



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE AMAR TELIDJI- LAGHOUAT

**FACULTE DE GENIE CIVIL ET D'ARCHITECTURE
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL**

MEMOIRE DE MASTER

Présenté par : **BENGHIA KAOUTHAR IKRAM**

Domaine Sciences et Technologies

Filière Génie Civil

Option : Matériaux en Génie Civil

THEME

***ETUDE RHEOLOGIQUE DE ECO-BETON A BASE DE DECHETS
DE DEMOLITION COMME AJOUT CIMENTAIRE***

Jurys de soutenance

Nom et Prénom	Grade	Qualité
Mr. BENABED Benchâa	Professeur	Président
Mr. GOUAL Idriss	Professeur	Examinateur
Mr. SOUALHI Hamza	Maîtres de conférences « A »	Rapporteur
Mr. BELAIDI Akram Salah Eddine	Professeur	Co-Rapporteur

Promotion : Juin – 2022

Remerciements

Tout d'abord, je tiens à remercier sincèrement mes encadrants : Professeur Akram Salah Eddine Belaidi et Docteur Hamza Soualhi pour m'avoir donné la chance de réaliser ce projet d'étude, merci de m'avoir soutenu encourager, merci pour leur entière disponibilité, leurs conseils et leurs directives pertinentes tout au long de cette étude.

J'exprime ma profonde gratitude à mes professeurs pour leur aide leur disponibilité, leurs conseils et leur immense apport scientifiques et pour la confiance qu'ils m'ont accordée je les remercie pour leur qualités humaines et pédagogiques de leur encadrement exceptionnel de leur admirable attention tout au long de cette étude. Leur aide appréciable et leur précieux conseils durant mon parcours scientifique dans le domaine de la construction.

J'adresse mes sincères remerciements à Monsieur Ferhat Ahmida, pour son aide ces conseils pertinents, sa générosité et sa gentillesse.

Je remercie notamment le professeur Benabed Betchaa, d'avoir accepté de présider ma soutenance et le professeur Goual Idriss, pour avoir accepté d'examiner mon travail.

Je voudrais exprimer ma gratitude et mes reconnaissances à Monsieur Tayeb Bouziani, et Monsieur Mohamed Sekkoum pour leur aide d'avoir facilité les démarches de mes études.

Un merci du cœur pour docteur Dada El hadja, qui m'a beaucoup aidé et facilité mon travail pour la réalisation de mes essais au laboratoire merci infiniment pour ta générosité et tes précieux conseils.

Je tiens à remercier mes copines, mes collègues, les doctorants au laboratoire pour leurs gentilles, leurs aides, le travail d'équipes que nous avons passé ensemble.

Pour terminer je remercie ma famille, mes parents, mes frères et mes sœurs, pour leurs soutiens, leurs sacrifices et leurs amours inconditionnels. Je remercie mon oncle qui m'a toujours soutenu encourager jusqu'au bout sa disponibilité ses conseils pour le bien et le meilleur de mon parcours scientifique mille merci mon cher oncle.

Table des matières

<i>Remerciements</i>	1
<i>الملخص</i>	7
<i>Résumé</i>	8
<i>Abstract</i>	9
<i>Introduction générale</i>	10
<i>Chapitre 1 . Les bétons bas carbonés</i>	12
1.1 Introduction	12
1.2 Béton bas carbone	12
1.3 Béton a base des additions minérales	14
1.3.1 Les différents types d'addition	15
1.3.2 Effets des additions minérales sur la rhéologie des matériaux cimentaires.....	19
1.4 L'utilisation des déchets de démolitions comme ajout cimentaire	21
1.4.1 La brique en terre cuite	21
1.4.2 Valorisation des briques	22
1.4.3 Conséquences sur les propriétés à l'état frais	23
1.4.4 Réaction pouzzolanique.....	24
1.5 L'effets de substitution des poudres de brique sur le béton et mortier	26
<i>Chapitre 2 . Rhéologie des matériaux cimentaire</i>	30
2.1 Introduction	30
2.2 Paramètres rhéologiques	30
2.2.1 Viscosité.....	30
2.2.2 Seuil de cisaillement	32
2.2.3 Contrainte de cisaillement.....	32
2.3 Différents comportements rhéologiques des fluides	33
2.3.1 Fluides newtoniens	33
2.3.2 Les fluides non-newtoniens	34
2.3.3 La Thixotropie	35
2.3.4 La Dilatance.....	36
2.4 Essais de rhéologie existants	36
2.4.1 Le cône d'Abrams.....	37
2.4.2 Le maniabilimètre L.C.P.C	38
2.5 Les différents types des rhéomètres	38
2.5.1 Les rhéomètres de type Couette	39
2.5.2 Les rhéomètres rotatifs à plateau-plateau	39
2.5.3 Les rhéomètres de type Poiseuille.....	40
2.6 Les rhéomètres à béton adaptés	41

2.6.1	Le rhéomètre Estelle et al	41
2.6.2	Le rhéomètre Soualhi et al.....	43
Chapitre 3 . Matériaux et méthodes expérimentales.....		45
3.1	Introduction.....	45
3.1	Matériaux utilisés	45
3.1.1	Ciment.....	45
3.1.2	Additions minérales	46
3.1.3	Superplastifiants	48
3.1.4	Sable.....	49
3.1.5	Eau de gâchage	52
3.2	Méthode expérimentale.....	52
3.2.1	Principe de la méthode de mortier de béton équivalent (MBE).....	52
3.2.2	Formulation de mortier de béton équivalent (MBE)	53
3.2.3	Plan expérimental	55
3.3	Préparation des mortiers.....	55
3.3.1	Malaxage.....	55
3.4	Caractérisation des MBE.....	56
3.4.1	Essai au mini cône	56
3.4.2	Essai au Maniabilimètre (LCPC) Type B.....	56
3.4.3	Essai au rhéomètre	57
3.4.4	Profil de vitesse imposée	58
3.4.5	Essai de résistance à la compression	58
Chapitre 4 . Résultats et discussion		60
4.1	Introduction.....	60
4.1.1	Etude rhéologique de mortier MBE à base de poudre de déchets de brique	60
4.1.2	Paramètres rhéologiques.....	63
4.1.3	L'affaissement au mini cône	65
4.1.4	Essai temps d'écoulement	66
4.2	Corrélation entre le seuil de cisaillement et l'affaissement	67
4.2.1	Déchets de brique de démolition	67
4.2.2	Déchets de la brique pure.....	68
4.3	Corrélation entre la viscosité et le seuil de cisaillement.....	70
4.3.1	Déchets de brique de démolition recyclé	70
4.3.2	Déchets de brique pure	71
4.4	Caractérisation à l'état durci.....	72
4.4.1	Effet de déchets de brique de démolition	72
4.4.2	Effet de déchets de la brique pure.....	75
Conclusion Générale.....		77
Recommandations et perspectives.....		78
Annexes.....		79
Références bibliographiques.....		85

Liste des Figures

Figure 1.1. (a) Corrélation entre le facteur clinker et les émissions de CO ₂ du ciment, projection a été estimée par régression linéaire. (b) Corrélation entre le facteur clinker et l'intensité carbone du béton [7], [8].	13
Figure 1.2. Émissions de CO ₂ par tonne de ciment pour différents ciments et quantités minimales et maximales de Clinker [6].	14
Figure 1.3. Des agrégats de brique sur l'affaissement [31].	24
Figure 1.4. Utilisation des fines de brique à différents taux de substitution et résistance en compression [38].	26
Figure 1.5. Essai d'étalement avec augmentation des taux de substitution en fines de brique [23].	27
Figure 1.6. L'influence la teneur en poudre de déchets de briques sur la résistance à la compression du MAP [39].	28
Figure 1.7. Evaluation de la viscosité des différents types de béton [40].	29
Figure 2.1. Les comportements rhéologiques des fluides.	33
Figure 2.2. Phénomènes thixotropes et antithixotropes.	35
Figure 2.3. Représentation schématique des réponses des matériaux thixotropiques et anti-thixotropiques [46].	36
Figure 2.4. Essai au cône d'Abrams [47].	37
Figure 2.5. Le maniabilimetre LCPC-Type B pour les mortiers [41].	38
Figure 2.6. Représentation schématique du principe de fonctionnement des rhéomètres rotatifs à plateau – plateau [48].	40
Figure 2.7. Représentation schématique du principe de fonctionnement des rhéomètres de type Poiseuille [48].	40
Figure 2.8. Schéma de principe du dispositif expérimental et du rhéomètre à béton [49].	41
Figure 2.9. Profil vitesse pour le rhéomètre Estellé et al [49].	42
Figure 2.10. Rhéomètre L2MGC et profil de vitesse du rhéomètre Soualhi et al [47].	44
Figure 3.1. Ciment CEM I 42.5R.	46
Figure 3.2. Poudre de brique de recyclée (DBR).	47
Figure 3.3. Poudre de brique pure (DBP).	47
Figure 3.4. Densimètre le Chatelier.	48
Figure 3.5. Superplastifiant haut réducteur d'eau.	48
Figure 3.6. Tamiseuse électrique.	49
Figure 3.7. Courbe granulométrique du sable.	49
Figure 3.8. Essai de l'équivalent de sable.	50
Figure 3.9 Essai de la masse volumique spécifique.	51
Figure 3.10. Teste de pré- séchage avec le cône et le piston.	51
Figure 3.11. Passage du béton au MBE.	52
Figure 3.12. Mini cône.	53
Figure 3.13. Essai d'affaissement pour mortier.	56
Figure 3.14. Maniabilimètre LCPC type B.	56
Figure 3.15. Rhéomètre utilisé.	58

<i>Figure 3.16. Profil de vitesse utilisé.</i>	58
<i>Figure 3.17. Eprouvettes des mortiers.</i>	59
<i>Figure 3.18. Essai d'écrasement des éprouvettes.</i>	59
<i>Figure 4.1. L'effet de poudre de brique recyclée sur le comportement rhéologique de mortier MBE.</i>	62
<i>Figure 4.2. L'effet de poudre de brique pure sur le comportement rhéologique de mortier MBE.</i>	62
<i>Figure 4.3. Effet de taux de substitution sur les paramètres rhéologiques de DBR.</i>	63
<i>Figure 4.4. Effet de taux de substitution sur les paramètres rhéologiques de DBP.</i>	63
<i>Figure 4.5. Variation de la viscosité plastique pour les deux types des additions.</i>	64
<i>Figure 4.6. Variation de seuil de cisaillement pour les deux types des additions.</i>	65
<i>Figure 4.7. Variation d'affaissement en fonction de taux de substitution.</i>	66
<i>Figure 4.8. Influence de taux de substitution sur le temps d'écoulement.</i>	66
<i>Figure 4.9. Corrélation entre l'affaissement et le seuil de cisaillement pour les mortiers DBR.</i>	68
<i>Figure 4.10. Corrélation entre l'affaissement et le seuil de cisaillement pour les mortiers DBP.</i>	68
<i>Figure 4.11. Relation entre l'affaissement et le seuil de cisaillement.</i>	69
<i>Figure 4.12. Corrélation entre la viscosité plastique et le seuil de cisaillement pour les mortiers DBR.</i>	70
<i>Figure 4.13. Corrélation entre la viscosité plastique et le seuil de cisaillement pour les mortiers DBP.</i>	71
<i>Figure 4.14. Corrélation entre la viscosité et le seuil de cisaillement.</i>	71
<i>Figure 4.15. Résistance à la compression des MBE-DBR à 7 jours.</i>	73
<i>Figure 4.16. Résistance à la compression des MBE-DBR à 14 jours.</i>	73
<i>Figure 4.17. Résistance à la compression des MBE-DBR à 28 jours.</i>	74
<i>Figure 4.18. Résistance à la compression des MBE-DBP à 28 jours.</i>	75
<i>Figure 4.19. Résistance à la compression à 28 jours des MBE-DBP/DBR.</i>	76

Liste des Tableaux

<i>Tableau 2.1. Définitions des viscosités [42].</i>	31
<i>Tableau 3.1. Composition de béton pour un mètre cube.</i>	53
<i>Tableau 3.2. La surface développée du mélange des graviers.</i>	54
<i>Tableau 3.3. La surface développée du sable.</i>	54
<i>Tableau 3.4. Proportion des MBE pour 1m³.</i>	54
<i>Tableau 4.1. Résultats des paramètres rhéologiques des MBE à base de déchets de brique de démolition.</i>	61
<i>Tableau 4.2. Résultats des paramètres rhéologiques des MBE à base de déchets de brique pure.</i>	61

الملخص

في سياق الحد من التأثير البيئي الناتج عن تصنيع الأسمنت، يتم عادةً دمج المضافات المعدنية لتحل محل الأسمنت جزئيًا في صياغة الخرسانة. تسلط هذه الدراسة الضوء على تعديل الخصائص الريولوجية الناتجة عن استخدام الإضافات المعدنية الجديدة. لا تؤثر نفايات الهدم على المعايير الريولوجية فحسب، بل تؤثر أيضًا على الأداء الميكانيكي والديمومة.

الهدف من هذه الدراسة هو فهم وتوقع عواقب إدخال إضافات الأسمنت مثل نفايات هدم البناء على الخصائص الريولوجية للخرسانة وإيجاد حلول لتحسين خصائص معينة، وذلك من أجل الحصول على خرسانة ذات أداء وخصائص تعادل الخرسانة العادية. تم إجراء دراسة ببيولوجرافية على الإضافات المعدنية واستخداماتها في الخرسانة وتأثيرها على الملاط والخرسانة. ثم أجريت دراسة تجريبية حول تأثير نفايات الطوب المعاد تدويره ونفايات الطوب النقية على السلوك الريولوجي والميكانيكي لملاط المكافئ للخرسانة. (MBE)

نوضح من خلال قياساتنا الريولوجية على الملاط آثار دمج نفايات الهدم المعاد تدويره (DBR) ونفايات الطوب النقية (DBP)، على عتبة القص ولزوجة البلاستيكية للملاط، فضلاً عن الهبوط ووقت التدفق. تثبت نتائجنا في الحالة الصلبة إمكانية استخدام نفايات الطوب المعاد تدويره والنقية في تصنيع مواد اسمنتية جديدة.

من الممكن صياغة خرسانة بيئية ذات تأثير بيئي منخفض عن طريق استبدال نفايات الهدم كإضافة اسمنتية لها نفس الخصائص الميكانيكية مثل الخرسانة المرجعية وخصائص ريولوجية أفضل.

Résumé

Dans le cadre de diminuer l'impact environnemental dû à la fabrication de ciment, les ajouts minéraux sont couramment incorporés pour remplacer partiellement le ciment dans la formulation des bétons. Cette étude met en évidence la modification des propriétés rhéologiques apporté par l'utilisation des nouveaux ajouts minéraux. Les déchets de démolition affectent non seulement les paramètres rhéologiques, mais également les performances mécaniques et de durabilité.

L'objectif de cette étude est de comprendre et de prédire les conséquences de l'introduction des ajouts cimentaires comme les déchets de démolition de construction sur les propriétés rhéologiques du béton et de trouver des solutions pour améliorer certaines propriétés, afin d'avoir des bétons qui ont des performances et des qualités équivalentes à celles d'un béton ordinaire.

Une étude bibliographique a été faite sur les additions minérales, leurs utilisations dans le béton et leurs influences sur les mortiers et les bétons. Ensuite une étude expérimentale a été faite sur l'influence des déchets de brique recyclée et pure sur le comportement rhéologique et mécanique des mortiers à béton équivalent (MBE).

Nous illustrons à partir de nos mesures rhéologiques sur les mortiers les effets de l'incorporation des déchets de démolition recyclée (DBR) et déchets de brique pure (DBP), sur le seuil de cisaillement et la viscosité plastique de mortier, ainsi que l'affaissement et le temps d'écoulement. Nos résultats à l'état durci permettent de valider l'utilisation de déchets de brique recyclée et pure lors de la fabrication de nouveaux matériaux cimentaires.

Il est possible de formuler un béton écologique à faible impact d'environnement par la substitution des déchets de démolition comme ajout cimentaire et d'avoir les mêmes propriétés mécaniques qu'un béton de référence et de meilleurs propriétés rhéologiques.

Abstract

In the context of reducing the environmental impact due to the manufacture of cement, mineral additives are commonly incorporated to partially replace cement in the formulation of concretes. This study highlights the modification of the rheological properties brought by the use of new mineral additions. Demolition waste not only affects rheological parameters, but also mechanical and durability performance.

The objective of this study is to understand and predict the consequences of the introduction of cement additives such as construction demolition waste on the rheological properties of concrete and to find solutions to improve certain properties, in order to have concretes which have performances and qualities equivalent to those of ordinary concrete.

A bibliographical study was made on mineral additions, their uses and their influences on mortars and concretes. Then an experimental study was made on the influence of recycled and pure brick waste on the rheological and mechanical behavior of concrete equivalent mortars (CEM).

We illustrate from our rheological measurements on mortars the effects of the incorporation of recycled demolition waste (DBR) and pure brick waste (DBP), on the yield stress and the plastic viscosity of mortar, as well as the slump and the flow time. Our results in the hardened state validate the use of recycled and pure brick waste during the manufacture of new cementitious materials.

It is possible to formulate an ecological concrete with low environmental impact by substituting demolition waste as a cementitious addition and to have the same mechanical properties as a reference concrete and better rheological properties.

Introduction générale

Ces dernières années, de nombreux travaux de recherche se sont intéressés à la réutilisation des déchets de construction et de démolition dans le béton. À titre d'exemple, dans les pays européens le projet « Recybéton » qui a engagé de vastes recherches sur le sujet. Elles ont permis de mieux connaître les propriétés des granulats et des bétons recyclés.

A heure actuelle les ajouts cimentaires représentent un sujet de recherche intéressant. Depuis de longues années, l'incorporation des additions minérales dans la formulation des bétons tel que les fillers calcaires, la fumée de silice, les cendres volantes, le laitier des hauts-fourneaux sont maintenant reconnus et acceptés comme des constituants souhaitables, voire indispensables aux bétons pour des raisons économiques et écologiques.

Plusieurs recherches ont été faites sur les additions dans la rhéologie des bétons [1]–[3]. Le remplacement partiel du ciment par des additions minérales dans le béton peut apporter des modifications sur le comportement rhéologique des bétons notamment, le seuil de cisaillement et la viscosité plastique. Ce changement vient de la nature d'additions utilisées de leurs interactions avec le ciment et leurs réactivités. L'utilisation de ces additions est la solution la plus utilisable pour la conception d'un béton écologique à faible empreinte carbone. L'influence de la substitution d'une addition minérale a pour objectif l'amélioration des propriétés rhéologiques et mécaniques ainsi que la durabilité du béton.

De nos jours avec le changement climatique et l'épuisement des sources naturelles nous obligent à recourir vers la valorisation de nouveaux ajouts cimentaires. Les déchets de démolition sont des matériaux de construction qui ne suscitaient guère d'intérêt ni d'importance, et qui ont commencé à causer des problèmes économiques et écologiques. Les quantités énormes mobilisent de plus en plus de grandes surfaces pour le stockage et réduisent ainsi les disponibilités des terrains, générant des risques de pollution d'environnement avec toutes ses conséquences [4].

Ce travail est une étude rhéologique des comportements liée à l'utilisation de déchets de démolition comme ajout cimentaire des différents taux de substitution. L'influence des additions de déchets de brique de démolition recyclées (DBR) et les déchets de brique pure

(DBP) ont été étudiés à partir d'un plan de recherche qui vise à quantifier les modifications apportées par l'ajout de déchets de brique sur les paramètres rhéologiques (le seuil de cisaillement et la viscosité plastique), la maniabilité (Affaissement et le temps de d'écoulement) ainsi que les performances mécaniques (résistance à la compression).

L'objectif principal de cette étude est de comprendre et prédire les conséquences rhéologiques de l'introduction des ajouts de brique dans la confection des bétons via du mortier à béton équivalent (MBE). Les connaissances établies dans ce sens seront exploitées afin de formuler des bétons à faible impact environnemental, puis pour un meilleur comportement rhéologique, tout en gardant une bonne performance mécanique.

Le premier chapitre présente une synthèse bibliographique sur les effets des additions minérales et les déchets de démolition sur le comportement rhéologique et mécaniques des matériaux cimentaires (mortier et béton). Dans le deuxième chapitre, un rappel théorique sur la rhéologie en général et les paramètres rhéologiques concernant les différents types de comportement d'un fluide ainsi que les principaux rhéomètres utilisés pour la détermination des paramètres rhéologiques du béton.

Le troisième chapitre présente une description détaillée des matériaux et du matériel utilisés en donnant un aperçu sur les techniques expérimentales ainsi que la préparation des mélanges et les variables à étudier. Le quatrième chapitre est consacré à l'analyse et la discussion des résultats obtenus. Enfin, des conclusions générales et des recommandations sont données afin de poursuivre le travail dans cet axe de recherche.

Chapitre 1 . Les bétons bas carbonés

1.1 Introduction

Les bétons bas carbonés sont la solution la plus récente pour diminuer l'empreinte carbone et réduire les émissions de gaz à effet de serre. Principalement l'impact carbone du béton est dû à celui du ciment. C'est pour cela que la plupart des appellations « béton bas carbone » indiquent l'utilisation d'un « ciment bas carbone » à l'échelle mondiale. Le secteur de la construction est responsable d'environ 10% des émissions de gaz à effet de serre à lui seul, le béton est responsable de près de 52% des émissions du secteur du bâtiment.

En outre la recherche dans le domaine de la construction sert toujours à remplacer partiellement le ciment portland dans le béton par des additions qui permettent de réduire les émissions de gaz et génèrent un béton écologique ayant un faible impact sur l'environnement. Les éco-bétons sont basés sur la substitution des ciments portlands par des matériaux locaux disponibles dans la nature ou issus des déchets industriels ou par le recyclage des matériaux tels que la brique, le marbre, le verre et du béton de démolition.

La valorisation des déchets de démolitions est une des principales préoccupations d'environnement non seulement dans les pays occidentaux mais dans le monde.

Les recherches scientifiques sur le sujet de valorisation et l'utilisation de ces matériaux comme des additifs ou des granulats afin de formuler des éco-bétons occupent une importance primordiale dans les pays développés. Une partie de ces recherches vise à améliorer les technologies de production de clinker et à la création de nouveaux types de ciment qui proposent les mêmes propriétés physiques.

Dans ces pays le recyclage du béton de ciment a fait l'objet de projets nationaux de recherche menés récemment sous le terme de Recybéton. À l'heure actuelle certains pays européens comme l'Allemagne, les Pays-Bas, le Danemark, la Norvège ou la Suisse, réalisent déjà des bétons de structure incorporant des granulats recyclés.

1.2 Béton bas carbone

Béton bas carbone est la nouvelle génération des bétons. Le terme béton «bas carbone» est largement utilisé, cela montre que toute solution permettant de réduire la quantité de ciment

portland par des additions minérales vont permettre de réduire l’empreinte de carbone ainsi que la préservation des ressources naturelles.

Néanmoins, il est connu que ces bétons correspondent à des bétons qui, ont des propriétés, des performances, des qualités et une durabilité équivalente à celles d’un béton de référence. Ces bétons dans lequel une partie du ciment est remplacée par des additions minérales a apporté des solutions économiques et écologiques au problème des émissions de dioxyde de carbone (CO_2), ainsi qu’à la quantité d’énergie consommée et à l’élimination des déchets [5].

La fabrication de ciment est l’un des problèmes environnementaux. La transformation de calcaire et d’argile dans des fours puissants et la chaleur qui en résulte dégagent d’importantes quantités de dioxyde de carbone. Le transport ainsi l’extraction de ces matières premières sont la source de CO_2 qui participe au réchauffement climatique au niveau mondiale. Le ciment est habituellement composé de clinker et de produits d’addition. Le poids carbone du ciment est principalement dû au clinker en lien à deux causes la cuisson du clinker à 1450°C responsable d’environ un tiers des émissions de GES et la décarbonatation du calcaire lors de la cuisson est responsable des deux tiers restants [1].

le ciment est une matière première pour la production du béton et du mortier. Il n’existe pas de base de données représentative sur l’évolution de l’empreinte de CO_2 du béton et autres produits cimentaires au fil du temps. La Figure 1.1 représente, le facteur de clinker est corrélé linéairement avec les émissions de CO_2 de la production de ciment et de béton dès l’extraction jusqu’au produit fini, depuis 1988 à 2016 [6].

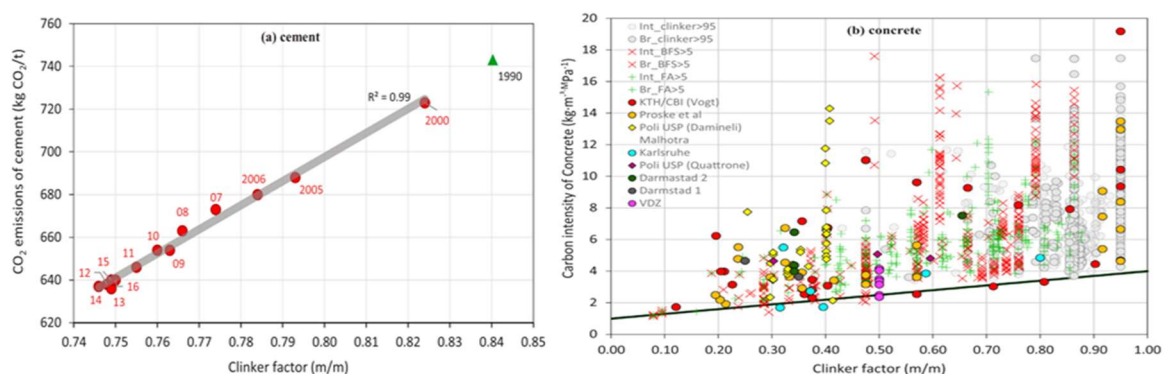


Figure 1.1. (a) Corrélation entre le facteur clinker et les émissions de CO_2 du ciment, projection a été estimée par régression linéaire. (b) Corrélation entre le facteur clinker et l'intensité carbone du béton [7], [8].

