

CONCLUSION GENERALE

Le béton est l'un des matériaux de construction les plus utilisés dans le monde, il fait partie de notre cadre de vie. Il a mérité sa place par ces performances, sa souplesse d'emploi ainsi que par la diversité qu'il permet dans les formes, les couleurs et les aspects.

Le béton est un matériau très en demande et son utilisation ne cessera de croître au cours des années à venir. Afin d'assurer la croissance de ce matériau de construction indispensable, l'approche du développement durable doit être intégrée à la production du ciment et du béton.

Cette approche consiste à optimiser l'utilisation des ajouts cimentaires des résidus industriels, afin de remplacer le ciment dans le béton, et d'utiliser les matériaux recyclés pour la réalisation des bétons, ce qui permettra d'augmenter la production de ce dernier à un coût compétitif, et protéger la nature des stocks grandissants des résidus industriels.

L'objectif principal de cette thèse rentre dans ce contexte, il s'inscrit dans le thème très général de la recherche de l'amélioration des caractéristiques des matériaux locaux et la valorisation des déchets et sous produits industriels, tout en étudiant et en élaborant un liant hydraulique à base d'un sous produit industriel (le laitier granulé) sans clinker (liant basique), et de déterminer l'influence de l'utilisation des granulats du laitier cristallisé sur le comportement du béton ordinaire et du béton basique. Alors nous cherchons à améliorer quelques aspects de la durabilité des bétons, en proposant des traitements simples et rentables et enfin d'expliquer les comportements observés.

La méthodologie adoptée pour ce travail est la suivante : recherche bibliographique (partie A), expérimentation en laboratoire, et interprétation des résultats (partie B). en final des recommandations et conclusions récapitulatives ont été présentées.

RECOMMANDATIONS ET CONCLUSIONS : PARTIE A

Le but essentiel de toute recherche bibliographique est de fournir un contexte scientifique et technique pour n'importe quel travail de recherche. La partie A de notre travail est composée de trois chapitres à savoir : le premier chapitre évoque le problème des déchets industriels présentant des atteintes à l'environnement, et propose des solutions a adopté.

Le laitier granulé et le laitier cristallisé de l'usine d'El Hadjar est un exemple de déchets industriels qu'il faut s'en débarrasser, à partir de leur valorisation pour la confection des liants et la réalisation des bétons.

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude du ciment au laitier activé où nous avons mis l'accent sur les différents facteurs qui influencent sa réactivité notamment : la phase vitreuse, la composition chimique, la finesse et le traitement effectué durant son durcissement.

Les propriétés hydrauliques du laitier sont latentes, ne peuvent être mobilisées que dans un milieu fortement basique, il a été recommandé d'assurer un PH égal à 12 pour favoriser la dissolution des composants du laitier à partir de son activation : calcique, sulfatique ou alcaline. L'activation alcaline est une méthode récente datée des années 1970, elle est très efficace.

Il a été recommandé également d'utiliser le verre soluble comme activant du laitier du fait qu'il améliore les résistances mécaniques du ciment au laitier trois fois de plus qu'un ciment ordinaire, et raccourci largement son délai de prise. La densité de l'activant joue un rôle majeur dans les performances mécaniques du liant de laitier.

On a également étudié dans ce chapitre le béton à base du laitier activé (béton basique), ses propriétés et les différents aspects de sa durabilité.

Le seul inconvénient du béton basique réside dans ses délais brefs de maniabilité, plusieurs tentatives ont été faites pour y remédier. Il a été recommandé de modifier l'ordre de malaxage des composants du béton, et d'ajouter le composant alcalin sous la forme concentrée, ensuite après quelques minutes introduire la quantité complémentaire d'eau.

Le chapitre trois a mis le point sur le squelette granulaire du béton (granulats naturels et ceux du laitier cristallisé) en exposant leurs propriétés essentielles.

Il a été recommandé d'utiliser le laitier cristallisé comme granulats grossiers dans la réalisation des bétons.

RECOMMANDATIONS ET CONCLUSIONS : PARTIE B

Dans le quatrième chapitre nous définissons les principales caractéristiques chimiques et minéralogiques des divers matériaux que nous avons utilisés à savoir : (le laitier granulé, les ciments, le sable, pierres concassées, laitier cristallisé et les activants).

