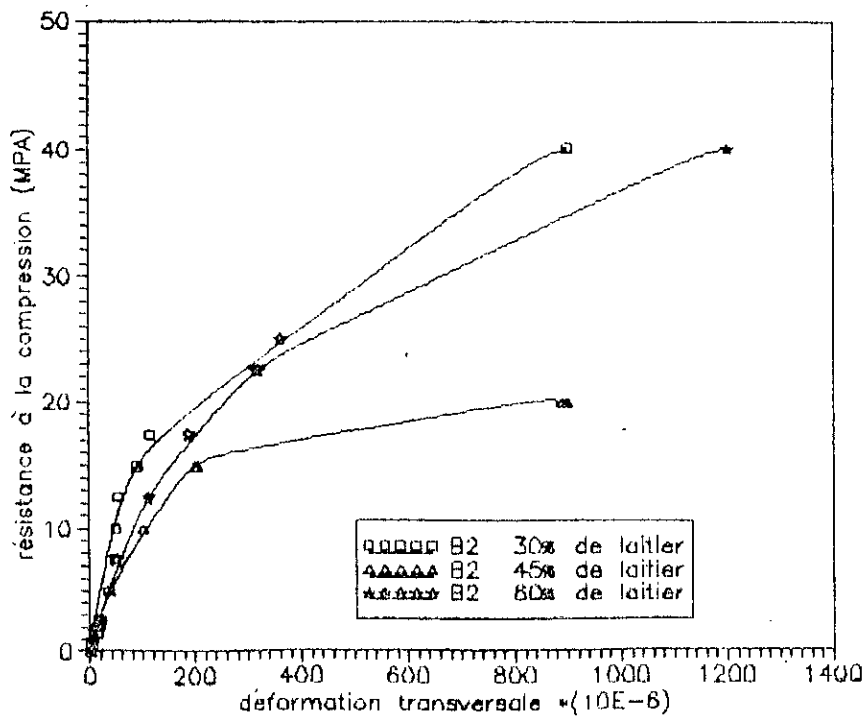


Fig. 4.20: Relation contrainte-déformation du béton (B2) après trois mois de cure normale

Les résultats de vitesses obtenus sont présentés au tableau 4.14 (Annexe), et illustrés sur les figures 4.21 à 4.25. suivant les modes de conservation du béton.

Pour interpréter ces résultats, il est important de calculer l'indice de continuité (I_c) qui donne un aperçu direct sur le degré de fissuration du béton. En effet, si le (I_c) augmente le degré de fissuration diminue [67]. (I_c) est donné par la relation suivante:

$$I_c = \frac{V_l}{V} \cdot 100 \quad (4.1) \quad [67]$$

où: - V_l = la vitesse longitudinale du son dans le béton en m/s

- V = la vitesse de référence égale à 4500 m/s pour le béton normal [67]

le tableau 4.15 (Annexe) donne l'indice de continuité pour les différents types de cure.

On constate d'après ces résultats que:

1°/ Pour la conservation dans l'eau douce, l'indice de continuité augmente en fonction de l'âge, entraînant une diminution du degré de fissuration. Le béton ayant le plus grand indice de continuité est le béton contenant 30% de laitier.

2°/ Pour la conservation dans l'étuve, une baisse dans l'indice de continuité (I_c) est enregistrée dès qu'on dépasse la durée de 28 jours. Cette chute signifie l'apparition des micro-fissures causées par l'évaporation brusque de l'eau.

3°/ la conservation à l'air libre, pour une durée supérieure à 90 jours, entraîne une chute de l'indice de continuité. Cependant un traitement durant 7 et 28 jours dans l'eau douce, entraîne une augmentation de I_c de 5% et 10% respectivement.

De la même manière que pour le module d'élasticité nous

remarquons que l'indice de continuité et la résistance à la compression varient de façon identique.

Une dernière constatation (concernant les fissures visibles à l'oeil nu ou à l'aide d'une loupe): Il n'y a eu aucune apparition de fissure durant toute la période de conservation et pour tous les régimes de cure. Ce résultat est important car il confirme l'absence des réactions alcalis granulats. Ces dernières réactions qui se produisent entre les alcalins en solution aqueuse du béton et la silice réactive d'origine granulaire; résultats en accord avec les références [23], [24], et [60].

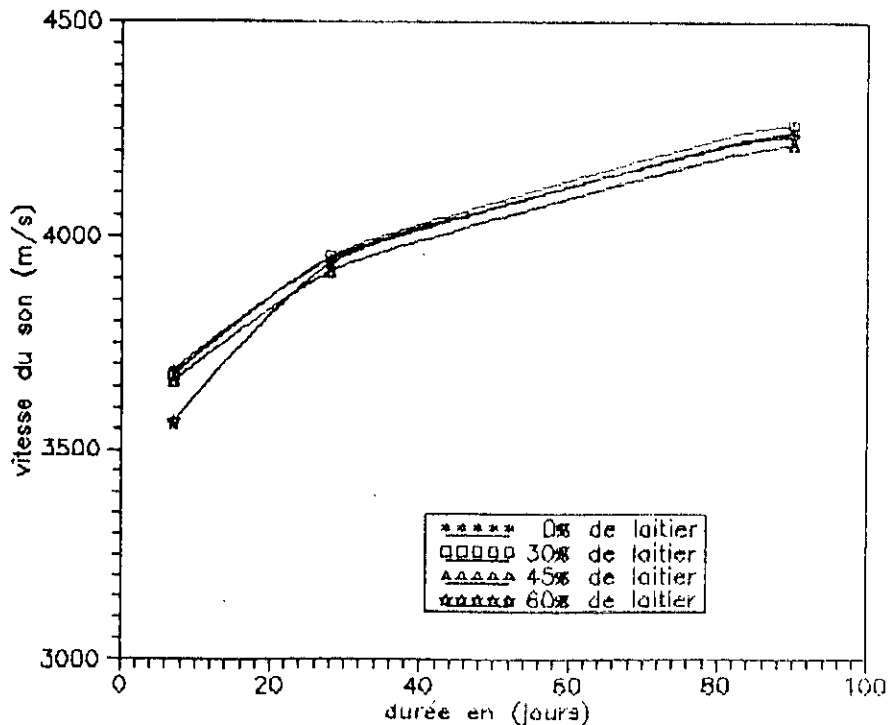


fig. 4.21: Vitesse longitudinale du son dans le béton (B2) en fonction de la durée de conservation dans l'eau douce

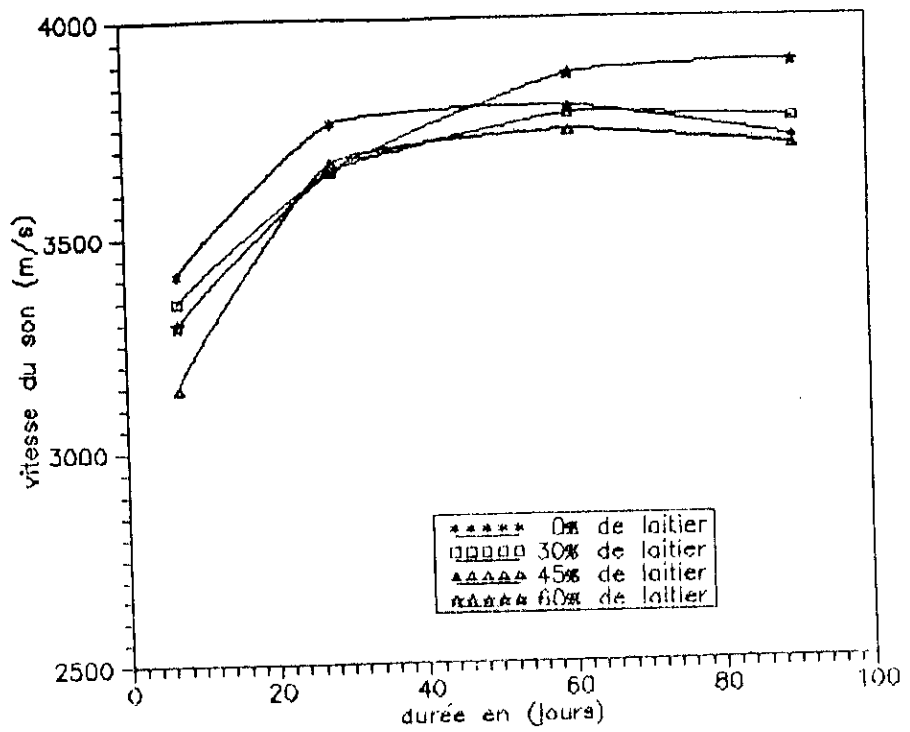


fig. 4.22: Vitesse longitudinale du son dans le béton (B2) en fonction de la durée de conservation à l'air libre

