



Mémoire présenté pour l'obtention Du diplôme de Master

Filière : Génie Civil

Option : Matériaux

Réalisé par :

M. Maaref Hamza

Encadreur : Soualhi Hamza

Co-encadreur : Guehlouz Imed

Thème

Exploration et Développement D'Un Nouveau Modèle Pour La Rhéologie Des Béton

Soutenu le 30/06/2024 devant la commission d'examen composée de :

M. Hadacha Fatimzohraà l'Université de BBA	Président
M. Soualhi Hamza à l'Université de BBA	Directeur du Mémoire
M.Belkadi Ahmed Abderraoufà l'Université de BBA	Examineur
M. Daghfel Moussa à l'Université de BBA	Examineur

Dédicaces

Je dédie ce travail :

Mon défunt frère KAMEL

A mes parents ;

Ma femme

A mes enfants

A mes frères et sœurs ;

A mes chairs amis : SAHLI Samir, AKBACHE Khaled ,MAHBOUS Rafik

A tous mes amis de promos master 2 génie civil

A tous la famille.

A toutes les gens qui m'ont aidé de près ou de loin.

Remerciements

Tout d'abord, nous tiens à remercions "ALLAH" le tout puissant qui nous a donné la force et la patience pour terminer ce présent travail ainsi que nos parents qui nous toujours encouragés et soutenu durant toute la durée de nos études.

Nous adressons nos profonds remerciements à notre encadreur de mémoire Mr SOUALHI Hamza, pour avoir accepté nous encadrer, pour ses conseils et ses orientations pour mieux élaborer ce travail de recherche et pour qu'il nous guider sur le bon chemin durant l'accomplissement de ce travail.

Nous voulons exprimer notre sincère gratitude à Monsieur GUEHLOUZ IMED qu'il accepté de participer comme co-encadreure dans ce travail, pour sa disponibilité, pour son écoute, pour ses grandes qualités pédagogiques, afin de mener au mieux ce travail de recherche.

Nous voudrions remercions l'ensemble de notre jury de mémoire, qui a bien voulu examiner ce travail :

Md Hadacha fatimzohra, Mr.Belkadi Ahmed Abderraouf et Mr.Deghfel Moussa

Nous adressons nos remerciements à tous les responsables du laboratoire de Génie Civil : ZOBIR, RACHID, FARID, FATIHA et HAYAT qui ont toujours été disponibles pour nous donner un petit coup de main et beaucoup d'encouragement.

Nous remercîments aussi l'administration de génie civil.

Résumé

Cette étude explore les propriétés rhéologiques comparatives du béton témoin (BT) et du béton fibré (BF) incorporant des fibres de polypropylène. L'objectif principal était d'analyser l'évolution temporelle de la viscosité, du seuil de cisaillement et de l'affaissement sur une période de 30 minutes après le mélange. Les résultats ont révélé que le BF présente une viscosité et un seuil de cisaillement significativement plus élevés que le BT, attribués à l'enchevêtrement des fibres dans la matrice cimentaire. Les deux types de béton ont montré une augmentation de la viscosité et du seuil de cisaillement au fil du temps, probablement due à l'hydratation initiale du ciment. Une relation inverse entre le seuil de cisaillement et l'affaissement a été observée, cohérente avec les théories rhéologiques existantes. Cette étude propose un nouveau modèle rhéologique intégrant l'évolution temporelle des propriétés et l'impact des fibres. Ce modèle pourrait améliorer la prédiction du comportement des bétons fibrés dans diverses applications pratiques. Les résultats suggèrent que, malgré des propriétés rhéologiques différentes, le BF maintient un affaissement comparable au BT, indiquant son potentiel d'utilisation dans des applications similaires tout en bénéficiant des avantages mécaniques des fibres. Cette recherche contribue à une meilleure compréhension de la rhéologie des bétons fibrés et ouvre la voie à des études futures sur la formulation mathématique du modèle proposé, l'impact de différentes concentrations de fibres et l'influence des conditions environnementales sur les propriétés rhéologiques.

Mots-clés : rhéologie du béton, béton fibré, viscosité, seuil de cisaillement, affaissement, modélisation rhéologique.

Abstract

This study explores the comparative rheological properties of control concrete (BT) and fiber-reinforced concrete (BF) incorporating polypropylene fibers. The main objective was to analyze the temporal evolution of viscosity, shear threshold and slump over a period of 30 minutes after mixing. The results revealed that BF exhibits a significantly higher viscosity and shear threshold than BT, attributed to the entanglement of the fibers in the cementitious matrix. Both types of concrete showed an increase in viscosity and shear threshold over time, probably due to the initial hydration of the cement. An inverse relationship between shear threshold and slump was observed, consistent with existing rheological theories. This study proposes a new rheological model integrating the temporal evolution of properties and the impact of fibers. This model could improve prediction of the behavior of fiber-reinforced concrete in various practical applications. The results suggest that, despite different rheological properties, BF maintains a slump comparable to BT, indicating its potential for use in similar applications while benefiting from the mechanical advantages of fibers. This research contributes to a better understanding of the rheology of fiber-reinforced concrete and paves the way for future studies on the mathematical formulation of the proposed model, the impact of different fiber concentrations and the influence of environmental conditions on rheological properties.

Keywords: concrete rheology, fiber-reinforced concrete, viscosity, shear threshold, slump, rheological modeling.

الملخص

تستكشف هذه الدراسة الخواص الانسيابية المقارنة للخرسانة الخاضعة للتحكم (BT) و الخرسانة المقواة بالألياف (BF) التي تحتوي على ألياف البوليبروبيلين. وكان الهدف الرئيسي هو تحليل التطور الزمني للزوجة و عتبة القص و الركود على مدى 30 دقيقة بعد الخلط، و كشفت النتائج أن الخرسانة المقواة بالألياف البوليبروبيلينية تتمتع بلزوجة و عتبة قص أعلى بكثير من الخرسانة المقواة بالألياف البوليبروبيلينية، ويعزى ذلك إلى تشابك الألياف في المصفوفة الأسمنتية. وأظهر كلا النوعين من الخرسانة زيادة في اللزوجة و عتبة القص بمرور الوقت، ربما بسبب الترطيب الأولي للأسمنت. تقترح هذه الدراسة نموذجًا انسيابيًا جديدًا يدمج التطور الزمني للخصائص وتأثير الألياف. يمكن لهذا النموذج تحسين التنبؤ بسلوك الخرسانة المقواة بالألياف في مختلف التطبيقات العملية. وتشير النتائج إلى أنه على الرغم من اختلاف الخواص الانسيابية للخرسانة المقواة بالألياف، إلا أن الخرسانة المقواة بالألياف تحافظ على انحدار مماثل لخرسانة BT مما يشير إلى إمكانية استخدامها في تطبيقات مماثلة مع الاستفادة من المزايا الميكانيكية للألياف. يساهم هذا البحث في فهم أفضل لريولوجيا الخرسانة المقواة بالألياف ويمهد الطريق للدراسات المستقبلية حول الصياغة الرياضية للنموذج المقترح، وتأثير تركيزات الألياف المختلفة و تأثير الظروف البيئية على الخواص الريولوجية.

الكلمات المفتاحية: ريولوجيا الخرسانة، الخرسانة المقواة بالألياف للزوجة عتبة القص الركود النمذجة الريولوجية.

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE	XV
<i>Chapitre 01</i>	<i>1</i>
ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE	1
1.1. Introduction	1
1.2. Importance de l'étude rhéologique	1
1.3. Paramètres rhéologiques.....	2
1.3.1. Viscosité	2
1.3.2. Seuil de cisaillement.....	3
1.3.3. Vitesse de cisaillement.....	3
1.3.4. Contrainte de cisaillement.....	4
1.3.5. Thixotropie	4
1.4. Principes de base de la rhéologie :	5
1.5. Comportement rhéologique des bétons :	5
1.6. Facteurs influençant la rhéologie des bétons :	6
1.7. Modèles rhéologiques existants pour les bétons.....	6
1.7.1. Modèles empiriques :	6
1.7.2. Modèles analytiques :	7
1.7.3. Limites des modèles actuels :	7
1.8. Facteurs affectant la rhéologie des bétons.....	7
1.9. Effet du rapport eau-ciment	8
1.10. Effet du type de ciment	8
1.11. Effet des adjuvants.....	9
1.12. Effet de la température	10
1.13. Différents types de bétons:.....	12
1.13.1. Béton auto plaçant (BAP) :	12
1.13.2. Bétons de hautes performances (BHP) :	13
1.13.3. Béton de fibres :	13
1.13.4. Béton compacte au rouleau (BCR) :	13
1.13.5. Béton préfabriqué :	14
1.13.6. Béton léger :	14

1.13.7. Béton lourd :	14
1.13.8. Béton de poudre réactive (BPR) :	14
1.13.9. Béton ordinaire :	14
<i>Chapitre 02</i>	16
MATERIAUX ET MATERIEL	16
2.1. Introductio.....	16
2.2. Matériaux utilisés :	16
2.3. Caractéristiques des matériaux :	16
2.3.1. Caractéristiques du gravier :	16
2.3.2. Caractéristiquedusable:.....	26
- Massevolumiqueàl'étatcompacte:.....	33
2.3.3. Caractéristiques du ciment utilisé :	35
2.3.4. L'eaude gâchage:[NAEN1008]	36
2.3.5. Adjuvant :	37
<i>Chapitre 03</i>	39
FORMULATION DU BETON	39
3.1. Introduction.....	39
3.2. Calcul de la composition du béton:	39
3.2.1. But :	39
3.2.2. Méthode de calcul de la composition du béton:	39
3.2.3. Formulation de Dreux- Gorisse	40
En a prendre1% par rapport le ciment finalement la quantité est 4.5 kg/ m^3	43
3.3. Lemalaxage:[NAEN12390-2].....	44
<i>Chapitre 04</i>	45
RESULTATS ET DISCUSSION	45
4.1. Introduction :	45
4.2. Etude Des Comportements Des Bétons.....	45
4.2.1. Essai sur béton frais	45
4.2.2. A l'état durci	48

4.3. Résultats des essais rhéologiques (rhéomètre) :.....	55
4.4. Viscosité et seuil de cisaillement :	56
Affaissement :	56
4.5. Interprétation des résultats :.....	57
4.5.1. Effet sur la viscosité :	57
4.5.2. Conclusions sur le rôle des fibres :.....	57
4.6. Comparaison notre module avec les autres modules	57
4.6.1. Modèle de Bingham (1922) :	58
4.6.2. Modèle d'Herschel-Bulkley (1926) :.....	58
4.6.3. Modèle de Quemada (1998) :	58
4.6.4. Modèle thixotropique de Roussel (2006) :	59
4.7. Conclusion pour notre module	59
CONCLUSIONS GENERALES ET PERSPECTIVES	61

Liste des figures

Figure 1 Courbe d'écoulement d'un fluide Binghamien [Ferraris, 1999].	2
Figure 2 Contribution de la phase solide et de la phase liquide à la résistance au Cisaillement du béton [De Larrard, 2002].	3
Figure 3 Schéma de vitesse de cisaillement [De Larrard, 2002].	3
Figure 4 Exemples des courbes d'écoulement (a) diminution de la vitesse de rotation;(b) augmentation de la vitesse de rotation ; (c)augmentation de la vitesse de rotation après une période de repos. [belaidi,2013].	4
Figure 5 Phénomènes thixotrope et antithixotrope [Hu, 1995].	5
Figure 6 Schéma de principe du comportement d'un fluide à seuil thixotrope [Mahautetal. 2009].	5
Figure 7 Quelques courbes d'écoulement caractéristique. a) fluides viscoplastiques. b) fluides exclusivement visqueux.	6
Figure 8 Le rhéomètre ICAR utilisé.	7
Figure 9 Effet du rapport E/C sur les paramètres rhéologiques des bétons [Domoneandal, 1999].	8
Figure 10 Variation du Seuil de cisaillement et de la viscosité d'une pâte de ciment en fonction du temps, confectionnée avec différents types de superplastifiant [Bjömströmet Chandr. ,2003].	9
Figure 11 Évolution du comportement rhéologique en fonction du temps.	10
Figure 12 Variation du seuil d'écoulement en fonction de la température et le dosage en ciment.	12
Figure 13 Coefficient de viscosité relative en fonction de la température et le dosage en ciment.	12
Figure 14 lesboulesavantl'essai.	24
Figure 15Appareil de Los Angeles.	24
Figure 16 Courbes granulométriques des granulats.	28
Figure 17 Schéma des étapes de formulation du béton.	40
Figure 18 Coefficient granulaire G' en fonction de la qualité et de la taille maximale des granulats Dmax.	41
Figure 19 Abaque permettant la détermination de Copt.	42
Figure 20 Détermination les pourcentages à l'aide de analyse granulométrique.	43
Figure 21 malaxage béton avec les fibres PP.	44
Figure 22 Essai d'affaissement con d'Abrams.	46
Figure 23 Affaissement les deux mélanges BT et BF.	47
Figure 24 Valeurs de la masse volumique.	48
Figure 25 Presse hydraulique utilise.	49
Figure 26 Les Eprouvettes après 24h de coulage.	50
Figure 27 Eprouvette au coure d'écrasement.	50
Figure 28 Variation de la résistance à la compression en fonction du temps pour deux mélanges.	51
Figure 29 Résistance à la traction par flexion.	53
Figure 30 couple viscosité et le seuil de cisaillement pour BT et BF.	55
Figure 31 Seuil de cisaillement par rapport l'affaissement avec le temps.	56

Liste des tableaux

Tableau 1 L'analyse granulométrique de gravier concassé (3/8) (8/16).....	17
Tableau 2 La masse volumique apparente (ρ) du gravier concassé (3/8), (8/15).....	19
Tableau 3 La masse volumique absolue (ρ) du gravier (3/8), (8/16).....	20
Tableau 4 Porosité, compacité et indice des vides du gravier.....	22
Tableau 5 Adaptation des charges des boulets correspondant à la classe granulaire choisie. [HAMMOUCHE.Y et LAALAOUIA, 2012].....	23
Tableau 6 Estimation de la dureté des agrégats en fonction du coefficient LA. [HAMMOUCHE.Y et LAALAOUIA, 2012].....	25
Tableau 7 Résultats d'essai de Los Angeles du gravier (3/8), (8/16).....	25
Tableau 8 Degré d'absorption d'eau des agrégats (3/8), (8/16)	26
Tableau 9 Analyse granulométrique du sable.	27
Tableau 10 Module de finesse du sable.	28
Tableau 11 Qualité du sable en fonction des valeurs d'équivalent de sable ESV et ESP [BRETTE Alain,].....	31
Tableau 12 Résultats d'essais d'équivalent de sable du sable de dune testé.....	32
Tableau 13 Caractéristiques physiques du sable de dune.....	34
Tableau 14 Composition chimique de ciment utilise CEM II/A 42,5N.....	35
Tableau 15 Analyse chimique de l'eau utilisée.....	37
Tableau 16 Caractéristiques de superplastifiant MEDAFLOW 30.	37
Tableau 17 Résultats d'affaissement les deux mélanges.....	46
Tableau 18 Valeurs de la masse volumique pour les deux mélanges	47
Tableau 19 Valeurs de Résistance à la compression.....	51
Tableau 20 Résistance à la traction par flexion	52

Listes des Symboles

Symboles:

C : ciment.

E:eau.

E/C : rapport eau sur ciment.T:letemps.

ν : Coefficient de poisson.

E : module d'élasticité dynamique.

Dmax : Diamètre maximal du gros granulat.

V : volume.

γ : masse volumique absolue.