L'une des principales préoccupations du béton portland conventionnel est associée à la quantité massive de consommation mondiale de ciment et de granulats naturels grossiers, ce qui provoque l'épuisement des ressources naturelles d'une part et des problèmes écologiques d'autre part, par conséquent le concept éco-béton en remplaçant le ciment par des additions supplémentaires tels que le laitier de haut fourneau granulées broyées, les cendres volantes, la fumée de silice et le métakaolin peut jouer un rôle essentiel dans la lutte contre la menace environnementale du béton conventionnel.

En cimenterie, plusieurs additions minérales (fillers calcaires, fumées de silice, cendres volantes, laitier de haut-fourneau, etc.) viennent remplacer une partie du clinker au moment du broyage pour former les différents ciments de la norme NF EN 197-1 [NF EN 197-1, 2012]. La Figure 1.2 présente les quantités de CO₂ émises ainsi que les quantités de clinker minimales et maximales pour les huit ciments.

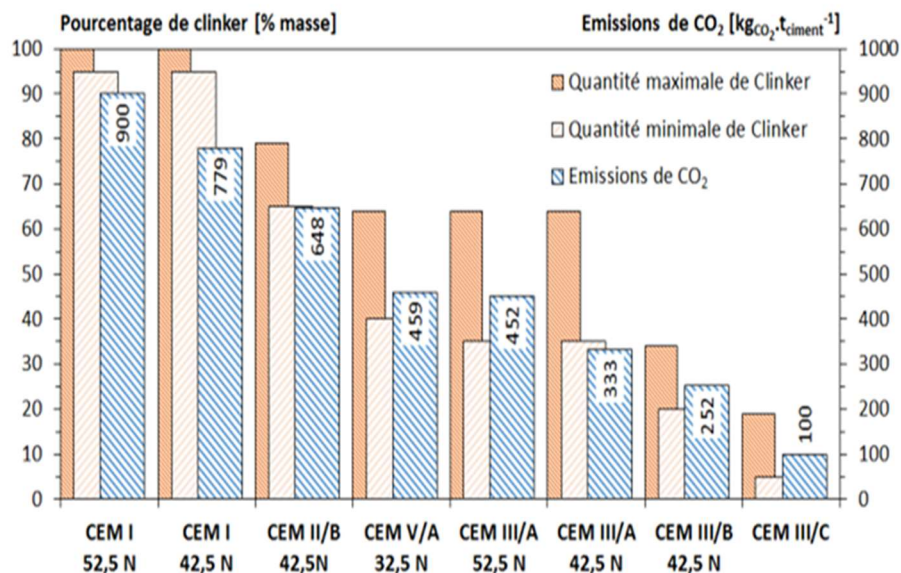


Figure 1.2. Émissions de CO₂ par tonne de ciment pour différents ciments et quantités minimales et maximales de Clinker [6].

1.3 Béton a base des additions minérales

les additions minérales sont utilisé dans la confection ou la formulation des bétons comme des ajouts cimentaires pour améliorer certaine propriétés d'ouvrabilité et de consistance ou pour lui conférer des propriétés particulières tel que la compacité et la durabilité. Par leur activité physique, hydraulique et pouzzolaniques ces additions peuvent améliorer le comportement des bétons à l'état frais et à l'état durci.

Les additions minérales peuvent être utilisées en substitution (remplacement) partielle du ciment selon le concept de liant équivalent, uniquement pour les ciments de type CEM I le taux de substitution dépend du type de ciment et de la classe d'exposition. Ils sont définies dans la norme NF EN 206/CN. La norme distingue deux types d'additions :

- Additions de type I : quasiment inertes.
- Additions de type II : à caractère pouzzolanique ou hydraulique latent.

Les additions de type I correspondent à des fillers conformes à la norme relative aux granulats (NF EN 12620) et les pigments de coloration des bétons conformes à la norme NF EN 12878 ainsi que :

- Les additions calcaires conformes à la norme NF P 18-508.
- Les additions siliceuses conformes à la norme NF P 18-509.

Les additions de type II regroupent :

- Les cendres volantes de centrale thermique conformes à la norme NF EN 450-1.
- Les laitiers vitrifiés moulus de haut fourneau conformes à la norme NF EN 15671-1.
- Les fumées de silice conforme à la norme NF EN 13263-1.
- Les métakaolins conformes à la norme NF P 18-513.

1.3.1 Les différents types d'addition

Plusieurs types d'ajouts sont bien connus tels que les pouzzolanes naturelles, les cendres volantes, le laitier des hauts fourneaux ainsi que la fumée de silice. Par ailleurs, elles jouent un rôle important dans la rhéologie du béton, leur incorporation est également motivée par leur capacité à réduire les charges environnementales liées à la consommation d'énergie, aux émissions de gaz à effet de serre, à l'élimination des déchets et à l'épuisement des ressources naturelles

1.3.1.1 Fillers calcaires

Le calcaire est une roche sédimentaire composée principalement de carbonate de calcium (CaCO_3) sous forme de calcite minérale. Le calcaire est l'un des deux composants clés nécessaires à la fabrication du ciment. Il est utilisé en raison de sa teneur élevée en oxyde de calcium, qui est le principal composant du ciment et représente généralement environ 65% du produit final. La quantité d'argile utilisée dépend de sa teneur en oxyde de silicium, qui

constitue environ 20% de la poudre de ciment. Ainsi, son emploi a donné des résultats prometteurs de résistance et de durabilité [9].

En 1960, le code Espagnol permit l'introduction de plus de 10% de filler pour des classes faibles de ciment. Puis en 1975, le code fut révisé pour permettre d'incorporer jusqu'à 35% de calcaire. En plus, l'introduction de quatre classes de ciments a encouragé l'utilisation du ciment au calcaire pour contrôler les classes inférieures tout en assurant une rhéologie satisfaisante.

Dès les années 90, plusieurs pays européens révisaient leurs normes et permettaient l'introduction du calcaire en cimenterie comme le BS 7583 en 1992. En 2000, la Norme Européenne EN 197-1 définit quatre types de ciment au calcaire parmi 27 ciments normalisés, ce qui favorise la production de ce type de ciment qui s'élève à 40 millions de tonnes représentant 24% de la production européenne [10].

Les ajouts cimentaires finement broyés comblent les interstices granulaires inaccessibles aux grains et rendent le mélange plus fluide ce qui permet de réduire la quantité d'eau et rend le béton résistant. Les fillers avaient principalement un effet physique de comblement de vide et d'amélioration de la porosité. Les recherches et les études sur les effets de fillers montrent la possibilité d'obtention de ciment hydraulique durable à hautes performances mécaniques. Chaid et al. [11] ont rapporté que l'emploi des fillers calcaires locaux finement broyés donne un remplissage des vides et la réaction superficielles entre les grains de calcite et le ciment entre elle améliore la compacité du béton. Cet effet permet une réduction de la porosité capillaire (et donc de la perméabilité) et par conséquent une augmentation des résistances chimiques envers les milieux agressifs (l'eau de mer).

1.3.1.2 Laitier des hauts fourneaux

Le laitier des hauts fourneaux est un sous-produit des usines sidérurgiques formé essentiellement de silicates et d'aluminosilicates de calcium et d'autres substances minérales. Il subit un refroidissement rapide avec un jet d'eau qui lui donne une structure vitreuse apte à réagir en présence de l'hydroxyde de calcium libéré par l'hydratation du ciment. L'utilisation de ces sous-produits de plus d'une centaine d'années avec la première production d'un ciment au laitier.

Les Laitiers de haut-fourneaux, produits de l'élaboration de la fonte résultant de la réduction des minerais de fer (Hématite Fe_2O_3 ou Magnétite Fe_3O_4) par le charbon pour obtenir de la fonte (alliage de fer-carbone, saturé en carbone). Les laitiers de hauts fourneaux présentent une hydraulicité potentielle qui nécessite une activation calcique ou sulfo-calcique et qui confère aux ciments une stabilité accrue aux agents chimiques agressifs. Une fois broyé finement le laitier vitrifié de haut fourneau peut être un constituant principal du ciment autre que le clinker ou introduit comme addition au béton. Son utilisation en cimenterie s'est étendue à travers le monde à cause de ses performances mécaniques, de son économie et de sa valeur écologique.

1.3.1.3 Pouzzolane naturelle

La pouzzolane est une roche naturelle correspondant à des projections volcaniques, scoriacées, essentiellement stromboliennes et basiques, c'est-à-dire d'une composition basaltique. Sa couleur varie généralement du noir au rouge selon le degré d'oxydation de fer, présent respectivement sous forme de magnétite ou d'hématite. Avant la découverte du ciment Portland, on n'utilisait à l'échelle mondiale que des liants composés de pouzzolane et de chaux. Puis leur utilisation fut délaissée à cause de leurs faibles résistances et de la lenteur de leur prise. Toutefois grâce à ses avantages techniques, la pouzzolane naturelle est devenue très pratique dans la construction, en y substituant le ciment Portland [10].

1.3.1.4 Fumée de silice

La fumée de silice est un sous-produit industriel résultant du dépoussiérage des fumées issues des fours à arcs électriques dans lesquels sont élaborés du silicium et d'autres alliages. Elle se combine avec l'oxygène de l'air pour donner de l'oxyde de silicium SiO_2 en quantité prédominante supérieur à 90%.

La taille fine de ses particules permet d'étendre la granulométrie de l'ensemble du squelette granulaire du ciment en comblant les vides et en augmentant la compacité. De plus, sa structure amorphe permet de déclencher une réaction pouzzolanique par la consommation de la chaux et la création de nouveaux hydrates.

1.3.1.5 Cendres volantes

Les cendres volantes sont de fines particules résultant de la combustion du charbon dans les centrales thermiques. Leurs particules ont une forme sphérique avec un diamètre allant de 1 à 150 μm . En 1937, Davis de l'université de Californie présenta une étude sur l'utilisation des cendres volantes en cimenterie. En 1948, la construction du barrage de Hungry Horse aux USA fut la première application pratique. Depuis, les études se sont multipliées et l'utilisation de ses cendres s'est énormément répandue grâce aux améliorations apportées au béton et à l'économie enregistrée par leur emploi [10].

1.3.1.6 Poudre de verre

La poudre de verre (PV) est un ajout cimentaire alternatif de couleur blanche. Elle est obtenue par broyage des fragments de verre coloré. Elle a une propriété pouzzolanique grâce à sa teneur élevée en SiO_2 (environ 70%). L'influence de la poudre de verre (PV) sur l'ouvrabilité des bétons frais dépend de plusieurs facteurs.

Selon Zidol [12], il s'avère que la poudre de verre avec une finesse semblable à celle du ciment soit une valeur optimale pour l'obtention d'une ouvrabilité acceptable [12]. De plus, il est rapporté que la demande en superplastifiant diminue à mesure que le pourcentage de remplacement du ciment par la poudre de verre augmente [12]. L'absorption quasi nulle de la poudre de verre constitue un facteur de diminution du dosage en SP adéquate pour un étalement donné.

1.3.1.7 Métakaolin

Le métakaolin (MK), ou bien métakaolin à haute réactive (HRM) est un ajout cimentaire, qui est relativement nouveau dans l'industrie de la fabrication de ciment et du béton, a un grand potentiel d'améliorer les performances mécaniques et la durabilité du béton. Le terme « Haute réactivité » est utilisé couramment dans la littérature scientifique pour différencier de métakaolin fabriquées à partir de kaolinite blanchâtre, purifiée et activée thermiquement ou d'autres variétés des MK moins réactives obtenu par calcination d'argile pouzzolanique contenant des impuretés, qui ne peuvent pas être activé à une forme pouzzolanique à la température utilisée pour produire de métakaolin hautement réactive [13].

1.3.1.8 La poudre de marbre

Le marbre est une roche métamorphique résultant de la transformation d'un calcaire pur. Le degré de pureté du marbre est responsable de sa couleur et de son aspect : il est blanc si la roche dont il provient était principalement composée de calcite (100% CaCO_3), utilisé principalement dans la construction et la décoration.

Une grande quantité de poudre est générée lors de la découpe et de polissage du marbre. Son utilisation en remplacement du calcaire, dans la production de ciment, dans la mesure où elle n'altère pas trop les caractéristiques du béton, permet de réduire l'impact de sa mise en décharge [14], [15].

1.3.2 Effets des additions minérales sur la rhéologie des matériaux cimentaires

Les mécanismes de l'action des additions minérales qui induisent des modifications dans la rhéologie de la pâte du ciment ou du béton sont larges. Les avantages de ces additions sont généralement l'augmentation de l'affaissement et la diminution du seuil de cisaillement et de la viscosité plastique, la distribution granulaire et le potentiel qui influent sur la rhéologie des matériaux cimentaires.

Le remplacement partiel du ciment par des pourcentage élevé des additions minérales est un facteur clé pour la conception d'un béton bas carbone. L'influence de la substitution d'une addition minérale pour améliorer les propriétés rhéologiques et mécaniques et la durabilité du béton dépend du type et de la teneur de l'addition. L'effet des additions minérales sur les propriétés rhéologiques des pâtes de ciment a été étudié par Xiong et Jihong [16], qui expliquent que le seuil de cisaillement augmente avec la teneur en additions ultrafines et la viscosité plastique varie avec la nature et la quantité d'addition. En outre, l'effet des addition minérales sur la demande en superplastifiant dépend principalement de la quantité et de la finesse de l'ajout, indépendamment du type de ciment [17]. Toutefois, ces additions modifient la rhéologie et l'ouvrabilité des bétons, mortiers et pâte de ciment par leurs nature, activité, densité, forme, taille et distribution granulaire et leur interaction.

Des recherches menées par Adjoudj et al. [18], montrent que l'ajout du filler calcaire contribue à diminuer le seuil de cisaillement et la viscosité plastique, par contre l'ajout du filler calcaire provoque une augmentation de la viscosité plastique lorsque le dosage est supérieur à une certaine valeur critique. Ceci est due aux particules fines du filler calcaire, qui améliorent

la distribution granulaire des grains, remplissent les vides disponibles entre les particules du mortier et augmentent la compacité du mélange.

La substitution du ciment par le laitier de haut fourneau à un comportement opposé entre la viscosité et le seuil de cisaillement d'après Atzeni et al [19]. Les paramètres rhéologiques, le seuil de cisaillement et la viscosité plastique peuvent augmenter ou diminuer avec un additif de laitier. Cela dépend de la relation entre la surface spécifique du ciment et du laitier. D'autres recherches montrent que la distribution granulométrique du laitier de haut fourneau améliore la compacité du mélange et augmente la quantité de l'eau libre ce qui offre un bon comportement rhéologique des ciments composés.

La pouzzolane naturelle a un comportement rhéologique similaire à celui de la fumée de silice en raison de l'augmentation des interactions entre les particules fines. De nombreuses recherches montrent que la viscosité augmente rapidement en fonction du taux de substitution de la pouzzolane naturelle. Ezziane et al. [20], expliquent que l'augmentation des paramètres rhéologiques du ciment pouzzolanique est due à un système de vides et de canaux présents dans la structure de leurs grains, qui conduisent à l'adsorption de l'eau libre de mélange. Une autre explication possible de ce phénomène accorde cette baisse des propriétés rhéologiques des ciments pouzzolaniques au grand volume de la pâte résultant de la substitution d'un ciment de forte densité par une addition minérale de densité plus faible.

Amziane et al. [21], ont remarqué que l'augmentation du taux de substitution du ciment par des cendres volantes variant de 0 à 40% a eu comme conséquence une diminution de la viscosité plastique à cause de la forme sphérique de ses particules qui permet de réduire les frottements entre les particules.

Toutefois, une légère diminution du rapport E/L peut atténuer l'effet de la forme et augmenter rapidement la viscosité du mélange à cause de la finesse élevée des cendres volantes. Cet effet semble être amplifié quand les cendres volantes sont riches en calcium [22]. Par contre, l'influence du dosage des cendres volantes sur le seuil de cisaillement est moins claire [21].

Soualhi et al. [1], et Safiddine et al. [3], ont aussi montré qu'une hausse du taux de substitution du ciment par des cendres volantes de classe F s'accompagne toujours par une augmentation du seuil de cisaillement.

1.4 L'utilisation des déchets de démolitions comme ajout cimentaire

De nos jours le changement climatique est l'un des défis les plus complexes, le secteur du bâtiment affecte fortement l'environnement, par les consommations de ressources naturelles l'épuisement des ressources non renouvelables va confronter des crise écologique et environnementale. Afin de résoudre ces problèmes, il est nécessaire entre autres de diminuer la consommation d'énergie et d'avoir recours à des matériaux recyclables à faibles impacts environnementaux qui devenue un enjeu majeur mobilisant la communauté internationale dans son ensemble.

Ces dernières années de nombreux travaux de recherche sont intéressées à la valorisation et la réutilisation des déchets de construction et de démolition dans le béton lors de la déconstruction et la démolition des bâtiments. La brique occupe une importance majeure de ces déchets. Dans les pays développés, (France, la Belgique...) le recyclage de la brique est déjà réalisé sous des produits de construction sous forme de granulats pour les travaux routiers.

1.4.1 La brique en terre cuite

La brique est un matériau composé de terre argileuse, celle-ci est un mélange d'argiles, de quartz, de carbonates et d'oxydes de fer. Le choix de la terre argileuse est lié aux propriétés du matériau avant et après cuisson. L'élasticité des argiles permet le façonnage et le moulage selon des formes variables, et le réarrangement des minéraux lors de la cuisson confère aux briques une importante résistance mécanique et thermique. L'argile est l'élément majoritaire qui compose la matière première des briques. Les argiles sont des minéraux de la famille des phyllosilicates [23]. Ce qui rend ces minéraux spécifiques, c'est leur structure. Ils sont constitués de feuillets, tétraédriques et octaédriques, ainsi qu'un espace interstitiel.

- la brique crue est le résultat d'un moulage et du séchage de la terre argileuse.
- la brique cuite est issue d'un processus de cuisson d'une terre argileuse.

La brique de terre cuite est un matériau couramment utilisé depuis la fin du 19^{ème} siècle dans les constructions. Elles sont fabriquées avec tous types d'argile : les illitiques (couleur marron gris à rouge, après cuisson), les kaoliniques (très claires). On trouve dans la pâte argileuse essentiellement des éléments métalliques, sous forme d'oxydes plus ou moins hydratés les éléments dits « réfractaires » dont le degré de fusion est très supérieur à celui de la

température (de 800 à 1000 °C) des fours à briques : il s'agit de la silice (SiO_2), et de l'aluminium (Al_2O_3). Les éléments « colorants » dont la proportion détermine la couleur basique de la brique (le degré de cuisson étant l'autre facteur déterminant de cette couleur). Ce sont : l'oxyde de fer, l'oxyde de titane et l'oxyde de manganèse [24].

Les déchets de brique conviennent bien pour les bétons réfractaires, qui sont, en général, utilisés pour la confection d'ouvrages soumis à des températures élevées tels que revêtements des chaudières, cheminées, carnaux de cheminées, conduites de fumées, de sols d'usines sidérurgiques, des parties de fours.

L'argile est l'élément majoritaire qui compose la matière première des briques. Les argiles sont des minéraux de la famille des phyllosilicates. Ce qui rend ces minéraux spécifiques, c'est leur structure. Ils sont constitués de feuillets, tétraédriques et octaédriques, ainsi qu'un espace interstitiel [25].

1.4.2 Valorisation des briques

Le recyclage est un procédé qui consiste à valoriser et réutiliser les déchets de brique, du béton et déchets BTP. L'utilisation des briques en substitution des agrégats naturels permet la réduction de stockage de déchets, mais aussi un bénéfice économique et écologique. La possibilité de substituer aux agrégats naturels dans les bétons et les mortiers est évaluée dans plusieurs études [26], [27], utilisable comme des granulats dans la couche de fondation routière ou comme matériaux de remblai.

Lahmadi et al. [28], ont étudiés l'influence de la substitution des granulats naturels par les déchets de brique sur le comportement mécanique du béton. Cette étude montre que, l'affaissement diminue en substituant les granulats naturels par les déchets de briques soit sous forme d'un sable ou d'un gravier. Pour avoir la même consistance, les granulats de briques demandent une quantité supplémentaire d'eau de gâchage. Les résultats sur le comportement mécanique obtenus montrent que la substitution partielle des gros granulats par les déchets de briques avec la résistance estimée à 28 jours de durcissement est bénéfique où les résistances sont comparables à celles d'un béton ordinaire.

Il existe deux types de sources pour les fines. Certaines fines sont issues de centre de tri. Elles sont produites lorsque les centres de tri préparent les granulats et les sables recyclés.

La deuxième est une source expérimentale. Les fines sont fabriquées intentionnellement pour obtenir un matériau avec une forte valeur ajoutée. Les fines de brique peuvent être définies comme un filler, un matériau avec une granulométrie inférieure à 0,063 mm EN NF 12620. Les fillers sont utilisés dans des formulations de mortier ou de béton pour permettre une amélioration des propriétés d'écoulement, de résistance mécanique et de durabilité. Travailler avec des fines permet d'être au plus proche des matériaux substitués ciment en termes de granulométrie. Les fines de brique peuvent être utilisées comme substituant ou ajout dans les mortiers ou bétons à base de ciment [29].

Des études antérieures ont montré qu'une fine provenant de granulats recyclés a davantage de potentiel qu'une fine fabriquée à partir d'un béton. Ces études montrent que ces matériaux pouvaient présenter des propriétés pouzzolaniques grâce à la présence de terre cuite. Cette terre cuite est susceptible de réagir pour former des hydrates si les conditions de dissolution et précipitation sont réunies [23]. C'est d'ailleurs une des conclusions fortes qui traite de la fabrication d'additions minérales à base de fines. En outre une influence similaire des fines à celle d'un filler calcaire sur le comportement rhéologique et mécanique de mortiers, les fines offrent une valeur plus sur les propriétés mécaniques à long terme que l'on peut attribuer à une activité pouzzolanique.

Les résultats de Oksri Nelfia [30], montrent que les fines accélèrent le processus d'hydratation du ciment et augmente le degré son hydratation. On suppose que les fines fournissent des sites de nucléation au ciment. À l'inverse la quantité de chaleur diminue avec l'augmentation de la substitution, ce qui s'explique par la faible quantité de ciment anhydre dans les fines. La présence de fines provoque une précipitation plus précoce de la portlandite.

L'influence des fines sur la résistance mécanique des mortiers a permis de montrer que l'augmentation du taux de substitution diminue la résistance et ce quel que soit l'échéance et donc que cette substitution devait être limitée à 25 % car la perte de performance mécanique serait trop importante. Ces résultats mettent des points pour le développement d'une nouvelle filière de valorisation des granulats recyclés, sous forme d'addition minérale pour le béton.

1.4.3 Conséquences sur les propriétés à l'état frais

Plusieurs études montrent un changement dans la rhéologie des matériaux à base de sables de brique. La porosité des briques se situe entre 30 et 50%, ce qui les situent dans les

matériaux poreux. Pour des agrégats avec une taille des grains de 10 mm, la porosité est d'environ 30%. La porosité est importante dans les phénomènes d'absorption d'eau et de maniabilité. Une diminution de la maniabilité ainsi que de la densité du mélange sont observées dans les formulations avec une substitution par des agrégats de brique. Les résultats présentés dans la Figure 1.3, tiré de l'étude Khatib et al. [31], indiquent une diminution importante de la maniabilité du matériau avec des granulats de brique pour des taux de substitution supérieurs à 25%, contrairement aux mélanges avec des granulats de béton qui voient leur maniabilité légèrement augmenter. La quantité d'eau totale doit ainsi être réévaluée, pour avoir une quantité d'eau efficace suffisante, pour une maniabilité correcte et une hydratation optimale du mélange avec les agrégats de brique.

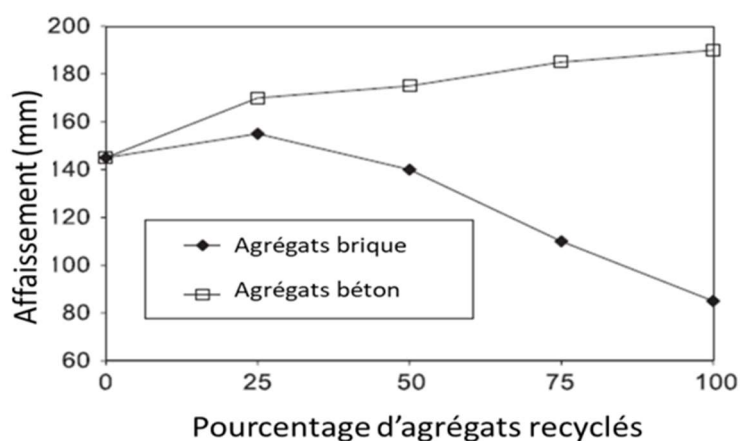


Figure 1.3. Des agrégats de brique sur l'affaissement [31].

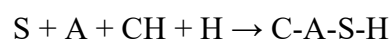
1.4.4 Réaction pouzzolanique

La brique est un matériau essentiellement aluminosilicate qui, sous forme de fines, peut être qualifié de matériau potentiellement pouzzolanique. Une pouzzolane est définie dans la norme ASTM C618-05 de la façon suivante : « Les pouzzolanes sont des matériaux siliceux ou silico-alumineux, qui ne possèdent pas eux-mêmes de propriétés liantes, mais qui sous forme d'une poudre finement broyée et en présence d'humidité, réagissent chimiquement avec l'hydroxyde de calcium à température ordinaire pour former des composés possédant des propriétés liantes ». Les briques peuvent aussi être caractérisées par leur quantité d'oxydes [32], $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 \geq 70 \%$, qui les inclut dans les pouzzolanes et en partie dans les verres en fonction de la quantité de phase amorphe, sur la base de la teneur en trois oxydes principaux.