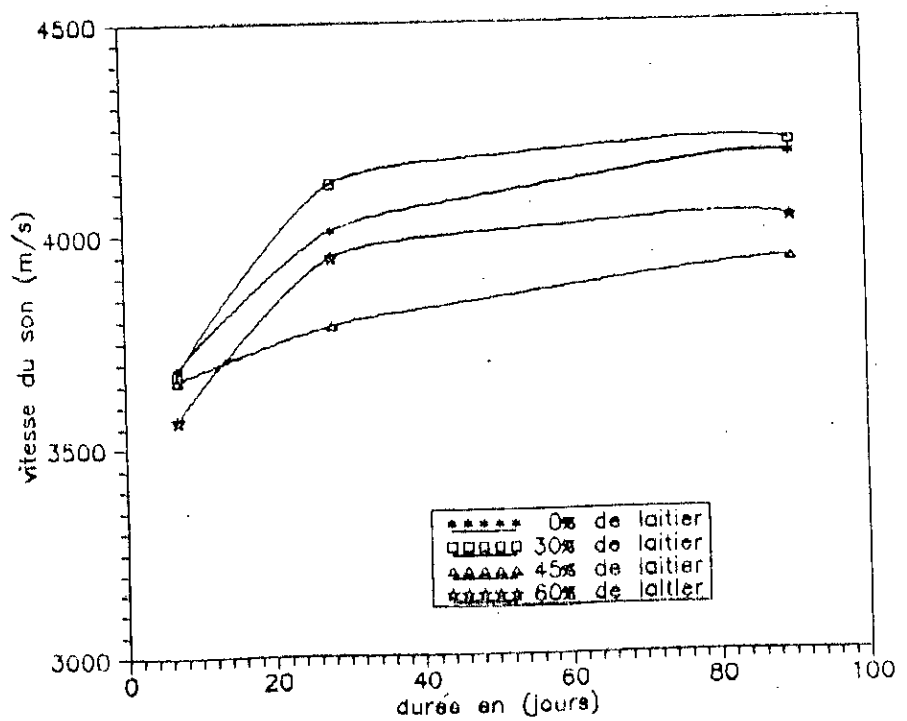


fig. 4.23: Vitesse longitudinale du son dans le béton (B2) conservé 7 jours dans l'eau douce puis à l'air libre

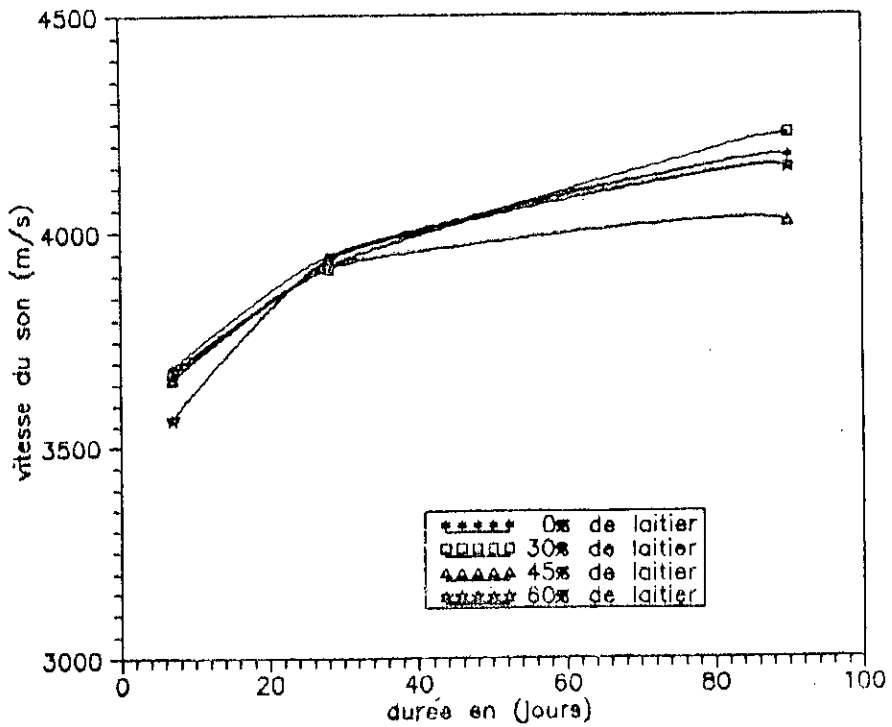


fig. 4.24: Vitesse longitudinale du son dans le béton (B2) conservé 28 jours dans l'eau douce puis à l'air libre

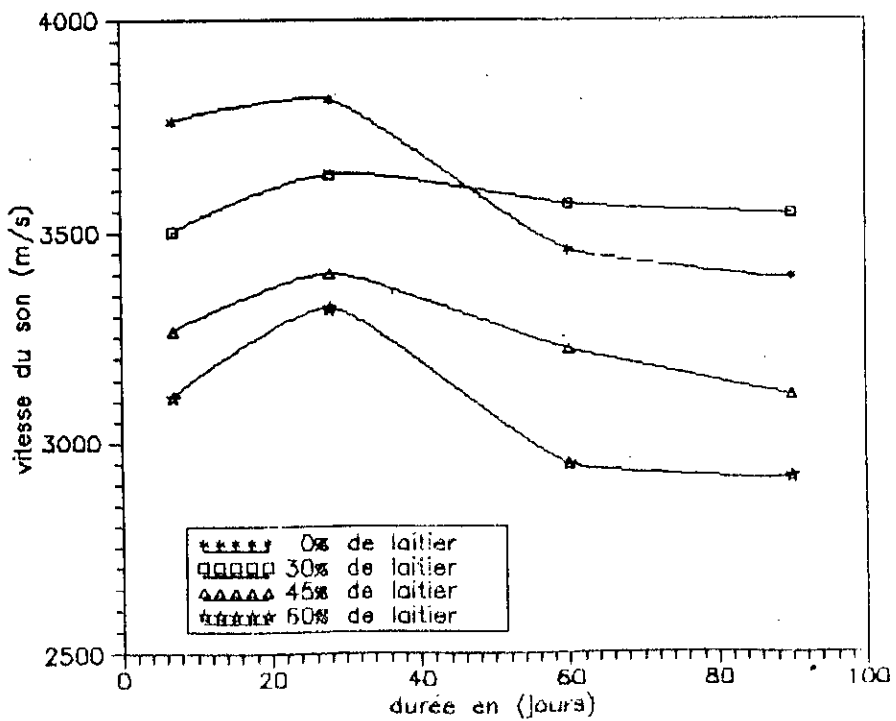


Fig. 4.25: Vitesse longitudinale du son dans le béton (B2) en fonction de la durée de convection dans l'étuve

4.5 DURABILITE DU BETON AU LAITIER

4.5.1 INTRODUCTION

Le béton est un matériau durable, néanmoins, ses constituants, qu'il s'agisse du ciment, du sable, ou des granulats peuvent subir des agressions à plus ou moins brève échéance.

Dans ce présent paragraphe nous allons étudier l'effet du liant(selon sa nature) sur la tenue du béton à l'eau de mer.

Cette étude se fera sur deux paramètres :

- premièrement examiner la perméabilité, étant donné qu'elle est la cause principale de détérioration du béton.

- deuxièmement, étude comparative entre la résistance du béton selon la conservation dans l'eau de mer ou dans l'eau douce.

