



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Amar Thelidji- Laghouat

FACULTE DE GENIE CIVIL ET D'ARCHITECTURE
DEPARTEMENT GENIE CIVIL

MEMOIRE DE MASTER

➤ ***Présenté par : HAOUATI Haouas & CHEMMA Ahmed***

DOMAINE SCIENCES ET TECHNOLOGIES

Filière Génie Civil

Option : Matériaux de Génie Civil

Thème

***Etude de l'influence du volume de la pâte et du couple
température/temps sur le comportement rhéologique des
mortiers de béton équivalent.***

Jurys de soutenance :

Nom et Prénom	Grade	Qualité
Mr. MAKHLOUFI Zoubir	Pr.	Président
Mr. FERHAT Ahmida	M.A.A	Examineur
Mr. BELAIDI Akram Salah Eddine	Pr.	Rapporteur
Mlle. DADA El Hadja	Doctorante	Co-rapporteur

Promotion : Septembre - 2020

DÉDICACES

Je dédie ce modeste travail :

À mes très chers parents,

à mes chers frères et sœurs,

à ma cher grande famille,

à toute mes amis proches ou loin ,

à tous ceux qui sont chers, et qu'ils trouvent leur place dans

mon cœur

Haouas

DÉDICACES

*Tout d'abord, merci et louange à **Dieu** Tout-Puissant, afin qu'il lui
attribue tout crédit et perfection. Et la perfection reste pour Dieu seul
A qui est-celle que je la préfère à moi-même, et pourquoi pas ; Tu t'es
sacrifié pour moi*

Elle n'a pas toujours ménagé ses efforts pour me rendre heureux

(Ma chère mère).

*Nous marchons sur les chemins de la vie, et cela reste celui qui contrôle
nos esprits de toutes les manières que nous prenons*

Le propriétaire d'un visage gentil et de bonnes actions.

Il m'a épargné toute sa vie

(Mon cher père).

*À **mes amis** et à tous ceux qui se tenaient à côté de moi et m'ont aidé avec
tout ce qu'ils avaient, à bien des égards*

AHMED

الملخص

إن تطوير مواد جديدة مثل الخرسانة ذات التأثير البيئي المنخفض والخرسانة البيئية، يزيد من الحاجة إلى توصيف سلوكها وتدفقها بشكل أفضل. تعتمد قابلية تشغيل ومعالجة الخرسانة الطازجة بشكل أساسي على معايير مختلفة، وهي نسبة الماء إلى الإسمنت (E/C)، وإضافة المعادن، والخلط، ودرجة الحرارة، ومدة النقل.

إن الهدف من هذا العمل البحثي هو التحكم في السلوك الريولوجي لهذه الخرسانة من خلال المونة المكافئة لها، والتعرف بعناية على تأثير حجم العجينة ودرجة الحرارة على معاييرها الانسيابية وقابليتها للتشغيل وكذلك ثباتها في زمن. تم تحليل المتغيرات الانسيابية وقابلية التشغيل لأربع أنواع من المونات خرسانية مكافئة (MBE) الأولى مرجعية بدون إضافات إسمنتية الثانية مونة اسمنتية مع إضافة مسحوق الرخام، الثالثة مونة اسمنتية مع إضافة البوزولان الطبيعي والرابعة مونة اسمنتية مع إضافة خبث أعالي الافران، بالنسبة للملاط الاسمنتي الثنائي، تتراوح معدلات تعويض الإسمنت من 5 إلى 40٪. تمت دراسة تأثير حجم العجينة على ستة مونات مع تراكيز مختلفة من الاسمنت 325، 350، 375، 400، 425 و 450 كغ/م³. تم وضع جميع المونات في درجات حرارة تقدر بـ 10، 20، 30 و 40 درجة مئوية، مع إيلاء اهتمام خاص لتأثير الوقت بعد الخلط والمقدر بـ 30 و 60 و 90 دقيقة.

