



UNIVERSITÉ MOHAMED BACHIR EL IBRAHIMI
BORDJ BOU ARRÉRIDJ
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 LA POUDRE DE MARBRE
SUR LA RHEOLOGIE DES BETONS A L'ETAT FRAIS
ET A L'ETAT DURCI**

Par :

Mlles. MEBARKIA Rahma & ATIA Majda

Soutenu publiquement le : 02/07/2018 devant le jury composé de :

Mr. BOUGLADA Mohamed Salah	Président
Dr. MESSAOUDENE Ibrahim	Encadreur
Mr. LOGZIT Nacer	Examineur
Mr. NOUI Ammar	Examineur

Promotion : 2017/2018

Dédicaces

A nos chers parents, Aucun hommage ne pourrait être à la hauteur de l'amour dont ils ne cessent de nous combler. Que dieu leur procure bonne santé et longue vie pour leurs patiences, leur amour, leur soutien et encouragement.

A nos chers frères et sœurs qui nous ont supportés durant cette période.

A nos amis les plus fidèles et collègues.

A tous nos proches
A tous ceux qui nous aiment
A tous ceux que nous aimons
Nous dédions ce modeste mémoire.

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier Allah le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce Modeste travail. En second lieu, nous tenons à remercier notre encadreur Mr MESSAOUDENE Ibrahim, son précieux conseil et son aide durant toute la période du travail. Nos remerciements s'adressent à Mr KESSAL Oussama pour son aide pratique et son soutien moral et ses encouragements. Nous remercions également les membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail Et de l'enrichir par leurs propositions.

A tout le personnel de :

Laboratoire de génie civil de l'université de B.B.Arreridj (Mr CHETOUAH Farid, Mr DJENDI Zoubir, Mm MERAZGHIA)

Laboratoire des Travaux Publics de l'EST (B.B.Arreridj)

Laboratoire de la cimenterie d'AIN- LEKBIRA (Sétif)

Centrale à Béton EL IKHWA MEBARKIA CONSTRUCTION

A tous ceux qui ont contribué dans notre formation de près ou de loin : nos enseignants à l'Université, qu'ils trouvent ici le témoignage de notre gratitude.

Résumé

De nos jours, le béton incorpore dans sa matrice des ajouts cimentaires qui améliorent ses propriétés rhéologiques à l'état frais et à l'état durci. Dans le but de résoudre le problème du déficit de production de ciment et afin de réduire l'émission des gaz à effet de serre, on utilise des ajouts minéraux tels que la poudre de marbre pour substituer partiellement le ciment. L'objectif de cette étude est d'examiner l'effet de la substitution du ciment par de la poudre de marbre sur les propriétés rhéologiques et mécaniques du béton. Le ciment Portland ordinaire a été partiellement remplacé par différents pourcentages de poudre de marbre (5 et 10%). L'écoulement du béton frais a été mesuré à l'aide du Rhéomètre ICAR, La résistance à la compression a été déterminée sur des éprouvettes cubiques à l'âge de 3 jours, 7 jours, 28 jours et 2 mois. Les résultats indiquent une amélioration de la maniabilité du béton avec l'utilisation de poudre de marbre. Avec une teneur de 5% de poudre de marbre le béton a enregistré une meilleure résistance à la compression.

Mots clés : Rhéologie, poudre de marbre, seuil de cisaillement, viscosité, résistance, ductilité.

Abstract:

Today, concrete incorporates cements additions into its matrix that improve its rheological properties in the fresh and hardened state. In order to solve the problem of the deficit of cement production in order to reduce the emission of greenhouse gases, mineral additives such as marble powder are used to partially replace the cement. The objective of this study is to examine the effect of cement substitution by marble powder on the rheological and mechanical properties of concrete. Ordinary Portland cement has been partially replaced by different percentages of marble powder (5 and 10%). The flow of fresh concrete was measured using the ICAR Rheometer. The compressive strength was determined on cubic specimens at the age of 3 days, 7 days, 28 days and 2 months. The results indicate an improvement in the handling of concrete with the use of marble powder. The compressive strength of the concrete with the 5% content of the marble powder showed an increase.

Key words: Rheology, marble powder, shear yield, viscosity, strength, ductility.

ملخص

تدمج الخرسانة مع الإضافات الإسمنتية التي تحسن خصائصها الريولوجية في الحالة الطازجة وفي الحالة الصلبة. من أجل حل مشكلة عجز إنتاج الأسمنت وتقليل انبعاث الغازات، يتم استخدام إضافات معدنية مثل مسحوق الرخام لتحل محل الأسمنت جزئياً. الهدف من هذه الدراسة هو دراسة تأثير استبدال الأسمنت بواسطة مسحوق الرخام على الخواص الريولوجية والميكانيكية للخرسانة. تم استبدال الأسمنت البورتلاندي العادي جزئياً بنسب مختلفة من مسحوق الرخام (5 و 10%). تم قياس تدفق الخرسانة الطازجة باستخدام ICAR Rheometer. تم تحديد مقاومة الانضغاط على عينات مكعب في عمر 3 أيام و 7 أيام و 28 يوماً و 60 يوماً. تشير النتائج إلى تحسين خصائص الخرسانة باستخدام مسحوق الرخام. أظهرت مقاومة الضغط للخرسانة زيادة بمحتوى 5% من مسحوق الرخام.

الكلمات المفتاحية: الريولوجيا، مسحوق الرخام، عتبة القص، اللزوجة، القوة، الليونة

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE

CHAPITRE I : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE1

I.1. INTRODUCTION	1
I.2. LE BETON	1
I.3. LES AJOUTS CIMENTAIRE	1
I.4. LA POUDRE DE MARBRE.....	2
I.4.1. Effet de la poudre de marbre sur les qualités des ciments	2
I.4.2. Effet de la poudre de marbre sur les propriétés physiques	3
I.4.3. Effet sur la porosité	3
I.4.4. Réactivité indirecte du filler de la poudre de marbre	3
I.4.5. Réactivité directe de la poudre de marbre	3
I.4.6. Effet de la poudre de marbre sur les aspects Rhéologiques	4
I.5. LA RHEOLOGIE DU BETON.....	4
I.5.1. Introduction	4
I.5.2. L'importance de l'étude rhéologique	4
I.5.3. La Rhéologie du béton frais	5
I.5.4. Paramètres rhéologique	5
I.5.4.1. La viscosité	5
I.5.4.2. Contrainte de cisaillement	5
I.5.4.3. Vitesse de cisaillement	5
I.5.4.4. Seuil de cisaillement	6
I.5.5. Modèle de Bingham	7
I.5.6. Facteurs influençant le comportement Rhéologique du béton frais	8
I.5.6.1. Le rapport eau/ciment	8
I.5.6.2. La finesse et composition chimique du ciment	8
I.5.6.3. Le temps	8
I.5.6.4. Squelette granulaire	9
I.5.6.5. Le Malaxage	9
I.5.6.6. Effet des additions minérales	9
I.5.7. Stabilité Rhéologique	10
I.5.7.1. La Ségrégation	10
I.5.7.2. Le Ressuage	10
I.5.8. La Rhéologie du béton durci	10
I.5.8.1. Comportement rhéologique	10
I.5.9. Conclusion	13

CHAPITRE II : CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX.....14

II.1. INTRODUCTION.....	14
II.2. MATERIAUX UTILES.....	14
II.3. CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX.....	14
II.3.1. <i>Caractéristiques du gravier</i>	14
II.3.1.1. <i>Analyse granulométrique par tamisage [NF EN 933-1]</i>	14
II.3.1.2. <i>Le coefficient d'aplatissement</i>	17
II.3.1.3. <i>La masse volumique</i>	18
II.3.1.4. <i>La porosité</i>	21
II.3.1.5. <i>La compacité</i>	21
II.3.1.6. <i>L'indice des vides</i>	21
II.3.1.7. <i>La résistance à la fragmentation par chocs: Essai los Angeles [NA EN1097-2]</i>	22
II.3.1.8. <i>Degré d'absorption d'eau [NA EN 1097-6]</i>	24
II.3.2. <i>Caractéristique du sable</i>	25
II.3.2.1. <i>Analyse granulométrique</i>	25
II.3.2.2. <i>Le module de finesse du sable [NFP 18-540]</i>	26
II.3.2.3. <i>La masse volumique du sable</i>	28
II.3.2.4. <i>La porosité, la compacité et l'indice de vides du sable</i>	29
II.3.2.5. <i>Essai au bleu de méthylène [NF EN 933-9]</i>	29
II.3.2.6. <i>Equivalent de sable</i>	31
II.3.3. <i>Caractéristiques du ciment CEM I 42,5</i>	32
II.3.3.1. <i>Caractéristiques physiques</i>	32
II.3.3.2. <i>Caractéristiques chimiques</i>	32
II.3.3.3. <i>Caractéristiques minéralogiques</i>	32
II.3.4. <i>Caractéristique de la poudre de marbre</i>	33
II.3.4.1. <i>Caractéristiques physiques</i>	33
II.3.4.2. <i>Caractéristiques chimiques</i>	33
II.3.5. <i>Caractéristiques du programme expérimental</i>	33
II.3.5.1. <i>Caractéristiques physiques</i>	33
II.3.5.2. <i>Caractéristiques chimiques</i>	34
II.3.5.3. <i>Caractéristiques minéralogiques</i>	34
II.3.6. <i>Caractéristiques de l'eau de gâchage</i>	34
II.3.6.1. <i>Caractéristiques physico-chimique de l'eau</i>	34
II.4. FORMULATION DU BETON.....	35
II.4.1. <i>Définition</i>	35
II.4.2. <i>Les résultats de formulation de notre béton</i>	37
II.5. ESSAI ET MATERIELS.....	37
II.5.1. <i>Les essais sur le béton à l'état frais</i>	37
II.5.1.1. <i>Le malaxage [NA EN 12390-2]</i>	38
II.5.1.2. <i>Affaissements au Cône d'Abrams [NA EN 12350-2]</i>	38
II.5.1.3. <i>Vibration [NA EN 12390-2]</i>	38
II.5.1.4. <i>Mesure au rhéomètre ICAR</i>	38

II.5.2. Les essais sur le béton à l'état durci	40
II.5.2.1. Les essais de compression [NA EN 12390-3].....	41
II.5.2.2. Essais de traction par flexion [NA EN 12390-3].....	41
CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSION	42
III.1. CARACTERISTIQUE RHEOLOGIQUE A L'ETAT FRAIS	42
III.1.1 Caractérisation Rhéologique du béton témoin	42
III.1.2. Caractérisation rhéologique des bétons de poudre de marbre	43
III.1.2.1. Poudre de marbre collectée au niveau de l'atelier de découpe	43
III.1.2.2. Poudre de marbre ré-broyée à l'aide du broyeur à boulets	46
III.1.3. Interprétation globale des résultats	51
III.2. CARACTERISTIQUE RHEOLOGIQUE DU BETON DURCI	52
III.2.1. La résistance à la compression	52
III.2.2. La résistance à la flexion	52
III.2.3. La résistance à la traction par flexion	53
III.2.4. Calcul du module de Young	54
III.2.5. La relation entre la résistance mécanique et le module d'élasticité	56
III.2.6. Evaluations du comportement du béton durci	56
III.1.6.1. Evaluation du comportement du béton durci à 3jours	56
III.1.6.2. Evaluation du comportement des bétons à 7jours	58
III.1.6.3. Evaluation du comportement du béton à 28jours	59
III.1.6.4. Evaluation du comportement du béton à 60jours	60
III.2.7. Relation entre le comportement rhéologique du béton à l'état frais et à l'état durci ...	61
CONCLUSION GENERALE	63

Liste des figures

• Figure 1.1 Schéma de vitesse de cisaillement.....	06
• Figure 1.2 Contributions de la phase solide et de la phase liquide à la résistance au Cisaillement du béton.....	06
• Figure 1.3 : Schématisation du modèle de Bingham.....	07
• Figure 1.4 model élasto-plastique parfait.....	11
• Figure 1.5 Model de Maxwel.....	12
• Figure 1.6 Essai de relaxation, diminution de la contrainte à déformation constante.....	13
• Figure 1.7 Essai de fluage déformation continue à chargement constante.....	13
• Figure 2.1 Courbe de l'analyse granulométrique du gravier 3/8.....	16
• Figure 2.2 Courbe de l'analyse granulométrique du gravier 8/15.....	17
• Figure 2.3 Courbe de l'analyse granulométrique du sable.....	27
• Figure 2.4 Courbe de mélange des composants.....	36
• Figure 2.5 le Rhéomètre ICAR et ces constituant.....	39
• Figure 2.6 Fenêtre du logiciel ICAR Rhéomètre.....	40
• Figure 3.1 Diagramme couple-vitesse de rotation pour le béton témoin (BT).....	43
• Figure 3.2 Diagramme vitesse-couple pour un béton avec 5% de PM au SSB 2400cm ² /g.....	44
• Figure 3.3 Diagramme vitesse-couple pour un béton avec 10% de poudre de marbre avec SSB 2400cm ² /g.....	45
• Figure 3.4 Diagramme évaluent les différent bétons.....	45
• Figure 3.5 Diagramme vitesse-couple pour un béton avec 5% de PM au SSB 6668cm ² /g.....	46
• Figure 3.6 Diagramme vitesse-couple pour un béton avec 10% de PM au SSB 6668cm ² /g.....	47
• Figure 3.7 Diagramme évaluent les différent bétons avec les différentes surfaces spécifiques de Blaine.....	48
• Figure 3.8 Histogramme d'évaluation du seuil de cisaillement dans les différent bétons avec les différentes SSB.....	49
• Figure 3.9 Histogramme d'évaluation de la viscosité dans les différents bétons avec les différentes SSB.....	50
• Figure 3.10 La résistance mécanique à la compression des bétons étudiés.....	52
• Figure 3.11 La résistance mécanique à la flexion des bétons étudiés.....	53
• Figure 3.12 La résistance mécanique à la traction des bétons étudiés.....	54
• Figure 3.13 Histogramme des modules d'élasticité.....	55
• Figure 3.14 Evaluation du module d'élasticité en fonction de la résistance mécanique.....	56
• Figure 3.15 courbes contraintes σ / déformations ϵ à 3jours.....	57
• Figure 3.16 courbes contraintes/déformations des bétons étudiés à 7jours.....	58
• Figure 3.17 Courbes contraintes/déformations des bétons à 28jours.....	59

- Figure 3.19 Courbes contraintes/déformations des bétons à 60 jours.....60

Liste des tableaux

• Tableau 2.1 L'analyse granulométrique du gravier (3/8)	15
• Tableau 2.2 L'analyse granulométrique du gravier (8/15)	16
• Tableau 2.3 : Le coefficient d'aplatissement.....	18
• Tableau 2.4 La masse volumique apparente (ρ_{app}) du gravier (3/8), (8/15).....	19
• Tableau 2.5 La masse volumique absolue (ρ_{abs}) du gravier (3/8), (8/15)	20
• Tableau 2.6 Porosité, Compacité et Indice de vides du gravier.....	22
• Tableau 2.7 Adaptation des charges des boulets correspondant à la classe granulaire.....	22
• Tableau 2.8 Estimation de la dureté des agrégats en fonction du coefficient LA.....	23
• Tableau 2.9 Résultats d'essai de Los Angeles du gravier (3/8) et (8/15)	24
• Tableau 2.10 Degré d'absorption d'eau du gravier (3/8), (8/15)	24
• 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 (SC+SD).....	27
• Tableau 2.14 résultats du module de finesse des sables.....	28
• Tableau 2.15 La masse volumique apparente (ρ_{app}) du sable.....	28
• Tableau 2.16 La masse volumique absolue (ρ_{abs}) du sable.....	28
• Tableau 2.17 Porosité, Compacité et Indice de vides du sable.....	29
• Tableau 2.18 Les catégories de la propreté du matériau par rapport aux limites des valeurs de VB.....	30
• Tableau 2.19 Résultat de l'essai au bleu de méthylène.....	30
• Tableau 2.20 Les préconisations en matière de propreté pour les sables utilisés dans les bétons.....	31
• Tableau 2.21 Les résultats des essais	32
• Tableau 2.22 Caractéristiques physiques du CEMI /42.5.....	32
• Tableau 2.23 Composition chimiques du CEMI /42.5.....	32
• Tableau 2.24 Composition minéralogique du CEMI /42.5.....	32
• Tableau 2.25 Caractéristiques physiques de la poudre de marbre.....	33
• Tableau 2.26 Composition chimique de la poudre de marbre.....	33
• Tableau 2.27 Caractéristiques physiques du béton avec la poudre de marbre.....	33
• Tableau 2.28 Compositions chimiques du béton avec la poudre de marbre.....	34
• Tableau 2.29 Caractéristiques physico-chimique de l'eau.....	34
• Tableau 2.30 Données de base de la formulation.....	35
• Tableau 2.31 Analyse granulométrique des matériaux.....	36
• Tableau 2.32 Les résultats de formulation de béton.....	37
• Tableau 2.33 Les résultats de formulation pour un volume de 36L.....	37
• Tableau 3.1 Résultats au Rhéomètre pour le béton témoin (BT).....	47
• Tableau 3.2 Résultats au rhéomètre pour un béton de 5% de poudre de marbre.....	48
• Tableau 3.3 Résultats au rhéomètre pour un béton de 10% de poudre de marbre.....	49

- Tableau 3.4 Résultats au rhéomètre pour un béton de 5% de poudre de marbre.....50
- Tableau 3.5 Résultats au rhéomètre pour un béton de 10% de poudre de marbre.....51
- Tableau 3.6 Variation du seuil de cisaillement dans les différent béton avec les différentes SSB.....53
- Tableau 3.7 Variation de la viscosité dans les différent béton avec les différentes SSB...54
- Tableau 3.8 La résistance à la compression des bétons étudie.....55
- Tableau 3.9 La résistance à la flexion des bétons étudiés.....56
- Tableau 3.10 La résistance à la traction des bétons étudiés.....56
- Tableau 3.11 Le module d'élasticité des bétons étudiés.....57
- Tableau 3.12 Valeurs des résultats obtenus des caractéristiques rhéologiques des deux états.....61
- Tableau 3.13 Evaluation des caractéristiques rhéologiques à l'état frais et à l'état durci....62

Liste des Symboles

- η_{pl} : Viscosité plastique.
- τ : Contrainte de cisaillement.
- dF : Projection de la force de frottement tangentielle.
- dS : Surface élémentaire d'une couche cisillée.
- γ : Vitesse de cisaillement.
- $\dot{\gamma}$: La dérivée par rapport au temps de la vitesse de cisaillement.
- τ_0 : Le seuil de cisaillement.
- ε : La déformation.
- σ : La contrainte.
- ρ_{app} : La masse volumique apparente.
- M : Masse.
- V : Volume.
- ρ_{abs} : La masse volumique absolue.
- $P(\%)$: La porosité.
- $C(\%)$: la compacité.
- $e(\%)$: L'indice des vides.
- LA : Le coefficient de Los Angeles.
- $A(\%)$: Degré d'absorption d'eau.
- SD : Sable de dune.
- SC : Sable concassé.
- MF : Module de finesse.
- VB : Le volume du bleu de méthylène introduit.
- ES : Equivalent de sable.
- ESP : Equivalent de sable avec piston.
- SSB : La surface spécifique de Blaine.
- PM : poudre de marbre.
- BPM : Béton avec la poudre de marbre.
- BT : Béton témoin.
- A : Affaissement au cône d'Abrams.
- $ICAR$: Centre International de Recherche des Agrégats.
- σ_f : La contrainte de flexion
- σ_c : La contrainte de compression.
- F : Charge.
- S : Surface.
- E_d : Le module d'élasticité dynamique.
- E_c : Le module d'élasticité statique.
- K : Constante.
- t : Age du béton en jours.
- V_v : Volume des vides.
- V_s : Volume des solides

INTRODUCTION GENERALE

Introduction Générale

Le béton occupe, depuis son invention au début du 19^e siècle, la première place en volume d'utilisation des matériaux dans le domaine du bâtiment et du génie civil. Son intérêt vient de sa grande facilité de mise en œuvre, sa résistance à la compression, sa durabilité et son faible coût. Il présente également d'autres qualités telles qu'une excellente tenue au feu, une grande résistance aux chocs, une bonne protection contre les radiations nucléaires, etc....

