



UNIVERSITÉ MOHAMED EL BACHIR EL- IBRAHIMI
BOURJ BOU ARRERIDJ

FACULTÉ DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE

Département de Génie Civil

MÉMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de MASTER

Filière : Génie Civil

Spécialité : Matériaux de génie civil

SUJET

**EFFET DE L'AJOUT DE LAITIER DE HAUT
FOURNEAU SUR LA RHEOLOGIE DES BETONS A
L'ETAT FRAIS ET A L'ETAT DURCI**

Par : BOUAISSI Zahia

Soutenu publiquement le : 01/07/2018 devant le jury composé de :

Mr. DEBOUCHA Sadek	Président
Dr. MESSAOUDENE Ibrahim	Encadreur
Mr. BENAICHI El Hadj	Examineur
Mr. AMRIOU Abderachid	Examineur

Promotion : 2017/2018

Je dédie ce modeste travail

A mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse et leur soutien.

A mes chers frères Abd Elmalek et Hicham pour leur appui et leur encouragement.

A tout ma famille Bouaissi et Benmalek pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire.

A mes copines Mebarkia Rahma et Atia Majda et mon ami Khial Hamza et tous qui m'ont connu de proche ou de loin.

Ma dédicace va également à ceux qui ont participé de près ou de loin à l'aboutissement de mes efforts.

En première lieu je remercie Allah pour m'avoir donné tant de courage et de patience pour accomplir ce modeste mémoire.

Je tiens à remercier mon encadreur Docteur MESSAOUDENE Ibrahim pour son encadrement éclairé, sa disponibilité et pour sa culture scientifique qu'il m'a fait partager pendant l'élaboration de ce travail.

Je remercie également tous les membres de jury qui ont accepté d'examiner mon travail.

Je remercie les techniciens et ingénieurs du laboratoire des travaux publics de l'Est Bordj Bou Arreridj ainsi que le personnel du laboratoire de génie civil de l'université et aussi de la cimenterie d'AIN EL KEBIRA (Sétif) d'avoir mis à ma disposition tous les moyens pour mener à bien mon travail.

Mes remerciements vont également à tous mes professeurs de l'université.

Je ne saurais oublier tous ceux qui m'ont soutenu moralement et qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

ملخص:

معرفة السلوك الانسيابي (إجهاد القص واللزوجة البلاستيكية) خلال الساعتين الأوليين بعد الخلط لا يقل أهمية عن قياس الخصائص الأولية (الترهل). لهذا الغرض، يهدف العمل الحالي إلى دراسة تأثير إضافة خبث الأفران العالية بنسبة 10% و 20% على الريولوجيا للخرسانة العادية في الحالة الجديدة وفي نفس الوقت. الحالة المتصلبة. أجريت هذه الدراسة باستخدام مقياس إيكار ريو ماطر. تم اختبار $10 \times 10 \times 10$ مكعب من العينات المحفوظ بها في الماء لاختبارات ضغط بسيطة في 7 و 28 و 60 يومًا.

أظهرت النتائج أنه من خلال إضافة نسبة 10% من الخبث، من ناحية، هناك انخفاض طفيف في عتبة القص التي تبدأ من 468 باسكال للخرسانة الخاضعة للسيطرة دون إضافة 388 باسكال، من ناحية أخرى هي أكثر لزوجة، في الواقع اللزوجة أعلى للخرسانة مع الاسمنت يتكون من 10% من الخبث، ارتفاع اللزوجة من 30 إلى حوالي 47 باسكال. ثانية. من ناحية أخرى بالنسبة لمعدل إضافة 20% من الخبث، زاد عتبة القص إلى 587 باسكال وانخفضت اللزوجة إلى قيمة حوالي 21 باسكال. ثانية.

بالنسبة لمعدل 10%، من الصعب شرح تطور الخصائص الريولوجية، ولكن بمعدل 20%، يمكن تفسير الزيادة في عتبة القص من خلال تأثير حشو الخبث الذي يولد المزيد من الخرسانة. إن السطح المحدد للخبث (أكثر من 4000 سم² / جم) أعلى بكثير من الاسمنت (3000 سم² / جم) وبالتالي يكون الاحتكاك بين الحبيبات أكبر. تصبح الخرسانة أكثر سلاسة وتتناقص اللزوجة التي يمكن أن تعزى إلى زيادة الطور السائل من خلال تأثير حبيبات الخبث التي يكون سطحها الخاص كبيرًا مما يزيد من سطح ترطيب حبيبات الاسمنت.

في الحالة المتصلبة، يمكن الاستنتاج أن استبدال الأسمنت بنسبة 10% أو 20% من خبث الأفران لم يكن له أي تأثير على قوة الضغط للخرسانة خلال جميع المواعيد النهائية (7، 28، 60). أيام، المقاومة قابلة للمقارنة عمليا مع الخرسانة العادية. جميع الخرسانات لها نفس السلوك الريولوجي في الحالة المتصلبة وهذا خلال جميع المواعيد النهائية، فإن إضافة الخبث لم يكن لها تأثير للمرحلة المرنة أو الطور البلاستيكي للخرسانة. تدفق الخرسانة هو نفسه.

الكلمات المفتاحية: الريولوجيا، اللزوجة، إجهاد القص، خبث الأفران.

Résumé

La connaissance du comportement rhéologique (contrainte de cisaillement et la viscosité plastique) au cours des deux premières heures après le malaxage est tout aussi importante que la mesure des propriétés initiales (affaissement). Pour cette raison, le présent travail a pour l'objectif l'étude de l'effet de l'ajout du laitier de haut fourneau avec deux pourcentages 10% et 20% sur la rhéologie du béton ordinaire à l'état frais et à l'état durci. Cette étude a été faite au moyen de l'appareil de mesure ICAR rhéomètre.

Des éprouvettes cubiques 10*10*10 conservées dans l'eau ont été soumises à des essais de compression simple à 7, 28 et 60 jours.

Les résultats ont montré qu'avec un taux de 10% d'ajout de laitier, d'une part, il y a une légère diminution du seuil de cisaillement qui passe de 468Pa pour le béton témoin sans ajout à 388Pa, par contre le béton est plus visqueux, en effet la viscosité est supérieure pour un béton avec un ciment composé de 10% de laitier, la viscosité est passée de 30 à environ 47Pa.s. D'autre part, pour un taux d'ajout de 20% de laitier, le seuil de cisaillement a augmenté pour atteindre 587Pa et la viscosité a diminué pour une valeur d'environ 21Pa.s.

Pour un taux de 10%, il est difficile d'expliquer l'évolution des caractéristiques rhéologiques, mais pour un taux de 20%, l'augmentation du seuil de cisaillement peut être expliquée par l'effet filler du laitier qui engendre un béton plus compacte, en effet la surface spécifique du laitier (plus de 4000cm²/g) est nettement supérieure à celle du ciment (3000 cm²/g) et donc les frottements grain-grain sont plus grands. Le béton devient plus fluide et la viscosité diminue cela peut être dû à la l'augmentation de la phase liquide par l'effet des grains de laitier dont la surface spécifique est grande ce qui augmente la surface de mouillage des grains de ciment.

A l'état durci, on peut conclure que la substitution du ciment par 10% ou 20% de laitier de haut fourneau n'a pas eu de conséquence sur la résistance à la compression du béton durant toutes les échéances (7, 28 et 60 jours), en effet la résistance est pratiquement comparable avec celle du béton témoin. Tous les bétons ont le même comportement rhéologique à l'état durci et ceci pendant toutes les échéances, l'ajout du laitier n'a pas eu un effet que se soit pour la phase élastique ou la phase plastique du béton. L'écoulement du béton est le même.

Mots-clés : Rhéologie, viscosité, contrainte de cisaillement, laitier de haut fourneau..

Abstract:

Knowledge of the rheological behavior (shear stress and plastic viscosity) during the first two hours after mixing is just as important as measuring the initial properties (sagging). For this reason, the present work aims to study the effect of the addition of blast furnace slag with two percentages 10% and 20% on the rheology of ordinary concrete in the fresh state and at the same time. hardened state. This study was done using the ICAR rheometer.

Of Cubic 10 * 10 * 10 specimens held in water were subjected to simple compression tests at 7, 28 and 60 days.

The results showed that with a 10% slag addition rate, on the one hand, there is a slight decrease of the shear threshold which goes from 468Pa for the control concrete without addition to 388Pa, on the other hand the concrete is more viscous, indeed the viscosity is higher for a concrete with a cement composed of 10% of slag, the viscosity went from 30 to about 47Pa.s. On the other hand, for an addition rate of 20% slag, the shear threshold increased to 587Pa and the viscosity decreased to a value of about 21Pa.s.

For a rate of 10%, it is difficult to explain the evolution of the rheological characteristics, but for a rate of 20%, the increase in the shear threshold can be explained by the filler effect of the slag, which generates more concrete. Compact, indeed the specific surface of the slag (over 4000cm² / g) is significantly higher than that of cement (3000 cm² / g) and therefore the grain-grain friction is greater. The concrete becomes more fluid and the viscosity decreases that can be due to the increase of the liquid phase by the effect of the slag grains whose specific surface is large which increases the wetting surface of the cement grains.

In the hardened state, it can be concluded that the substitution of the cement with 10% or 20% of blast furnace slag has not had any effect on the compressive strength of the concrete during all the deadlines (7, 28 and 60 days), the resistance is practically comparable with that of the control concrete. All the concretes have the same rheological behavior in the hardened state and this during all the deadlines, the addition of the slag did not have an effect that is for the elastic phase or the plastic phase of the concrete. The flow of the concrete is the same.

Keywords: Rheology, viscosity, shear stress, blast furnace slag.

INTRODUCTION GENERALE

CHAPITRE 01	1
ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE	1
1.1. Introduction.....	1
1.2. Le béton.....	1
1.2.1. Le ciment.....	1
1.2.2 L'eau.....	1
1.3. Les ajouts minéraux.....	1
1.4. Le laitier de haut fourneau.....	1
1.4.1. Définition.....	1
1.4.2. Les principales formes de laitier.....	2
1.4.3 L'effet physique et l'effet chimique de laitier.....	5
1.4.3.1. L'hydratation de laitier granulé de hauts fourneaux.....	6
1.4.4. Utilisation des laitiers de haut fourneau.....	6
1.4.5 Valorisation de laitier en Algérie.....	7
1.5. La rhéologie de béton.....	7
1.5.1 Comportement rhéologique du béton a l'état frais.....	8
1.5.2 Vitesse de cisaillement.....	8
1.5.3 La viscosité.....	9
1.5.4 Le seuil de cisaillement.....	10
1.5.5. La contrainte de cisaillement.....	10
1.6 Facteurs affectant la rhéologie des bétons.....	11
1.7 Le rhéomètre.....	11
1.8 Comportement du béton a l'état durci.....	13
1.9. Conclusion.....	13
CHAPITRE 02	16
MATERIAUX, MATERIELS ET ESSAIS	16
2.1 Introduction.....	16
2.2. Matériaux utilisés.....	16

2.3. Caractéristique des matériaux.....	16
2.3.1 Caractéristique du gravier.....	16
2.3.2 Caractéristique de sable.....	25
2.3.3. Caractéristiques du ciment CEM I 42,5.....	32
2.3.4. Caractéristique de laitier haut fourneau.....	33
2.3.5. Caractéristiques du programme expérimental.....	34
2.3.6. Caractéristiques de l'eau de gâchage.....	35
2.4. Formulation du béton.....	36
2.5. Confection des éprouvettes.....	38
2.6. Les essais sur le béton à l'état frais.....	38
2.7. Les essais sur le béton durci.....	39
2.8. Calcul du module de Young.....	39
CHAPITRE 03.....	39
RESULTATS ET DISCUSSION.....	39
3.1. Caractéristique rhéologique à l'état frais.....	41
3.1.1. Caractérisation rhéologique du béton témoin.....	41
3.1.2. Caractérisation rhéologique des bétons au laitier de haut fourneau.....	42
3.1.3 Evolution de la viscosité des différents bétons.....	44
3.1.4 Evolution du seuil de cisaillement des différents bétons.....	45
3.2 Caractéristiques rhéologiques à l'état durci.....	46
3.2.1 Résistances à la compression du béton témoin	46
3.2.2 Résistances à la compression avec ajout de 10% laitier de haut fourneau.....	48
3.2.3 Résistances à la compression de avec ajout de 20% laitier de haut fourneau	50
3.2.4 Les courbes contrainte-déformation des différents bétons.....	52
CONCLUSION GENERALE.....
Figure 1.1 Laitier cristallisé et vitrifié de haut fourneau.....	2
Figure 1.2 Les principales formes de laitier.....	2
Figure 1.3 Laitier bouletée.....	5
Figure 1.4 Schéma de la vitesse de cisaillement	9

Figure 1.5 Le rhéomètre ICAR et ces constituants.....	12
Figure 1.6 Les briques de base pour la représentation des comportements.....	14
Figure 2.1 Courbe de l'analyse granulométrique du gravier 3/8.....	17
Figure 2.2 Courbe de l'analyse granulométrique du gravier 8/15.....	18
Figure 2.3 Courbe de l'analyse granulométrique du sable.....	27
Figure 2.4 Courbe du mélange des composants.....	37
Figure 3.1 Diagramme couple-vitesse pour le béton témoin.....	41
Figure 3.2 Diagramme couple-vitesse du béton avec ajout de 10% de laitier	42
Figure 3.3 Diagramme couple-vitesse du béton avec ajout de 20% de laitier	43
Figure 3.4 Diagramme couple-vitesse des trois bétons (LHF10%, LHF20% et BT).....	44
Figure 3.5 Evolution de la viscosité des différents types de béton.....	44
Figure 3.6 Evolution du seuil de cisaillement des différents types de béton.....	45
Figure 3.7 courbe contrainte-déformation du béton témoin à 7 jours.....	46
Figure 3.8 courbe contrainte-déformation du béton témoin à 28 jours.....	47
Figure 3.9 courbe contrainte-déformation du béton témoin à 60 jours	47
Figure 3.10 courbe contrainte-déformation avec ajout 10% LHF à 7 jours.....	48
Figure 3.11 courbe contrainte-déformation avec ajout 10% LHF à 28 jours.....	49
Figure 3.12 courbe contrainte-déformation avec ajout 10% LHF à 60 jours.....	49
Figure 3.13 courbe contrainte-déformation avec 20% LHF à 7 jours.....	50
Figure 3.14 courbe contrainte-déformation avec 20% LHF à 28 jours.....	51
Figure 3.15 courbe contrainte-déformation avec 20% LHF à 60 jours.....	51
Figure 3.16 courbe contrainte-déformation des différents types de béton à 7 jours.....	52
Figure 3.17 courbe contrainte-déformation des différents types de béton à 28 jours.....	53
Figure 3.18 courbe contrainte-déformation des différents types de béton à 60 jours.....	53

Tableau 1.1 : Propriétés du béton au laitier granulé de haut fourneau.....	4
Tableau 1.2 : Ordres de grandeur des paramètres rhéologiques pour différents types de Matériau.....	11
Tableau 2.1 L'analyse granulométrique du graviers (3/8).....	17
Tableau 2.2 L'analyse granulométrique du graviers (8/15).....	18
Tableau 2.3 : Le coefficient d'aplatissement.....	19
Tableau 2.4 La masse volumique apparente (ρ_{app}) des graviers (3/8) et (8/15).....	21
Tableau 2.5 La masse volumique absolue (ρ_{abs}) des gravier (3/8)et (8/15).....	21
Tableau 2.6 Porosité, Compacité et Indice de vides des graviers.....	22
Tableau 2.7 Adaptation des charges des boulets correspondant à la classe granulaire.....	23
Tableau 2.8 Estimation de la dureté des agrégats en fonction du coefficient LA.....	24
Tableau 2.9 Résultats d'essai de Los Angeles des graviers (3/8) et (8/15).....	24
Tableau 2.10 Degré d'absorption d'eau des graviers (3/8) et (8/15).....	25
Tableau 2.11 Les résultats de l'analyse granulométrique du sable de dune.....	25

Tableau 2.12 Résultats de l'analyse granulométrique pour le sable concassé.....	26
Tableau 2.13 Résultats de l'analyse granulométrique pour le sable de mélange.....	26
Tableau 2.14 La qualité du sable en fonction de leur module de finesse.....	27
Tableau 2.15 Résultats du module de finesse des sables.....	28
Tableau 2.16 La masse volumique apparente (ρ_{app}) du sable.....	28
Tableau 2.17 La masse volumique absolue (ρ_{abs}) du sable.....	29
Tableau 2.18 Porosité, Compacité et Indice de vides du Sable.....	29
Tableau 2.19 Les catégories de la propreté du matériau par rapport aux limites des valeurs de VB.....	30
Tableau 2.20 Résultat de l'essai au bleu de méthylène.....	31
Tableau 2.21 Les préconisations en matière de propreté pour les sables utilisés dans les bétons.....	32
Tableau 2.22 Les résultats des essais.	32
Tableau 2.23 Caractéristiques physiques du ciment CEMI /42.5.....	33
Tableau 2.24 Composition chimiques du ciment CEMI /42.5.....	33
Tableau 2.25 Composition minéralogiques du CEMI /42.5.....	33
Tableau 2.26 Caractéristiques physiques de laitier de haut fourneau.....	34
Tableau 2.27 Composition chimiques du laitier LHF.....	34
Tableau 2.28 Caractéristiques physiques du ciment avec LHF.....	34
Tableau 2.29 Caractéristiques chimiques du ciment avec LHF.....	35
Tableau 2.30 composition minéralogiques des ciment avec laitier.....	35
Tableau 2.31 Caractéristiques physico-chimiques de l'eau.....	35
Tableau 2.32 Données de base de la formulation.....	36
Tableau 2.33 Analyse granulométrique des matériaux.....	36
Tableau 2.34 Les résultats de formulation du béton.....	37
Tableau 3.1 Résultats au rhéomètre du béton témoin.....	41
Tableau 3.2 Résultats au rhéomètre du béton avec 10% LHF.....	42
Tableau 3.3 Résultats au rhéomètre du béton avec 20% LHF.....	43
Tableau 3.4 Evolution de la viscosité des différents types de bétons.....	44
Tableau 3.5 Evolution du seuil de cisaillement des différents types de bétons.....	45
Tableau 3.6 La résistance du béton témoin à 7 jours.....	47
Tableau 3.7 La résistance du béton témoin à 28 jours.....	47
Tableau 3.8 : la résistance de béton témoin à 60 jours.....	47
Tableau 3.9 La résistance du béton avec ajout de 10% LHF à 7 jours.....	48
Tableau 3.10 La résistance du béton avec ajout de 10% LHF à 28 jours.....	48
Tableau 3.11 La résistance du béton avec ajout de 10% LHF à 60 jours.....	49
Tableau 3.12 La résistance du béton avec ajout 20% LHF à 7 jours	50
Tableau 3.13 La résistance du béton avec ajout de 20% LHF à 28 jours	50

Tableau 3.14 La résistance du béton avec ajout de 20% LHF à 60 jours	51
Tableau 3.15 Evolution de la résistance du béton en fonction du taux d'ajout de laitier(MPa)	52

Acronymes

SD : sable de dune

SC : sable concassé

MF : module de finesse

Aff. : affaissement

LHF : laitier de haut fourneau

BT : Béton témoin

Symboles

τ : la contrainte de cisaillement

τ_0 : le seuil de cisaillement

μ : la viscosité plastique

$\dot{\gamma}$: Le gradient de vitesse

ρ abs : la masse volumique absolue

ρ app : la masse volumique apparente

ε : la déformation

σ : la contrainte

p : la porosité

C : la compacité

P : la porosité

e : l'indice des vides

A : degré d'absorption d'eau

γ : la masse volumique de béton

ν : coefficient de poisson

V : vitesse du son

E_c : module d'élasticité statique

INTRODUCTION GENERALE

Le béton est le matériau de construction le plus utilisé au monde, il est présent dans tous les secteurs de la construction, ses qualités et ses performances répondent aux différents besoins en matière de bâtiments et de génie civil en respectant les exigences de sécurité, d'esthétique et de durabilité. Le béton est un matériau minéral obtenu en mélangeant du ciment, de l'eau et des granulats. Il a un comportement évolutif : il est d'abord fluide ce qui lui permet de prendre toutes les formes possibles puis progressivement il devient dur et très résistant.