أظهرت النتائج أن الزيادة في حجم لها تأثير مفيد على السلوك الريولوجي وقابلية التشغيل بينما أن تأثير درجة الحرارة والوقت معا يعد سلبيا وخاصة في الأجواء الحارة مما قد يؤثر سلبا في عملية تموضع الخرسانة في مكانها النهائي.

Résumé

Le développement de nouveaux matériaux, tels que le béton à faible impact et le béton environnemental, augmente la nécessité de mieux caractériser leur comportement et leur écoulement. La maniabilité et le durcissement du béton frais sont principalement basés sur divers paramètres, qui sont le rapport Eau/Ciment (E/C), l'ajout de minéraux, le malaxage, la température, la durée de transport.

L'objectif de ce travail de recherche est de contrôler le comportement rhéologique de ce béton à travers son mortier équivalent, et d'identifier soigneusement l'effet de volume de pâte et de la température sur ses paramètres rhéologiques, son ouvrabilité ainsi que sa stabilité dans le temps. Les paramètres rhéologiques et l'ouvrabilité de quatre mortiers équivalents (MBE) ont été analysées, le premier mortier est de référence sans addition (CPA), le deuxième mortier avec addition de la poudre de marbre (PM), le troisième mortier avec addition de pouzzolane naturelle (PZ) et le quatrième mortier avec laitier de haut fourneaux (LHF), pour les mortiers binaires les taux de substitution de ciment allant de 5 à 40 %. Etude de l'influence de volume de pâte a été étudié sur six mortiers avec différentes concentrations du ciment 325, 350, 375, 400, 425 et 450 kg/m³. Tous les mortiers ont été placés à des températures estimées à 10, 20, 30 et 40 °C, avec une attention particulière à l'effet du temps après malaxage, estimé à 30, 60 et 90 minutes.

Les résultats ont montré qu'une augmentation de volume pâte a un effet bénéfique sur le comportement rhéologique et l'ouvrabilité tandis que l'effet de la température et du temps ensemble est négatif, en particulier dans les climats chauds, ce qui peut affecter négativement le processus de mise en œuvre du béton à sa place finale.

Abstract

The development of new materials, such as low impact concrete and environmental concrete, increases the need to better characterize their behavior and flow. The workability and hardening of fresh concrete are mainly based on various parameters, which are Water/Cement (W/C) ratio, addition of minerals, mixing, temperature, transport time.

The objective of this research work is to control the rheological behavior of this concrete through its equivalent mortar, and to carefully identify the effect of paste volume and temperature on its rheological parameters, its workability as well as its stability in time. The rheological parameters and the workability of four equivalent mortars (MBE) were analyzed, the first mortar is of reference without addition (CPA), the second mortar with the addition of marble powder (PM), the third mortar with the addition of natural pouzzolan (PZ) and the fourth mortar with blast furnace slag (LHF), for binary mortars the cement substitution rates ranging from 5 to 40%. Study of the influence of paste volume was studied on six mortars with different concentrations of cement 325, 350, 375, 400, 425 and 450 kg/m³. All the mortars were placed at temperatures estimated at 10, 20, 30 and 40 °C, with particular attention to the effect of the time after mixing, estimated at 30, 60 and 90 minutes.

The results showed that an increase in paste volume has a beneficial effect on rheological behavior and operability while the effect of temperature and time together is negative, especially in hot climates, which can adversely affect the process of placing the concrete in its final place.