ρ : masse volumique apparent.

P(%) : porosité.

C(%) : compacité.

e(%) : indice des vides.

Pc(%) : porosité à l'état compacte.

Cc(%) : compacité à l'état compacte.

ec(%) : indice des vides à l'état compacte.

PL(%) : porosité à l'état lâche.

CL(%) : compacité à l'état lâche

F: charge de rupture.

BT : béton témoin

BF : béton fibré avec polypropylène

τ : contrainte de cisaillement

$\dot{\gamma}$: le gradient de vitesse de cisaillement correspondant :

μ : viscosité

PP : fibre de Polypropylènes

INTRODUCTION GENERALE

Le béton est l'un des matériaux de construction les plus importants et les plus largement utilisés dans le monde, en raison de sa résistance, de sa durabilité et de son coût relativement faible [1]. Cependant, la mise en œuvre du béton frais implique de prendre en compte son comportement rhéologique complexe, qui influence directement sa maniabilité, sa pompabilité et sa capacité à être correctement mis en place et compacté [2], [3].

La rhéologie des bétons est régie par de nombreux facteurs, tels que la composition du mélange, les propriétés des constituants, les paramètres de formulation et les conditions de mise en œuvre [4]. Une compréhension approfondie de ce comportement rhéologique est essentielle pour optimiser les processus de fabrication, de transport et de mise en place du béton, tout en garantissant la qualité et les performances finales de l'ouvrage [5], [6].

Bien que de nombreux modèles rhéologiques aient été développés pour décrire le comportement des bétons, la plupart d'entre eux présentent des limitations, soit en termes de précision, soit en termes de capacité à prendre en compte l'ensemble des facteurs influents [7], [8]. Par conséquent, il existe un besoin réel de développer de nouveaux modèles plus robustes et plus performants pour prédire avec précision la rhéologie des bétons dans différentes conditions.

C'est dans ce contexte que s'inscrit cette étude, qui vise à explorer et développer un nouveau modèle rhéologique pour les bétons, capable de mieux représenter leur comportement complexe et de tenir compte de l'influence de divers paramètres clés. Ce modèle amélioré permettrait une meilleure compréhension des phénomènes rhéologiques en jeu et contribuerait à optimiser la formulation, la fabrication et la mise en œuvre des bétons dans diverses applications du génie civil.

Chapitre 01

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

1.1. Introduction

Cette section présente une compilation exhaustive des sources consultées et citées tout au long de notre étude sur le développement d'un nouveau modèle pour la rhéologie des bétons. La bibliographie joue un rôle crucial dans notre travail, car elle établit le fondement scientifique sur lequel repose notre recherche et souligne la pertinence de notre contribution au domaine.

Les références listées ici couvrent un large éventail de sujets liés à notre projet, notamment :

- Les principes fondamentaux de la rhéologie des bétons
- Les modèles existants et leurs applications
- Les méthodes expérimentales en rhéologie des matériaux cimentaires
- Les avancées récentes dans la modélisation du comportement des bétons
- Les influences des différents constituants sur les propriétés rhéologiques du béton

Cette bibliographie a été soigneusement compilée pour inclure à la fois des ouvrages classiques qui ont posé les bases de notre compréhension actuelle, ainsi que des articles de recherche récents qui reflètent l'état de l'art dans le domaine. Elle comprend des publications académiques, des thèses, des rapports techniques et des actes de conférences pertinents.

1.2. 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 peut ne 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 des a mesuré ont pris du même coup une importance primordiale. Auparavant, un béton plus fluide était automatiquement associé aux problèmes de ségrégation et une faible résistance à la compression. De nos jours, il est maintenant possible de produire un béton très fluide ayant d'excellentes propriétés mécaniques par l'utilisation des superplastifiants. 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 donne des résultats plus adéquats et reflète bien l'aptitude physique du matériau à se déplacer sous son propre poids.

1.3. Paramètres rhéologiques

1.3.1. Viscosité

La viscosité est la résistance à l'écoulement de la matière, elle est définie généralement comme étant le rapport entre la contrainte de cisaillement τ et le gradient de vitesse de cisaillement $\dot{\gamma}$ correspondant :

$$\mu = \tau / (\dot{\gamma})$$

Elle correspond à la pente de la droite donnant la variation du gradient de vitesse de cisaillement en fonction de la contrainte de cisaillement (Figure.1. 1). La viscosité plastique dépend de la force intermoléculaire qui empêche le déplacement des particules les unes par rapport aux autres et rend l'écoulement plus difficile [Charbel, 2008].

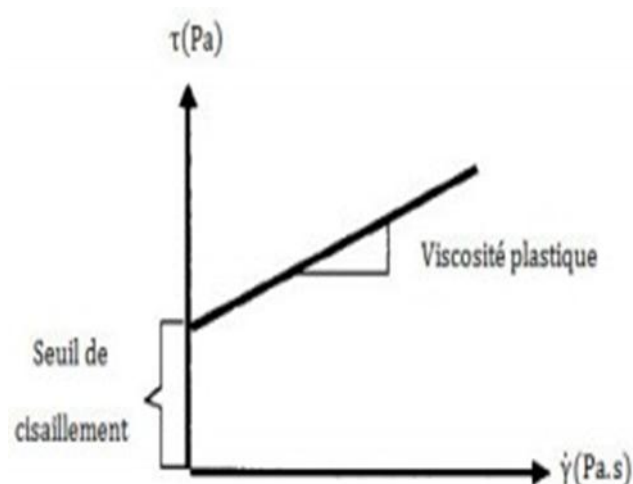


Figure 1 Courbe d'écoulement d'un fluide Binghamien [Ferraris, 1999].

1.3.2. Seuil de cisaillement

Le seuil de cisaillement est défini comme la contrainte de cisaillement au-delà de laquelle le matériau devient fluide, Alors que la viscosité plastique est connue comme la résistance à l'écoulement de la matière. De Larrard [2002] a donné une explication physique plus concluante. En effet, cet auteur a montré que le seuil de cisaillement est contrôlé par les contacts intergranulaires, c'est-à dire par la phase solide du béton, pendant que les termes μ , $\dot{\gamma}$ représentent la contribution de la phase liquide (Figure2).

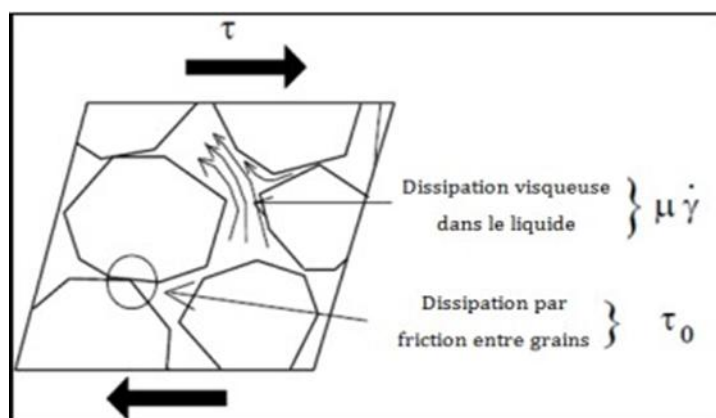


Figure 2 Contribution de la phase solide et de la phase liquide à la résistance au Cisaillement du béton [De Larrard, 2002].

1.3.3. Vitesse de cisaillement

Souvent appelé gradient de vitesse il s'agit de la vitesse de déformation de deux couches successives de matériau cisailé, qui représente donc la dérivée par rapport au temps de la déformation 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 3).

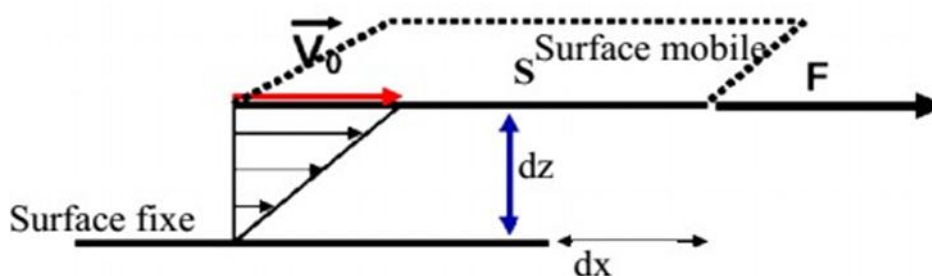


Figure 3 Schéma de vitesse de cisaillement [De Larrard, 2002].

1.3.4. 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 contrainte τ (mesurée en Pascal), qui s'exerce tangentiellement à la surface de la couche cisailée [Poitou et Racinaux, 2001]. Donc, on peut dire que la contrainte de cisaillement est la force que l'on exerce par unité de surface du fluide, selon la formule suivante :

$$\tau = \frac{dF}{dS}$$

1.3.5. Thixotropie

Après avoir dépassé le seuil de cisaillement, le matériau commence à s'écouler. Si l'effort nécessaire pour maintenir un écoulement constant diminue en fonction du temps (ou si l'écoulement s'accélère en fonction du temps à effort constant), ce matériau est dit thixotrope. Si le matériau thixotrope subit un cisaillement constant après un temps de repos, on observe un comportement analogue à celui décrit sur la Figure 4 (c). Ainsi que l'anti-thixotropie, sont définies comme étant des phénomènes réversibles (Figure 5). Le schéma du principe du comportement d'un fluide thixotrope est donné dans la Figure. 6

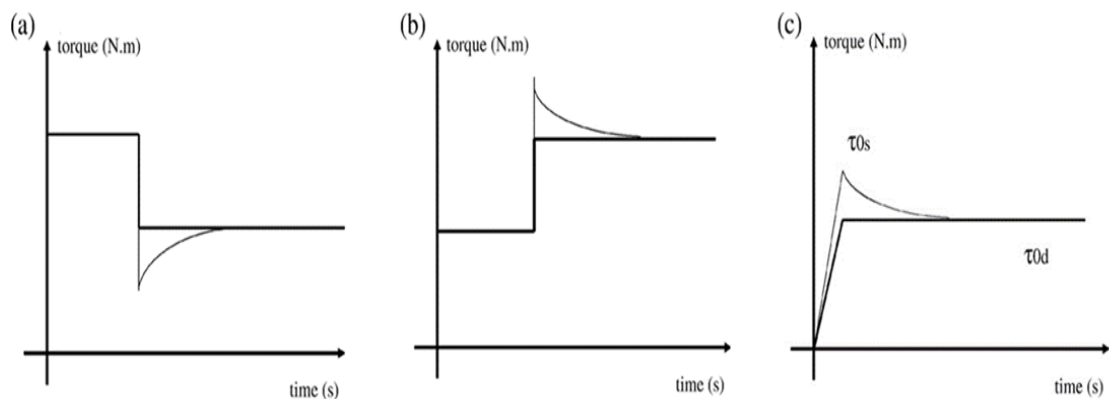


Figure 4 Exemples des courbes d'écoulement (a) diminution de la vitesse de rotation; (b) augmentation de la vitesse de rotation ; (c) augmentation de la vitesse de rotation après une période de repos. [belaidi, 2013].

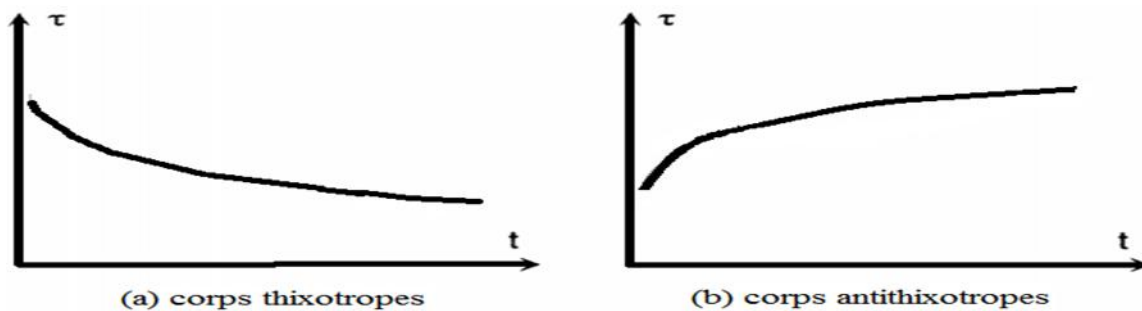


Figure 5 Phénomènes thixotrope et antithixotrope [Hu, 1995].

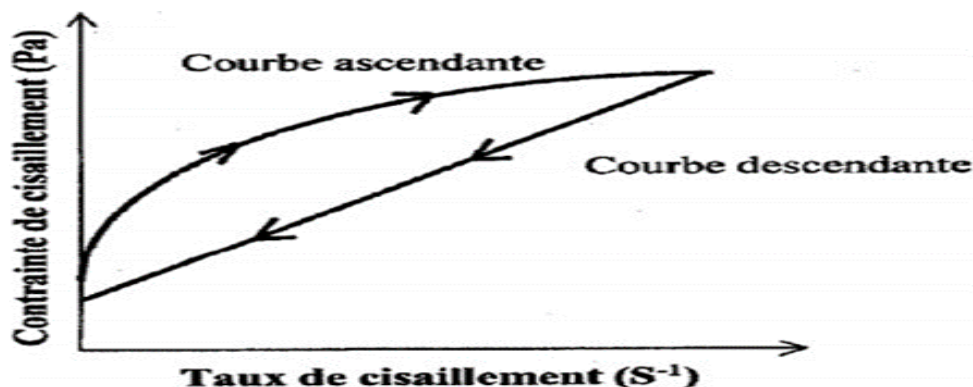


Figure 6 Schéma de principe du comportement d'un fluide à seuil thixotrope [Mahautetal. 2009].

1.4. Principes de base de la rhéologie :

La rhéologie est l'étude de la déformation et de l'écoulement de la matière sous l'effet de contraintes appliquées. Pour les bétons, la rhéologie décrit le comportement de l'écoulement du mélange frais et sa capacité à être mis en place et compacté [9]. Les concepts clés sont la viscosité (résistance à l'écoulement) et le seuil de cisaillement (contrainte minimale pour initier l'écoulement).