Les bétons utilisés doivent répondre à des exigences de formulation et de performance très rigoureuses. Le type de ciment, la présence d'ajouts cimentaires, le rapport eau/ciment, les différents types d'adjuvant, les dosages, le type ainsi que la taille des granulats sont quelques facteurs jouant un grand rôle sur la qualité finale d'un mélange. Toutefois, il ne suffit pas d'avoir uniquement une composition adéquate pour obtenir les propriétés désirées, encore faut-il être en mesure, en chantier, de mettre correctement le mélange en place (transport, consolidation, prise et finition) et, bien sûr, procéder à la cure appropriée. Ainsi, le béton doit posséder des propriétés rhéologiques lui permettant de s'écouler et combler adéquatement l'espace offert avec un minimum de ségrégation, offrir une bonne ouvrabilité ainsi qu'une bonne stabilité Rhéologique

La connaissance des propriétés et du comportement rhéologique du béton a une grande importance pratique tant pour le chantier que pour les laboratoires. La connaissance des propriétés et du comportement Rhéologique du béton permettra de poser sur une base scientifique la détermination des composantes du béton et de choisir le moyen le plus convenable de transport et la méthode la plus efficace et économique de son mise en place dans les constructions. La découverte de la particularité dans le comportement rhéologique du béton et les facteurs lesquels ce comportement dépend permettra de prévoir tant les propriétés mécaniques que les processus qui ont lieu dans la formation de la structure et des propriétés du béton durci.

L'emploi de certaines additions minérales dans la confection du béton contribue à une accélération du processus d'hydratation 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 à très jeune âge. Ces modifications des propriétés physico-chimiques des composants du béton dues à des additions minérales affectent directement les propriétés rhéologiques du béton frais et ses composants. En effet, cela peut conduire à une mise en place facile ou difficile du béton.

L'objectif de notre étude est d'évaluer expérimentalement l'apport de la poudre de marbre issu des déchets de marbreries sur le comportement rhéologique à l'état frais et à l'état durci d'un béton ordinaire. Le travail expérimental est entamé sur des bétons où le ciment est substitué partiellement par des différents pourcentages de la poudre de marbre (5% et 10%), où les paramètres rhéologiques du béton ont été mesurés par le rhéomètre ICAR. Dans ce contexte, cette étude comporte trois chapitres distincts.

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 et à la poudre de marbre. La seconde porte sur l'étude rhéologique du béton.

1.2. Le béton

Le béton est un matériau composite aggloméré constitué de granulats durs de diverses dimensions collées entre eux par un liant. Dans les bétons courants, les granulats sont des grains de pierre, sable, gravier, cailloux et le liant est un ciment, généralement un ciment portland. Les composants sont très différents :

Ciment: c'est le constituant qui va réagir chimiquement avec l'eau, devenir résistant, et lier tous les ingrédients.

L'eau: c'est elle qui va hydrater le ciment et rendre le mélange malléable.

Les granulats: ils vont former une disposition plus ou moins ordonnée qui va conférer au béton sa résistance. C'est le ciment hydraté qui va "coller" les granulats.

Le sable: il permet de remplir les trous qui subsistent entre les gros granulats.

Toutes les opérations de mise en œuvre (Formulation, préparation du béton frais, transport et la mise en place) sont importantes si l'on veut obtenir un béton dense de qualité homogène.

Pour être durable, un béton doit :

- Être bien composé.
- Correctement mis en œuvre
- Protégé des causes possibles d'altération par des dispositions constructives adéquates.

1.3. Les ajouts cimentaires

Les ajouts cimentaires sont des matériaux présentant une granulométrie très fine que l'on incorpore le plus souvent au ciment Portland et donnent ses propriétés au béton, grâce à une activité hydraulique et/ou pouzzolanique. Les ajouts permettent soit d'améliorer les caractéristiques du béton ou de lui conférer des propriétés spécifiques. Contrairement aux adjuvants, les ajouts doivent être pris en compte dans le calcul de la Composition du béton. Des ajouts, tels que les cendres volantes, le laitier granulé de haut fourneau (LGHF) et les fumées de silice, les fillers etc... Entrent dans la majorité des compositions du ciment dans le but d'améliorer ses caractéristiques rhéologiques et/ou mécaniques. On obtient ainsi un liant de composition binaire voire tertiaire.

Les ajouts sont des matières premières naturelles, artificielles, sous-produits d'une autre industrie, résidus industriels ou déchets industriels polluant, ils sont ajoutés soit au mélange de matières premières avant le broyage, soit à la farine crue, soit au clinker portland avant ou après le broyage, leurs pourcentages dans la masse varient suivant leur but d'ajouts cimentaires et le rôle qu'elle peut jouer, ainsi on trouve des ajouts en faibles teneurs, moyennes ou en fortes teneurs. On distingue deux types d'ajouts : inertes et actif

- Les ajouts minéraux actifs : Les ajouts minéraux actifs consiste à fixer la portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ du ciment qui se dégage lors de l'hydratation de C_3S pour former des compositions difficilement solubles qui contribuent à la résistance du ciment. Les ajouts minéraux actifs améliorent la compacité du béton, cette compacité donne une meilleure protection du ciment à l'agressivité des eaux douces et des sels.
- Les ajouts minéraux inertes : comme les fillers calcaires ; l'objectif dans leur utilisation est d'améliorer la compacité du béton et donc sa résistance. Elles sont également utilisées pour améliorer la consistance et la rhéologie des bétons.

1.4. La poudre de marbre

Le marbre est une roche calcaire de texture assez dense, a tissu compact ou cristallin. Le degré de pureté du marbre est responsable de sa couleur et de son aspect. Ces couleurs proviennent essentiellement d'oxydes métalliques du fer, il est blanc si la roche dont il provient est uniquement composée de calcite.

Le marbre a été couramment utilisé comme matériau de construction depuis les temps anciens. Par conséquent, les déchets de marbre en tant que sous-produits sont des matériaux très importants qui nécessitent un effort d'élimination environnemental adéquat. De plus, le recyclage des déchets sans gestion adéquate peut entraîner des problèmes environnementaux plus importants que les déchets eux-mêmes. La poudre de marbre est un déchet produit lors de la production de marbre. Une grande quantité de poudre est générée pendant le processus de coupe. Le résultat est qu'environ 25% de la masse de marbre d'origine est perdue sous la forme de poussière. Laisser ces déchets directement dans l'environnement peut causer des problèmes environnementaux tels que l'augmentation de l'alcalinité du sol, affecter les plantes, affecter le corps humain, etc. La poudre de marbre, un déchet solide généré par le traitement du marbre peut être utilisé comme matériau de remplissage dans le ciment ou les granulats fins lors de la préparation du béton. La poudre de marbre peut être utilisée comme adjuvant dans le béton, de sorte que la résistance du béton peut être augmentée.

La poudre de marbre qui ajoutés au ciment Portland peuvent en général accélérer l'hydratation du ciment avec comme conséquence, une amélioration des résistances à la compression à jeune âge. Du point de vue chimique, la poudre de marbre n'a pas des propriétés pouzzolaniques, mais dans certains cas selon la nature du ciment, elle peut réagir avec les aluminates du ciment.

1.4.1 Effet de la poudre de marbre sur les qualités des ciments

Agissant principalement grâce à une granulométrie appropriée par leur propriété physique sur certaines qualités du ciment :

- Accroissement de maniabilité.

- Diminution de perméabilité.
- Diminution de capillarité.
- Réduction des fissures.
- Augmente la cohésion.
- Accélérer l'hydratation du ciment

1.4.2 Effet de la poudre de marbre sur les propriétés physiques

La poudre de marbre incorporée dans un béton modifie le squelette granulaire du mélange, qui peut compenser un déficit en particules fines. Le squelette se trouve alors optimisé par remplissage d'une partie de volume des vides, la maniabilité du mélange s'améliorant. Si la quantité d'eau est réduite pour conserver la même maniabilité, alors la résistance augmente, cet accroissement de la résistance est appelé effet de filler de la poudre de marbre (<http://thesis.univ-biskra.dz/2446/3/chapitre1.pdf>).

1.4.3 Effet sur la porosité

Les fillers de la poudre de marbre auraient tendance à modifier la densité des C-S-H. En général la densité des C-S-H d'échantillons de pâtes contenant du CaCO_3 (corrigée en prenant en compte la présence de portlandite, de CaCO_3 et de C_3S anhydre) est légèrement plus importante. Cependant cette relation dépend également du degré d'hydratation des matériaux. La densité d'une pâte de C_3S incorporant du carbonate de calcium est par contre plus faible dans le cas de l'utilisation de CaCO_3 [Adams et Race, 1990].

À un certain degré d'hydratation, une pâte de C_3S ne contenant pas de CaCO_3 a

Une porosité totale plus faible. Cependant durant les sept premiers jours d'hydratation, une pâte

Contenant par exemple 15% de CaCO_3 peut posséder une porosité plus faible, due des degrés

Différents d'hydratation comparativement à une pâte du même âge sans CaCO_3 , [Ramachandan et Zhang Chuin-mei, 1986].

1.4.4 Réactivité indirecte de la poudre de marbre

L'addition de CaCO_3 augmente le taux d'hydratation du silicate tricalcique. Cet effet serait d'autant plus important que la finesse des particules ajoutées diminuerait et que la quantité de carbonate de calcium ajoutée serait accrue. Le carbonate de calcium accélérerait l'hydratation du silicate tricalcique comme le déchlorure de calcium mais sans toutefois diminuer la période d'induction. L'effet accélérateur est particulièrement marqué pour une teneur optimale en CaCO_3 . Après cet optimum, il pourrait bloquer la dissolution et la cristallisation de produits d'hydratation. Cela pourrait provenir du fait que des particules de CaCO_3 seraient incorporées dans la phase des C-S-H. Plus la quantité de CaCO_3 incorporée serait grande, plus cette partie prise par les C-S-H serait importante, du moins jusqu'à une valeur de 25% (<http://thesis.univ-biskra.dz/2446/3/chapitre1>).

1.4.5 Réactivité directe de la poudre de marbre

Longuet, et al ont introduit la notion de filler inerte ou actif. Ils ont proposé d'étudier la réactivité avec le C_3A comme évaluation de la réactivité hydraulique de la poudre de marbre donné. En effet, il a été démontré que le CaCO_3 peut réagir avec le clinker. Des analyses de diffraction aux rayons

(X) a permis de détecter la présence de carbo-aluminates de calcium hydratés dans des pâtes de ciment. Ces produits pourraient se former en présence ou non de gypse dans le mélange. La formation de carbo-aluminates de calcium hydraté est vue comme analogue à celle de l'ettringite. Il y a composition entre SO_4 et CO_3 pour réagir avec les aluminates de calcium. La participation directe du carbonate de calcium (introduit par le biais de l'addition de fillers calcaires) à la réaction avec hydraté de formule $C_3A \cdot CaCO_3 \cdot 11H_2O$. La forme $C_3A \cdot 3CaCO_3 \cdot 27H_2O$ aurait été identifiée dans un mélange cimentaire avec $CaCO_3$ (<http://thesis.univ-biskra.dz/2446/3/chapitre1.pdf>).

1.4.6 Effet de la poudre de marbre sur les aspects rhéologiques

La présence de la poudre de marbre implique des variations du seuil de cisaillement et de la viscosité plastique. L'effet s'oriente vers un effet fluidifiant.

1.5. La Rhéologie des bétons

1.5.1 Introduction

L'étude Rhéologique appliquée aux bétons est l'un des aspects scientifiques des bétons le plus étroitement lié au domaine pratique. Les difficultés liées au malaxage, à l'écoulement dans les coffrages, au maintien de la stabilité Rhéologique, à la capacité à se consolider ainsi que la réalisation d'une finition de surface adéquate ne sont que quelques exemples de problématiques pouvant être rencontrées avec l'utilisation d'un béton ne possédant pas un comportement Rhéologique adéquat. Dans cette optique, la composition d'un mélange de béton frais doit se faire selon les règles de l'art, tant en qualité qu'en proportion de ciment, d'agréats et d'ajout minéral et d'adjuvant chimique (Tattersall and Banfill, 1983). Chacune des composantes de la formulation d'un mélange de béton joue un rôle essentiel dans le comportement Rhéologique.

L'intérêt derrière l'étude Rhéologique du béton est de pouvoir quantifier et qualifier le comportement du béton à partir du contact eau/ciment jusqu'au moment où le béton n'est plus maniable. La durée de cette période est variable: elle se traduit généralement, dans le cas de béton ordinaire, dans une échelle de temps s'exprimant en heures.

1.5.2 L'importance de l'étude Rhéologique :

Bien que les propriétés du béton à l'état durci soient plus évoquées pour les bétons d'aujourd'hui, il s'avère que si un béton ne peut pas être mis en place correctement, ses propriétés désirées ne seront pas obtenues. Pour chaque application, les caractéristiques requises pour le béton frais sont différentes et définissent si un béton a de bonnes propriétés à l'état frais telles que les besoins de finition, de mise en place, de pompabilité, de résistance à la ségrégation etc... Aujourd'hui, le développement des nouveaux bétons intensifie le besoin de caractériser encore mieux le comportement du béton et son écoulement. De nombreux ajouts cimentaires et adjuvants organiques ont fait leur apparition et viennent apporter des modifications importantes au béton. L'importance de la maniabilité et de sa mesure ont pris du même coup une importance primordiale.

Les tests empiriques conventionnels ne suffisent plus pour certains cas à bien caractériser le comportement lors de l'écoulement et de la mise en place du béton frais. Le développement de

nouveaux appareils basés sur une approche plus fondamentale et Rhéologique donne des résultats plus adéquats et reflète bien l'aptitude physique du matériau à se déplacer sous son propre poids.

1.5.3. La Rhéologie du béton frais

Le comportement rhéologique du matériau : maniabilité, ouvrabilité, consistance, cohésion, écoulement, mobilité et même la pompabilité. Certains termes, comme la consistance, font référence à un indice de mobilité, d'autres comme la cohésion, réfèrent à la stabilité. Aucune règle stricte ne limite l'utilisation de ces termes. De façon générale, une bonne ouvrabilité signifie qu'un mélange est en mesure de se mettre en place de manière efficace. Par contre, il est peu fréquent de décrire l'évolution de celle-ci dans le temps. L'aspect de la stabilité est souvent négligé, ou mal compris, ce qui peut se traduire par des problèmes de ségrégation et/ou de ressuage excessif.

1.5.4 Paramètres Rhéologiques

1.5.4.1 La viscosité

On considère idéalement un liquide au repos comme un ensemble de couches moléculaires parallèles soumise à une contrainte tangentielle. Si une des couches du liquide se déplace par rapport à celle qui lui est sous-jacente, en raison du frottement permanent sur les molécules de la seconde couche, le mouvement est transmis partiellement à cette dernière en même temps que la vitesse de déplacement de la première couche diminue. Cet effet de retard, provoqué par la friction interne des molécules de la couche sous-jacente sur celle de la couche supérieure, est appelé viscosité η [Pa.s]. Donc, la viscosité peut être définie comme la résistance à l'écoulement d'un système soumis à une contrainte tangentielle. Elle est caractérisée par un coefficient de viscosité qui joue un rôle essentiel dans la rhéologie des fluides. Pour certains fluides, sa connaissance suffit à caractériser de façon précise son comportement rhéologique (Courrazé G et Grossiord JL, 2000).

1.5.4.2 Contrainte de cisaillement

Au cours d'un mouvement laminaire de cisaillement, les couches sont animées d'un mouvement relatif les unes par rapport aux autres. Il en résulte l'apparition de contraintes τ [Pa], qui s'exerce tangentiellement à la surface de la couche (De larrard F et Belloc A, 1999). Donc, on peut dire que la contrainte de cisaillement est la force que l'on exerce par unité de surface du fluide:

$$\tau = dF/dS$$

Où:

dF : projection de la force de frottement tangentielle.

dS : surface élémentaire d'une couche cisailée.

1.5.4.3 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 (figure .1.1).

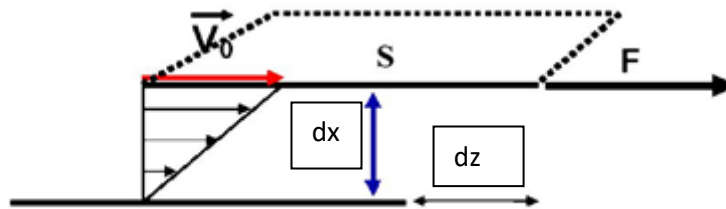


Figure 1.1 Schéma de vitesse de cisaillement.

Sous l'effet de la force tangentielle, la première couche moléculaire se déplace à la même vitesse. Les couches inférieures vont se mouvoir dans la même direction mais avec des vitesses de plus en plus petites. Il se crée un gradient de vitesse entre les deux plans. 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. (Courrazé G., Grossiord JL, 2000).

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

1.5.4.4 Seuil de cisaillement

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). (De larrard F., Belloc A, 1999) ont considéré que le seuil de cisaillement τ_0 [Pa] est la manifestation macroscopique du frottement entre les grains composant le squelette granulaire du béton y compris les grains de ciment et les particules ultrafines (figure1.2).

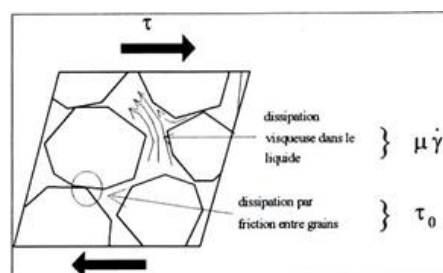


Figure 1.2 Contributions de la phase solide et de la phase liquide à la résistance au cisaillement du béton (De larrard F., Belloc A 1999).

1.5.5 Modèle de Bingham

Les modèles Rhéologiques sont des outils mathématiques utilisés pour caractériser le comportement d'un matériau lors de son écoulement. Le choix du modèle est justifié par le type de matériau étudié ainsi que la vitesse de déformation à laquelle le matériau est soumis. De nombreux modèles rhéologiques ont été proposés depuis le début de l'étude de la rhéologie.

Dans l'étude du béton frais, c'est le modèle de Bingham qui apparaît dans la majorité des études comme un bon compromis entre complexités du matériau et la réalisation d'une mesure expérimentale représentative. Ce modèle permet une bonne représentation du comportement rhéologique d'un béton frais.

