
Etude des propriétés du béton étuvé contenant du laitier en milieu marin

R. Derabla¹, A. Ayat¹, S. Seboui¹, M. L. Benmalek²

¹ Département de Génie Civil, Université de 20 Aout 1955 Skikda, Algérie.
derabla_riad@yahoo.fr

² Département de Génie Civil, Université de 8 Mai 1945 Guelma, Algérie.

RÉSUMÉ. Cet article présente une étude de l'utilisation du laitier granulé en substitution au ciment (jusqu'à 40% en masse) pour l'élaboration d'un béton de ciment au laitier. Les propriétés physico-mécaniques (capacité d'absorption d'eau, porosité et résistance à la compression) des éprouvettes préparées à partir des différents ciments élaborés ont été étudiées sous deux conditions de cure (normale et étuvage) et deux milieux de conservations (eau douce et eau de mer).

Il a été montré qu'en utilisant du laitier en substitution au ciment, il est possible de confectionner un béton traité thermiquement résistant aux sulfates et chlorures existant dans le milieu marin, soit:

- En combinant 20 % de laitier avec un adjuvant plastifiant réducteur d'eau et un E/C limité à 0,35.
- En utilisant 40 % de laitier, sans adjuvant, et un E/C un peu plus élevé, égal à 0,5.

ABSTRACT. This study deals with the use of ground granulated slag in substitution to cement (up to 40% of by weight) to produce slag-cement concrete. The physico-mechanical properties (water absorption capacity, porosity and compressive strength) of specimens prepared with elaborated cements were investigated under two curing conditions (standard and steam curing) and two storage environment (freshwater and seawater).

It has been proved that it is possible, using slag in substitution to cement, to produce a heat-treated-concrete resistant to chlorides and sulphates existing in the marine environment by either:

- Combining 20% of slag, with the use of water reducing plasticizer admixture and W/C rate limited to 0.35.
- Using 40 % of slag, without admixture and a W/C slightly higher, equal to 0.5.

MOTS-CLÉS : Laitier, traitement thermique, béton, eau de mer, résistance.

KEY WORDS: Slag, heat treatment, concrete, seawater, strength.

Introduction

Les besoins du monde moderne exigent de produire plus, plus vite, durable et moins cher ; et comme le béton est le matériau de construction le plus utilisé de nos jours, mais demandant un temps assez long pour acquérir ses capacités optimales, nous avons cherché à accélérer sa prise et son durcissement pour qu'il devienne compatible avec les exigences de la production industrielle. Cet objectif peut être obtenu par le traitement thermique qui occupe une place importante parmi différentes méthodes possibles.

Afin de minimiser le coût final du ciment, matière première primordiale du béton, tout en réduisant la consommation d'énergie de production [TRE 01], diminuant de façon conséquente les impacts sur l'environnement et permettant l'utilisation rationnelle et économique des matériaux locaux, on s'oriente généralement vers l'emploi d'additions minérales, comme le laitier de haut fourneau. Mais son refroidissement rapide, qui le rend granulé, lui confère des propriétés hydrauliques latentes, ce qui nécessite l'utilisation d'un agent d'activation pour assurer son hydratation. Ceci entraîne lors de son incorporation dans le ciment une baisse des performances mécaniques surtout au jeune âge. Pour améliorer ces performances, deux voies sont habituellement suivies: le traitement thermique (étuvage) [CHA 04] et l'emploi d'adjuvants chimiques tels que les accélérateurs de prise et de durcissement [GIF 97] et [VAN 06].

Il reste l'aspect durabilité, qui a une grande importance, notamment pour les ouvrages situés dans un milieu agressif contenant des sulfates et des chlorures tel que le milieu marin. Dans ce cas, il faut mettre en place un béton convenablement formulé et muri pour qu'il soit le plus imperméable et le plus compact possible afin d'acquérir une très bonne résistance à l'eau de mer et par suite assurer une vie plus longue pour les ouvrages en question.