L'emploi de certaines additions minérales et organiques dans la confection du béton contribue à une accélération du processus d'hydratation du ciment. La cinétique d'hydratation se trouve modifiée en avançant l'apparition du deuxième pic et en augmentant la chaleur totale dégagée. En plus de la complexité de l'hydratation d'un ciment ordinaire, il vient s'ajouter l'interférence de la réaction des additions minérales avec celle du ciment. Ceci engendre une modification de certaines propriétés du ciment à savoir le temps de prise, l'apparition des microfissures et l'évolution des résistances mécaniques au très jeune âge. L'incorporation de ces additions minérales entraîne également une modification de la distribution granulaire, l'apparition de nouveaux sites de nucléation et une nouvelle activité des surfaces des grains qui viennent défloculer les grains et améliorer l'ouvrabilité du béton. Ces modifications des propriétés physico-chimiques des composants du béton dues à des additions minérales et organiques affectent directement les propriétés rhéologiques du béton frais et ses composants.

La rhéologie est l'étude du changement de la forme et de l'écoulement d'une mixture. Elle donne une meilleure définition des propriétés d'écoulement des matériaux cimentaires et fournit les grandeurs rhéologiques fondamentales (seuil d'écoulement, viscosité plastique) qui permettent de tracer des courbes d'écoulement, caractéristiques des différents types de mélanges.

L'objet de ce travail est de voir les modifications des propriétés rhéologiques des composants du béton et des propriétés rhéologiques apportées par l'addition de laitier des hauts fourneaux. Le travail expérimental est mené sur des bétons où le ciment est substitué partiellement par différents pourcentages de laitier de hauts fourneaux 10% et 20%, où les paramètres rhéologiques du béton ont été mesurés par le rhéomètre ICAR.

Pour ce faire, ce travail est scindé en trois chapitres :

Le premier chapitre présente une recherche bibliographique sur les notions de bases de comportement rhéologique à l'état frais et à l'état durci et aussi un rappel sur l'effet de l'ajout du laitier haut fourneau dans le ciment.

Quant au deuxième chapitre, il la représente les différents matériaux utilisés dans cette étude, ainsi que leurs caractéristiques et la formulation de béton et ensuite les différents modes opératoire des essais à l'état durci.

Ce chapitre sera suivi d'un troisième chapitre qui présente les résultats obtenus par l'appareil ICAR rhéomètre et l'essai d'écrasement.

Bien entendu les résultats des essais effectués au laboratoire sont suivis d'une conclusion générale.

CHAPITRE 01

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

1.1 Introduction

Ce chapitre a pour objectif de présenter les notions théoriques générales des différents concepts abordés dans ce mémoire. Ce chapitre est divisé en deux sections : la première présente les notions associées au béton, aux ajouts de laitier de haut fourneau. La seconde porte sur l'étude rhéologique du béton.

1.2. Le béton :

Le béton est le matériau le plus utilisé dans les constructions à travers le monde. En effet, sa rapidité de fabrication, sa mise en place, son faible coût et ses performances mécaniques ainsi que sa durabilité ont contribué à accroître son utilisation pour tous les ouvrages, comme des immeubles de bureaux ou d'habitation, des ponts, des centrales nucléaires .

[<http://www.planete-tp.com/formulation-et-proprietés-du-béton-r154.html>]

1.2.1 Le ciment : est un liant hydraulique qui durcit sous l'action de l'eau

1.2.2 L'eau : est un élément essentiel pour la fabrication du béton. Elle est ajoutée lors du mélange afin d'hydrater le ciment et permet de lier les constituants du béton entre eux.

1.2.3 Les granulats : ensembles de grains minéraux ou de petits morceaux de roches de dimensions comprises entre 0 et 125mm destinés à réaliser des ouvrages de travaux publics, de génie civil et de bâtiment. [[http://www.unpp.fr/accueil/nos-activites/les granulats-en-bref/](http://www.unpp.fr/accueil/nos-activites/les-granulats-en-bref/)]

1.3 Les ajouts minéraux : Les additions minérales sont des matériaux minéraux finement divisés pouvant être partiellement substitués au ciment pour améliorer certaines de ses propriétés ou pour lui conférer des propriétés particulières. Les additions sont variées : le laitier granulé de haut fourneau, les calcaires, les pouzzolanes naturelles (siliceuses ou calciques), les fumées de silice, les cendres volantes [Adjoudj.M 2015]

1.4 Le laitier de haut fourneau :

1.4.1 Définition :

Le laitier est un sous-produit de l'élaboration de la fonte. Il est formé des constituants non ferreux, des fondants et des cendres de coke, et donc composé essentiellement de chaux (CaO), magnésie (MgO), silice (SiO₂) et alumine (Al₂O₃). L'élaboration du laitier peut conduire selon le traitement de refroidissement adopté, à deux formes minéralogiques :

Laitier vitrifié (granulé) : obtenu par refroidissement rapide par trempe.

Laitier cristallisé : obtenu par refroidissement lent à l'air du laitier liquide.

Ces deux formes minéralogiques sont fondamentalement différentes du point de vue cristallographique et réactivité chimique, et cela conditionne les propriétés des matériaux obtenus, donc leur utilisation.

Le laitier vitrifié présente une structure vitreuse, riche en énergie ce qui lui confère une hydraulicité latente.

Au contraire, le laitier cristallisé a une forme minéralogique stable et son pouvoir hydraulique, lorsqu'il existe, n'est que modeste. [Messaoudene.I]



Figure1.1. Laitier cristallisé et vitrifié de haut fourneau.

1.4.2 Les principales formes de laitier :

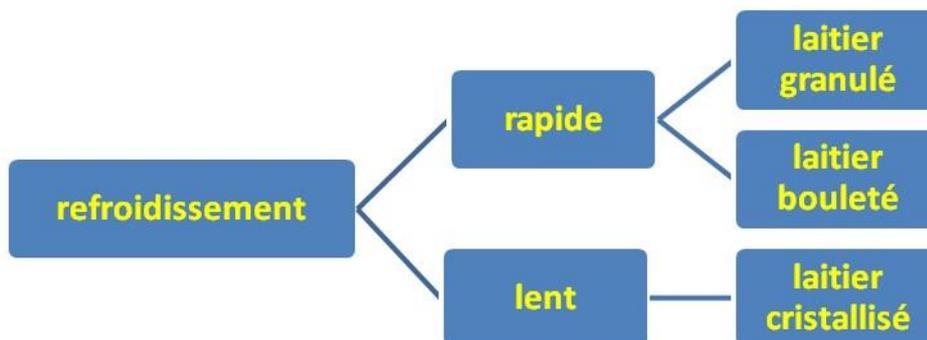


Figure1.2. Les principales formes de laitier

1.4.2.1 Laitier granulé (vitrifié) :

La granulation a été utilisée à l'origine comme moyen de fragmentation du laitier pour faciliter sa manutention.

Elle se faisait très simplement en déversant le jet de laitier liquide dans un bassin rempli d'eau. On s'avisa ultérieurement des propriétés hydrauliques latentes du laitier granulé ainsi obtenu. Le principe de la granulation est d'extraire le plus possible de chaleur d'une quantité de laitier fondu, en minimum de temps (il faut atteindre des températures inférieures à 800°C en un minimum de temps), pour obtenir l'état vitreux indispensable pour son utilisation comme substitut du ciment portland. [Messaoudene.I]

Ensuite, les différents types de granulations furent inventés et expérimentés pour :

- Améliorer la constante des caractéristiques du laitier granulé.
- Augmenter sa réactivité.
- Diminuer la consommation d'eau qui est importante (8 à 10 m³/t de laitier)

Tableau1.1 : Propriétés du béton au laitier granulé (LGHF) [Touati.A and Zahouani.H 2011].

Propriétés du béton	
Propriétés du béton frais	Commentaire
L'affaissement et l'ouvrabilité	Le LGHF améliore l'ouvrabilité et la cohésion du béton, et l'ampleur de cette amélioration va de pair avec la proportion de LGHF utilisé, cependant que le LGHF à finesse élevée n'améliore pas l'ouvrabilité du béton.
Le ressuage	L'utilisation de laitier n'as pas d'incidence significative sur le ressuage du béton.
L'augmentation autogène de la température	-L'utilisation du LGHF peut atténuer l'augmentation autogène de la température dans les éléments en bétons, ainsi que les risques de contraintes thermiques et de fissurations associée, si le pourcentage de laitier utilisé comme substitut partiel au ciment portland est suffisamment élevé (c.à.d. au
	moins 50%, pourvu que la finesse de Blaine se soit pas supérieure à environ 6000cm ² /g). -Par temps chaud, un pourcentage de remplacement plus élevé (>65%) pourrait s'avérer nécessaire.

Temps de prise	<p>-Le temps de prise du béton du laitier peut être plus lent que celui du béton de ciment Portland, en particulier en temps froid.</p> <p>-La prise plus lente dépend de la réactivité du laitier et de son pourcentage dans le mélange.</p>
----------------	---

La mise en place	<p>-Étant donné que le développement de la résistance légèrement plus lent du béton content du LGHF, sa mise en place est délicate par temps froid, puisque de faibles températures peuvent réduire encore davantage son temps de prise.</p> <p>-Par temps chaud, les temps de prise sont semblables à ceux du ciment Portland.</p>
Propriétés du béton durci	
Développement de la résistance	<p>-En général la résistance du béton contenant du LGHF se développe plus lentement, est plus faible initialement et égale ou supérieure à long terme à celle du béton Portland de résistance à la compression à 28 jours semblable.</p> <p>-Par temps chaud, le développement de la résistance peut être aussi rapide, sinon plus, que celui du béton de ciment portland.</p>
Retrait au séchage	<p>-Il n'y a pas de différences notables en ce qui concerne les caractéristiques de retrait entre le béton avec et sans LGHF comme ajout cimentaire, si la proportion de la pâte est la même.</p> <p>-Il est par ailleurs possible de tirer avantage de l'ouvrabilité améliorée et de la réduction possible d'eau nécessaire dans le cas du béton contenant du LGHF.</p>
Fluage	<p>-Le LGHF semble réduire le fluage en raison de l'augmentation de la résistance finale et du module d'élasticité du béton qu'il entraîne.</p>

1.4.2.2 Laitier bouleté :

La fragmentation du laitier résulte simultanément de l'action de l'eau et de l'air.

Le laitier liquide se déverse dans un tambour tournant cannelé à axe horizontal qui comporte des trous en périphérie, alimenté en eau sous pression. Des rampes d'arrosage extérieur complètent ce dispositif. Les particules sont projetées à plusieurs mètres du tambour, et d'autant plus loin qu'elles sont plus grosses.

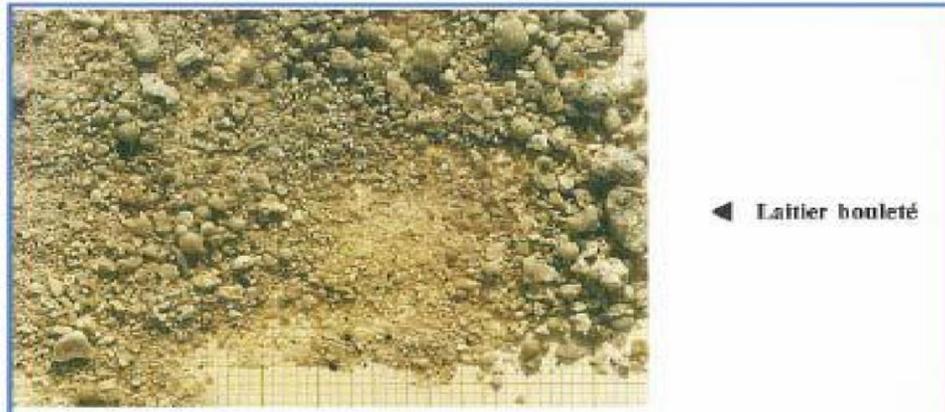


Figure 1.3. Laitier bouletée

1.4.2.3 Laitier cristallisé :

Un refroidissement lent entraîne la cristallisation du laitier. On obtient un matériau solide sous forme de gros granulats, après concassage et classification par fractions granulaires.

Le laitier en fusion séparé de la fonte coule dans une rigole vers la fosse où il va se refroidir naturellement et se solidifier en cristallisant d'où son nom de laitier cristallisé.

Après solidification de la surface, le refroidissement est activé par un arrosage qui accélère la progression du front de solidification et fragmente par choc thermique le laitier qui vient de se solidifier. [Messaoudene.I]

1.4.3 L'effet chimique et effet physique du laitier granulé

L'activité pouzzolanique est un phénomène aboutissant à la formation de phases susceptibles de manifester de la résistance mécanique après le durcissement. Elle se produit par l'effet de la réaction de la chaux sur les produits formés par l'attaque alcaline des silicates acides.

La réaction produit des hydrates semblables aux phases néoformées par l'interaction du clinker avec du laitier de haut fourneau : silicates de calcium et aluminates de calcium hydratés en présence d'un excès de chaux. Les réactions pouzzolanique mettent en jeu la portlandite Ca(OH)_2 dans le processus d'hydratation.

Le rôle chimique de laitier consiste à améliorer la microstructure de la pâte en fixant la portlandite Ca(OH)_2 libérée par l'hydratation de ciment. Cette dernière se présente sous forme de plaquette de faible résistance. Cette réaction pouzzolanique donne naissance à un deuxième silicate de calcium hydraté supplémentaire (C-S-H) principale responsable du durcissement de la pâte de ciment [$\text{Ca(OH)}_2 + \text{SiO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{C-S-H}$].

Le rôle physique de laitier finement broyée consiste à remplir les vides entre les grains de ciment, ce remplissage fait augmenter la compacité du béton et par conséquent sa résistance. (Messaoudene.I and Naceri.A 2006).

1.4.3.1 L'hydratation du laitier granulé de hauts fourneaux

L'initiation de la prise du laitier est liée à deux phénomènes successifs ne se produisant qu'en présence d'un activant (agent basique).

Ces deux phénomènes sont :

1/ Le passage en solution dans l'eau interstitielle de l'aluminium, du silicium et du calcium. Sous l'action des ions hydroxyle OH de la solution, la solubilisation étant accélérée à partir de pH 12.

2/ La cristallisation à partir de la phase aqueuse de composés hydratés dont la composition globale est plus riche en chaux que le laitier. L'apport de calcium est donc nécessaire pour l'hydratation pour prévenir la chute du pH en dessous du seuil d'attaque.

L'activant répond à une double fonction : il permet de maintenir le pH au-dessus de 12,6 par apport de chaux en excès et il participe à la formation des hydrates.

L'activation peut se produire selon différents mécanismes en fonction de la nature chimique de l'agent. Il existe : l'activation alcaline (sodique ou calcique), l'activation sulfatique et l'activation sulfo-calcique. Les produits formés sont alors de compositions et de dispositions différentes. L'activation des laitiers dans le ciment est de type calcique (à cause de la portlandite libérée par l'hydratation du ciment active) et un peu sulfo-calcique.

[Touati.A and Zahoani.H 2011]

1.4.4 Utilisation des laitiers de haut fourneau :

➤ En cimenterie :

L'emploi du laitier granulé en cimenterie est doublement important, car il permet à la fois des économies considérables d'énergie (réduction du combustible de 30 à 40 %), et permet d'obtenir des ciments présentant des propriétés variées.

Le laitier peut produire un liant hydraulique de plusieurs façons. Premièrement, il peut être mélangé à du calcaire et être utilisé comme matière première pour produire du ciment Portland par le procédé à sec. Le clinker obtenu à partir de ces matériaux est souvent utilisé avec le laitier dans la fabrication du ciment portland au laitier.

Cette utilisation du laitier est économique (car la chaux est présentée sous forme de CaO de sorte que l'on n'a plus à fournir l'énergie nécessaire pour la décarbonatation).

- Deuxièmement, dans la plupart des pays, le laitier granulé et broyé est utilisé dans le ciment portland comme ajout pour fabriquer des ciments portland au laitier. Troisièmement, le laitier du haut fourneau granulé broyé à une finesse appropriée peut être utilisé seul comme liant mais en présence d'un catalyseur à base d'alcali [http://decplay.fr/3517289-valorisation-des-dechets-industriels.html.]

➤ **Pour la confection des bétons :**

Dans un béton, le squelette granulaire (sable et granulats naturels peuvent être ; remplacé par le laitier vitreux et le laitier cristallisé concassé respectivement).le laitier concassé forme d'excellent granulats pour le béton.

- De même le laitier granulé entre dans la confection des bétons légers (bétons cellulaires), et les briques de laitiers. [[http://decplay.fr/3517289-valorisation des dechets-industriels.html](http://decplay.fr/3517289-valorisation-des-dechets-industriels.html).]

➤ **Pour les travaux routiers :**

- Les utilisations concernent la construction des chaussées, des routes, autoroutes et les assises où on peut utiliser soit le laitier granulé où le laitier concassé. [[http://decplay.fr/3517289-valorisation des dechets-industriels.html](http://decplay.fr/3517289-valorisation-des-dechets-industriels.html)]

1.4.5 Valorisation du laitier en Algérie :

L'utilisation des produits de laitier en Algérie est limitée à quelques rares applications malgré sa production progressant (500.000 tonnes/an).

En cimenterie, il entre comme un ajout secondaire ne dépassant pas 20 % (cette substitution est faite seulement dans quelques cimenteries).

Et en travaux routiers : A titre d'exemple, le laitier granulé a trouvé une utilisation dans la réalisation de la liaison autoroutière Annaba – Berrahal, où la couche de fondation été réalisée par une grave laitier tout laitier.