1.5. Comportement rhéologique des bétons :

Le béton est un matériau hétérogène de par ses éléments constitutifs. C'est une suspension de particules de tailles diverses dans un fluide suspensant. Son comportement rhéologique est classiquement considéré comme celui d'un fluide à seuil. De nombreux travaux associent à de telles suspensions concentrées un comportement rhéologique viscoplastique, par exemple de type Bingham [10,11] Rappelons que le comportement rhéologique des fluides visqueux newtoniens (fluide classique) est caractérisé par une relation linéaire entre contrainte τ et taux de cisaillement $\dot{\gamma}$. Un tel comportement semble trop réducteur pour caractériser les bétons. Parmi les modèles de fluides à seuil, nous pouvons distinguer le modèle de Bingham caractérisé par une viscosité plastique définie du modèle de Herschel Bulkley pour lequel la composante visqueuse évolue en loi

puissance Les Principales lois de comportements rhéologiques du béton sont le modèle de Bingham qui est le modèle le plus utilisé pour modéliser le comportement rhéologique du béton en raison du faible nombre de paramètres à ajuster (le seuil de cisaillement τ_0 et la viscosité plastique μ_{pl}). Dans le cas unidimensionnel, cette loi de comportement s'écrit simplement pour retraduire les conditions d'arrêt de l'écoulement du béton ainsi que les dissipations liées à son écoulement :

$$\begin{array}{lll} \dot{\gamma} = 0 & \text{si} & \tau < \tau_0 \\ \tau = \tau_0 + \mu_{pl}\dot{\gamma} & \text{Si} & \tau > \tau_0 \end{array}$$

Le seuil de cisaillement correspond à la contrainte minimale à dépasser pour avoir écoulement [12,13]. Il peut être interprété physiquement par la présence de frottements inter granulaires .La viscosité plastique est caractéristique d'une dissipation visqueuse du fluide

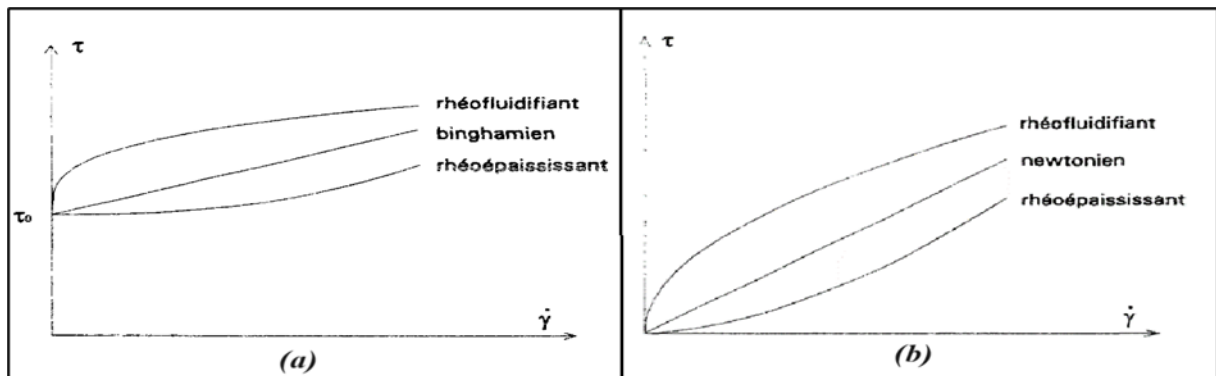


Figure 7 Quelques courbes d'écoulement caractéristique. a) fluides viscoplastiques. b) fluides exclusivement visqueux.

1.6. Facteurs influençant la rhéologie des bétons :

De nombreux facteurs influencent la rhéologie, notamment la formulation (rapport eau/liant, adjuvants), les caractéristiques des constituants (forme, texture et distribution granulométrique des granulats, propriétés des liants), les interactions physicochimiques, la température, l'air entraîné, etc.

1.7. Modèles rhéologiques existants pour les bétons

1.7.1. Modèles empiriques :

Les modèles empiriques comme Bingham, Herschel-Bulkley ou les lois de puissance sont couramment utilisés pour décrire le comportement d'écoulement des bétons, bien qu'ils ne soient

qu'une approximation [13]. Ils permettent une caractérisation rhéologique simple à partir de quelques paramètres ajustables.

1.7.2. Modèles analytiques :

Des modèles analytiques plus complexes ont été développés, comme les modèles d'épaisses suspensions ou de fluide à seuil élastoplastique, pour mieux capturer le comportement non linéaire et la nature hétérogène des bétons [14,15]. Cependant, ils nécessitent plus de paramètres et de validations expérimentales.

1.7.3. Limites des modèles actuels :

Bien que des progrès aient été réalisés, les modèles rhéologiques actuels peinent encore à prédire avec précision le comportement des bétons dans toutes les conditions. Les principales limitations sont liées à la complexité des interactions à l'échelle microscopique, aux effets de paroi, au caractère thixotrope et rhéoépaississant de certains bétons, ainsi qu'aux conditions de mise en œuvre [16,17].



Figure 8 Le rhéomètre ICAR utilisé.

1.8. Facteurs affectant la rhéologie des bétons

Comme toutes les caractéristiques du béton, les paramètres rhéologiques dépendent fortement de sa composition et des propriétés physico-chimiques de ses composants [Adjoudj, 2015].

1.9. Effet du rapport eau-ciment

Plusieurs auteurs ont trouvé que l'augmentation du rapport E/C diminue le seuil de cisaillement et la viscosité plastique [Tattersall, 1991]. Les auteurs qui ont noté cet effet ont souvent réalisé une gâchée de béton à un faible rapport E/C et par la suite ajouté successivement des quantités d'eau. La quantité de pâte de ciment n'est donc pas constante lors que le rapport E/C varie. Effectivement, le seuil de cisaillement et la viscosité diminuent avec l'augmentation du rapport E/C. La Figure.1. 14. montre l'influence du rapport E/C sur les paramètres rhéologiques du béton frais [Domone et al. 1999].

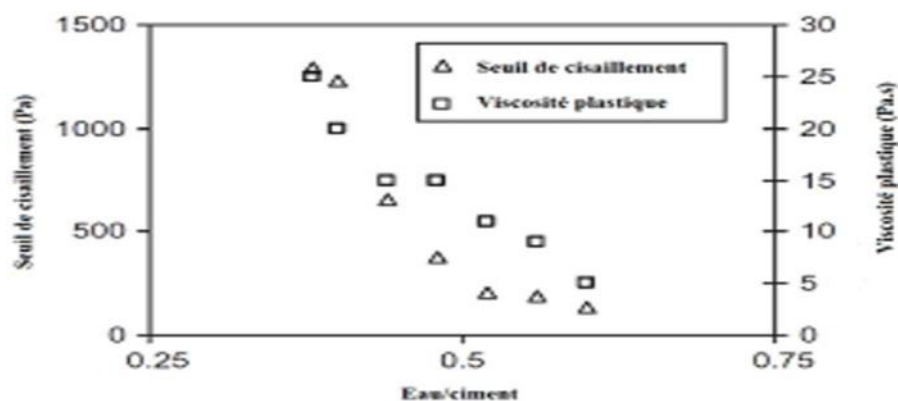


Figure 9 Effet du rapport E/C sur les paramètres rhéologiques des bétons [Domoneandal, 1999].

1.10. Effet du type de ciment

L'influence de la composition du ciment Portland sur les propriétés rhéologiques des matériaux cimentaires a été largement étudiée. Beaupré et Mindess [1998] ont effectué des essais avec trois types de ciment.

Quand tous les autres paramètres sont constants, un mélange fabriqué avec du ciment de type 50 (ciment résistant aux sulfates, selon la norme canadienne) montre le plus faible seuil de cisaillement, un mélange fait avec du ciment type 10 (ciment portland ordinaire, selon la norme canadienne) avec de la fumée de silice montre le plus grand seuil de cisaillement et un mélange fait avec du ciment type 10 présente un seuil de cisaillement compris entre les deux précédents. Généralement ces résultats donnent une viscosité plastique pratiquement constante. A sakura et al. [1992] ont constaté que la viscosité des pâtes de ciment augmente sensiblement dans le ciment ayant un faible rapport C3S/C2S ou C3A/C4AF lorsqu'un super plastifiant est employé.

1.11. Effet des adjuvants

Dans une étude menée sur le temps d'introduction des super plastifiants sur les propriétés rhéologiques des pâtes de ciment, il a été constaté que les supers plastifiants à base de naphthalène et de mélamine augmentent les propriétés rhéologiques des pâtes de ciment à court et à long termes et que la réduction de la viscosité plastique et le seuil de cisaillement dépendent de la composition du ciment et du temps d'introduction du superplastifiant. Aiad [2003] a estimé un temps optimal pour l'introduction des superplastifiants entre 10 à 15 min après le début du malaxage Golaszewski et Szwabowski [2004] ont montré que le type de superplastifiant a une grande influence sur le comportement rhéologique des mortiers de ciment à l'état frais et que les superplastifiants à base de polycarboxylate était plus efficace que les superplastifiants à base de naphthalène. Le type de superplastifiant utilisé et sa structure moléculaire influence l'état rhéologique des pâtes de ciments. Björnström et Chandra [2003] ont mis en évidence l'action de plusieurs types de superplastifiant sur les paramètres rhéologiques où l'action des plicarboxylates est très significative comme l'illustre la Figure 10.

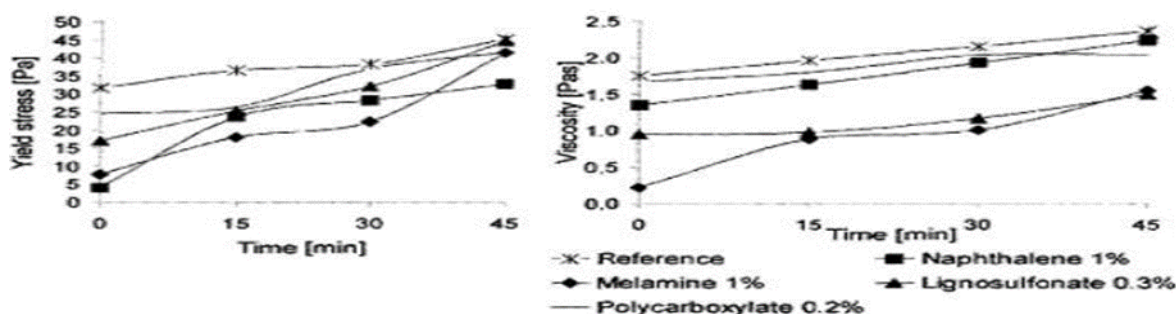


Figure 10 Variation du seuil de cisaillement et de la viscosité d'une pâte de ciment en fonction du temps, confectionnée avec différents types de superplastifiant [Björnström et Chandr., 2003].

Effet du 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 du béton. La durée de la période où le béton frais reste suffisamment maniable est limitée dans le temps à cause du processus d'hydratation. Quand cette limite est dépassée, le béton perd sa maniabilité et son comportement rhéologique est modifié.

La Figure.1. 16 ci-dessous, montre que le seuil de cisaillement de deux pâtes différentes après des durées de 5 et 60 minutes. On constate qu'à 5 minutes ces pâtes présentent un même comportement

(Binghamien).Après60minuteslacourbeduciment(C)se différencie Complètement de celle du quartz (S). Le seuil de cisaillement du ciment a augmenté. Il a fallu briser des liaisons chimiques pour atteindre ensuite un comportement Binghamien par contre la courbe du quartz reste identique et n'est pas affectée par le temps [Singh et Upadhyay. 1993

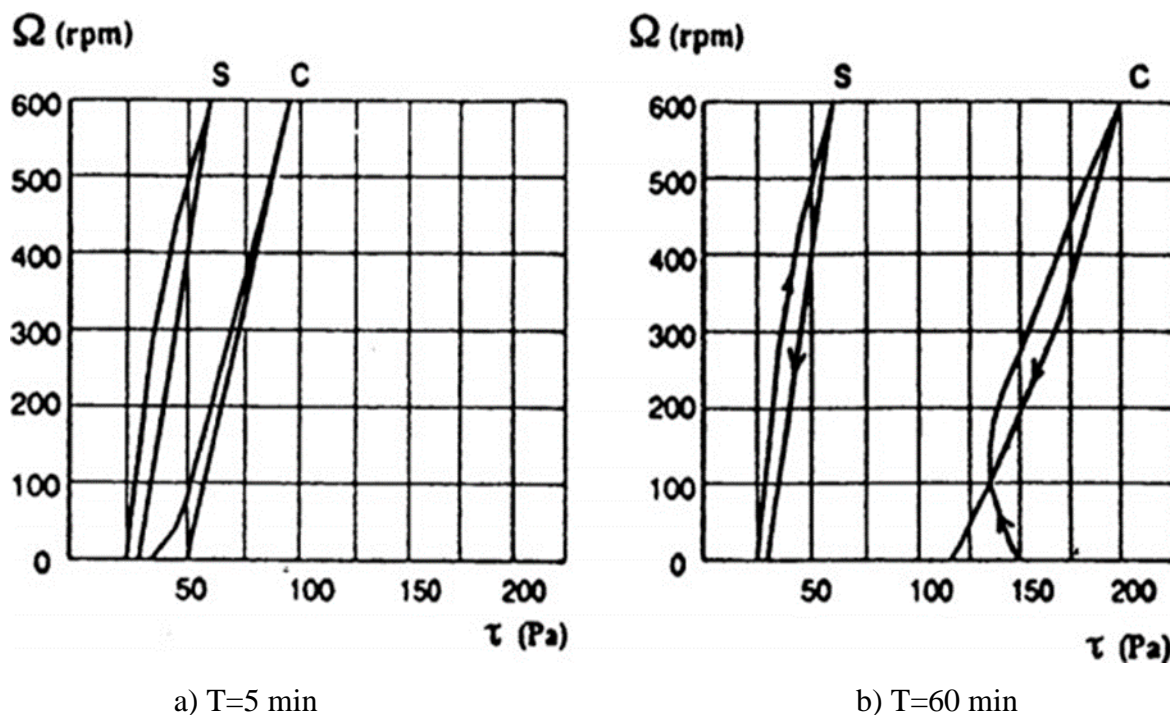


Figure 11Évolution du comportement rhéologique en fonction du temps.

1.12. Effet de la température

L'effet de la température sur la viscosité des pâtes de ciment est directement lié à leurs compositions chimiques. Les travaux de Griesser [2002] illustrés sur la Figure12 montrent que les ciments riches en C3A se manifestent par un plus fort seuil d'écoulement. En général, le seuil de cisaillement augmente avec la température, cette dépendance est plus prononcée en cas du ciment riche en C3A (12.6%) où sa valeur double lorsque la température passe de 20 à 30°C. Le coefficient de viscosité relative a tendance à diminuer avec l'élévation de température et semble relié au type de superplastifiant utilisé comme la montre la Figure 13.

La viscosité augmente au cours du temps et autant plus si la température ambiante est élevée surtout entre 20 et 30°C. Golaszewki et Szwabowski [2004] observent une forte influence de l'élévation de

la température sur le comportement rhéologique des mortiers accompagne d'une augmentation du seuil d'écoulement et une diminution de la viscosité plastique. Avec l'élévation de la température, la contrainte de cisaillement diminue, cette diminution est beaucoup plus marquée en présence d'un superplastifiant [Griesser, 2002].