4.5.2 PERMEABILITE ET POROSITE

La perméabilité dépend essentiellement de deux paramètres. La porosité et la capacité d'échange ions-cations entre le milieu de conservation et le béton .

a) POROSITE

Les essais sont réalisés conformément à la méthodologie décrite au paragraphe (3.6.4.1).

Cette méthode consiste à déterminer la porosité totale qui est égale à la somme de la porosité ouverte par des mesures d'absorption d'eau à la pression atmosphérique selon la formule (3.9):

Les résultats de mesure sont donnés au tableau 4.16 .

Tableau 4.16: Absorption d'eau du béton (B II)

% de laitier	Absorption capillaire d'eau (A.C) en (g/cm ²)			
	0%	15%	30%	45%
A.C	21.6	15.6	7.21	7.00

D'après les résultats obtenus, on constate une diminution de l'absorption d'eau en fonction de l'augmentation du pourcentage de laitier impliquant une baisse dans la porosité.

La porosité dépend de l'existence de deux types de pores de dimension différentes (larges pores et petits pores). Les larges pores sont obturés grâce à la formation de produits d'hydratation C-H-S lors de l'hydratation des deux types de liant CPA et CPA+L. Par contre les petits pores sont comblés par la formation des précipités de silicates et d'aluminates de calcium hydratés obtenus lors de l'hydratation des CPA+L uniquement, parce que les précipités des CPA ne sont ni fixes ni imperméables. Ainsi la porosité des bétons au laitier est inférieure à celle des bétons au CPA. Le mécanisme de formation des précipitations pour les CPA et les CPA + laitier est en effet illustré sur les figures 2.17 et 2.18 (Chapitre II).

b) PERMEABILITE

les essais de perméabilité ont été, comme convenu, effectués au laboratoire de Liverpool Polytechnic en Angleterre, mais malheureusement les résultats ne nous sont pas parvenus pour des raisons que nous ignorons.

4.5.3 Durabilité à l'eau de mer

Pour étudier l'influence du type de liant sur la durabilité du béton lorsqu'il est conservé dans l'eau de mer, il a été jugé utile de confectionner des éprouvettes de mortier. Cependant des éprouvettes en béton ont été confectionnées à Liverpool Polytechnic, malheureusement les résultats de ces essais n'ont pu être obtenus.

4.5.3.1 RESISTANCE A LA COMPRESSION ET A LA FLEXION

L'examen de l'évolution de la résistance à la compression et à la flexion est réalisé sur des éprouvettes de mortier (4X4X16) cm confectionnées conformément au programme d'essai rapporté au paragraphe (3.5.1.2.b.)

Les résultats sont donnés aux tableaux (4.17 et, 4.18) (Annexe) et sur les Figures 4.26 à 4.29 avec la convention suivante:

- (C.M): conservation à l'eau de mer
- (C.E): conservation à l'eau douce

Les résultats de ces essais montrent que le mortier ne contenant pas de laitier, présente la plus grande résistance à court terme (âge à 7 jours). Ceci permet d'affirmer que le clinker est le premier élément à s'hydrater dans l'eau de mer ou dans l'eau douce.

À long terme par contre (pour une durée supérieure à 3 mois) le mortier contenant 20% de laitier et conservé dans l'eau de mer ou l'eau douce est le plus résistant. Cet effet

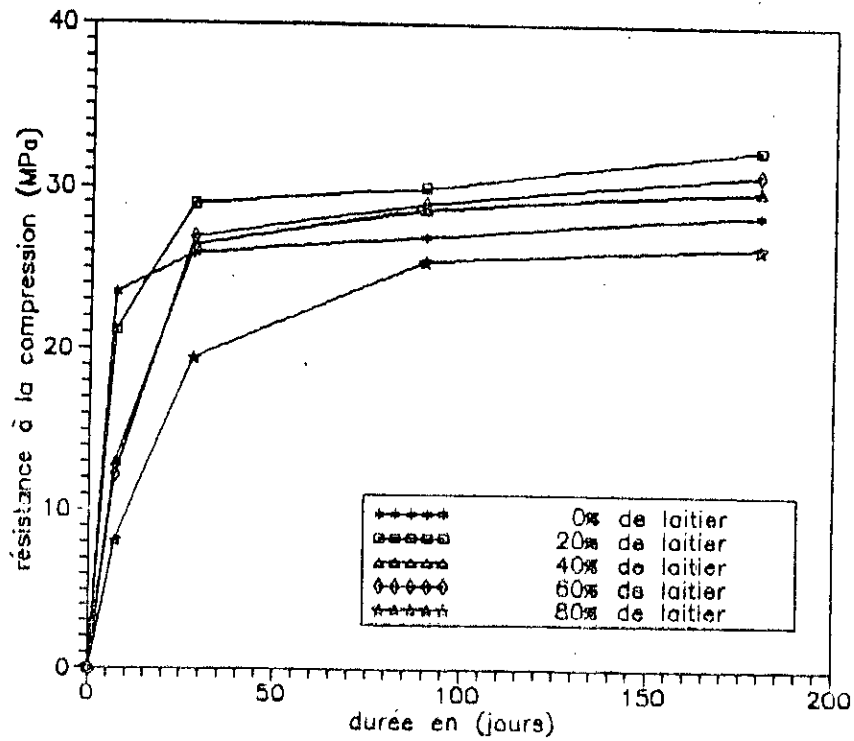


Fig. 4.26: Résistance à la compression du mortier en fonction de la durée de conservation dans l'eau douce (ciment+laitier)=540 kg/m³

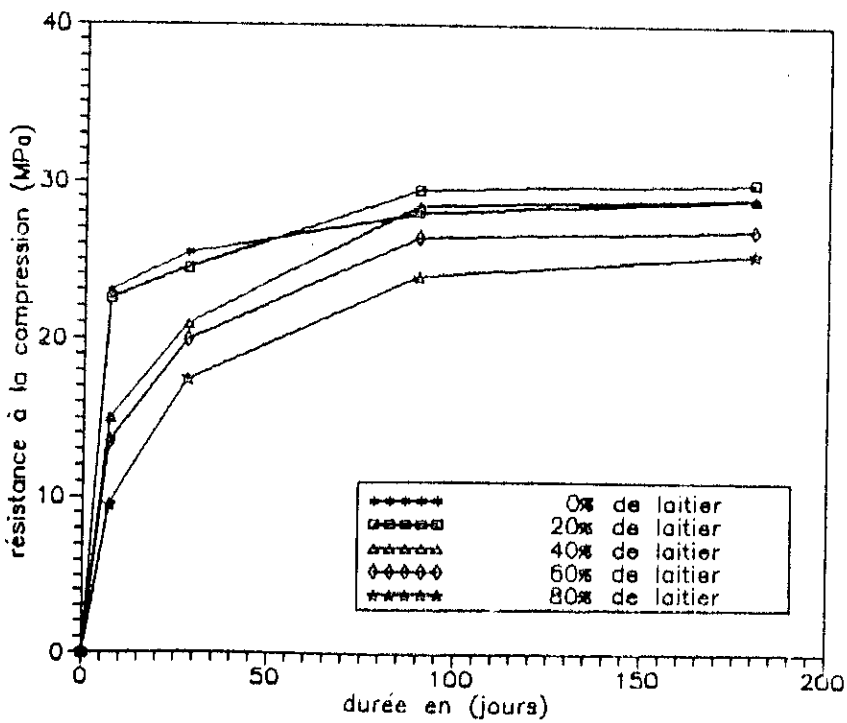


Fig. 4.27: Résistance à la compression du mortier en fonction de la durée de conservation dans l'eau de mer (ciment+laitier)=450 kg/m³