Des études intéressantes et récentes ont montré la possibilité d'utiliser les laitiers Algériens (d'El-Hadjar) pour :

- ✓ La fabrication des briques silico calcaires à base du laitier.
- ✓ La fabrication du béton cellulaire autoclave.
- ✓ La fabrication d'un ciment de laitier activé sans clinker. ([http://decplay.fr/3517289-valorisation des dechets-industriels.html](http://decplay.fr/3517289-valorisation-des-dechets-industriels.html).)

1.5 La rhéologie du béton :

La rhéologie, mot inventé par Bingham en 1929 à partir du verbe grec $\rho\theta\omega'$ qui veut dire couler, est l'étude des écoulements et des déformations, La rhéologie est l'étude du changement de la forme et de l'écoulement d'une mixture. Elle donne une meilleure définition des propriétés d'écoulement des matériaux cimentaires et fournit les grandeurs rhéologiques fondamentales (seuil d'écoulement, viscosité plastique) qui permettent de tracer des courbes d'écoulement caractéristiques des différents types de mélanges. L'étude des phénomènes physiques mis en jeu, dans l'étude des écoulements des mortiers et bétons revêt une importance particulière dans le domaine de la rhéologie. De telle approche, a pour but d'expliquer et d'analyser les propriétés rhéologiques macroscopiques du béton frais à partir du comportement des phases constitutives. L'organisation de ces différentes phases telles que la

viscosité du fluide suspensé, la forme et la taille des grains solides ainsi que leurs activités régissent le comportement rhéologique global de l'écoulement des matériaux cimentaires.

1.5.1 Comportement rhéologique du béton à l'état frais

Nombreux auteurs ont montré que le comportement rhéologique du béton à l'état frais est bien représenté par celui des fluides Binghamiens. La loi de comportement de Bingham s'écrit sous la forme suivante :

$$\tau = \tau_0 + \mu \dot{\gamma}$$

Avec :

τ (Pa) est la contrainte de cisaillement μ (Pa.s) est la viscosité plastique

τ_0 (Pa) est le seuil de cisaillement $\dot{\gamma}$ (1/s) est le taux de cisaillement

Le terme τ_0 apparaît comme la contribution de la phase solide et le terme $\mu \dot{\gamma}$ comme celle de la phase liquide.

A l'état frais le béton doit assurer la facilité de la mise en œuvre ainsi qu'une grande capacité de remplissage, celle-ci doit fournir les caractères rhéologiques visés à savoir : un béton homogène, stable et uniforme [Adjoudj.M 2015]

1.5.2 Vitesse de cisaillement :

Considérons un matériau comme un ensemble de couches moléculaires parallèles, emprisonné entre deux plans parallèles de surface S (séparés d'une distance dz). Un des plans est fixe, et le second est déplacé d'une distance dx à une vitesse constante de norme V_0 . [Maafi.L and Zehar.I 2017].

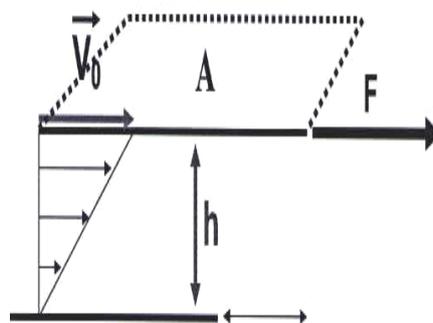


Figure 1.4. Schéma de la vitesse de cisaillement

Sous l'effet de ce cisaillement, le matériau s'écoule en couches planes, parallèles entre elles, animées de vitesses différentes qui varient continûment entre 0 pour la couche au contact de la surface fixe et V pour la couche au contact avec la surface mobile. Le déplacement entre les deux plans est défini comme la déformation, symbole γ suivant la relation :

$$\gamma = \frac{dx}{dz}$$

La norme du gradient de vitesse constant dans tout l'échantillon est définie comme la vitesse de cisaillement, appelée également vitesse de déformation ou taux de cisaillement, il s'agit de la vitesse de déformation entre deux couches successives voisines du fluide cisailé. Elle est souvent présentée comme étant la dérivée par rapport au temps de la déformation de cisaillement

$$\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{dx}{dz} \right) = \frac{d}{dz} \left(\frac{dx}{dt} \right) = \frac{dv}{dz}$$

La vitesse de cisaillement encore appelée gradient de vitesse $\dot{\gamma}$ La vitesse étant une longueur divisée par un temps, ce quotient s'exprime donc en inverse de seconde (s^{-1}). La valeur de la vitesse de cisaillement dépend par conséquent, non seulement de la vitesse de déplacement de la couche mobile mais aussi, et de façon critique, de l'épaisseur e cisailée. Si cette dernière est faible, on peut atteindre des vitesses de cisaillement très élevées.

1.5.3 La viscosité :

C'est une grandeur qui caractérise les frottements internes du fluide, autrement dit sa capacité à s'écouler. Elle caractérise la résistance d'un fluide à son écoulement lorsqu'il est soumis à l'application d'une force. C'est à dire, les fluides de grande viscosité résistent à l'écoulement et les fluides de faible viscosité s'écoulent facilement. Elle peut être mesurée par un viscosimètre à chute de bille dans lequel on mesure le temps écoulé pour la chute d'une bille dans le fluide. Elle peut également être mesurée par un récipient dont le fond comporte un orifice de taille standardisée. La vitesse à laquelle le fluide s'écoule par cet orifice permet de déterminer la viscosité du fluide. La viscosité est déterminée par la capacité d'entraînement que possède une couche en mouvement sur les autres couches adjacentes [Maafi.L and Zehar.I 2017].

1.5.3.1 la viscosité dynamique

C'est le rapport entre la contrainte de cisaillement et la vitesse de cisaillement du fluide

$$\mu = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}$$

1.5.3.2 la viscosité cinétique

C'est le rapport de la viscosité dynamique à la masse volumique du fluide

$$v = \frac{\mu}{\rho}$$

1.5.4 Seuil de cisaillement τ_0

Le seuil de cisaillement τ_0 est défini comme étant la contrainte de cisaillement minimale à atteindre pour qu'un fluide soumis à une déformation de cisaillement s'écoule. En dessous de cette valeur, cette mixture se comporte comme un pseudo-solide (pas de déformations permanentes) [Maafi.L and Zehar.I 2017]

1.5.5 Contrainte de cisaillement

Exprimant les forces de frottement entre les couches, forces qui s'exercent tangentiellement à la surface de ces couches.

$$\tau = dF/dS$$

Ou :

dF : projection de la force de frottement tangentielle.

dS : surface élémentaire d'une couche cisailée.

1.6 Facteurs affectant la rhéologie des bétons

Comme toutes les caractéristiques du béton, ses paramètres rhéologiques dépendent fortement de sa composition et des propriétés physico-chimiques de ses composants. Le tableau 1.2 présente des ordres de grandeur des paramètres rhéologiques pour pâte, mortier et béton [Adjouj.M 2015]

Tableau 1.2 : Ordres de grandeur des paramètres rhéologiques pour différents types de Matériau

Paramètres	Pâte	Mortier	BAP	Béton fluide	Béton ordinaire
Seuil de cisaillement τ_0 (Pa)	10-100	80-100	50-200	100-400	500-2000
Viscosité plastique μ (Pa.s)	0,01-1	1-3	20-100	20-100	50-100

- **Effet du rapport eau-ciment**

Normalement, l'augmentation du rapport E/C diminue le seuil de cisaillement et la viscosité plastique. Les auteurs qui ont noté cet effet ont souvent réalisé une gâchée de béton à un faible rapport E/C et par la suite ajouté successivement des quantités d'eau. La quantité de pâte de ciment n'est donc pas constante lors que le rapport E/C varie.

- **Effet des fibres**

Les études de l'effet de l'ajout de fibres sur la rhéologie du béton frais montrent que le comportement des bétons est Binghamien. Ses résultats montrent que lorsque la quantité de fibres augmente, la viscosité plastique et le seuil de cisaillement augmentent aussi. Lorsque la longueur des fibres augmente, seul le seuil de cisaillement augmente

- **Effet d'addition minérale**

Les substances minérales utilisées comme ajouts en cimenterie ou additifs lors de la confection du béton contribuent par leur activité physique, hydraulique et pouzzolanique à améliorer le comportement des ciments à l'état frais ainsi qu'à l'état durci. Plusieurs types d'ajouts sont bien connus tels que les pouzzolanes naturelles, les cendres volantes, les laitiers des hauts fourneaux ainsi que la fumée de silice. Ces produits deviennent plus actifs dans les solutions alcalines du ciment et donnent naissance à de nouveaux hydrates qui confèrent aux bétons une plus grande résistance mécanique et une meilleure durabilité. Par leur activité de surface et leur distribution granulaire, ils jouent un rôle fondamental dans le comportement rhéologique du béton.

1.7 Le rhéomètre

Un rhéomètre est un appareil de laboratoire capable de faire des mesures relatives à la rhéologie d'un fluide. Il applique en cisaillement à l'échantillon, généralement de faible dimension caractéristique (très faible inertie mécanique du rotor) il permet d'étudier fondamentalement les propriétés d'écoulement d'un liquide, d'une suspension, d'une pâte, etc... en réponse à une force appliquée.

Un rhéomètre est plus sophistiqué et plus chère qu'un viscosimètre. Il permet de connaître la grandeur fondamentale de taux de cisaillement, et contrainte de cisaillement et viscosité. Les mesures qu'il donne peuvent être comparées avec celles obtenues par d'autres techniques [<http://fr.m.wikipedia.org/wiki/rh%C3%A9om%C3%A8tre>]

- **ICAR rhéomètre**

Le rhéomètre ICAR est un instrument robuste et portable pour mesurer les propriétés fondamentales rhéologiques du béton frais. L'instrument a été développé au centre international pour la recherche agrégée (ICAR) située à l'université du Texas à Austin pour combler le besoin d'une méthode pour caractériser le comportement réel des mélanges de béton. Les méthodes traditionnelles de mesure des flux de chutes ou de chutes ne sont pas capables de caractériser les propriétés rhéologiques fondamentales du béton qui existent pendant les processus de mélange, transport et de placement. En conséquence, la performance des mélanges de béton innovants ne peut pas être mesurée avec ces méthodes traditionnelles basées sur les décrochages. Le rhéomètre ICAR fournit, pour la première fois, un instrument peu coûteux et simple à utiliser qui peut être utilisé pour :

Recherche et développement pour caractériser l'influence de nouveaux matériaux sur la rhéologie de béton.

Optimiser les proportions de mélange afin que le béton résultant s'écoule facilement mais résiste à la ségrégation (particulièrement important pour le béton auto-consolidant) Contrôle de qualité sur place [Maafi.L and Zehar.I 2017]

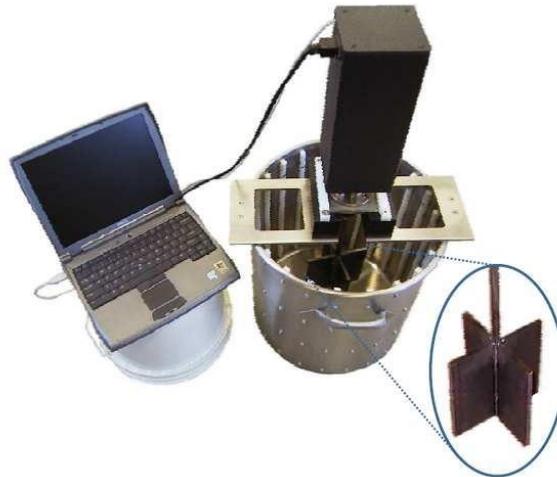


Figure 1.5. Le rhéomètre ICAR et ses constituants

- **Principe**

Le béton frais peut être considéré comme un fluide, ce qui signifie qu'il s'écoulera sous l'action des contraintes de cisaillement. Le comportement d'écoulement du béton peut être représenté par la relation à deux paramètres suivants :

$$\tau = \tau_0 + \mu \dot{\gamma}$$

Qui est connu sous le nom de model Bingham : le paramètre τ_0 est le stress élastique, et il représente la contrainte de cisaillement requise pour amorcer l'écoulement. la pente de la ligne est la viscosité plastique et elle affecte la résistance a l'écoulement après que la contrainte de rendement a été surpassée. Ces deux paramètres, qui définissent la courbe d'écoulement, fournissent une description complète du comportement d'écoulement d'un fluide [Maafi.L and Zehar.I 2017].

- **Mode opératoire**

Le rhéomètre ICAR plus est composé d'un récipient pour contenir le béton frais, une tête de conducteur qui comprend un moteur électrique et un compteur de couple ; une aube a quatre lames qui est retenue par le mandrin sur le conducteur ; un cadre pour attacher pilote/palette au sommet du conteneur ; et un ordinateur portable pour faire fonctionner le conducteur, enregistrer le couple pendant le test et calculer les paramètre de la courbe d'écoulement. Le récipient contient une série de tiges verticales autour du périmètre pour éviter le glissement du béton le long de la paroi du récipient pendant le test. la taille de conteneur et la longueur de

l'arbre de la palette sont sélectionnées en fonction de la taille maximale nominale de l'agrégat. Le diamètre et la hauteur des aubes sont à la fois de 127mm.

Deux types de tests sont effectués. Le premier type est un test de croissance du stress dans lequel l'aube est tournée à une vitesse lente constante de 0.025 rev/s l'augmentation initiale du couple est mesurée en fonction du temps. Le couple maximal mesuré lors de ce test est utilisée pour calculer le stress statique. L'autre type d'essai est un test de la courbe d'écoulement pour déterminer le stress élastique dynamique et la viscosité plastique. Le teste de la courbe d'écoulement commence par une période de « panne » dans laquelle la girouette tourne à la vitesse maximale. Ceci est faire pour décomposer toute structure thixotropie qui peut exister et pour fournir un historique de cisaillement cohérent avant de mesurer les paramètres de Bingham. la vitesse de la palette est maintenue constante et la vitesse moyenne et le couple sont enregistrés. la parcelle de couple par rapport la vitesse de rotation de l'aube définit la courbe d'écoulement à partir de laquelle les paramètres Bingham sont calculés.

Le logiciel ICAR plus rhéomètre effectue toutes les fonctions nécessaires : actionne le conducteur, enregistre le couple, calcule les résultats des tests et stocks les données. L'ensemble du test est contrôlé à partir d'un seul écran. L'utilisateur définit la géométrie du test et fournit les paramètres de test pour exécuter le teste de croissance du stress et le teste de la courbe d'écoulement. Une simple pression sur le bouton « Démarrer » déclenche le test de croissance du stress et le test de la courbe d'écoulement démarre en appuyant sur le deuxième bouton « Démarrer ». les deux test sont terminés dans 1 minute. [Maafi.L and Zehar.I 2017].

1.8 Comportement de béton a l'état durci

L'allure qualitative de la réponse des matériaux à quelques essais simples permet de les ranger dans des classes bien définies. Ces comportements «de base», qui peuvent être représentés par des systèmes mécaniques élémentaires, sont l'élasticité, la plasticité et la viscosité. Les éléments les plus courants sont, en figure 2.6 :

1. Le ressort, qui symbolise l'élasticité linéaire parfaite, pour laquelle la déformation est entièrement réversible lors d'une décharge, et où il existe une relation biunivoque entre les paramètres de charge et de déformation (figure 1.6a).
2. L'amortisseur, qui schématise la viscosité, linéaire (figure 1.6b) ou non-linéaire (figure 1.6c). La viscosité est dite pure s'il existe une relation biunivoque entre la charge et la vitesse de chargement. Si cette relation est linéaire, le modèle correspond à la loi de Newton.
3. Le patin, qui modélise l'apparition de déformations permanentes lorsque la charge est suffisante (figure 1.6d). Si le seuil d'apparition de la déformation permanente n'évolue pas avec le chargement, le comportement est dit plastique parfait. Si, de plus, la déformation avant écoulement est négligée, le modèle est rigide-parfaitement plastique.

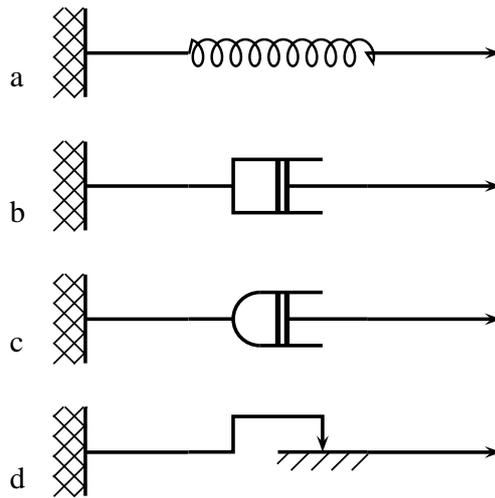


Figure 1.6. Les briques de base pour la représentation de comportement.

Ces éléments peuvent être combinés entre eux pour former des modèles rhéologiques. Ceux-ci représentent des systèmes mécaniques qui servent de support dans la définition des modèles. Il ne faut en aucun cas leur accorder un trop grand crédit pour ce qui concerne la représentation des phénomènes physiques qui sont à la base des déformations. La réponse de ces systèmes peut être jugée dans 3 plans différents, qui permettent d'illustrer le comportement lors d'essais de type :

- **écrouissage**, ou augmentation monotone de la charge ou de la déformation, (plan $\varepsilon-\sigma$)
- **fluage**, ou maintien de la charge (plan $t-\varepsilon$).
- **relaxation**, ou maintien de la déformation (plan $t-\sigma$).

Les réponses de modèles classiques sont reportées dans ces 3 plans pour les cas :

- du solide élastique.
- du solide viscoélastique (modèle de Voigt), qui comporte un ressort et un amortisseur en parallèle
- du solide élastique-parfaitement plastique, (modèle de Saint-Venant), constitué par un ressort linéaire et un patin en série ; lorsque le module E tend vers l'infini, le modèle devient rigide-parfaitement plastique,
- du solide élastique-plastique écrouissable, (modèle de Saint-Venant généralisé), qui donne une courbe de traction linéaire par morceaux,
- du solide élastique-parfaitement viscoplastique, (modèle de Norton), formé par un amortisseur non linéaire, ou modèle de Bingham-Norton, qui comporte un ressort linéaire en série avec un amortisseur et un patin situés en parallèle; lorsque le seuil du patin tend vers zéro, et que l'amortisseur est choisi linéaire, ce dernier modèle dégénère en un modèle de fluide visqueux, modèle de Maxwell, comportant un ressort et un amortisseur en série.

- du solide élastique-viscoplastique écrouissable, qui représente le schéma le plus complexe [Georges C and Samuel F]

1.9 Conclusion

Cette étude bibliographique est une revue de documentation sur tous les paramètres qui concernent le comportement rhéologiques à l'état frais mais aussi à l'état durci du béton ainsi sur l'effet de l'addition du laitier de haut fourneau sur les propriétés du béton.

CHAPITRE 02

MATERIELES,

MATERIAUX ET ESSAIS

2.1 Introduction

Ce chapitre présente les différents matériaux utilisés dans cette étude, ainsi que leurs caractéristiques et représente les calculs de formulation de béton et ensuite les différents modes opératoires des essais destructifs et non destructifs.