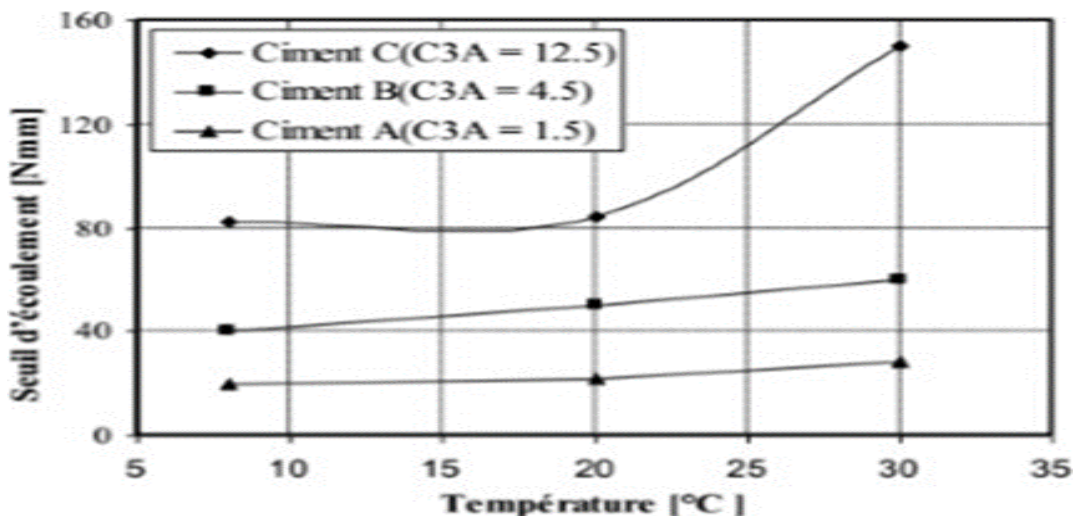


Figure 12 Variation du seuil d'écoulement en fonction de la température et le dosage en ciment

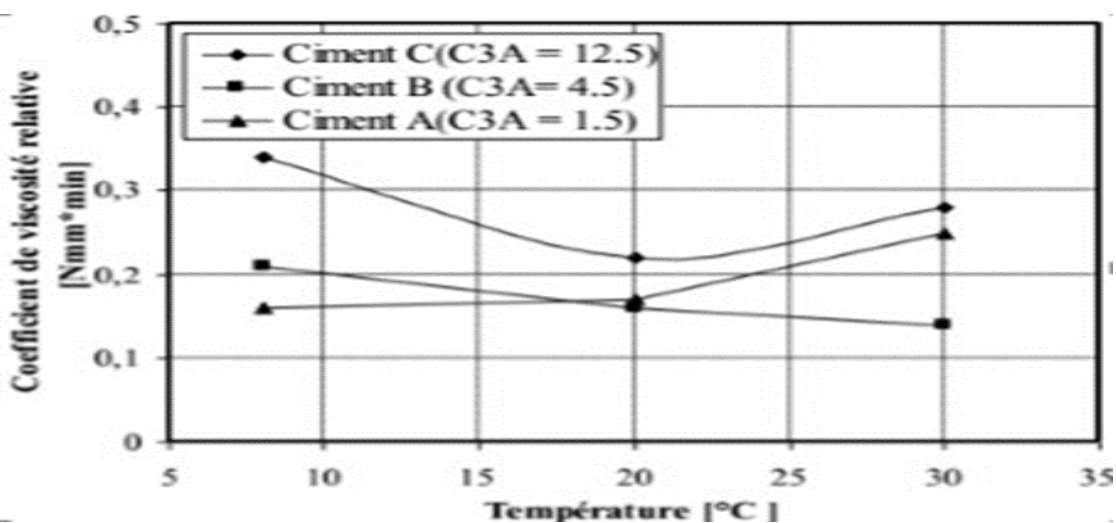


Figure 13 Coefficient de viscosité relative en fonction de la température et le dosage en ciment

1.13. Différents types de bétons:

1.13.1. Béton auto plaçant (BAP) :

Développé dans les années 80 par des chercheurs de l'université de Tokyo au Japon, le béton auto plaçant est un béton fluide, très déformable, homogène et stable qui se met en place par gravitation et sans l'utilisation d'un moyen de vibration, il épouse parfaitement les formes des coffrages les plus complexes, il ne doit pas subir de ségrégation et doit présenter des qualités comparables à

celles d'un béton vibré classique. Ils se caractérisent en général par une formulation contenant au moins un adjuvant chimique et un ajout minéral en proportions bien précises pour satisfaire les exigences en matière de maniabilité et de stabilité. [BARON et SAUTEREY .R ,1982]

1.13.2. Bétons de hautes performances (BHP) :

Sont des bétons aux résistances mécaniques élevées au jeune âge et à 28 jours (supérieure à 50 MPa), et un rapport pondéral E/C inférieur à 0.40. Leur propriété essentielle est leur grande résistance en compression qui dépasse largement le cas des bétons ordinaires. Ceci est obtenu grâce à leur faible porosité qui est diminuée en réduisant la quantité d'eau gâchée par l'emploi d'adjuvants plastifiants et super plastifiants réducteurs et hauts réducteurs d'eau et en utilisant des ultrafines, telles que les fumées de silice qui permettent de combler les vides entre les grains de ciment et d'améliorer l'ouvrabilité du béton frais.[BERNIER.G, 2005]

1.13.3. Béton de fibres :

Est un béton dans lequel sont incorporées des fibres synthétiques ou naturelles, ce qui permet suivant l'ouvrage, de supprimer le treillis soudé traditionnel. Parmi les caractéristiques du béton fibré, on peut citer : sa résistance à la traction, à la fissuration et au choc. Les fibres synthétiques peuvent être d'origine minérale (verre, carbone, métallique) ou d'origine organique (polyamides, polypropylène, acrylique, kevlar, aramide). Les fibres métalliques peuvent être utilisées avec des propriétés spécifiques et avec un dosage de l'ordre de 0,3 à 2% en volume. C'est surtout le rapport entre la longueur et le diamètre des fibres (élancement) qui aura une influence sur les performances finales du béton de fibres.

1.13.4. Béton compacte au rouleau (BCR) :

Ayant une apparence très sèche et raide et un affaissement nul, constitué d'une proportion importante de granulats avec une faible quantité de ciment d'où l'ajout des minéraux (cendres volantes, fibres calcaires, résidus miniers etc...). Il est utilisé pour la construction de barrages en raison de sa faible chaleur d'hydratation initiale (béton de masse) et aussi très utilisé au Canada dans la construction des routes [BACARA, 1996].

1.13.5. Béton préfabriqué :

Sert à la fabrication, généralement en usine et en milieu contrôlé, de diverses composantes allant de l'élément standardisé comme le bloc jusqu'aux éléments de structure ou des panneaux de façades multifonction [CIM BETON, 2000]. Les éléments préfabriqués sont caractérisés par un niveau de qualité constant. Mais ce qui est toujours recherché pour ces bétons est la résistance initiale pour diminuer le délai entre la préfabrication et le transport sur le chantier.

1.13.6. Béton léger :

La norme NF EN 206-1 définit les bétons légers comme ayant une masse volumique après séchage entre 800 et 2100 kg/m³, parmi ces bétons on peut citer les bétons de granulats légers. Ils sont utilisés dans le domaine du confort thermique d'une habitation (isolation thermique) et même comme éléments porteurs de charges qui permettent d'alléger la construction. [CORMON.P, 1973]

1.13.7. Béton lourd :

C'est un béton dont la masse volumique apparente est supérieure à 2600 kg/m³, les résistances mécaniques du béton lourd sont comparables à celle des bétons classiques et même plus élevées compte tenu des faibles dosages en eau [DREUX.G et FESTA.J, 1998].

1.13.8. Béton de poudre réactive (BPR) :

Est un nouveau béton composé essentiellement de ciment, des fumées de silice, des fines réactives constituées de quartz et de sable broyés à une grosseur inférieure à 500 µm, des fibres métalliques d'une longueur de 13 mm environ. Le BPR est caractérisé par des performances mécaniques élevées et une durabilité améliorée. La ductilité que l'ajout de fibres métalliques confère au BPR le rend apte à être utilisé dans de nombreuses applications sans aucune armature passive. Le BPR peut également être utilisé pour la réalisation de structures précontraintes par pré ou post-tension. Les résistances en traction et en compression sont très élevées voir mêmes supérieures à celles des aciers (350 MPa). [RICHARD et CHEYREZY.M, 1995]

1.13.9. Béton ordinaire :

Mélange homogène composé exclusivement des constituants de base ciment, granulat, Eau, avec un rapport E/C qui varie en fonction de la plasticité ainsi que de la résistance désirée. Le béton

ordinaire est caractérisé par sa résistance à la compression qui se situe entre : $20 \text{ MPa} \leq f_{c28} \leq 50 \text{ MPa}$.

Chapitre 02

MATERIAUX ET MATERIEL

2.1. Introductio

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

2.2. Matériaux utilises :

Nous avons utilisé des matériaux locaux, leurs caractéristiques sont étudiées expérimentalement au laboratoire de génie civil à l'université de Elbachir El Ibrahimy Bordj Bou Arreridj

2.3. Caractéristiques des matériaux :

2.3.1. Caractéristiques du gravier :

Les fractions utilisées sont : (3/8), (8/16).

2.3.1.1. Analyse granulométrique par tamisage [NA EN 933-5] :

a. But de l'essai

L'analyse granulométrique a pour but de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différents grains constituant l'échantillon.

b. Principe de l'essai :

L'essai consiste à fractionner au moyen d'une série de tamis un matériau en plusieurs classes granulaires de tailles décroissantes. Les dimensions de mailles et le nombre des tamis sont choisis 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.

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 1 L'analyse granulométrique de gravier concassé (3/8) (8/16).

	Ouverture du tamis(mm)	Refuspartiel(g)	Refuscumulé	% desrefuscumulés	% detami scumul é
Gravier 3/8 1600g	8	2	2	0.125	99.88
	6.3	159	161	10.06	89.94
	5	664	825	51.56	48.44
	4	497	1322	82.63	17.37
	3.15	247	1569	98.06	1.94
	Fond	12	1581	100	00.0
Gravier 8/16 3200g	16	0	0	00.0	100
	14	260.64	260.64	8.69	91.31
	12.5	517.64	778.28	25.94	74.06
	10	1084.65	1862.93	62.10	37.90
	8	858.35	2721.28	90.71	9.29
	6.3	279.48	3000	100	–
	Font	–	3197	99.90	0.10

2.3.1.2. 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 d'un certain volume d'un matériau et la masse du même volume d'eau à 4 °C, c'est - à - dire une grandeur sans unité. [AYADI.B et HAMMACHE.Y, 2012].

Comme il existe le volume apparent et le volume absolu, on distinguera :

a. La masse volumique apparente (γ):

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; Kg/m³; t/m³).

- Principe :

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

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

- Mode opératoire :

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

• Il résulte que :

$$\gamma = (M_2 - M_1) / V$$

M1 : masse du récipient vide.

M2 : masse du récipient et gravier.

V : volume de récipient.

Les résultats obtenus sont classés dans les tableaux suivants :

Tableau 2 La masse volumique apparente (ρ) du gravier concassé (3/8), (8/15).

matériaux	M ₁ (kg)	V(l)	M ₂ (kg)	γ_{app}	γ_{moy} (kg/l)
3/8	7.416	5	0.841	1.315	1.338
	7.595	5	0.841	1.351	
	7.580	5	0.841	1.348	
8/16	7.983	5	0.841	1.428	1.419
	7.958	5	0.841	1.423	
	7.882	5	0.841	1.408	

b. La masse volumique absolue ou spécifique (ρ):

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 (t/m³, kg/dm³, 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 en va utiliser la méthode de l'éprouvette graduée.

- Mode opératoire :

- Mettre dans une éprouvette graduée en verre un volume d'eau V₁ (400 ml).
- Peser une masse M du corps (300 g) et l'introduire dans l'éprouvette.
- Bien éliminer les bulles d'air,
- Lire le nouveau volume V₂,

• Le volume absolu ou réel est :

$$V = V_2 - V_1$$

• La masse volumique réelle est:

$$\rho = M / (V_2 - V_1)$$

L'opération se fait 03 fois et en prendre la moyenne. [HAMMOUCHE.Y et LAALAOUI.A, 2012]

Les résultats obtenus sont classés dans les tableaux suivants :

Tableau 3 La masse volumique absolue (ρ) du gravier (3/8), (8/16).

matériaux	M(g)	V ₁ (ml)	V ₂ (ml)	ρ_{abs}	ρ_{moy} (kg/l)
3/8	300	400	516	2.586	2.593
	300	400	515	2.608	
	300	400	516	2.586	
8/16	300	400	517	2.564	2.564
	300	400	518	2.542	
	300	400	516	2.586	

c. 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:

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

On peut exploiter les résultats des masses volumiques pour déterminer la porosité de notre gravier où:

$$P(\%) = \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right) \times 100$$

d. La compacité:

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

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

Aussi:

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

e. L'indice des vides :

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

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

Aussi:

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

Tableau 4 Porosité, compacité et indice des vides du gravier.

Gravier	Porosité P(%)	Compacité C(%)	Indice des vides e(%)
(3/8)	48.39	51.61	0.937
(8/15)	44.65	55.35	0.806

f. La résistance à la fragmentation par chocs: Essai Los Angeles [NAEN1097- 2]:

- But de l'essai:

Estimer la résistance à la fragmentation par chocs sous 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 mélangés à des boules d'acier. A la fin, évaluer la quantité de matériau retenu sur le tamis de 1.6mm

Il se pratique sur une des six classes granulaires qui sont : (4/6.3) ou (6.3/10) ou (10/14) ou (10/25) ou (16/31.5) ou (25/50). [HAMMOUCHE.Y et LAALAOUI.A, 2012]

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

Tableau 5 Adaptation des charges des boulets correspondant à la classe granulaire choisie.

[HAMMOUCHE.Y et LAALAOUIA, 2012].

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

- Mode opératoire:

- ❖ Après 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, en 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.



Figure 14 les boules avant l'essai.



Figure 15 Appareil de Los Angeles.

Peser ce refus une fois séché. Soit P le résultat de la pesée avec:

$P = 5000$ - refus

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

$$L_A = 100(P/5000)$$

P: est le passant à 1.6mm.

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

Tableau 6 Estimation de la dureté des agrégats en fonction du coefficient L_A . [HAMMOUCHE, Y et LAALAOUI, A, 2012]

Coefficient L_A	Estimation de la dureté des agrégats
<20	Très dure
20 à 25	Dur
25 à 30	Assez dure
30 à 40	Mis dure
40 à 50	Tendre
>50	Très tendre

Les résultats obtenus sont inscrits dans le tableau ci-dessous:

Tableau 7 Résultats d'essai de Los Angeles du gravier (3/8), (8/16).

Fraction granulaire	L_A (%)
(3/8)	21
(8/16)	21

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

g. Degré d'absorption d'eau [NA EN1097-6]

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

$$A(\%) = [(M_H - M_S) / M_S] \cdot 100$$

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

M_S : La masse du matériau sec en (g). [HAMMOUCHE, Y. et LAALAOUI, A., 2012]

Les résultats sont regroupés dans le tableau suivant:

Tableau 8 Degré d'absorption d'eau des agrégats (3/8), (8/16)

Fraction	M_H (g)	M_S (g)	A(%)
(3/8)	1000	978	2.25
(8/16)	1000	986	1.42

2.3.2. Caractéristique du sable:

Le sable utilisé dans nos travaux est un sable de dune. Ce sable est prélevé dans une zone située au sud de M'silad où les caractéristiques sont citées ci-après:

Les courbes granulométriques de différentes fractions granulaires utilisées sont tracées ci-dessous.

2.3.2.1. Analyse granulométrique du sable [NAEN933-1]

a. But de l'essai:

Permettre la détermination de la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différents grains constituant l'échantillon.

b. Principe de l'essai:

Faire passer l'échantillon à travers une série de tamis décroissant de plus grand à plus petit, et faire peser le refus dans chaque tamis.

c. Mode opératoire:

Le mode opératoire est identique à celui cité précédemment dans la partie des graviers, la seule différence est la durée de l'essai qu'elle est de 3 minutes dans le cas des sables.

Les résultats de l'analyse granulométrique du sable de BOUSAADA sont inscrits dans le tableau ci-dessous:

Tableau 9 Analyse granulométrique du sable.