Un matériau pouzzolanique va, en présence d'eau, se combiner avec la chaux pour former des hydrates types C-S-H pouzzolanique qui contribuent aux performances et à la durabilité des liants réalisés. Les C-S-H pouzzolaniques se différencient des C-S-H produits par l'hydratation du ciment par leur rapport Ca/Si plus faible [33]. Cette propriété est essentielle à déterminer pour envisager l'utilisation des fines de brique sous forme de substitut dans les mélanges hydrauliques. La pouzzolanicité et la finesse sont dès lors considérées comme les paramètres permettant de caractériser l'activité des fines de brique lorsqu'elles sont utilisées dans des mélanges hydrauliques [26].

Dans un mélange avec du ciment, le matériau pouzzolanique réagit avec la Portlandite formée lors de la réaction d'hydratation. La réaction se déroule en deux temps :

- Dissolution des minéraux présents. Tout d'abord dissolution de la chaux provenant de la réaction d'hydratation entraînant une saturation de la solution et une augmentation du pH. Ce nouveau milieu permet la dissolution de la silice et de l'alumine apportées par le matériau pouzzolanique. L'augmentation des ions en solution entraîne la précipitation et la cristallisation de nouvelles phases hydratées [34].
- La Portlandite (CH) formée lors de la phase d'hydratation du ciment, associée avec les réactifs d'un matériau pouzzolanique que sont les silicates (S) et aluminates (A) en solution, permet la formation de gel de C-S-H et C-A-S-H.



D'autres hydrates sont formés en combinant les deux réactions. Les C-S-H produits lors de la réaction pouzzolanique sont identifiés comme des C-S-H pouzzolanique car leur rapport Ca/Si est plus faible [33].

Les autres hydrates formés sont principalement des hydrates de calcium incorporant la part d'aluminium présente dans la solution (C-A-S-H). Les fines de brique sont un matériau potentiellement pouzzolanique : elles semblent donc être intéressantes dans le cadre de cette réaction. En plus de la réaction pouzzolanique, les additions minérales peuvent entraîner deux effets physico-chimiques l'effet filler et l'effet de nucléation [35].

1.5 L'effets de substitution des poudres de brique sur le béton et mortier

Dans les mortiers ou les bétons à base de ciment, la brique sous forme des fines peut être utilisée comme un ajout dans les formulations tel que d'autres additions minérales ou remplacer une partie du clinker dans l'élaboration d'un ciment composé. Plusieurs recherches étaient faites sur l'utilisation des fines de brique dans la formulation des bétons. Chen et al., montre que les formulations à base de fines de brique ont des meilleures performances mécaniques. L'activité des fines de brique permet une amélioration des performances mécaniques due à son activité pouzzolanique. Dans certaines études, les formulations des bétons réalisées avec des fines de brique donnent des résistances en compression à 28 jours supérieures à 50 MPa [36], [37]. (cf. Figure 1.4). En restant avec des taux de substitution inférieurs à 20 %, les performances des bétons et mortiers obtenues avec fines de brique sont équivalentes voire supérieures à celles avec un ciment seul.

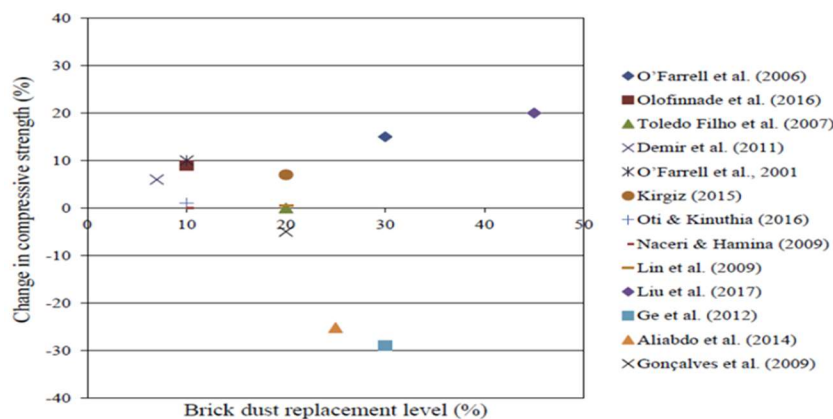


Figure 1.4. Utilisation des fines de brique à différents taux de substitution et résistance en compression [38].

Des études ont rapporté sur l'effets de finesse de Blaine de poudre de brique sur le comportement rhéologique l'évaluation des propriétés d'un mortier par utilisation de la poudre de brique recyclée comme pouzzolane artificielle en remplacement fractionné du substitut de ciment [26]. Ces études observent que lorsque la finesse de la poudre de brique recyclée (PBR) est restée constante, la fluidité a diminué à mesure que le taux de remplacement du PBR augmentait. Par rapport aux échantillons avec des matériaux cimentaires recyclée, les mélanges avec 20% de poudre de brique avaient un écoulement plus faible. La réduction moyenne est d'environ 3%. Cela indique que les mélanges contenant plus de 20% de poudre de brique recyclée auront une faible capacité d'écoulement. De l'autre côté, lorsque la teneur en poudre

de brique recyclée est restée constante, la capacité d'écoulement a augmenté à mesure que la finesse du PBR augmentait. Toutefois les mélanges contenant plus de 20% de poudre de brique recyclée auront une faible fluidité avec une réduction de 30%.

Des travaux de recherche réalisés par Grellier [23], montrent que le comportement des fines de brique montre une augmentation de la maniabilité du mélange avec l'augmentation en fines. Des essais permettant d'évaluer l'impact des fines de brique sur la mise en œuvre des mélanges formulés ainsi que le suivi au jeune âge de la réaction d'hydratation et le test d'étalement démontre un comportement rhéologique différent selon la taille des particules et selon le taux de fines de brique.

Pour les mélanges avec les fines, la granulométrie très fine entraîne une augmentation de la surface spécifique des particules et ainsi une augmentation de la demande en eau. La perte de maniabilité avec les fines est donc liée à la finesse des particules et au piégeage de l'eau en surface (cf. Figure 1.5). L'augmentation de la maniabilité est associée à une taille des particules plus importante qui entraîne une augmentation de la compacité (densité de tassement) ainsi qu'un effet filler lié aux fines. L'eau libre nécessaire à l'écoulement est donc piégée entre les fines et la maniabilité augmente avec le taux de substitution en fines de brique [23].

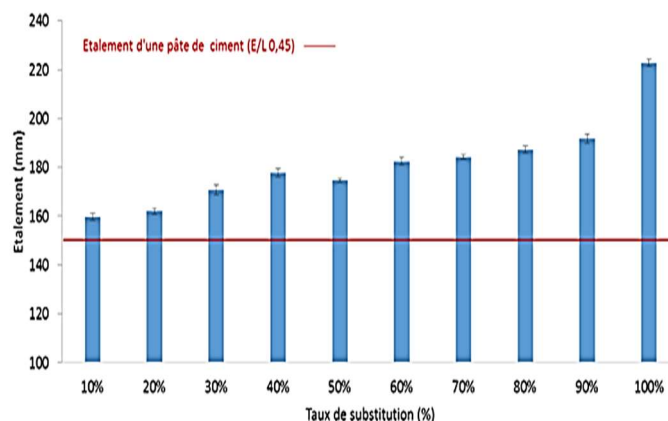


Figure 1.5. Essai d'étalement avec augmentation des taux de substitution en fines de brique [23].

Mohammed Si-Ahmed, et Saïd Kenai avaient étudié l'effet de l'ajout de déchets de briques broyées sur 25% de substitution du ciment par des poudres de briques. Cette étude montre que l'utilisation jusqu'à 15% de poudre de déchet de brique a peu d'influence sur les paramètres rhéologiques du mortier autoplaçant. Les pertes de maniabilité sont plus nettes à

partir de 20% de substitution du ciment.

Dès le plus jeune âge, la résistance à la compression diminue avec l'incorporation de poudre de déchets de brique, mais à long terme, la résistance à la compression est plus élevée par rapport au mortier de référence (cf. Figure 1.6). La poudre de déchets de brique provoque une légère augmentation dans l'absorption d'eau par capillarité du mortier [39].

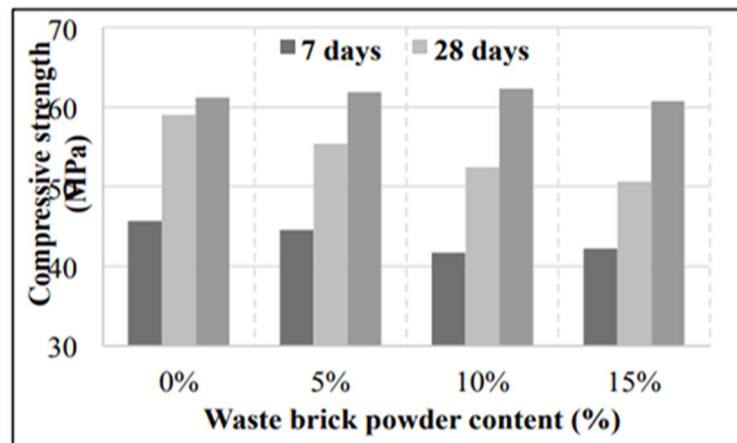


Figure 1.6. L'influence la teneur en poudre de déchets de briques sur la résistance à la compression du MAP [39].

Les études de Grellier [23], montrent que les résultats sur les fines de brique de référence mais aussi de briques anciennes sont encourageants pour envisager une valorisation sur la source de brique recyclées qu'il faudra broyer à une granulométrie équivalente au ciment. Pour des taux de substitution en fines de briques jusqu'à 20%, les performances mécaniques sont préservées. Et pour des taux de substitutions supérieures, les performances mécaniques diminuent mais pourraient être compatibles avec des usages spécifiques tels que l'élaboration de coulis ou de mortiers. L'emploi de fines de brique permet par conséquent de réduire la part de clinker dans le ciment composé élaboré et donc de contribuer à la réduction de l'impact CO₂ et la préservation des ressources naturelles nécessaires à la constitution du cru.

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 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. Le comportement rhéologique seuil d'écoulement, viscosité plastique étude des

écoulements des mortiers et bétons affect une importance particulière dans la rhéologie des matériaux.

Messaoudene et al. [40], montrent que la substitution partielle du ciment par 20% de déchet de brique avec une finesse de Blaine de plus de 5000 cm²/g rend le béton plus fluide. En effet la viscosité est fortement réduite pour atteindre environ 14,2 Pa.s (cf. Figure 1.7). Le seuil de cisaillement est légèrement supérieur à celui du béton témoin sans ajout, mais il est inférieur à celui du béton à base d'un ciment composé de 10% d'ajout de brique. Les résistances à la compression des différents types de béton sont très intéressantes et cela à toutes les échéances. Les bétons ont atteint des performances très importantes après 60 jours sauf pour le béton à base de ciment composé de 20% de déchet de brique dont la résistance. Cela est le résultat de sa grande finesse de mouture plus de 5000 cm²/g) par rapport à celle du ciment Portland (de l'ordre de 3000 cm²/g).

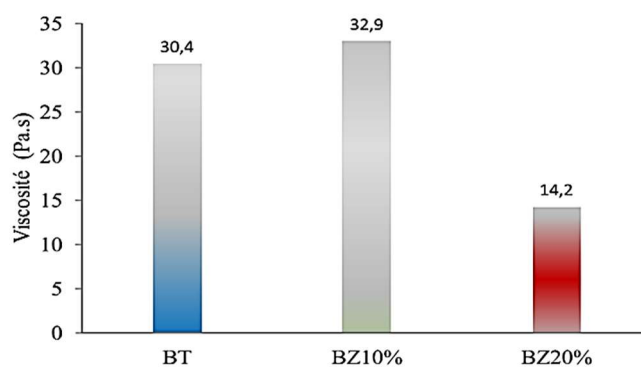


Figure 1.7. Evaluation de la viscosité des différents types de béton [40].

Chapitre 2 . Rhéologie des matériaux cimentaire

2.1 Introduction

La rhéologie est la science qui traite l'écoulement, les déformations des matériaux sous l'effets de contraintes. Un grand nombre de travaux ont été effectués dans le passé sur la rhéologie des matériaux, tels que polymères, huiles multigrades, les peintures, adhésifs, produits agroalimentaires, pharmaceutiques, cosmétiques, ou encore pâtes de ciment, l'étude et la connaissance de comportement rhéologique de ces matériaux hétérogènes tel que le béton est un domaine relativement nouveau. La complexité de ces matériaux imposent des difficultés viennent que le béton est constitué de plusieurs composants de nature différente : granulats, ciment, eau, air, d'adjuvants et ajouts pour modifier quelques propriétés, et d'une grande variation géométrique, particules de dimension inférieure au micron jusqu'aux grains de quelques centimètres. Cette dernière difficulté impose un échantillon représentatif d'étude de dimension importante, et provoque parfois des problèmes de ségrégation et de dilatation pendant l'écoulement.

Le comportement rhéologique des matériaux solide est la mécanique des solides ou bien la physique de ces derniers qui obéit à une équation fondamentale qui établit une relation entre les grandeurs dynamiques responsables du mouvement , les contraintes, les déformation, la dilatation de l'élasticité, la plasticité jusqu'à la rupture et la géométrie des masses, ou plusieurs grandeurs physique ainsi les grandeurs cinématiques qui décrivant ce mouvement, en rhéologie des matériaux liquides, les paramètres rhéologique sont la viscosité le seuil de cisaillement, contrainte de cisaillement et le taux de cisaillement passent par des grandeurs essentiels tel que la géométrie de la pale , le type de rhéomètre utilisé et le choix de profile de vitesse .

2.2 Paramètres rhéologiques

2.2.1 Viscosité

Un liquide au repos peut être considéré comme un ensemble de couches moléculaires parallèles. Soumis à une contrainte tangentielle, 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 la viscosité [41]. La viscosité est la résistance à l'écoulement d'un système soumis à une contrainte tangentielle. Un liquide au repos peut être considéré comme un ensemble de couches moléculaires parallèles. Soumis à une contrainte tangentielle, 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 **la viscosité**. La viscosité est la résistance à l'écoulement d'un système soumis à une contrainte tangentielle.

On distingue différents types de viscosité :

La viscosité dynamique ou apparente : c'est le rapport entre la contrainte de cisaillement et la vitesse de cisaillement du fluide.

$$\mu = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (2.1)$$

La viscosité cinématique : c'est le rapport de la viscosité dynamique à la masse volumique du fluide.

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (2.2)$$

Elle correspond au temps qu'il faut à un fluide pour s'écouler dans un tube capillaire par la force de gravité. Son unité est le m^2/s .

Le Tableau 2.1 représente les définitions des viscosités :

Tableau 2.1. Définitions des viscosités [42].

Type de viscosité	Définition	Expression	Dépendance
Viscosité dynamique η	Résistance au mouvement due aux frottements moléculaires internes, résistance que les molécules de ce fluide opposent aux forces de dissociation et au mouvement.	Pour un fluide idéal, la loi de Newton donne : $\tau = \eta \dot{\gamma}$ (Pa.s) Pour les fluides dits non Newtoniens la grandeur est la viscosité apparente	Essentiellement de la cohésion et du taux de transfert de quantité de mouvement entre les molécules.
Viscosité cinétique μ	Doit son origine à l'utilisation des viscosimètres capillaires utilisant le temps d'écoulement sous l'effet de la pesanteur, qui intègre la masse spécifique de la substance.	Temps d'écoulement $\nu = \eta / \rho$ Avec ρ la densité du liquide et η sa viscosité (en stokes ou m^2/s)	De la densité du liquide et de sa viscosité.

2.2.2 Seuil de cisaillement

Le seuil de cisaillement τ_0 est défini comme étant la contrainte de cisaillement minimum à atteindre pour que le fluide s'écoule. En dessous de cette valeur, ce dernier se comporte comme un pseudo-solide (pas de déformations permanentes).

Le seuil de cisaillement **statique** correspond à la contrainte à fournir afin d'obtenir le premier signe d'écoulement. Le seuil de cisaillement statique peut être déterminé en imposant une contrainte croissante jusqu'à la valeur provoquant l'écoulement de la suspension.

Le seuil de cisaillement **dynamique** correspond à une valeur théorique qui découle de l'extrapolation de la courbe d'écoulement à un gradient de vitesse de cisaillement nul. Il s'agit alors d'une valeur obtenue après la déstructuration du corps. La valeur du seuil de cisaillement statique est logiquement supérieure à celle du seuil de cisaillement dynamique, en raison de l'état de déstructuration de la matière cisailée.

On pourrait croire que ce coefficient suffit à caractériser les propriétés d'écoulement des échantillons, à une température donnée. C'est vrai dans le cas des ***liquides newtoniens*** pour lesquels il y a proportionnalité entre contrainte et vitesse de cisaillement, si bien que la viscosité est indépendante du cisaillement. Mais ce n'est plus vrai dans le cas des ***liquides non newtoniens***, pour lesquels la relation de proportionnalité n'est plus vérifiée, et qui présentent un comportement en écoulement beaucoup plus riche et complexe.

2.2.3 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 qui s'exercent tangentiellement à la surface de la couche, la contrainte de cisaillement (τ) [Couarraze, 2000]. On a l'habitude de rapporter ces forces à l'unité de surface et de définir ainsi ce qu'on appelle la contrainte de cisaillement qu'on notera (τ), et qui s'exprime en pascal (Pa).

Ainsi, la contrainte de cisaillement est la force exercée par unité de surface du fluide :

$$\tau = \frac{dF}{dS} \quad (2-3)$$

Avec :

dS : surface élémentaire d'une couche cisailée.

dF : projection de la force de frottement tangentielle.

Il est bien évident que les mouvements de cisaillement réels ne possèdent pas toujours une symétrie plane de translation. C'est ainsi que la plupart des viscosimètres et rhéomètres sont rotatifs et présentent des symétries cylindriques coaxiales, ou cône-plateau, ou plateau-plateau. De même, ces mouvements de cisaillement ne sont pas toujours engendrés par le déplacement d'une paroi solide. Dans de nombreuses applications, le cisaillement est provoqué par une différence de pression appliquée aux extrémités de l'échantillon, ou encore par le seul effet de la pesanteur : c'est le cas des écoulements dans les tubes cylindriques, qu'il s'agisse de canalisations industrielles, de vaisseaux sanguins, de tubes capillaires.

2.3 Différents comportements rhéologiques des fluides

Il existe plusieurs types de comportements rhéologiques qui se divisent en deux grandes familles : les fluides newtoniens et les fluides non-newtoniens.

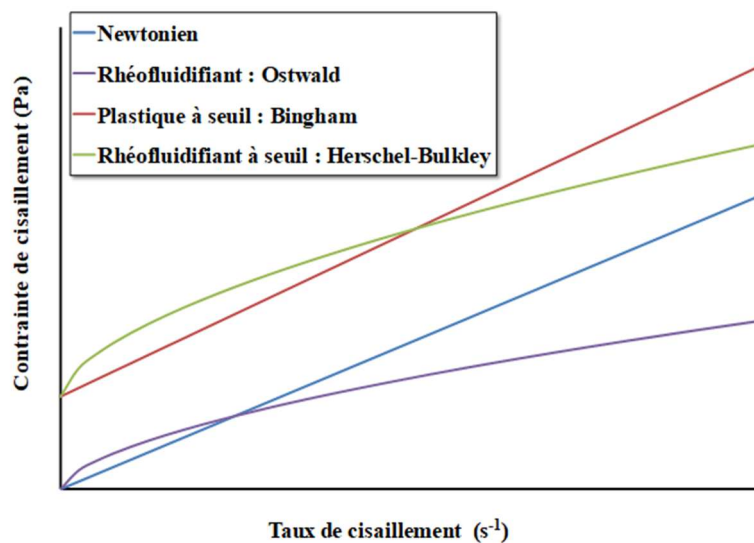


Figure 2.1. Les comportements rhéologiques des fluides.

2.3.1 Fluides newtoniens

Un fluide est dit newtonien lorsque les gradients de vitesse de sa déformation en mouvement sont linéairement proportionnels aux contraintes de cisaillement appliquées (Figure 2.2), d'où on peut écrire la relation qui décrit son comportement rhéologique comme suit :

$$\tau = \mu \dot{\gamma} \quad (2-4)$$

Avec :

μ : la viscosité [Pa.s]

τ : la contrainte de cisaillement [Pa]

$\dot{\gamma}$: le taux de cisaillement [1/s]

2.3.2 Les fluides non-newtoniens

Un fluide est dit non newtonien lorsque le tenseur des contraintes visqueuses n'est pas une fonction linéaire du tenseur des taux de déformation. Dans la famille des fluides non-newtoniens, on distingue plusieurs comportements tels que les fluides à seuil (Binghamien), les rhéofluidifiants, les fluides rhéoépaississants, etc...[43].

a) Fluide Binghamien

Ces types de fluides sont les plus simples des fluides anormaux caractérisés par leur comportement rhéologique particulier. Tandis qu'un fluide newtonien s'écoule sous l'action d'une force de cisaillement infiniment faible, un fluide Binghamien exige une force minimale pour provoquer son écoulement [44]. Pour des forces inférieures à ce seuil, la mixture se comporte comme un solide. On appelle limite d'écoulement, ou résistance au cisaillement, ou seuil de rigidité, la tension de cisaillement à laquelle le fluide commence à s'écouler. Un fluide Binghamien se comporte ensuite comme un fluide normal. Il répond donc à l'équation ci-dessous :

$$\tau = \tau_0 + \mu\dot{\gamma} \quad (2-5)$$

Avec :

(τ_0) et (μ) représentent respectivement le seuil de cisaillement et le coefficient de viscosité.

Généralement, les coulis de ciment, les mortiers et les bétons ont approximativement le comportement d'un fluide Binghamien, avec un seuil de cisaillement, et une viscosité (μ) [44].

b) Fluide rhéofluidifiant

Le fluide rhéofluidifiant, appelé pseudo-plastique, est représenté par un rhéogramme dont la concavité est tournée vers le bas. Pour ces fluides la viscosité décroît lorsque le cisaillement augmente. Ainsi, le liquide devient moins visqueux et donc plus fluide lorsque le cisaillement augmente.

c) Fluide rhéoépaississant

Le fluide rhéoépaississant, appelé dilatant, est représenté par un rhéogramme dont la concavité est tournée vers le haut. Ainsi, le liquide devient plus visqueux et donc plus épais lorsque le cisaillement augmente.

2.3.3 La 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), on dit que ce matériau est thixotrope. Dans le cas contraire, on dit qu'il est anti thixotrope. Ces deux phénomènes sont caractérisés dans la figure. Il faut noter que la thixotropie, ainsi que l'anti thixotropie, sont définies comme étant des phénomènes réversibles.

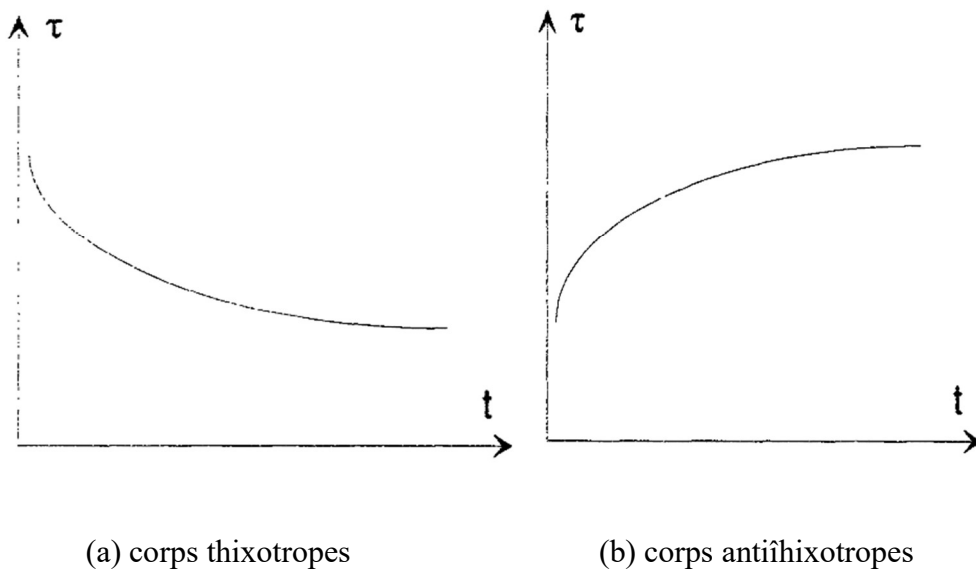


Figure 2.2. Phénomènes thixotropes et antithixotropes.

Certains fluides non newtoniens peuvent avoir un écoulement dont les caractéristiques rhéologiques dépendent des traitements antérieurs. La mesure de cisaillement, et donc la viscosité, peut augmenter ou diminuer avec le temps de cisaillement. Ces changements peuvent être réversibles ou irréversibles. Ces fluides sont définis comme des fluides thixotropiques ou anti-thixotropiques. Si la viscosité est une fonction décroissante de la durée d'écoulement pour un taux de cisaillement constant et que sa structure initiale se régénère après un temps de repos suffisant, il s'agit de la thixotropie. Le rhéogramme issue d'une telle mesure rhéologique

présente une boucle d'hystérésis. Le phénomène inverse, qui est le comportement anti-thixotropique, se traduit par une augmentation de la viscosité apparente avec la durée d'écoulement [45].