Le modèle Rhéologique de Bingham est donc le modèle Rhéologique le plus couramment employé dans le domaine des matériaux cimentaires (Tattersall et Banfill, 1983). Ce modèle est utilisé pour des fluides qui sont caractérisés par la présence d'un seuil de cisaillement. Ce seuil de cisaillement « τ_0 » est défini comme la contrainte minimale à appliquer au fluide afin d'initier l'écoulement. La viscosité plastique (η_{pl}) est décrite par l'équation de la variation de contrainte de cisaillement et la vitesse de cisaillement.

$$\tau = \tau_0 + \eta_{pl} \cdot \dot{\gamma}$$

Avec :

- τ : Contrainte de cisaillement (Pa)
- τ_0 : Seuil de cisaillement (Pa)
- η_{pl} : Viscosité plastique (Pa.s)
- $\dot{\gamma}$: Vitesse de cisaillement (s^{-1})

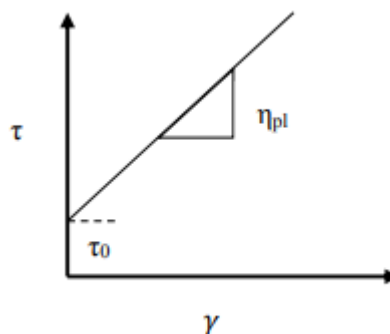


Figure 1.3 : Schématisation du modèle de Bingham

Les corps Binghamiens ne peuvent s'écouler tant que la contrainte de cisaillement n'est pas supérieure à la contrainte minimale d'écoulement, soit le seuil de cisaillement. Lorsque cette contrainte minimale est vaincue, le taux de cisaillement appliqué sur le matériau devient alors proportionnel à la contrainte de cisaillement. La constante de proportionnalité est la viscosité

plastique. Selon Ferraris et de Lanard (1998), les relations ne sont pas linéaires dans le cas des bétons très fluides (par exemple pour les bétons Auto-plaçant). Toutefois, comme ces chercheurs le soulignent, le modèle de Bingham semble s'appliquer assez bien dans le cas des bétons ordinaires et des bétons à haute performance. Ce modèle peut alors être considéré en première approximation.

Lors de mesures sur béton (ordinaire), on admet généralement qu'il existe une corrélation entre le seuil de cisaillement et l'affaissement (tel que mesuré au cône d'Abrams). Cependant, la viscosité plastique pourra varier pour 2 bétons ayant la même mesure de seuil de cisaillement, ce qui témoigne de l'importance de la mesure rhéologique, ici 2 points, afin de décrire le comportement d'un béton frais.

1.5.6 Facteurs influençant le comportement Rhéologique du béton frais

La complexité Rhéologique associée au béton frais réside dans le fait que tous les constituants d'un mélange influencent le comportement Rhéologique d'un béton frais. Les principaux facteurs influencent le comportement rhéologique du béton frais sont les suivants;

- Rapport eau/ciment;
- Finesse et composition chimique du ciment;
- Distribution granulométrique et surface spécifique des ciments utilisés;
- Dosage approprié des adjuvants chimiques;
- Temps d'hydratation;
- Distribution granulométrique, taille et forme des granulats;
- Teneur en air;
- Durée et intensité du malaxage.

1.5.6.1 Le rapport eau/ciment

L'augmentation du rapport eau/ciment entraîne une diminution du seuil de cisaillement ainsi qu'une diminution de la viscosité plastique (Tattersall, 1991; Westerholm, 2006).

1.5.6.2 La finesse et composition chimique du ciment

La surface spécifique est l'une des façons de caractériser la finesse du ciment. Vom berg (1979) a démontré que la finesse d'un ciment est un facteur affectant considérablement les caractéristiques rhéologiques. À maniabilité égale, une pâte fabriquée à partir d'un ciment ayant une surface spécifique plus grande entraîne une demande d'eau supplémentaire. Dans le cas d'un ciment Portland, la finesse peut varier normalement entre 3500 et 3800 cm²/g. Pour la poudre de marbre, la finesse peut varier entre 3200 et 7000 cm²/g. C'est pour cette raison, à dosage similaire, que le ciment à base de poudre de marbre est fluide que le ciment Portland (plus grande finesse).

1.5.6.3 Le temps

Le temps occupe une place particulière étant donné qu'il s'agit du seul facteur qui ne fait pas intrinsèquement partie de la composition d'un mélange de béton. Une des propriétés importantes du béton frais est sa stabilité dans le temps. Un béton doit demeurer maniable suffisamment longtemps (période dormante) pour permettre son transport, sa mise en place. Sa consolidation et sa finition

afin de livrer un produit de qualité. La durée de la période où le béton frais reste suffisamment maniable est limitée dans le temps à cause du processus d'hydratation. L'hydratation des matériaux cimentaires produit une structuration progressive du matériau, ce qui cause la perte de maniabilité du béton dans le temps.

1.5.6.4 Squelette granulaire

Plus la forme des granulats est sphérique. Plus la maniabilité du mélange dans lequel ils sont incorporés est élevée (Tattersall et Banfill, 1983). Il est toutefois plus important de considérer l'effet global du squelette granulaire sur la rhéologie (incluant les gros granulats. Le sable et les particules fines) que celui de chacune des particules prises individuellement. Les caractéristiques d'un squelette granulaire sont habituellement mesurées à partir d'une courbe granulométrique. Il semble que l'effet de la granulométrie sur la rhéologie doit être compris à partir du concept de surface spécifique et que, par conséquent, plus les particules fines ont une finesse élevée et plus les gros granulats ont un petit diamètre, plus la maniabilité du mélange sera affectée de façon négative. Il existe plusieurs techniques d'optimisation du squelette granulaire qui permettent d'obtenir une bonne rhéologie. Selon Shilstone (1990a), la rhéologie optimale est obtenue pour le squelette granulaire possédant la Compacité optimale.

1.5.6.5 Le Malaxage

Le malaxage est une opération visant à homogénéiser le mélange de béton par l'entremise d'une action mécanique. Les différents constituants de la formulation n'ayant pas les mêmes densités, il peut être difficile de rendre le mélange homogène (Yang et Jennings, 1995). En même temps, la période de malaxage permet de rendre le béton plastique, donc d'obtenir une consistance adéquate. Pour obtenir cette plasticité, le malaxeur doit apporter suffisamment d'énergie pour une durée suffisante. De plus, le malaxage a comme rôle, lorsque cela est requis, d'entraîner de l'air dans le mélange (Lemay, 2000). Lors du malaxage, un culbutage est exercé sur la masse de béton malaxé. Cette action produit un réseau de bulle d'air en emprisonnant dans un premier temps des bulles d'air pour ensuite, en présence d'un agent entraîneur d'air, les réduire et les stabiliser en bulle plus petite.

1.5.6.6 Effet des additions minérales

Les additions minérales engendrent des modifications significatives sur les propriétés rhéologiques des matériaux cimentaires à l'état frais et durci. A l'état frais, la présence des additions minérales modifie la structure du squelette granulaire et les frictions entre les composants solides dans la phase liquide. Au cours de la prise et du durcissement, les particules des additions minérales interagissent dans le processus d'hydratation du ciment en modifiant la structure des produits hydratés. (Zhang et Han, 2000) ont étudiés l'effet des additions ultrafines sur les propriétés rhéologiques des pâtes de ciment et ont constatés que le seuil de cisaillement augmente avec la quantité d'addition ultrafine incorporée tandis que la viscosité de la pâte varie avec la nature et la quantité d'addition.

1.5.7 Stabilité Rhéologique

1.5.7.1 La Ségrégation

La ségrégation dans un mélange de béton frais est une problématique à considérer et à éliminer lors de la conception et de la mise en place d'un mélange de béton. La ségrégation se manifeste par la séparation d'une proportion de la phase solide (principalement les gros granulats) du reste du mortier; la pâte migre vers les zones cisailées tandis que les gros granulats migrent vers les zones mortes. Une bonne granulométrie et une pâte à rhéologie adaptée peuvent diminuer les risques de ségrégations.

1.5.7.2 Le Ressuage

Le ressuage est un cas particulier de ségrégation où les particules solides ont un mouvement inverse à celui du liquide. En fait, pendant la période dormante du béton, l'eau, étant moins dense que l'ensemble des composantes du mélange, percole vers la surface (Josserand, 2002). Le ressuage est dû à un déséquilibre entre l'eau et les particules fines (en quantité trop faible), ainsi qu'un tassement du squelette granulaire. Un faible ressuage est acceptable, puisque l'eau de ressuage en surface prévient l'évaporation excessive.

1.5.8 La Rhéologie du béton durci

Pour donner une description mathématique précise du comportement mécanique macroscopique observé, on suppose que toutes les grandeurs qui caractérisent la réponse de la matière sont réparties d'une manière continue. Une telle conception, qui repose sur certaines hypothèses statistiques implicites, permet de définir la distribution des déformations et des contraintes comme des champs tensoriels. Les relations entre ces champs sont appelées lois de comportement ou équations constitutives.

En rhéologie, pour englober toute la variété des propriétés des matériaux réels, on se sert souvent de la description à un paramètre, où une contrainte représentative est reliée à la déformation ou à la vitesse de déformation correspondante.

1.5.8.1 Comportement rhéologique

Au court du temps, et dès l'arrêt du malaxage, le comportement de béton évolue d'une part à court terme par des interactions réversibles entre particules, d'autre part à plus long terme par des réactions chimiques irréversibles entraînant la prise.

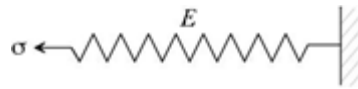
On distingue 3 comportements Rhéologiques :

A. Le comportement élastique

C'est le plus simple des comportements. Il est complètement réversible, c'est à dire que si les actions extérieures engendrant la déformation sont supprimées le solide retrouve sa forme initiale. Il n'y a donc pas de déformation résiduelle. Ce comportement est instantané et on le qualifie de linéaire si la mesure de la déformation est proportionnelle à la mesure

des actions. La grande majorité des solides se comportent de façon élastique, au moins jusqu'à un certain niveau de contrainte. D'un point de vue physique, ce sont les forces de cohésion entre les particules matérielles (forces électriques) qui sont à l'origine du comportement élastique.

Le modèle analogique 1D est celui du ressort de raideur E



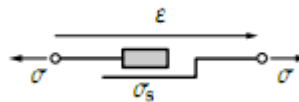
La relation contrainte – déformation s'écrit simplement

$$\sigma = E \varepsilon$$

B. Le comportement plastique

Au-delà d'un certain seuil de contrainte (appelé seuil de plasticité), un solide commence à subir une déformation irréversible ; après déchargement complet, le corps ne retrouve donc pas la forme qu'il possédait avant la mise en charge. On ne considère ici que les déformations indépendantes du temps : le comportement du corps est toujours le même, qu'on le déforme rapidement ou lentement. Cette déformation permanente porte le nom de déformation plastique. D'un point de vue physique, les déformations plastiques peuvent être dues soit aux mouvements relatifs des grains (cas des sols) qui le constitue soit à des glissements de rangées atomiques dans le réseau cristallin (propagation de dislocations dans l'arrangement régulier du réseau).

Le modèle analogique est celui du patin à frottement sec.



B.1. L'élasto-plasticité

Le modèle du patin précédent représente ce que l'on appelle un comportement rigide-plastique : il n'y a pas de déformation (corps rigide) tant que le seuil de plasticité n'est pas atteint ; une fois ce seuil atteint toute la déformation engendrée est irréversible.

Un comportement plus réaliste pour un solide est le comportement élasto-plastique : le comportement est élastique mais une déformation irréversible se développe si le seuil est atteint.

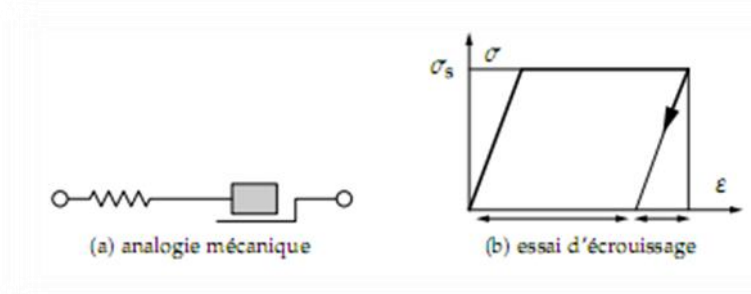
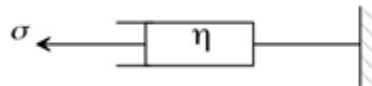


Figure 1.4 Model élasto-plastique parfait EPP

C. Le comportement visqueux

On aborde maintenant les comportements pour lesquels la vitesse du chargement intervient. Intuitivement, il est clair qu'un corps réagira différemment selon la vitesse à laquelle on le déforme : sa résistance sera, par exemple, d'autant plus grande que la vitesse de déformation sera importante. On parle alors de viscosité pour désigner cette propriété du type frottement interne. La viscosité des solides est à rapprocher de celle des fluides, mais les lois de comportement sont plus complexes dans le cas des corps solides. On se limitera ici à décrire de manière élémentaire la notion de solide visqueux linéaire.

Le modèle analogique correspondant à un élément visqueux linéaire est celui de l'amortisseur de viscosité



Pour pouvoir le déformer à un taux de déformation $\dot{\epsilon}$ constant il faut lui appliquer une contrainte

$$\sigma = \eta \dot{\epsilon}$$

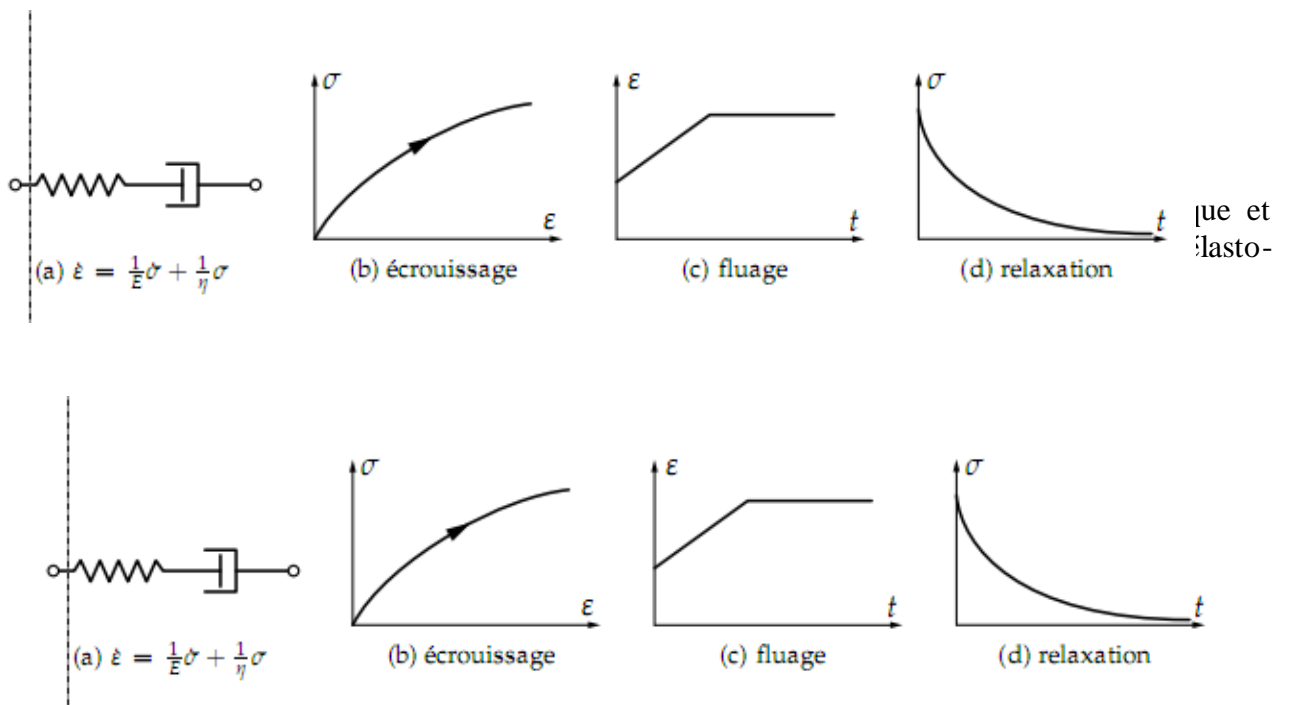


Figure 1.5 Model de Maxwell

C.2 phénomène de relaxation

La relaxation est une propriété non instantanée : lorsqu'on impose un échelon de déformation, du fait du caractère viscoélastique du matériau, la contrainte met un certain temps à atteindre sa valeur finale. Le matériau retourne progressivement à un état plus stable. La relaxation, comme la viscoélasticité, fait intervenir les notions de résistance à l'écoulement, de viscosité, d'amortissement.

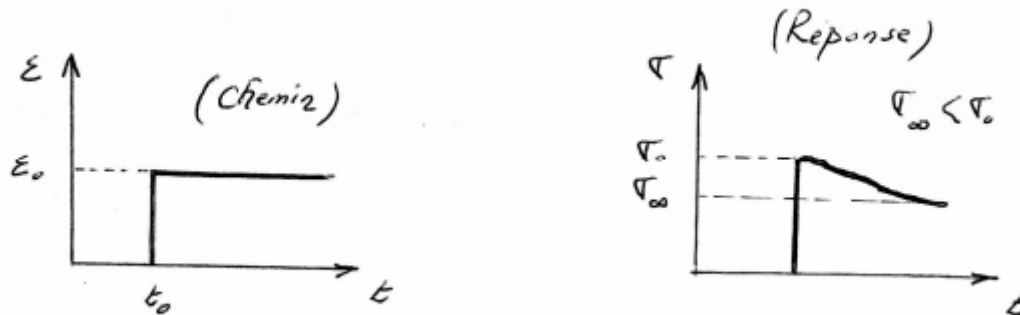


Figure 1.6 Essai de relaxation, diminution de la contrainte à déformation constante

C.3 phénomène de fluage

Le fluage est le phénomène physique qui provoque la déformation irréversible différée (c'est-à-dire non-instantanée) d'un matériau soumis à une contrainte constante, inférieure à la limite d'élasticité du matériau, au cours du temps. Le fluage ainsi que la relaxation de contrainte sont deux méthodes en quasi statique de caractérisation des matériaux visqueux (cas du béton).

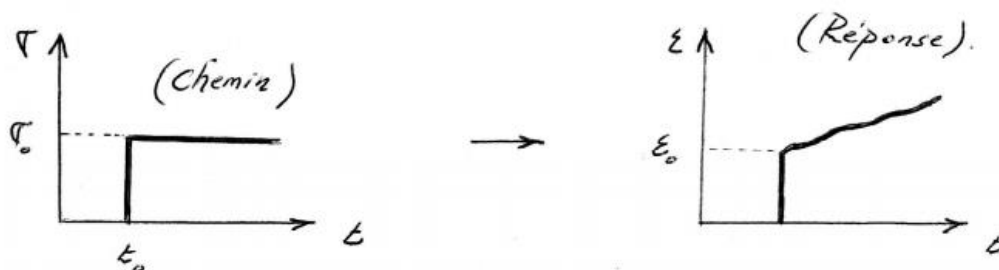


Figure 1.7 Essai de fluage déformation continue à chargement constante

1.5.9 Conclusion

L'étude du comportement Rhéologique du béton occupe un intérêt particulier pour la mise en œuvre du béton et l'étude de la résistance. La mesure des paramètres rhéologiques doit intégrer les

nouvelles composantes du béton telles que les additions minérales. De plus, il faut tenir compte des paramètres externes relatifs au type d'appareillage utilisé, type de climat et le décalage entre la mise en eau et le coulage ainsi qu'aux charges appliquées.