2.2 Matériaux utilisés

Nous avons utilisé des matériaux locaux, provenant de la centrale à béton EL IKHWA MEBARKIA CONSTRUCTION. Leurs caractéristiques sont étudiées expérimentalement au laboratoire des travaux publics de l'Est Bordj Bou Arreridj.

2.3 Caractéristiques des matériaux

2.3.1 Caractéristiques du gravier

Le gravier utilisé pour la confection du béton est un gravier obtenu après concassage de la roche. Les fractions utilisées sont : (3/8) et (8/15).

2.3.1.1 Analyse granulométrique par tamisage [NF EN 933-1]

- **But de l'essai**

L'analyse granulométrique a pour but de déterminer la grosseur et le pourcentage pondéral respectif des différents grains consistants l'échantillon.

➤ **Principe de l'essai**

L'essai consiste à fractionner au moyen d'une série de tamis un matériau en plusieurs classes granulaire de tailles décroissantes. Les dimensions de mailles et de nombre des tamis sont choisies en fonction de la nature de l'échantillon et de la précision attendue.

Les masses des différents refus et tamisât sont rapportées à la masse initiale du matériau. Les pourcentages ainsi obtenus sont exploités sous forme de tableau ou graphique.

➤ **Préparation de l'échantillon pour l'essai**

L'échantillon doit être préparé suivant la prescription de la norme [NF EN 933-1]. La masse M de l'échantillon pour essai doit être supérieure à $(D/10)^2$, avec M exprimé en grammes et D plus grande dimension spécifiée en millimètres.

L'opération du tamisage du gravier se fait au moyen d'une tamiseuse ou on place la série des tamis sur le cercle inférieur du cadre de l'appareil en suite l'ensemble est serré aux montants par la couronne supérieure, à l'aide de deux jeux de ressort et vis de blocage.

La vibration se fait 03 fois durant 07 minutes à chaque fois.

Les résultats obtenus sont présentés dans les tableaux 2.1 et 2.2 et les figures 2.1 et 2.2 ci-dessous :

Tableau 2.1. L'analyse granulométrique du gravier 3/8

Diamètre de tamis (mm)	Refus partiel(g)	Refus cumulés	% des refus cumulés	% de tamis cumulés
8	0	0	0	100
6.3	48.88	48.88	8.14	91.86
5	189.03	237.91	39.65	60.35
4	184.47	422.38	70.39	29.61
3.15	163.48	585.86	97.64	23.6
2.5	9.98	595.84	99.30	0.74
fond	1.90	597.74	99.62	0.38

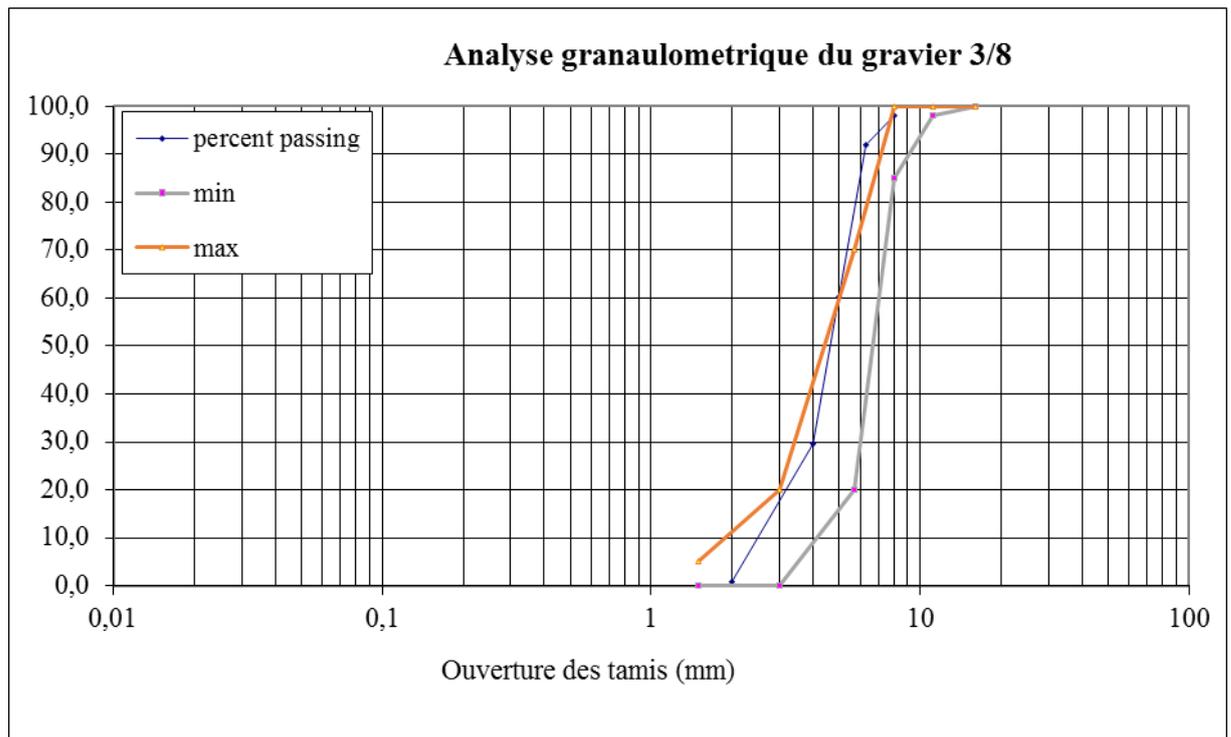


Figure 2.1. Courbe de l'analyse granulométrique du gravier 3/8

Tableau 2.2. L'analyse granulométrique du gravier 8/15

Diamètre de tamis (mm)	Refus partiel(g)	Refus cumulés	% des refus cumulés	% de tamis cumulés
16	26.35	26.35	1.01	98.99
12.5	445.67	472.02	19.69	80.31
10	898.99	1371.01	54.26	45.74
8	507.06	1878.07	73.77	26.23
6.3	620.86	2498.93	97.65	2.35
5	51.99	2550.92	99.65	0.35
fond	7.92	2558.84	99.84	0.16

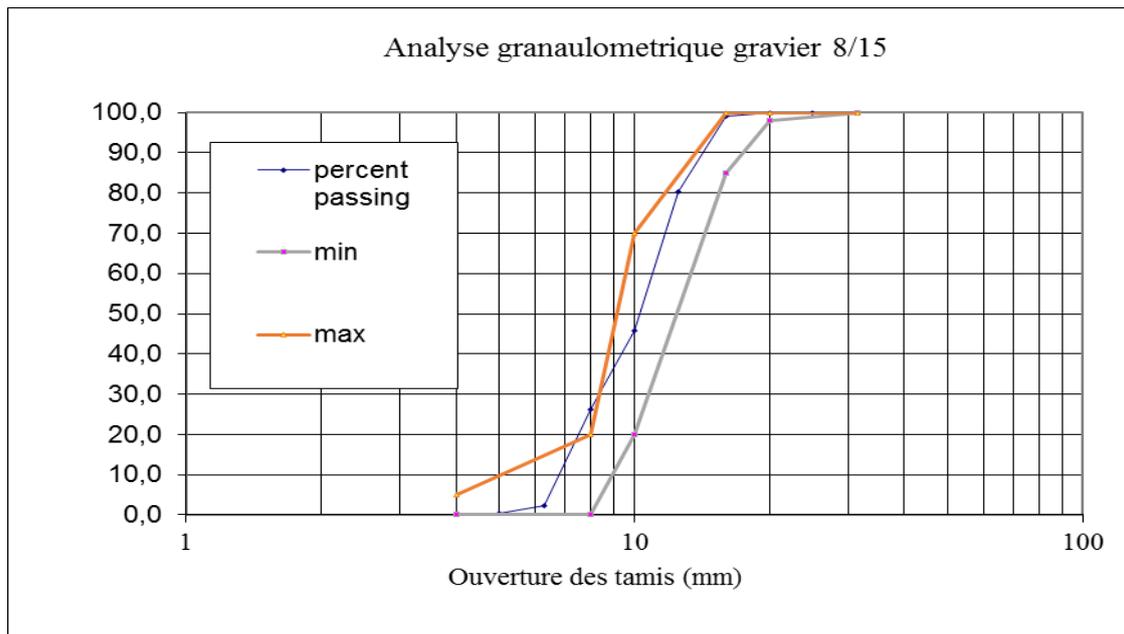


Figure 2.2. Courbe de l'analyse granulométrique du gravier 8/15

2.3.1.2 Le coefficient d'aplatissement

➤ But de l'essai

L'élaboration des bétons de ciment, ainsi que la réalisation des corps de chaussées et des couches de roulement, nécessitent de n'utiliser que des granulats ayant une forme assez ramassée, à l'exclusion des granulats plats. En effet, ceux-ci ne permettent pas de réaliser un béton très compact. La détermination du coefficient d'aplatissement est l'un des tests permettant de caractériser la forme plus ou moins massive des granulats.

Le coefficient d'aplatissement s'obtient en faisant une double analyse granulométrique, en utilisant successivement, et pour le même échantillon de granulat.

- une série de tamis normalisés à mailles.
- une série de tamis à fentes de largeurs normalisées

Forme d'un granulat et coefficient d'aplatissement :

La forme d'un granulat est définie par trois grandeurs géométriques

- a. La longueur L , distance minimale de deux plans parallèles tangents aux extrémités du granulat,
- b. L'épaisseur E , distance minimale de deux plans parallèles tangents au granulat

La conduite de l'essai :

- i. On opère, comme dans l'analyse granulométrique, avec un échantillon de masse M , $0,2D$, D -étant le diamètre maximum des granulats en millimètres, et M la masse de l'échantillon, exprimé en Kg.

- ii. L'échantillon est tamisé sur un tamis de 4 mm d'ouverture et e refus de masse M0 qui est pesé au gramme, est utilisé pour la détermination de A.
- iii. On note les résultats dans le tableau suivant.

Tableau 2.3. Le coefficient d'aplatissement

Détermination du coefficient d'aplatissement				
Tamisage sur tamis		Tamisage sur grille		
Classes granulaires d/D (mm)	Masse du refus M1(g)	Ecartement des grilles (mm)	Passant M2(g)	$A = \frac{M2}{M1} 100$
16/20	15.05	10	83.73	84.6
12.5/16	114.08	8	32.47	
10/12.5	154.33	6.3	47.7	
8/10	59.87	5	52.4	
6.3/8	26.14	4	51.32	
5/6.3	0.86	3.15	45.69	
4/5		2.5		
$\Sigma M1=370.33g$		$\Sigma M2=313.31$		

➤ **Principe de l'essai**

2.3.1.3 La masse volumique

La masse volumique d'un corps est la masse de l'unité sur le volume de ce corps.

Il ne faut pas confondre entre la masse volumique et la densité : une densité est le quotient entre la masse de certain volume d'un matériau et la masse du même volume d'eau à 4°C ; c'est-à-dire une grandeur sans unité. Comme il existe le volume apparent et le volume absolu, on distinguera :

A. La masse volumique apparente papp

C'est la masse d'un corps par unité de volume apparent en état naturel (y compris les vides et les capillaires). Elle est exprimée en (c/cm³, kg/m³, t/m³).

➤ **Principe**

Il s'agit de remplir une mesure de 1 litre ou plus (2 litres, 5 litres) avec le matériau et de déterminer la masse du contenu.

Le mode de remplissage de la mesure a une influence très importante sur les résultats, il faudra réaliser les essais avec du matériel aussi simple que possible et très soigneusement.

➤ **Mode opératoire**

- Peser le récipient à vide et noter M1,
- Prendre le matériau dans les 2 mains formant entonnoir,
- Placer les 2 mains à 10 cm environ au-dessus de la mesure et laisser tomber le matériau ni trop vite, ni trop lentement,
- Verser ainsi le matériau au centre de la mesure jusqu'à ce déborde autour en formant un cône,
- Araser à la règle,
- Peser le contenu et noter M2.
- Il résulte que :

$$\rho_{app} = M/V$$

M : masse du gravier.

V : volume de récipient.

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 2.4 suivant :

Tableau 2.4. La masse volumique apparente (ρ_{app}) des graviers 3/8 et 8/15.

Gravier	M (kg)	V(L)	ρ_{app} (kg/l)	ρ_{app} Moy (kg/l)
3/8	1.54	1	1.54	1.54
	1.55		1.55	
	1.55		1.55	
8/15	7.78	5	1.56	1.56
	7.78		1.56	
	7.80		1.56	

B. la masse volumique absolue ou spécifique

C'est la masse d'un corps par unité de volume absolu de matière pleine (volume de matière seul sans tenir compte des vides et des pores). Elle est exprimée en (c/cm³, kg/m³, t/m³).

➤ **principe**

Le volume absolu ou réel d'un corps est généralement déterminé en mesurant le volume d'un liquide que déplace l'introduction de ce corps.

De nombreuses méthodes permettent de déterminer les masses et volumes des matériaux à étudier, dans notre étude en va utiliser la méthode de l'éprouvette graduée.

➤ **Mode opératoire**

- Mettre dans une éprouvette graduée en verre un volume d'eau V₁ (400 ml).
- Peser une masse M du corps (300 g) et l'introduire dans l'éprouvette.
- Bien éliminer les bulles d'air.
- Lire le nouveau volume V₂.
- Le volume absolu ou réel est : $V = V_2 - V_1$
- La masse volumique réelle est : $\rho = M / (V_2 - V_1)$.

Les résultats obtenus sont classés dans le tableau 2.5 suivant :

Tableau 2.5. La masse volumique absolue (ρ abs) des graviers 3/8) et 8/15.

Gravier	M(g)	V ₁ (ml)	V ₂ (ml)	ρ abs	ρ moy (kg/l)
3/8	300	400	515	2.60	2.66
			510	2.72	
8/15	300	400	510	2.72	2.66
			515	2.60	

2.3.1.3 La porosité

C'est le rapport du volume des vides d'un matériau et son volume total, elle représente donc le degré de remplissage de son volume occupé par les vides.

La porosité est exprimée en pourcentage (%) et définie par la relation :

$$P(\%) = \frac{V_v}{V_t} \times 100$$

En peut exploiter les résultats des masse volumique pour déterminer la porosité de notre gravier d'où :

$$P(\%) = \left(1 - \frac{\rho_{app}}{\rho_{abs}} \right) \times 100$$

2.3.1.4 La compacité

C'est le quotient du volume des grains solides et le volume total du matériau, elle exprime en pourcentage (%) et donner par la relation suivante :

$$C(\%) = \frac{V_s}{V_t} \times 100$$

Aussi :

$$C(\%) = 1 - P$$

2.3.1.5 l'indice des vides

C'est le rapport entre le volume occupé par les vides et le volume de la partie solide des grains, V étant le volume total occupé par les granulats.

$$e(\%) = \frac{V_v}{V_s}$$

Aussi :

$$e(\%) = \frac{1 - C}{C}$$

Tableau 2.6. Porosité, Compacité et Indice de vides des graviers.

Gravier	Porosité (%)	Compacité (%)	Indice des vides (%)
3/8	42	58	72.24
8/15	41	59	69.5

2.3.1.6 la résistance à la fragmentation par chocs : essai los Angeles [NA EN 1097-2]

➤ **But de l'essai**

Estimer la résistance à la fragmentation par chocs ou bien la dureté des agrégats et à l'usure par frottements.

➤ **Principe de l'essai**

Faire rouler dans un tambour rotatif un échantillon de granulats mélangé à des boules d'acier. À la fin, on évalue la quantité de matériau retenu sur le tamis de 1.6 mm

Il se pratique sur une des six classes granulaires qui sont : (4/6.3), (6.3/10), (10/14), (10/25), (16/31.5) ou (25/50).

On place un échantillon de 5 kg de granulats et 7 à 12 boulets d'aciers dans un tambour pouvant tourner de son axe, la charge des boules est fixée conformément aux indications du tableau 2.7 ci-dessous :

Tableau 2.7. Adaptation des charges des boulets correspondant à la classe granulaire [19]

Classe granulaire (mm)	Nombre de boulets	Masse totale de la charge (g)	
4-6.3	7	3080	+20 à -150
6.3-10	9	3960	
10-14	11	4840	
10-25	11	4840	+20 à -150
16-31.5	12	5280	
25-50	12	5280	

➤ **Mode opératoire**

- Après introduction de l'échantillon et les boules d'acier avec soin dans le tambour, en faire opérer la machine de Los Angeles.
- Faire effectuer à la machine 500 rotations avec une cadence régulière comprise entre 30 tr/min à 33 tr/min.
- Après l'achèvement de l'essai, recueillir les granulats dans un bac placé sous l'appareil, en ayant soin d'amener l'ouverture, juste au-dessus de ce bac, afin d'éviter les pertes de matériau.
- Tamiser le matériau contenu dans le bac sur le tamis de 1.6 mm
- Laver le refus au tamis de 1.6 mm égoutter et sécher à l'étuve à 105°C, jusqu'à masse constante

Peser ce refus une fois sécher. Soit **P** le résultat de la pesée :

$$P = 5000 - \text{refus}$$

Le coefficient de Los Angeles LA est donné par la relation suivante :

$$LA = 100 \left(\frac{P}{5000} \right)$$

P : est le passant à 1.6 mm

Le tableau 2.8 donne l'estimation de la dureté des agrégats en fonction du coefficient LA :

Tableau 2.8. Estimation de la dureté des agrégats en fonction du coefficient LA

Coefficient LA	Estimation de la dureté des agrégats
<20	Très dure
20 à 25	Dur

25 à 30	Assez dure
30 à 40	Mis dure
40 à 50	Tendre
>50	Très tendre

Les résultats obtenus sont inscrits dans le tableau 2.9 suivant :

Tableau 2.9. Résultats d'essai de Los Angeles des graviers 3/8 et 8/15.

Fraction granulaire	Refus(g)	P(g)	LA (%)
(3/8)	3749.2	1250.8	25.01
(8/15)	3809.93	1190.07	23.80

Les valeurs de la résistance à la fragmentation montrent que le gravier testé est dur et reconnu apte pour la confection du béton.

2.3.1.7 degré d'absorption d'eau [NA EN 1097-6]

C'est le pouvoir d'un matériau d'absorber et de retenir l'eau. Elle est exprimée en (%) et définit par la formule :

$$A(\%) = \left[\frac{M_h - M_s}{M_s} \right] \times 100$$

M_h : La masse du matériau saturé d'eau en (g)

M_s : La masse du matériau sec en (g).

Les résultats sont regroupés dans le tableau 2.10.

Tableau 2.10. Degré d'absorption d'eau des graviers 3/8 et 8/15.