La thixotropie se produit toujours dans le cas des fluides rhéofluidifiants (dans le sens que la viscosité diminue avec l'augmentation de τ) et l'anti-thixotropie se produit dans le cas des fluides rhéoépaississants [46].

Les effets de la thixotropie et de l'anti-thixotropie sont illustrés sur la Figure 2.3.

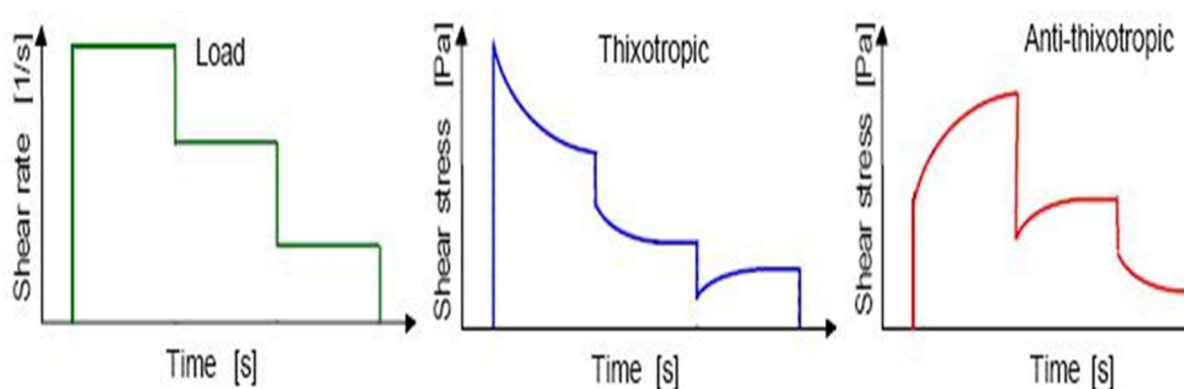


Figure 2.3. Représentation schématique des réponses des matériaux thixotropiques et anti-thixotropiques [46].

2.3.4 La Dilatance

La dilatance est la propriété que certains matériaux ont d'augmenter de volume lorsqu'ils se déforment. En fait, il s'agit particulièrement des matériaux bien compactés, dont la compacité diminue sous cisaillement afin de permettre une déformation ou un écoulement. Le phénomène contraire est la contractante. Il concerne certains matériaux, par exemple, certains sables, mais rarement les bétons.

2.4 Essais de rhéologie existants

Le comportement rhéologique du béton est indispensable pour le bon déroulement d'une construction, il permet de prédire l'énergie nécessaire pour le mettre en place. Pour caractériser ce comportement il existe plusieurs essais à savoir des essais empiriques de maniabilité (cône d'Abrams, l'appareil Vébé, la table à secousses, le maniabilimètre LCPC. et les essais rhéologiques qui donnent plus de précision sur le comportement du béton : essais aux rhéomètres (Two-Point, BML, BTRHEOM, CEMAGREF-IMG, IBB, Lanos, ICAR....).

2.4.1 Le cône d'Abrams

L'essai au cône d'Abrams est un essai normalisé (ASTM C 143 ou NFP 18-451). On remplit un moule tronconique de 300 mm de hauteur en trois couches successives de béton (6 litres environ au total), piquée chacune 25 fois ; puis on démoule le cône et on mesure l'affaissement au centre original de la surface supérieure de l'échantillon. Celui-ci varie de quelques millimètres, voire même zéro pour les bétons très secs (tel un béton routier) à une vingtaine de centimètres pour les bétons très fluides. En raison d'une sensibilité et d'une répétabilité mauvaises pour des bétons très secs et très fluides, cet essai ne convient a priori qu'aux bétons fermes à fluides. Sa superbe simplicité fournissant une certaine qualité est toujours très appréciée jusqu'à aujourd'hui sur chantier comme dans les laboratoires. Cependant, le grand défaut de cet essai est que des bétons ayant les mêmes affaissements peuvent présenter des comportements rhéologiques très différents. Autrement dit, la relation entre l'affaissement au cône et l'ouvrabilité n'est pas toujours univoque. Ceci crée des problèmes plus ou moins graves sur chantier. Actuellement, cet essai est beaucoup utilisé pour contrôler la qualité du béton, d'une gâchée à l'autre et avec une formulation fixée. Une variation anormale de l'affaissement peut être causée par un changement inattendu de formulation ou de matériaux. Néanmoins, pour les travaux de techniques très avancées, il apparaît que la mesure de l'affaissement n'est pas suffisamment sensible. Quant à l'analyse des causes de variation, cet essai montre encore une fois ses limites.

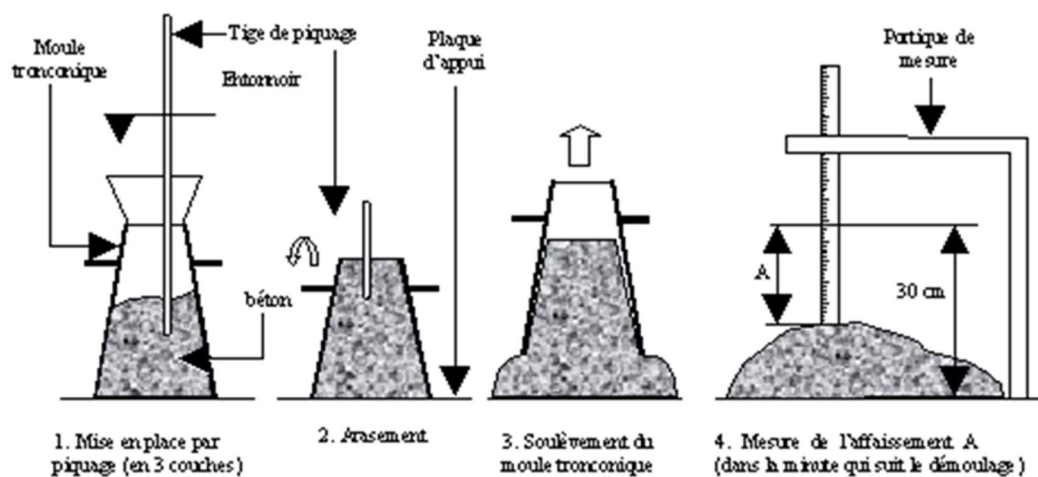


Figure 2.4. Essai au cône d'Abrams [47].

2.4.2 Le maniabilimètre L.C.P.C

L'essai au maniabilimètre est normalisé dans la norme NFP 18-452. Une caisse métallique parallélépipédique à l'extrémité de laquelle est fixé un vibreur, est séparée en deux 16 compartiments par une trappe mobile. 30 litres du béton sont versés dans le compartiment le plus éloigné du vibreur (notons qu'il existe encore une "version mortier" ayant un volume de 1 litre pour les mortiers et bétons dont les dimensions des granulats sont inférieures à 15 mm). L'enlèvement de la trappe met automatiquement en route le vibreur. Le béton s'écoule sous l'effet de la vibration, et le temps nécessaire pour que le béton atteigne un repère tracé sur la paroi, côté vibreur, est considéré comme l'indication de la maniabilité. Il varie de quelques secondes à une minute. Cet appareil convient surtout aux bétons relativement secs du fait qu'il s'agit d'un essai dynamique. La taille considérable de l'appareil (version béton) garantit une excellente répétabilité. Le mode d'emploi est simple. Apprécié pour ses avantages, le maniabilimètre L.C.P.C. est souvent utilisé dans les laboratoires en France. Cependant, pour les bétons fluides, les temps d'écoulement ne sont pas très significatifs. Par ailleurs, son encombrement l'empêche d'être largement utilisé sur chantiers [41].

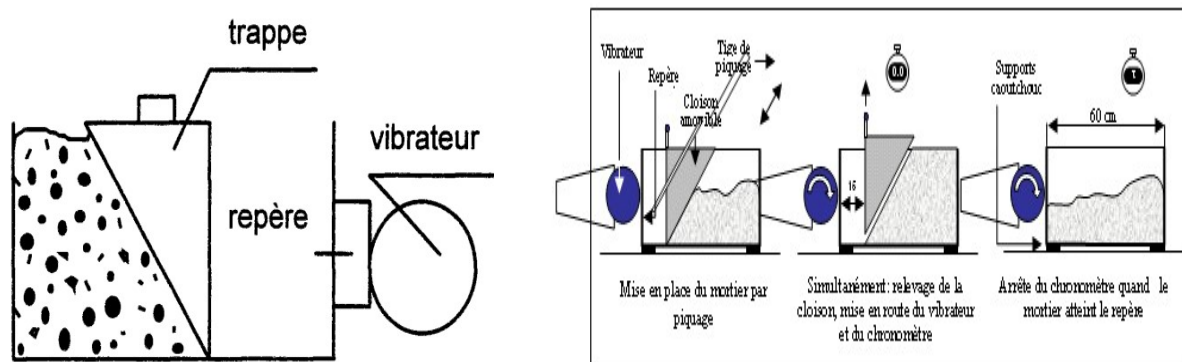


Figure 2.5. Le maniabilimètre LCPC-Type B pour les mortiers [41].

2.5 Les différents types des rhéomètres

L'étude expérimentale des comportements rhéologiques d'écoulement se fait avec des rhéomètres qui permettent tous d'atteindre la mesure de la contrainte T et de la vitesse de déformation $\dot{\epsilon}$. Selon les rhéomètres utilisés, la vitesse de déformation imposée, permet l'obtention de la contrainte de cisaillement ou, vice-versa le comportement rhéologique des matériaux. Ils peuvent être classés grossièrement en trois grandes catégories, selon leur régime de fonctionnement :

- Les rhéomètres fonctionnant en régime permanent, ils permettent de déterminer les caractéristiques en écoulement des substances liquides.
- Les rhéomètres fonctionnant en régime transitoire, ils permettent de déterminer les caractéristiques viscoélastiques des substances liquides ainsi que des solides.
- Les rhéomètres fonctionnant en régime dynamique (sinusoïdal), ils permettent de déterminer de manière très complète les caractéristiques rhéologiques, y compris des propriétés en régime d'écoulement et des propriétés viscoélastiques de matériaux liquides ou solides.

Les rhéomètres fonctionnant en régime permanent permettent largement d'étudier le comportement rhéologique des matériaux cimentaires, ainsi seule cette catégorie sera détaillée ici. Dans cette catégorie, deux types de rhéomètres se distinguent :

- Les rhéomètres de type Couette,
- Les rhéomètres de type Poiseuille.

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

2.5.1 Les rhéomètres de type Couette

Les rhéomètres de type Couette sont des rhéomètres dans lesquelles le fluide étudié est cisailé entre deux surfaces solides dont l'une est fixe et l'autre mobile. Différents modèles existent en fonction de la forme et du mouvement relatif des surfaces solides, 4 variantes se distinguent :

- Les rhéomètres rotatifs aux cylindres coaxiaux.
- Les rhéomètres plans à translation.
- Les rhéomètres rotatifs à cône-plateau.

2.5.2 Les rhéomètres rotatifs à plateau-plateau

Le principe de fonctionnement des rhéomètres rotatifs à plateau-plateau consiste à cisailier un échantillon de fluide entre deux disques parallèles coaxiaux de même rayon R et distant de quelques centimètres. Un disque est fixe, l'autre est en rotation avec une vitesse angulaire Ω constante sous l'effet d'un couple de rotation constant correspondant M . La Figure représente schématiquement le principe de fonctionnement des rhéomètres rotatifs à plateau-plateau [47].

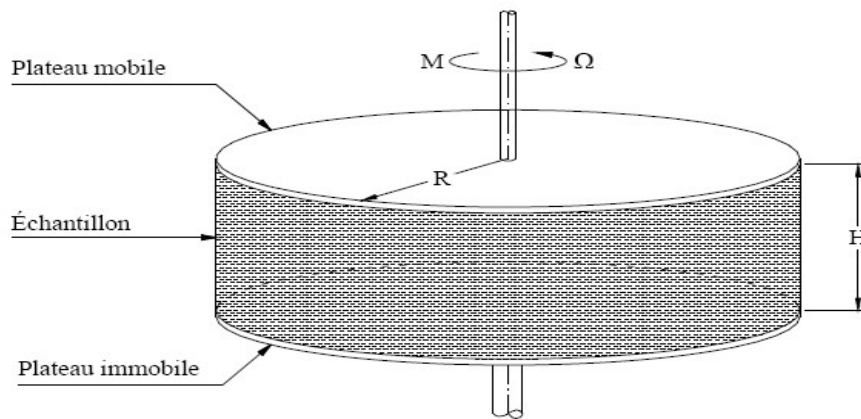


Figure 2.6. Représentation schématique du principe de fonctionnement des rhéomètres rotatifs à plateau – plateau [48].

2.5.3 Les rhéomètres de type Poiseuille.

Le principe de fonctionnement des rhéomètres de type Poiseuille est relativement simple. Le fluide s'écoule dans un tube cylindrique de rayon R et de longueur L , soit sous l'effet de la pesanteur (tube en position verticale), soit sous l'effet d'un gradient de pression (tube en position horizontale soumis à une différence de pression Δp entre ses deux extrémités), soit sous l'effet d'une conjonction de ces deux actions (le tube est en position verticale soumis à une différence de pression Δp entre ses deux extrémités) [47].

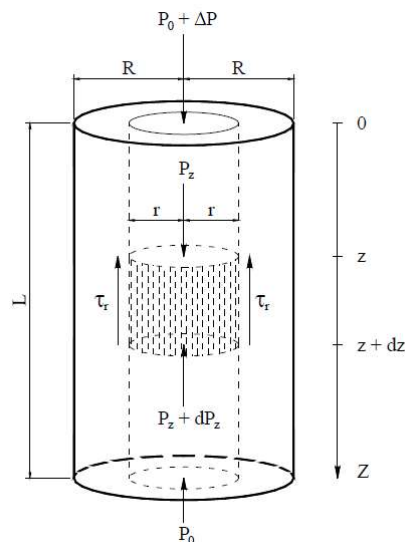


Figure 2.7. Représentation schématique du principe de fonctionnement des rhéomètres de type Poiseuille [48].

La contrainte et le taux de cisaillement sont calculés par les équations suivantes :

$$\tau = \frac{2M}{\pi R^4} r \quad (2.6)$$

$$\dot{\gamma} = \frac{\Omega}{H} r \quad (2.7)$$

2.6 Les rhéomètres à béton adaptés

A l'heure, actuelle, il existe plusieurs rhéomètres adaptés aux bétons avec différentes configurations et à différentes tailles comme : Btrhéom, Cemagref, Two Point, BML, ICAR, etc...

2.6.1 Le rhéomètre Estelle et al.

Le rhéomètre développé par Estelle et al. Est composé de 3 parties :

- Un récipient cylindrique d'un diamètre $D= 35$ cm, avec une paroi interne rugueuse.
- Une pale en acier d'une hauteur $h= 15$ cm et d'un diamètre $d= 15.6$ cm.
- Un moteur équipé d'un capteur de couple de capacité de 100 Nm et d'une vitesse de rotation maximale de 120 tr/min. [49].

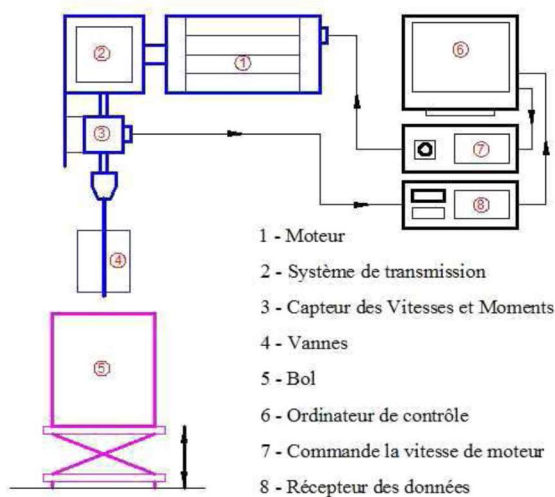


Figure 2.8. Schéma de principe du dispositif expérimental et du rhéomètre à béton [49].

Procédure d'essai :

- Le béton est placé dans le récipient cylindrique.
- Le récipient est levé à l'aide d'une table élévatrice jusqu'à immersion de l'outil dans le béton de façon que la pale soit à l'arase du béton.

- Le logiciel associé permet de générer et lancer le profil de cisaillement présenté dans la Figure 2.19

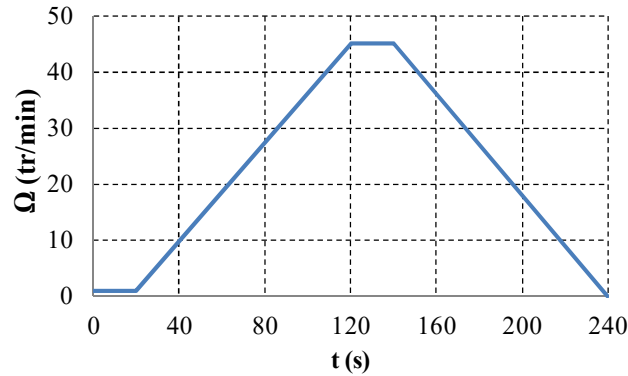


Figure 2.9. Profil vitesse pour le rhéomètre Estellé et al [49].

Exploitation des résultats :

L'exploitation des mesures rhéologiques consiste à déterminer l'évolution de la contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement ($\dot{\gamma}$) à partir des couples ($M_i - \Omega_i$) mesurés. La vitesse de cisaillement s'exprime par les équations (1) et (2), lorsque respectivement le fluide est partiellement cisailé ou complètement cisailé dans l'entrefer [49]–[51].

$$\dot{\gamma} = 2M \frac{\partial \Omega}{\partial M} \quad (2.8)$$

$$\dot{\gamma} = 2 \frac{M \frac{\partial \Omega}{\partial M}}{\left(1 - \frac{R_i^2}{R_e^2}\right)} - \frac{\Omega - M \frac{\partial \Omega}{\partial M}}{\ln\left(\frac{R_i}{R_e}\right)} \quad (2.9)$$

Où R_b et h désignent le rayon et la hauteur de la pale et R_c le rayon du récipient. Ω et M représentent respectivement la vitesse de rotation et le couple correspondant.

Le taux de cisaillement engendré par une vitesse de rotation Ω_i peut donc être calculé par l'équation (I-19) ci-dessous :

$$\dot{\gamma} = \max(\dot{\gamma}_{j[2-8]}; \dot{\gamma}_{j[2-9]}) \quad (2.10)$$

Avec :

$$\frac{d\Omega_j}{dM_j} \cong \frac{\Omega_{j+1} - \Omega_{j-1}}{M_{j+1} - M_{j-1}} \quad i = j \quad \text{et } j = 1, n \quad (2.11)$$

Ainsi la contrainte correspondante à la vitesse de rotation Ω_i s'obtient via l'équation ci-dessous :

$$\tau_i = \frac{1}{2}(\tau_{j-1} + \tau_{j+1}) \quad (2.12)$$

$$\tau_j(M) = \frac{M_j}{2\pi h R_b^2} \quad (2.13)$$

Les équations permettent de passer du couple ($M_i - \Omega_i$) au couple ($\tau_i - \dot{\gamma}_i$) et de déterminer les paramètres rhéologiques du béton testé.

2.6.2 Le rhéomètre Soualhi et al

En 2014, Soualhi et al. Ont développé un nouveau rhéomètre coaxial de type vanne, validé d'abord sur des mortiers, ensuite sur des bétons (Soualhi et al., 2016) [47].

L'appareil est équipé d'un agitateur à régulation électronique de vitesse, intégrant une acquisition informatique du couple et de la vitesse de rotation, piloté par un logiciel « Watch and control » et d'un récipient de 25 cm de hauteur et de 30 cm de diamètre, contenant des tiges réparties et fixées verticalement à sa surface intérieure pour réduire le risque de glissement du matériau cisailé. La pâle utilisée a une forme en double U inversé qui minimise les vibrations du système au cours de l'essai, réduit le phénomène de ségrégation et rend les mesures plus stables (Soualhi et al, 2016). [52], [53].

Le rhéomètre développé par Soualhi est un rhéomètre de type Couette. Effectivement, cette méthode est généralement considérée comme étant la mieux adaptée pour des suspensions concentrées avec un seuil de cisaillement supérieur à 10 Pa. Le principe consiste à mettre en rotation, à différentes vitesses, un cylindre ou une pale dans un échantillon cylindrique de béton frais et mesurer le couple à appliquer pour engendrer la rotation. Dans ce cas, en considérant le fluide Binghamien, le couple nécessaire pour maintenir la rotation évolue linéairement avec la vitesse de rotation [1], [52].

L'utilisation d'une pale a été préférée à celle d'un cylindre. Effectivement, l'insertion d'une pale dans l'échantillon crée une perturbation minimale de l'échantillon Le résultat brut d'un essai réalisé avec le rhéomètre se présente donc sous la forme d'une fonction linéaire :

$$M = M_0 + k \Omega \quad (2.14)$$

Où :

- M (N.m) est le couple total appliqué sur le béton.
- M_0 (N.m) le couple à l'origine.
- k (N.m.s) un coefficient de régression linéaire.
- Ω (rad/s) est la vitesse angulaire de rotation de la pale.

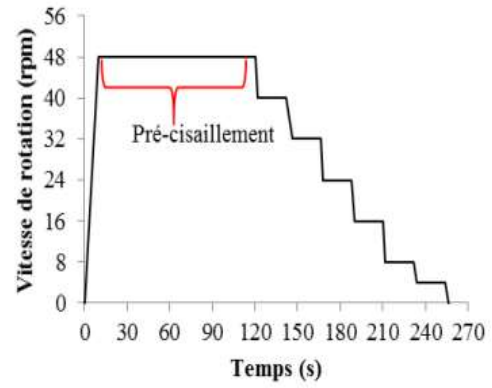


Figure 2.10. Rhéomètre L2MGC et profil de vitesse du rhéomètre Soualhi et al [47].

Chapitre 3 . Matériaux et méthodes expérimentales

3.1 Introduction

Dans ce chapitre nous présentons les différentes étapes et méthodes de caractérisations des matériaux utilisés. L'objectif de ce chapitre est de déterminer les paramètres et les propriétés physiques des matériaux entrant dans la confection de mortier béton équivalent MBE et leurs intérêts durant la formulation, ainsi les facteurs de formulation qui peuvent influencer les grandeurs rhéologiques des matériaux cimentaires. Dans nos expériences, nous décrivons également tous ces facteurs.

Le but de ce travail est d'étudier le comportement rhéologique et l'ouvrabilité des mortiers de béton équivalent à base des déchets de brique de démolition (DBR) et des déchets de brique pure (DBP) comme additions on remplace le ciment par des différents taux de substitutions. Deux additions sont étudiées dans ce travail, brique de démolition et brique pure avec une granularité inférieure à 100 μm quelle est comparable à celle de ciment nous avons effectué des taux de substitutions de 5, 10, 15, 20, 25 et 30% selon un plan de recherche qui vise à avoir des bétons écologiques ayant un impact faible sur environnement.

Ce chapitre présente dans un premier temps les caractéristiques des différents constituants utilisés. Puis, une description de la méthode de formulation, la procédure de malaxage ainsi que les essais de rhéologie et d'ouvrabilité qu'ont été réalisés sur les mortiers à l'état frais, nous terminons cette recherche par la résistance mécanique sur Eco-béton a jeune âge jusqu'à la stabilité.

3.1 Matériaux utilisés

3.1.1 Ciment

Le ciment Portland utilisé est de type CEM I 42,5 R (NF P 15-301), commercialisé par la cimenterie de Biskria (Figure 3.1). Les principales propriétés, physiques du ciment sont données dans l'Annexe.



Figure 3.1. Ciment CEM I 42.5R.

3.1.2 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.

Dans ce travail nous avons suivi une méthode de valorisation est d'élaboration de liant composé par le remplacement d'une partie du ciment par des poudres de brique. L'étude consiste à réaliser des mélanges de MBE avec des fines de brique de démolition recyclé (cf. Figure 3.2) et d'autre de déchets de brique pure (cf.

Figure 3.3). Les briques sont cassées et les fragmenter à l'aide d'une masse avant l'étape de concassage. Ensuite, le concassage avec un concasseur à mâchoire est réalisé afin d'obtenir une poudre. Cette poudre est broyée à l'aide de l'appareil de los Angeles ou 500 tours ont été effectué avec une vitesse de rotation compris entre 31 et 33 tour/min. ensuite, le matériau est finement broyé dans le Micro Deval pendant plus de 18 H et tamisée au tamis de 100 μm . Les fines de brique sont ramenées à une granulométrie proche à celle du ciment avec une finesse de 3010 cm^2/g DBR et de 3050 cm^2/g pour les DBP.



Figure 3.2. Poudre de brique de recyclée (DBR).



Figure 3.3. Poudre de brique pure (DBP).

Au fur et à mesure nous avons déterminé la densité spécifique à travers l'essai de densimètre le Chatelier (cf. Figure 3.4). D'où nous l'avons rempli jusqu'au niveau 0 avec l'éthanol et on verse dedans une masse de 64 g de chaque addition broyée, tamisée et pesée. Puis on agite et on le laisse incliné pour éliminer l'air entraîné par la poudre de brique. Lorsque liquide est stabilisé nous avons lu sur la graduation le volume de la brique introduite et calculé la densité par la formule suivante :

$$\gamma = \frac{m}{V_1 - V_0} \quad (3.1)$$

Nous avons trouvé la densité spécifique de déchets de brique recyclée = 2,64

La densité spécifique de de brique pure = 2,72



Figure 3.4. Densimètre le Chatelier.