Remerciements

Le présent travail

A été réalisé au sein du laboratoire de Génie

Civil de l'Université Amar Telidji à Laghouat

*On tient à remercier tout d'abord DIEU "Allah" Miséricordieux
Qui nous a donné la force et la volonté d'achever ce modeste travail.*

*Nos remerciements profonds vont en premier lieu à notre encadreur
Mr. BELAIDI Akram Salah Eddine. Professeur et notre Co-encadreur
Mlle DADA. H, d'avoir accepté de diriger ce travail de recherche, pour
leurs conseils, leur patience, leur expérience scientifique et leur aide
continu.*

*Notre sincère reconnaissance est adressée au **Mr. MAKHLOUFI
Zoubir**. Professeur à l'université, pour l'honneur qu'il nous a fait
présidant le jury de notre soutenance, ainsi qu'au **Mr. FERHAT
Ahmida**. Maître Assistant, pour avoir accepté de participer à la critique
et au jugement de ce travail.*

*Ainsi à tous l'effectif de laboratoire de génie civil **Mr Hamdi Ibrahim** et
Mr. Deles Aissa et tout qui nous aidé de près ou de loin.*

On voudrait remercier nos familles

Pour leurs soutiens et leurs encouragements.

Finalement, merci pour toutes personnes qui

Nous avons aidé de près ou de loin

Ahmed

&

Haouas

Table des matières

المخلص	iv
Résumé.....	v
Abstract	vi
Remerciements	vii
Introduction générale.....	1
1. Mortier de béton équivalent	3
1.1 Béton à faible impact environnemental.....	3
1.1.1 Introduction.....	3
1.1.2 Importance des bétons à faible impact environnemental	4
1.2 Formulation de mortier de béton équivalent	5
1.2.1 Introduction.....	5
1.2.2 Principe de la méthode de mortier de béton équivalent	5
1.2.3 Calcul de mortier de béton équivalent (MBE).....	6
1.2.4 Caractéristiques du béton de base	7
1.2.5 Cas des gravillons de masses volumiques voisines.....	8
1.2.6 Cas des gravillons de masses volumiques différentes	11
1.2.7 Cas des sables du béton.....	11
1.2.8 Bilan des compositions du mortier (MBE).....	13
1.2.9 Corrélation entre le béton et le mortier	13
1.3 Les additions minérales.....	15
1.3.1 La pouzzolane naturelle	15
1.3.2 Le laitier de haut fourneau.....	16
1.3.3 Les cendres volantes	16
1.3.4 Le métakaolin.....	17
1.3.5 Les fillers calcaires	19
1.3.6 La poudre de marbre	19
1.4 Conclusion	20
2 Etat des connaissances sur la rhéologie	21
2.1 Introduction.....	21
2.2 Notion de base sur la rhéologie.....	21

2.2.1	Contrainte de cisaillement	21
2.2.2	Le taux de cisaillement	21
2.2.3	La viscosité	22
2.2.4	Le seuil de cisaillement	23
2.2.5	La thixotropie	23
2.2.6	Loi de comportement de rhéologie.....	25
2.3	Facteurs influencent la rhéologie	25
2.3.1	Volume de pâte	25
2.3.2	Effet de températures sur la rhéologie	26
2.3.3	Effet de temps sur la rhéologie.....	27
2.4	Conclusion	29
3	Matériaux et méthodes expérimentales	30
3.1	Introduction.....	30
3.2	Matériaux utilisés.....	30
3.2.1	Ciment	30
3.2.2	Additions minérales	31
3.2.3	Superplastifiant	33
3.2.4	Granulats	34
3.2.5	Eau de gâchage	39
3.3	Procédure expérimentale	39
3.3.1	Formulation de mortier de béton équivalence (MBE).....	39
3.3.2	Plan expérimentale	42
3.3.3	Malaxage	43
3.4	Caractérisation des MBEs.....	44
3.4.1	Essai au mini cône.....	44
3.4.2	Essai au Maniabilimètre LCPC (type B)	44
3.4.3	Essai au rhéomètre	45
3.5	Conclusion	47
4	Résultats et Interprétations.....	48
4.1	Introduction.....	48