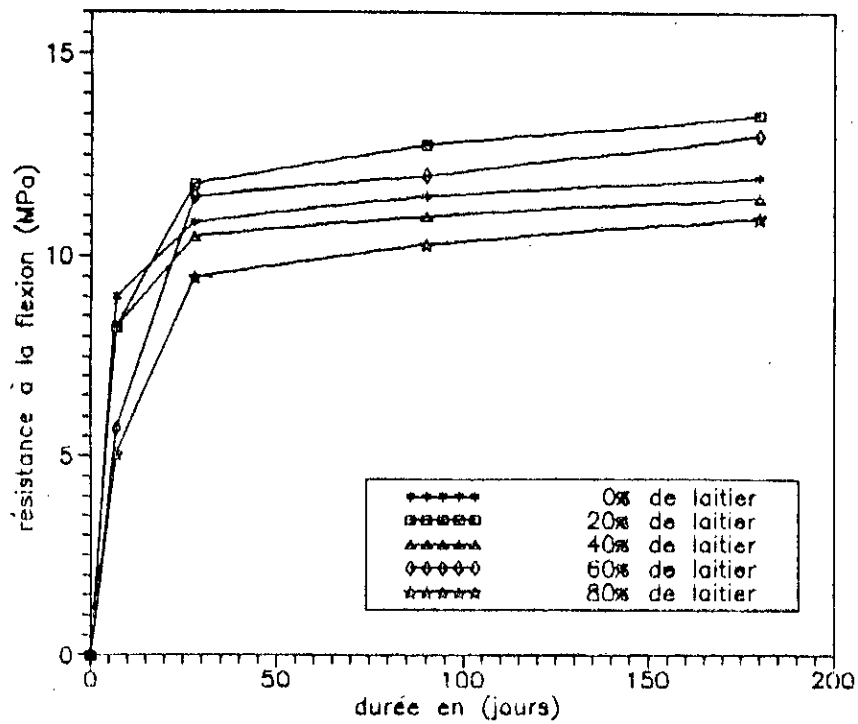


Fig. 4.28: Résistance à la flexion du mortier en fonction de la durée de conservation dans l'eau douce (ciment+laitier)=450 kg/m³

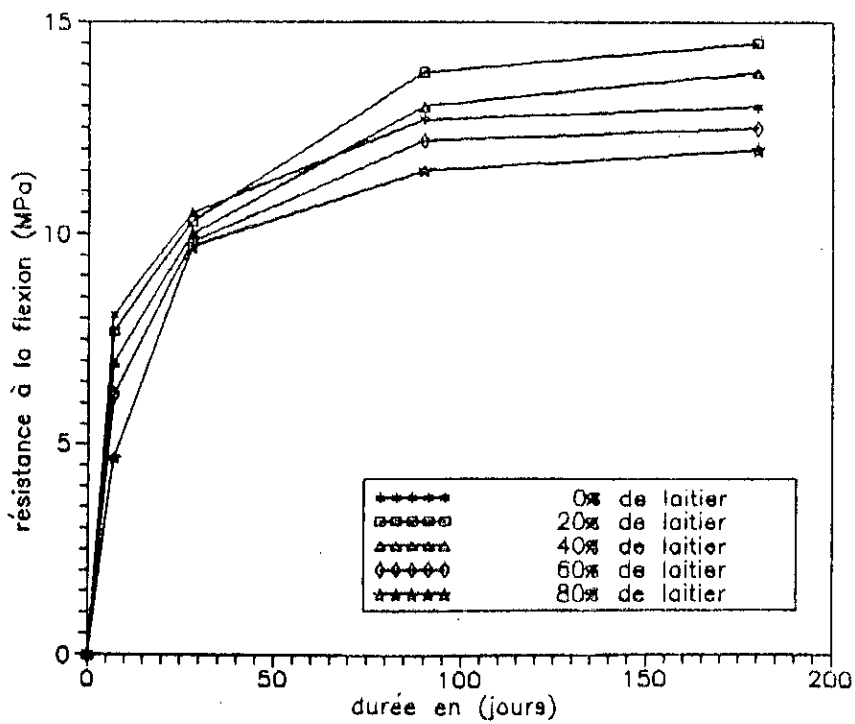


Fig. 4.29: Résistance à la flexion du mortier en fonction de la durée de conservation dans l'eau de mer (ciment+laitier)=450 kg/m³

est dû au faible pouvoir hydraulique du laitier d'El-hadjar.

Cependant, les mortiers subissant une cure normale initiale de 7 ou de 28 jours dans l'eau douce ont un gain de résistance important par rapport à ceux conservés directement dans l'eau de mer. On remarque ainsi que le mortier le plus résistant est celui renfermant 60% de laitier. Pour ce dernier, le gain de résistance par rapport au mortier conservé directement dans l'eau de mer à 180 jours est de:

- 96% pour le 28 C.E + C.M

- 74% pour le 7 C.E + C.M

Afin d'interpréter la variation de la résistance, nous allons examiner le mécanisme de l'action de l'eau de mer sur les CPA qui est résumé sur le Tableau 4.19.

Nous pouvons dire que, la cause principale de la chute de résistance à long terme dans l'eau de mer pour les CPA, est due à la transformation progressive des produits d'hydratation C.S.H en M.S.H qui n'a aucune propriété liante. Ce passage s'explique par la substitution de Mg^{2+} en Ca^{2+} et la formation de l'ettringite ($C_3A \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$) résultant de la réaction du gypse secondaire avec le C_3A . Contrairement à l'ettringite dans l'eau douce, l'ettringite dans l'eau de mer est efflorescente aux aiguilles plus longues et plus épaisses, entraînant une fissuration de la pâte et une chute de résistance.

De ce fait, la faible cinétique du gain de la résistance pour les mortiers au laitier conservés directement dans l'eau de mer peut s'interpréter comme suit:

- Comme pour les ciments au laitier, les premiers hydrates sont ceux du clinker (C-S-H plus un excès de la chaux), l'hydratation du laitier ne se manifeste qu'après libération d'une quantité suffisante de la chaux lors de l'hydratation du clinker. Une partie de la chaux va se dissoudre dans l'eau de mer, sous forme de $Mg(OH)_2$, réduisant ainsi l'activité du laitier et par conséquent une diminution de la cinétique d'hydratation est enregistrée.

-De plus, la conservation directe dans l'eau de mer provoque le gonflement du mortier à la suite de la formation de l'ettringite ce qui conduit à un éclatement dans la pâte et à une réduction dans l'évolution de la résistance.

Ces deux facteurs sont finalement les principaux responsables du ralentissement du gain de résistance des mortiers au laitier conservés directement dans l'eau de mer.

En ce qui concerne les mortiers au laitier subissant une cure initiale dans l'eau douce de 28 jours, le gain de résistance particulièrement pour le mortier contenant un pourcentage élevé de laitier (2 60%), s'explique comme suit:

- La dissolution de CaO et la diffusion des cations Mg^{2+} sont faibles entraînant ainsi une formation réduite de la chaîne M-S-II, il s'ensuit une faible teneur en gypse secondaire et une formation réduite d'ettringite ($\text{C}_3\text{A} \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$).

- Les aiguilles d'ettringite dans les ciments au laitier sont plus courtes et plus fines n'entraînant pas d'expansion en contact avec l'eau de mer.

- la diffusion des ions agressifs dans la pâte des ciments au laitier est très réduite du fait que, d'une part les ciments au laitier ont une porosité faible, d'autre part la capacité d'échange d'ions-cations est très réduite. En effet, au contact d'une solution aqueuse, le laitier ne cède pas son cation de calcium (Ca^{2+}) mais il absorbe les ions de la solution et forme progressivement à la surface une couche de gels siliceux et alumineux. Une fois cette couche imperméable est formée, aucun ion agressif ne peut pénétrer, le laitier ainsi protégé résiste convenablement à la dégradation.

Le mortier contenant 60% de laitier, et traité durant 28 jours dans l'eau douce reste le plus résistant, ce qui confirme les résultats rapportés dans la littérature [8], [11], [18], [20], et [64]. Les ciments à haute teneur en laitier supérieure ou égale à 60%, ont, en effet, une bonne

résistance à l'eau de mer.

Par conséquent, dans les ouvrages maritimes, on peut ajouter au ciment CPA jusqu'à 60% de laitier à condition de veiller à ce que les conditions initiales de conservation soient acceptables, à savoir qu'une bonne protection des surfaces avant exposition à l'eau de mer et une cure initiale dans l'eau douce durant 28 jours pour permettre au laitier de s'hydrater, vu que ce dernier a une hydratation latente.