3.1.3 Superplastifiants

Dans cette étude nous avons choisi l'utilisation d'un superplastifiant haut réducteur d'eau de troisième génération, fourni par la société Algérienne Granitex et commercialisé et nommé MEDAFLOW 30 (cf. Figure 3.5). Qu'il est compatible avec le ciment CEMI 42,5R ce qui conduit à améliorer considérablement les propriétés des bétons et des mortiers à l'état frais. Sa plage normale d'utilisation est de 0,5% à 2% (en extrait sec) du poids de ciment sous forme de liquide jaunâtre, le MEDAFLOW 30 a une densité, un pH et un extrait sec de 1,07, 6, et 30% respectivement avec une teneur en chlore inférieure à 1 [g/l].



Figure 3.5. Superplastifiant haut réducteur d'eau

3.1.4 Sable

L'analyse granulométrique a été réalisée selon la norme NF EN 933-1, à l'aide d'une tamiseuse électrique (cf. Figure 3.6) où le sable passe à travers une série de tamis décroissante des mailles en (mm) 5 ; 2.5 ; 1.25 ; 0.63 ; 0.315 ; 0.16 ; 0.08.



Figure 3.6. Tamiseuse électrique.

A partir de l'analyse granulométrique on peut déterminer les caractéristiques des granulats et en particulier le module de finesse de sable alluvionnaire qui est défini comme le 1/100 de la somme des refus exprimés en pourcentage sur les différents tamis de la série suivante : 0.16 ; 0.315 ; 0.63 ; 1.25 ; 2.5 ; 5 (mm). A savoir $M_f = 3,71$

La courbe granulométrique présentée dans la Figure 3.7.

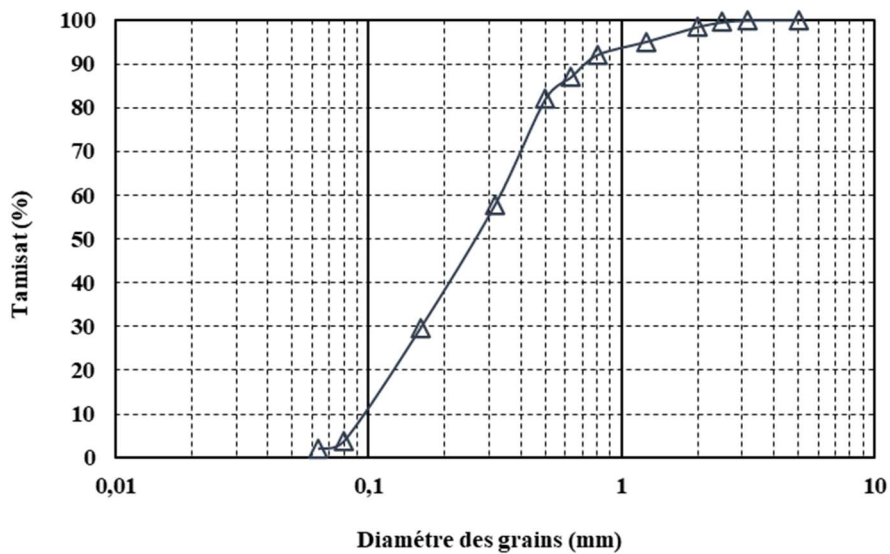


Figure 3.7. Courbe granulométrique du sable

a. Equivalent de sable

L'équivalent de sable (E_s) permet de contrôler la propreté d'un sable et de déterminer le pourcentage des poussières nuisibles. Il a été réalisé conformément à la norme NF P 18-598. Cet essai consiste à plonger une masse de sable dans une éprouvette normalisée remplie par une solution lavante, après agitation, on laisse décanter le mélange pendant 20 minutes, (cf. Figure 3.8) ensuite on mesure la hauteur du sédiment (h_1) et du sédiment + flocculant (h_2). L'équivalent de sable est donné par la relation suivante :

$$E_s = 100 \cdot \frac{h_1}{h_2} \quad (3.2)$$

L'équivalent de sable de notre étude sable est de 77 %



Figure 3.8. Essai de l'équivalent de sable.

b. Masse Volumique spécifique

On entend par masse spécifique la masse de l'unité de volume absolue d'un corps (volume matière plein). L'essai consiste à introduire dans une éprouvette graduée remplie d'un volume d'eau (V_1), une masse de sable (M_a) et on mesure le volume de l'eau et le sable soit (V_2) (cf. Figure 3.9). La masse volumique spécifique du sable peut être calculée par la formule :

$$\gamma_{abs} = \frac{M_a}{V_1 - V_2} \quad (3.3)$$

Dans notre cas la masse volumique de sable alluvionnaire : $\gamma_{abs} = 2600 \text{ kg/m}^3$



Figure 3.9 Essai de la masse volumique spécifique.

c. Coefficient d'absorption

Le coefficient d'absorption d'eau est défini comme le rapport de l'augmentation de masse de l'échantillon entraînée par imbibition partielle en eau, à la masse sèche de l'échantillon dans l'eau pendant 24 heures à 20 °C à la pression atmosphérique.

On procède à un pré-séchage avec un séchoir pour éliminer l'eau entre les grains, pour le sable il faut utiliser le cône et le piston (cf. Figure 3.10) jusqu'à ce que le sable ne soit plus cohérent et par la suite le mettre à l'étuve au point où la masse reste constante et ne change pas. Donc le coefficient d'absorption du sable A_{bs} est déterminé par la formule suivante :

$$A_{bs} = \frac{Mh - Ms}{Ms} \quad (3.4)$$

Pour notre sable le coefficient d'absorption d'eau = 0,84



Figure 3.10. Test de pré-séchage avec le cône et le piston.

3.1.5 Eau de gâchage

L'eau du robinet est utilisée pour la confection des mortiers. Cette eau est potable elle renferme toutes les prescriptions de la norme NF P18-303.

3.2 Méthode expérimentale

3.2.1 Principe de la méthode de mortier de béton équivalent (MBE)

Afin d'étudier le comportement rhéologique apporté par l'incorporation de l'ajouts des fines de déchets de démolition comme addition elle difficile d'étudier l'influence des additions sur le béton à plusieurs pourcentage et même essai au rhéomètre nous avons choisis la méthode de mortier béton équivalent pour simplifier le travail de cette recherche sur les bétons et les mortiers à faible impact environnemental, Elle constitue une méthode rapide et fiable pour la mise au point des bétons adjuvantes et permet de détecter les éventuels incidents rhéologiques pouvant survenir sur chantier. Son principe est basé sur l'existence d'une corrélation simple reliant les propriétés rhéologiques d'un béton au mortier qui le compose. Ce dernier peut être obtenu expérimentalement en tamisant le béton frais au tamis de 5 mm, ou bien à partir d'une composition théorique conduisant aux mêmes propriétés que celles du mortier tamisé [54]. Le MBE consiste à remplacer les graviers du béton par du sable dont la surface développée des grains est égale à celle du gravier que l'on a écarté (cf. Figure 3.11).

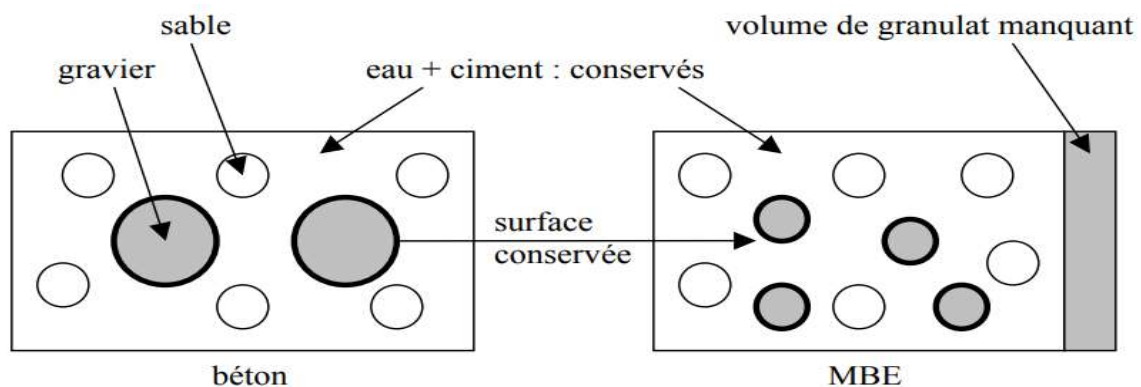


Figure 3.11. Passage du béton au MBE

La composition théorique est déduite directement de celle du béton en corrigeant la quantité de sable de manière à ce que la surface granulaire unitaire du MBE soit la même que celle du béton. Le MBE doit donc être composé en utilisant le sable du béton comme correcteur granulaire.

Les propriétés rhéologiques du MBE sont mesurées à l'aide d'un mini-cône (cf. Figure 3.12) dont les dimensions sont une réduction de celles du cône d'Abrams (rapport d'homothétie de deux). Le mini-cône permet de mesurer l'affaissement ainsi que l'étalement du MBE étudié.

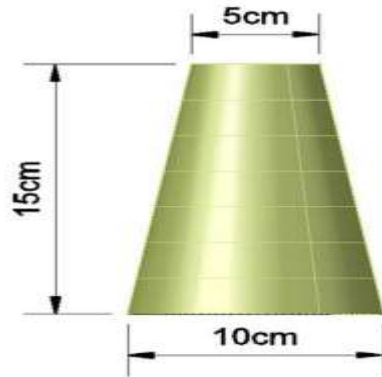


Figure 3.12. Mini cône.

3.2.2 Formulation de mortier de béton équivalent (MBE)

Dans un premier lieu, il est nécessaire de formuler un béton initial. Il existe de nombreuses méthodes de formulation de bétons, comme par exemple celles de Dreux-Gorisses, de Bolomey, de Faury, d'Abrams, de Vallette et de Joisel. Elles sont de nature empirique. La méthode la plus pratiquée est celle de Dreux-Gorisses.

Il s'agit d'un béton plastique (affaissement au cône d'Abrams $A = 7 \pm 2$ cm). L'étude de la composition du béton consiste à définir le mélange optimal des différents granulats ainsi que le dosage en ciment et en eau afin de réaliser un béton dont les qualités soient celles recherchées. Par la suite a été reconduit avec l'utilisation des superplastifiants (SP).

La formule de béton, trouvées théoriquement, a été réalisée expérimentalement, dont ces proportions sont présentées dans le Tableau 3.1.

Tableau 3.1. Composition de béton pour un mètre cube

Ciment (kg/m ³)	Eau (kg/m ³)	Sable (kg/m ³)	Gravier 3/8 (kg/m ³)	Gravier 8/15 (kg/m ³)	Affaissement (cm)	Résistance à 28j (MPa)
350	140	707,1	135,5	898,1	7	45

Face aux progrès techniques, à l'apparition des nouvelles gammes de bétons, à l'emploi fréquent des adjuvants et à l'utilisation des additions on se trouve confronter à un nombre croissant de variables non maîtrisées par la méthode de formulations déjà citées. Il nous est donc apparu nécessaire de recourir à des méthodes de MBE.

La formulation de MBE a été faite directement à partir de la composition du béton initiale. Les mêmes constituants et les mêmes dosages ont été conservés, excepté les gravillons qu'ils ont été retirés. Toutefois, il faut considérer que les quantités de pâte et de particules fines de sable qui adhèrent aux gravillons sont proportionnelles à la surface des gravillons. Donc les surfaces spécifiques des sables et des gravillons utilisés ont été déterminés et présentés dans les Tableau 3.2 et Tableau 3.3.

Tableau 3.2. La surface développée du mélange des graviers.

T _{mi}	0,5	1,25	2,5	5	6,3	8	10	12,5
TM _i	1,25	2,5	5	6,3	8	10	12,5	16
d _i (mm)	0,875	1,875	3,75	5,65	7,15	9	11,25	14,25
M _{ui} (g)	4,69	64,65	36,69	838,21	184,09	85,14	175,31	187,54
v _i (mm ³)	0,35	3,45	27,60	94,39	191,29	381,51	745,14	1 514,34
s _i (mm ²)	2,40	11,04	44,16	100,24	160,52	254,34	397,41	637,62
ρ _g (kg/ m ³)	2543,45							
ω (m ³ /kg)	39.10 ⁻⁵							
V _i .10 ⁶ (mm ³)	0,002	0,025	0,025	0,327	0,072	0,0033	0,068	0,073
N _i	5215,28	7308,55	913,57	3463,33	375,31	87,04	91,76	48,04
S_i (mm²)	12537,85	80679,52	40339,76	347152,73	60246,03	22136,62	36464,70	3063,41
SD (mm ²)	630188,61							

Tableau 3.3. La surface développée du sable.

T _{mi}	0,08	0,16	0,315	0,63	1,25	2	5
TM _i	0,16	0,315	0,63	1,25	2	5	6,3
d _i (mm)	0,12	0,2375	0,4725	0,94	1,625	3,5	5,65
M _{ui} (g)	98,71	110,38	14,42	177,06	30,19	34,15	0
v _i (mm ³)	0,0009	0,007	0,06	0,435	2,25	22,44	0
s _i (mm ²)	0,05	0,18	0,70	2,77	8,29	38,47	0
ρ _g (kg/ m ³)	2610						
ω (m ³ /kg)	38.10 ⁻⁵						
V _i .10 ⁶ (mm ³)	0,038	0,043	0,006	0,069	0,012	0,013	0
N _i	42570497,61	6140151,79	101904,13	158861,19	5243,66	593,62	0
S_i (mm²)	1924867,62	277633,10	18048,81	111365,61	14548,57	4922,05	0
SD (mm ²)	2351385,76						

Donc la quantité du sable nécessaire (S') dans le mortier est 992.52 kg/m³

Après le calcul des surfaces développées, on a déduit la composition de mortier de béton équivalent. Les proportions du mélange de MBE, sont présentées dans le Tableau 3.4.

Tableau 3.4. Proportion des MBE pour 1m³.

Sable (kg)	Ciment (kg)	Eau de pré-humidification (kg)	Eau (kg)	Affaissement (cm)	SP (%)
992,52	350	20,135	140	10	0,94

3.2.3 Plan expérimental

Afin de pouvoir étudier le comportement rhéologique des éco-bétons à base de déchets de démolition. Cette étude est effectuée avec deux types d'additions à différents taux de substitutions. Pour réduire l'impact environnemental du béton, les déchets de démolitions et des déchets de briques pures sont étudiés. Ces nouvelles fines ont été ajoutés en tant qu'addition minéral en substitution au ciment en masse dont les proportions de mortier à 5, 10, 15, 20, 25 et 30%.

3.3 Préparation des mortiers

3.3.1 Malaxage

Les propriétés rhéologiques varient énormément selon le mode de malaxage et le dosage des constituants employés. Avant tout travail, le mode de malaxage doit être désigné selon les moyens disponibles et la quantité de mortiers à préparer. Le malaxeur disponible au niveau de laboratoire de recherche en génie civil est utilisé pour la confection des mortiers de ciment. Cet appareil normalisé (EN 196-1), sur lequel se base pratiquement toutes les normes pour la préparation du mortier, est caractérisé par deux vitesses de rotation selon le mode de préparation choisi.

La procédure de malaxage et le mode d'introduction de l'adjuvant utilisé pour fabriquer les mortiers sont décrits ci-dessous. Chaque type de mortier a été confectionné en suivant les étapes suivantes :

- Introduire le sable plus une quantité d'eau égale à l'absorption du sable augmenté de 1%. Malaxer 2 minutes à petite vitesse.
- Laisser reposer pendant 5 minutes en prenant soin de protéger le récipient contre l'évaporation.
- Introduire le ciment et l'addition minérale et malaxer 30 secondes à petite vitesse.
- Introduire les 2/3 d'eau de gâchage et continuer à malaxer pendant 30 secondes à petite vitesse.
- Introduire l'eau restante et SP et continuer à malaxer pendant 30 secondes à petite vitesse.
- Malaxer 30 secondes à grande vitesse.
- Racler le fond et le pourtour du bol pendant une minute et demi.
- Malaxer une minute à grande vitesse

3.4 Caractérisation des MBE

Tous les MBE sont caractérisés à l'état frais, l'affaissement et le temps d'écoulement sont déterminées par le mini cône, et le maniabilimètre (LCPC).

3.4.1 Essai au mini cône

Essai d'ouvrabilité Tous les MBE sont caractérisés à l'état frais, l'affaissement et le temps d'écoulement sont déterminées par un mini cône, et le maniabilimètre (LCPC B) L'essai d'affaissement est l'essai normalisé le plus utilisé pour la mesure de l'ouvrabilité. Il consiste à remplir le mini-cône en trois couches de volumes semblables et piquer 15 fois chacune, araser la surface du mini-cône et le soulever en ± 2 secondes et ce, le plus verticalement possible. Une fois le mini-cône est soulevé mesurer l'affaissement au niveau du point le plus haut (cf. Figure 3.13).



Mortier témoin



DBR/DBP

Figure 3.13. Essai d'affaissement pour mortier.

3.4.2 Essai au Maniabilimètre (LCPC) Type B

L'essai d'écoulement effectué selon la norme NF P18-452. Le temps d'écoulement est mesuré à l'aide d'un maniabilimètre à mortier de dimensions (180 x 90 x 90mm) (cf. Figure 3.14).



Figure 3.14. Maniabilimètre LCPC type B.

Il s'agit du temps nécessaire à un volume de mélange frais pour atteindre un trait repère tracer sur le maniabilimètre sous l'effet de vibration.

3.4.3 Essai au rhéomètre

Le rhéomètre utilisé est un rhéomètre de type Couette développé par l'équipe de recherche de l'université de Cergy Pontoise (cf. Figure 3.15). Ce type est généralement considéré comme étant le mieux adapté pour des suspensions concentrées possédant un seuil de cisaillement. Le principe consiste à mettre en rotation, à différentes vitesses, un cylindre ou une pale dans un échantillon cylindrique de mortier frais et de mesurer le couple appliqué. L'utilisation d'une pale a été préférée à celle d'un cylindre où son insertion dans l'échantillon crée une perturbation minimale par rapport à l'insertion d'un cylindre, ce qui est un avantage pour les matériaux thixotropes comme le mortier. Après la mesure de l'affaissement, on verse le mortier préparé dans le récipient qui sera fixé pour éviter tout mouvement. Ensuite, on fait descendre le croisillon au centre du récipient qui pénètre au centre du mortier. Il faut s'assurer que l'extrémité supérieure des ailes du croisillon se situe à l'araser du mortier. A l'aide du logiciel et l'essai rhéométrique, on démarre la rotation du croisillon en suivant un profil de vitesse approprié (cf. Figure 3.16).

L'essai rhéologique se déroule selon les étapes suivantes :

- 1^{ère} étape : mesure des couples à vide (M_{vide}). Ils correspondent aux couples à imposer pour maintenir les vitesses en phase de palier lorsque le récipient est vide.
- 2^{ème} étape : positionnement de la pale. Elle est centrée (suivant le diamètre du récipient) puis plongée au milieu la pale jusqu'à l'arase du MBE.
- 4^{ème} étape : mesure des couples totaux (M_{total}). Ils correspondent aux couples à imposer pour maintenir les vitesses en phase de palier lorsque le récipient est rempli.
- 5^{ème} étape : calculs des couples finaux (M). Les couples finaux s'obtiennent par la différence entre les couples totaux et les couples à vides pour chaque palier de vitesse.
- 6^{ème} étape : exploitation des mesures et calculs des paramètres rhéologiques.



Figure 3.15. Rhéomètre utilisé.

3.4.4 Profil de vitesse imposée

Le profil de vitesse utilisé est choisi sur la base d'une série d'essai qui consiste à trouver le profil de vitesse permettant d'avoir les mesures les plus stables en minimisant le phénomène de ségrégation. Le profil utilisé doit avoir suffisamment de points pour pouvoir bien caractériser le comportement du mortier. Les paliers de vitesse imposés doivent être espacés pour bien distinguer les différentes paires (Ω , M). La Figure 3.16, illustre le profil choisi pour le déroulement des essais.

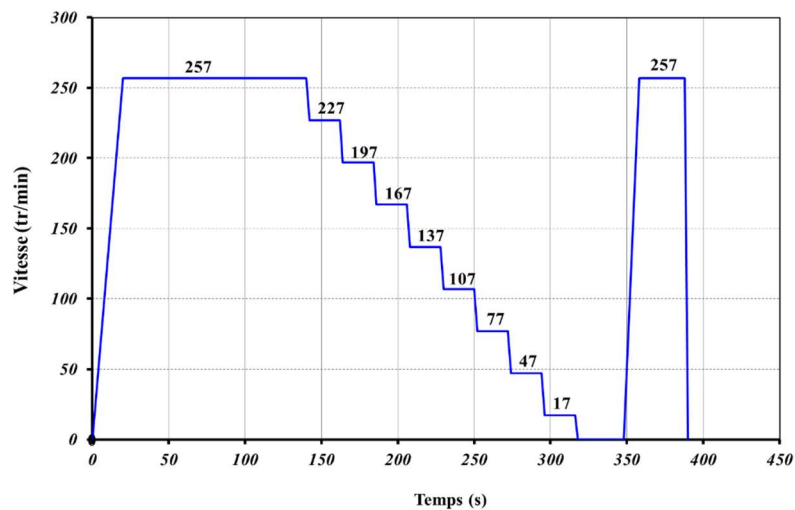


Figure 3.16. Profil de vitesse utilisé.

3.4.5 Essai de résistance à la compression

La résistance à la compression est déterminée selon la norme EN 196-1, sur des éprouvettes de mortiers de béton équivalent. L'essai consiste à remplir un moule (4x4x16 cm) de trois éprouvettes, avec MBE en deux couches et en appliquant au moule 60 chocs.

Ensuite les moules sont couverts par un film plastique et conservés dans le laboratoire à $20\text{ °C} \pm 1$. Après 24 heures, ces éprouvettes ont été démoulés et entreposées dans l'eau saturée en chaux à 20 °C jusqu'à 28 jours (cf. Figure 3.17). L'essai de compression se fait sur six morceaux écrasés par flexion. L'éprouvette est soumise à une charge croissante jusqu'à la rupture moyennant d'une presse hydraulique de capacité de 1000 kN. L'éprouvette obtenu après rupture en flexion seront rompus en compression comme indiqué sur la Figure 3.18. Et en déduit la résistance à la compression.



Figure 3.17. Eprouvettes des mortiers.



Figure 3.18. Essai d'écrasement des éprouvettes

Chapitre 4 . Résultats et discussions

4.1 Introduction

L'étude présente est basée sur l'emploi de déchets de démolition sous forme de poudres fines comme additions, à savoir les déchets de brique. On étudie en particulier l'effet de ces additions sur le comportement rhéologique et mécanique. Ce chapitre regroupe tous les résultats des différents essais réalisés sur MBE-DBR et MBE-DBP en remplaçant le ciment par des taux de substitution de 5, 10, 15, 20, 25 et 30% de déchets de brique.

Notre objectif est d'étudier l'effet de fine de brique de démolition recyclée et pure comme ajout cimentaire sur le béton à partir des MBE en déterminer le dosage optimal, qui donne les meilleurs performances rhéologiques et mécaniques.

4.1.1 Etude rhéologique de mortier MBE à base de poudre de déchets de brique

Les poudres employées dans ce travail, sont des poudres de brique. Ces poudres proviennent de deux sources différentes ; l'une de chantier de démolition et l'autre de déchets de briqueterie. Ce sont des matériaux alternatifs pour la construction, fabriqués par concassage et broyage des déchets du BTP. Ces matériaux complexes sont majoritairement composés de matériaux de démolition (béton, mortier, brique, enduit etc.). Les propriétés des poudres comme additions sont très dépendantes de leur nature et pareillement aux autres additions similaires, ils peuvent présenter un effet important sur la rhéologie.

Rappelons d'abord que l'objectif est de caractériser les propriétés rhéologiques de MBE à base de poudre de brique de démolition et ses paramètres, mesurons la viscosité le seuil de cisaillement et la résistance à la compression à 7, 14 et 28 jours. Toutefois, l'étude de l'influence de l'incorporations de poudre de brique lors la confection des MBE afin de formuler un béton à faible impact environnemental, est de comparer leurs propriétés pour valoriser leurs utilisations dans le domaine de constructions comme des éléments structuraux.

Un programme expérimental est structuré pour étudier le comportement rhéologique de deux additions : déchets de brique de démolition (DBR) et déchets de brique pure (DBP). On a réalisé tout d'abord les essais d'ouvrabilité, étudions l'effet des taux de substitutions sur l'écoulement de MBE (essai d'affaissement) puis le temps d'écoulement (essai LCPC), suivi

par un essai au rhéomètre adapté développé au niveau de laboratoire L2MGC par Soualhi et al. Ce travail est finalisé par l'élaborations des éprouvettes prismatiques de mortiers de béton équivalent ces éprouvettes ont été démoulés et entreposés dans l'eau saturée en chaux à 20 °C jusqu'à 7, 14, et 28 jours de l'écrasement. Le Tableau 4.1 et Tableau 4.2 résume les résultats obtenus.

Tableau 4.1. Résultats des paramètres rhéologiques des MBE à base de déchets de brique de démolition.

Additions	0%	5%	10%	15%	20%	25%	30%
A_{ff} (cm)	10,00	12,00	12,60	13,00	14,70	13,00	13,40
T_{Lcpc} (s)	4,62	4,50	4,32	2,79	1,12	2,28	1,64
μ (Pa.s)	9,65	5,54	5,12	6,39	4,25	5,92	5,97
τ₀ (Pa)	28,29	16,96	15,92	20,67	11,862	18,60	19,33

Tableau 4.2. Résultats des paramètres rhéologiques des MBE à base de déchets de brique pure.