4.2	Etude rhéologie de mortier équivalence de référence.....	48
4.2.1	Les paramètres rhéologiques des mortiers de référence.....	48
4.2.2	L'affaissement au mini-cône de mortier de référence	50
4.3	Influence de volume de pate sur le comportement rhéologie des MBEs...	52
4.3.1	L'affaissement au mini au cône et temps d'écoulement.....	54
4.4	Effet de températures sur le comportement rhéologie des MBEs	56
4.4.1	MBE à base de poudre marbre	56
4.4.2	MBE à base de pouzzolane naturelle	59
4.4.3	MBE à base de laitier de haut fourneau.....	62
4.5	Influence de couple temps/températures sur le comportement rhéologique des MBEs.....	65
4.5.1	MBE à base de poudre de marbre	65
4.5.2	MBE à base de pouzzolane naturelle	69
4.5.3	MBE à base de laitier de haut fourneau.....	72
	Conclusion Générale.....	76
	Recommandations et perspectives	78
	Annexe.....	79
	Références bibliographiques.....	80

Liste des Figures

Figure 1-1. Passage du béton au MBE.....	6
Figure 1-2. L'évolution de l'étalement du mortier tamisé du béton et des mortiers potentiellement équivalents [6].....	14
Figure 1-3. Corrélation entre l'étalement MBE/Affaissement béton [6].....	14
Figure 1-4. Variation de l'étalement des bétons autoplaçants en fonction du pourcentage de pouzzolane naturelle [8].	15
Figure 1-5. Micrographies au MEB de cendres volantes [12].	17
Figure 1-6. Photographie au MEB de kaolinite (a), Photographie au MEB de métakaolin (b) [15].	18
Figure 2-1. Liquide entre deux plans sous cisaillement. Le plan supérieur est en mouvement à une vitesse par rapport à celle du plan du bas et d est la distance séparant les deux plans [20].	22
Figure 2-2. Schéma glissement des couches [22].	22
Figure 2-3. Contributions de la phase solide et de la phase liquide à la résistance au cisaillement du béton [22].	23
Figure 2-4. Comportement d'un corps thixotropique [22].	24
Figure 2-5. : Coefficient de viscosité en fonction de la température et le dosage en SP. [27].	27
Figure 2-6. : Variation du seuil 'écoulement en fonction de la température pour différentes pâtes de ciments [27].	27
Figure 2-7. : Évolution du comportement rhéologique en fonction du temps Pâte E/C=0,4 S : Quarts (pâte inerte), C : Ciment (pâte active) [22].	28
Figure 3-1. Superplastifiant utilisé.....	33
Figure 3-2 Analyse granulométrique des granulats.	39
Figure 3-3 Essai d'affaissement au mini cône.	44
Figure 3-4 Essai de temps d'écoulement à l'aide de maniabilimètre LCPC type B....	45
Figure 3-5. Rhéomètre utilisé.	46
Figure 3-6. Profil de vitesse utilisé.	46
Figure 4-1. Influence de température sur les paramètres rhéologiques des MBE de référence.....	48
Figure 4-2. Influence du temps sur le seuil de cisaillement de MBE de référence.....	49
Figure 4-3. Influence de la température sur l'affaissement et le temps d'écoulement des MBE de référence.	50
Figure 4-4. Influence du temps après malaxage sur l'affaissement des MBE de référence.....	51
Figure 4-5. Influence du temps après malaxage sur le temps d'écoulement des MBE de référence.	52