CHAPITRE 02

MATERIELES, MATERIAUX ET ESSAIS

Chapitre 02

MATERIAUX, MATERIELS ET ESSAIS

2.1 Introduction

Dans ce chapitre, on présente les différents matériaux utilisés dans cette étude, ainsi que leurs caractéristiques et on présente les calculs de formulation de notre béton et ensuite on d'écrit 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 classés dans les tableaux suivants :

Tableau 2.1 L'analyse granulométrique du gravies (3/8)

	Diamètre de tamis (mm)	Refus partiel(g)	Refus cumulés	% des refus cumulés	% de tamis cumulés
Gravier 3/8 600 g	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

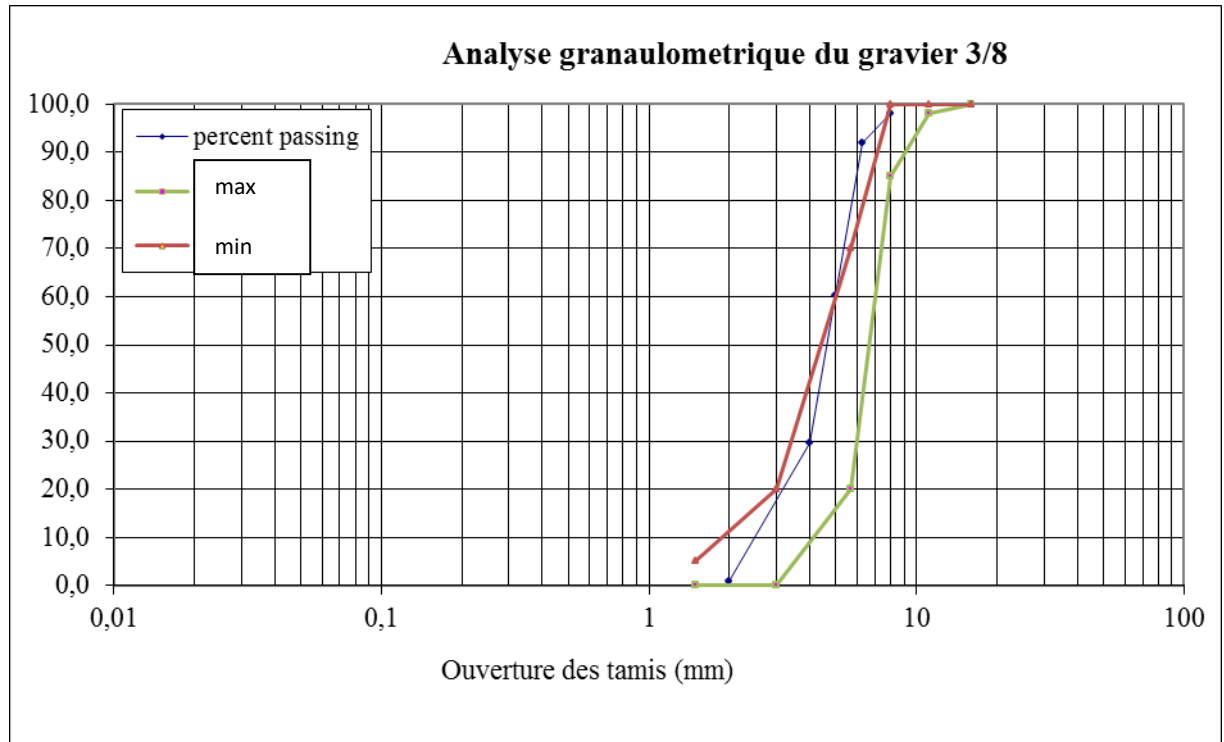


Figure 2.1 Courbe de l'analyse granulométrique du gravier 3/8.

Tableau 2.2 L'analyse granulométrique du gravies (8/15).

	Diamètre de tamis (mm)	Refus partiel(g)	Refus cumulés	% des refus cumulés	% de tamis cumulés
Gravier 8/15 2600 g	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	

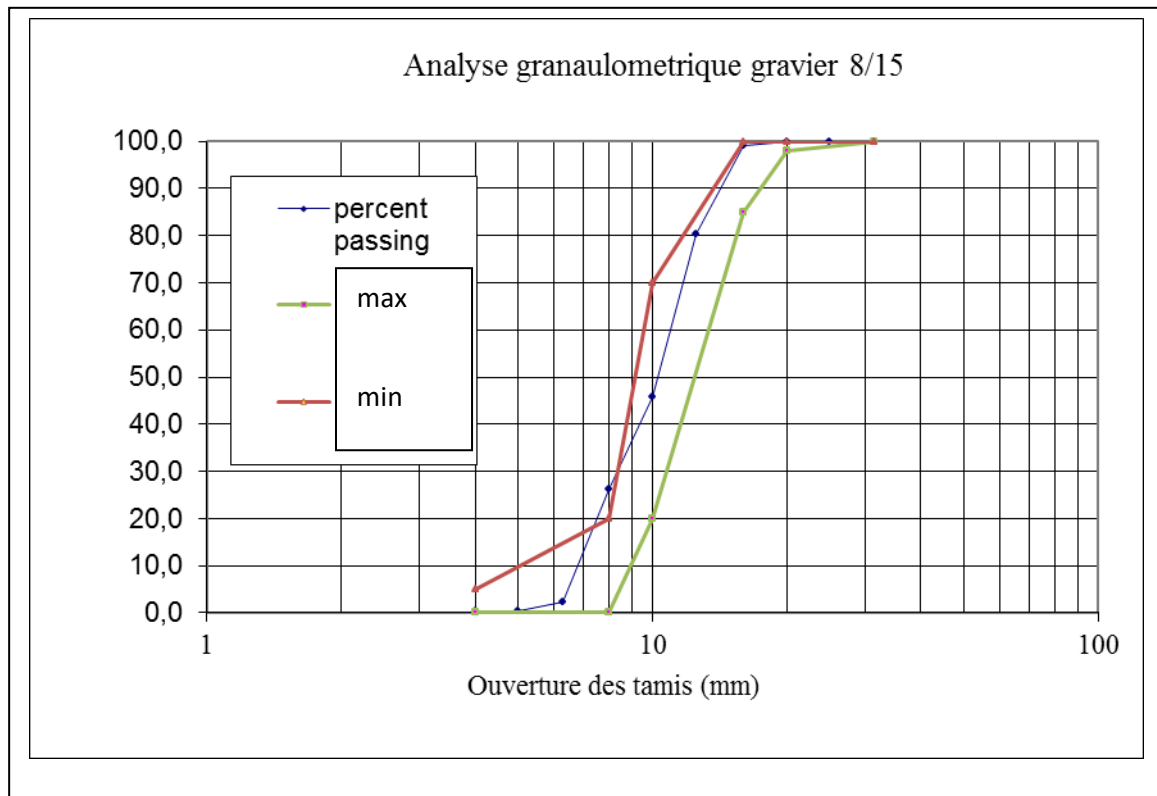


Figure 2.2 Courbe de l'analyse granulométrique du gravier 8/15.

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 M_0 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)	$A = \frac{M_2}{M_1} 100$
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		
$\Sigma M_1=370.33g$		$\Sigma M_2=313.31$		

➤ 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 (g/cm³).

➤ 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 classés dans les tableaux suivants :

Tableau 2.4 La masse volumique apparente (ρ_{app}) du gravier (3/8), (8/15).

Matériaux	M (kg)	V(L)	ρ_{app} (kg/l)	ρ_{app} Moy (g/cm ³)
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 seule sans tenir compte les vides et les pores). Elle est exprimée en (g/cm³).

➤ 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 on 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 les tableaux suivants :

Tableau 2.5 La masse volumique absolue (ρ abs) du gravier (3/8), (8/15).

Matériaux	M(g)	V1 (ml)	V2 (ml)	ρ abs	ρ moy (g/cm ³)
Gravier (3/8)	300	400	515	2.7	2.71
			510	2.72	
Gravier (8/15)	300	400	510	2.56	2.57
			515	2.60	

2.3.1.4 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 masses volumique pour déterminer la porosité de notre gravier d'où :

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

2.3.1.5 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 :

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

2.3.1.6 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 du gravier.

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

2.3.1.7 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 ci-après.

Tableau 2.7 Adaptation des charges des boulets correspondant à la classe granulaire

Classe granulaire (mm)	Nombre de boulets	Masse total 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

- Introduire 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 séché. 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 suivant 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 présentés dans le tableau suivant :

Tableau 2.9 Résultats d'essai de Los Angeles du gravier (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.

2.3.1.8 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 suivant :

Tableau 2.10 Degré d'absorption d'eau du gravier (3/8). (8/15).

Fraction	M _h (g)	M _s (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 concassé fabriqué à 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 suffit 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
Sable de dune 300 g	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
	5	0	0	0	100
Sable concassé 300 g	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

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 = $1/100(\sum \text{refus cumulés en \% des tamis } 0,16 - 0,315 - 0,63 - 1,25 - 2,5 - 5)$

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

Après avoir calculé le module de finesse des sables il est obligatoire de corriger le sable de dune, car celui la présente une grande finesse.

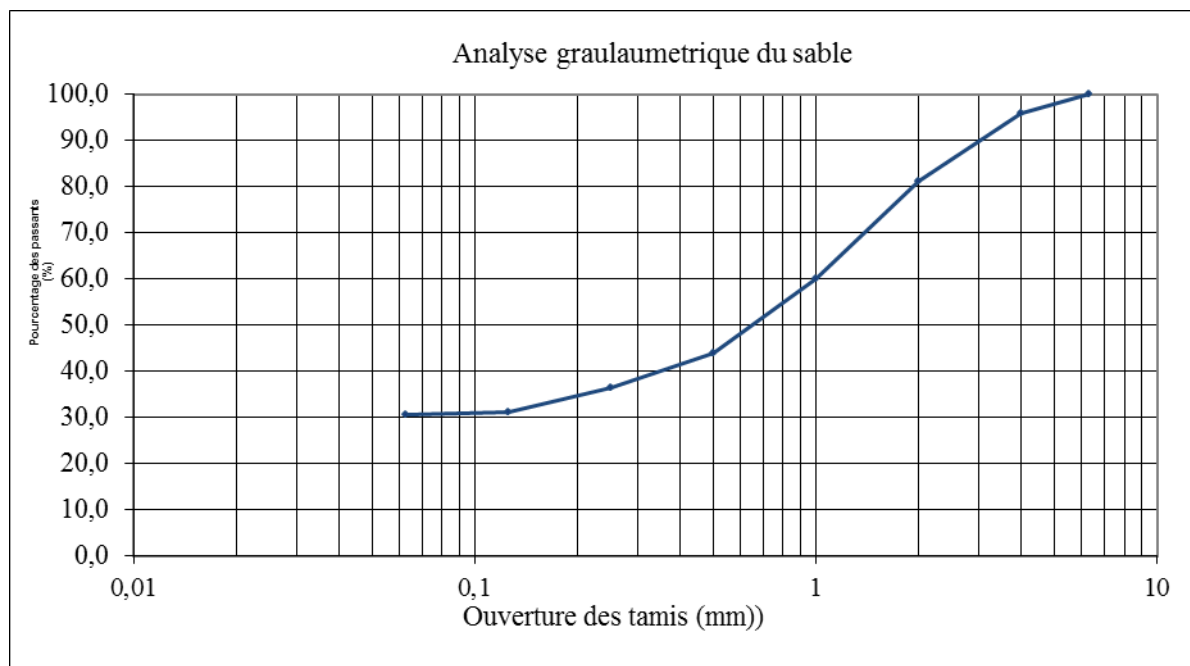
Le meilleur mélange choisi est le pourcentage suivant :

25% sable de dune (SD);

75% sable concassé (SC).

Tableau 2.13 Résultats de l'analyse granulométrique pour le sable (SD+SC)

	Diamètre de tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulés	% des refus cumulés	% de tamis cumulés
	5	0	0	0	100
Sable de mélange 300 g	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

Le module de finesse du sable mélange (SD+SC) :

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

MF=2.61

Tableau 2.14 Résultats du module de finesse des sables

Sables	MF
SD	0.91
SC	3.20
25%SD+75%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

1) La masse volumique apparente (ρ_{app})

Tableau 2.15 La masse volumique apparente (ρ_{app}) du sable.

Matériaux	M (kg)	V(L)	ρ_{app} (kg/l)	ρ_{app} Moy (g/cm ³)
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	
SD+SC	1.76		1.76	1.74
	1.73		1.73	
	1.75		1.75	

2) La masse volumique absolue ou spécifique

Tableau 2.16 La masse volumique absolue (ρ_{abs}) du sable

Matériaux	M(g)	V1 (ml)	V2 (ml)	ρ_{abs}	ρ_{moy} (g/cm ³)
SD	300	400	505	2.85	2.78
			510	2.72	
SC			511	2.7	2.7
			511	2.7	
SD+SC			509	2.59	2.61
			510	2.62	

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

Tableau 2.17 Porosité, Compacité et Indice de vides du Sable.

Gravier	Porosité (%)	Compacité (%)	Indice des vides (%)
SD	48	52	92
SC	37	63	58
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 5minute.
- 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 2.18 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 2.19 Résultat de l'essai au bleu de méthylène

Sables	M(g)	V (cm ³)	VB	
SD	200	5	0.25	
		5		
		5		
SC		200	5	0,75
			10	
			15	
75%SD+25%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 flocculat 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 2.20 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 ≤ SE < 70	Sable légèrement argileux - de propreté admissible pour béton de qualité quand on ne craint pas particulièrement de retrait
70 ≤ 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 2.21 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 ciment portland artificiel CEMI /42.5 de AIN LEKBIRA.

2.3.3.1. Caractéristiques physiques

Tableau 2.22 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. Caractéristiques chimiques

Tableau 2.23 Compositions chimiques du 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. Caractéristiques minéralogiques

Tableau 2.24 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. Caractéristique de la poudre de marbre

La poudre de marbre utilisé est un déchet des marbreries collectée directement des ateliers de découpe des plaques de marbre.

2.3.4.1. Caractéristiques physiques

Tableau 2.25 Caractéristiques physiques de la poudre de marbre.

densité	Perte au feu %	PH	inflammabilité	Surface spécifique de Blaine (cm ² /g)		Couleur
2.7	41.81	9 +/- 0.5	Non	2400	6668	Blanche

2.3.4.2. Caractéristiques chimiques

Tableau 2.26 Compositions chimiques de la poudre de marbre.

élément	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	CaO	MgO
%	0.13	0.11	0.04	0	0.05	57.67	0.17

2.3.5. Caractéristiques du programme expérimental

Les compositions du liant ciment plus poudre de marbre (PM) en tant qu'ajouts minéral avec des teneurs de 5 et 10% de la masse de ciment.

2.3.5.1. Caractéristiques physiques

Tableau 2.27 Caractéristiques physiques du béton avec la poudre de marbre.

		BPM5%	BPM10%
densité		3.05	3.04
perte au feu %		3.31	5.77
La surface spécifique de Blaine (cm ² /g)		6668	
		2400	
temps de prise (min)	Début	180	170
	fin	385	420
La consistance normale (E/C)		0.26	0.26
Refus % au 80µ		6	4

2.3.5.2. Caractéristiques chimiques

Tableau 2.28 Compositions chimiques du béton avec la poudre de marbre.

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	CaO	MgO
BPM5%	20.52	4.19	4.74	0.31	0.13	62.25	1.36
BPM10%	19.33	3.97	4.47	0.30	0.13	61.94	1.26

On remarque bien que plus le taux de poudre de marbre augmente, plus le taux de la silice SiO₂ et le taux de la chaux CaO diminues, ce qui augure un changement dans la cinétique d'hydratation du ciment et ainsi sur les propriétés physico-chimiques et mécaniques du béton.

2.3.6. Caractéristiques de l'eau de gâchage

Pour notre béton nous avons utilisé de l'eau du robinet disponible au laboratoire de génie civil de notre université.

2.3.6.1. Caractéristiques physico-chimique de l'eau

Tableau 2.29 Caractéristiques physico-chimiques de l'eau.

Paramètre	Mesures
PH	7.62
Conductivité	1450.11 c/cm
cl-	0.24mg/l
NO ₂ -	0.15mg/l
SO ₄	180.22mg/l
Turbidité	1.71NTU
Nitrite	0
Résidu sec	100mg/l

Ces résultats montrent que notre eau est apte pour la confection de notre béton.

2.4 Formulation du béton

La composition du béton consiste à définir le mélange optimal des différents granulats, du ciment et de l'eau à fin de réaliser un béton dont la qualité recherchée en ce qui concerne l'ouvrabilité, la résistance et la durabilité.

Pour déterminer la composition de notre béton, nous avons utilisé une méthode de calcul de composition est celle de la méthode de Dreux-Gorisse.

2.4.1 Définition

L'étude de la composition d'un béton consiste à définir le mélange optimal des différents granulats dont on dispose ainsi que le dosage en ciment et en eau afin de réaliser un béton dont les qualités soient celles recherchées pour la construction de l'ouvrage ou de l'élément d'ouvrage en cause. Plusieurs méthodes sont proposées parmi lesquelles la méthode pratique simplifiée dite méthode "Dreux Gorisse" Elle permet de définir de façon simple et rapide une formule de composition à peu près adaptée au béton étudié mais que, seules quelques gâchées d'essais et la confection des éprouvettes permettront d'ajuster au mieux la composition à adopter définitivement en fonction des qualités souhaitées et des matériaux effectivement utilisés. Les paramètres essentiels utilisés sont :

- Fc28 : Résistance en compression à 28 jours,
- A : Affaissement au cône d'Abrams en cm,
- D : Dimension maximale des granulats en mm.

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

Tableau 2.30 Données de base de la formulation.

DESIGNATION	G 8/15	G 3/8	Sable	Dosage en ciment
Masse volumique App	1,56	1,54	1,74	400
Masse volumique Abs	2,57	2,71	2,61	Rapport C / E
Impureté %			-	
Equivalent de sable %	-	-	85	1,85
Module de finesse	-	-	2,2	Résistance
valeur de bleu méthylène	-	-		demandée (Mpa)
Coefficient App	-	-	-	30

Tableau 2.31 Analyse granulométrique des matériaux.