Tableau. 4.19: Action de l'eau de mer sur le ciment CPA [64]

<p><u>1. Action des sulfates</u></p> <p>substitution $Mg^{2+} \longrightarrow Ca^{2+}$</p> <p>a) $MgSO_4 + Ca(OH)_2 \longrightarrow CaSO_4 + Mg(OH)_2$ soluble 1.2g/l solide précipité gypse secondaire</p> <p>b) $CaSO_4 + C_3A + 32H_2O \longrightarrow C_3A.3CaSO_4.32H_2O$ ettringite "GONFLEMENT"</p>	
<p><u>2. Action des chlorures</u></p> <p>substitution $Mg^{2+} \longrightarrow Ca^{2+}$</p> <p>a) $MgCl_2 + Ca(OH)_2 \longrightarrow CaCl_2 + Mg(OH)_2$ soluble précipité</p> <p>b) $CaCl_2 + C_3A + 10H_2O \longrightarrow C_3A.CaCl_2.10H_2O$ (sel de Friedel) ou Monochloroaluminate, instable donne en présence de sulfate $C_3A.3CaSO_4.32H_2O$ ettringite "GONFLEMENT"</p>	

4.6 CONCLUSION

Les indices d'hydraulicité indiquent que le laitier d'El-Hadjar est classé dans la catégorie des laitiers médiocres. Cependant, nous avons espéré que les résultats des résistances mécaniques contrediraient ce classement. Malheureusement, ces derniers ont plutôt confirmé la médiocrité de ce laitier.

Ainsi, une activation (chimique ou thermique) ou une amélioration dans les procédés de fabrication du laitier (ou la fonte) tels que le bon réglage pondéral du chargement du haut fourneau en minerai et coke et une bonne opération de vitrification lors de refroidissement du laitier, sont nécessaires pour remédier à cette situation et améliorer la qualité du laitier.

Cependant, à son état actuel, le laitier d'El-Hadjar peut être ajouté jusqu'à 30% dans les bétons destinés aux constructions de préfabrication, les châteaux d'eau, et les barrages et jusqu'à 60% pour les constructions maritimes et Sahariennes, tout en respectant les conditions initiales de conservation telles qu'une bonne protection de surface et une cure initiale dans l'eau douce ou dans un milieu saturé durant 28 jours.

CHAPITRE CINQUIEME: CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

5.1 CONCLUSIONS

Notre étude sur le laitier d'El-Hadjar nous a permis de tirer les conclusions suivantes:

1- Le laitier granulé nécessite un temps de broyage plus long du fait de sa dureté plus élevée que celle du clinker.

2- L'essai de Vicat a révélé l'inaptitude du laitier pur à faire prise, d'où la nécessité d'employer un bon activant. Notre choix s'est porté sur le CPA.

3- Selon la littérature relative à l'hydraulicité, le laitier d'El-Hadjar est considéré comme étant moyen du point de vue réactivité.

La faible hydraulicité du laitier d'El-Hadjar ne permet pas d'introduire un pourcentage élevé de laitier dans le béton, qui est de 70% en Angleterre, et 80% en France. Le pourcentage maximal du laitier d'El-Hadjar, entrant dans la composition du béton, est seulement de 30%. L'utilisation de catalyseur est alors nécessaire à l'amélioration de l'activité de ce laitier, et ce, afin d'augmenter son pourcentage d'incorporation. Le choix du rapport pondéral optimal entre le minerai et le coke lors du chargement du haut fourneau, constitue une solution supplémentaire.

4- Vu leur hydratation latente, les ciments au laitier conviennent parfaitement aux bétons de masse.

5- A court terme, (pour une durée inférieure à 7 jours) les bétons au laitier présentent une résistance mécanique inférieure à celle du béton ordinaire. Tandis qu' à long terme, (pour une durée supérieure à 28 jours) les bétons au laitier conservés dans les conditions suivantes:

- Cure normale dans l'eau douce ($T = 20 \pm 2^\circ\text{C}$).
- A l'aire libre ($T = 15 \pm 5^\circ\text{C}$), mais subissant une cure normale d'au moins 7 jours dans l'eau douce.
- A l'éluve (température cyclique entre 15°C et 45°C), et subissant une cure initiale d'au moins 28 jours dans l'eau douce;

développent une résistance supérieure à celle du béton ordinaire. Cependant, pour les deux premiers types de cure le béton renfermant 30% de laitier est le plus performant, alors que pour la dernière cure c'est le béton contenant 60% de laitier qui présente la résistance mécanique la plus élevée.

Ce qui nous amène à indiquer que le laitier d'El-Hadjar peut être ajouté à concurrence de 30% dans les ciments CPA destinés aux constructions préfabriquées, ou, aux constructions hydrauliques, à condition néanmoins que les bétons subissent une cure initiale dans l'eau douce, durant 28 jours.

6- Le béton renfermant 60% de laitier, et conservé pendant 28 jours dans l'eau douce, s'est avéré le plus résistant au traitement thermique cyclique (température variante entre 15°C et 45°C) dans une atmosphère dépourvue d'humidité. De ce fait, de point de vue résistance mécanique ce béton convient parfaitement au climat Saharien.

7- La variation du module d'élasticité des bétons au laitier est similaire à celle de la résistance mécanique en fonction de l'âge et du régime de cure. Le béton renfermant 30% de laitier présente le plus grand module d'élasticité

$$E=33.33.10^3 \text{ MPa}$$

8- Les essais ultrasoniques ont révélé que le béton contenant 30% de laitier traité par immersion dans l'eau douce (cure normale), présente une compacité et un indice de continuité très élevés que ceux du béton ordinaire, induisant ainsi un degré de fissuration moindre.

Par contre dans le cas d'une conservation à l'air libre ou dans l'étuve l'indice de continuité diminue avec l'âge, engendrant des micro-fissures.

9- Durant une période de conservation de six mois, les bétons au laitier (0%, 30%, 60%, et 80%) n'ont présenté aucune fissure apparente visible à la loupe. Ce qui implique l'absence des réactions alcalis-granulats entre le liant et les granulats (sable, gravier).

10- Le mortier contenant 60% de laitier, subissant une cure initiale de 28 jours dans l'eau douce résiste bien à l'eau de mer. Cette bonne durabilité est due d'une part à la faible perméabilité des mortiers au laitier par rapport au mortier ordinaire, et d'autre part, à la faible capacité d'échange ions-cations entre la solution saline et le liant. Les ciments au laitier ne cèdent pas leurs cations Ca^{2+} , mais ils arrachent les ions de la solution saline et forment une couche protectrice à la surface. Une fois cette couche formée, la pénétration des ions dans le mortier devient très faible. Par contre, les mortiers au laitier exposés directement à l'eau de mer présentent une résistance réduite, du fait qu'une partie de la chaux destinée à activer les grains de laitier se trouve dissoute dans l'eau de mer.

5.2 RECOMMANDATIONS

1- Le béton renfermant 30% de laitier, a présenté de meilleures caractéristiques pour l'ensemble des essais

effectués. En outre, afin d'arriver à un ciment convenable aux constructions courantes, il est recommandé d'incorporer 30% de laitier dans la fabrication de ce ciment.

2- Le mortier contenant 60% de laitier s'est avéré très résistant à l'eau de mer. Nous recommandons pour les constructions maritimes, l'ajout de 60% de laitier au CPA, et ne plus importer les CHE ou bien les CLK.

3- Pour la température cyclique, le béton avec CPA + 60% de laitier et traité initialement dans l'eau douce durant 28 jours est le plus performant du point de vue résistance mécanique. Cependant, pour une éventuelle production des ciments (CPA + 60% de laitier) qui conviendrait au climat Saharien il est recommandé d'étudier de très près la fissuration de ces bétons soumis à tel climat. Par ailleurs afin de palier à ce problème de fissuration il serait intéressant de produire des bétons au laitier incorporant des fibres végétales (fibres de palmier) ou des fibres métalliques (chute de fils d'attache). Cet axe de recherche est d'une grande importance pour la réalisation des bétons structurels durables résistant aux diverses modifications de climat.