La démarche adoptée dans ce travail consiste à substituer une partie du ciment par du laitier à des taux de: 0% pour CPA, 20% pour CPJ, et 40% pour CHF. Il s'agira ensuite de formuler des bétons qui seront étudiés sous différentes conditions de traitement (normalisé à 20 °C et thermique suivant le cycle de la figure 1) et de cure (eau douce et eau de mer) afin de connaître l'effet du traitement thermique et de la teneur en laitier sur les caractéristiques physico-mécaniques. Celles-ci sont la porosité (P), la Capacité d'absorption d'eau (CAE) et la résistance à la compression à l'âge de 2, 7, et 28 jours des bétons élaborés dans le milieu marin.

Matériaux utilisés

1.1. Granulats

On a utilisé un sable concassé 0/4 et des graviers de fractions 4/8, 8/16, 16/25 provenant de la carrière de COJAAL situé à Didouche Mourad (Wilaya de

Constantine). Les résultats de l'analyse granulométrique des granulats sont présentés sur la figure 2.

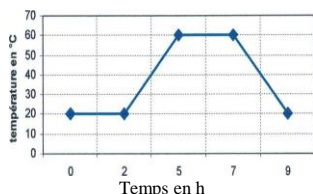


Figure 1. Cycle du traitement thermique

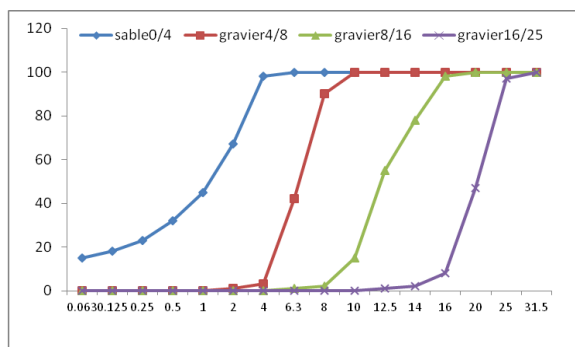


Figure 2. Courbes granulométriques

Les résultats des essais de caractérisation, effectués au laboratoire de COJAAL, sont présentés dans les tableaux 1 et 2 qui suivent.

Tableau 1. Spécification du sable selon XP P 18-545

	Equivalent de sable %	Bleu de Méthylène	Module de Finesse	Densité absolue	Coefficient d'absorption
Sable 0/4	49	1.00	2.98	2.84	1.16

Tableau 2. Spécification des graviers selon XP P 18-545

	Los Angeles %	Micro Deval %	Coefficient d'aplatissement %	Densité absolue	Coefficient d'absorption
G 4/8	26	13	7	2.71	2.00
G 8/16			5	2.73	1.98
G 6/25			6	2.73	1.95

1.2. Adjuvant

On a utilisé comme adjuvant le SIKA VISCOCRETE 3045 qui est un plastifiant réducteur d'eau non chloré (teneur en ions Cl- ≤ 0,1 %) et prêt à l'emploi, à base de polycarboxylates modifiés, conforme à la norme NF EN 934-2.

1.3. Ciment

Trois types de ciments ont été employés : Un ciment portland artificiel (CPA CEM I 42,5) de la cimenterie de M'Sila résistant aux sulfates (C₃A: 2,8 à 3,2 %), un ciment portland composé (CPJ 42.5) contenant 20% de laitier de la cimenterie de Hdjar Soud, et un ciment de haut fourneaux CHF contenant 40 % de laitier, qui a été préparé par ajout de 20 % de laitier granulé broyé au deuxième type de ciment, le CPJ 42.5.

La composition chimique et minéralogique des trois ciments utilisés sont présentées dans les tableaux 3 et 4 respectivement:

Tableau 3. Composition chimique du CPA, du CPJ et du laitier

	CPA	CPJ	Laitier
SiO ₂	21.94±0.14	22 - 28	34.41
Al ₂ O ₃	3.78±0.05	5 - 6	8.17
Fe ₂ O ₃	4.82±0.01	3 - 3.6	4.15
CaO	63.11±0.21	55 - 65	40.69
MgO	2.12±0.02	1 - 2	0.10
K ₂ O	0.46±0.01	0.3 - 0.6	0.10
Na ₂ O	0.17±0.02	0.1 - 0.16	0.89
SO ₃	1.87±0.03	1.8 - 2.5	-
CaO libre	0.915±0.010	0.8 - 1.8	-
Cl ⁻	0.01773±0.00079	0 - 0.1	0.36
Résidus insolubles	0.89±0.15	-	-
P. F	1.370±0.004	-	-