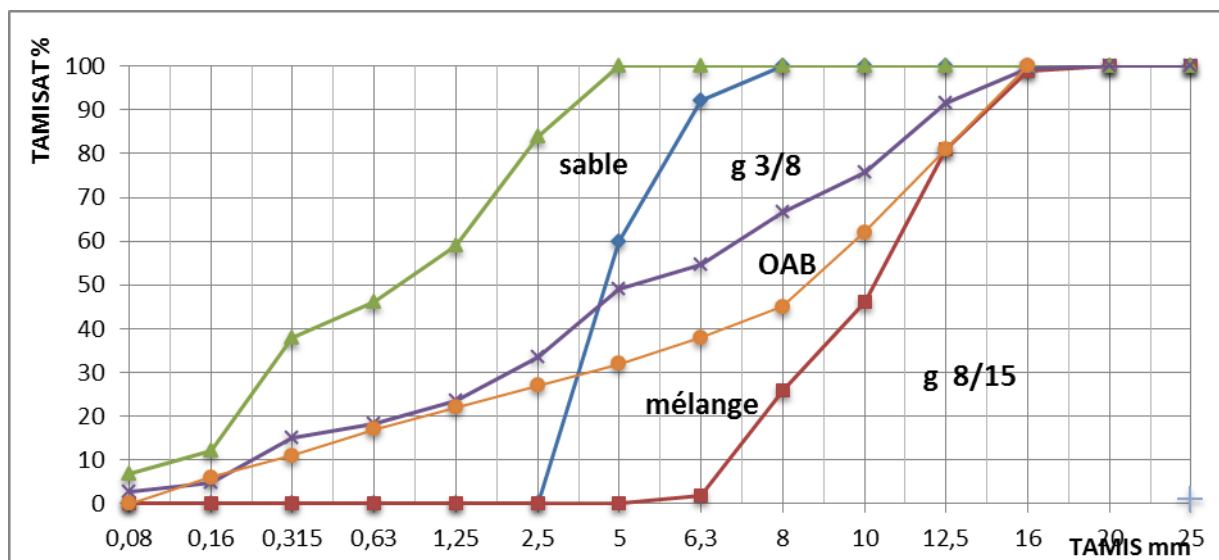
tamis mm	G 8/15	G 3/8	MELANGE SABLE	MELANGE	OAB
25	100	100	100	100	
20	100	100	100	100	
16	99	100	100	100	100
12,5	81	100	100	91	81
10	46	100	100	76	62
8	26	100	100	67	45
6,3	2	92	100	55	38
5	0	60	100	49	32
2,5	0	0	84	34	27
1,25	0	0	59	24	22
0,63	0	0	46	18	17
0,315	0	0	38	15	11
0,16	0	0	12	5	6
0,08	0	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.

2.4.2 Les résultats de formulation de béton

Tableau 2.32 Les résultats de formulation de béton.

Composants	%	Volume Absolu (Litre)	Densité Absolu	Densité Apparente	Composition 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

Après avoir effectué la formulation pour 1m³ de béton ; suite a ça il nous faut faire une pour le volume de 36L soit le volume du récipient du Rhéomètre ICAR.

Tableau 2.33 Les résultats de formulation pour un volume de 36L.

Composants	%	Volume Absolu (Litre)	Densité Absolu	Densité Apparente	Composition pondérale pour 1 m ³ de béton (Kg)
Graviers		696			
Gravier 8/15	45	313	2,57	1,56	28.98
Gravier 3/8	15	104	2,71	1,54	10.18
Sables	40	278	2,61	1,74	26.17
Ciment	400	129	3,10	3,10	14.4
Eau de gâchage		216	1,00	1,00	7.77
Totale	100	1041			87.50

2.5 Essais et matériels

2.5.1 Les essais sur le béton à l'état frais

On sait que le béton est le matériau obtenu par solidarisation par un liant de ciment, un squelette granulaire composé de graviers et de sables.

2.5.1.1 Le malaxage [NA EN 12390-2]

Les constituants sont introduits dans le malaxeur à l'ordre suivant :

- Introduire les constituants secs ;
- Malaxage à sec de durée de 1min et 30s ;
- Introduire l'eau en malaxant pendant 3 min ;
- Mesurer l'affaissement.

2.5.1.2 Affaissements au Cône d'Abrams [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 cône utilisé pour réaliser cet essai a une hauteur de 30cm et de diamètre. Placé sur une surface lisse, la petite ouverture vers le haut, le cône est rempli de béton en 3 couches. Chacune des couches est compacte avec 25 coups d'une tige métallique normalisée de 1.6cm de diamètre, dont l'extrémité est arrondie.

Une fois le cône rempli, le dessus de la surface doit être arasé en se servant de la tige et on effectue des mouvements de vas et vient. Durant ces opérations, le cône doit demeurer fixe sur la base lisse ; des écrous de serrage situés à la base du cône permettent de le 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 appelé l'affaissement. La valeur de l'affaissement est exprimée en cm

Dans notre étude on a fixé l'affaissement à : 11 cm.

2.5.1.3 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 de l'amplitude des oscillations, ainsi que la durée de vibration.

La vibration de notre béton a été réalisée à l'aide d'un vibreur à béton électrique.

2.5.1.4 Mesure au rhéomètre ICAR

Cet essai consiste à mesurer la rhéologie du béton à l'état frais à l'aide du rhéomètre ICAR.

Le Rhéomètre ICAR est composé d'un récipient à tiges vertical au tour du périmètre pour éviter le glissement du béton, une aube a 4 lames de diamètre et de hauteur de 127mm, un cadre fixateur pour attacher l'ensemble aube/conducteur, un conducteur et un ordinateur portable.

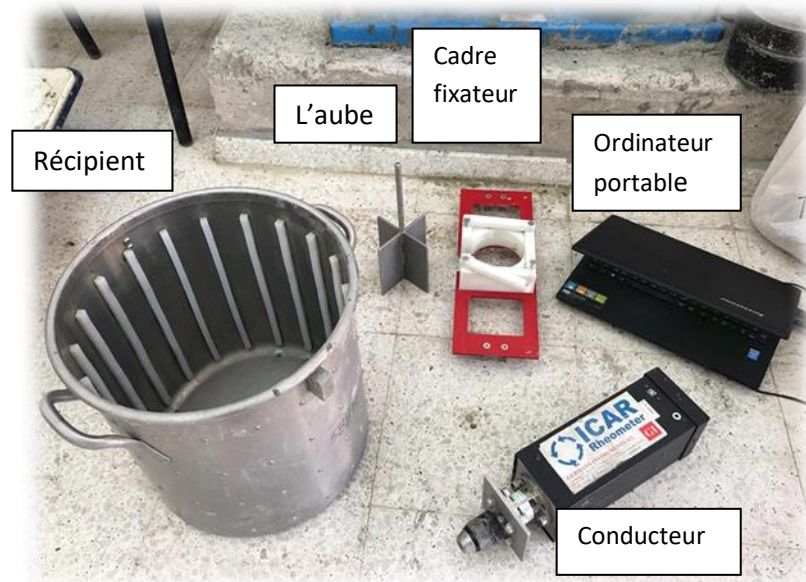


Figure 2.5 le Rhéomètre ICAR et ses constituants.

➤ Le mode opératoire

Deux types de tests peuvent être effectués. Le premier est un test de croissance des contraintes dans lequel l'aube est tournée à une vitesse lente constante de $0,025 \text{ tr / s}$. L'augmentation initiale du couple est mesurée en fonction de temps. Le couple maximal mesuré pendant l'essai est utilisé pour calculer la limite d'élasticité statique. L'autre type d'essai est un test de courbe d'écoulement pour déterminer la limite d'élasticité dynamique et la viscosité plastique. Le test de la courbe d'écoulement commence par une période de "décomposition" pendant laquelle l'aube est tournée vitesse maximum. Ceci est fait pour décomposer toute structure thixotrope qui peut exister et pour fournir un historique cohérent de cisaillement avant de mesurer les paramètres de Bingham. La vitesse de l'aube est alors diminuée dans un nombre spécifié de point, qui est sélectionné par l'utilisateur, mais au moins six points sont recommandés. Pendant chaque point, la vitesse de l'aube est maintenue constante et la vitesse moyenne et le couple sont enregistré. La courbe du couple en fonction de la vitesse de rotation des aubes définit la courbe d'écoulement partir de laquelle les paramètres de Bingham sont calculés.

Le logiciel ICAR Rhéomètre effectue toutes les fonctions nécessaires:

- Actionne le conducteur ;
- Les enregistrements le couple ;
- Calcule les résultats du test et stocke les données ;

Pour plus de simplicité, l'ensemble du programme est exploité à partir d'un seul écran comme indiqué ci-dessous. L'utilisateur définit la géométrie de test et fournit les paramètres pour exécuter courbe d'écoulement de ce test. Une simple pression sur le bouton "Démarrer" lance les tests, qui prennent moins de 1 minute pour les terminer.

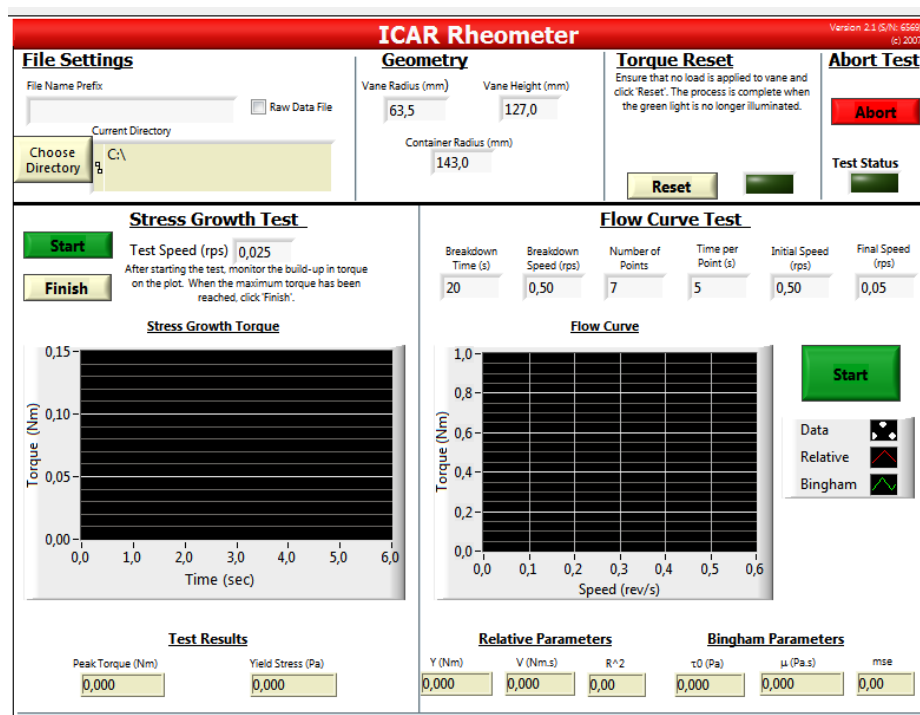


Figure 2.6 Fenêtre du logiciel ICAR Rhéomètre.

2.5.2 Les essais sur le béton à l'état durci

Les échantillons utilisés pour déterminer la résistance mécanique en traction par flexion du béton étudiés sont réalisées sur des éprouvettes prismatique ($7 \times 7 \times 28 \text{ cm}^3$), et pour la compression, ils sont réalisées sur des éprouvettes cubique ($10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$).er qui Ont été conservées après démoulage dans milieux non agressifs(baquet a eau) jusqu'à l'échéance déterminée 3jours,7jours,28 jours et 2 mois. Les valeurs prises en compte sont les moyennes obtenues des résultats des éprouvettes.

2.5.2.1 Les essais de compression [NA EN 12390-3]

L'essai de compression consiste à soumettre des éprouvettes de béton cubique (10x10 x10) cm³ à l'écrasement par compression axiale. La mise en charge doit se faire d'une manière continue jusqu'à la rupture de l'éprouvette. On note la charge maximale atteinte F (KN) et la surface de chargement S (m²). Et la contrainte maximale (résistance à la compression) s'écrit alors :

$$\sigma_c \text{ [MPa]} = F / S$$

Les essais effectués sur les différents bétons aux âges (3jours, 7jours, 28 jours et 2mois).

2.5.2.2 Essais de traction par flexion [NA EN 12390-3]

L'essai de résistance à la traction par flexion est effectué en conformité avec la méthode qui consiste à soumettre des éprouvettes prismatiques, reposant sur deux appuis, à une charge croissante concentrée au milieu jusqu'à la rupture. La charge est appliquée à l'aide d'une presse à lecture digitale reliée à un système d'acquisition (PC) par lequel on introduit la vitesse de chargement (50 N/s). La force à la rupture est donnée par le même système.

La résistance à la traction par flexion est obtenue en faisant un simple calcul de résistance des matériaux.

On trouve la résistance à la flexion qui se localise au milieu de l'éprouvette, et se calcule par la formule suivante :

$$\sigma_f = \frac{3F_f l}{2a^3}$$

F_f : force concentrée en KN ;

l : distance entre les deux appuis l=3a (en cm) ;

a : Coté et hauteur de l'éprouvette prismatique ;

σ_f : la contrainte

CHAPITRE 03

RESULTATS EXPERIMENTAUX ET

DISCUSSION

Chapitre 03

RESULTATS EXPERIMENTAUX ET DESCUSSION

3.1. Caractéristique rhéologique a l'état frais

3.1.1. Caractérisation Rhéologique du béton témoin

Nous présentons les résultats des essais au Rhéomètre ICAR qui mesure le couple en fonction de la vitesse de rotation en traçant automatiquement un diagramme couple-vitesse sous forme de droite dans la mise en équation aboutit au modèle de Bingham :

$$\tau = \tau_0 + \eta \cdot \dot{\gamma}$$

Tableau 3.1 Résultats au Rhéomètre pour le béton témoin (BT)

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		

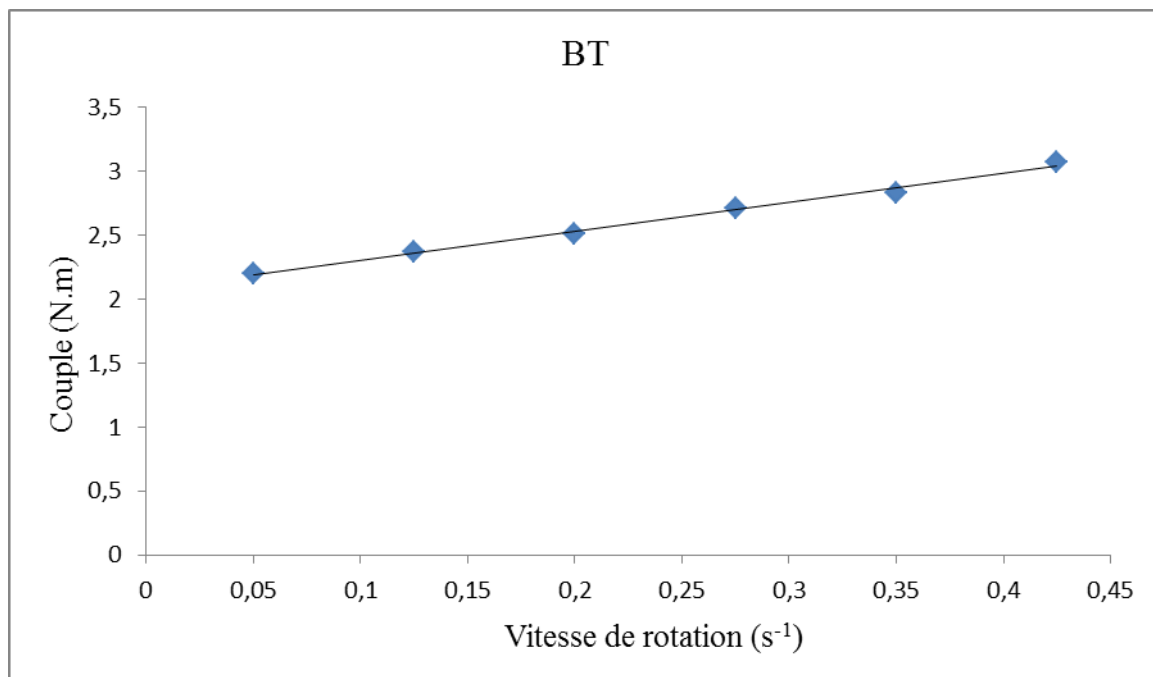


Figure 3.1 Diagramme couple-vitesse de rotation pour le béton témoin (BT).

3.1.2. Caractérisation rhéologique des bétons à base du ciment avec ajout de poudre de marbre

3.1.2.1. Poudre de marbre collectée au niveau de l'atelier de découpe

Elle est caractérisée par la surface spécifique de Blaine de 2400cm²/g.

Nous présentons dans les tableaux, les figures et les diagrammes suivants les résultats des essais pour les deux pourcentages de poudre de marbre ajoutée au ciment.

Tableau 3.2 Résultats au rhéomètre pour un béton de 5% de poudre de marbre

Vitesse de rotation (s ⁻¹)	Couple (N.m)	Viscosité (Pa.s)	Seuil de cisaillement (Pa)
0.500	3.444	30	492.9
0.425	3.166		
0.350	2.798		
0.275	2.978		
0.200	2.601		
0.125	2.254		
0.05	2.473		

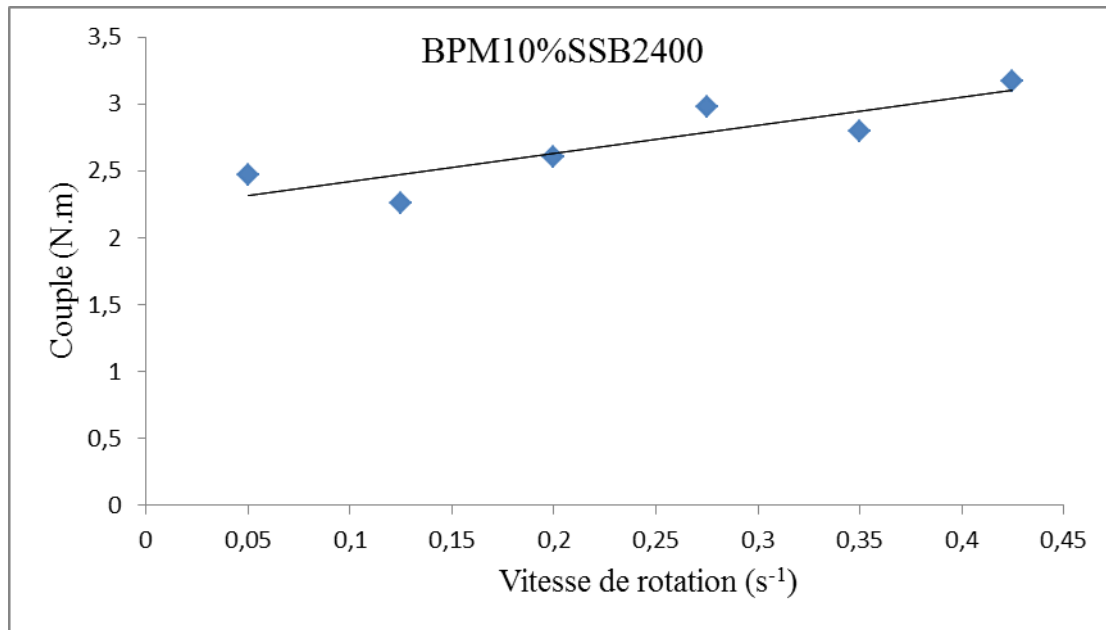


Figure 3.2 Diagramme vitesse-couple pour un béton avec 5% de PM avec SSB 2400cm²/g.

Tableau 3.3 Résultats au rhéomètre pour un béton de 10% de poudre de marbre.