En perspective, nous proposons les axes de recherche suivantes:

1- L'étude de l'effet de la dégradation des bétons au laitier sur la corrosion des armatures pour une durée supérieure à deux ans.

2- La possibilité d'améliorer la caractéristique de réactivité du laitier d'El-Hadjar, soit par l'ajout de certains catalyseurs, ou bien le choix de remplissage optimal du four en minerai et coke.

3- L'utilisation du laitier riche comme granulats dans le béton et le ballast.

4- La valorisation du laitier dans les constructions routières.

5- Le développement de la production du laitier bouleté, qui ne demande qu'une installation très simple (Fig. 2.2).

Nous concluons que les domaines d'utilisation du laitier d'El-Hadjar sont très vastes (en particulier en cimenterie), alors que sa valorisation en Algérie reste très faible.

L'utilisation de ce sous-produit industriel issu de la fabrication de la fonte, offre plusieurs avantages, entre autres, l'avantage écologique et économique.

- L'AVANTAGE ECOLOGIQUE:

L'incorporation de quantités importantes de laitier dans les ciments, permet l'élimination des montagnes artificielles (laitier mis en stock), entraînant une préservation des sites, et évitant ainsi la stérilisation des terres riches (agricoles).

- L'AVANTAGE ECONOMIQUE:

L'Algérie traverse actuellement une crise en matière des matériaux de construction, caractérisée par l'indisponibilité et le prix élevé des ciments.

L'une des solutions, consiste en l'augmentation de la production des ciments par l'incorporation des sous-produits et déchets industriels, tel que le laitier granulé d'El-Hadjar.

Par ailleurs, l'Algérie possède 11 cimenteries dont la production annuelle est de 6 millions de tonnes, alors que les besoins annuels s'élèvent à 10 millions de tonnes.

Ainsi, si chaque cimenterie introduisait, seulement 30% de laitier, la production annuelle augmenterait de 2 millions de tonnes, soit une économie équivalente à l'investissement d'une nouvelle cimenterie.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] DUSSART, J., "Le laitier de hauts fourneaux et laitier d'aciérie (L.D.)", Colloque international sur l'utilisation des sous-produits et déchets industriels dans le génie civil, Vol. II, pp. 289-295, Paris, 1978.
- [2] DUBOSC, A., "Avantage technique et économique de l'utilisation du laitier granulé en cimenterie", Colloque international sur l'utilisation des sous-produits et déchets industriels dans le génie civil", Vol. II, pp. 297-301, Paris, 1978.
- [3] BEHIM, M., "Utilisation du laitier granulé d'El-Hadjar pour la fabrication des ciments", Thèse de magistère, Université de Annaba, 1987.
- [4] DURIEZ, M. et ARRAMBIDE, J., Nouveau traité de matériaux de construction, Ed., Dunod, 1961.
- [5] HOGAN, F.J. and MEUSEL, J.W., "Evaluation for durability and strength development of ground granulated blast-furnace slag", Cement, Concrete, and Aggregates, Vol. 3, N°1, pp.40-52, summer, 1981.
- [6] ACI Committee 226, "Ground granulated Blast-furnace slag as a cementitious constituent in concrete", ACI, Materials journal, pp. 327-342, July-August, 1987.
- [7] OLOMBIER, G., "Utilisation des laitiers en techniques routières", Colloque international sur l'utilisation des sous-produits et déchets industriels dans le génie civil", Vol. II, pp. 279-295, Paris, 1978.
- [8] ROGOURD, M., "slags and slag cements", Concrete Technology and Design, Vol. 3, Cement Replacement Materials, pp. 73-99, 1986.

- [9] DRON, R., "Mécanisme de la prise du laitier granulé sous activation alcaline", Rapport de Recherche N°38, L.C.P.C., 1974.
- [10] ABADLIA, M. T., "Fabrication des blocs de laitier et étude de leurs propriétés d'exploitation", Journées Scientifique E.N.P El-Harrach, Mai 1989.
- [11] SMOLCZYK, H.G., "Structure et caractérisation des laitiers", 7^{ème} Congrès international de chimie des ciments, Vol. I, Paris, 1980.
- [12] JIANG, S.P. and GRANDET, J., "Evolution comparée des porosités des mortiers de ciment au laitier et des mortiers des ciments portland", Cement and Concrete Research, Vol. 19, pp. 487-496, 1989.
- [13] ROY, D.M. and IDORN, G.M., "Hydration, structure, and properties of blast-furnace slag cements, mortars and concrete" ACI journal, Proceedings Vol. 79, N°6, pp. 444-457, Nov.-Dec., 1982.
- [14] KONDO, R. and OHSAWA, S., "Studies on a method to determine the amount of granulated blast furnace slag and the rate of hydration of slag in cement", Proceedings of the 5th international symposium of the chemistry of cement, Vol. IV, pp. 255-262, Tokyo, 1968.
- [15] KONDO, R. and UEDA S., "Kinetics and mechanisms of the hydration of cement", Proceedings of the 5th international symposium of the chemistry of cement, Vol. 11-4, pp. 203-255, Tokyo, 1968.

- [16] COPELAND, L.E. and HAYES, J.C., "Determination of non evaporable water in hardened portland paste", ASTM BULL., N°194, pp. 70-74, 1953.
- [17] DIAMON, M., "Mécanisme et cinétique de l'hydratation du ciment au laitier", 7^{ème} Congrès International de chimie des ciments, Paris, 1980.
- [18] REGOURD, M., HORNAIN, H. et MORTUREUX, B., "Résistance à l'eau de mer des ciments au laitier", Silicates Industriels, pp. 19-29, 1979.
- [19] BOGUE, R.H., La chimie du ciment portland, Ed., Eyrolles, 1952.
- [20] LUKE, K. and GLASSER, F.P., "Internal chemical evolution of the constitution of blended cement", Cement and Concrete Research, Vol. 18, pp. 495-502, 1988.
- [21] Gutt, W.H., "Blast-furnace slag as coarse aggregate for concrete stored in sulphate solutions for 22 years", Magazine of Concrete Research, Vol. 41, N°146, pp. 33-39, Mar., 1989.
- [22] PELTIER, R., "Résultats des essais de longue durée de résistance des ciments à la mer au laboratoire maritime de la Rochelle", Revue des Matériaux, N°680, pp. 31-44, Mai., 1973.
- [23] BARONIO, G., BERRA, M., MONTANARO, L., DELMASTRO, A., et BACHIORRINI, A., "Couplage d'action de certains paramètres physiques sur le développement de la réaction alcalis-granulats", Durability of construction materials, Proceeding of the first international congress held by RILEM, Vol. 3, pp. 919-926, France, 1987.

[24] ROGOURD, M., "Structure et comportement des hydrates des ciments au laitier", 7^{ème} Congrès International de chimie des ciments, pp. III-2/9 à III-2/26, Paris, 1980.

[25] HARRISON, T.A. and SPOONER, D.C., "The properties and use of concretes made with composite cements", Cement and Concrete Association, Interim Technical note 10.

[26] MEUSEL, J.W. and ROSE, J.H., "Production of granulated blast furnace slag at sparrows point, and the workability and strength potential of concrete incorporating the slag", Fly ash, Silica fume Slag and Other mineral By-products in Concrete, SP-79, ACI, Detroit, pp. 867-890, 1983.

[27] BOUIKNI, A., "Influence of slag on the properties of concrete", Thesis of Master of Science, University of Sheffield, 1987.

[28] BERRY, E.E., "Strength development of some blended-cement mortars", Cement and Concrete Research Vol. 10, pp. 1-11, 1980.

[29] BACHE, H.H. and IDORN, G.M., NEPPER-CHRISTENSEN, P. and NIELSEN, J., "Morphology of calcium hydroxide in cement paste", Special Report N°90, Highway Research Board, Washington, pp. 154-174, 1966.

[30] WAINWRIGHT, P.J., "Properties of fresh and hardened concrete incorporating slag cements", Concrete Technology and Design, Vol. 3, Cement Replacement Materials, pp. 100-133, 1986.