Les laitiers provenant de l'usine d'El Hadjar (wilaya de Annaba), deux types de ciments sont utilisés, l'un est un CPA fabriqué à la cimenterie de Aïn touta (wilaya de Batna) l'autre est un CPJ fabriqué à la cimenterie de Hamam Dalâa (wilaya de M'sila).

Le sable utilisé est un sable très fin, de la région de M'sila, ainsi que les pierres concassées. L'activant utilisé est Na_2CO_3 commercialisé par Granitex nouveaux produits de la filière de Boussaâda (M'sila).

Le chapitre quatre a pour objectif d'étudier les propriétés physiques et mécaniques du ciment au laitier (sans clinker) activé par la soude et le carbonate de soude (ajoutés à des densités croissantes). Une activation par le clinker à titre de comparaison a été étudiée.

L'étude de la pâte de ciment au laitier activé, ainsi que l'étude du mortier nous a permis de préciser un certain nombre de points :

1. A des teneurs inférieures à 50 % de la masse de ciment, le laitier du haut fourneau finement broyé, peut être additionné au ciment portland sans qu'il affecte considérablement les propriétés mécaniques (notant que le délai de prise sera prolongé). Mais au-delà de cette limite, la chute de résistance est nettement remarquée d'où le recours à l'activation mixte.
2. L'activation mixte (clinker et soude) (où n'importe quelle autre solution basique) récompense l'effet négatif des teneurs élevées en laitier :
 - a. pour des teneurs en laitier allant à 80 % du poids du liant un composant alcalin d'une densité moyenne de (1.15 g/cm^3) peut donner des résistances acceptables à 28 jours (comparables à celles d'un liant de ciment portland composé). A long terme (après 1 an de durcissement) ces résistances s'améliorent significativement.
 - b. Pour une teneur extrême du laitier de 80 %, le début de prise est largement raccourci par l'utilisation de NaOH comme activant : de 2 h. 50 min pour un liant non activé à 20 min, de même la fin de prise.
 - c. La plasticité est un peu affectée pour ce type d'activation (l'activant est un raidisseur puissant).
3. Augmentant la teneur en laitier à 100 % l'activation alcaline du laitier est une méthode très efficace, il suffit d'augmenter seulement la densité du composé alcalin utilisé à 1.20 g/cm^3 à 1.25 g/cm^3 .
 - a. L'augmentation de la densité du composant alcalin influence les propriétés physiques du liant au laitier notamment son délai de prise de quelques heures à quelques minutes seulement, aussi elle influence ces propriétés mécaniques (résistance mécanique en compression, en flexion et en traction par flexion).
4. L'hydratation du ciment au laitier est très lente aux premiers âges, même après son activation alcaline, (il faut noter qu'il existe des composants alcalins assez puissants tel que le verre soluble dont l'utilisation favorise l'hydratation des composants du laitier, et le développement des résistances initiales).
 - a. A cet effet, on propose dans le cas de l'activation par la soude et ses sels de procéder à un durcissement par étuvage.

b. La combinaison de l'activation et l'étuvage est bénéfique, l'augmentation de la résistance est estimée à 3 fois de plus après un jour d'étuvage que celle d'un liant non étuvé. Après 28 jours de durcissement une légère différence est signalée entre le durcissement normal et celui par étuvage. Donc, dans le cas de la préfabrication des éléments structuraux, on propose d'utiliser un ciment de laitier sans clinker activé par la soude où à partir de ses sels, durcissant par étuvage.

5. Il reste à noter que :

Les ciments au laitier (activé par le clinker où partir des solutions basiques) présentent un retrait inférieur à celui noté dans un ciment portland et un gonflement nul.

Les ciments au laitier activé résistent mieux que le ciment portland aux milieux agressifs.

Le dernier chapitre est consacré à l'étude de l'influence des granulats du laitier cristallisé sur le comportement rhéologique et mécanique du béton ordinaire et celui du béton basique.

Nous avons tout d'abord substituer dans le béton le sable naturel par du laitier granulé, nous avons constaté que cette substitution entraînait d'une part une baisse de la plasticité du béton d'autre part des pertes en résistance (dans le cas la substitution totale).