Vitesse de rotation (s ⁻¹)	Couple (N.m)	Viscosité (Pa.s)	Seuil de cisaillement (Pa)
0.500	4.404	29.3	716.1
0.425	4.238		
0.350	3.795		
0.275	3.542		
0.200	3.525		
0.125	3.473		
0.05	3.078		

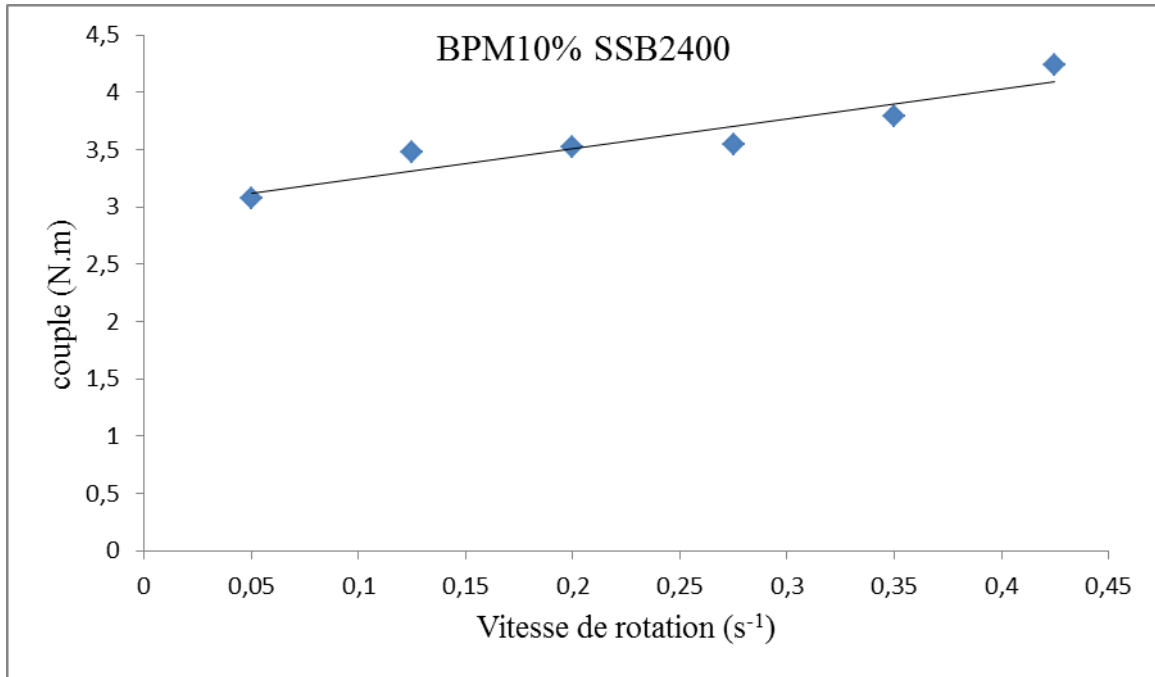


Figure 3.3 Diagramme vitesse-couple pour un béton avec 10% de poudre de marbre avec SSB 2400cm²/g.

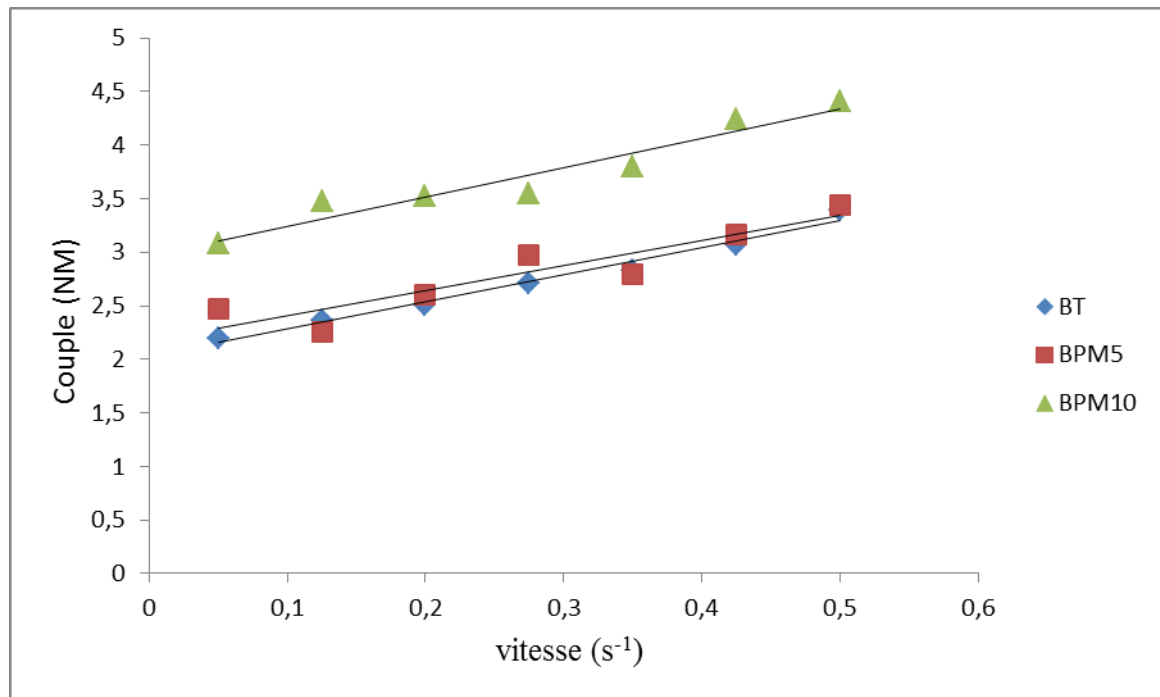


Figure 3.4 Diagramme couple-vitesse des différents bétons.

Dans le diagramme couple (N.m) /vitesse de rotation (s⁻¹), Le seuil de cisaillement augmente de façon importante pour le béton de poudre de marbre 10% comparé à sa Viscosité (Nm s) qui semble diminuée. Il est possible d'observer qu'entre le béton 10% de poudre de marbre se situe en haut des autres bétons. Donc on constate que le seuil de cisaillement varie grandement en fonction du dosage de la poudre de marbre

3.1.2.2. Poudre de marbre ré-broyée à l'aide du broyeur à boulets

Elle est caractérisée par la surface spécifique de Blaine de 6668cm²/g.

Nous présentons dans les tableaux, les figures et les diagrammes suivants les résultats des essais pour les deux pourcentages de poudre de marbre ajouté au ciment.

Tableau 3.4 Résultats au rhéomètre pour un béton de 5% de poudre de marbre

Vitesse de rotation (s ⁻¹)	Couple (N.m)	Viscosité (Pa.s)	Seuil de cisaillement (Pa)
0.500	4.092	29.6	643.1
0.425	3.839		
0.350	3.665		
0.275	3.449		
0.200	3.277		
0.125	2.951		
0.05	2.611		

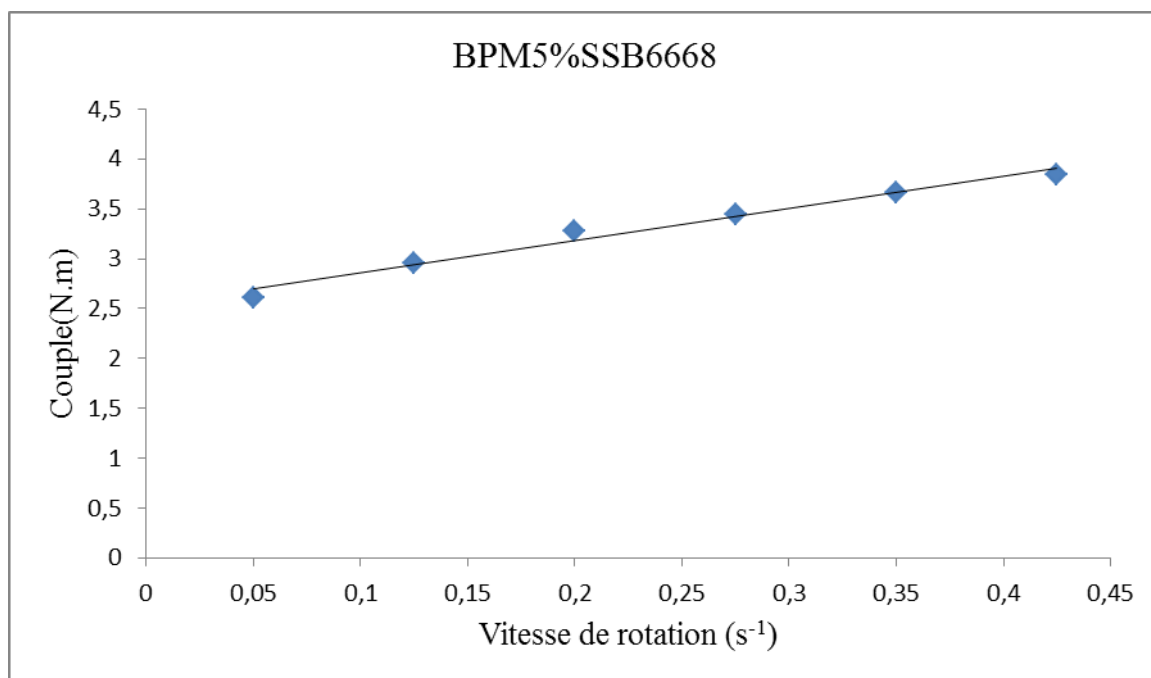
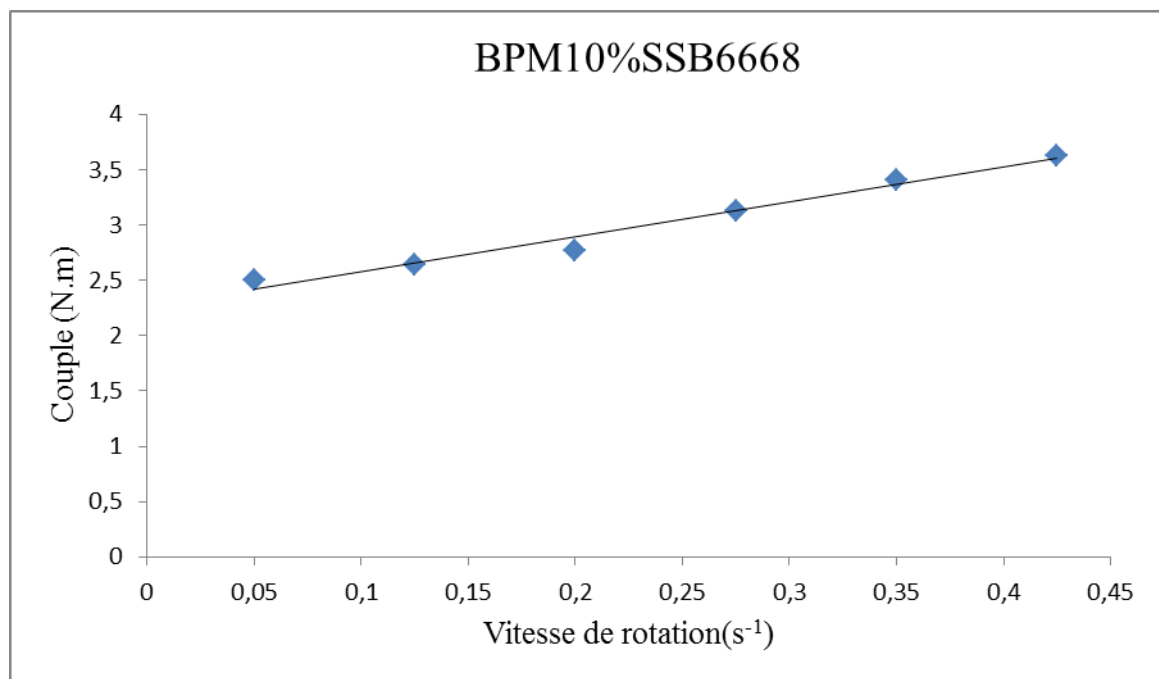


Figure 3.5 Diagramme vitesse-couple pour un béton avec 5% de PM avec SSB 6668cm²/g.

Tableau 3.5 Résultats au rhéomètre pour un béton de 10% de poudre de marbre

Vitesse de rotation (s ⁻¹)	Couple (N.m)	Viscosité (Pa.s)	Seuil de cisaillement (Pa)
0.500	3.622	30.6	559.1
0.425	3.627		
0.350	3.410		
0.275	3.133		
0.200	2.768		
0.125	2.638		
0.05	2.504		

**Figure 3.6** Diagramme vitesse-couple pour un béton avec 10% de PM avec SSB 6668cm²/g.

Le seuil de cisaillement augmente de façon importante pour le béton de poudre de marbre 5%. Dans ces conditions, la Viscosité (Nm s) semble stable. Il est possible d'observer qu'entre le béton 5% de poudre de marbre se situe en haut des autres bétons. Donc on constate que le seuil de cisaillement varie grandement en fonction du dosage de la poudre de marbre.

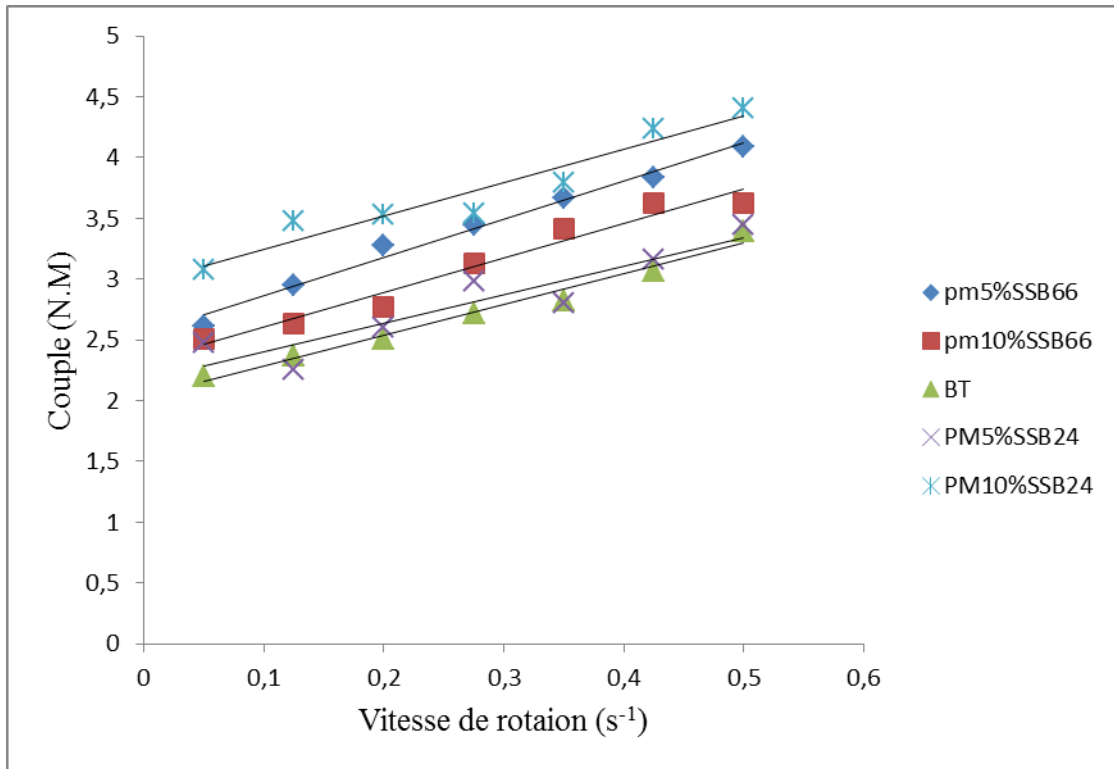


Figure 3.7 Diagramme couple-vitesse des différents bétons en fonction du taux et de la surface spécifique de la poudre de marbre.

Dans ce diagramme englobent les différents bétons avec les différentes surfaces spécifiques de Blaine. On constate que le seuil de cisaillement augmente de façon importante pour les bétons de dosage de poudre de marbre 10% avec une SSB de 2400cm²/g et 5% avec une SSB 6668 cm²/g. Dans ces conditions, la Viscosité (Pa s) semble demeurée plus au moins stable. Et donc on peut conclure que le seuil de cisaillement ainsi que la rhéologie à l'état frais sont influencés par le dosage de la poudre de marbre ainsi que par sa surface spécifique.

Tableau 3.6 Variation du seuil de cisaillement dans les différents bétons en fonction de la SSB de la poudre de marbre

Types de bétons	Le seuil de cisaillement
BT	468.3
BPM5%SSB2400	492.9
BPM10%SSB2400	716.1
BPM5%SSB6668	643.1
BPM10%SSB6668	559.1

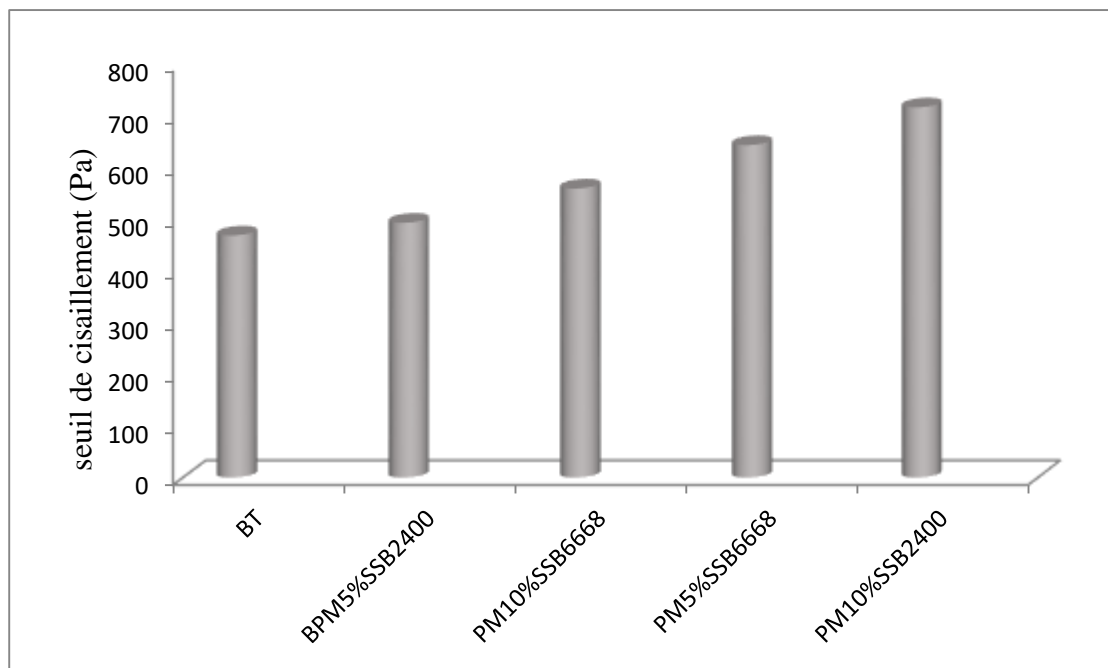


Figure 3.8 Histogramme d'évaluation du seuil de cisaillement dans les bétons en fonction de la SSB de la poudre de marbre.