[31] XUEQUAN, WU and ROY, D.M., "Slag cement utilization: Rheological properties and related characterization", Cement and Concrete Research, Vol. 14, pp. 521-528, 1984.

[32] HAQUE, M.N. and CHULILUNG, T., "Strength development of slag ternary blend concrete", Cement and Concrete Research, Vol. 20, pp. 120-130, 1990.

[33] NEVILLE, A.M. and BROOKS, J.J., "Time dependent behaviour of cemsave concrete" Concrete March 9, (3), pp. 36-39, 1975.

[34] BAMFORTH, P.B., "An investigation into the influence of partial portland cement replacement using either fly ash or granulated blastfurnace slag on the early age and long-term behaviour of concrete", International report N°145/78/2067, Taylor woodrow southall, England, 1978.

[35] BAMFORTH, P.B., "In situ measurement of the effect of partial cement replacement using either fly ash or ground granulated blastfurnace slag on the performance of mass concrete", Proc. Inst. Civil. Engrs., Part 2, Vol. 69, pp. 777-800, Sept., 1980.

[36] PICKETT, G., "The effect of change in moisture content of the creep of concrete under a sustained load", ACI Journal, Vol. 13, N°4, pp. 333-355, 1942.

[37] BAZANT, Z.P. and CHERN, J.C., "concrete creep at variable humidity constitutive law and mechanism", Materiau et Constuction (RILEM Paris), Vol. 18, N°103, 1985.

[38] CHERN, J.C. and CHAN, Y.W., "Deformation of concretes made with blast-furnace slag cement and ordinary portland cement", ACI Materials Journal, pp. 372-382, July-August, 1989.

[39] MOUKWA, M., "Penetration of chloride ions from sea water into mortars under different exposure condition", Cement and Concrete Research, Vol. 19, pp. 894-904, 1989.

- [40] MASO, J.C., Durability of construction materials, Proceeding of the first international congress held by RILEM, Vol. 3, France, 1987.
- [41] CAMPUS, F., "Essai de résistance des mortiers et bétons à la mer (1934-1964)", Silicates Industriels, 28, pp. 79-88, 1963.
- [42] GJORV, O.E. and VENNESLAND, O., "Diffusion of chlorides ions from seawater into concrete", Cement and Concrete Research, Vol. 9, pp. 229-238, 1979.
- [43] MASUDA, Y., "Penetration mechanism of chloride ion into concrete", Durability of construction materials, Proceeding of the first international congress held by RILEM, Vol. 3, France, 1987.
- [44] JAVOR, T., "Experimental studies of long-term action of various media in concrete structure", Durability of construction materials, Proceeding of the first international congress held by RILEM, Vol. 3, pp. 1049-1056, France, 1987.
- [45] PAGE, C.L., SHORT N.R. and HOLDEN W.R., "The influence of different cement on chloride-induced corrosion of reinforcing steel", Cement and Concrete Research, Vol.16, pp. 79-86, 1986.
- [46] MIDGLEY, H.G. and ILLSTON, J.M., "The penetration of chlorides into hardened cement pastes", Cement and Concrete Research, Vol. 14, pp. 546-558, 1984.
- [47] SEKI, H., "Deterioration of concrete of coastal structures in Japon", Durability of concrete, publication SP-47-13, ACI, Detroit, 1975.

[48] EURIN, P., "Action of time and environment durability of construction materials", Materials and Structures Vol. 21, pp. 131-136, 1988.

[49] BRIAN, B.H. and ALAN, K.C., "Chloride corrosion threshold in concrete", ACI materials journal technical, paper title N° 84-M32, July-August, 1987.

[50] RELEM Draft Recommendation, "Measurement of hardened concrete carbonatation depth", Materieau et Construction, Vol. 17, N°102, pp. 435-440, Nov.-Dec., 1984.

[51] HOBBS, D.W., "Carbonatation of concrete containing Pfa", Magazine of Concrete Research, VOL. 40, N°143, June 1988.

[52] STEOPOE, A.L., La durabilité du béton Ed., Eyrolis, Paris, 1970.

[53] DAVIES, H., "Long-term performance of mild steel bars embedded in concrete containing dense blast-furnace slag aggregate", Magazine of Concrete Research, Vol. 41, N°146, pp. 41-44, 1989.

[54] GOUDA, V.K. SHATER, M.A. and MIKHAIL, R.Sh., "Hardened portand blast-furnace slag pastes, II: The corrosion behavior of steel reinforcement", Cement and Concrete Research, Vol. 5, pp. 1-13, Mar., 1975.

[55] GOUDA V.K., MIKHAIL R.Sh. and SHATER M.A., "Hardened portand blast-furnace slag pastes, III: Corrosion of steel reinforcement versus pore structure of the paste matrix", Cement and Concrete Research, Vol. 15, pp. 99-102, 1975.

[56] BUENFELD, N.R., and NEWMAN, J.B., "The resistivity of mortars immersed in sea-water", Cement and Concrete Research, Vol. 16, pp. 511-524, 1986.

[57] RAHARINAIVO, A., BREVET, P., PANNIER, G. et GRIMALDI, G., "Influence de la dégradation du béton sur l'enrouillement des armatures", Bulletin liaison Laboratoire des Ponts et Chaussées, 145, Sep.-Oct., 1986.

[58] HONG, C.Z. and PARROTT, L.J., "Air permeability of cover concrete and the effect of curing", B.C.A, Oct., 1989.

[59] LI, S. and ROY, D.M., "Investigation of relation between porosity, pore structure and Cl^- diffusion of fly ash and blended cement", Cement and Concrete Research, Vol. 16, pp. 749-759, 1986.

[60] BAKKER, R.F.M., "About the cause of the resistance of blast-furnace cement concrete to alkali-silicate reaction", Proceedings 5th international conference on alkali-aggregate reaction in concrete, (Cape Town), National Building Research Institute, C.S.I.R, 5252/29, pp. 1-7, Pretoria, 1981.

[61] BAKKER, R.F.M., "Permiability of blended cement concrete", Fly ash, Silicat, Slag and Other mineral By-products in Concrete, SP-79, ACI, detroit, pp. 589-605, 1983.

[62] FRIAA, A., MENSI, R. et ACKER, P., "Etude du transfert simultané de la teneur en eau et la chaleur dans le béton " Durability of construction materials, Proceedings of the first international congress held by RILEM, Vol. 3, pp. 1266-1273, France, 1987

- [63] KELHAM, S. "A water absorption test for concrete", Magazine of Concrete Research, Vol. 40, N°143, June, 1988.
- [64] REGOURD, M., "La résistance du béton aux altérations physiques et chimiques", Béton hydraulique, presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 1982.
- [65] TEYCHENNE, D.C., FRANKLIN, R.E. and ERNTROY, H.C., "Design of normal concrete mixes", Building Research Establishment Report, Published by Departement of the Environment, 1988.
- [66] BRITISH STANDARD INSTITUTION (B.S.I), BS 4550: Part 3, "Methodes of Testing cement", 1978.
- [67] GORISSE F., Essai et contrôle des bétons, Ed., Eyrolles, 1978.
- [68] GEORGES, D., Nouveau guide du béton, Ed., Eyrolles, 1985.
- [69] Collectifs (Réunion d'Ingénieurs), Matériaux de Construction, Ed., Eyrolles, 1979.
- [70] ADAM, M., Guide pratique pour l'emploi des ciments, Paris, la Sté., de diffusion des techniques du Bat., 1985.