Additions	0%	5%	10%	15%	20%	25%	30%
A_{ff} (cm)	10,00	12,50	12,70	13,20	14,70	13,50	13,70
T_{Lcpc} (s)	4,62	2,68	2,59	2,34	1,09	2,23	2,14
μ (Pa.s)	9,65	5,78	5,19	6,30	4,43	4,53	5,51
τ₀ (Pa)	28,29	17,12	16,092	20,09	13,60	14,53	17,43

La Figure 4.1 représente les rhéogrammes des MBE en fonctions de dosages d'addition et l'évolution de l'effet de la poudre de brique de démolition sur le mortier. Le rhéogramme représente l'évolution de la contrainte de cisaillement en fonction de taux de cisaillement.

Cette figure montre que l'incorporation de taux de substitutions de 5, 10, 15, 20, 25 et 30% de la poudre de brique de démolition a entraîné une forte diminution de contrainte de cisaillement à des taux de cisaillement comparable et toutes les courbes d'écoulement sont placés au-dessous de la courbe de MBE 100% ciment.

Cette expérimentation permet d'observer une forte diminution de la contrainte à certain taux de substitution. Il est évident que le taux de 20 % offre un faible taux de cisaillement ce que signifie l'augmentation de la maniabilité, cette dernière montre que le matériau peut facilement s'écouler. Au-delà de 20% les taux de cisaillements augmentent par rapport à celle de 20% de substitution. Pour les MBE à base des fines de brique pure, des résultats similaires ont été aussi observées (cf. Figure 4.2).

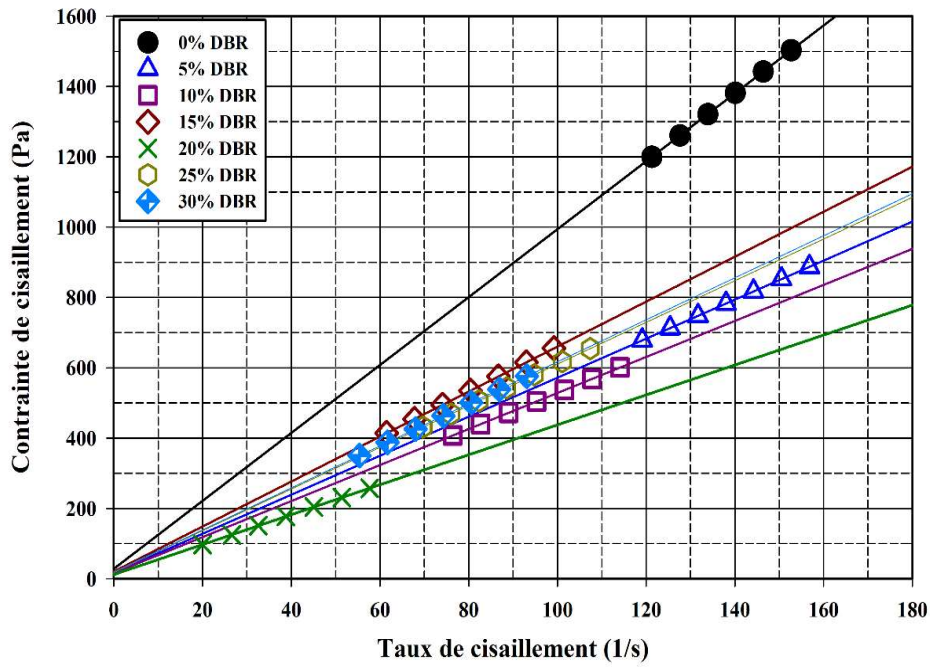


Figure 4.1. L'effet de poudre de brique recyclée sur le comportement rhéologique de mortier MBE.

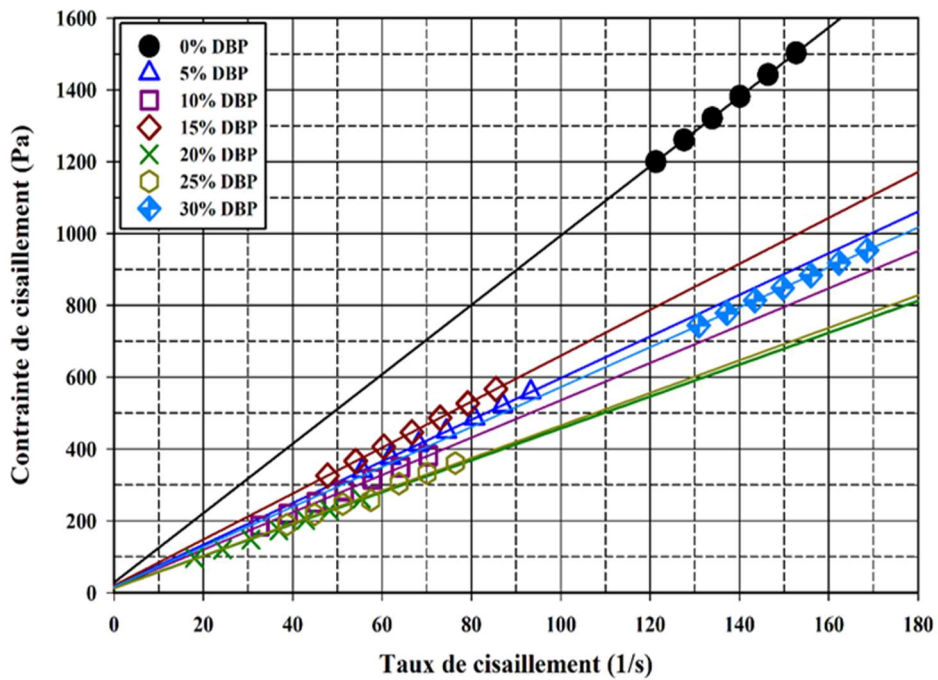


Figure 4.2. L'effet de poudre de brique pure sur le comportement rhéologique de mortier MBE.

4.1.2 Paramètres rhéologiques

L'effets de poudre de brique sur le comportement rhéologique est défini par leur paramètres (viscosité plastique et seuil de cisaillement).

Les Figure 4.3 et Figure 4.4, montrent l'évolution de ces paramètres en fonction de taux de substitution pour chaque type de poudre de brique.

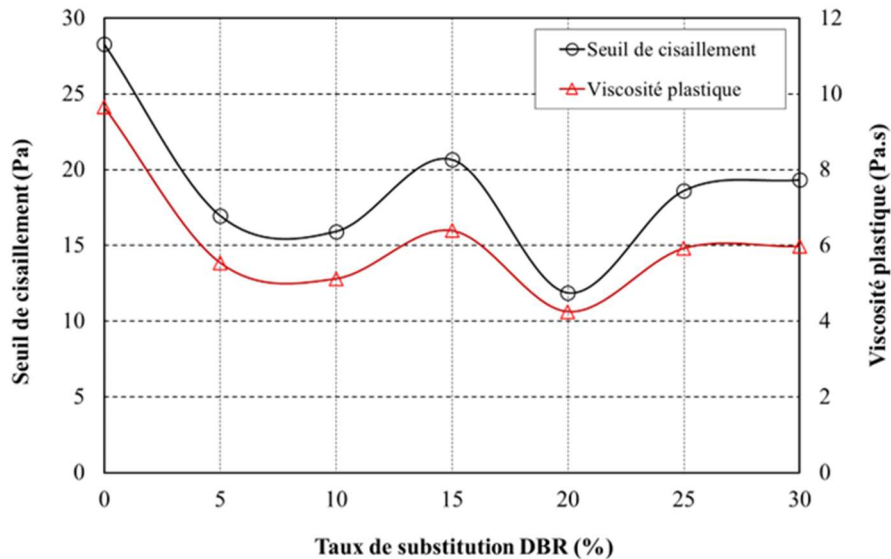


Figure 4.3. Effet de taux de substitution sur les paramètres rhéologiques de DBR.

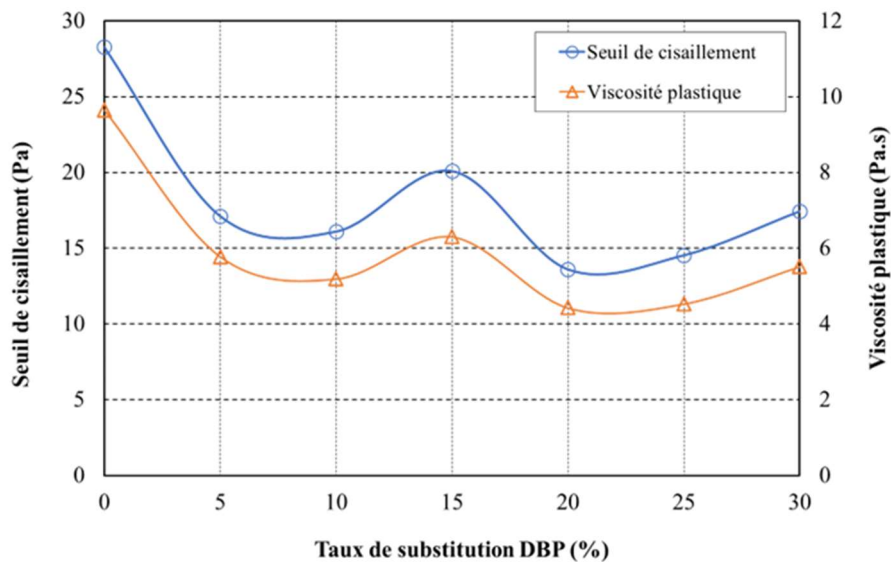


Figure 4.4. Effet de taux de substitution sur les paramètres rhéologiques de DBP.

Les résultats montrent que l'utilisation de fine de déchets de brique finement broyée, diminue les paramètres rhéologiques pour tous les mélanges étudiés. Les Figures, montrent

aussi que les valeurs du seuil de cisaillement et de viscosité inférieures à celle du mortier témoin et que le taux de 20% apporte un meilleur comportement rhéologique.

Un effet décroissant est observé quand le taux dépasse la valeur optimale, les paramètres augmentent respectivement pour le taux de 25% et 30%. Irki et al. [26], indique que les mélanges contenant plus de 20% de poudre de brique recyclée auront une faible capacité d'écoulement. La poudre de brique améliore la fluidité du mortier.

La Figure 4.5, représente une comparaison des viscosités plastiques pour les deux types de poudres (DBR et DBP).

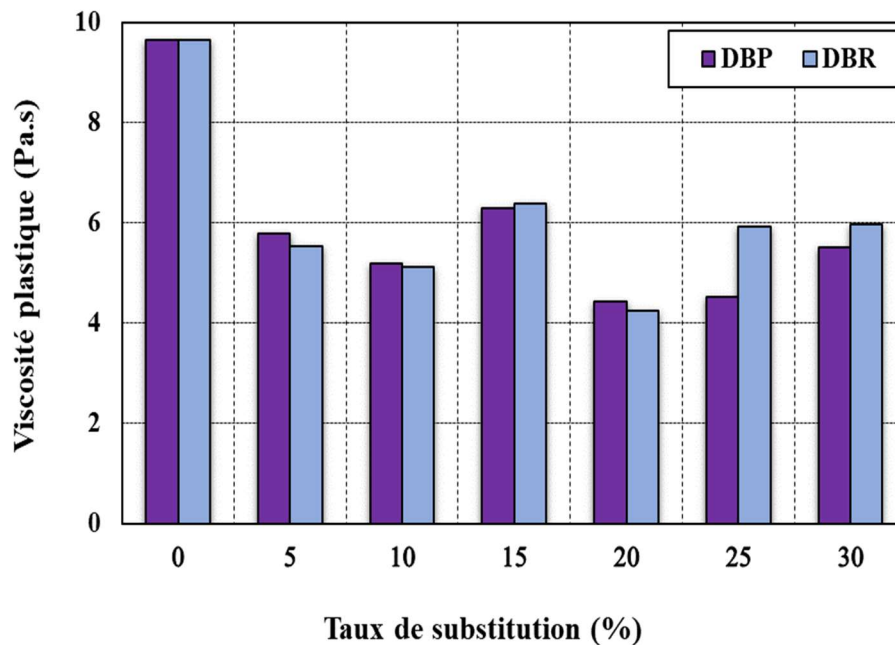


Figure 4.5. Variation de la viscosité plastique pour les deux types des additions.

On constate que les deux ajouts ont une variation similaire de la viscosité plastique avec un optimum de 20% de substitution, où la viscosité plastique a subi une diminution de l'ordre de 54 et 56% pour DBP et DBR respectivement. Au-delà de 20% de substitution une augmentation a été constatée pour les deux types d'ajouts. Cette augmentation est plus prononcée pour le DBR. Cela est dû probablement à la demande en eau des ajouts recyclés qui est plus élevée à celle des ajouts purs [26].

La Figure 4.6 représente une comparaison des seuils de cisaillements pour les deux types de poudres (DBR et DBP). On constate que les deux poudres ont une variation similaire du seuil de cisaillement jusqu'à de 15% de substitution. On constate un optimum à 20% de substitution qui coïncide avec l'optimum de la viscosité plastique, avec à une diminution de 52 à 58% pour DBP et DBR respectivement. Au-delà de 20% de substitution une augmentation a été constatée pour les deux types d'ajouts. Cette augmentation est plus prononcée pour le DBR, est similaire à celle de la viscosité plastique. Cela est dû probablement toujours à la demande en eau des ajouts recyclés

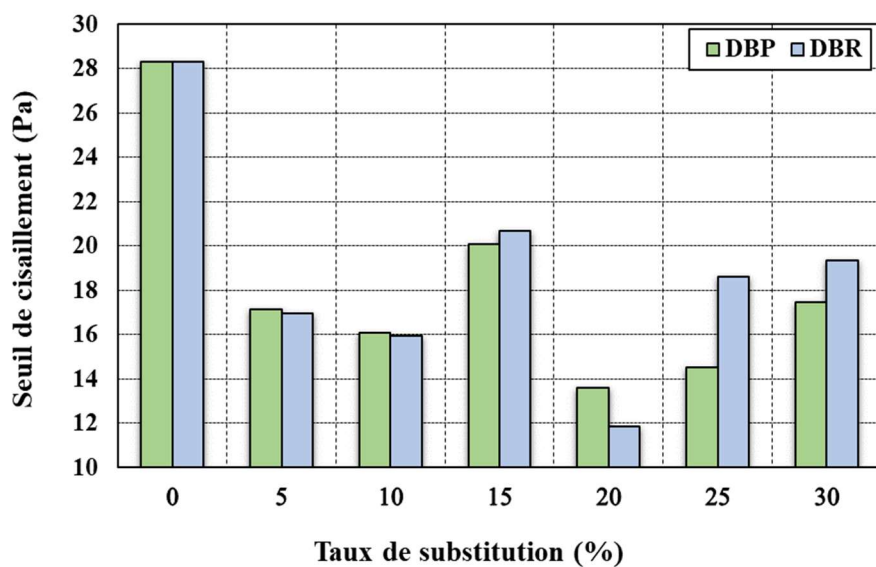


Figure 4.6. Variation de seuil de cisaillement pour les deux types des additions.

4.1.3 L'affaissement au mini cône

La Figure 4.7 présente les résultats de l'essai d'affaissement en fonction des taux de substitution pour les différents types de fines de brique. Elle permet de visualiser l'effets des ajouts sur la maniabilité des MBE. Les résultats montrent que la fluidité des MBE augmente avec tous les taux de substitution testés par rapport à MBE de référence. On remarque aussi que l'affaissement la plus élevée est obtenu à un taux de 20% pour les deux types de fines, avec une valeur de 14.7 cm et augmentation d'affaissement de l'ordre de 47%. Au-delà de 20% de substitution on constate une légère diminution d'affaissement pour les deux types de fines par

rapport à l'optimum. Cette diminution est de l'ordre de 7.5% et 10% pour le MBE-DBP et MBE-DBR respectivement.

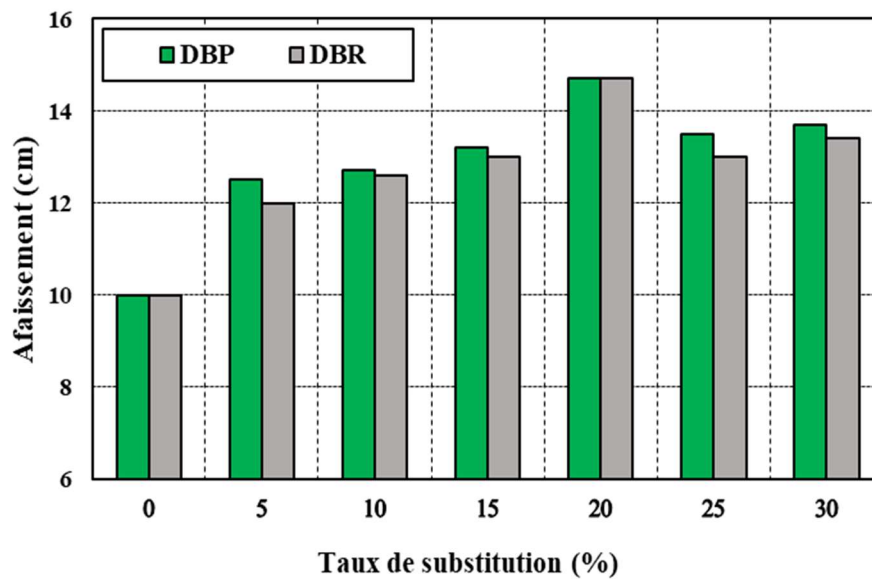


Figure 4.7. Variation d'affaissement en fonction de taux de substitution.

4.1.4 Essai temps d'écoulement

Les résultats du temps d'écoulement par la boîte LCPC ne mesurent pas la viscosité mais donne une indication sur le comportement rhéologique du mortier et la vitesse d'écoulement. Un béton avec une grande viscosité aura un débit initial très lent.

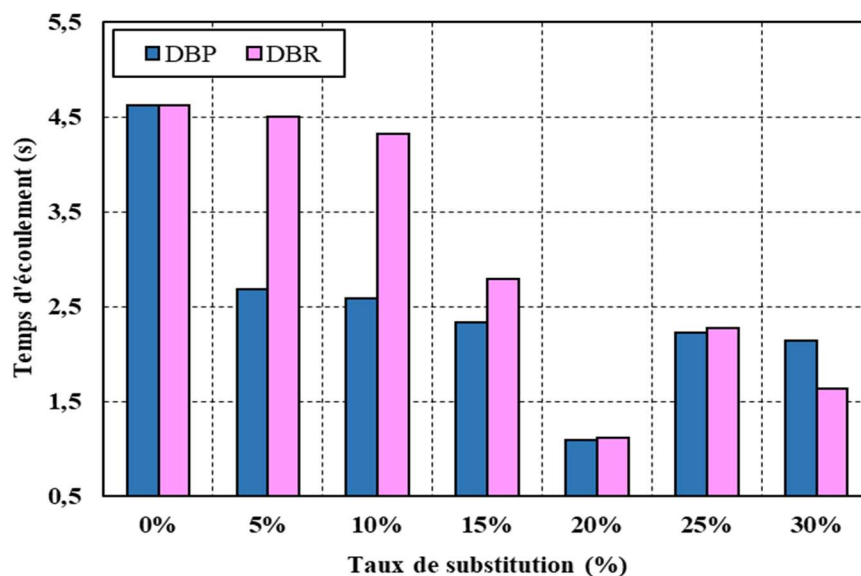


Figure 4.8. Influence de taux de substitution sur le temps d'écoulement.

L'effet de déchets de brique sur le temps d'écoulement est représenté sur la figure 4.4 le résultat obtenu montre que l'incorporation de déchets de brique fine dans la formulation de MBE diminue significativement le temps d'écoulement au maniabilimètre pour les deux types de fines et par conséquent augmente significativement la fluidité de matériaux. Les résultats montrent un optimum avec le taux de 20%, où on a une diminution de 70% par rapport au mortier avec 100% ciment. Cette diminution peut être expliquée par l'effet des fillers qui libèrent l'eau piégée entre les grains de ciment. Cette eau contribue à la fluidification des mélanges [55].

Ces résultats montrent une corrélation entre le temps d'écoulement mesuré avec le maniabilimètre et la viscosité mesurée au rhéomètre (Cf. Figure 4.5), où on constate que l'incorporation de déchets de brique influence le temps d'écoulement et la viscosité en fonction de l'ajout d'addition.

Yahia et al. [55], ont réalisé une étude sur l'effet des fillers sur le comportement rhéologique. Ils ont expliqué que les fillers remplacent les vides dans la structure cimentaire du mortier libèrent toutefois l'eau piégée dans les vides et augmentent l'affaissement, et par conséquent une diminution de seuil de cisaillement.

Par contre les résultats obtenus au-delà de 20% (25% et 30%) le comportement des mélanges devient moins fluide et plus visqueux. Ceci est dû probablement à l'absorption de l'eau par les fines.

Par ailleurs, les mesures obtenues lors de l'incorporation de fines de brique pure montrent une plus grande chute de temps d'écoulement comparée à celle des déchets de démolition. Ceci montre que les fines pures de brique ont une influence sur le temps d'écoulement plus importante que celle de déchets de démolition recyclés.

4.2 Corrélation entre le seuil de cisaillement et l'affaissement

4.2.1 Déchets de brique de démolition

Plusieurs chercheurs ont montré que l'affaissement au cône d'Abrams permet de définir pour les bétons ordinaires le seuil de cisaillement [56], [57]. La connaissance de l'affaissement permet de déterminer une valeur approximative du seuil de cisaillement.

La Figure 4.9, représente l'évolution de seuil de cisaillement en fonction de l'affaissement pour les mortiers de déchets de brique recyclés. La figure montre que lorsque

l'affaissement augmente le seuil de cisaillement diminue remarquablement. Ce qui suggère que le seuil de cisaillement dépend de l'affaissement. Cela peut être expliqué par le fait que le seuil de cisaillement est influencé par l'interaction intergranulaire avec la même manière que l'affaissement.

Cette évolution montre qu'il y a une corrélation entre l'affaissement et le seuil d'écoulement (Figure 4.9). On peut proposer une simple corrélation pour estimer le seuil de cisaillement par l'intermédiaire d'une équation polynomiale de 2^{ème} degré suivante :

$$\tau_0 = 0.2105A_{ff}^2 - 8.1429A_{ff} + 87,752 \quad \text{avec} \quad R^2 = 0,7318$$

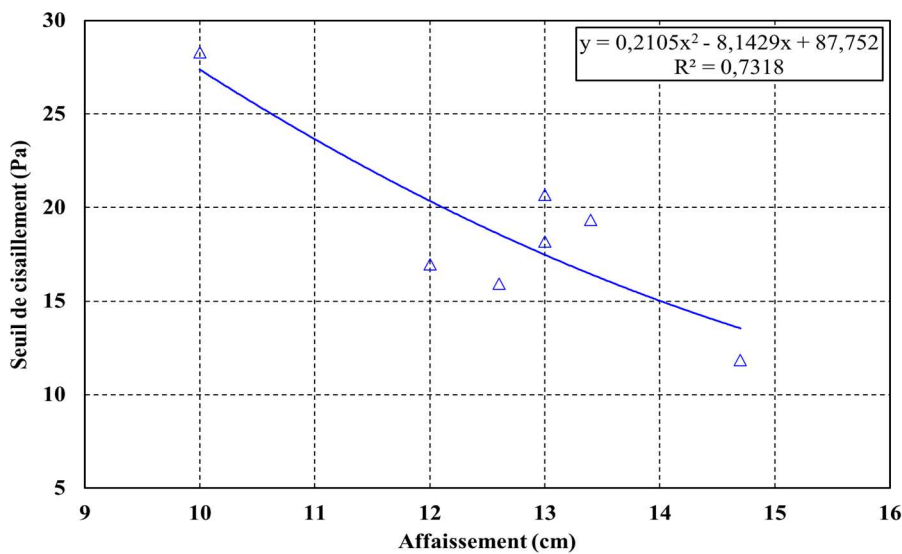


Figure 4.9. Corrélation entre l'affaissement et le seuil de cisaillement pour les mortiers DBR.

4.2.2 Déchets de la brique pure

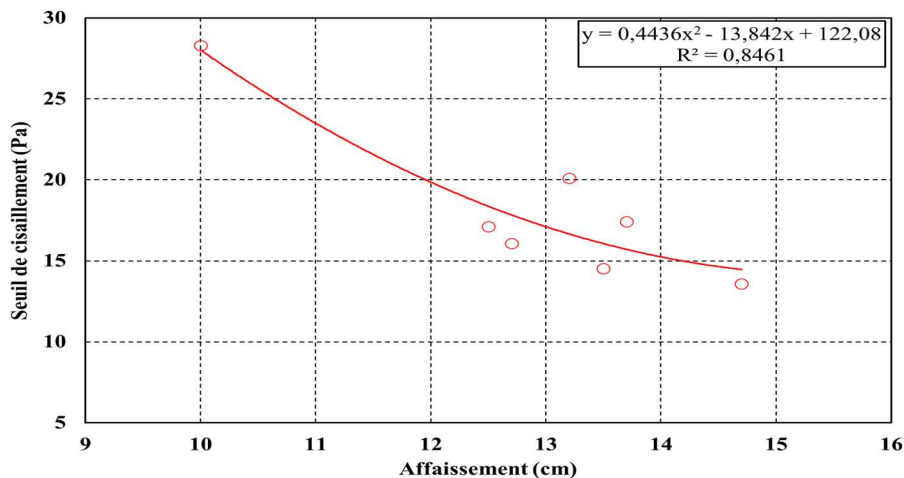


Figure 4.10. Corrélation entre l'affaissement et le seuil de cisaillement pour les mortiers DBP.