Fraction	Mh(g)	Ms(g)	A (%)
3/8	1000	986.63	1.35
		986.65	
		986.68	
8/15	1000	995.93	0.40
		995.94	
		995.98	

2.3.2 Caractéristique du sable

Deux types de sables sont utilisés, l'un c'est un sable concassé issu de la centrale à béton EL IKHWA MEBARKIA et l'autre c'est un sable de dune (Boussaâda)

2.3.2.1 Analyse granulométrique

Même procédé pour le gravier

➤ Mode opératoire

Le mode est identique à celui du gravier, la seule différence est la durée de l'essai car pour le sable il ne suffit que de 3 minutes.

Tableau 2.11. Les résultats de l'analyse granulométrique du sable de dune.

Diamètre de tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulés	% des refus cumulés	% de tamis cumulés
5	0	0	0	100
2.5	0	0	0	100
1.25	0	0	0	100
0.63	0	0	0	100
0.315	11	11	3.67	96.33
0.16	252	263	87.66	12.34

0.08	34	297	99	1
Fond	3	300	100	0

Tableau 2.12. Résultats de l'analyse granulométrique pour le sable concassé.

Diamètre de tamis (mm)	Refus partiel(g)	Refus cumulés	% des refus cumulés	% de tamis cumulés
2.5	64.01	64.01	21.33	78.67
1.25	111.55	175.56	58.52	41.48
0.63	40.81	216.37	72.12	27.88
0.315	27.68	244.05	81.35	18.65
0.16	14.98	259.03	86.34	13.66
0.08	12.98	272.01	90.67	9.33
Fond	23.70	295.71	98.57	1.43

Le sable de dune est trop fin, on devrait le corriger par le sable concassé. Après plusieurs essais, on a opté pour le mélange suivant : 75% de sable concassé (SC) Et 25% de sable de dune (SD)

Tableau 2.13. Résultats de l'analyse granulométrique pour le sable de mélange

Diamètre de tamis (mm)	Refus partiel(g)	Refus cumulés	% des refus cumulés	% de tamis cumulés
5	0	0	0	100
2.5	48	48	16	84
1.25	75	123	41	59
0.63	39	162	54	46
0.315	24	186	62	38
0.16	78	264	88	12
0.08	15	279	93	7

Fond	21	300	100	0
------	----	-----	-----	---

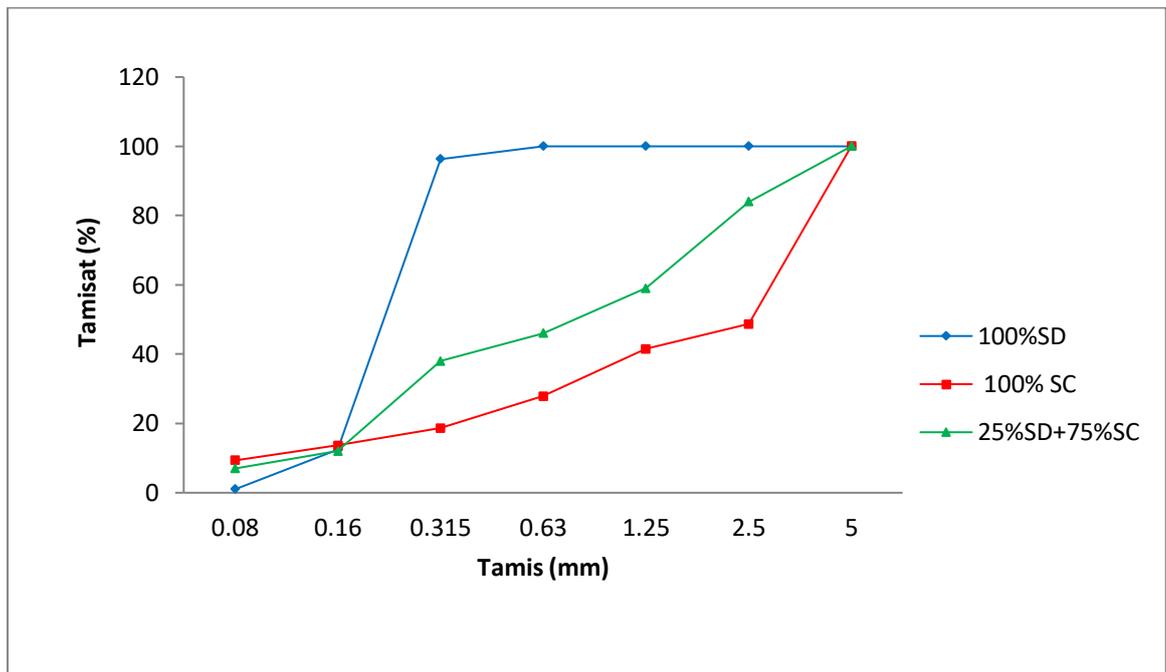


Figure 2.3 Courbe de l'analyse granulométrique du sable

2.3.2.2 Le module de finesse du sable [NFP 18-540]

Les sables doivent présenter une granulométrie telle que les éléments fins ne soient ni en excès, ni en trop faible proportion.

- Le caractère plus ou moins fin d'un sable peut être quantifié par le calcul du module de finesse (MF).
- Le module de finesse est d'autant plus petit que le granulat est riche en éléments fins.

Le module de finesse est égal au 1/100 de la somme des refus cumulés exprimée en pourcentages sur les tamis de la série suivante : 0,16 - 0,315 - 0,63 - 1,25 - 2,5 - 5 mm

MF : module de finesse = 1/100

(\sum refus cumulée en % des tamis 0,16 - 0,315 - 0,63 - 1,25 - 2,5-5)

Tableau 2.14. La qualité du sable en fonction de leur module de finesse

MF	La qualité du sable
1.8 et 2.2	le sable est à majorité de grains fins
2.2 et 2.8	on est en présence d'un sable préférentiel
2.8 et 3.3	le sable est un peu grossier. Il donnera des bétons résistants mais moins maniabiles

1) Sable de dune (SD) :

$$MF=1/100(87.66+3.67)=91.33/100=0.913$$

MF=0.91

2) Sable concassé (SC) :

$$MF=1/100(86.34+81.35+72.12+58.52+21.33)=319.66/100=3.2$$

MF=3.2

3) Sable mélange (SD+SC) :

$$MF=1/100(88+62+54+41+16)=261/100=2.61$$

MF=2.61

Tableau 2.15 résultats du module de finesse des sables

Sables	MF
SD	0.91
SC	3.20
SD+SC	2.61

2.3.2.3 la masse volumique du sable

La masse volumique du sable se mesure de la même manière que le gravier

- **La masse volumique apparente (ρ_{app})**

Tableau 2.16. La masse volumique apparente (ρ_{app}) du sable.

Sable	M (kg)	V(L)	ρ_{app} (kg/l)	ρ_{app} Moy (kg/l)
SD	1.43	1	1.43	1.44
	1.45		1.45	
	1.45		1.45	
SC	1.72		1.72	1.72
	1.74		1.74	
	1.71		1.71	
	1.76		1.76	

SD+SC	1.76		1.76	1.75
	1.75		1.75	

- **la masse volumique absolue ou spécifique**

Tableau 2.17. La masse volumique absolue (ρ abs) du sable

Sable	M(g)	V1 (ml)	V2 (ml)	ρ abs	ρ moy (kg/l)
SD	300	400	505	2.85	2.78
			510	2.72	
SC			511	2.7	2.7
			511	2.7	
SD+SC			509	2.75	2.73
			510	2.72	

2.3.2.4 la porosité, la compacité et l'indice de vides du sable

Tableau 2.18 Porosité, Compacité et Indice de vides du Sable

gravier	Porosité (%)	Compacité (%)	Indice des vides (%)
SD	48	52	92
SC	36	64	56
SD+SC	36	64	56

2.3.2.5 Essai au bleu de méthylène [NF EN 933-9]

➤ Objectif et principe de l'essai

L'essai au bleu de méthylène, ou « essai au bleu », est utilisé pour déterminer la propreté d'un sable, d'un granulat et plus généralement d'un sol. L'essai consiste à déterminer la quantité de particules argileuses présentes dans l'échantillon. Pour cela on utilise du bleu de méthylène.

Dans le domaine du béton, ces particules perturbent l'hydratation du ciment et entraînent des défauts d'adhérence entre les granulats et la pâte.

➤ **Mode opératoire**

- Prélever une masse de 200gr.
- Verser un échantillon de 200 gr pour la fraction 0/2mm et plus de 30gr pour la fraction 0/0.125 dans le Bécher et ajouter 500ml d'eau distillée. Agiter sans arrêt le mélange à l'aide de l'agitateur à ailettes pendant 5 minutes.
- Ajouter 5 cm³ de bleu de méthylène dans le Bécher.
- Prélever une goutte de mélange et la placer sur papier filtre.
 - Si la tache centrale est entourée d'une auréole bleu turquoise, le test est positif. Dans ce cas l'essai est terminé, les particules argileuses sont alors saturées en Bleu de Méthylène. On recommence l'essai à l'identique, cinq fois à intervalle d'une minute pour le confirmer.
 - Si la tâche est entourée d'une auréole humide incolore, le test est négatif. Dans ce cas, on ajoute du bleu de méthylène par prises de 5cm³ jusqu'à ce que le teste soit positif. On répète l'essai à l'identique, cinq fois à intervalle d'une minute pour le confirmer.
- Calculer la valeur au bleu (VB) en appliquant la formule suivante :

$$VB = \frac{V}{M} \times 10$$

Avec :

V : le volume du bleu introduit en centimètre cube

M : la masse sèche de l'échantillon en gramme.

Plus la valeur au bleu est élevée, moins le sable est propre. Les préconisations sont variables selon l'usage des sables ou gravillons, trois niveaux de propreté sont définis.

Tableau 2.19. Les catégories de la propreté du matériau par rapport aux limites des valeurs de VB

Catégorie	A	B	C
Limite des valeurs de VB	$VB \leq 1,5$	$1,5 \leq VB \leq 2,5$	$VB > 2,5$

Tableau 2.20. Résultat de l'essai au bleu de méthylène

Sables	M(g)	V (cm ³)	VB
SD	200	5	0.25
		5	
		5	
SC		5	0,75
		10	
		15	
SD+SC	200	5	0.5
		10	

2.3.2.7 Equivalent de sable

➤ **Principe de l'essai**

Cet essai permet de mettre en évidence des traces d'argile, de limon ou de matières très fines, contenues dans un sol sableux.

➤ **Mode opératoire**

- Tamiser le matériau à tester de façon à séparer les éléments sableux les plus grossiers des particules fines (fraction 0/2), puis en prélever 120 gr.
- Remplir une éprouvette avec la solution lavande jusqu'au premier trait de jauge.
- Verser les 120 gr de l'échantillon dans l'éprouvette à l'aide de l'entonnoir. Préparer de la même façon une seconde éprouvette.
- Laisser les deux éprouvettes au repos pendant 10 minutes.
- Boucher les éprouvettes à l'aide des bouchons et les agiter avec la machine agitatrice.
- Remplir les éprouvettes jusqu'au second trait de jauge en lavant le bouchon et les parois intérieures afin de récupérer toutes les impuretés et le sable au fond des tubes.
- Laisser reposer chaque éprouvette 20 minutes en tenant compte des décalages de temps dus aux manipulations.
- Abaisser le piston dans le liquide pour séparer le floculat de l'eau. Lire les valeurs de h1 et h2 à l'aide d'une règle.
- Calculer « ES » en remplaçant h1 et h2 dans la formule suivante :

$$ES = h2/h1 \times 10$$

Tableau 2.21. Les préconisations en matière de propreté pour les sables utilisés dans les bétons.

SE	Nature et qualité du sable
SE<60	Sable argileux - Risque de retrait ou de gonflement, à rejeter pour des bétons de qualité
$60 \leq SE < 70$	Sable légèrement argileux - de propreté admissible pour béton de qualité quand ou ne craint pas particulièrement de retrait
$70 \leq SE < 80$	Sable propre - à faible pourcentage de fines argileuses Convenant Parfaitement pour les bétons de haute qualité.
SE >80	Sable très propre - l'absence presque totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra rattraper par une augmentation du dosage en eau.

Tableau 2.22. Les résultats des essais.

	SD	SC	SD+SC
H1	10.1	9.5	9.5
H2	9.7	8.9	8.5
ES	96.03	93.13	89.5
ESP	94.04	87.36	85.3

2.3.3. Caractéristiques du ciment CEM I 42,5

Le ciment utilisé est un CEMI /42.5 de AIN- LEKBIRA (W.Sétif) dont les caractéristiques physiques et les compositions chimiques et minéralogique données dans les tableaux suivants.

2.3.3.1. Caractéristiques physiques

Tableau 2.23. Caractéristiques physiques du CEMI /42.5.

Densité relative	3.22	
Perte au feu %	1.43	
La surface spécifique de Blaine (cm ² /g)	2943	
Temps de prise	début	185
	fin	285
La consistance normale (E/C)	0.25	
Refus % au 80μ	3.4	

2.3.3.2. Compositions chimiques

Tableau 2.24. Composition chimique du ciment CEMI /42.5.

Elément	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	CaO	CaO libre
%	21.63	4.42	4.99	0.33	0.15	62.57	0.75

2.3.3.3. Composition minéralogique

Tableau 2.25 Composition minéralogique du ciment CEMI /42.5.

Elément	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
%	48.78	25.20	3.28	15.17

2.3.4. Caractéristiques du laitier de haut fourneau (LHF) utilisé

2.3.4.1. Caractéristiques physiques

Le tableau 2.26 résume les caractéristiques physiques de laitier de haut fourneau

Tableau 2.26. Caractéristiques physiques du laitier de haut fourneau.

Densité	2.86
La surface spécifique de Blaine (SSB) (cm ² /g)	4403
Perte au feu(%)	4.63

2.3.4.2. Caractéristiques chimiques

Tableau 2.27. Composition chimique du laitier

élément	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	CaO	MgO
%	37.77	7.87	2.16	0.60	0.26	42.06	4.26

2.3.5. Caractéristiques du programme expérimental

Les compositions du liant ciment plus LHF en tant qu'ajout minéral avec des teneurs de 10 et 20% de la masse de ciment

2.3.5.1. Caractéristiques physiques

Tableau 2.28 Caractéristiques physiques du ciment avec LHF

		LHF10%	LHF20%
Densité		3.05	3.04
Perte au feu %		1.47	1.69
SSB (cm ² /g)		4403	
Temps de prise (min)	Début	180	180
	fin	296	285
La consistance normale (E/C)		0.25	0.24
Refus % au 80μ		7.6	8.8

2.3.5.2. Caractéristiques chimiques

Le tableau 2.29 résumant les compositions chimiques des ciments avec laitier

Tableau 2.29 Compositions chimiques des ciments avec laitier de haut fourneau

	SiO₂	Al₂O₃	Fe₂O₃	K₂O	Na₂O	CaO	MgO
LHF10%	24.67	5.13	4.16	0.39	0.16	58.46	2.09
LHF20%	23.20	4.77	4.54	0.36	0.15	60.33	1.77

-On remarque bien que plus le taux de l'ajout de laitier de haut fourneau augmente plus le taux de la silice diminue et plus le taux de la chaux CaO augmente, ce qui augure un changement dans la cinétique d'hydratation du ciment et ainsi sur les propriétés physico-chimiques et mécaniques du béton.

2.3.5.3. Caractéristiques minéralogiques

Tableau 2.30 Composition minéralogique des ciments avec laitier de haut fourneau

	C₃S	C₂S	C₃A	C₄AF
LHF10%	5.591	66.463	6.538	12.671
LHF20%	26.208	46.698	4.952	13.841

2.4 Formulation du béton

Pour ce mémoire l'étude de la formulation a été établie à l'aide d'un logiciel fourni par le laboratoire LTPE Bordj Bou Arreridj, et les résultats sont données dans les tableaux 2.31 suivant :

Tableau 2.31. Analyse granulométrique des matériaux.

tamis mm	G 8/15	G 3/8	MELANGE SABLE	MELANGE	OAB
25	100	100	100	100	
20	100	100	100	100	
16	99	100	100	100	100
12,5	81	100	100	91	81
10	46	100	100	76	62
8	26	100	100	67	45

6,3	2	92	100	55	38
5	0	60	100	49	32
2,5	0	0	84	34	27
1,25	0	0	59	24	22
0,63	0	0	46	18	17
0,315	0	0	38	15	11
0,16	0	0	12	5	6
0,08	0	0	7	3	0

Avec :

Le pourcentage du sable de mélange 40%

Le pourcentage du gravier 3/8 15%

Le pourcentage du gravier 8/15 45%

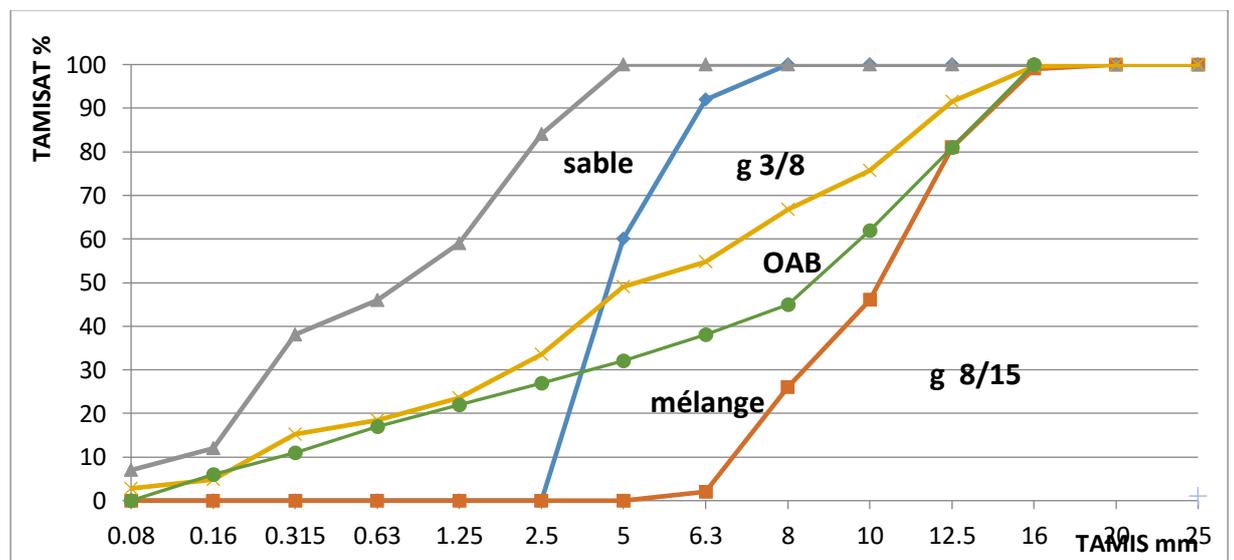


Figure 2.4. Courbe de mélange des composants.