Nous avons ensuite utilisé le laitier cristallisé au remplacement des pierres concassées, des améliorations de la résistance en compression sont notées.

Enfin nous avons remplacé le squelette granulaire (sable et pierres concassées) par les produits du laitier, nous avons remarqué que cette substitution est à éviter (résistance, et ouvrabilité très faibles).

Nous avons montré qu'on a un intérêt à utiliser le laitier cristallisé au remplacement des granulats naturels grossiers que de remplacer les granulats fins par du laitier granulé.

L'influence des granulats du laitier cristallisé sur les propriétés du béton ordinaire peut se résumer en :

1. La plasticité des bétons était diminuée par l'introduction du laitier cristallisé.
2. Les résistances à la traction étaient d'autant plus élevées que celles du béton contenant les granulats naturels.
3. Un module d'élasticité comparable à celui d'un béton ordinaire (BOGN), et un module de déformabilité assez élevé dans l'intervalle des contraintes croissantes (0.3 – 0.9) par rapport à celui du béton ordinaire (BOGN). Et des déformations élasto – instantanées longitudinales et transversales un peu inférieures à celles déterminées dans un béton ordinaire (BOGN).

4. Une porosité et une imperméabilité meilleures en comparaison avec celles du béton ordinaire, estimée à 8 %.
5. Un peu plus d'influence du milieu agressif est remarquée sur la résistance des bétons ordinaires à base du laitier cristallisé en comparaison avec ceux à granulats naturels.
6. Une résistance considérable vis-à-vis des hautes températures (600°C à 900°C) en comparaison avec le béton ordinaire.

Pour formuler le béton basique, nous avons proposé la méthode simplifiée dite méthode de Dreux Gorisse modifiée, en gardant toutes les données concernant la formulation du béton ordinaire (sauf que l'activité de ciment n'étant pas la même).

L'influence des granulats du laitier cristallisé sur le comportement rhéologique et mécanique du béton basique est évidente d'une manière assez comparable à leur effet sur le béton ordinaire, la basicité du laitier cristallisé se combine à l'activation alcaline du laitier granulé pour améliorer certains propriétés du béton basique notamment :

1. La résistance mécanique en compression à court terme en comparaison avec un béton basique à granulats naturels (BBGN) et la résistance mécanique en traction.
2. La résistance mécanique en compression, dans le cas de l'accélération du durcissement par étuvage après un jour et 28 jours de durcissement. (efficacité du traitement thermique par étuvage).
3. Le module d'élasticité assez élevé en comparaison avec les autres types de bétons (BOGN, BOGL et BBGN) il présente une augmentation de 10% par rapport au béton basique à granulats naturels et de 6.30% par rapport du béton ordinaire, le module de déformabilité présente des valeurs très élevés en comparaison avec les autres types de béton. Les déformations élasto – instantanées (longitudinales et transversales) restent du même ordre.
4. La porosité est nettement améliorée après un an de durcissement.
5. Une surface qui reste intacte, et un comportement ductile est remarqué face aux hautes températures en comparaison avec les autres types de bétons (BOGN, BOGL et BBGN).
6. Une structure qui diffère des autres types de béton caractérisée par la précipitation d'une silice brillante sur le granulat du laitier cristallisé.
7. Le laitier cristallisé joue un rôle actif dans le durcissement des bétons basique, et améliore ses propriétés élastiques, et sa durabilité.
8. Les opérations de vibration, compactage du béton basique sont celles du béton ordinaire, sauf la nécessité de maintenir l'humidité pour éviter la dessiccation.

9. Le laitier cristallisé de l'usine d'El Hadjar présente donc des caractéristiques nécessaires pour être un excellent granulat à mortier et béton (ordinaire et basique).
10. Le béton basique à base de granulats du laitier est recommandé :
 - Dans le cas de la préfabrication des éléments structuraux en procédant à un durcissement par étuvage.
 - Dans les éléments d'ouvrages exposés aux fortes températures.
11. Vu ses propriétés élastiques très importantes, il est recommandé aussi dans la réalisation des ouvrages d'art (les ponts).
12. le béton basique à base des granulats naturels est recommandé dans la réalisation des fondations et des ouvrages souterrains.