Diamètre de tamis (mm)	Refus Partie l(g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisé cumulés (%)
5	0	0	0	100
3.15	4.26	4.26	0.43	99.57
2.5	5.01	9.27	0.93	99.07
1.25	37.52	46.79	4.68	95.32
0.63	126.15	172.94	17.29	82.71
0.315	458.26	631.2	63.12	36.88
0.16	299.64	930.84	98.6	6.92
0.08	55.14	986.84	0	1.40
Fond	14	1000	100	0.00

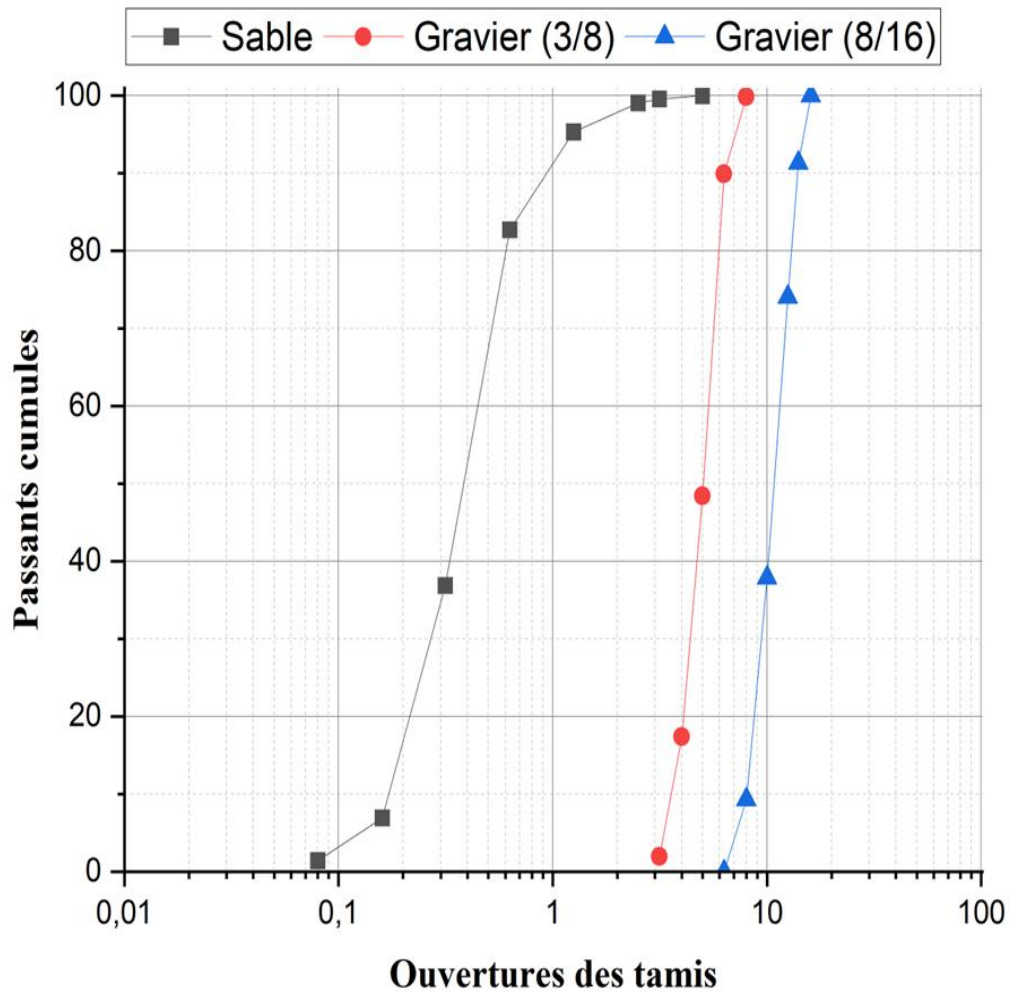


Figure 16 Courbes granulométriques des granulats

2.3.2.2. Module de finesse [NAEN12620]:

Le module de finesse d'un sable est égal au 1/100 de la somme de refus exprimés en pourcentage sur les différents tamis. [BRETTE, Alain, 2007]

Tableau 10 Module de finesse du sable.

Quantité d'usage	Module de finesse
Gros	>2.5
Moyen	2 à 5
Fin	1.5 à 2

Trèsfin	1à1.5
---------	-------

$$MF = \sum R_i / 100$$

$$MF = \frac{1}{100} (\text{refus cumulés en \% de tamis } * 0,16 - 0,315 - 0,63 - 1,25 - 2,5 - 5 +)$$

$$MF = 0.42 + 6.16 + 10.31 + 15.97 + 66.28 + 95.79 / 100 = 1.94 \quad MF = 1.94$$

Après l'analyse granulométrique on trouve que, le module de finesse du sable testé est égal à: MF = 1.94, MF < 2 (C'est un sable fin).

2.3.2.3. Equivalent desable: [NAEN933-8]

a. But de l'essai:

Cet essai consiste à déterminer la quantité d'éléments fins (argile, limons, impuretés) contenus dans le sable par rapport à la quantité d'éléments sableux.

b. Mode opératoire:

- Remplir l'éprouvette d'une solution la vente jusqu'au premier repère.
- A l'aide d'un entonnoir, verser l'échantillon de sable de 120 ± 1 g dans l'éprouvette et taper fortement à plusieurs reprises avec la paume de la main afin de libérer les bulles d'air et favoriser le mouillage de l'échantillon.
- Laisser reposer pendant 10 min.
- Boucher l'éprouvette à l'aide d'un bouchon en caoutchouc et lui imprimer 90 cycles de 20 cm de secousses horizontales en 30 s à l'aide de l'agitateur mécanique.
- Retirer le bouchon de l'éprouvette, le rincer avec la solution lavante au-dessus de l'éprouvette et rincer ensuite les parois de celle-ci.
- Faire descendre le tube laveur dans l'éprouvette et le rouler entre le pouce et l'index en faisant tourner lentement le tube et l'éprouvette tout en imprimant au tube un léger piquage.

- Après 20 min de dépôt, lire la hauteur h_1 , de niveau supérieur de flocculat jusqu'au fond de l'éprouvette à l'aide d'une règle.
- Mesurer également avec la règle la hauteur h_2 comprise entre le niveau supérieur de la partie sédimentaire du fond de l'éprouvette.

Avec: h_1 : hauteur du sable plus flocculat.

- h_2 : hauteur du sable.

Introduire le piston dans l'éprouvette et le laisser descendre doucement jusqu'à ce qu'il repose sur le sédiment.

$$E_{sp} = (h'/h) 100\%$$

Avec: h_1 : hauteur du sable plus flocculat.

h_2 : hauteur du sable.

Tableau 11 Qualité du sable en fonction des valeurs d'équivalent de sable ESV et ESP [BRETTE Alain,].

E_{sv}	E_{sp}	Nature et qualité du sable
$E_s < 65$	$E_s < 60$	Sable argileux: risque de retrait et de gonflement à rejeter pour des bétons de qualité.
$65 < E_s < 75$	$65 < E_s < 80$	Sable légèrement argileux de propriétés admissibles convient parfaitement pour des bétons de qualité courante quand on ne craint pas particulièrement le retrait.
$75 \leq E_s \leq 85$	$70 \leq E_s \leq 80$	Sable propre à faible pourcentage de farine argileuse convient parfaitement pour des bétons de haute qualité.

$E_s \geq 85$	$E_s > 85$	Sable très propre ; l'absence totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra rattraper par une augmentation du dosage en eau.
---------------	------------	--

En répétant l'essai 03 fois, les résultats sont regroupés dans le tableau ci-dessous:

$$E_{sv} = (h_2/h_1) 100\%$$

Tableau 12 Résultats d'essais d'équivalent de sable du sable de dune testé.

Hauteur (cm)	h_1	h_2	$E_{sv}(\%)$	$E_{sv\text{moy}}(\%)$	h'_2	$E_{sp}(\%)$	$E_{sp\text{moy}}(\%)$
Echantillon (1)	13.90	8.20	58.99	64.27	8.00	57.55	59.07
Echantillon (2)	12.50	8.3	66.40		7.40	59.20	
Echantillon (3)	12.90	8.7	67.44		7.80	60.46	

Le sable testé donne les résultats suivants:

$E_{sv} = 64.27(\%)$
 $E_{sp} = 59.07(\%)$

} Le sable est considéré argileux et nécessite un lavage avant son utilisation.

2.3.2.4. Caractéristiques physiques du sable:

Il est nécessaire de déterminer tous les caractéristiques physiques pour le sable de dune.

a. Masse volumique apparente [EN1097-6]

- Masse volumique à l'état lâche:

- On détermine la masse volumique apparente du sable à l'aide d'un entonnoir standardisé de capacité 1L.
- On remplit l'entonnoir avec du sable sec
- On pèse le récipient sous

l'entonnoir à une distance de 10 à 15 cm et on le remplit avec du sable.

- On nivelle la surface du sable et on pèse le tout soit M_2 en poids.

La masse volumique apparente du sable est donnée par la formule suivante:

$$\rho_{app} = (M_2 - M_1) / V_r$$

M_1 : Masse du récipient vide.

M_2 : Masse du récipient plus le sable.

V_r : Volume du récipient ($V_r = 1L$).

- Masse volumique à l'état compacte:

C'est la masse du matériau par unité de volume après remplissage du récipient et le compacter par tassement à 25 secousses manuelles, jusqu'au remplissage du récipient après on nivelle ce dernier et on le pèse, soit M_2 la masse de l'ensemble (sable + récipient) M_1 la masse du récipient.

La masse volumique à l'état compacte est donnée par la formule suivante:

$$\rho_c = (M_2 - M_1) / V_r$$

M_1 : Masse du récipient vide

M_2 : Masse du récipient plus le sable

V_r : Volume du récipient ($V_r = 1L$).

b. Laporosité:

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

Cette propriété ou notion de porosité est importante car elle influe sur certaines caractéristiques fondamentales et que:

- Résistance mécanique élevée, donc P faible.

Capacité d'absorption d'eau (w); Prélevé donc (w) grand La porosité est donnée par la relation suivante :

$$P(\%) = [1 - (\gamma / \rho_s)] \times 100\%$$

à l'état lâche :

$$P_L = [1 - (\gamma_L / \rho_s) 100\%$$

à l'état compact :

$$P_c = [1 - (\gamma_c / \rho_s) 100\%$$

c. La compacité:

La compacité d'un matériau est une proportion de son volume réellement occupé par la matière solide qu'il constitue, c'est le rapport du volume absolu des grains au volume apparent du matériau :

à l'état lâche :

$$C_L = 1 - P_L$$

$$C = 1 - P$$

à l'état compacte :

$$C_c = 1 - P_c$$

d. L'indice des vides:

Le rapport de volume de vides sur le volume de solide :

à l'état lâche :

$$e = p / (1 - p)$$

$$e_L = P_L / (1 - P_L)$$

à l'état compacte :

$$e_c = P_c / (1 - P_c)$$

On note ici que les résultats présentés dans le tableau 13 ci-dessous sont calculés comme moyennes des essais effectués en laboratoire après avoir fait l'échantillonnage.

Les résultats qui regroupés dans le tableau suivant sont tirés d'une étude de caractérisation du sable.

Tableau 13 Caractéristiques physiques du sable de dune.

Propriété	Valeurs
-----------	---------

Masse volumique apparente	1.558
Masse volumique absolue	2.514
Masse volumique à l'état lâche	1.558
Masse volumique à l'état compact	1.574
Compacité à l'état lâche	61.98%
Porosité à l'état lâche	38.02%
Indice des vides à l'état lâche	61.34%
Compacité à l'état compact	62.61%
Porosité à l'état compact	37.39%
Indice des vides à l'état compact	59.72%
Degré d'absorption	17.65%

2.3.3. Caractéristiques du ciment utilisé :

Les ciments couramment employés sont les ciments Portland composés, conformes aux normes en vigueur [18,19]. Ils comprennent généralement un mélange de clinker Portland et d'additions minérales telles que la fumée de silice, les cendres volantes ou le laitier de haut fourneau. Ces additions contribuent à améliorer les propriétés rhéologiques, la durabilité et la résistance mécanique des bétons [20,21].

Le ciment utilisé dans ce travail est un ciment portland composée CEM II/A 42,5N. Il provient de la cimenterie « GICA ain el kabira wilaya de Sétif ». Ce produit convient pour : les bétons armés et non armés, préfabriqués ou précontraints, étuvés et autoétuvés, le génie civil (ouvrages et routes) et les constructions (logements, locaux commerciaux et industriels).

Tableau 14 Composition chimique de ciment utilise CEM II/A 42,5N

Composition chimique (%)	Ciment
--------------------------	--------

SiO ₂	19.63
Al ₂ O ₃	3.50
Fe ₂ O ₃	4.12
CaO	63.64
MgO	1.07
SO ₃	2.55
K ₂ O	0.30
Na ₂ O	0.18
CL	0.001
LOI	0.82
Propretés Physique	
Densité	3.10
SSB (cm ² /g)	3017
passant 45 µm (%)	13.61

2.3.4. L'eau de gâchage:[NAEN1008]

Nous avons utilisé pour le gâchage de notre béton l'eau de robinet disponible au niveau de l'université, d'où ces caractéristiques physico-chimiques sont les suivantes :

notre

Tableau 15 Analyse chimique de l'eau utilisée.

Paramètre	Quantité	Commentaire
pH	8.18	Acceptable pour le gâchage.
Conductivité	1250 $\mu\text{s}/\text{cm}$	
Taux de (Cl)	0.24 mg/l	0.05 à 0.50
Taux de (NO ₂)	0,15 mg/l	> à la concentration max (0.1)
Taux de (NO ₃)	1,8 mg/l	< à la concentration max (50)
Turbidité	1,44 NTU	
Dureté totale	6,72 °F	15-50
Résidu sec	100 mg/l	

L'analyse chimique de l'eau de gâchage a été réalisée au laboratoire de la chimie université d'Elbachir El Ibrahimy Bordj Bou Arreridj. Les résultats obtenus ont montré que l'eau testée est apte pour la confection du béton.

2.3.5. Adjuvant :

Les adjuvants sont des produits chimiques ajoutés aux mélanges de béton pour modifier leurs propriétés à l'état frais ou durci. Les principaux adjuvants utilisés dans les bétons à haute performance sont les réducteurs d'eau (plastifiants et superplastifiants) qui améliorent l'ouvrabilité et les agents entraîneurs d'air qui améliorent la résistance au gel-dégel [25,26]. D'autres adjuvants tels que les retardateurs ou accélérateurs de prise peuvent également être utilisés en fonction des besoins spécifiques.

L'adjuvant utilisé dans notre étude est un superplastifiant réducteur d'eau pour haute résistance mécanique MEDAFLOW 30 à base de polycarboxylate

Tableau 16 Caractéristiques de superplastifiant MEDAFLOW 30.

Characteristics	polycarboxylate based
Appearance	liquid

Colour	Yellowish
pH	6-6.5
Density	1.07+0.01
Chlorinecontent	< 1 g/l
Dry extract	30%

Chapitre 03

FORMULATION DU BETON

3.1. Introduction

3.2. Calcul de la composition du béton:

3.2.1. But :

Déterminer les proportions de ciment, d'eau, de granulats et sable éventuels devant entrer dans la composition d'un béton dont on exige certaines performances

3.2.2. Méthode de calcul de la composition du béton:

Le calcul de la composition du béton à pour le but de déterminer le dosage en ciment, granulats et en eau pour un dosage de 1 m³ de béton frais afin d'obtenir un mélange homogène et d'une capacité élevée, ainsi qu'une résistance mécanique voulue.