Tableau 3.7 Variation de la viscosité dans les différents bétons en fonction de la SSB de la poudre de marbre

Types de bétons	La viscosité
BT	30.4
BPM5%SSB2400	30
BPM10%SSB2400	29.3
BPM5%SSB6668	29.6
BPM10%SSB6668	30.6

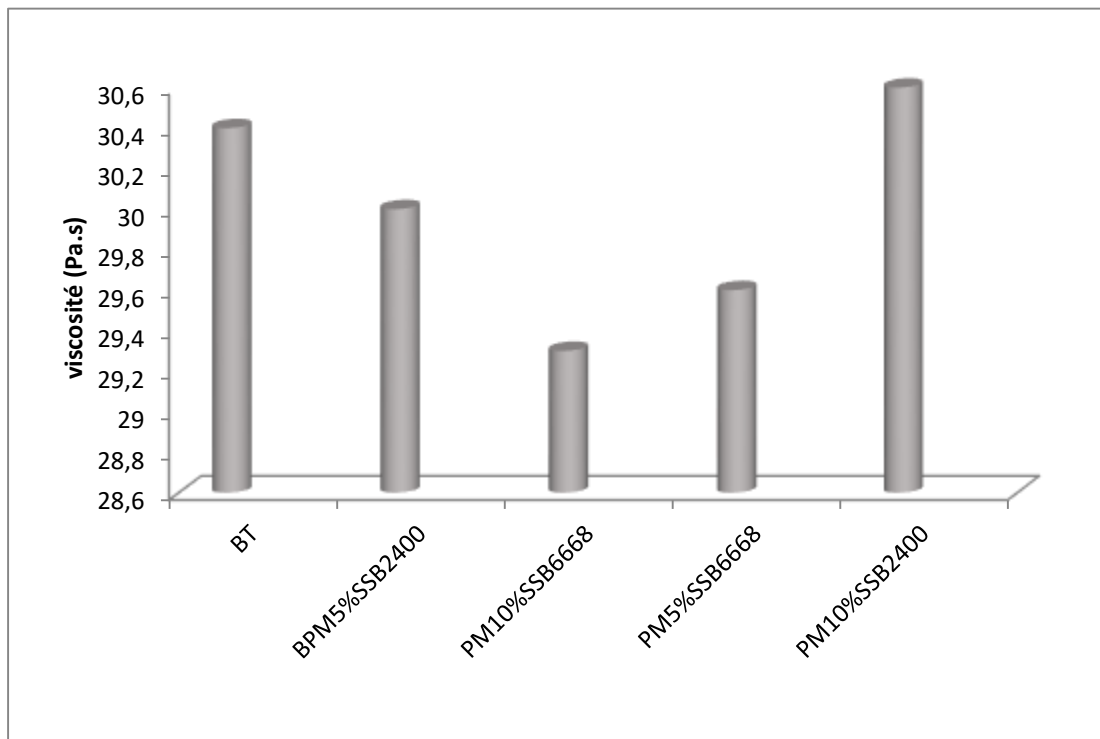


Figure 3.9 Histogramme d'évaluation de la viscosité dans les bétons en fonction de la SSB de la poudre de marbre.

3.1.3 Interprétation globale des résultats

Les résultats montrent, d'une part, avec un taux de 5% ou de 10% de remplacement du ciment par la poudre de marbre avec les différentes SSB, la viscosité du béton est pratiquement la même. D'autre part, le seuil de cisaillement **augmente_sensiblement** pour un taux de poudre de marbre de 10% avec SSB 2400g/cm. Ces résultats rejoignent ceux de (Zhang X et Han J, 2000) qui ont montré que le seuil de cisaillement augmente avec la quantité d'addition ultrafine incorporée tandis que la viscosité de la pâte varie avec la nature et la quantité d'addition. Ils ont montré que lorsque le taux de substitution du ciment par des additions de fumée de silice, cendres volantes ou calcaires est inférieur à 15%, la viscosité de la pâte est remarquablement réduite. En fait, à l'état frais, la présence des additions minérales actives modifie la structure du squelette granulaire et les frictions entre les composants solides dans la phase liquide. Au cours de la prise et du durcissement, les particules des additions minérales interagissent dans le processus d'hydratation du ciment en modifiant la structure des produits hydratés. [Adjoudj M., 2015].

3.2 Caractéristiques rhéologiques du béton durci

3.2.1 La résistance à la compression

Les essais de compression simple sont réalisés à 3jours, 7jours, 28jours et 2 mois par écrasement d'éprouvettes de bétons cubique (10×10×10) cm qui ont été conservées après démoulage à une température de 20°C et HR=55 ± 5% d'humidité relative.

Tableau 3.8 La résistance à la compression des bétons

Type de béton		BT	BPM 5% SSB 2400	BPM10% SSB 2400	BPM5% SSB6668	BPM10% SSB6668
Résistance du béton en (MPa)	3jours	26.7	20.26	28.33	32.05	25.92
	7jours	36.6	30.89	44.19	42.39	32.15
	28jours	54.05	51.84	58.45	60.83	50.28
	60jours	69.6	67.86	73.42	70.84	59.17

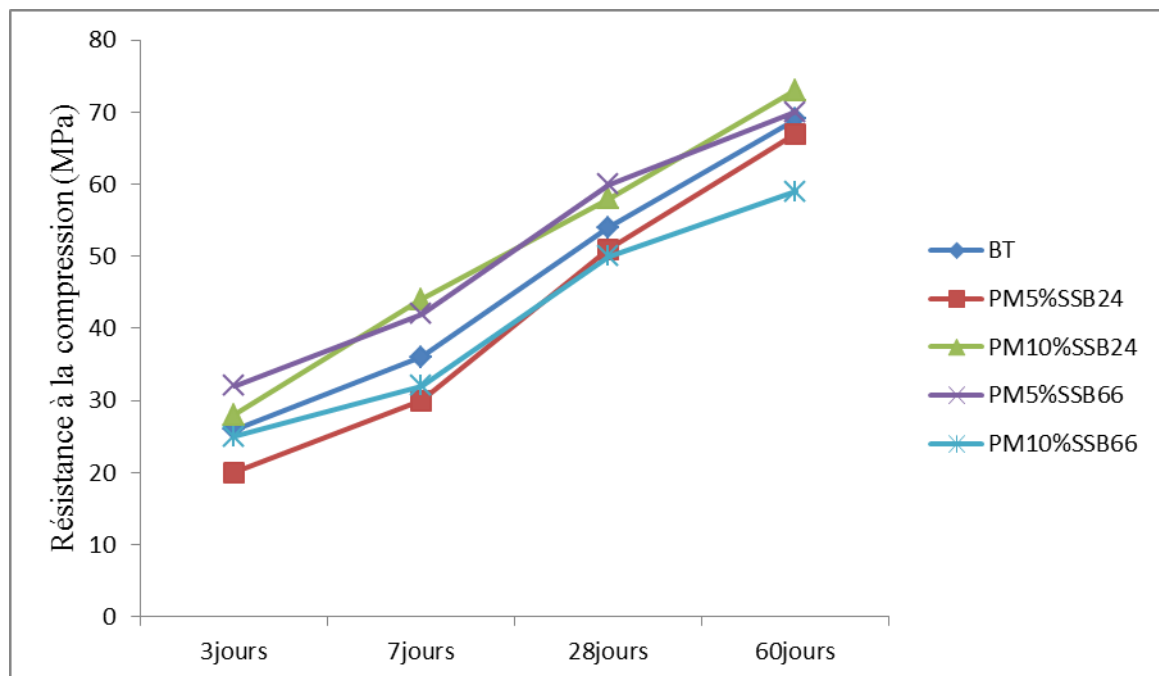


Figure 3.10 La résistance mécanique à la compression des bétons

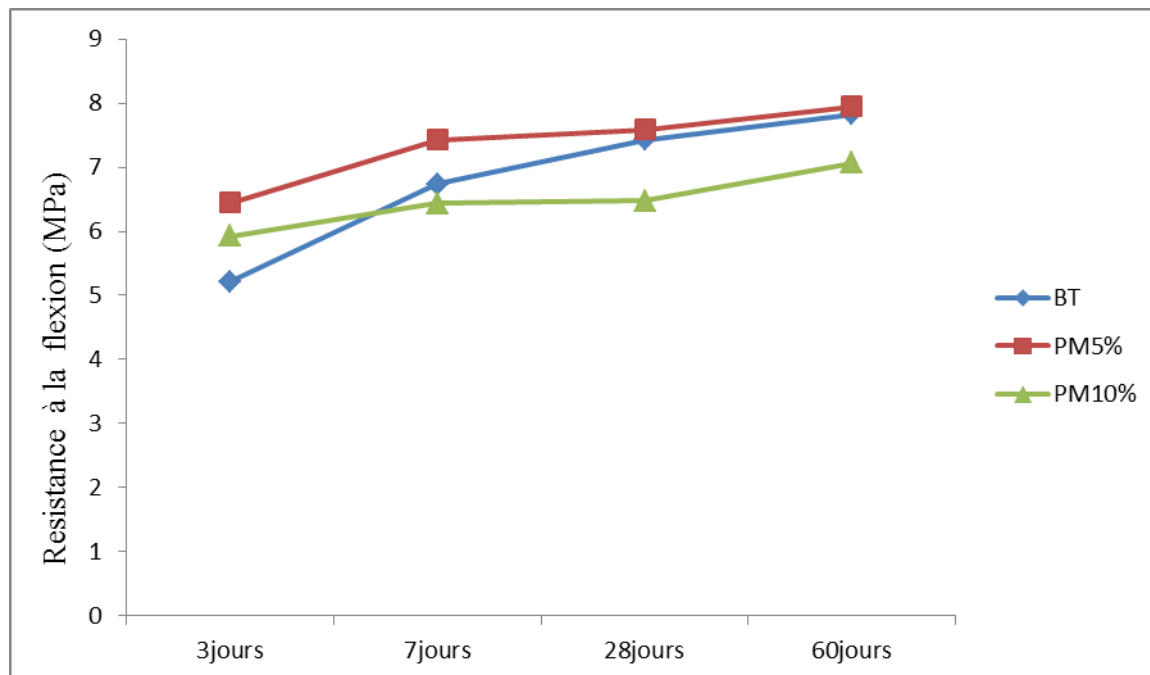
On remarque bien que pour un taux de 5% d'ajout de poudre de marbre avec SSB 6668g/cm², la résistance à la compression est plus élevée comparé à celle d'un béton sans ajout ou aux bétons avec une petite SSB pour toutes les échéances (3, 7, 28 et 60jours) ; cela est dû à l'effet filler de la poudre de marbre car avec une si grande surface spécifique le béton est plus compacte et donc plus résistant.

3.2.2 La résistance à la flexion

Les essais de flexion trois points sont réalisés à 3, 7, 28 et 60jours de mûrissement du béton témoin ainsi que les bétons ayant de la poudre de marbre avec une SSB 6668cm²/g sur des éprouvettes prismatiques (7×7×28) cm.

Tableau 3.9 La résistance à la flexion des bétons étudiés

Type de béton		BT	BPM 5%	BPM10%
Résistance du béton en (MPa)	3jours	5.21	6.45	5.93
	7jours	6.74	7.43	6.44
	28jours	7.43	7.59	6.48
	60jours	7.83	7.95	7.07

**Figure 3.12** La résistance mécanique à la flexion des bétons.

3.2.3 La résistance à la traction par flexion

Les essais de traction par flexion sont réalisés à 3, 7, 28 et 60 jours de mûrissement du béton témoin ainsi que les bétons ayant de la poudre de marbre avec une SSB 6668cm²/g sur des éprouvettes prismatiques (7×7×28) cm.

Tableau3.10 La résistance à la traction des bétons.

Type de béton		BT	BPM 5%	BPM10%
Résistance du béton en (MPa)	3jours	4.78	6.77	5.45
	7jours	6.18	7.80	5.90
	28jours	6.82	7.97	5.95
	60jours	7.20	7.30	6.50

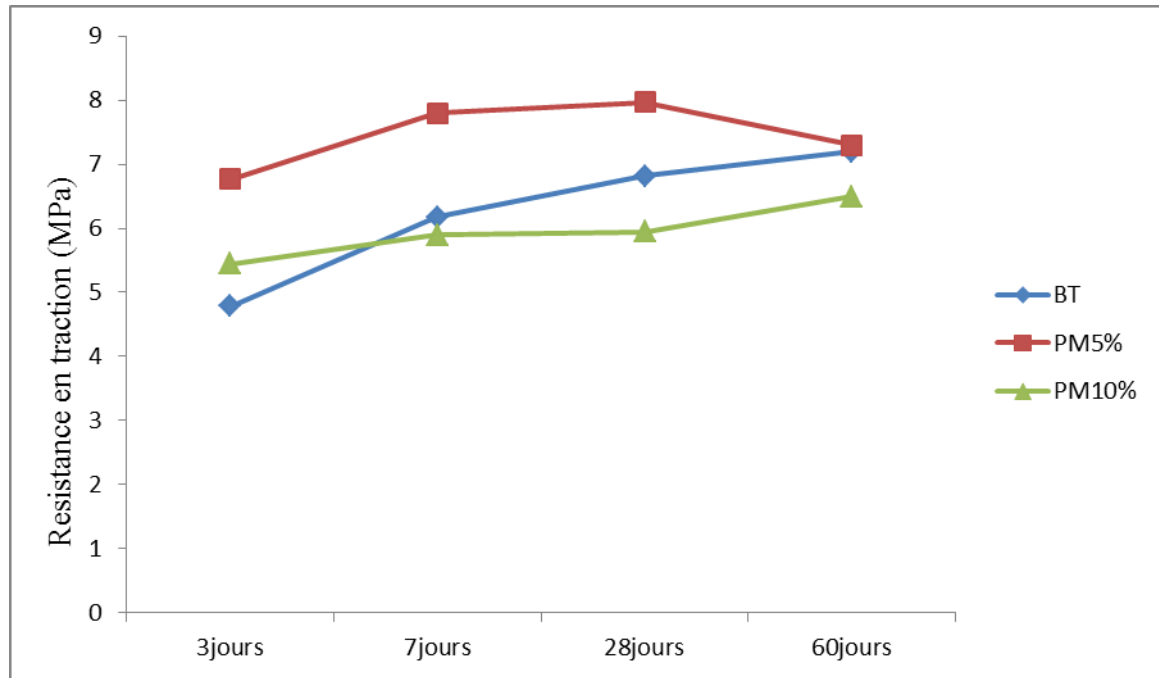


Figure 3.12 La résistance mécanique à la traction des bétons.

L'ajout progressif de la poudre de marbre jusqu'à 5% améliore notablement la résistance mécanique de compression, de flexion et de traction, au-delà de 5% d'ajout c'est-à-dire 10% la baisse de résistance est ressentie. L'optimum est obtenu à 5% d'ajout avec une surface spécifique de Blaine plus grande est atteint la valeur de 70.84 MPa en compression, 7.95MPa en flexion et 7.30MPa en traction. Malgré l'ajout de 10% de la poudre de marbre la résistance ne baisse pas au-dessous du béton témoin.

3.2.4 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);

ν = 0,15 (coefficient de Poisson),

V : vitesse du son [km/s]

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

Où :

$$E_c = K V^2$$

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 de l'échéance d'écrasements des éprouvettes (3, 7, 28 et 60jours).

Ici la surface spécifique de Blaine n'est pas prise en compte car la vitesse de son est identique pour les différentes SSB.

Tableau 3.11 Le module d'élasticité des bétons étudiés.

Type de béton		BT	BPM5%	BPM10%
Le module d'élasticité (GPa)	3jours	20	24	23
	7jours	27	26	25
	28jours	30	30	28
	60jours	33	32	30

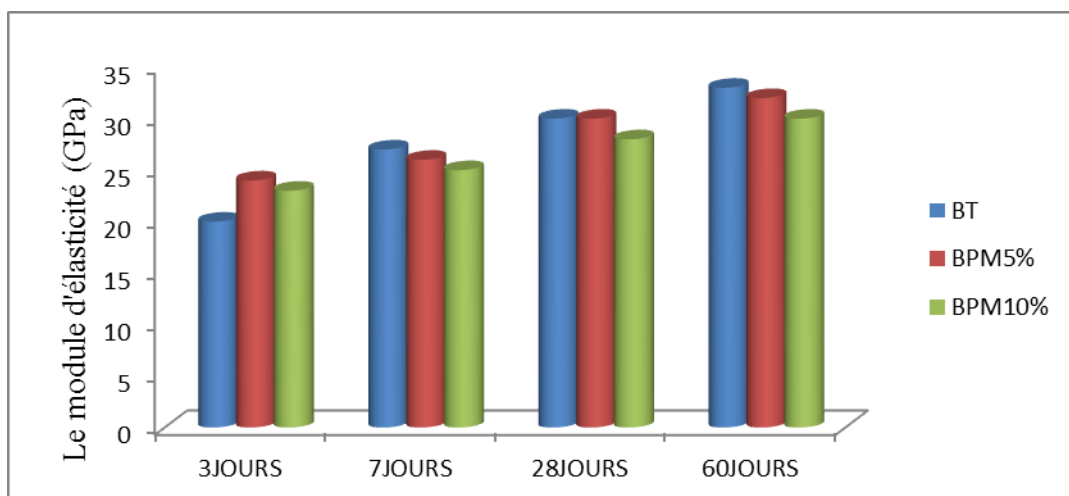


Figure 3.13 Histogramme des modules d'élasticité.

3.2.5 La relation entre la résistance mécanique et le module d'élasticité

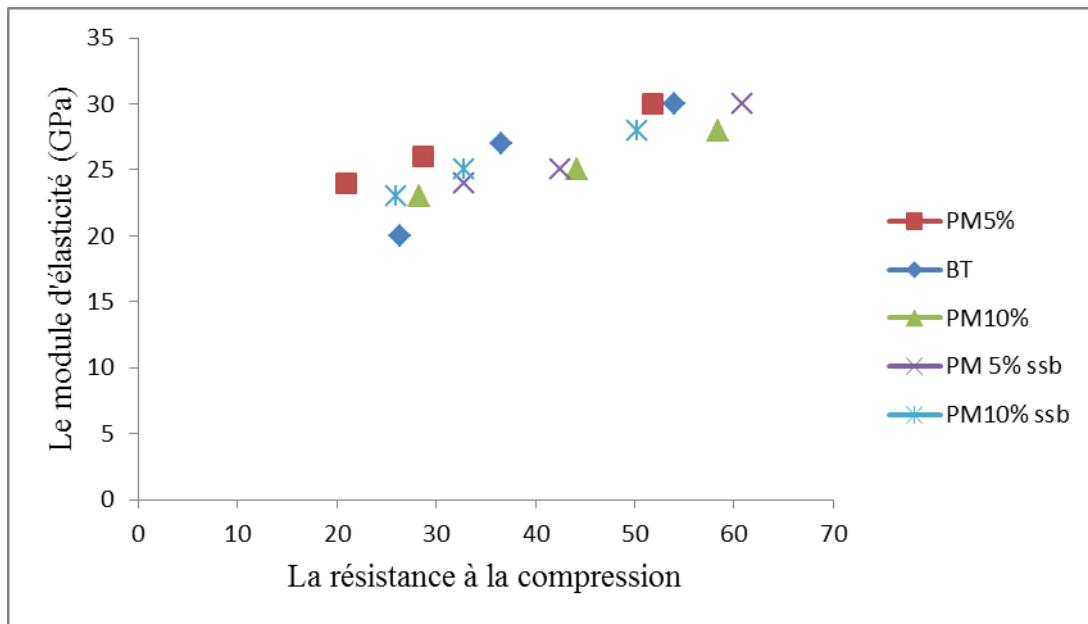


Figure 3.14 Evolution du module d'élasticité en fonction de la résistance mécanique.

L'augmentation de la résistance mécanique à une relation relative avec l'augmentation du module de Yong.

Le calcul du module de Young statique permet de tracer les courbes de contraintes/déformations.

Ces courbes permettent d'évaluer la Rhéologie du béton à l'état durci.

3.2.6 Evaluations du comportement du béton durci

L'étude du comportement du béton durci ce fait grâce à l'essai de compression ; on trace le diagramme contraintes σ /déformations ϵ .