Tableau 4. Composition minéralogique

	Clinker %	Gypse %	laitier %	C ₄ AF %	C ₃ A %	C ₂ S %	C ₃ S %
CPA	95	5	0	13 - 15	2,8-3,2	17- 21	55- 59
CPJ	75	5	20	9 - 13	8 - 12	10- 25	55- 65
CHF	55	5	40				

2.4. Laitier

On a utilisé le laitier granulé du complexe sidérurgique d'El Hadjar-Annaba après qu'il ait été broyé jusqu'à la finesse de 3138 cm²/g (proche de celle du ciment CPJ) à l'aide d'un broyeur à boulets type laboratoire au niveau du laboratoire de génie civil de l'université d'Annaba. Sa composition chimique a été donnée dans le tableau 3 précédent.

Son indice d'activité M_b , déterminé par la relation qui suit, indique qu'il est basique [DRE 98]: $M_b = \frac{\%CaO + \%MgO}{\%SiO_2 + \%Al_2O_3} = 0,96 \approx 1$

3. Formulation du béton

Deux formulations de béton déterminées par la méthode de DREUX-GORISSE ont été appliquées, les dosages sont présentés dans le tableau 5. Pour réaliser le programme des essais envisagés, 6 mélanges de béton ont été préparés par utilisation des 3 types de ciments (CPA, CPJ et CHF) avec les deux formulations ([Formu-1 (E/C=0,5)] et [formu-2 (E/C=0,35+Adj)]). L'étude a porté sur l'influence du milieu

de conservation (eau douce et eau de mer) et du traitement thermique pour les échéances 2j, 7j et 28j.

Tableau 5. Formulation du béton d'étude

Dosage	Ciment (Kg)	S 0/4 (Kg)	G 4/8 (Kg)	G 8/16 (Kg)	G16/25 (Kg)	Eau (l)	Adj (%)	E/C	Aff (cm)
Formu-1	375	757	128	478	534	192	-	0,5	8
Formu-2	400	681	144	491	527	140	2,0	0,35	18

4. Résultats expérimentaux et interprétations

4.1. Propriétés physiques

Pour déterminer la porosité et la capacité d'absorption d'eau des éprouvettes de béton (témoins et étuvées) à l'âge de 28 jours, on a pesé les éprouvettes après séchage et élimination totale de l'humidité (séchage dans l'étuve à 105 °C) et ensuite immersion dans l'eau jusqu'à saturation. La porosité (P) a été déterminée à l'aide de

$$P = \frac{M_{sat} - M_{sec}}{V_t} \times 100 \%$$

La capacité d'absorption d'eau (CAE) a été calculée par: $CAE = \frac{M_{sat} - M_{sec}}{M_{sec}} \times 100 \%$

M_{sat} : masse de l'éprouvette saturée d'eau ;

M_{sec} : masse de l'éprouvette sèche.

V_t : volume total de l'éprouvette (15×15×15) cm³

Les valeurs de P et de CAE sont reportées sur les figures 3 et 4 ci-dessous.

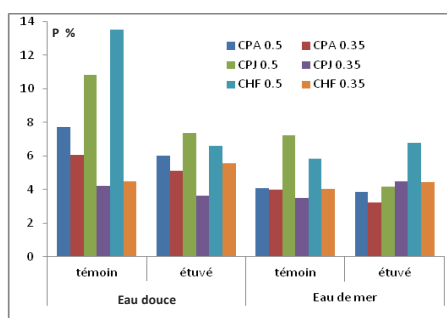


Figure 3. Porosité des bétons (%)

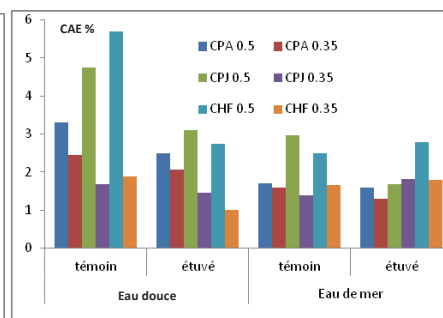


Figure 4. CAE des bétons(%)

4.1.1. Influence du milieu de conservation et de la teneur en laitier

Les bétons conservés dans l'eau douce ont une porosité plus élevée que ceux conservés dans l'eau de mer. Ce résultat peut être expliqué par:

- Les bétons à base de ciment CPA ont une plus faible porosité dans l'eau de mer à cause de sa nature (CRS) et de ses caractéristiques (une meilleure résistance et perméabilité dans les milieux agressifs contenant des sulfates).