2.4.1. Les résultats de formulation de béton

Tableau 2.32 Les résultats de formulation du béton

Composants	%	Volume Absolu (Litre)	Densité Absolu	Densité Apparente	Composition pondérale pour 1 m ³ de béton (Kg)	Composition volumétrique pour 1 m ³ de béton (litre)

Graviers		696				
Gravier 8/15	45	313	2,57	1,56	805	516
Gravier 3/8	15	104	2,71	1,54	283	184
Sables	40	278	2,61	1,74	727	418
Ciment	400	129	3,10	3,10	400	129
Eau de gâchage		216	1,00	1,00	216	216
Totale	100	1041			2431	1462

2.5. Confection des éprouvettes

Le choix des dimensions des éprouvettes est un compromis. la petite taille permettra d'étudier les mécanismes de dégradations des matériaux pendant une courte durée ; on utilise des éprouvettes cubique de dimensions (10*10*10) cm.

2.6 Les essais sur le béton à l'état frais

2.6.1 Préparation de gâchée

- Vérifier en premier le nombre et l'état des moules, Ces derniers doivent être graissés à l'aide d'une huile pour faciliter le décoffrage.
- Vérifier que les matériaux ne sont pas humides, si non les sécher préalablement dans l'étuve.
- Préparer la quantité d'eau nécessaire pour la gâchée.
- Peser les matériaux secs et les introduire dans le malaxeur.
- Mettre le malaxeur en marche pour homogénéiser le mélange sec.
- Laisser le malaxeur en marche et ajouter progressivement l'eau
- Effectuer immédiatement les essais après arrêt du malaxage

2.6.2 Affaissement au cône d'Abrams (slump test) [NA EN 12350-2]

Cet essai est effectué conformément aux prescriptions de la norme (NA EN 12350-2) c'est l'essai de mesure de consistance le plus employé et le plus connu universellement. Le moule utilisé pour réaliser cet essai est un cône tronqué de 30cm de hauteur. Placé sur une surface lisse, la petite ouverture vers le haut, le cône est rempli de béton en trois couches d'égal volume. Chacune des ouvertures est compactée avec 25 coups d'une tige métallique normalisée de 1.6cm de diamètre, dont l'extrémité est arrondie.

Une fois le cône remplis, le dessus de la surface doit être arasé en se servant de la tige et en effectuant des mouvements de va et vient. Durant ces opérations, le cône doit demeurer fixe

sur la base lisse ; des écrous de serrage, situées à la base du cône, permettent de la maintenir immobile.

Après remplissage, le cône est relevé lentement et le béton s'affaisse, la différence entre la hauteur du béton affaissé et la hauteur du cône est appelée l'affaissement.

La valeur de l'affaissement est exprimée en cm.

Dans ce travail l'affaissement est fixé à : Aff. 11cm

2.6.3 Vibration : [NA EN 12390-2]

La vibration est la méthode de compactage la plus répandue, le degré de compactage d'un béton frais par vibration dépend de la fréquence et l'amplitude des oscillations, ainsi que de la durée de vibration.

- On commence par piqué de vibration qui est utilisé pour vibrer le béton dans l'éprouvette dans 3 étapes et 3 couches à chaque fois en frappe 25 frappes avec le même rythme afin d'homogénéiser la forme de l'échantillon.
- La vibration est faite sur la table vibrante pendant 20s

2.6.4 Conservation des éprouvettes :

Après le gâchage pour un béton ordinaire les moules sont conservés dans une pièce à température ambiante, et démoulés après 24h.

Une fois démoulées, pour assurer un bon mûrissement du béton, les éprouvettes sont conservées dans un bac d'eau à une température de 20°C, ceci permet d'éviter les pertes d'eau, et de garantir le déroulement normal du processus d'hydratation du ciment.

2.7 Les essais sur béton durci

Les essais sur béton durci faire pour détermination des performances mécaniques du béton de manière destructive et non-destructive au moyen des essais les plus courants.

2.7.1 Détermination de la résistance par les essais destructifs

- **La résistance à la compression (essai d'écrasement) [NA EN 12390-3]**

La résistance a été longtemps considérée comme la qualité essentielle, pour ne pas dire la seule à rechercher pour un béton.

La détermination de cette résistance est nécessaire pour contrôler cette qualité essentielle de ce béton.

2.8. Calcul du module de Young

Selon la vitesse du son pour estimer le module d'élasticité d'un ouvrage âgé en service, les mesures par ultrasons sont recommandées. La vitesse de propagation de l'onde ultrasonore dans un béton dépend du module d'élasticité du béton et de sa densité. Hassan Munzer (1994) a déterminé le module d'élasticité selon la vitesse du son et la masse volumique.

Le module d'élasticité dynamique peut être déterminé par l'équation :

$$E_d = \frac{(1-\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)} \gamma V^2$$

Où

γ : masse volumique du béton (expérimentale) ;

$\nu = 0,15$ (coefficient de Poisson),

V : vitesse du son [km/s]

Le module d'élasticité peut être donné en fonction de la constante (K) :

Ou :

$$E_c = K V^2$$

E_c [GPa] : module d'élasticité statique sécant selon la SIA 162/1

v [km/s] : vitesse du son dans le béton ;

K : $k = 1.68$ pour $t \geq 180$ jours ;

$k = t^{0.1}$ pour $t < 180$ jours ;

t : âge du béton en jours.

Le calcul du module d'élasticité statique de chaque béton a été fait en fonction des jours de l'échéance d'écrasement des éprouvettes (7jours, 28jours et 60jours).

CHAPITRE 03
RESULTATS
EXPERIMENTAUX ET
DISCUSSION

3.1. Caractéristiques rhéologiques à l'état frais

3.1.1. Caractérisation Rhéologique du béton témoin

Les résultats des essais au rhéomètre ICAR sont représentés dans le tableau 3.1 et la figure 3.1.

Tableau 3.1. Résultats au rhéomètre du béton témoin

Vitesse de rotation (s⁻¹)	Couple (N.m)	Viscosité(Pa.s)	Seuil de cisaillement (Pa)
0.500	3.395	30.4	468.3
0.425	3.071		
0.350	2.825		
0.275	2.713		
0.200	2.505		
0.125	2.367		
0.05	2.200		

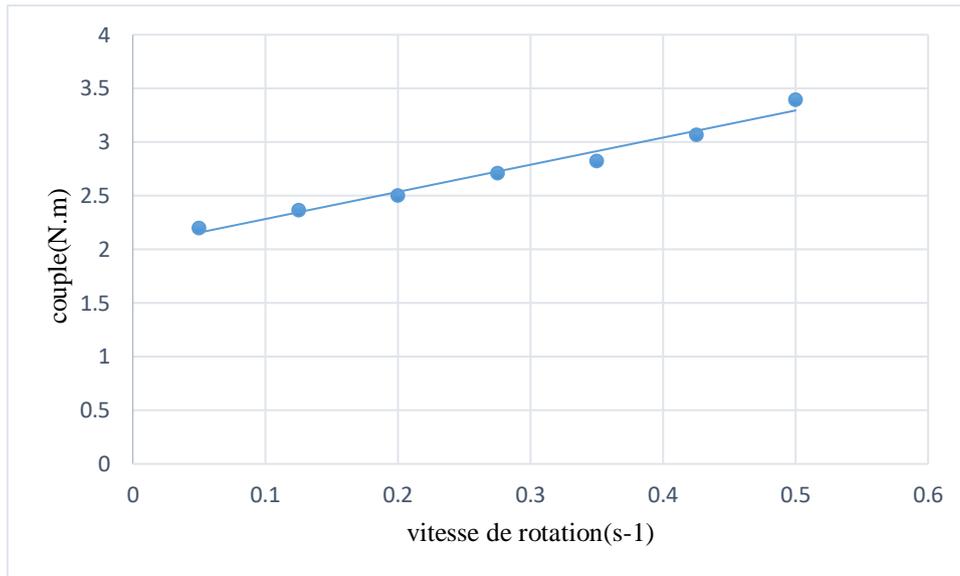


Figure 3.1. Diagramme vitesse-couple pour le béton témoin

3.1.2. Caractérisation Rhéologique des bétons au laitier de haut fourneau

3.1.2.1. Béton avec 10% de laitier haut de fourneau

Tableau 3.2. Résultats au rhéomètre du béton 10% LHF

Vitesse de rotation (s ⁻¹)	Couple (N.m)	Viscosité (Pa.s)	Seuil de cisaillement (Pa)
0.500	3.544	46.7	388.1
0.425	3.071		
0.350	2.755		
0.275	2.812		
0.200	2.361		
0.125	2.616		
0.05	1.88		

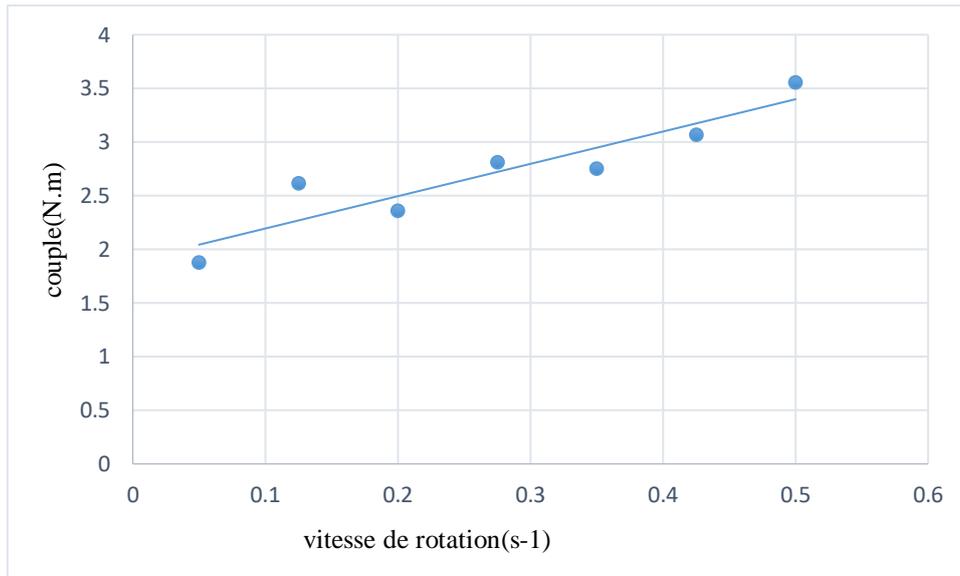


Figure 3.2. Diagramme vitesse-couple pour le béton 10% LHF

3.1.2.2. Béton avec 20% de laitier haut de fourneau

Tableau 3.3. Résultats au rhéomètre du béton 20% LHF

Vitesse de rotation (s ⁻¹)	Couple (N.m)	Viscosité (Pa.s)	Seuil de cisaillement (Pa)
0.500	3.494	20.7	586.5
0.425	3.282		
0.350	3.083		
0.275	2.870		
0.200	2.814		
0.125	2.672		
0.05	2.485		

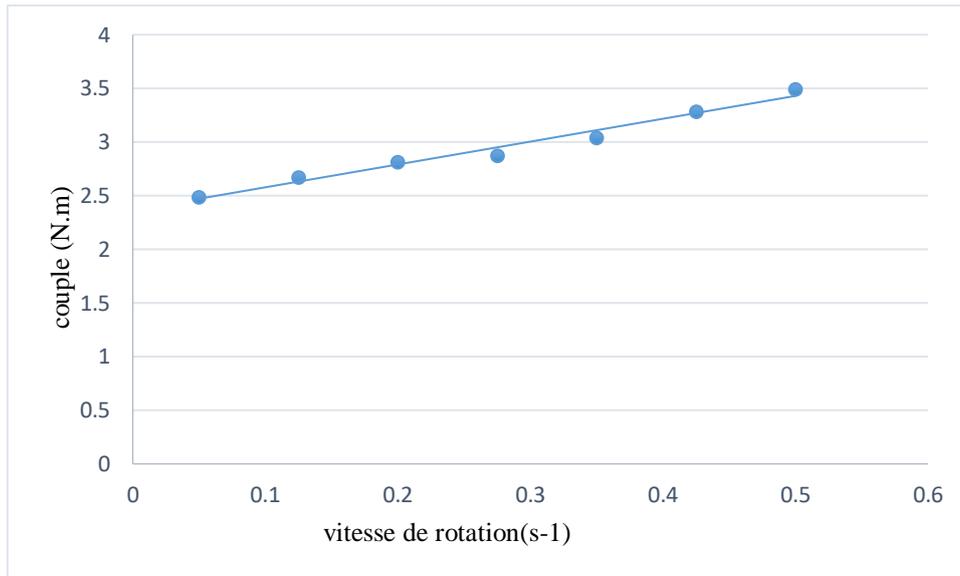


Figure 3.3. Diagramme vitesse-couple pour le béton 20% LHF

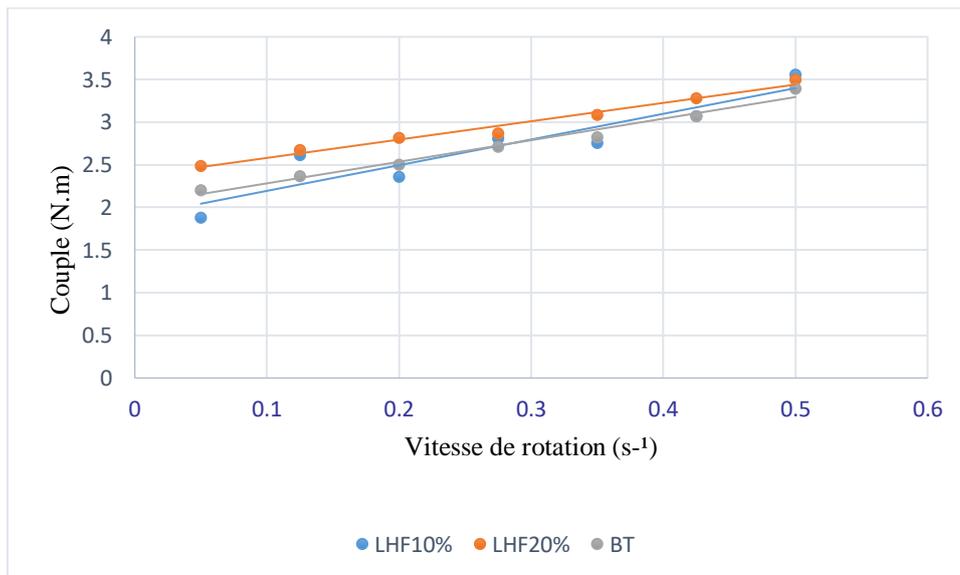


Figure 3.4. Diagramme vitesse-couple des trois bétons (LHF10%, LHF20%, BT)

3.1.3 Evolution de la viscosité des différents types de béton

Tableau 3.4. Evolution de la viscosité des différents types de béton

Béton	Viscosité(Pa.s)
BT	30.4
LHF10%	46.7
LHF20%	20.7

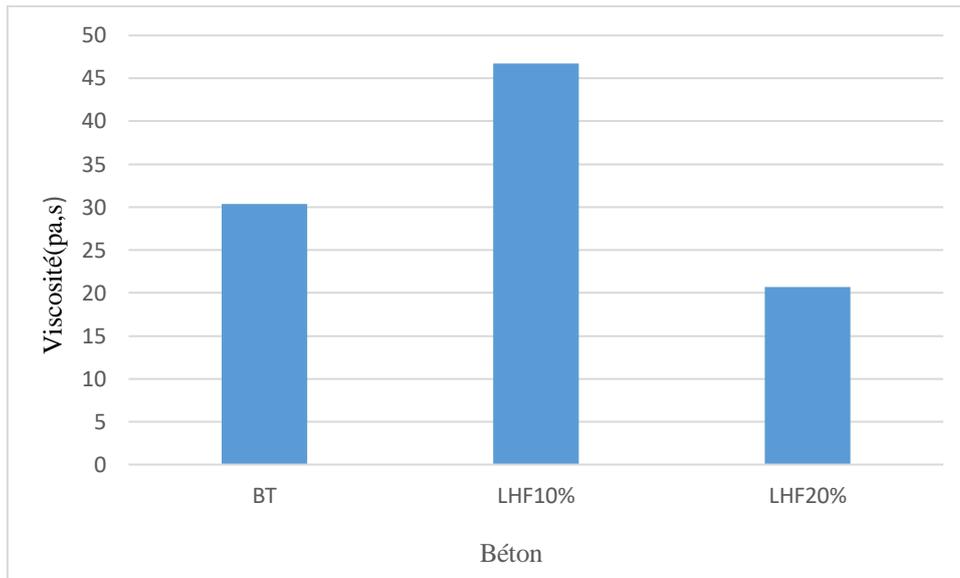


Figure 3.5. Evolution de la viscosité des différents bétons

3.1.4 Evolution du seuil de cisaillement des différents types de béton

Tableau 3.5 Evolution du seuil de cisaillement des différents types de béton

Béton	Seuil de cisaillement (Pa)
BT	468.3
LHF10%	388.1
LHF20%	586.5

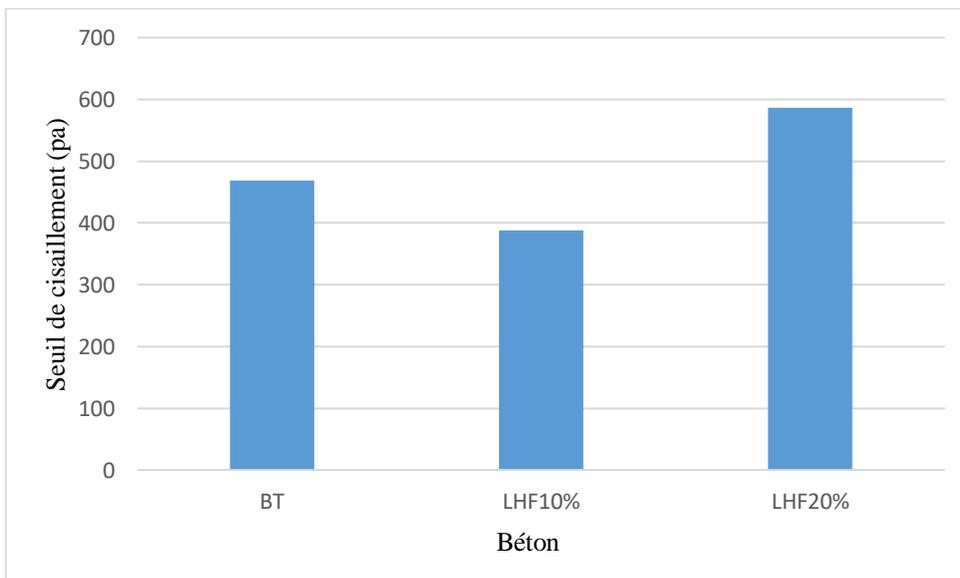


Figure 3.6. Evolution du seuil de cisaillement des différents types de béton

Interprétation :

Les résultats montrent qu'avec un taux de 10% d'ajout de laitier, d'une part, il y a une légère diminution du seuil de cisaillement qui passe de 468Pa pour le béton témoin sans ajout à 388Pa, par contre le béton est plus visqueux, en effet la viscosité est supérieure pour un béton avec un ciment composé de 10% de laitier, la viscosité est passée de 30 à environ 47Pa.s.

D'autre part, pour un taux d'ajout de 20% de laitier, le seuil de cisaillement a augmenté pour atteindre 587Pa et la viscosité a diminué pour une valeur d'environ 21Pa.s.