Il existe plusieurs méthodes de détermination de la composition du béton proposé et appliquées dans les différents pays du monde parmi ces méthodes on peut citer:

- ❖ Méthode de BOLOMEY
- ❖ Méthode d'ABRAMS
- ❖ Méthode de FAURY
- ❖ Méthode d'OISEL
- ❖ Méthode de VALETTE
- ❖ Méthode de DREUX GORISSE
- ❖ Méthode des VOLUMES ABSOLUS
- ❖ Méthode GENERALE DU CENTRE D'ESSAIS DES STRUCTURES

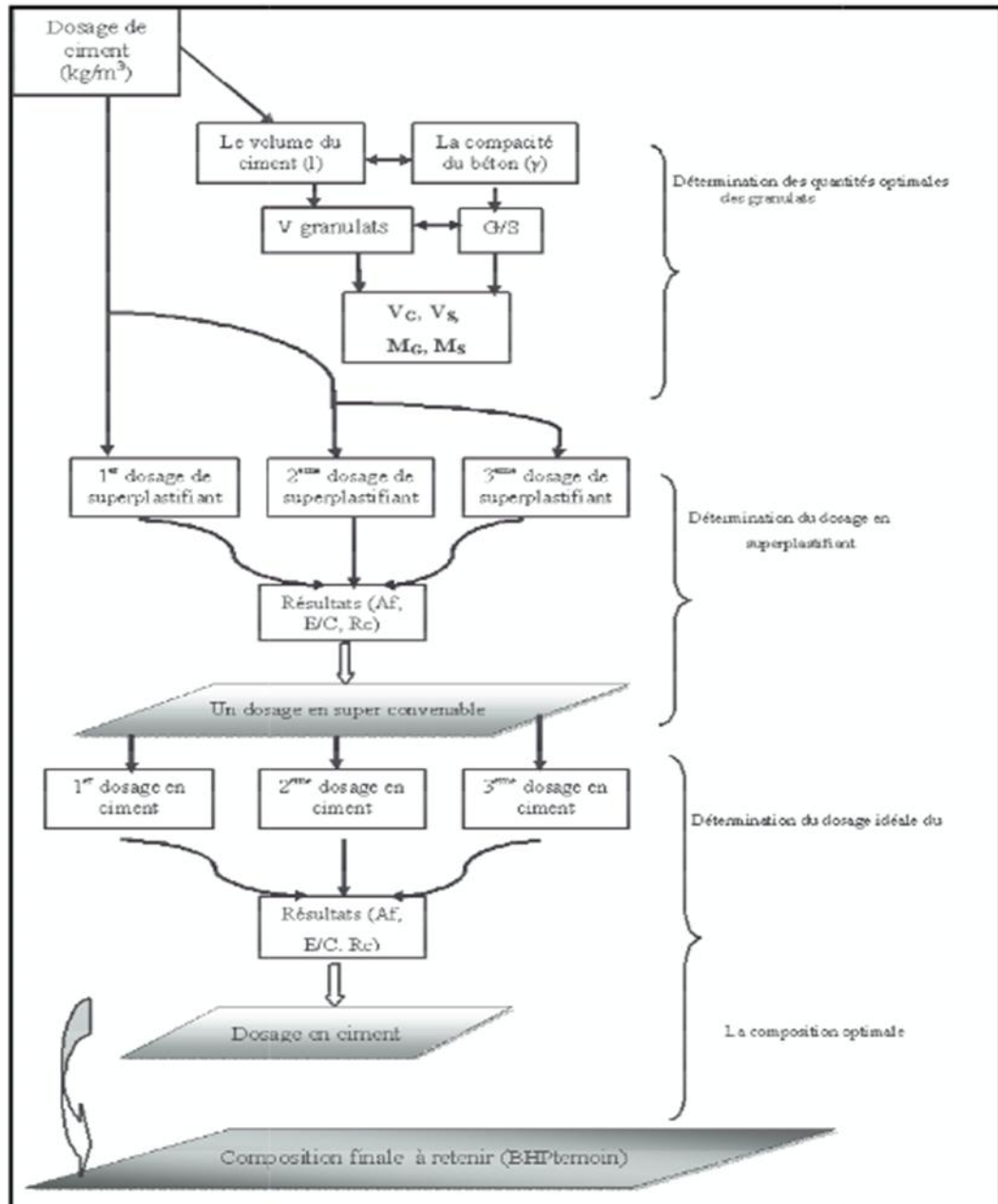


Figure 17 Schéma des étapes de formulation du béton

3.2.3. Formulation de Dreux- Gorisse

La méthode de formulation de Dreux-Gorisse permet de déterminer les quantités optimales de matériaux (eau E, ciment C, sable S, gravillon g et gravier G) nécessaires à la confection d’un mètre cube de béton conformément au cahier des charges.

Plusieurs étapes de calcul successives sont nécessaires à l’obtention de la formulation théorique de béton :

3.2.3.1. Détermination du rapport C/E

- Détermination de C et E
- Détermination du mélange optimal à minimum de vides
- Détermination de la compacité du béton
- Détermination des masses de granulats

3.2.3.2. Détermination du rapport C/E

Le rapport C / E est calculé grâce à la formule de Bolomey :

$$\sigma'_{28} = G' \sigma'_c (C/E - 0.5)$$

$$\sigma'_{28} = 1,15 \times f_{c28}$$

Avec :

σ'_{28} = Résistance moyenne en compression du béton à 28 jours en MPa

σ'_c = Classe vraie du ciment à 28 jours en MPa

C = Dosage en ciment en kg par m³ de béton

E = Dosage en eau total sur matériau sec en litre par m³ de béton

G' = Coefficient granulaire (Tab.4) fonction de la qualité et de la dimension maximale des granulats.

Qualité des granulats	Dimension D _{max} des granulats		
	Fins D _{max} < 12,5 mm	Moyens 20 < D _{max} < 31,5	Gros D _{max} > 50 mm
Excellente	0,55	0,60	0,65
Bonne, courante	0,45	0,50	0,55
Passable	0,35	0,40	0,45

Figure 18 Coefficient granulaire G' en fonction de la qualité et de la taille maximale des granulats Dmax.

3.2.3.3. Détermination de C :

En a C/E=2,9

Et Affaissement >16 cm

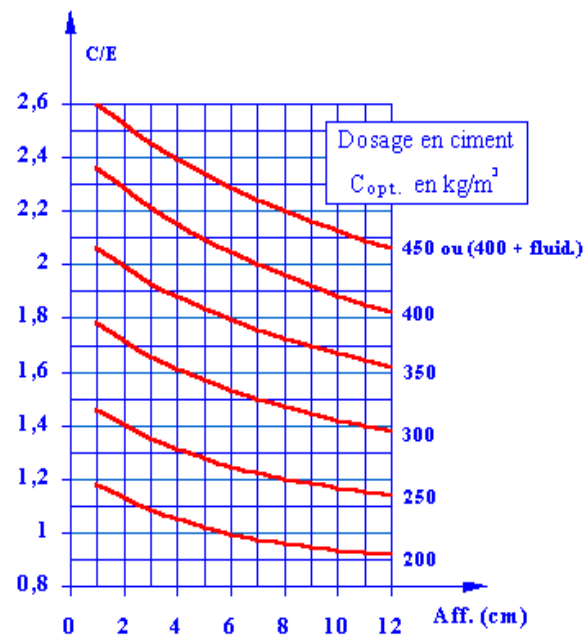


Figure 19 Abaque permettant la détermination de C_{opt.}

A base d abaque en a C=450 kg

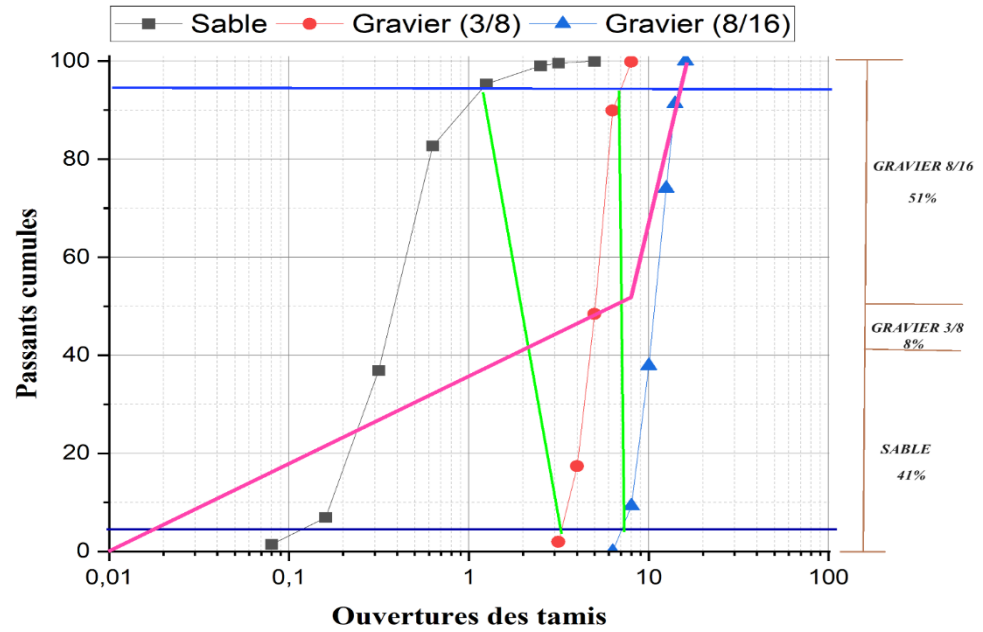


Figure 20 Détermination des pourcentages à l'aide de l'analyse granulométrique.

3.2.3.4. Détermination de la compacité du béton

$$C = 0.800 \text{ m}^3$$

$$C - V_c = 0.655 \text{ m}^3$$

3.2.3.5. Détermination des masses de granulats

$$V_s = 0.655 * 0.41 = 0.216 \text{ m}^3 \quad S = 698 \text{ KG} / \text{m}^3$$

$$V_g = 0.655 * 0.08 = 0.0459 \text{ m}^3 \quad g = 136 \text{ KG} / \text{m}^3$$

$$V_G = 0.655 * 0.51 = 0.393 \text{ m}^3 \quad G = 869 \text{ KG} / \text{m}^3$$

3.2.3.6. Obtention de la formulation théorique de béton

La formulation théorique de béton recherchée est définie par les quantités d'eau E, de sable S, de gravillon g et de gravier G. La masse totale d'un mètre cube de béton

$$\Delta = (E + C + S + g + G) = 155 + 450 + 698 + 136 + 869$$

3.2.3.7. Obtention la quantité de Superplastifiant

En a prendre 1% par rapport le ciment finalement la quantité est 4.5 kg/m^3

3.3. Le malaxage: [NAEN12390-2]

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

- Introduire gravier 8/16, ciment, sable 0/5 et gravier 3/8.
- Malaxer pendant 1 minute 30 secondes.
- Introduire la quantité d'eau.
- Malaxer pendant 3 minutes et ajouter l'eau tout attentivement.
- Mesurer l'affaissement à chaque fois par cône d'Abrams jusqu'à la valeur désirée et visé. [R. DAUPAIN, J.-C. Saint-Arroman, 2009]



Figure 21 malaxage béton avec les fibres PP

Chapitre 04

RESULTATS ET DISCUSSION

4.1. Introduction :

Cette section présente les résultats obtenus au cours de notre étude sur le développement d'un nouveau modèle pour la rhéologie des bétons. Nous y exposons les données expérimentales recueillies, les analyses effectuées, et les interprétations qui en découlent.

Notre travail s'est concentré sur l'étude de différentes compositions de béton, l'influence de divers paramètres sur le comportement rhéologique, la comparaison avec des modèles existants.

Les résultats seront présentés de manière structurée, en commençant par les observations initiales, suivies des analyses quantitatives, puis des comparaisons avec les modèles théoriques.

Dans la discussion qui suivra, nous examinerons la signification de ces résultats dans le contexte plus large de la rhéologie des bétons. Nous évaluerons également les forces et les limites de notre nouveau modèle, ainsi que ses implications potentielles pour la compréhension et la prédiction du comportement des bétons.

Cette section vise à fournir une analyse approfondie de nos découvertes, en mettant en lumière leur pertinence pour le domaine de la rhéologie des bétons et en ouvrant des perspectives pour de futures recherches.

4.2. Etude Des Comportements Des Bétons

4.2.1. Essai sur béton frais

4.2.1.1. Essai d'affaissement[NAEN12350-2]

Cet essai est effectué conformément aux prescriptions de la norme (NA EN 12350-2). C'est l'essai de mesure de consistance le plus employé et le plus connu universellement. Le moule utilisé pour réaliser cet essai est un cône tronqué de 30cm de hauteur. Placé sur une surface lisse, la petite ouverture vers le haut, le cône est rempli de béton en trois couches d'égal volume. Chacune des couches est compactée 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 en effectuant des mouvements de va 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 appelée l'affaissement.

La valeur de l'affaissement est exprimée en cm [R.DAUPAIN, J.-C.Saint.A, 2009].

Dans notre étude on a fixé l'affaissement à : Aff. entre 20 et 26 cm.

Tableau 17 et figure 22 représentent l'affaissement avec le temps des différences mélanges

Tableau 17 Résultats d'affaissement les deux mélanges

BT		BF	
Affaissement (cm)	Temps (min)	Affaissement (cm)	Temps (min)
26	0	22	0
25	30	20	30



Figure 22 Essai d'affaissement con d'Abrams

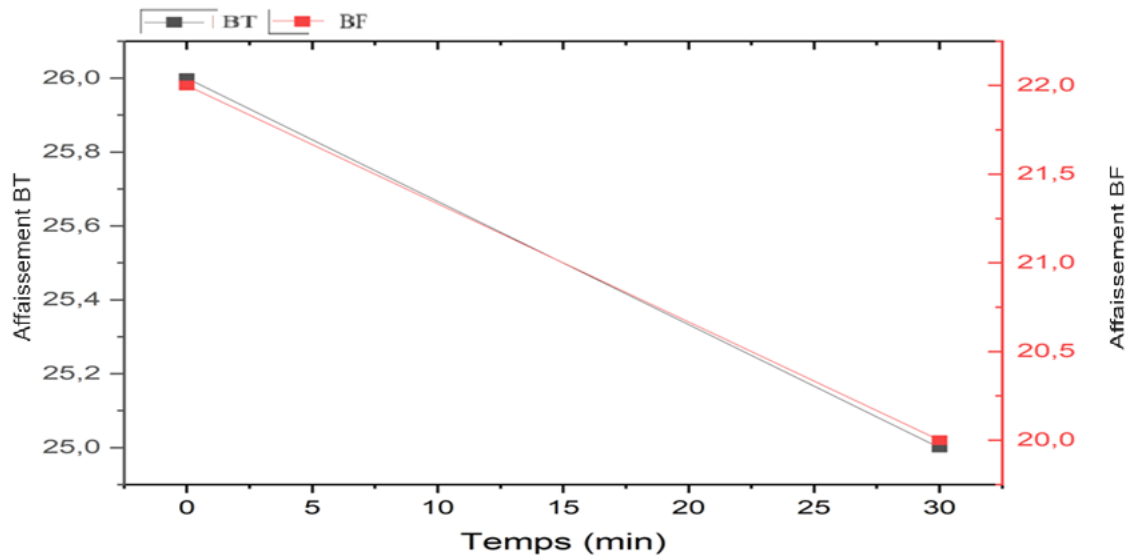


Figure 23 Affaissement les deux mélanges BT et BF.

A bas de figure 22 :

BT : L'affaissement diminue légèrement de 26 cm à 25 cm après 30 minutes.

BF : L'affaissement diminue de 22 cm à 20 cm après 30 minutes.

Observation : Les fibres réduisent l'affaissement initial et augmentent la perte d'affaissement dans le temps.

4.2.1.2. Masse volumique à l'état frais

Dans le tableau 18 et la figure 23 nous avons rassemblé les résultats des mesures de la masse volumique pour les 02 types du béton d'étude.