- L'incorporation de 20% du laitier rend le béton (à base de CPJ avec adjuvant) moins poreux que celui contenant 40%, et par suite plus résistant à la pénétration des sulfates et des chlorures. Ce résultat a été obtenu également par [JAU 98] et [BIN 08] qui estiment que 20% de laitier dans un béton est un optimum face à la pénétration des chlorures notamment dans le milieu marin. Les chercheurs [HAN 08] et [MEM 02] ont aussi pu justifier la performance du laitier face à l'attaque de l'eau de mer.

4.1.2. Influence de la formulation

L'utilisation du plastifiant réducteur d'eau VISCOCRETE (cas de formu-2) est très bénéfique. Selon [MAR 86] l'adjuvant réducteur d'eau est responsable de 60% ou plus du gain de résistance à 28 jours, et dans notre cas il a permis d'obtenir des taux de porosité inférieurs à ceux des bétons préparés sans adjuvant (cas de formu-1). Cette constatation est encore plus significative avec davantage de laitier qui réduit le diamètre des pores continus [ALD 00].

4.1.3. Influence du traitement thermique

Dans l'eau douce, La porosité est plus élevée dans les bétons témoins que dans les bétons étuvés aussi bien pour le CPA que pour le CPJ, de même que pour le CHF de formu-1. Ce résultat est à l'opposé du béton de CHF obtenu avec formu-2 car le laitier a besoin de plus d'eau et de temps pour réagir.

Dans l'eau de mer, La porosité est plus élevée dans les bétons témoins que dans les bétons étuvés pour le CPA avec les 2 formulations et le CPJ avec formu-1, mais le contraire pour le reste des bétons. Ceci permet de conclure que 20 % de laitier avec suffisamment d'eau ($E/C = 0.5$) est plus avantageux pour un béton traité thermiquement destiné à l'usage en milieu marin.

Selon les résultats relatifs à la porosité et à la CAE, on peut constater une quasi-proportionnalité entre P et CAE: une porosité élevée correspond à une CAE élevée et ceci pour les mêmes raisons citées précédemment.

4.2. Propriétés mécaniques (résistances à la compression)

L'essai d'écrasement a été effectué sur des éprouvettes de béton $15 \times 15 \times 15 \text{ cm}^3$. L'influence des facteurs étudiés est discuté pour les échéances de 2, 7 et 28 jours.

4.2.1. Effet du traitement thermique

4.2.1.1. Béton à base de CPA

On peut constater d'après la figure 5 que, d'un coté les bétons formulés par Formu-2 ont pu acquérir les meilleures résistances par les deux modes de traitement

(normal et thermique) et dans les deux milieux de conservation à cause de l'emploi de l'adjuvant plastifiant réducteur d'eau qui permet de limiter la quantité d'eau de gâchage (E/C), et d'un autre côté le béton étuvé présente la meilleure résistance au jeune âge par rapport au béton témoin, ce qui permet un décoffrage rapide à court terme. Ce gain de résistance sera d'autant plus important que la température est plus élevée, mais à long terme, le béton témoin reprend sa place car l'effet négatif du traitement thermique apparaît à ce stade, on parle de la porosité qui augmente à cause de l'évaporation de l'eau si toutefois les conditions d'étanchéité ne sont pas assurées (perte d'humidité).

La chute de résistance des bétons étuvés par rapport au béton témoin était prévisible; dans notre cas elle est comprise entre 5 et 8 %.