Pour un taux de 10%, il est difficile d'expliquer l'évolution des caractéristiques rhéologiques, mais pour un taux de 20%, l'augmentation du seuil de cisaillement peut être expliquée par l'effet filler du laitier qui engendre un béton plus compacte, en effet la surface spécifique du laitier (plus de 4000cm²/g) est nettement supérieure à celle du ciment (3000 cm²/g) et donc les frottements grain-grain sont plus grands. Le béton devient plus fluide et la viscosité diminue cela peut être dû à l'augmentation de la phase liquide par l'effet des grains de laitier dont la surface spécifique est grande ce qui augmente la surface de mouillage des grains de ciment.

3.2. Caractéristiques rhéologiques à l'état durci

3.2.1. Résistances à la compression du béton témoin

3.2.1.1. La résistance à 7 jours

Tableau 3.6. La résistance du béton témoin à 7 jours

Type de béton	Béton témoin
La résistance en (MPa)	36.57

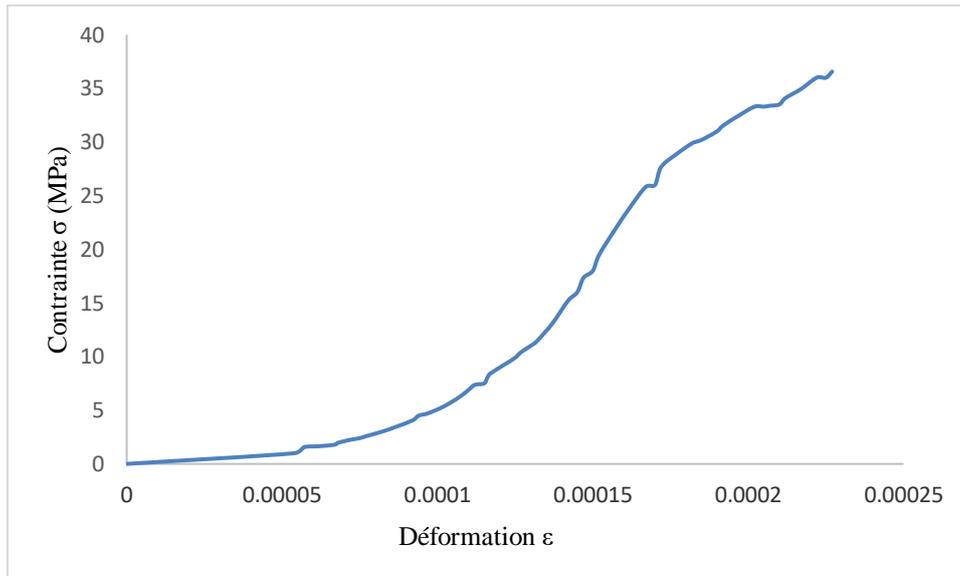


Figure 3.7. Courbe contrainte-déformation du béton témoin à 7 jours

3.2.1.2. La résistance à 28 jours

Tableau 3.7. La résistance du béton témoin à 28 jours

Type de béton	Béton témoin
La résistance en (MPa)	54.05

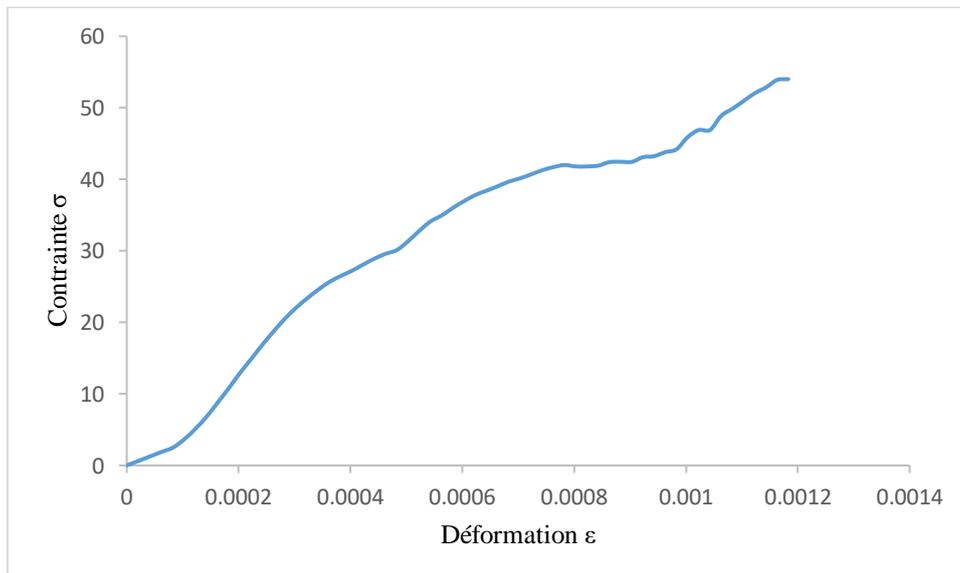


Figure 3.8. Courbe contrainte-déformation du béton témoin à 28 jours

3.2.1.3. La résistance à 60 jours

Tableau 3.8 : La résistance du béton témoin à 60 jours

Type de béton	Béton témoin
La résistance en (MPa)	69.56

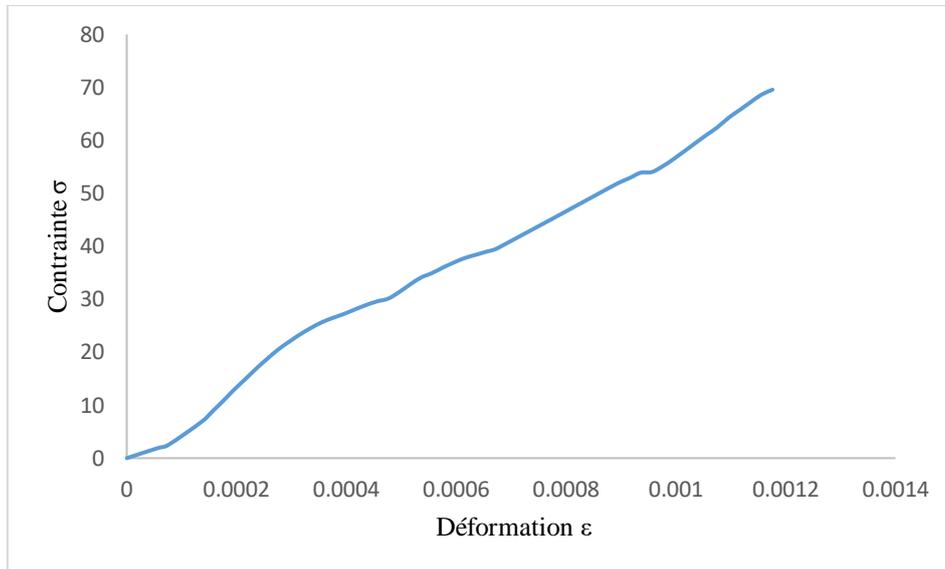


Figure 3.9. Courbe contrainte-déformation du béton témoin à 60 jours.

3.2.2. Résistances à la compression du béton avec ajout de 10% de laitier

3.2.2.1. La résistance à 7 jours

Tableau 3.9. La résistance du béton avec ajout de 10% de laitier à 7 jours

Type de béton	Béton avec LHF10%
La résistance en (MPa)	38.16

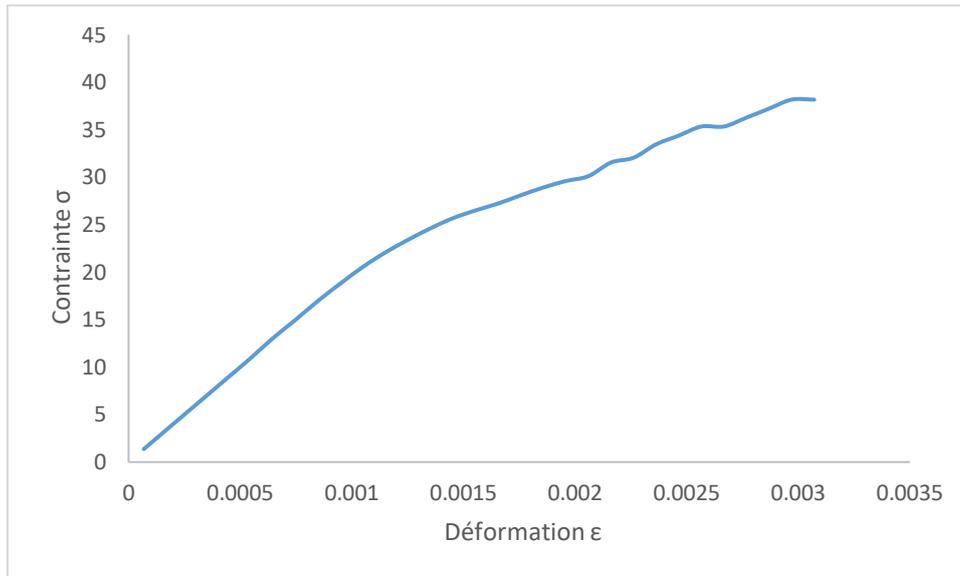


Figure 3.10. Courbe contrainte-déformation du béton avec LHF10% à 7 jours.

3.2.2.2. La résistance à 28 jours

Tableau 3.10. La résistance du béton avec ajout de 10% de laitier à 28 jours

Type de béton	Béton avec LHF10%
La résistance en (MPa)	50.72

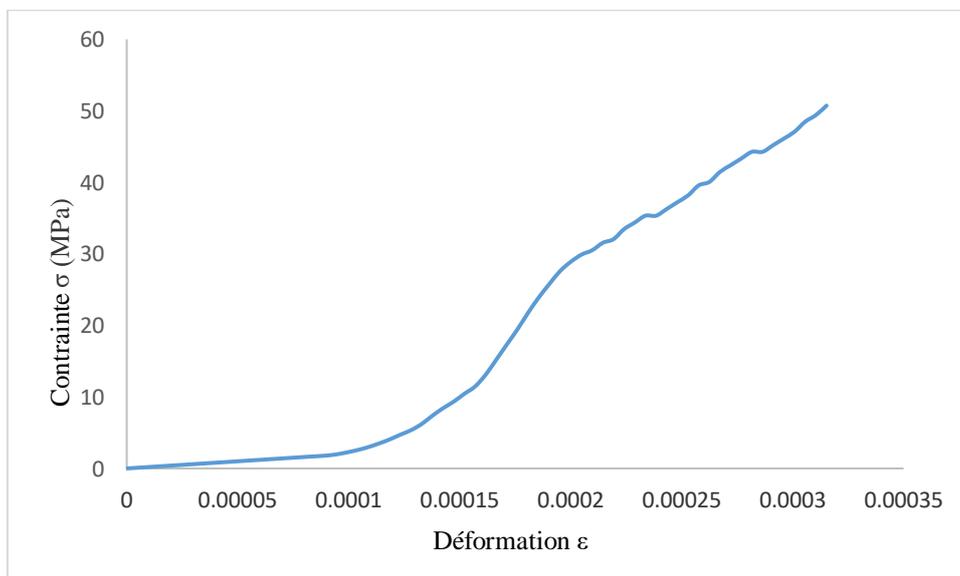


Figure 3.11. Courbe contrainte-déformation du béton avec LHF10% à 28 jours.

3.2.2.3. La résistance à 60 jours

Tableau 3.11. La résistance du béton avec ajout de 10% de laitier à 60 jours

Type de béton	Béton avec LHF10%
La résistance en (MPa)	66.19

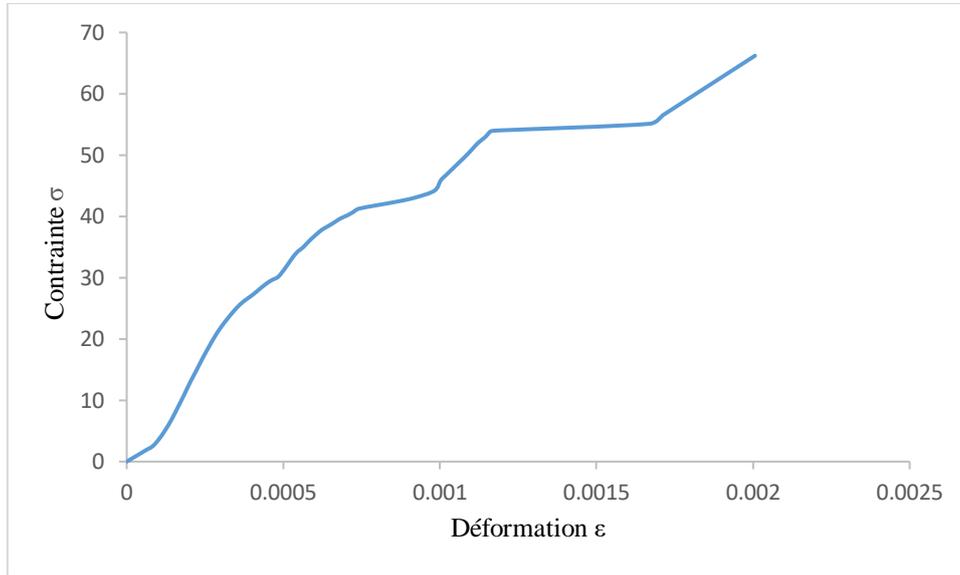


Figure 3.12. Courbe contrainte-déformation du béton avec LHF10% à 60 jours.

3.2.3. Résistances à la compression du béton avec ajout de 20% de laitier

3.2.3.1. La Résistance à 7 jours

Tableau 3.12. La résistance du béton avec ajout de 20% de laitier à 7 jours

Type de béton	Béton avec LHF20%
La résistance en (MPa)	33.38

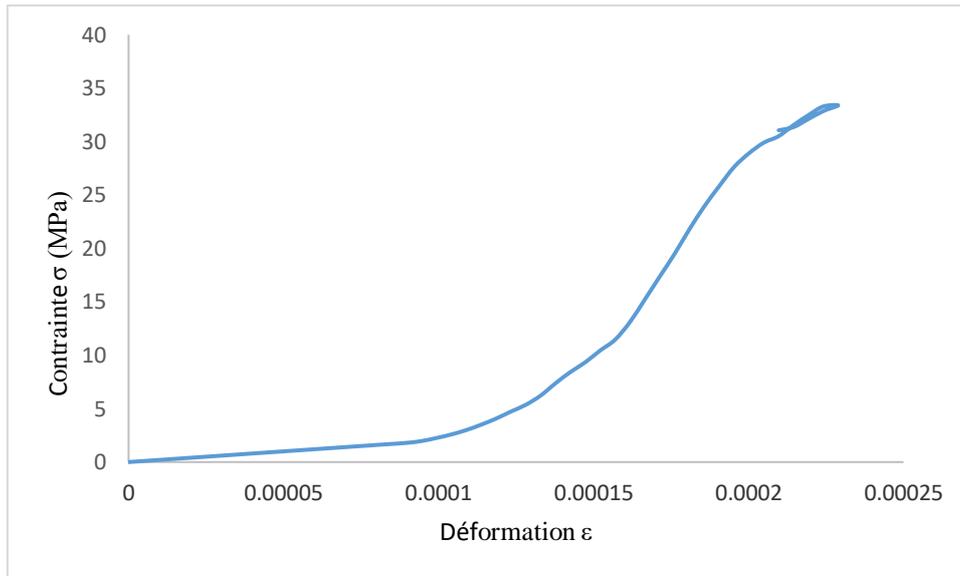


Figure 3.13. Courbe contrainte-déformation du béton avec LHF20% à 7 jours.

3.2.3.2. La Résistance à 28 jours

Tableau 3.13. La résistance du béton avec ajout de 20% de laitier à 28 jours

Type de béton	Béton avec LHF20%
La résistance en (Mpa)	53.89

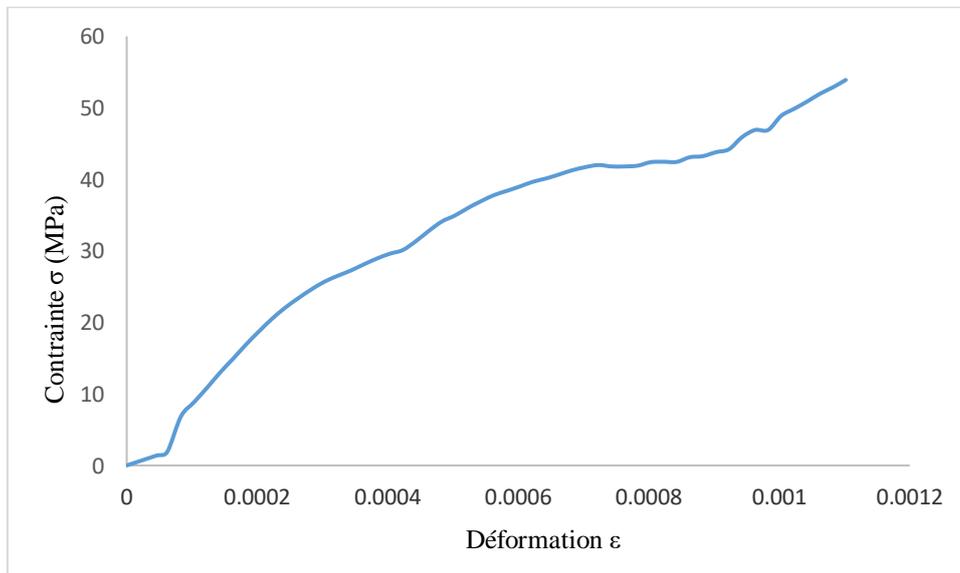


Figure 3.14. Courbe contrainte-déformation du béton avec LHF20% à 28 jours.

3.2.3.3. La Résistance à 60 jours

Tableau 3.14. La résistance du béton avec ajout de 20% de laitier à 60 jours

Type de béton	Béton avec LHF20%
La résistance en (MPa)	61.84

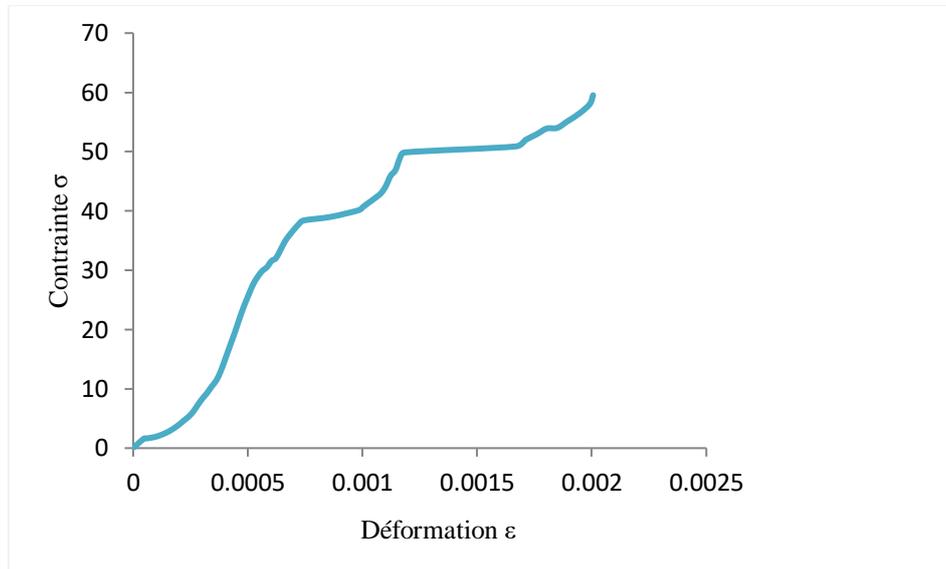


Figure 3.15. Courbe contrainte-déformation du béton avec LHF20% à 60 jours.