Tableau 18 Valeurs de la masse volumique pour les deux mélanges

Types de béton	BT	BF
Masse volumiques kg/m ³	2393	2355

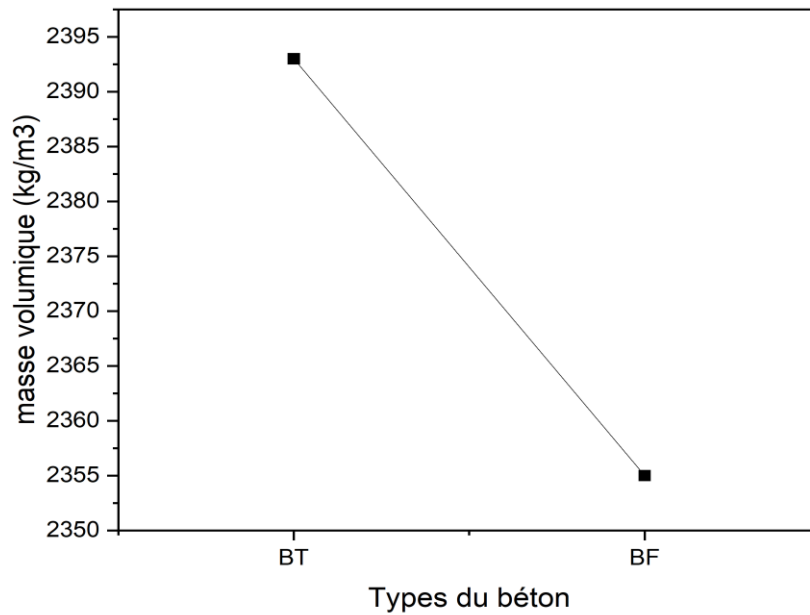


Figure 24 Valeurs de la masse volumique.

La masse volumique à l'état frais des bétons diminue avec le renforcement du béton par les fibres polypropylènes

4.2.2. A l'état durci

4.2.2.1. Caractéristiques mécaniques

a. Résistance à la compression (essai d'écrasement)

La résistance à long terme est considérée comme la qualité essentielle, pour ne pas dire la seule, à rechercher pour un béton

Ladéterminationdecetterésistanceestnécessairepourcontrôlercette qualitéessentielle denotredubéton.

- **Lapressehydraulique:[NAEN12390-3]**

Lapresse utilisée répond aux normes NAEN12390-3, elle comporte deux parties: Unité de commande constituée de:

- Uncadrant pour valeur maximale de charge;
- Interrupteur principal;
- Commande de réglage de la vitesse ;
- Clapet de charge-décharge.

Unité de pression: où on met l'éprouvette d'essai.



Figure 25 Presse hydraulique utilisée.

- **Essai d'écrasement [NAEN12390-3]:**

L'essai consiste à rompre entre les plateaux d'une presse hydraulique de capacité 3000 KN, à une vitesse constante (10 KN/s) des éprouvettes cylindriques de dimensions (10x10x10) cm. Celles-ci doivent être bien centrées entre les plateaux afin d'éviter l'apparition des moments dus à l'excentricité de la charge de compression.

On calcule la résistance à la compression par la relation

$$R_c = F/S$$

R_c : résistance à la compression (MPa).

F: la charge de rupture (N).

S: section de l'éprouvette (mm^2).



Figure 26 Les Epreuves après 24h de coulage



Figure 27 Epreuve au cours d'écrasement.

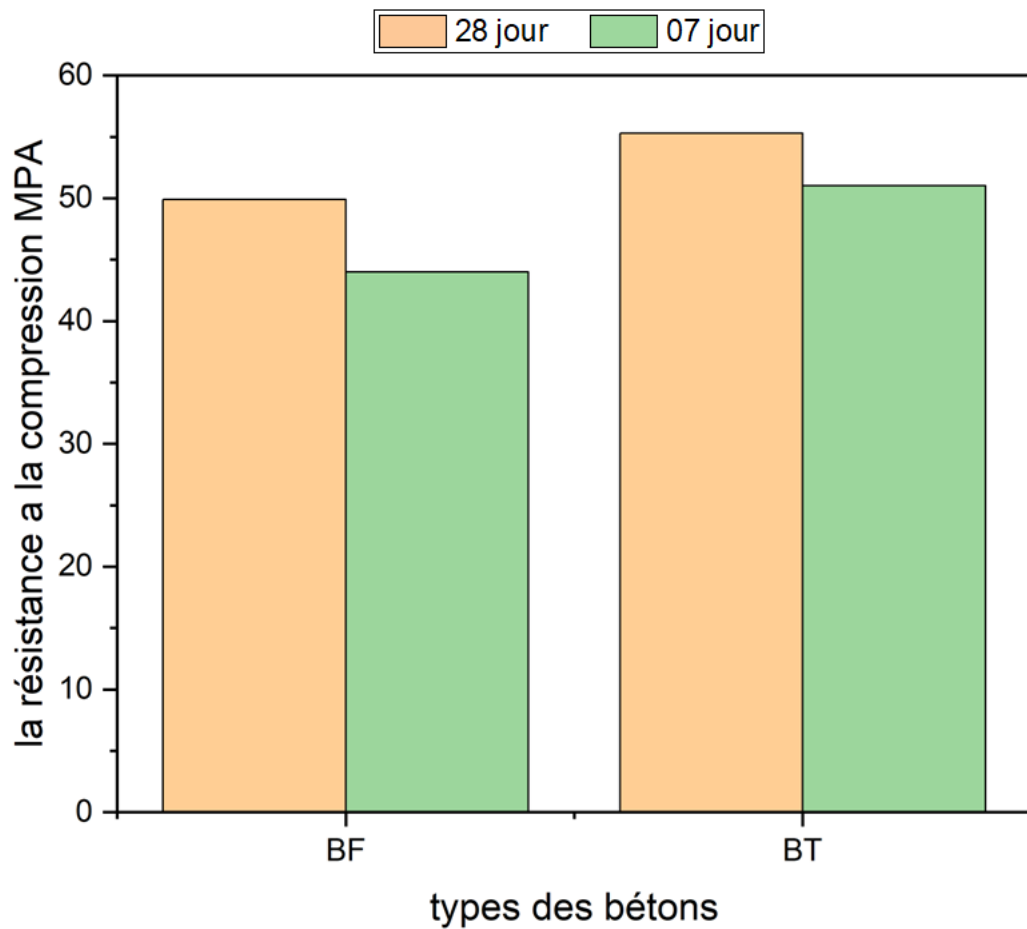


Figure 28 Variation de la résistance à la compression en fonction du temps pour deux mélanges.

Tableau 19 Valeurs de Résistance à la compression.

	28 jours	07 jours
BF	49,9	44
BT	55,3	51

À 28 jours, le béton témoin (BT) présente une résistance à la compression supérieure (55,3 MPa) à celle du béton fibré (49,9 MPa).

À 7 jours, on observe la même tendance : le BT (51 MPa) est plus résistant que le BF (44 MPa).

- **Évolution de la résistance dans le temps :**

Le BT passe de 51 MPa à 7 jours à 55,3 MPa à 28 jours, soit une augmentation de 8,4%.

Le BF passe de 44 MPa à 7 jours à 49,9 MPa à 28 jours, soit une augmentation de 13,4%.

- **Impact des fibres de polypropylène :**

Les fibres semblent réduire la résistance à la compression du béton.

Cependant, le béton fibré montre une progression plus importante de sa résistance entre 7 et 28 jours.

Ces résultats suggèrent que l'ajout de fibres de polypropylène diminue la résistance à la compression du béton, mais pourrait améliorer d'autres propriétés non mesurées ici, comme la résistance à la fissuration ou la ductilité.

b. Résistance à la traction par flexion

Tableau 20 Résistance à la traction par flexion

	28 jours	07 jours
BF	7.3	5.4
BT	6.4	4.8

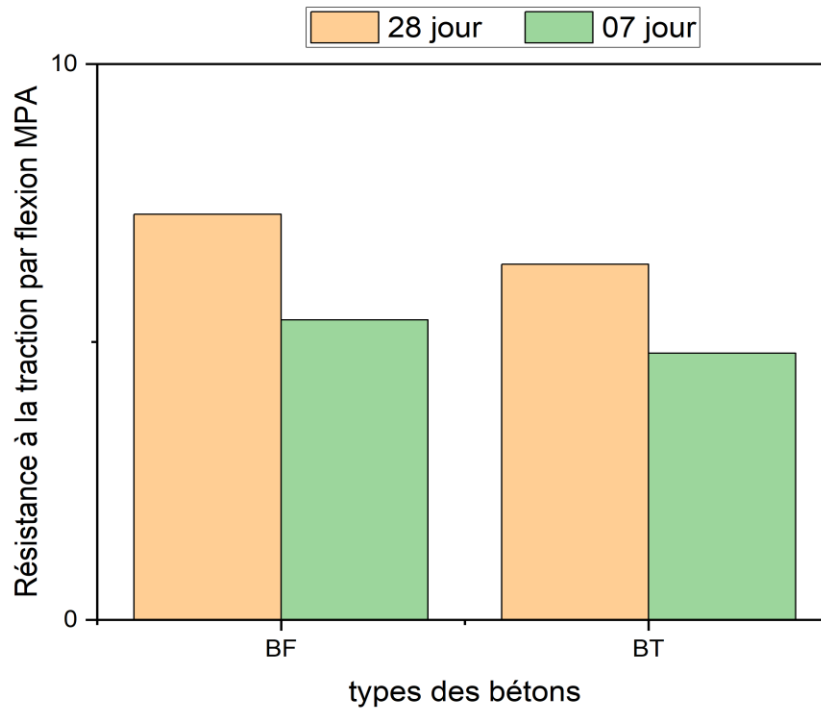


Figure 29 Résistance à la traction par flexion

Selon la figure 28 et Tableau 20 :

- **Résistance à la traction par flexion :**

- À 28 jours, le béton fibré (BF) présente une résistance à la traction supérieure (7,3 MPa) à celle du béton témoin (6,4 MPa).
- À 7 jours, on observe la même tendance : le BF (5,4 MPa) est plus résistant que le BT (4,8 MPa).

• Évolution de la résistance à la traction dans le temps :

- Le BF passe de 5,4 MPa à 7 jours à 7,3 MPa à 28 jours, soit une augmentation de 35,2%.
- Le BT passe de 4,8 MPa à 7 jours à 6,4 MPa à 28 jours, soit une augmentation de 33,3%.

- **Impact des fibres de polypropylène sur la traction :**

- Les fibres améliorent significativement la résistance à la traction du béton.
- Le béton fibré montre une progression légèrement plus importante de sa résistance à la traction entre 7 et 28 jours.

- **Comparaison avec les résultats de compression :**
- **Effet opposé des fibres :**
 - ✓ En compression, les fibres réduisaient la résistance du béton.
 - ✓ En traction, les fibres augmentent la résistance du béton.
- **Progression dans le temps :**

L'augmentation de la résistance à la traction entre 7 et 28 jours est plus prononcée que celle de la résistance à la compression pour les deux types de béton.

4.3. Résultats des essais rhéologiques (rhéomètre) :

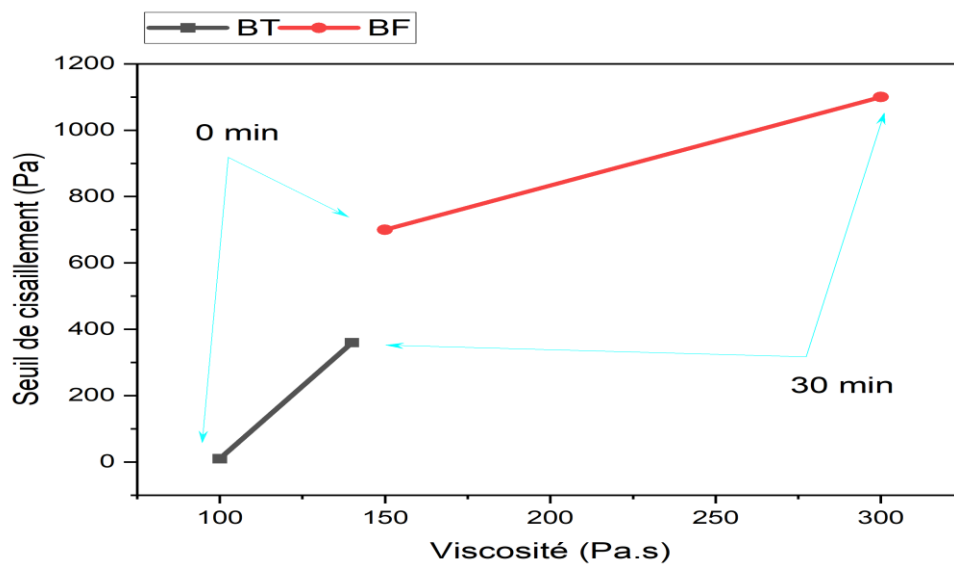


Figure 30 couple viscosité et le seuil de cisaillement pour BT et BF

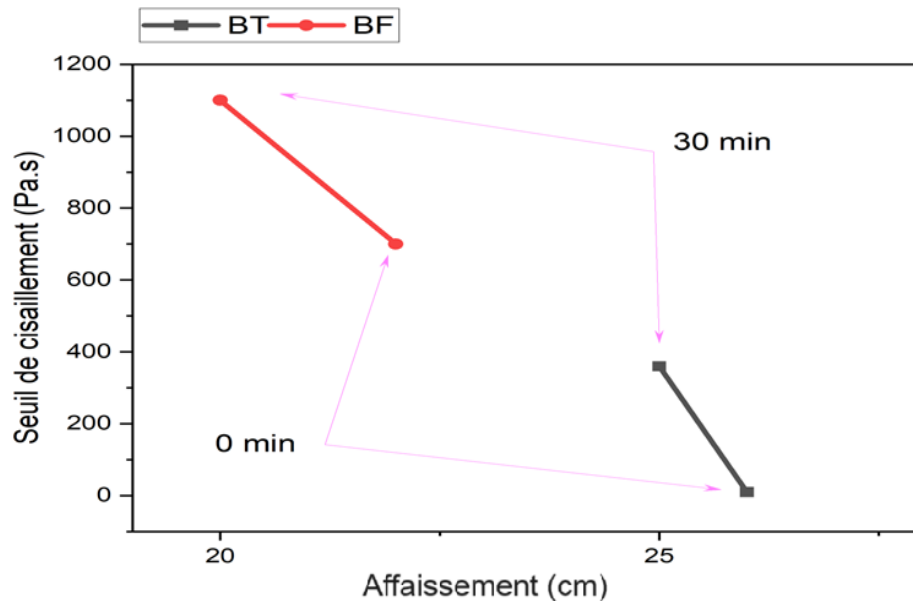


Figure 31 Seuil de cisaillement par rapport l'affaissement avec le temps

A base des figures 21,22, et 23 :

Commence par comparer les propriétés du béton témoin (BT) sans fibres et du béton fibré (BF) avec fibres polypropylène :

4.4. Viscosité et seuil de cisaillement :

BT : La viscosité augmente de 100 Pa.s à 140 Pa.s après 30 minutes, tandis que le seuil de cisaillement passe de 10 Pa à 360 Pa.

BF : La viscosité augmente de 150 Pa.s à 300 Pa.s, et le seuil de cisaillement passe de 700 Pa à 1100 Pa.

Observation : Les fibres augmentent considérablement la viscosité et le seuil de cisaillement du béton, tant à 0 min qu'à 30 min.

Affaissement :

BT : L'affaissement diminue légèrement de 26 cm à 25 cm après 30 minutes.

BF : L'affaissement diminue de 22 cm à 20 cm après 30 minutes.

Observation : Les fibres réduisent l'affaissement initial et augmentent la perte d'affaissement dans le temps.

4.5. Interprétation des résultats :

4.5.1. Effet sur la viscosité :

Les fibres augmentent significativement la viscosité du béton. Cela peut s'expliquer par l'interaction entre les fibres et la matrice cimentaire, créant un réseau tridimensionnel qui résiste à l'écoulement.