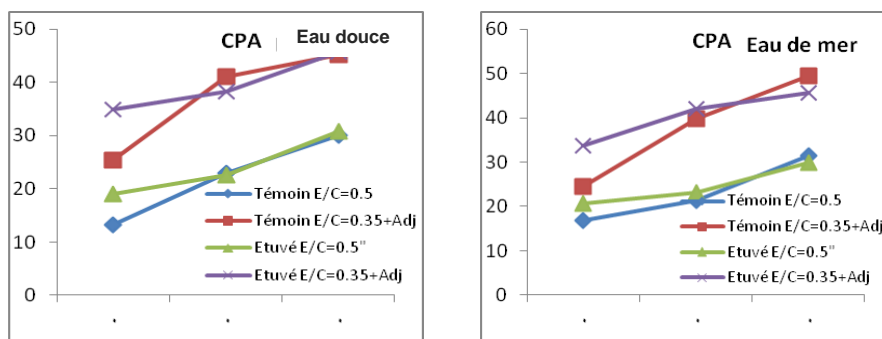


Figure 5. Résistance du béton de CPA (MPa)

4.2.1.2. Béton à base de CPJ

Les résultats relatifs aux résistances mécaniques sont présentés sur la figure 6, elles restent meilleures par Formu-2, et le traitement thermique du béton permet d'avoir d'excellentes valeurs principalement à jeune âge.

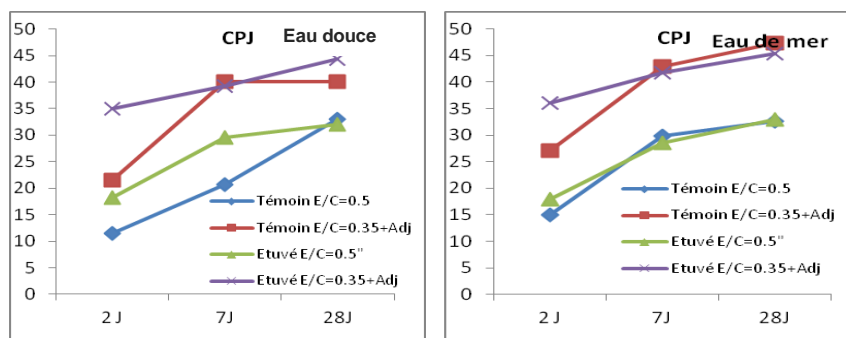


Figure 6. Résistance du béton de CPJ (MPa)

A long on peut noter que:

- Dans l'eau douce : la résistance du béton fluide (Formu-2) étuvé dépasse celle du béton témoin avec un gain avoisinant 9.5%. Ceci représente un excellent résultat compatible avec celui obtenu par [BAO 01]. La résistance du béton plastique (Formu-1) étuvé a chuté de 3.2% par rapport à celle du béton témoin.

- Dans l'eau de mer : la chute de résistance du béton fluide étuvé est de l'ordre de 4.15%. Elle est pratiquement nulle pour le béton plastique.

4.2.1.3. Béton à base de CHF

Comme pour les deux cas précédents, le béton étuvé est toujours prépondérant au jeune âge, au-delà on peut dire que (figure 7):

- En milieu normal : La résistance du béton adjuvanté étuvé est supérieure de 11.23%, probablement à cause du taux élevé de laitier contenu dans le CHF (40 %).

- En milieu marin: La résistance du béton plastique (sans adjuvant) traité thermiquement augmente considérablement jusqu'à ce qu'elle atteigne la résistance du béton adjuvanté témoin, cela est expliqué par l'effet bénéfique de l'augmentation de la teneur en laitier et sa bonne réaction avec la température (activité thermique) dans l'eau de mer. Ce résultat était prévisible car le laitier a un bon comportement à l'étuvage et il constitue un ajout très efficace dans les milieux agressifs tel que l'eau de mer (chlorures, sulfates).

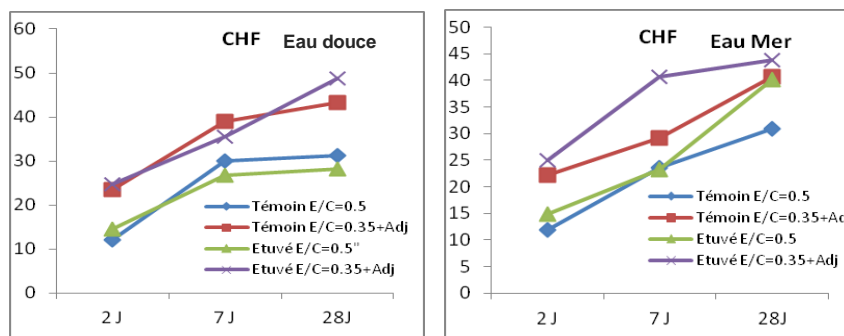


Figure 7. Résistance du béton de CHF (MPa)