L'essai de compression est réalisé à l'aide d'une presse hydraulique à toutes les échéances : 3, 7, 28et 60 jours.

3.2.6.1 Evaluation du comportement du béton durci à 3jours

Le but de cette évaluation au si jeune âge est de permettre de mieux étudier l'effet de l'ajout de la poudre de marbre à des teneurs différentes sur le béton.

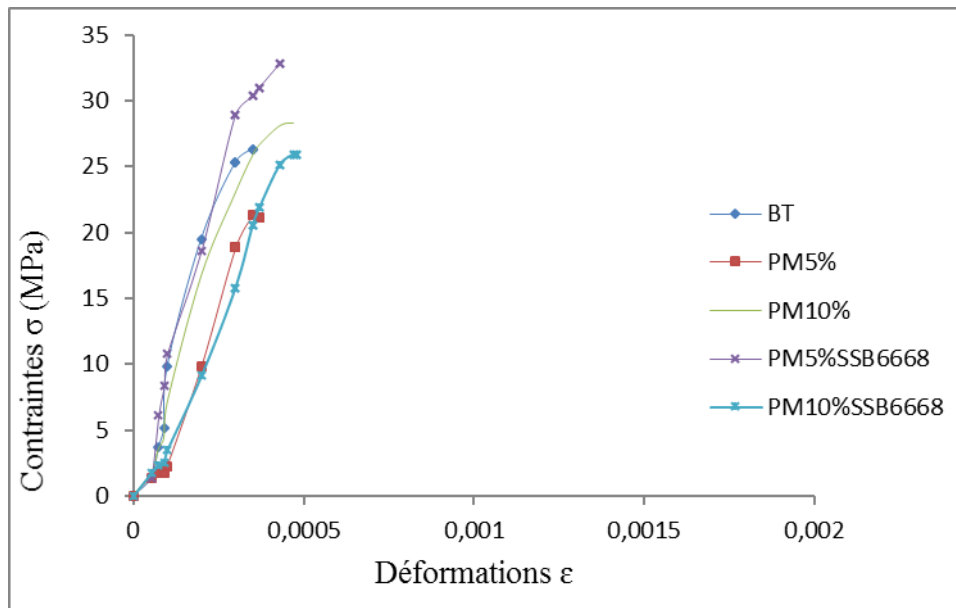


Figure 3.15 Courbes contraintes σ / déformations ε à 3jours.

Les courbes contraintes/déformations des différents bétons étudiés à 3jours présentent deux phases principales :

a) - Une phase linéaire où les déformations sont proportionnelles aux contraintes, et représente la phase élastique du béton.

Dans chaque courbe, l'apparition de la première fissure, présente un palier relativement horizontal, ce qui traduit une diminution de la rigidité des bétons.

b) - Une phase non linéaire où les déformations deviennent plus importantes par comparaison aux contraintes. Ceci traduit une phase d'endommagement du béton avant rupture, c'est la phase plastique.

Plus le palier plastique est large plus le béton est ductile.

Les résultats montrent bien que l'ajout de la poudre de marbre améliore la ductilité du béton par rapport au béton sans ajouts (témoin) pendant les 3 premiers jours.

3.2.6.2 Evaluation du comportement des bétons à 7jours

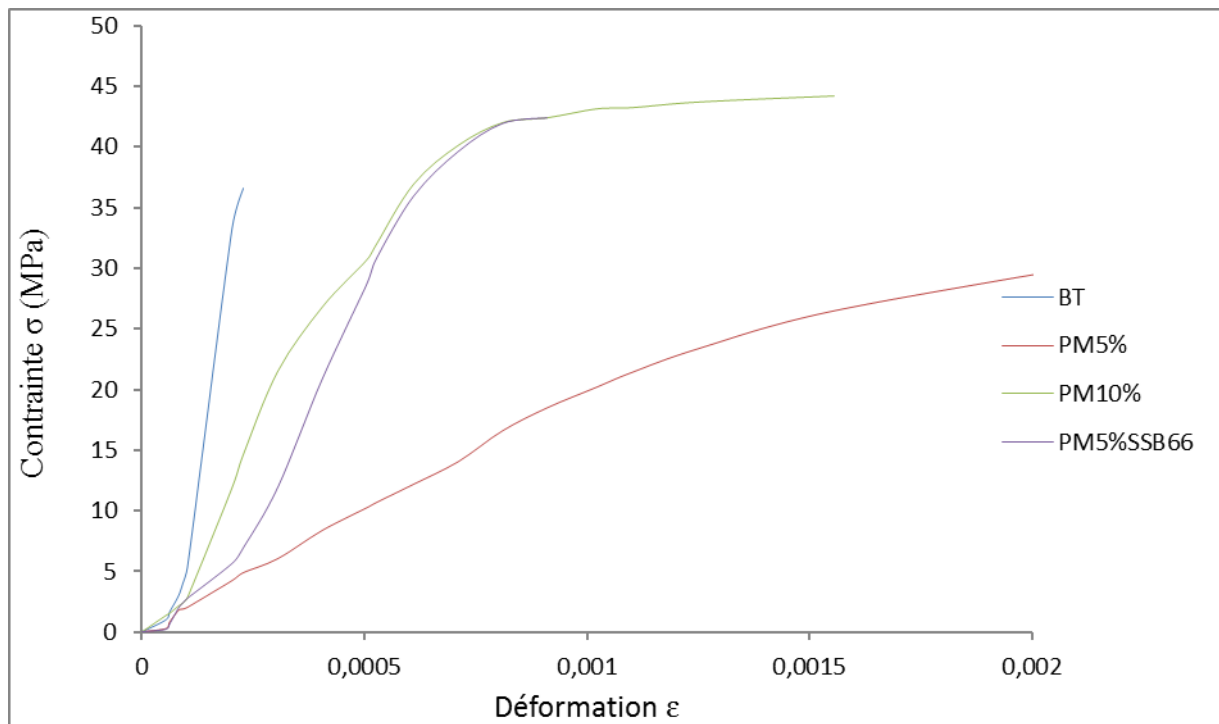


Figure 3.16 Courbes contraintes/déformations des bétons à 7jours.

L'allure des courbes Contraintes/Déformations montrent en général :

- a)** - la phase où le béton peut revenir à son état initial avant l'apparition de la première fissure.
- b)** - la deuxième phase plastique très apparente, caractérisée par l'augmentation des déformations où les contraintes sont à peu près constantes.

Ce comportement traduit le comportement ductile du béton, plus le palier plastique est large plus le béton est ductile.

Pour les courbes du comportement du béton à 7 jours; on constate que le béton confectionné avec un ciment avec 5% de poudre de marbre collectée avec une SSB de $2400\text{cm}^2/\text{g}$ est plus ductile que le béton témoin (de référence sans ajout).

3.2.6.3 Evaluation du comportement du béton à 28jours

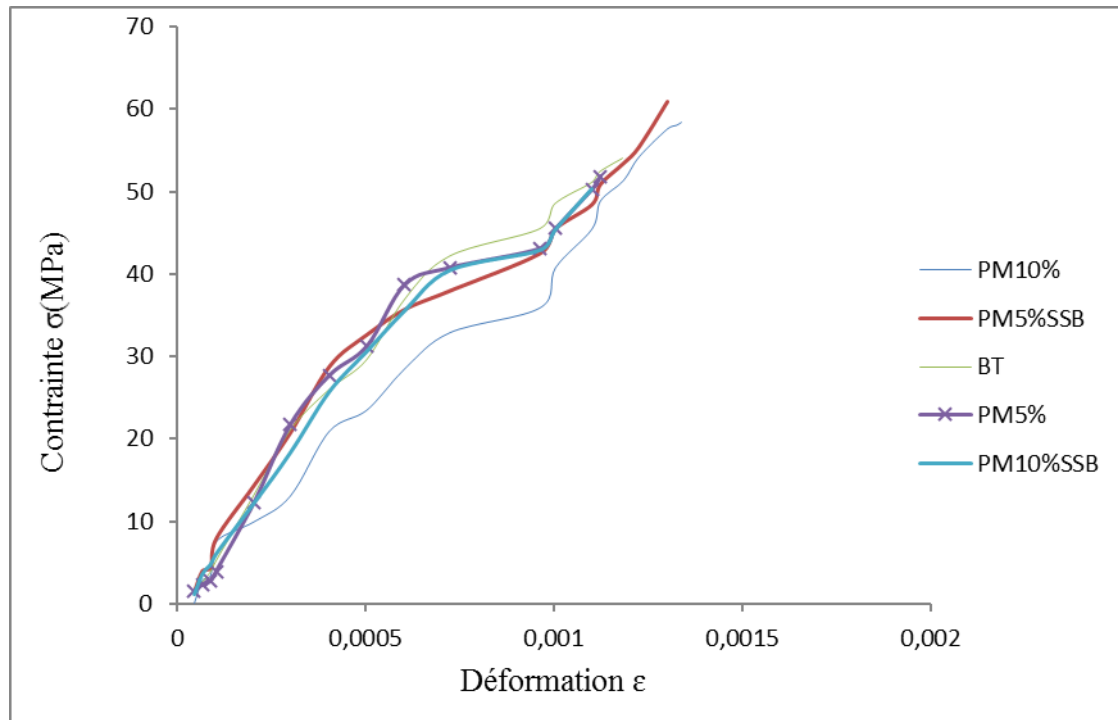


Figure 3.17 Courbes contraintes/déformations des bétons à 28jours.

A 28jours ; les courbes Contraintes/Déformations se devise en 2 partie :

Ici la partie linéaire qui traduit la phase élastique plus petite comparée aux courbes de 3 et 7jours.

La phase plastique qui est très apparente comparé aux courbes précédentes, caractérisée par l'augmentation des déformations par rapport aux contraintes.

Les bétons à 28jours ont un comportement quasi-similaire.

3.2.6.4 Evaluation du comportement du béton à 60 jours

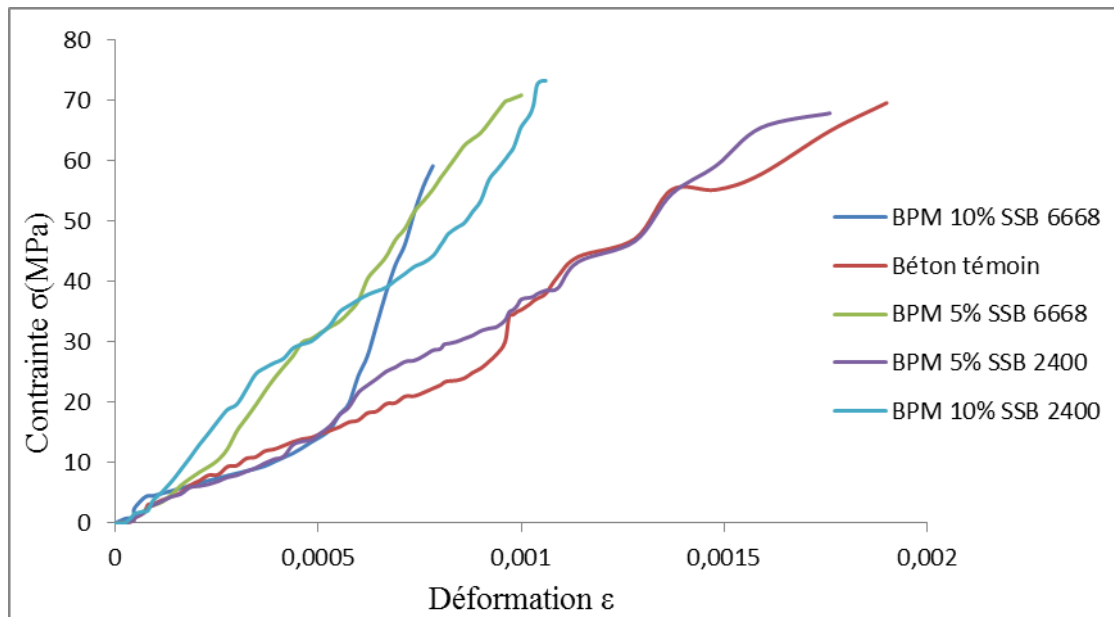


Figure 3.18 évaluation du comportement du béton à 60 jours

Ici à 60 jours ; les courbes Contraintes/Déformations traduisent clairement que les bétons à partir de cet âge restent stables contrairement au béton témoin et le béton avec un faible taux de poudre de marbre qui sont plus ductiles avec le temps.

Interprétations globale des résultats

L'étude du comportement du béton à l'état durci nous a permis de tirer les conclusions suivantes :

- L'ajout de poudre de marbre améliore la ductilité du béton à son jeune âge.
- Avec 5% de poudre de marbre avec SSB 6668g/cm² ne demande pas une longue période de cure pour murir et avoir une résistance comparable ou qui dépasse celle du béton témoin.
- Le module d'élasticité ou module de Young est pratiquement le même pour les 3 bétons, avec une légère augmentation pour le béton sans ajout de poudre de marbre et au béton avec ajout de 5%, ces bétons sont plus rigides.

3.2.7 Relation entre le comportement rhéologique du béton à l'état frais et à l'état durci.

Tableau 3.12 Valeurs des résultats obtenu des caractéristiques rhéologiques des deux états.

Type de béton	Le seuil de cisaillement	La viscosité	La résistance à 28jours
BT	468.3	30.4	54.05
BPM 5%SSB2400cm ² /g	492.9	30	51.84
BPM 10%SSB2400cm ² /g	716.1	29.3	58.45
BPM 5%SSB6668cm ² /g	643.1	29.6	60.83
BPM 10%SSB6668cm ² /g	559.1	30.6	50.28

Le seuil de cisaillement ainsi que la viscosité sont des paramètres indiquant la rhéologie du béton à l'état frais, l'état durci est caractérisée par la résistance.

Tableau 3.13 Evaluation des caracteristiques rhéologique a l'état frais et durci

Type de béton	Le seuil de cisaillement	La viscosité	La résistance à 28jours
Béton témoin	→	→	→
Béton de poudre de marbre 5%SSB2400cm ² /g	↑	→	↑
Béton de poudre de marbre 10%SSB2400cm ² /g	↑	→	↑
Béton de poudre de marbre 5%SSB6668cm ² /g	↑	→	↑
Béton de poudre de marbre 10%SSB6668cm ² /g	↑	→	↓

Il est difficile de se prononcer sur une corrélation entre le comportement à l'état frais et le comportement à l'état durci du béton ; en effet la résistance du béton n'est pas corrélée ni au seuil de cisaillement ni à la viscosité. En fait, le seuil de cisaillement et la viscosité ne sont que des caractéristiques rhéologiques intrinsèques du béton à l'état frais et la résistance c'est une caractéristique rhéologique du béton à l'état durci (ZEHAR I and MAAFI L, 2017).

Toutefois, il est intéressant de souligner que la résistance à la compression du béton se situe entre 50MPa pour le béton témoin et 61MPa pour le béton avec un ciment composé de 5% de poudre de marbre avec une SSB d'environ 6668cm²/g.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion Générale

L'objectif de cette étude est de montrer l'influence de l'ajout de poudre de marbre sur les propriétés rhéologiques à l'état frais et la résistance mécanique à l'état durci. On a effectué des essais de mesure de rhéologie sur béton à base d'ajout de poudre de marbre à des taux variables de 5 et 10% de la masse du ciment avec deux finesses distinctes (2400 et 6668cm²/g).

Une étude comparative de ces bétons avec un béton témoin sans ajout a été réalisée.

L'étude du comportement à l'état frais, nous a permis de constater que les bétons avec ajout de poudre de marbre présente un écoulement (rhéologie à l'état frais) comparable au béton de référence, en effet la viscosité n'a enregistré aucune évolution, elle est restée stable. Quant au seuil de cisaillement, on a constaté une augmentation avec le taux de poudre de marbre ajouté en passant de 468Pa pour le béton témoin à 716Pa pour un béton avec un ciment composé de 10% de poudre de marbre avec une SSB de 2400cm²/g. Ce résultat est évident du fait que les frottements inter granulaires augmentent avec l'incorporation de la poudre de marbre, le béton devient plus dense. Pour une SSB 6668cm²/g, le même constat peut être vérifié, le seuil de cisaillement est passé à 643Pa et 559Pa pour le béton avec 5% et 10% de poudre de marbre respectivement.

Concernant l'étude du comportement du béton à l'état durci ; nous avons constaté que le béton avec ajout de poudre de marbre présente une meilleure ductilité qu'avec un béton sans ajout de marbre surtout pour les 7 premiers jours.

.

Enfin, Il est difficile de se prononcer sur une corrélation entre le comportement à l'état frais et le comportement à l'état durci du béton ; en effet la résistance du béton n'est pas corrélée ni au seuil de cisaillement ni à la viscosité. En fait, le seuil de cisaillement et la viscosité ne sont que des caractéristiques rhéologiques intrinsèques du béton à l'état frais et la résistance c'est une caractéristique rhéologique du béton à l'état durci (ZEHAR I and MAAFI L, 2017).

Toutefois, il est intéressant de souligner que la résistance du béton se situe entre 50MPa pour le béton témoin et 61MPa pour le béton avec un ciment composé de 5% de poudre de marbre avec une SSB de 6668 cm²/g à 28jours.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

Références Bibliographiques

- Adams, L.D., Race, R.M. (1990) Effect of limestone additions upon drying shrinkage of Portland cement mortar, tiré de Carbonate additions to cement, Klieger P. ET Hooton D. Éditeurs, STP 1064, ASTM.
- Belloc A., Delarrard F., "L'influence du granulats sur la résistance à la compression des bétons", Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées–219–janvier–février 1999 – REF, 4246 – PP.41-52.
- Courrazé G., Grossiord JL., "Initiation à la rhéologie", Tec& Doc, (2000).
- Josserand, L. (2002), *Ressuage des bétons hydrauliques*. Thèse de Doctorat, Structures et Matériaux, ENPC p.211.
- Lemay, C (2000). *Étude de l'influence de l'automatisation du malaxage en bétonnière sur la variabilité du béton*, mémoire de maîtrise, département de génie mécanique de l'Université Laval, 72 p.
- Maafi and Zahar, (2017). Effet de la nature du sable sur le comportement rhéologique du béton ordinaire, mémoire d'obtention de diplôme de master, département de génie civil université de Bordj Bou Arreridj.
- Ramachandran, V S, Zhang Chun-mei 1986: Hydration kinetics and microstructural Development in the 3CaO.A12O3. CaCSO4-2H2O-CaCO3-H2O system, Matériaux et Constructions, vol.19, n°114, p.437-444
- Tattersall, G.H. (1991). *Workability and quality control of concrete*, Chapman and Hall, 262 p.
- Tattersall, G.H.; Banfill, P.F.G. (1983). *The rheology of fresh concrete*, Pitman, London, 365 p.
- Vom Berg, W. (2001). *Influence of specific surface and concentration of solid upon the flow behaviour of cement pastes*. Magazine of Concrete Research, Vol. 31, No. 109, p.211-216.
- Westerholm M. (2006). *Rheology of the Mortar Phase of Concrete with Crushed Aggregate*, Luleå University of Technology.
- Yang, M., and H. M. Jennings. (1995). *Influence of mixing methods on the microstructure and rheological behavior of cement paste* Advanced Cement Based Materials, p.70–78.

- Zhang X., Han J., "*The effect of ultra-fine admixture on the rheological property of cement paste*", Cement and concrete research, vol. 30(5),:2000, pp. 827–30.