Impact sur le seuil de cisaillement : Les fibres augmentent considérablement le seuil de cisaillement, ce qui indique une plus grande résistance à l'initiation de l'écoulement. Cela peut être attribué à la friction interne accrue due aux fibres.

Influence sur l'affaissement : Les fibres réduisent l'affaissement, ce qui est cohérent avec l'augmentation de la viscosité et du seuil de cisaillement. Cela suggère une diminution de la maniabilité du béton fibré.

Évolution dans le temps : Les deux types de béton montrent une augmentation de la viscosité et du seuil de cisaillement avec le temps, mais l'effet est plus prononcé pour le béton fibré. Cela pourrait être dû à l'hydratation progressive du ciment et à l'interaction croissante entre les fibres et la matrice.

4.5.2. Conclusions sur le rôle des fibres :

Les fibres polypropylène modifient significativement les propriétés rhéologiques du béton.

Elles augmentent la cohésion interne du mélange, ce qui se traduit par une viscosité et un seuil de cisaillement plus élevés.

La maniabilité du béton est réduite par l'ajout de fibres, comme le montre la diminution de l'affaissement.

Les fibres accentuent les changements rhéologiques du béton au fil du temps, ce qui pourrait avoir des implications pour la mise en place et le finissage du béton.

Ces observations soulignent l'importance de prendre en compte l'effet des fibres lors de la conception et de l'utilisation de bétons fibrés, en particulier pour les applications où les propriétés rhéologiques sont cruciales.

4.6. Comparaison notre module avec les autres modules

Examinons quelques modèles classiques et comparons-les aux données que vous avez présentées :

4.6.1. Modèle de Bingham (1922) :

C'est l'un des modèles les plus simples et les plus utilisés pour décrire le comportement rhéologique du béton frais. Il est défini par deux paramètres : le seuil de cisaillement (τ_0) et la viscosité plastique (μ).

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

où τ est la contrainte de cisaillement et $\dot{\gamma}$ est le taux de cisaillement.

4.6.1.1. Comparaison :

Les résultats obtenus montrent effectivement un seuil de cisaillement et une viscosité, ce qui correspond au modèle de Bingham. Cependant, le modèle de Bingham ne prend pas en compte l'évolution temporelle, ni les différences entre le béton fibré et non fibré.

4.6.2. Modèle d'Herschel-Bulkley (1926) :

Ce modèle est une extension du modèle de Bingham qui prend en compte le comportement non linéaire de certains bétons.

$$\tau = \tau_0 + K\dot{\gamma}^n$$

où K est l'indice de consistance et n est l'indice d'écoulement.

4.6.2.1. Comparaison :

Ce modèle pourrait mieux décrire le comportement non linéaire potentiel du béton fibré, mais il ne tient toujours pas compte de l'évolution temporelle.

4.6.3. Modèle de Quemada (1998) :

Ce modèle prend en compte la concentration en particules et est souvent utilisé pour les suspensions concentrées comme le béton.

$$\eta = \eta_\infty(1 - \phi/\phi_m)^{-2}$$

où η est la viscosité apparente, η_∞ est la viscosité du fluide porteur, ϕ est la fraction volumique de particules, et ϕ_m est la fraction volumique maximale.

4.6.3.1. Comparaison :

Ce modèle pourrait aider à expliquer les différences entre le béton fibré et non fibré en tenant compte de la concentration en fibres, mais il ne traite pas directement de l'évolution temporelle.

4.6.4. Modèle thixotropique de Roussel (2006) :

Ce modèle prend en compte l'évolution temporelle du seuil de cisaillement due à la thixotropie.

$$\tau_0(t) = \tau_0 + A_{thix} * t$$

où $\tau_0(t)$ est le seuil de cisaillement au temps t , et A_{thix} est le taux de restructuration thixotropique.

4.6.4.1. Comparaison :

Ce modèle correspond bien à l'évolution temporelle dans le seuil de cisaillement, mais ne traite pas explicitement de la viscosité.

4.7. Conclusion pour notre module

Le modèle semble combiner plusieurs aspects de ces modèles antérieurs :

- Il prend en compte à la fois le seuil de cisaillement et la viscosité (comme Bingham).
- Il considère l'évolution temporelle (comme le modèle de Roussel).
- Il différencie le comportement des bétons fibrés et non fibrés (ce qui pourrait être lié à des modèles tenant compte de la concentration en particules comme celui de Quemada).
- L'originalité de notre approche pourrait résider dans :
 - La prise en compte simultanée de l'évolution temporelle du seuil de cisaillement et de la viscosité.
 - L'intégration explicite de l'effet des fibres sur ces paramètres.
 - La corrélation établie entre ces paramètres rhéologiques et l'affaissement, qui est une mesure pratique sur laboratoire.
- Pour renforcer notre modèle, nous pourrions envisager :
 - D'établir des équations mathématiques décrivant l'évolution temporelle des paramètres.
 - D'intégrer un facteur lié à la concentration en fibres.
 - De proposer une relation mathématique entre les paramètres rhéologiques et l'affaissement.

CONCLUSIONS GENERALES ET PERSPECTIVES

Cette étude apporte une contribution significative à la compréhension de la rhéologie des bétons, en particulier dans le contexte des bétons fibrés. Les principales conclusions sont les suivantes :

- 1. L'ajout de fibres de polypropylène modifie substantiellement les propriétés rhéologiques du béton, augmentant sa viscosité et son seuil de cisaillement. Cela peut être attribué à l'enchevêtrement des fibres dans la matrice cimentaire, créant un réseau tridimensionnel qui résiste à l'écoulement.
- 2. L'évolution temporelle des propriétés rhéologiques, observée dans les deux types de béton, souligne l'importance de considérer le facteur temps dans les modèles rhéologiques. Cette évolution est probablement liée au début du processus d'hydratation du ciment et à la structuration progressive de la pâte.
- 3. Soulignion inverse entre le seuil de cisaillement et l'affaissement confirme les théories existantes et souligne l'importance de ces paramètres rhéologiques pour prédire le comportement pratique du béton sur chantier.
- 4. Bien que les propriétés rhéologiques du béton fibré diffèrent significativement de celles du béton témoin, l'affaissement reste relativement proche. Cela suggère que le béton fibré pourrait être utilisé dans des applications similaires à celles du béton standard, tout en bénéficiant des avantages mécaniques apportés par les fibres.

Cette étude ouvre la voie à un nouveau modèle rhéologique qui pourrait intégrer simultanément l'évolution temporelle du seuil de cisaillement et de la viscosité, ainsi que l'effet des fibres sur ces paramètres. Ce modèle pourrait avoir des implications importantes pour la formulation et l'utilisation des bétons fibrés dans l'industrie de la construction.

Des recherches futures pourraient se concentrer sur la formulation mathématique de ce modèle, l'étude de l'impact de différentes concentrations de fibres, et l'exploration d'autres paramètres rhéologiques comme la thixotropie. De plus, l'extension de cette étude à différentes températures et conditions environnementales pourrait améliorer encore notre compréhension de la rhéologie des bétons fibrés dans diverses situations pratiques

Références Bibliographiques

- [1] Ajdukiewicz A, Kliszczewicz Alina «Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/I-WC. Cement Concrete Composites » 2002; 24:269-79.
- [2]
- [3] Alain BRETTE : fascicule de cours réalisé par pour les classes de techniciens supérieurs travaux publique, 2007. LIEU.
- [4] ANDRIAMANANTSILVO.N.R: «comportement des matériaux cimentaires dans un coffrage : expérimentation, modélisation et simulation de la poussée et du processus de maturation », Thèse de doctorat, 2003 à l'Université de Bretagne sud.
- [5] AYADI.B et HAMMACHE.Y: « Effet des fillers de calcaire sur le retrait d'un béton à base d'agrégats recyclés adjuvanté », mémoire Master 2, 2012, Département de génie civil, Université de Bordj Bou Arreridj, Algérie.
- [6] BACARA PROJET FRANÇAIS: « le béton compacté au rouleau », 1996, Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, France.
- [7] BARON ET SAUTEREY .R : Le béton hydraulique Connaissances et Pratique, Presses de l'école des ponts et chaussées, sous la direction de Jacques Baron et Raymond Sauterey, 1982.
- [8] BELAGRAA. L: cours matériau de construction, à l'Université El Bachir Ibrahim, 3ème année, département de génie civil, 2011.
- [9] BERNIER.G: Formulation des bétons, Techniques de l'Ingénieur, traité Construction Doc C 2 210, 2005.
- [10] BOUTIBA.A : « Accélération du durcissement par énergies renouvelables du béton frais et caractérisation du béton durci », Thèse de Magister, sino dato à l'Université de M'Hamed Bougrra Boumerdes.
- [11] CASTEILLA-25, rue Monge-75005 PARIS, 4eme édition actualisée, page : 31.
- [12] CHANVILLARD.G: connaissances générale sur le matériau béton, Ed. Aléas, 1999.
- [13] CIM BETON: construire avec les bétons, Ed du Moniteur, 2000.
- [14] CORMON.P: Béton légers d'aujourd'hui, Ed. Eyrolles, 1973, Paris.
- [15] Crentsil Sagoe KK, Brown T, Taylor AH «Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate». Cem Concr Res 2001; 31:707- 12.
- [16] CYRILE GUERANDEL : « Etude de la qualité du piégeage des matières organiques par la matrice cimentaire vis-à-vis de lixiviation », Thèse de doctorat, 2009 à l'Université Paul Verlaine- METZ, 2009.
- [17] De Brito J. et Alves F. « Concrete with recycled aggregates», 2010 the Portuguese experimental research. RILEM.
- [18] De Juan M.S. and Gutiérrez P.A. «Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate» 2009, Construction and Building Materials, 23 (2), pp. 872-877.
- [19] DEGHEFEL MOUSSA, 2010 : « Application de l'essai de dureté pour la caractérisation du béton

- », Mémoire de Magistère, Université de M'SILA.
- [20] Douara T.H., « Caractérisation physiques et chimiques des granulats recyclés et granulats naturels ». 2009.
- [21] DR. IR. P.BOERAEVE : « Technologie du béton », Edition 1994, Groupement Belge du Béton.
- [22] DREUX.G ET FESTA.J: « Nouveaux guide du béton et de ces constituants », Ed. Eyrolles, 1998.
- [23] Evangelista L., De Brito J: «Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates, Cement and Concrete Composites» 2010, 32, 9-14.
- [24] MATINE, Fiche technique de ciment, 2013, Hammam El Dalaa.
- [25] GRANITEX, Fiche technique, 2013 Zone industrielle Oued Smar 16270 Alger.
- [26] [25]G. Maucuit-Lecomte, CIMBÉTON : Fiches techniques Tome 2 : « Les bétons, composition, fabrication et mise en œuvre »,2005.
- [27] Gérard BERNIER, sino dato : « Formulation des bétons », sino dato maître de conférences à l'école nationale supérieure de Cachan, C 2 210.
- [28] Gilpin Robinson Jr R, Menzie DW, Hyun H. « Recycling of construction debris as aggregate in the Mid-Atlantic Region», USA. Resour Conserv Recycl 2004; 42(3):275-94.
- [29] Gómez-Soberon J.M.V. « Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate: An experimental study, Cement and concrete research», 32 (8), pp. 1301- 1311, 2002.
- [30] GRONDIN Aurélie « valorisation des granulats recyclés de béton : Etude des caractéristiques physiques et mécaniques des Bétons de granulats recyclés de béton » Mémoire Projet de fin d'étude, 2011 à Institut National des Sciences Appliquées de Strasbourg : INSA Strasbourg.
- [31] HAMMOUCHE.Y et LAALAOUI.A, « Etude du comportement d'un béton en fibres Polypropylène aux moyens des essais non destructifs » mémoire Master 2, 2012, Département de génie civil, Université de Bordj Bou Arreridj, Algérie.
- [32] [31]J.-P. Lott, et al, 2005 CHAPITRE 2 : La norme béton NF EN 206-1.
- [33] [32]J.-P. Lott, et al, 2005 CIMBÉTON : centre d'information sur le ciment et ses applications « Ciment et béton » conception et réalisation– Edition 2005, Amprincipe Paris.
- [34] Jean Michel TORRENTI: « Du béton frais au béton durci », sino dato, Eléments de comportement par Directeur scientifique de l'Ecole française du béton (EFB).
- [35] Katz A., «Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete, Cement and concrete research», 33 (5), pp. 703-711, 2003.
- [36] Khalaf FM, DeVenny AlanS. « Recycling of demolished masonry rubble as coarse aggregate in Concrete: review». ASCE J Mater Civil Eng 2004:331-40.
- [37] LALAMI Sallah Eddine « l'effet des différents modes de cure sur la réponse mécanique d'un béton à base des agrégats recyclés », Projet de fin d'étude de Master 2, 2012 à l'Université Mohamed Elbachir Elibrahimi.
- [38] Levy Salomon M, Paulo Helene « Durability of recycled aggregates concrete: a safe way to sustainable development». Cem Concr Res 2004; 34(11):175-80.
- [39] MAAREF.H et MAHBOUS.R 2007 :« L'effet des modes de cure sur la réponse mécanique d'un béton à base d'agrégats recyclés », PFE Ingéniorat, 2006, département de génie civil, université

de M'sila, 2006, Algérie

- [40] MESSOUDENE. B : Cours « durabilité du béton », 2013 à l'Université El Bachir Ibrahim.
- [41] NETTAH ZOHIR ET MESSADI DJAMEL, « l'effet de fillers de marbre sur la réponse mécanique d'un béton à base d'agrégats recyclé », PFE Ingénierat, 2006, département de génie civil, université de M'sila, Algérie.
- [42] Oikonomou N.D. «Recycled concrete aggregates, Cement and Concrete Composites» 27 (2), pp. 315-318, 2005.
- [43] Otsuki N, Miyazato S, Yodsudjai W. « Influence of recycled aggregate on interfacial transition zone, strength, chloride penetration and carbonation of concrete». ASCE J Mater Civil Eng 2003.
- [44] Padmini A.K., Ramamurthy K. and Mathews M.S., «Influence of parent concrete on the properties of recycled aggregate concrete», Construction and Building Materials, 23 (2), pp. 829-836, 2009.
- [45] Québaud M., «Caractérisation des granulats recyclés-Etude de la composition et du comportement de béton incluant ces granulats », Thèse de doctorat, Université d'Artois, France, décembre 1996.
- [46] [45]R.DAUPAIN, J.-C. Saint-Arroman « Granulats, sols, ciments et bétons », édition, 2009.
- [46]Rao A., «Experimental Investigation on Use of Recycled Aggregates in Mortar and Concrete». Thesis submitted to the Department of Civil Engineering, Indian Institute of Technology Kanpur; 2005.
- [47] Rasheeduzzafar, Khan A. «Recycled concrete – a source of new aggregate. Cement, Concrete and Agréégates» (ASTM), 6, No 1, pp. 17-27, 1984.
- [48] RICHARD ET CHEYREZY.M : « Les bétons de poudres réactives », Annales ITBTP. Série béton 320, 1995.
- [49] Saïd BENCHERAI: « Étude des techniques de renforcement des structures en béton arme contreventées par portiques auto stables » Mémoire de fin d'étude, 2007, Université Abd Errahmane MIRA de Bejaia.
- [50] Topcu Bekir Ilker, Guncan Fuat Nedim. «Using waste concrete as aggregate». Cem Concr Res 1995; 25(7):1385-90. Topcu BI, Sengel S. Properties of concretes produced with was