4.2.2. Effet du laitier

4.2.2.1. Béton préparé avec Formu-1

Pour le béton témoin, dès les premiers jours la meilleure résistance est celle du béton à base de CPA suivie du béton à base de CPJ, mais avec le temps, la résistance du béton à base de CHF augmente considérablement (figure 8). Globalement, avec

l'utilisation du ciment CPJ, des résistances à la compression à 28 jours très intéressantes sont atteintes.

Avec un traitement thermique et une quantité d'eau de gâchage suffisante, le béton à base de CHF conservé dans l'eau de mer présente des résultats de résistance à 28 jours supérieurs à ceux des bétons à base de CPA et de CPJ, ce qui montre encore l'apport du laitier dans le milieu marin comme affirmé par [BIN 08] et dans le domaine de l'accélération de durcissement du béton par procédé thermique rejoignant l'avis des auteurs [YAZ 10].

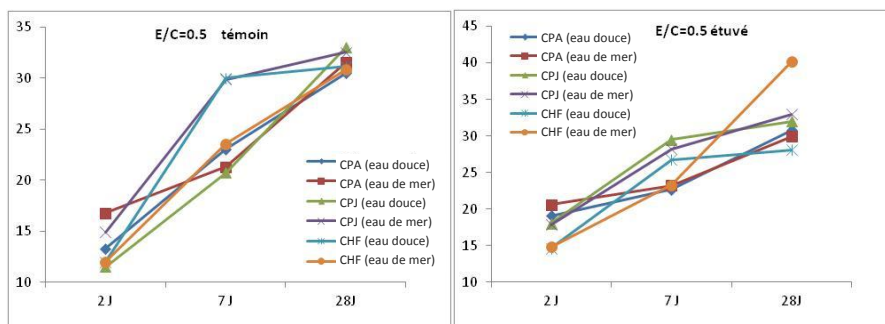


Figure 8. Résistances à la compression de différents bétons avec Formu-1(MPa)

4.2.2.2. Béton préparé avec Formu-2

Pour le béton témoin, les résistances à 28 jours des éprouvettes de bétons fluides à base de CPA et CPJ conservées dans l'eau de mer sont nettement supérieures à celles des éprouvettes conservées dans l'eau douce (figure 9).

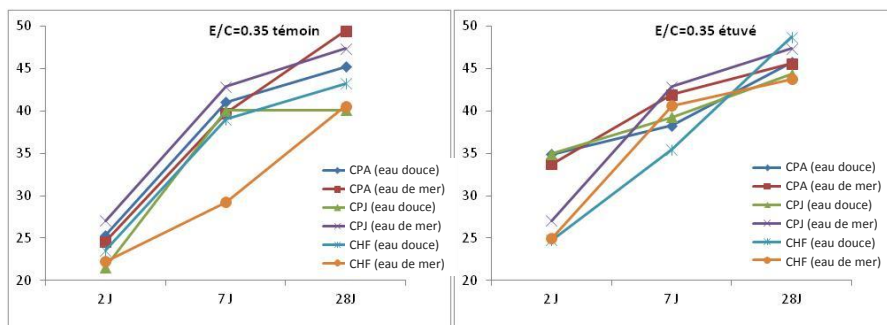


Figure 9. Résistances à la compression de différents bétons avec Formu-2(MPa)

Pour le béton étuvé et comme on l'a vu précédemment, les bétons à base de laitier réagissent mieux par traitement thermique (activation), mais avec l'emploi de l'adjuvant réducteur d'eau et un E/C = 0,35, le béton étuvé à base de CPJ est globalement le mieux résistant, et par suite le plus économique. Ceci est conforme aux résultats obtenus dans d'autres travaux de recherche [BIN 08], [JAU 98] et [ALD 00].