Tableau 3.15. Evolution de la résistance du béton en fonction du taux d'ajout de laitier (MPa)

Type de béton	BT	LHF10%	LHF20%
7 jours	36.57	38.16	33.38
28 jours	54.05	50.72	53.89
60 jours	69.56	66.19	61.84

Interprétation :

D'après les résultats obtenus, on peut conclure que la substitution du ciment par 10% ou 20% de laitier de haut fourneau n'a pas eu de conséquence sur la résistance à la compression du béton durant toutes les échéances (7, 28 et 60 jours), en effet la résistance est pratiquement comparable avec celle du béton témoin. Cela peut être expliquée par la grande surface spécifique du laitier qui est nettement supérieure à celle du ciment portland, 4000cm²/g et 3000cm²/g respectivement. Le laitier est caractérisé par une hydratation latente et la résistance du béton peut s'améliorer remarquablement à une longue échéance (1 année ou plus)

3.2.4. Courbes contrainte-déformation des différents types de béton

3.2.4.1. à 7 jours

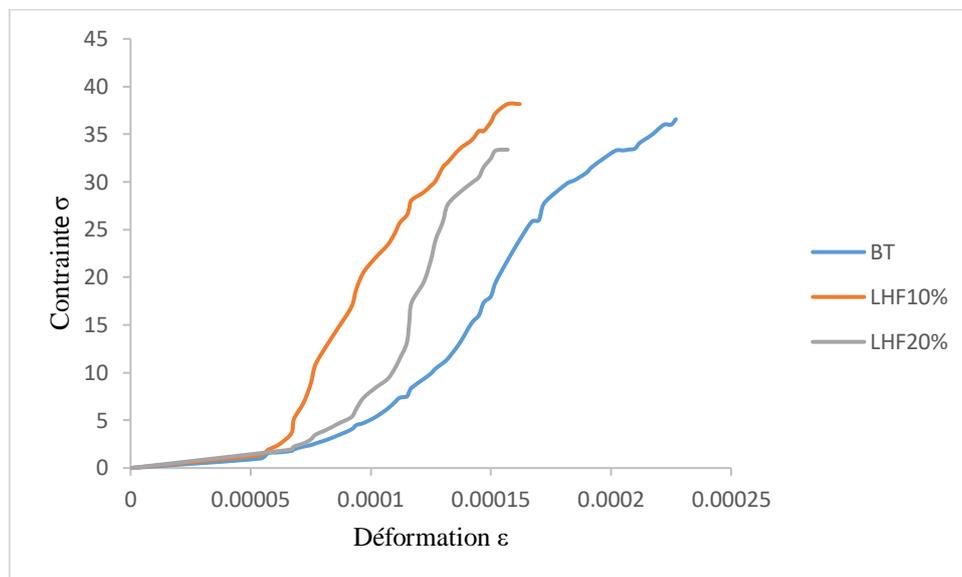


Figure 3.16. Courbe contrainte-déformation des différents types de béton à 7 jours

3.2.4.2. à 28 jours

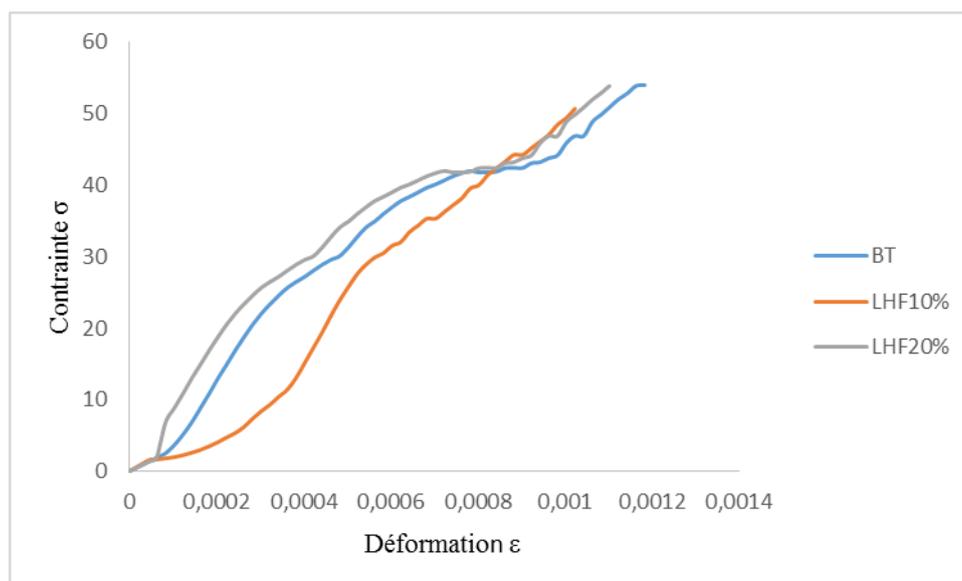


Figure 3.17 Courbe contrainte-déformation des différents types de béton à 28 jours.

3.4.2.3. à 2 60 jours

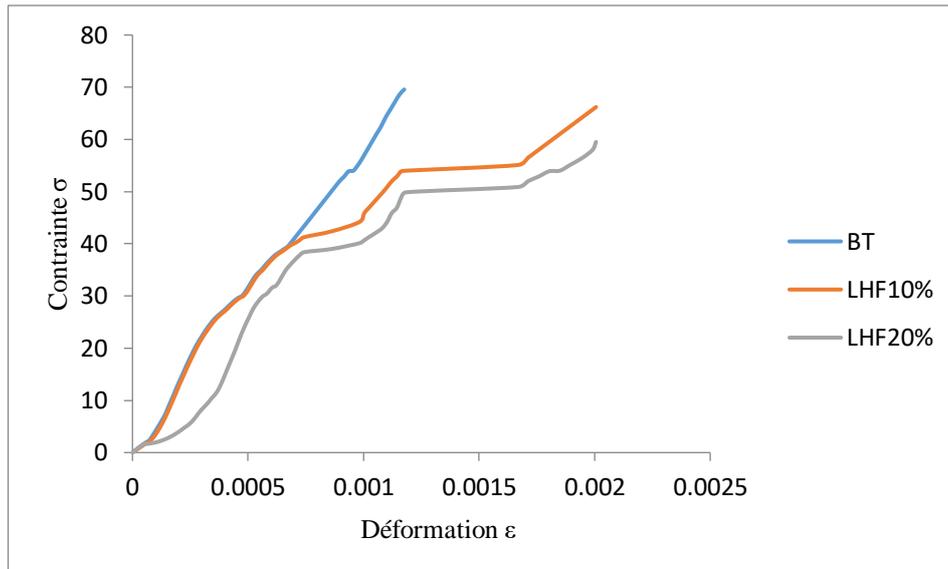


Figure 3.18 Courbe contrainte-déformation des différents types de béton à 60 jours.

Interprétation :

D'après les courbes contraintes-déformation, on remarque bien que tous les bétons ont le même comportement rhéologique à l'état durci et ceci pendant toutes les échéances, l'ajout du laitier n'a pas eu un effet que ce soit pour la phase élastique ou la phase plastique du béton. L'écoulement du béton est le même.

CONCLUSION GENERAL ET PERSPECTIVES

Conclusion générale et perspectives :

Le présent travail a pour l'objectif l'étude de l'effet de l'ajout du laitier de haut fourneau avec deux pourcentages 10% et 20% sur la rhéologie du béton ordinaire à l'état frais et à l'état durci. Cette étude a été faite au moyen de l'appareil de mesure ICAR rhéomètre.

Des éprouvettes cubiques 10*10*10 conservées dans l'eau ont été soumises à des essais de compression simple à 7, 28 et 60 jours.

Les résultats ont montré qu'avec un taux de 10% d'ajout de laitier, d'une part, il y a une légère diminution du seuil de cisaillement qui passe de 468Pa pour le béton témoin sans ajout à 388Pa, par contre le béton est plus visqueux, en effet la viscosité est supérieure pour un béton avec un ciment composé de 10% de laitier, la viscosité est passée de 30 à environ 47Pa.s. D'autre part, pour un taux d'ajout de 20% de laitier, le seuil de cisaillement a augmenté pour atteindre 587Pa et la viscosité a diminué pour une valeur d'environ 21Pa.s.

Pour un taux de 10%, il est difficile d'expliquer l'évolution des caractéristiques rhéologiques, mais pour un taux de 20%, l'augmentation du seuil de cisaillement peut être expliquée par l'effet filler du laitier qui engendre un béton plus compacte, en effet la surface spécifique du laitier (plus de 4000cm²/g) est nettement supérieure à celle du ciment (3000 cm²/g) et donc les frottements grain-grain sont plus grands. Le béton devient plus fluide et la viscosité diminue cela peut être dû à la l'augmentation de la phase liquide par l'effet des grains de laitier dont la surface spécifique est grande ce qui augmente la surface de mouillage des grains de ciment.

A l'état durci, on peut conclure que la substitution du ciment par 10% ou 20% de laitier de haut fourneau n'a pas eu de conséquence sur la résistance à la compression du béton durant toutes les échéances (7, 28 et 60 jours), en effet la résistance est pratiquement comparable avec celle du béton témoin. Tous les bétons ont le même comportement rhéologique à l'état durci et ceci pendant toutes les échéances, l'ajout du laitier n'a pas eu un effet que ce soit pour la phase élastique ou la phase plastique du béton. L'écoulement du béton est le même.

Comme perspectives, il est intéressant d'étudier l'effet de l'ajout de laitier de haut fourneau dans le ciment sur le comportement rhéologique des bétons hauts performances.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

- <http://www.planete-tp.com/formulation-et-proprietes-du-beton-r154.html>
- <http://www.unpp.fr/accueil/nos-activites/les-granulats-en-bref/>
- <http://decplay.fr/3517289-valorisation-des-dechets-industriels.html>.
- <http://fr.m.wikipedia.org/wiki/rh%C3%A9om%C3%A8tre>
- **I.MESSAOUDENE**.cours valorisation des déchets, Algérie : département génie civil, université El Bachir Ibrahim.
- **I.MESSAOUDENE and A.NACERI**. Effet de l'activation mécanique du laitier de haut fourneau sur le comportement mécanique du mortier, université de M'sila, 2006.
- **GEORGES Cailletaud and SAMUEL Forest**. Introduction à la plasticité, centre des matériaux.mines paristech/CNRS.
- **MHAMED Adjoudj**. Effet des additions minérales et organiques sur le comportement rhéologique du béton. Mécanique des matériaux [physics.class-ph]. Université de Cergy Pontoise, 2015.
- **MAAFI lakhder and ZEHAR imad-Ediine** Influence de la nature du sable sur le comportement rhéologique du béton ordinaire, Mémoire Master, Université de Bordj Bou Arreridj, 2017.
- **TOUATI Abdelaziz and ZAHOUANI Hassan** élaboration d'un béton auto plaçant à base de laitier de haut fourneau, projet fin d'étude.université d'Ouargla kasdi Merbah, 2011.

ملخص:

معرفة السلوك الانسيابي (إجهاد القص واللزوجة البلاستيكية) خلال الساعتين الأوليين بعد الخلط لا يقل أهمية عن قياس الخصائص الأولية (الترهل). لهذا الغرض، يهدف العمل الحالي إلى دراسة تأثير إضافة خبث الأفران العالية بنسبة 10% و 20% على الريولوجيا للخرسانة العادية في الحالة الجديدة وفي نفس الوقت الحالة المتصلبة. أجريت هذه الدراسة باستخدام مقياس إيكار ريو ماتي. تم اختبار $10 \times 10 \times 10$ مكعب من العينات المحتفظ بها في الماء لاختبارات ضغط بسيطة في 7 و 28 و 60 يوماً.

أظهرت النتائج أنه من خلال إضافة بنسبة 10% من الخبث، من ناحية، هناك انخفاض طفيف في عتبة القص التي تبدأ من 468 باسكال للخرسانة الخاضعة للسيطرة دون إضافة إلى 388 باسكال، من ناحية أخرى هي أكثر لزوجة، في الواقع اللزوجة أعلى للخرسانة مع الاسمنت يتكون من 10% من الخبث، ارتفاع اللزوجة من 30 إلى حوالي 47 باسكال. ثانياً. من ناحية أخرى بالنسبة لمعدل إضافة 20% من الخبث، زاد عتبة القص إلى 587 باسكال وانخفضت اللزوجة إلى قيمة حوالي 21 باسكال. ثانياً.

بالنسبة لمعدل 10%، من الصعب شرح تطور الخصائص الريولوجية، ولكن بمعدل 20%، يمكن تفسير الزيادة في عتبة القص من خلال تأثير حشو الخبث الذي يولد المزيد من الخرسانة. إن السطح المحدد للخبث (أكثر من 4000 سم² / جم) أعلى بكثير من الاسمنت (3000 سم² / جم) وبالتالي يكون الاحتكاك بين الحبيبات أكبر. تصبح الخرسانة أكثر سلاسة وتتناقص اللزوجة التي يمكن أن تعزى إلى زيادة الطور السائل من خلال تأثير حبيبات الخبث التي يكون سطحها الخاص كبيراً مما يزيد من سطح ترطيب حبيبات الاسمنت. في الحالة المتصلبة، يمكن الاستنتاج أن استبدال الاسمنت بنسبة 10% أو 20% من خبث فرن الصهر لم يكن له أي تأثير على قوة الضغط للخرسانة خلال جميع المواعيد النهائية (7، 28، 60، أيام)، المقاومة قابلة للمقارنة عملياً مع الخرسانة العادية. جميع الخرسانات لها نفس السلوك الريولوجي في الحالة المتصلبة وهذا خلال جميع المواعيد النهائية، فإن إضافة الخبث لم يكن لها تأثير للمرحلة المرنة أو الطور البلاستيكي للخرسانة. تتفق الخرسانة هو نفسه.

الكلمات المفتاحية: الريولوجيا، اللزوجة، إجهاد القص، خبث الأفران.

Résumé :

La connaissance du comportement rhéologique (contrainte de cisaillement et la viscosité plastique) au cours des deux premières heures après le malaxage est tout aussi importante que la mesure des propriétés initiales (affaissement). Pour cette raison, le présent travail a pour l'objectif l'étude de l'effet de l'ajout du laitier de haut fourneau avec deux pourcentages 10% et 20% sur la rhéologie du béton ordinaire à l'état frais et à l'état durci. Cette étude a été faite au moyen de l'appareil de mesure ICAR rhéomètre. Des éprouvettes cubiques $10 \times 10 \times 10$ conservées dans l'eau ont été soumises à des essais de compression simple à 7, 28 et 60 jours.

Les résultats ont montré qu'avec un taux de 10% d'ajout de laitier, d'une part, il y a une légère diminution du seuil de cisaillement qui passe de 468Pa pour le béton témoin sans ajout à 388Pa, par contre le béton est plus visqueux, en effet la viscosité est supérieure pour un béton avec un ciment composé de 10% de laitier, la viscosité est passée de 30 à environ 47Pa.s. D'autre part, pour un taux d'ajout de 20% de laitier, le seuil de cisaillement a augmenté pour atteindre 587Pa et la viscosité a diminué pour une valeur d'environ 21Pa.s.

Pour un taux de 10%, il est difficile d'expliquer l'évolution des caractéristiques rhéologiques, mais pour un taux de 20%, l'augmentation du seuil de cisaillement peut être expliquée par l'effet filler du laitier qui engendre un béton plus compacte, en effet la surface spécifique du laitier (plus de 4000cm²/g) est nettement supérieure à celle du ciment (3000 cm²/g) et donc les frottements grain-grain sont plus grands. Le béton devient plus fluide et la viscosité diminue cela peut être dû à la l'augmentation de la phase

liquide par l'effet des grains de laitier dont la surface spécifique est grande ce qui augmente la surface de mouillage des grains de ciment.

A l'état durci, on peut conclure que la substitution du ciment par 10% ou 20% de laitier de haut fourneau n'a pas eu de conséquence sur la résistance à la compression du béton durant toutes les échéances (7, 28 et 60 jours), en effet la résistance est pratiquement comparable avec celle du béton témoin. Tous les bétons ont le même comportement rhéologique à l'état durci et ceci pendant toutes les échéances, l'ajout du laitier n'a pas eu un effet que ce soit pour la phase élastique ou la phase plastique du béton. L'écoulement du béton est le même.

Mots-clés : Rhéologie, viscosité, contrainte de cisaillement, laitier de haut fourneau.

Abstract:

Knowledge of the rheological behavior (shear stress and plastic viscosity) during the first two hours after mixing is just as important as measuring the initial properties (sagging). For this reason, the present work aims to study the effect of the addition of blast furnace slag with two percentages 10% and 20% on the rheology of ordinary concrete in the fresh state and at the same time hardened state. This study was done using the ICAR rheometer. Of Cubic $10 * 10 * 10$ specimens held in water were subjected to simple compression tests at 7, 28 and 60 days.

The results showed that with a 10% slag addition rate, on the one hand, there is a slight decrease of the shear threshold which goes from 468Pa for the control concrete without addition to 388Pa, on the other hand the concrete is more viscous, indeed the viscosity is higher for a concrete with a cement composed of 10% of slag, the viscosity went from 30 to about 47Pa.s. On the other hand, for an addition rate of 20% slag, the shear threshold increased to 587Pa and the viscosity decreased to a value of about 21Pa.s.

For a rate of 10%, it is difficult to explain the evolution of the rheological characteristics, but for a rate of 20%, the increase in the shear threshold can be explained by the filler effect of the slag, which generates more concrete. Compact, indeed the specific surface of the slag (over $4000\text{cm}^2 / \text{g}$) is significantly higher than that of cement ($3000 \text{cm}^2 / \text{g}$) and therefore the grain-grain friction is greater. The concrete becomes more fluid and the viscosity decreases that can be due to the increase of the liquid phase by the effect of the slag grains whose specific surface is large which increases the wetting surface of the cement grains.

In the hardened state, it can be concluded that the substitution of the cement with 10% or 20% of blast furnace slag has not had any effect on the compressive strength of the concrete during all the deadlines (7, 28 and 60 days), the resistance is practically comparable with that of the control concrete. All the concretes have the same rheological behavior in the hardened state and this during all the deadlines, the addition of the slag did not have an effect that is for the elastic phase or the plastic phase of the concrete. The flow of the concrete is the same.

Keywords : Rheology, viscosity, shear stress, blast furnace slag.