La Figure 4.10, représente la relation entre le seuil de cisaillement et l'affaissement. Ces résultats montrent que l'incorporation de déchets de la brique pure ont une influence sur l'affaissement et le seuil de cisaillement proche à celle des déchets de démolition. On observe que l'augmentation d'affaissement s'accompagne par la diminution du seuil de cisaillement. Il est évident que l'augmentation de la maniabilité de mélanges permet la facilité d'écoulement et diminue le seuil d'écoulement ce qui rend le mortier plus fluide. Les résultats obtenus par l'étude de relation entre l'affaissement et le seuil de cisaillement assurent la fiabilité de l'étude rhéologique sur le mortier du béton équivalent (MBE) et concluent la relation entre les essais de l'ouvrabilité mis en place et les essais au rhéomètre.

La Figure 4.10, montre aussi qu'il y a une bonne corrélation entre l'affaissement et le seuil de cisaillement. Cette corrélation se traduit par l'intermédiaire d'une équation polynomiale de 2^{ème} degré suivante :

$$\tau_0 = 0,4436A_{ff}^2 - 13,842A_{ff} + 122,08 \quad \text{avec} \quad R^2 = 0,8461$$

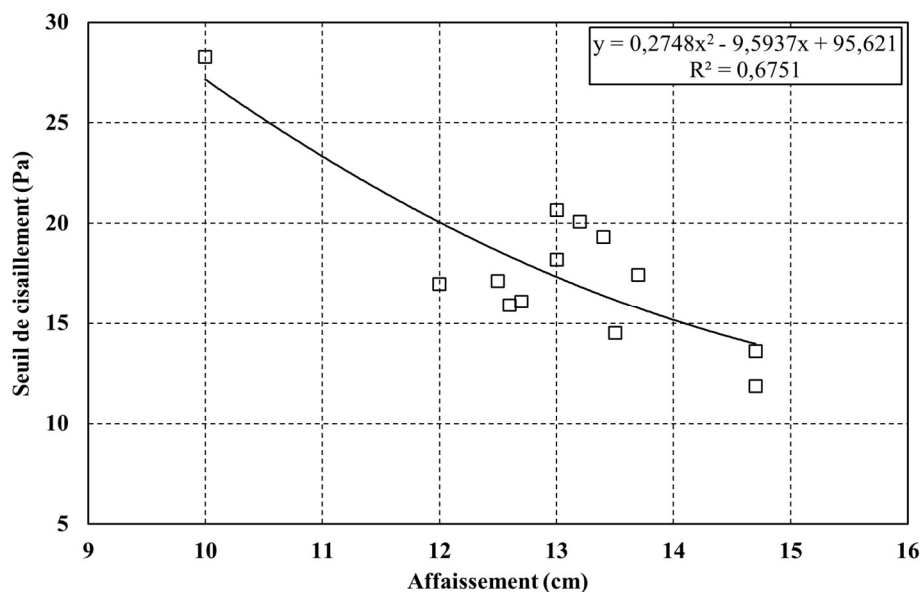


Figure 4.11. Relation entre l'affaissement et le seuil de cisaillement.

La Figure 4.11, combine les résultats (seuil de cisaillement et l'affaissement), pour les deux types de poudre (DBR et DBP). On constate qu'il y a aussi une bonne corrélation entre ces paramètres indépendamment de type de la poudre. Cette corrélation se traduit par l'intermédiaire d'une équation polynomiale de 2^{ème} degré suivante :

$$\tau_0 = 0,2748A_{ff}^2 - 9,5937A_{ff} + 95,621 \quad \text{avec} \quad R^2 = 0,6751$$

4.3 Corrélation entre la viscosité et le seuil de cisaillement

4.3.1 Déchets de brique de démolition recyclé

La Figure 4.12, représente la relation entre le seuil de cisaillement en fonction de la viscosité plastique et des mortiers DBR. La figure montre que le seuil de cisaillement augmente linéairement avec la viscosité plastique. Une bonne corrélation linéaire peut être proposée pour estimer la viscosité à partir de seuil cisaillement qui lui-même peut être estimé à partir des corrélations présentées précédemment. Cette corrélation montre bien l'influence que peut exercer la viscosité plastique sur le seuil de cisaillement.

Cette corrélation est présentée sous la forme de l'équation linéaire suivante :

$$\tau_0 = 2,9195\mu + 0,937 \quad \text{avec} \quad R^2 = 0,9666$$

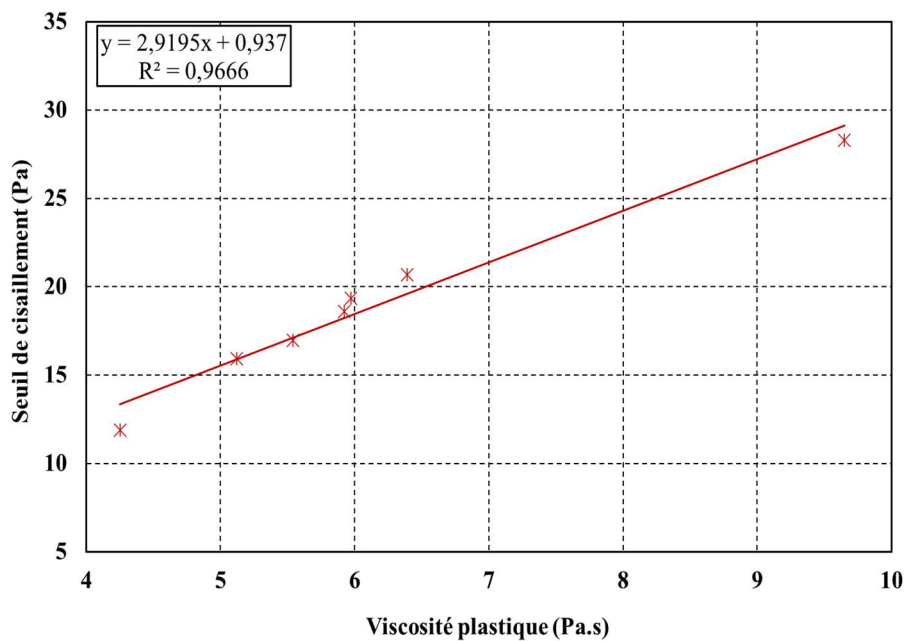


Figure 4.12. Corrélation entre la viscosité plastique et le seuil de cisaillement pour les mortiers DBR.

4.3.2 Déchets de brique pure

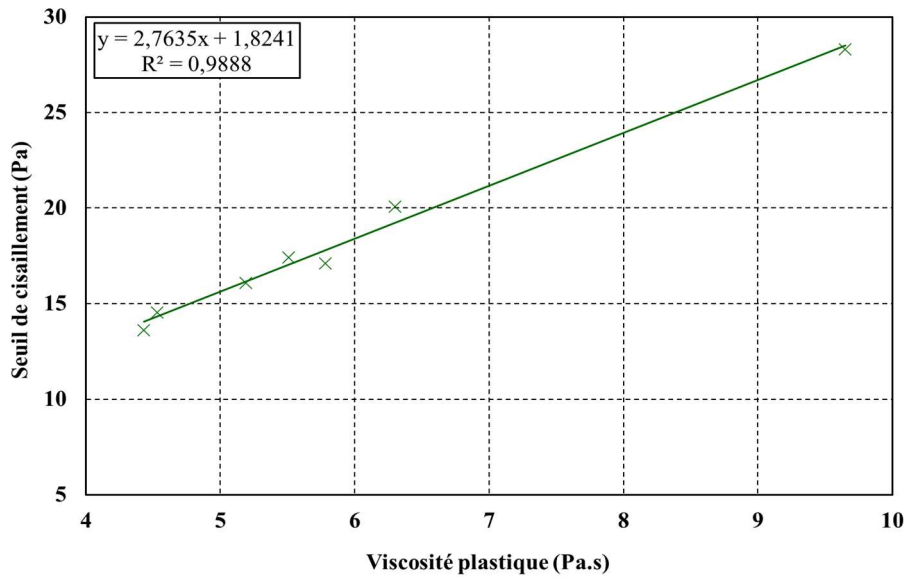


Figure 4.13. Corrélation entre la viscosité plastique et le seuil de cisaillement pour les mortiers DBP.

La Figure 4.13, montre l'évolution du seuil de cisaillement en fonction de la viscosité plastique et des mortiers DBP. Cette figure montre que le seuil de cisaillement varie linéairement avec la viscosité plastique, où une bonne corrélation linéaire peut être proposée pour estimer la viscosité à partir du seuil de cisaillement avec une bonne précision.

Cette corrélation est présentée sous la forme de l'équation linéaire suivante :

$$\tau_0 = 2,7635\mu + 1,8241 \quad \text{avec} \quad R^2 = 0,9888$$

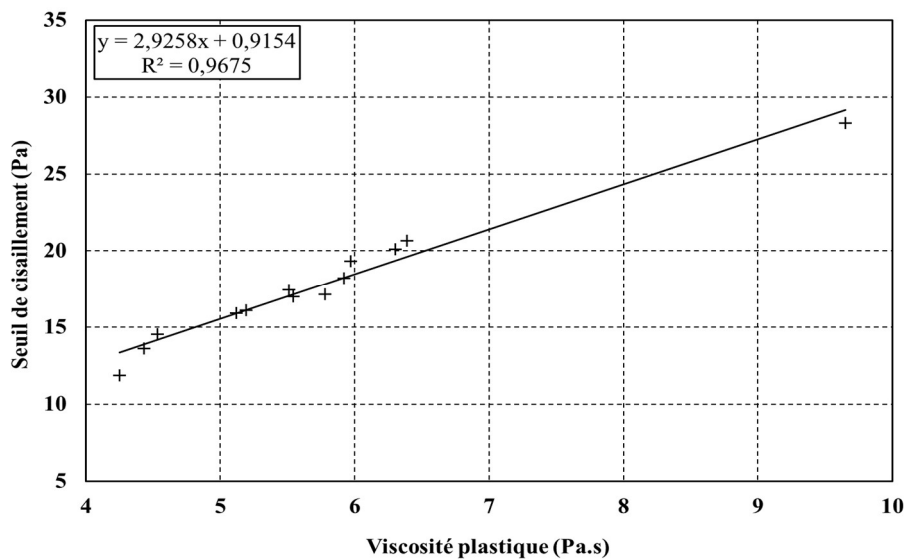


Figure 4.14. Corrélation entre la viscosité et le seuil de cisaillement.

La Figure 4.14, combine les résultats (seuil de cisaillement et la viscosité plastiques), pour les deux types de poudre (DBR et DBP). On constate qu'il y a aussi une bonne corrélation entre ces paramètres indépendamment de type de la poudre. Cette corrélation se traduit par l'intermédiaire de l'équation linéaire suivante :

$$\tau_0 = 2,9258\mu + 0,9154 \quad \text{avec} \quad R^2 = 0,9675$$

4.4 Caractérisation à l'état durci

Dans la suite de notre d'étude sur l'influence de déchets de brique sur les éco-béton, il est nécessaire de faire une étude sur le comportement mécanique à l'état durci des MBE. L'évolution de la résistance en fonction du temps permis d'analysé l'influence de l'incorporation des différents taux de substitution par le remplacement partiel du ciment. Cette étude vient de compléter l'étude sur le comportement rhéologique.

L'essai consiste à étudier la résistance à la compression des éprouvettes de MBE avec des taux de 0, 5, 10, 15, 20, 25 et 30%, de déchets de brique de démolition et de déchets de brique pure. Dans cette étude la seule variable est la nature du liant hydraulique (ciment + DBR/BDP), la résistance du mortier est alors considérée comme significative du liant utilisé.

4.4.1 Effet de déchets de brique de démolition

La Figure 4.15, représente l'évolution de la résistance à la compression à 7 jours en fonction des pourcentages de substitution par le DBR. La figure montre que l'incorporation des déchets de brique recyclés diminue la résistance à jeune âge pour tous les mélanges comparés à celle du MBE de référence qui a une résistance de 22,56 MPa. Cette diminution est plus prononcée à 15 et 30% avec une perte de résistance de l'ordre de 24%. La perte de résistance est moins importante pour les autres mélanges. La perte de résistance est plus faible à des taux de 5 et 20%, où on a observé 14% de perte.

Pour les pourcentages de 5%, 10% et 15%, la diminution de résistance est due probablement à l'existence de l'eau libre dans les pores de matrice cimentaire ce que génère une diminution de la résistance après l'évaporation. Par contre, les taux les plus élevé offrent une résistance plus élevée cela indique qu'avec l'augmentation de taux de plus de 20% les grains ultra fines de brique ont rempli les vides ce qui a augmenté la résistance.

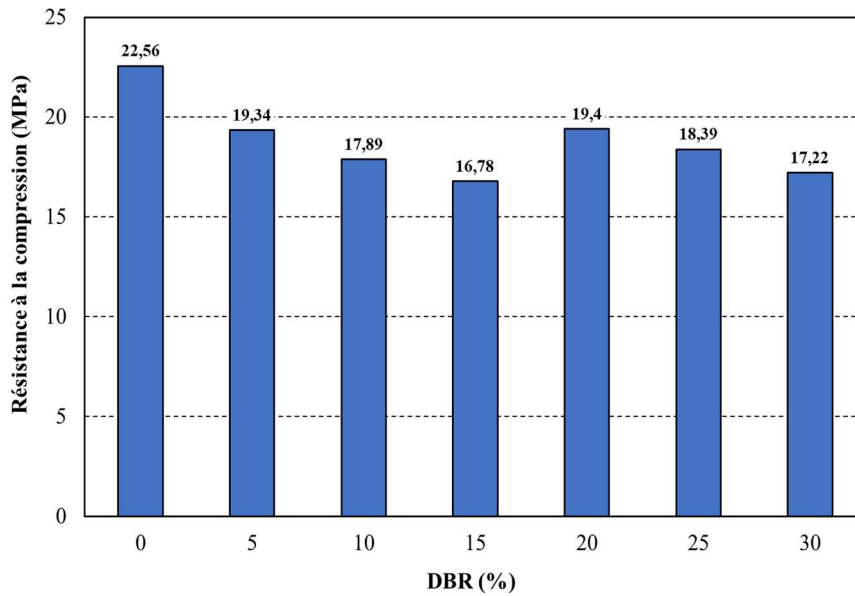


Figure 4.15. Résistance à la compression des MBE-DBR à 7 jours.

La Figure 4.16, représente l'évolution de la résistance à la compression à 14 jours en fonction des pourcentages de substitution par le DBR. Les résultats indiquent que la résistance à 14 jours diminue légèrement avec l'incorporation de déchets de brique recyclée par rapport au mortier témoin avec une perte maximale de 18% pour 30% de DBR. Des résistances comparables à celle de mortier témoin sont et observées avec les taux de substitution (5, 10, 15, et 20%) avec une légère perte de l'ordre de 9, 4, 4 et 8% respectivement.

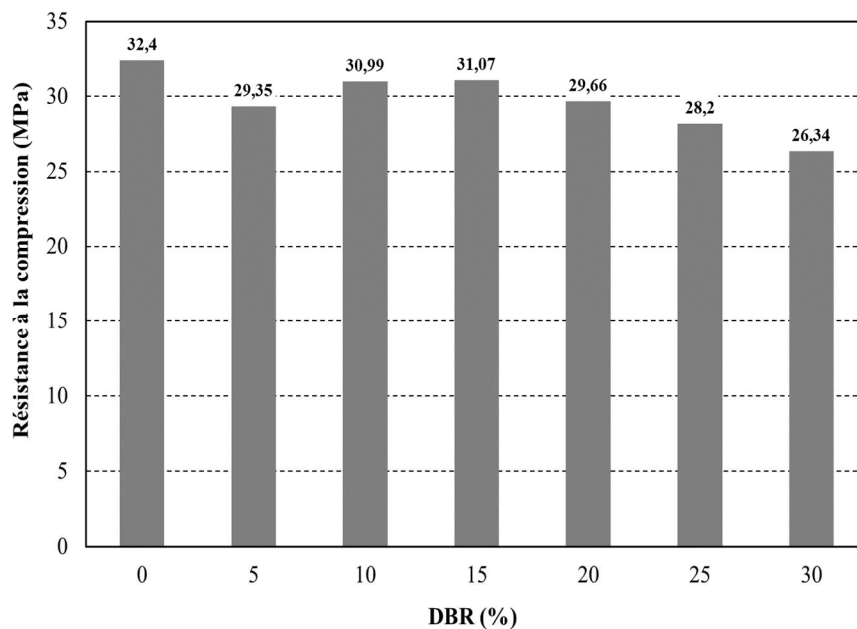


Figure 4.16. Résistance à la compression des MBE-DBR à 14 jours.

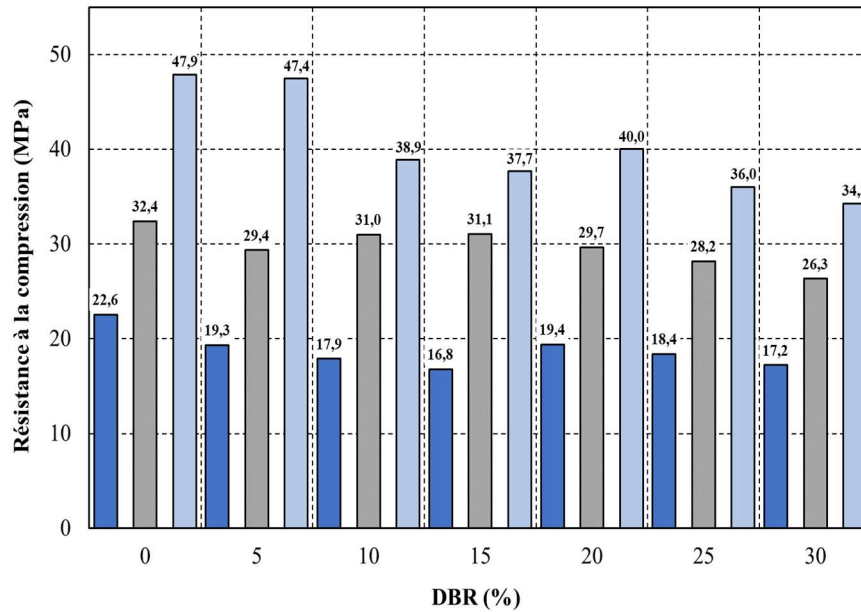


Figure 4.17. Résistance à la compression des MBE-DBR à 28 jours.

La Figure 4.17, montre l'évolution de la résistance à la compression jusqu'à 28 jours en fonction de pourcentage de l'incorporation de déchets de brique recyclés. A 5% de substitution la résistance est comparable à celle de mortier témoin ce qui présente la valeur maximale de résistance à la compression des MBE-DBR. Les résultats, montrent aussi une diminution de 19, 21, 16, 25 et 28% avec les taux de 10, 15, 20, 25 et 30% respectivement par rapport au mortier témoin. Par ailleurs on observe une augmentation de la résistance à 40 MPa au taux de 20% de DBR. Rappelons que ce taux de substitution et le niveau optimal à l'état frais qui offre un meilleur comportement rhéologique, comparé avec les autres.

Les résultats obtenus sur les mortiers avec les déchets de démolitions montrent des valeurs de résistance à la compression proches de celle du mortier témoin pour 5 et 20% de DBR. Il est évident que même le remplacement de 30% de fines de brique offre une résistance de 34 MPa, qui reste acceptable pour l'application des éléments structuraux.

Ces résultats sont similaires à celle trouver par Messoudane et al. [40], Grelleir et al [23], qui ont expliqué que les fines de brique ancienne permettent d'obtenir des liants hydrauliques composés avec de bonnes résistances. Grelleir et al [23], a obtenu 40 MPa pour les échantillons avec un taux de substitution jusqu'à 20 %.

4.4.2 Effet de déchets de la brique pure

Dans cette étude nous avons utilisé les fines de brique pure comme addition, les résistances à la compression des MBE-DBP sont regroupés sur la Figure 4.18.

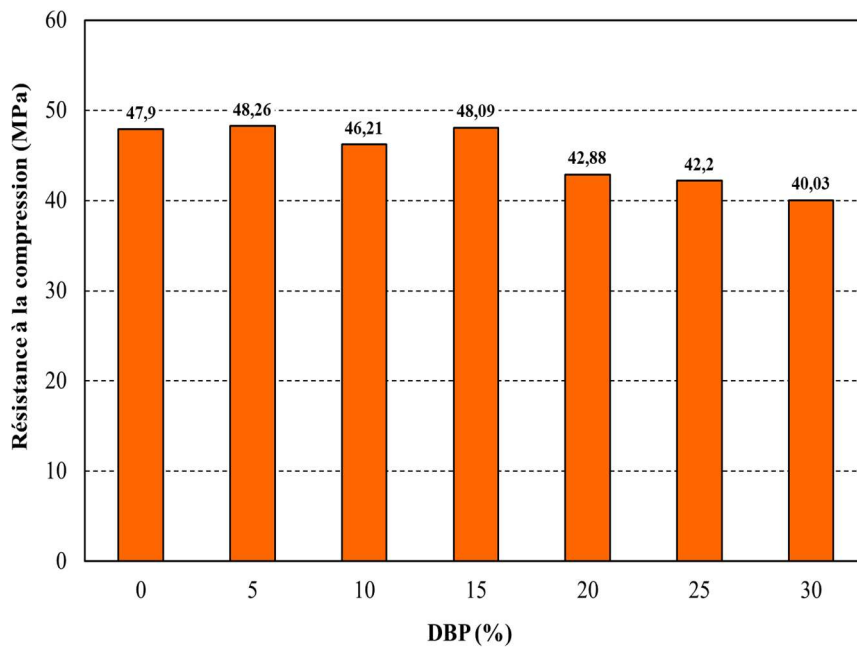


Figure 4.18. Résistance à la compression des MBE-DBP à 28 jours.

La Figure 4.18, montre l'évolution de la résistance à la compression des MBE à base de déchets de la brique pure. Une légère augmentation avec le taux de 5% et 15% jusqu'à 48 MPa, et une résistance comparable à celle de mortier témoin pour MBR-DBP 10% a été observées. Ce résultat est dû probablement que les pourcentages faibles des fines de brique ($\leq 15\%$ DBP), engendre un équilibre entre la production de chaux libre par la réaction d'hydratation et la quantité d'ajout utilisé ce qui favorise la réaction pouzzolanique. Au-delà de 15% de DBP, on remarque une perte de 10, 12 et 16% pour les MBE-DBP avec 20, 25 et 30% de substitution respectivement. Cette diminution est dû probablement au manque de chaux libre dégagée durant l'hydratation ce qui retarde l'activité pouzzolanique. Ces résultats concordent avec ceux trouvés par Grelleir et al [23].

Dada et al. [2], [58], ont montré qu'au pourcentage de remplacement élevé, le C-S-H formé diminue en raison de la libération d'une petite quantité d'hydroxyde de calcium provenant de l'hydratation de la quantité relativement faible de ciment.

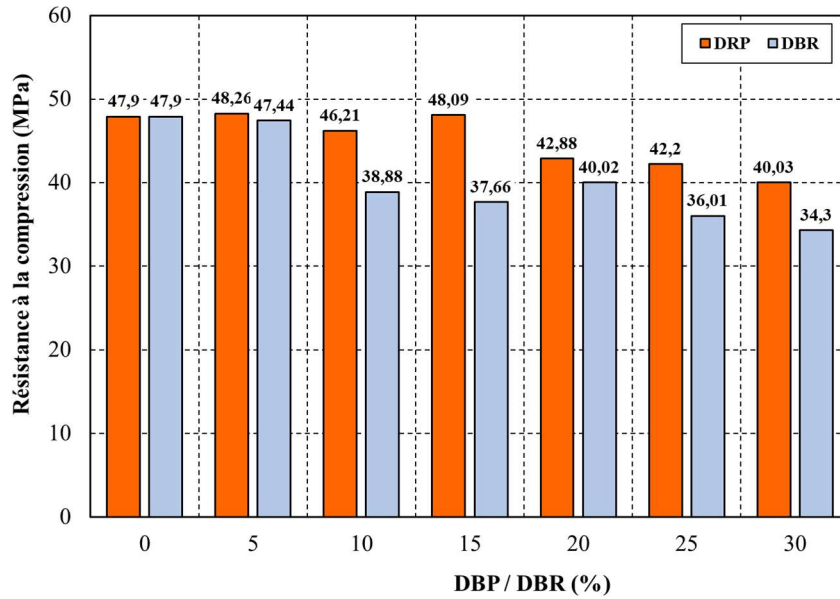


Figure 4.19. Résistance à la compression à 28 jours des MBE-DBP/DBR.

La Figure 4.19, représente une comparaison de résistance à 28 jours des MBE-DBP/DBR. Les résultats montrent, qu'à 5% de substitution les MBE-DBR/DBP, ont un comportement mécanique similaire et comparable à celui de MBE-témoin. Au-delà de 5% de substitution des MBE-DBP ont un meilleur comportement mécanique que celui des MBE-DBR. Les optimums des résistances sont observés à 15 et 20% pour MBE-DBP et MBE-DBR respectivement.