5. Conclusion et perspectives

Les bétons préparés avec Formu-2 donnent de meilleurs résultats avec traitement thermique notamment au jeune âge, où les résistances peuvent atteindre 55% de la résistance du béton témoin à 28 jours, l'augmentation du taux de laitier augmente les résistances dans le cas de l'étuvage avec un gain avoisinant les 11%.

Ces résultats prometteurs nous permettent de décoffrer rapidement (après quelques heures) les éléments en béton, béton armé ou précontraint (surtout dans le domaine de la préfabrication) en toute sécurité, d'où un gain de temps et d'argent.

En utilisant du laitier, il est possible de formuler un béton traité thermiquement résistant aux sels du milieu marin en combinant 20 % de laitier avec un E/C limité à 0,35 et emploi d'un adjuvant plastifiant réducteur d'eau, ou bien avec 40 % de laitier et un E/C un peu élevé de l'ordre de 0,5.

Une étude microscopique et prolongée à des échéances supérieures à 28 jours (90 jours et plus) peut sans doute éclaircir encore mieux l'efficacité du déchet sidérurgique (laitier granulé) activé thermiquement dans les milieux agressifs notamment dans l'eau de mer.

7. Bibliographie

[ALD 00] ALDEA C.M., YOUNG F., WANGA K., SHAH S.P., « Effects of curing conditions on properties of concrete using slag replacement », *Cement and Concrete Research*, vol. 30, 2000, p. 465-472.

[BAO 01] BAOJU L., YOUJUN X., SHIQIONG Z., JIAN L., « Some factors affecting early compressive strength of steam-curing concrete with ultrafine fly ash », *Cement and Concrete Research*, vol. 31, 2001, p. 1455-1458.

[BIN 08] BINICI H., AKSOGAN O., BAHSUDE E., KAPLAN H., BODUR M.N., « Performance of ground blast furnace slag and ground basaltic pumice concrete against seawater attack », *Construction and Building Materials*, vol.22, 2008, p. 1515-1526.

[CHA 04] CHABI S., MEZGHICHE B., GUETTALA H., Etude de l'influence des additions minérales actives sur le comportement mécanique des ciments et mortiers, Courrier du Savoir université de Biskra, n°05, Juin 2004, p. 03-08.

[DRE 98] DREUX, G., FESTA J., *Nouveau guide du béton et ses constituants*, Paris, Edition Eyrolles, 1998.

[GIF 97] GIFFORD P.M., GILLOTT J.E., « Behaviour of mortar and concrete made with activated blast furnace slag cement », *Canadian Journal Civil Engineering*, vol. 24, 1997, p. 237-247.

[HAN 08] BINICI H., AKSOGAN O., GORUR E., KAPLAN H., BODUR M. N., «Performance of ground blast furnace slag and ground basaltic pumice concrete against seawater attack», *Construction and Building Materials*, vol. 22, 2008, p. 1515-1526.

[JAU 98] JAU1 W.C., TSAY D.S., « Study of the basic engineering properties of slag cement concrete and its resistance to seawater corrosion », *Cement and Concrete Research*, vol. 28, n° 10, 1998, p. 1363–1371.

[MAR 86] MARKESTAD S.A., « A study of the combined influence of condensed silica fume and a water reducing admixture on water demand and strength of concrete », *Matériaux et Constructions*, vol. 19, n° 109, 1986, p. 39-47.

[MEM 02] MEMON A.H., RADIN S.S., ZAIN M.F.M., TROTTIER J. F., «Effects of mineral and chemical admixtures on high-strength concrete in seawater» *Cement and Concrete Research*, vol. 32, 2002, p. 373 – 377.

[TRE 01] TRENKWALDER H.M., LUDWIG, « Producing slag cements by separate grinding and subsequent mixing at the Karlstadt works », *Zkg International* 54 (9), 2001, 480-+

[VAN 06] VANROMPAEY G., Etude de la réactivité des ciments riches en laitier, à basse température et à temps court, sans ajout chloruré, Thèse de doctorat PhD, université libre de Bruxelles, 2006.

[YAZ 10] YAZICI H., YARDIMCI M.Y., YIGITER H., AYDIN S., TÜRKEL S., « Mechanical properties of reactive powder concrete containing high volumes of ground granulated blast furnace slag », *Cement & Concrete Composites*, vol. 32, 2010, p. 639–648.