ANNEXE

ANNEXE

Tableau 4.3: Résistance à la compression en (MPa); (C.E)

pourcentage du laitier	Béton (I)				béton (II)			
	Durée en jours				Durée en jours			
	3j	7j	28j	90j	3j	7j	28j	90j
0%	14.5	18.5	24.0	27.0	15.0	24.5	29.0	31.5
15%	10.0	19.5	26.0	31.0	08.0	25.5	34.0	37.0
30%	08.0	17.5	27.0	33.0	06.5	18.0	32.0	39.0
45%	06.5	12.0	20.5	29.0	06.5	16.0	24.0	33.0

Tableau 4.4: Pourcentage de la variation de la résistance à la compression du béton au laitier par rapport au béton ordinaire

Pourcentage de laitier	Béton (I)				Béton (II)			
	Durée en jours				Durée en jours			
	3j	7j	28j	90j	3j	7j	28j	90j
15%	-31	+2.7	+8.3	+14.8	-4.6	+4.1	+17.3	+17.5
30%	-44.8	-5.4	+12.5	+22.2	-56.6	-26.5	+10.3	+23.8
45%	-55.1	-35.1	-14.6	+7.40	-56.6	-34.6	-17.2	+4.70

Tableau 4.5: Effet du régime de cure sur la résistance à la compression en (MPa); (C.L)

Résistance à la compression en (MPa)						
durée (jour)	7	28		90		
conservation % de laitier	C.L	C.L	7 C.E + C.L	C.L	7 C.E + C.L	28 C.E + C.L
0%	20.5	26.5	30.5	24.5	39.6	40.0
30%	20.5	24.5	39.0	22.0	43.0	43.5
45%	10.2	20.4	21.0	28.5	30.6	32.6
60%	10.2	18.5	23.5	24.5	32.5	36.7

Tableau 4.6: Effet du régime de cure sur la résistance à la compression en (MPa); (C.U)

Résistance à la compression en (MPa)				
durée (jour)	7	28	90	
conservation % de laitier	C.U	C.U	C.U	28 C.E + C.U
0%	24.0	25.5	21.5	31.0
30%	24.0	28.0	26.0	34.7
45%	12.2	16.3	16.5	32.6
60%	12.2	14.2	20.5	41.0

Tableau 4.7: Résistance à la flexion en (MPa); (C.E)

Résistance à la flexion en (MPa)								
	Béton (I)				béton (II)			
pourcentage de laitier	durée en jours				durée en jours			
	3j	7j	28j	90j	3j	7j	28j	90j
0%	3.5	3.8	4.0	4.5	3.0	4.0	4.7	6.0
15%	2.0	4.5	5.0	6.0	2.6	4.8	5.6	6.5
30%	1.8	3.0	5.5	6.2	1.6	2.3	5.1	6.7
45%	1.0	2.6	3.3	5.0	1.3	2.18	5.0	6.0

Tableau 4.8: Effet de cure sur la résistance à la flexion (MPa); (C.L)

Résistance à la flexion en (MPa)						
durée (jours)	7	28		90		
cure % de laitier	C.L	C.L	7 C.E + C.L	C.L	7 C.E + C.L	28 C.E + C.L
0%	3.8	4.3	4.2	4.7	5.6	6.2
30%	3.6	3.9	4.5	4.5	7.0	7.1
45%	2.0	3.3	3.3	4.5	5.3	5.3
60%	2.0	3.1	3.3	3.8	4.5	4.7

Tableau 4.9: Effet de cure sur la résistance à la flexion en (MPa); (C.U)

Résistance à la flexion en (MPa)				
durée (jours)	7	28	90	
cure % de laitier	C.U	C.U	C.U	28 C.E + C.U
0%	3.4	3.7	3.4	5.0
30%	3.3	4.4	4.2	5.5
45%	1.8	2.9	3.0	4.5
60%	1.8	2.3	2.5	4.0

Tableau 4.11: Modules d'élasticité dynamique et statique du béton au laitier (conservation dans l'eau douce)

durée % de laitier	Module d'élasticité dynamique en (10^3 MPa)			E_{st} (10^3 MPa)
	7j	28j	90j	90j
0%	27.17	31.12	35.98	32.71
30%	27.0	31.20	36.32	33.33
45%	26.0	30.67	35.51	30.0
60%	25.43	31.0	35.83	30.0

Tableau 4.12: Effet de cure sur le module d'élasticité dynamique

Module d'élasticité dynamique en (10^3 MPa)						
durée (j)	7	28		90		
cure % de laitier	C.L	C.L	7 C.E + C.L	C.L	7 C.E + C.L	28 C.E + C.L
0%	23.23	28.24	33.44	27.61	34.94	34.88
30%	22.39	27.64	33.91	28.27	35.41	35.73
45%	19.75	26.91	28.65	27.35	30.97	32.44
60%	21.71	27.00	31.12	30.26	32.52	34.44

Tableau 4.13: Module d'élasticité dynamique du béton conservé en étuve

Module d'élasticité dynamique en (10^3 MPa)			
durée % de laitier	7 jours	28 jours	90 jours
0%	28.27	29.03	23.88
30%	24.50	26.44	25.44
45%	21.31	23.12	21.71
60%	19.34	22.01	17.36

Tableau 4.14: effet du régime de cure sur la vitesse longitudinale du son (v_l)

vitesse longitudinale du son en m/s						
durée (j)	cure	C.E	C.L	C.U	7 C.E + C.L	28 C.E + C.L
	% de laitier					
7j	0%	3686	3408	3760	---	---
	30%	3674	3346	3500	---	---
	45%	3660	3143	3264	---	---
	60%	3566	3295	3110	---	---
28j	0%	3945	3758	3810	4008	---
	30%	3950	3717	3636	4118	---
	45%	3916	3650	3400	3785	---
	60%	3935	3668	3318	3945	---
90j	0%	4242	3716	3390	4180	4176
	30%	4262	3760	3544	4208	4226
	45%	4214	3698	3110	3935	4028
	60%	4233	3890	2916	4032	4150

Tableau 4.15: Indice de continuité (Ic)

Indice de continuité						
durée (j)	cure % de laitier	C.E	C.L	C.U	7 C.E + C.L	28 C.E + C.L
		7j	0%	0.819	0.757	0.835
30%	0.816		0.743	0.777	---	---
45%	0.813		0.698	0.725	---	---
60%	0.792		0.732	0.691	---	---
28j	0%	0.876	0.835	0.846	0.906	---
	30%	0.877	0.826	0.808	0.915	---
	45%	0.870	0.815	0.755	0.841	---
	60%	0.874	0.811	0.737	0.876	
90j	0%	0.942	0.825	0.753	0.928	0.928
	30%	0.947	0.835	0.787	0.935	0.939
	45%	0.936	0.821	0.691	0.876	0.895
	60%	0.940	0.864	0.648	0.896	0.922

Tableau 4.17: Effet du régime de cure sur la résistance à la compression et à la flexion du mortier conservé dans l'eau de mer

Résistance à la compression et à la flexion en (MPa).							
	âge	7j	28j	90j	180j		
R_c	cure	C.M	C.M	C.M	C.M	7 C.E + C.M	28 C.E + C.M
	% de laitier						
	0%	23.0	25.5	28.0	29.0	43.0	43.0
	20%	22.5	24.5	29.5	30.0	43.0	43.0
	40%	15.0	21.0	28.5	29.0	45.0	45.0
	60%	13.5	20.0	26.5	27.0	47.0	53.0
	80%	9.5	17.5	24.0	25.5	---	47.0
R_f	0%	8.0	10.5	12.7	13.0	14.6	15.0
	20%	7.68	10.3	13.8	14.5	14.5	15.0
	40%	6.94	10.0	13.0	13.8	14.0	14.0
	60%	6.18	9.8	12.2	12.5	14.5	16.0
	80%	4.68	9.7	11.5	12.0	---	15.0

Tableau 4.18: Résistance à la compression et à la flexion du mortier conservé dans l'eau douce en fonction du pourcentage du laitier

Résistance a la compression et à la flexion en MPa					
	Age	7j	28j	90j	180j
	% de laitier				
R_c	0%	23.50	26.0	27.0	28.5
	20%	21.2	29.0	30.0	32.5
	40%	13.0	26.5	28.7	30.0
	60%	12.18	27.0	29.0	31.0
	80%	8.12	19.5	25.5	26.5
R_f	0%	9.0	10.87	11.5	12.0
	20%	8.25	11.81	12.75	13.5
	40%	8.25	10.5	11.0	11.5
	60%	5.7	11.5	12.0	13.0
	80%	5.06	9.5	10.3	11.0