Conclusion Générale

Cette étude a été réalisée pour étudier l'influence l'incorporation des déchets de briques recyclées (DBR) et des déchets de brique pure (DBP) comme additions minérales sur l'ouvrabilité (affaissement et temps d'écoulement) et le comportement rhéologique (seuil de cisaillement et viscosité plastique), ainsi que sur la résistance à la compression des mortiers dérivés du béton à faible impact environnemental, ou le ciment Portland Ordinaire (CPA) a été partiellement remplacé par différents pourcentages de DBR et DBP (5 à 30%). Sur la base des résultats obtenus, les conclusions suivantes peuvent être tirées :

- ✓ L'introduction de DBR et DBP diminue la viscosité et le seuil de cisaillement des MBE, et améliore le comportement rhéologique.
- ✓ L'incorporation de DBR et DBP augmente l'affaissement et diminue le temps d'écoulement, et par conséquent améliore la maniabilité des MBE.
- ✓ Un optimum à 20% de substitution a été constaté pour les deux types de brique, qui représente un meilleur comportement rhéologique et à l'état frais.
- ✓ A partir des résultats expérimentaux, une bonne corrélation a été établie pour estimer le seuil de cisaillement à l'aide de la valeur d'affaissement.
- ✓ Les résultats ont permis d'établir une loi mathématique linéaire pour estimer la viscosité plastique à partir du seuil de cisaillement calculé en fonction de l'affaissement.
- ✓ Les corrélations établies permettent d'estimer les paramètres rhéologiques à partir d'affaissement des MBE-DBR/DBP.
- ✓ Les MBE-DBP, ont un comportement à l'état frais, meilleure que celui des MBE-DBR.
- ✓ A 5% de substitution les MBE-DBR/DBP, ont un comportement mécanique similaire et comparable à celui de MBE-témoin.
- ✓ L'utilisation des déchets de brique (recyclées et pure), provoque une diminution de la résistance à la compression des MBE, mais qu'il reste acceptable pour les applications pour les éléments structuraux.
- ✓ Au-delà de 5% de substitution, des MBE-DBP ont un meilleur comportement mécanique que celui des MBE-DBR. Les optimums des résistances sont observés à 15 pour MBE-DBP et à 20% pour MBE-DBR.

Recommandations et perspectives

Les travaux dans le cadre de cette recherche ont permis d'assurer l'utilisation des nouveaux ajouts cimentaire (recyclage des déchets) dans la formulation du béton, il reste plusieurs axes qui seront intéressant à tester par la suite, afin de mieux comprendre le comportement rhéologique apporté par l'ajout de déchets de démolition sur les bétons depuis sa formulation jusqu'à son application et sa durabilité. Notre étude est limitée et encore en phase de développement. Nous recommandons pour les futures recherches ce qui suit :

- Étude rhéologique pour déterminer les paramètres (τ_0 et μ) rhéologiques des bétons.
- Étude de l'évolution de la compacité des mélanges.
- Étude sur l'évolution de l'indice d'activité pouzzolanique.
- Étude de la durabilité et du comportement à long terme.
- Proposition d'un modèle qui donne les paramètres rhéologiques tel que le seuil de cisaillement avec étalement et viscosité avec le temps d'écoulement.

Annexes

L'approche basée sur l'utilisation du mortier du béton équivalent MBE :

Calcul des surfaces développées par les granulats

Au niveau des granulats il convient de considérer les différents cas pouvant se présenter :

- **Cas 1** - Les différents gravillons présentent des masses volumiques très voisines (écart inférieur ou égal à $0,05 \text{ kg/dm}^3$)
- **Cas 2** - Les différents gravillons présentent des masses volumiques différentes (écart supérieur à $0,05 \text{ kg/dm}^3$).
- **Cas 3** - Le cas des sables.
- Notre cas : **Cas 1** - Les différents gravillons présentent des masses volumiques très voisines (écart inférieur ou égal à $0,05 \text{ kg/dm}^3$)

20) Cas des gravillons de masses volumiques voisines

Dans ce cas, il devient possible de calculer directement la surface développée dans le béton par les grains du mélange de tous ces gravillons. Dans ce contexte, le calcul de cette surface développée est organisé chronologiquement comme suit :

- 1/ Calcul de la granulométrie du mélange des gravillons du béton.
- 2/ Définition des tranches granulaires successives dans ce mélange.
- 3/ Calcul de la masse de chaque tranche granulaire.
- 4/ Calcul du diamètre de la particule moyenne dans chaque tranche.
- 5/ Calcul du volume de la particule moyenne dans chaque tranche.
- 6/ Calcul de la surface développée de la particule moyenne dans chaque tranche.
- 7/ Calcul du volume massique de la matrice du gravillon du mélange.
- 8/ Calcul du volume total de l'ensemble des particules dans chaque tranche granulaire.
- 9/ Calcul du nombre de particules moyennes dans chaque tranche granulaire.
- 10/ Calcul de la surface développée par les particules moyennes dans chaque tranche granulaire.
- 11/ Somme de l'ensemble des surfaces calculées pour chaque tranche granulaire du mélange de gravillons.

A1) Calcul de la granulométrie du mélange des gravillons du béton

Gravillons G3 et G4, qui présentent les caractéristiques suivantes :

Caractéristiques des gravillons du béton			
gravillon	dosage dans le béton	masse volumique	refus au tamis (ti)
G ₃	g ₃	μ ₃	Ri ₃
G ₄	g ₄	μ ₄	Ri ₄

En calculant le refus à chacun des tamis couvrant l'ensemble des gravillons à recomposer. Le passant à chacun de ces tamis est déterminé par la formule :

$$r_i = (g_3 \cdot r_{i3} + g_4 \cdot r_{i4}) / (g_3 + g_4) \quad (1)$$

De même la masse volumique du mélange est déterminée par la relation :

$$\mu_g = (g_3 \cdot \mu_3 + g_4 \cdot \mu_4) / (g_3 + g_4) \quad (2)$$

A2) Définition des tranches granulaires successives dans ce mélange

Chaque tranche granulaire est limitée par un tamis supérieur [TM_i] et par un tamis inférieur [Tm_i]. Les refus correspondant à ces tamis sont respectivement RM_i et Rm_i(exprimé en %, par exemple 15 %).

Les tamis à considérer sont les suivants :

20 / 16 / 12,5 / 10 / 8 / 6,3 / 5 / 4 / 3,15 / 2,5 / 1,25 / 0,63 / 0,315 / 0,16 / 0,08 / <0,08 mm

A3) Calcul de la masse de chaque tranche granulaire

La masse Mi de chaque tranche granulaire est définie par la relation :

$$M_i = (R_{m_i} - R_{M_i}) \times (g_3 + g_4) / 100 \quad (3)$$

A4) Calcul du diamètre de la particule moyenne dans chaque tranche

La particule moyenne de chaque tranche granulaire est définie comme étant la particule considérée sphérique par hypothèse présentant un diamètre (d_i) défini par la relation :

$$d_i = (TM_i + Tm_i) / 2 \quad (4)$$

A5) Calcul du volume de la particule moyenne dans chaque tranche

Le volume de chaque type de particule moyenne est donné par la relation

$$v_i = (\pi \cdot d_i^3) / 6 \quad (5)$$

Les valeurs des volumes pour chaque type de particules moyennes sont également données en abaque pour chaque tranche granulaire.

A6) Calcul de la surface développée de la particule moyenne dans chaque tranche

La surface développée pour chaque type de particule moyenne est donnée par la relation

$$s_i = \pi \cdot d_i^2 \quad (6)$$

Les valeurs des surfaces développées pour chaque type de particules moyennes sont également données pour chaque tranche granulaire

A7) Calcul du volume massique de la matrice du gravillon du mélange

Le volume massique de la matrice du gravillon du mélange est déterminé à partir de la masse volumique du mélange.

$$\Omega = 1 / \mu_g \quad (7)$$

A8) Calcul du volume total de l'ensemble des particules dans chaque tranche granulaire

Le volume total de l'ensemble des particules contenues dans une tranche granulaire est le produit de la masse de la tranche granulaire par le volume massique de la matrice du gravillon.

A9) Calcul du nombre de particules moyennes dans chaque tranche granulaire

Le nombre de particules moyennes est alors obtenu par le rapport du volume total de l'ensemble des particules de la tranche granulaire au volume unitaire de la particule moyenne ; ces paramètres v_i et V_i ont été définis

$$N_i = V_i / v_i \quad (9)$$

A10) Calcul de la surface développée par les particules moyennes dans chaque tranche granulaire

La surface développée par les particules moyennes dans chaque tranche granulaire est alors représentée par le produit de la surface développée de la particule moyenne par le nombre de particules moyennes :

$$S_i = N_i \cdot s_i \quad (10)$$

A11) Calcul de la somme de l'ensemble des surfaces calculées pour chaque tranche granulaire du mélange de gravillon

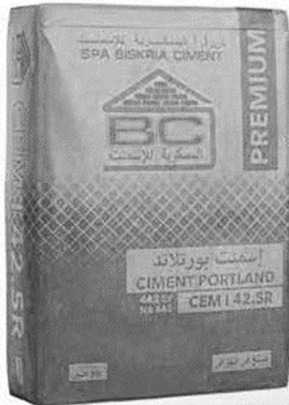
La somme de l'ensemble des surfaces calculées pour chaque tranche granulaire du mélange de gravillon représente la surface développée de l'ensemble des gravillons :

$$SD = \sum S_i \quad (11)$$

Annexe fiche technique du ciment



SPA BISKRIA CIMENT



PRODUCT DATA SHEET

CEM I 42.5R PORTLAND CEMENT

CEM I 42.5R Portland cement, for high performance concretes with rapid short-term resistance, intended for areas where removal of formwork deadlines are short, it is particularly recommended for concreting in cold weather.

CEM I 42.5R :
Compliant with Algerian Standard (NA442-2013)

👍 APPLICATION AREAS

A cement for all your high strength construction works at a young age, it is also recommended for the following uses :



















- Concrete products which require rapid hardening.
- Concreting in sliding formwork, especially in wintertime.
- Concrete resistant to frost in the presence of de-icing salts.
- Bridge decks.
- Pumped concrete.
- Sprayed concrete.



✓ RECOMMENDED APPLICATIONS

- Reinforced concrete with high resistance.
- Self-consolidating concrete.

🏠 RECOMMENDED FORMULATION

	cement 	Sand (dry) 0,5 	Gravel (dry) 8/15mm 15/25mm 	Water (liters) 
Concrete dosage	50k X1 	+ X7 	+ X5  + X4 	+ 25 L
	cement 	Sand Corrector 0/1mm 	Sand (dry) 0,4mm 	Water (liters) 
Mortar for bricklaying	50k X1 	+ X6 	+ X9 	+ 35 L
Finishing mortar	50k X1 	+ X9 	+ X6 	+ 35 L

Note : one Drum =10 liters

🔍 TECHNICAL CHARACTERISTICS

Chemical analyzes (%)	value
Loss on ignition	2.6 – 3.7
Sulphate content (SO3)	2.2 – 2.8
Magnesium Oxide content (MgO)	1.7 – 2.8
Chloride content (Cl)	0.03 – 0.07
Potential composition of Clinker (%) (According to Bogue)	value
C3S	56 – 66
C3A	5.1 – 7.2
Physical properties	value
Normal consistency (%)	25.8 – 26.4
Hot expansion (mm)	0.25 – 1.0
Setting time (min)	value
Setting start	150 – 190
Setting end	220 – 250
Résistance à la compression	value
2 days (MPa)	20 – 29
28 days (MPa)	42.5 – 52.5



Version : 01/2021

SPA BISKRIA CIMENT
Adress : Djar Belahrache
Branis , Biskra Algeria

Phone : +213 (0)560 753 424
Fax : +213 (0)33 558 108
contact@biskriaciment-dz.com
www.biskriaciment-dz.com

Annexe fiche technique du superplastifiant

NOTICE TECHNIQUE

2 1 1 9

MEDAFLOW 30

Conforme à la norme EN 934-2: TAB 1, TAB 3.1
ET TAB 3.2 NA 774.

Super plastifiant
Haut réducteur d'eau

DESCRIPTION

Le **MEDAFLOW 30** est un super plastifiant haut réducteur d'eau de la troisième génération. Il est conçu à base de polycarboxylates d'Ether qui améliorent considérablement les propriétés des bétons.

Le **MEDAFLOW 30** permet d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité.

En plus de sa fonction principale de superplastifiant, il permet de diminuer la teneur en eau du béton d'une façon remarquable.

Le **MEDAFLOW 30** ne présente pas d'effet retardateur.

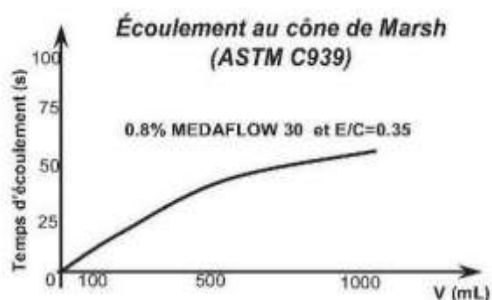
DOMAINES D'APPLICATION

- Bétons à hautes performances
- Bétons auto - plaçant
- Bétons pompés
- Bétons précontraints
- Bétons architecturaux.

PROPRIÉTÉS

Grâce à ses propriétés le **MEDAFLOW 30** permet :
Sur béton frais :

- Obtention d'un rapport E/C très faible
- Amélioration considérable de la fluidité
- Une très bonne maniabilité
- Éviter la ségrégation
- Faciliter la mise en œuvre du béton



Les renseignements donnés dans cette notice sont basés sur notre connaissance et notre expérience à ce jour. Il est recommandé de procéder à des essais de conformance pour déterminer la fourchette d'utilisation tenant compte des conditions réelles de chantier.

Sur béton durci :

- Augmenter les résistances mécaniques à jeune âge et à long terme (voir tableau).
- Diminuer la porosité
- Augmenter la durabilité
- Diminuer le retrait et le risque de fissuration

Désignation	Rc (MPa)		
	3J	7J	28J
MEDAFLOW 30 (1.4%)	39.2	54.7	62.2

CARACTÉRISTIQUES

- Aspect Liquide
- Couleur Brun clair
- pH 6 – 6,5
- Densité 1,07 ± 0,01
- Teneur en chlore < 0,1 g/l
- Extrait sec 30%

MODE D'EMPLOI

Le **MEDAFLOW 30** est introduit dans l'eau de gâchage.

Il est recommandé d'ajouter l'adjuvant dans le béton après que 50 à 70% de l'eau de gâchage ait déjà été introduite.

DOSAGE

Plage de dosage recommandée :

0,5 à 2,0 % du poids de ciment soit 0.46 à 1.85 litre pour 100 Kg de ciment.

Le dosage optimal doit être déterminé sur chantier en fonction du type de béton et des effets recherchés.

CONDITIONNEMENT ET STOCKAGE

Références bibliographiques

- [1] H. Soualhi, E. H. Kadri, T. T. Ngo, A. Bouvet, F. Cussigh, and B. Benabed, “Rheology of ordinary and low-impact environmental concretes,” *J. Adhes. Sci. Technol.*, vol. 29, no. 20, 2015.
- [2] A. S. E. Belaidi, H. Dada, H. Soualhi, E.-H. Kadri, and B. Benchaa, “A study of the rheological behaviour of eco-friendly mortar made with metakaolin and marble powder at various ambient temperatures,” *Eur. J. Environ. Civ. Eng.*
- [3] S. Safiddine, H. Soualhi, B. Benabed, A. S. E. Belaidi, and E.-H. Kadri, “Effect of different supplementary cementitious materials and superplasticizers on rheological behavior of eco-friendly mortars,” *J. Silic. Based Compos. Mater.*, vol. 73, no. 3, pp. 119–129, 2021.
- [4] Hichem Krour, “Recyclage du ciment dans le ciment : Incorporation des déchets de construction et de démolition dans le cru cimentier,” pp. 1–319, 2021.
- [5] J. J. Chen, B. H. Li, P. L. Ng, and A. K. H. Kwan, “Adding granite polishing waste as sand replacement to improve packing density, rheology, strength and impermeability of mortar,” *Powder Technol.*, vol. 364, pp. 404–415, 2020.
- [6] D. C. Reis, P. C. R. A. Abrão, T. Sui, and V. M. John, “Influence of cement strength class on environmental impact of concrete,” *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 163, p. 105075, 2020.
- [7] G. Van Rompaey, A. Bernard, and M.-P. Delplancke, “Etude de la réactivité des ciments riches en laitier, à basse température et à temps court, sans ajout chloruré,” 2006.
- [8] R. Feiz, J. Ammenberg, L. Baas, M. Eklund, A. Helgstrand, and R. Marshall, “Improving the CO₂ performance of cement, part I: Utilizing life-cycle assessment and key performance indicators to assess development within the cement industry,” *J. Clean. Prod.*, vol. 98, no. 98, pp. 272–281, 2015.
- [9] S. Safiddine, H. Soualhi, K. Amokrane, F. Debieb, A. S. E. Belaidi, and E. H. Kadri, “The double effect of limestone fillers on the rheological behavior of cement mortar.,” *Alger. J. Eng. Archit. Urban.*, vol. 5, no. 6, 2021.
- [10] M. Adjoudj, “Effet des additions minérales et organiques sur le comportement rhéologique du béton Mhamed Adjoudj To cite this version : République Algérienne Démocratique et Populaire THÈSE EN COTUTELLE Spécialité : Génie Civil Option : Matériaux et Structure,” 2016.
- [11] R. Chaid, R. Jauberthie, and A. Boukhaled, “Effet de l’ajout calcaire sur la durabilité des bétons,” *Leban. Sci. J.*, vol. 11, no. 1, pp. 91–103, 2010.
- [12] A. Zidol, *Optimisation de la finesse de la poudre de verre dans les systèmes cimentaires binaires*. 2009.
- [13] M. Said-Mansour, E. Kadri, S. Kenai, M. Ghrici, and R. Bennaceur, “Influence of calcined kaolin on mortar properties,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 25, pp. 2275–2282, 2011.

- [14] A. S. E. Belaidi, S. Kenai, E. H. E.-H. E. H. Kadri, H. Soualhi, B. Benchaâ, and B. Benabed, "Effects of experimental ternary cements on fresh and hardened properties of self-compacting concretes," *J. Adhes. Sci. Technol.*, vol. 30, no. 3, pp. 247–261, 2016.
- [15] A. S. E. Belaidi, L. Azzouz, E. Kadri, and S. Kenai, "Effect of natural pozzolana and marble powder on the properties of self-compacting concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 31, 2012.
- [16] X. Zhang and J. Han, "The effect of ultra-fine admixture on the rheological property of cement paste," *Cem. Concr. Res.*, vol. 30, pp. 827–830, 2000.
- [17] A. Bessa, J.-P. Bigas, and J.-L. Gallias, "Méthode d'évaluation de l'effet des additions minérales sur le besoin en eau et l'adjuvantation des mortiers," *Rev. Française Génie Civ.*, vol. 8, no. 2–3, pp. 181–201, 2004.
- [18] M. Adjoudj, K. Ezziane, E. Hadj, T. Ngo, and A. Kaci, "Evaluation of rheological parameters of mortar containing various amounts of mineral addition with polycarboxylate superplasticizer," *Constr. Build. Mater.*, vol. 70, pp. 549–559, 2014.
- [19] C. Atzeni, L. Massidda, and U. U. M. Sanna, "Relationship between rheology and workability of cement mixes containing blast furnace slag," *Silic. Ind.*, vol. 51, pp. 5–9, 1986.
- [20] K. Ezziane, E. H. Kadri, A. Hallal, and R. Duval, "Effect of mineral additives on the setting of blended cement by the maturity method," *Mater. Struct.*, vol. 43, pp. 393–401, 2010.
- [21] S. Amziane, "Contribution à l'étude des matériaux cimentaires à l'état frais," 2005.
- [22] T. Ponikiewski and J. Gołaszewski, "The influence of high-calcium fly ash on the properties of fresh and hardened self-compacting concrete and high performance self-compacting concrete," *J. Clean. Prod.*, vol. 72, pp. 212–221, 2014.
- [23] Grelier Adèle, "Des fines de brique de terre cuite comme liants de substitution dans les ciments et les matériaux alcali-activés.," 2021.
- [24] E. Mohammed, A. A. L. I. Aïchouba, and B. Ilhem, "Effet De L'ajout de déchets de brique sur la rhéologie des bétons aux etats frais et durci," 2003.
- [25] B. B. Velde and A. Meunier, *The origin of clay minerals in soils and weathered rocks*. Springer Science & Business Media, 2008.
- [26] I. Irki *et al.*, "Effet de la finesse Blaine du recyclage de la poudre de brique remplaçant les matériaux cimentaires dans le mortier auto-plaçant," vol. 4243, 2017.
- [27] D. Riad and B. Moufida, "Valorisation des déchets de brique rouge dans le béton à haute performance," vol. 34, no. 1, pp. 915–921, 1955.
- [28] A. Lahmadi, L. Zeghichi, and Z. Benghazi, "L'influence de la substitution des granulats naturels par les déchets de brique sur le comportement mécanique du béton," 2012.
- [29] M. Chen, J. Lin, S. Wu, and C. Liu, "Utilization of recycled brick powder as alternative filler in asphalt mixture," *Constr. Build. Mater.*, vol. 25, no. 4, pp. 1532–1536, 2011.
- [30] L. Oksri-Nelfia, "Incorporation de fines issues de granulats recyclés dans la fabrication de nouveaux liants hydrauliques," 2015.

- [31] J. M. Khatib, “Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 35, no. 4, pp. 763–769, 2005.
- [32] M. Bediako, *Influence of Higher Volumes of Clay Pozzolana Replacement Levels on Some Technical Properties of Cement Pastes and Mortars*, vol. 3. 2014.
- [33] M. Cyr, “Contribution à la caractérisation des fines minérales et à la compréhension de leur rôle joué dans le comportement rhéologique des matrices cimentaires,” INSA de Toulouse ; Université de Sherbrooke, 1999.
- [34] D. K. Panesar and R. Zhang, “Performance comparison of cement replacing materials in concrete: Limestone fillers and supplementary cementing materials – A review,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 251, p. 118866, 2020.
- [35] S. Stephant, “Etude de l’influence de l’hydratation des laitiers sur les propriétés de transfert gazeux dans les matériaux cimentaires.,” p. 220, 2015.
- [36] F. Pacheco-Torgal and S. Jalali, “Reusing ceramic wastes in concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 24, no. 5, pp. 832–838, 2010.
- [37] J. M. Ortega, V. Letelier, C. Solas, G. Moriconi, M. Á. Climent, and I. Sánchez, “Long-term effects of waste brick powder addition in the microstructure and service properties of mortars,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 182, pp. 691–702, 2018.
- [38] C. L. Wong, K. H. Mo, S. P. Yap, U. J. Alengaram, and T.-C. Ling, “Potential use of brick waste as alternate concrete-making materials: A review,” *J. Clean. Prod.*, vol. 195, pp. 226–239, 2018.
- [39] M. Si-ahmed and S. Kenai, “Comportement des mortiers auto-plaçants à base de brique de rebut Poudre,” pp. 39–44, 2020.
- [40] I. Messaoudene, *Effet De L'ajout de déchets de brique sur des bétons aux états frais et durci*. 2020.
- [41] C. Hu, “Rhéologie des bétons fluides,” Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1995.
- [42] T. Sedran, F. De Larrard, and L. Le Guen, “Determination of the compaction of cements and mineral admixtures using the vicat needle,” *Bull. des Lab. des Ponts Chaussees*, no. 270–271, pp. 155–163, 2007.
- [43] N. Huang, J.-L. Grossiord, and G. Couarraze, *Initiation à la rhéologie (4e édition)*. 2014.
- [44] C. Ferraris, “Measurement of the rheological properties of high performance concrete: state of the art report,” *J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.*, vol. 104, Dec. 1999.
- [45] T. A. Strivens, *An introduction to rheology*. 1999.
- [46] G. Chiocchio and A. E. Paolini, “Optimum time for adding superplasticizer to Portland cement pastes,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 15, no. 5, pp. 901–908, 1985.
- [47] H. Soualhi, “Optimisation de la viscosité des bétons à faible impact optimisation de la viscosité des bétons à faible impact environnemental.,” 2014.
- [48] V. H. Nguyen, “Comportement rhéologique et écoulement au cône de Marsh des coulis cimentaires,” 2007.
- [49] P. Estelle and C. Lanos, “High Torque Vane Rheometer for Concrete: Principle and Validation from Rheological Measurements,” *Appl. Rheol.*, vol. 22, p. 07, 2012.

- [50] P. Estelle, C. Lanos, A. Perrot, and S. Ameziane, “Processing the vane shear flow data from Couette analogy,” *Appl. Rheol.*, vol. 18, p. 06, 2008.
- [51] C. Lanos and P. Estellé, “Vers une réelle rhéométrie adaptée aux bétons frais,” *Eur. J. Environ. Civ. Eng.*, vol. 13, no. 4, pp. 457–471, Apr. 2009.
- [52] H. Soualhi, E.-H. Kadri, T.-T. Ngo, A. Bouvet, F. Cussigh, and Z.-E.-A. Tahar, “Design of portable rheometer with new vane geometry to estimate concrete rheological parameters,” *J. Civ. Eng. Manag.*, vol. 23, no. 3.
- [53] Omar TALEB, “Etude du comportement rhéologique des bétons autoplaçants locaux,” 2017.
- [54] A. Schwartzenruber and C. Catherine, “La méthode du mortier de béton équivalent (MBE)—Un nouvel outil d’aide à la formulation des bétons adjuvés,” *Mater. Struct.*, vol. 33, no. 8, pp. 475–482, 2000.
- [55] A. Y. K. H. Khayat and M. Sayed, K. H. Khayat, A. Yahia, and M. Sayed, “Effect of Supplementary Cementitious Materials on Rheological Properties, Bleeding, and Strength of Structural Grout,” *ACI Mater. J.*, vol. 105, no. 6, 2008.
- [56] O. H. Wallevik and J. E. Wallevik, “Rheology as a tool in concrete science: The use of rheographs and workability boxes,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 41, no. 12, pp. 1279–1288, 2011.
- [57] J. E. Wallevik, “Relationship between the Bingham parameters and slump,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 36, no. 7, pp. 1214–1221, 2006.
- [58] H. Dada, A. S. E. Belaidi, H. Soualhi, E.-H. Kadri, and B. Benabed, “Influence of temperature on the rheological behaviour of eco-mortar with binary and ternary cementitious blends of natural pozzolana and marble powder,” *Powder Technol.*, vol. 384, pp. 223–235, 2021.