Figure 4-6. Influence de volume de pâte sur le comportement rhéologique des MBE.	52
Figure 4-7. Evolution de seuil de cisaillement en fonction de volume de pâte et de temps.	53
Figure 4-8. Evolution de la viscosité plastique en fonction de volume de pâte et de temps.	53
Figure 4-9. Influence de volume de pâte sur l'affaissement et le temps d'écoulement des MBE.	54
Figure 4-10. Evolution d'affaissement en fonction de volume de pâte et de temps.	55
Figure 4-11. Evolution de temps d'écoulement en fonction de volume de pâte et de temps.	55
Figure 4-12. Effet de la température sur le seuil de cisaillement des MBEs à base de PM.	56
Figure 4-13. Effet de la température sur la viscosité des MBEs à base de PM.	57
Figure 4-14. Effet de la température sur l'affaissement des MBEs à base de PM.	57
Figure 4-15. Effet de la température sur le temps d'écoulement des MBEs à base de PM.	58
Figure 4-16. Effet de la température sur le seuil de cisaillement des MBEs à base de PZ.	59
Figure 4-17. Effet de la température sur le seuil de cisaillement des MBEs à base de PZ.	60
Figure 4-18. Effet de la température sur l'affaissement des MBEs à base de PZ.	61
Figure 4-19. Effet de la température sur le temps d'écoulement des MBEs à base de PZ.	61
Figure 4-20. Effet de la température sur le temps d'écoulement des MBEs à base de LHF.	62
Figure 4-21. Effet de la température sur la viscosité des MBEs à base de LHF.	63
Figure 4-22. Effet de la température sur l'affaissement des MBEs à base de LHF.	64
Figure 4-23. Effet de la température sur l'écoulement des MBEs à base de LHF.	64
Figure 4-24. Effet de couple temps et température sur seuil de cisaillement des MBEs à base de PM.	65
Figure 4-25. Effet de couple temps et température sur la viscosité plastique des MBEs à base de PM.	66
Figure 4-26. Effet de couple temps et température sur l'affaissement des MBEs à base de PM.	67
Figure 4-27. Effet de couple température et temps sur l'écoulement des MBEs à base de PM.	68
Figure 4-28. Effet de couple température et temps sur seuil de cisaillement des MBEs à base de PZ.	69

Figure 4-29. Effet de couple température et temps sur la viscosité plastique des MBEs à base de PZ.	70
Figure 4-30. Effet de couple température et temps sur l'affaissement des MBEs à base de PZ.	71
Figure 4-31. Effet de couple température et temps sur l'écoulement des MBEs à base de PZ.	71
Figure 4-32. Effet de couple température et temps sur seuil de cisaillement des MBEs à base de LHF.	72
Figure 4-33. Effet de couple température et temps sur la viscosité plastique des MBEs à base de LHF.	73
Figure 4-34. Effet de couple température et temps sur l'affaissement des MBEs à base de LHF.	74
Figure 4-35. Effet de couple température et temps sur l'écoulement des MBEs à base de LHF.	75

Liste des Tableaux

<i>Tableau 1.1 Caractéristiques des gravillons du béton</i>	<i>8</i>
<i>Tableau 1.2 Nomination des différents paramètres de composition du béton et caractérisation physiques.</i>	<i>12</i>
<i>Tableau 1.3 Nomination des différents paramètres de Composition du MBE corrigé par les sables du béton.....</i>	<i>12</i>
<i>Tableau 1.4 Composition du MBE suivant le type de correction.</i>	<i>13</i>
<i>Tableau 3.1 Caractéristiques minéralogique du ciment CEMI 42.5/ES (cimenterie d'Aflou)</i>	<i>30</i>
<i>Tableau 3.2 Caractérisation chimique et physico -mécaniques du laitier.</i>	<i>31</i>
<i>Tableau 3.3 Caractérisation chimique et physico -mécaniques de la pouzzolane.</i>	<i>32</i>
<i>Tableau 3.4 Caractérisation chimique et physico -mécaniques de la poudre de marbre.....</i>	<i>33</i>
<i>Tableau 3.5 Caractérisation chimique et physico -mécaniques de la poudre de marbre.....</i>	<i>34</i>
<i>Tableau 3.6. Propriétés physiques des agrégats utilisés.</i>	<i>36</i>
<i>Tableau 3.7. Résultats de l'analyse granulométrique du sable.....</i>	<i>37</i>
<i>Tableau 3.8. Analyse granulométrique du gravier 3/8.....</i>	<i>38</i>
<i>Tableau 3.9. Analyse granulométrique du gravier 8/15.....</i>	<i>38</i>
<i>Tableau 3.10. Composition de béton</i>	<i>40</i>
<i>Tableau 3.11. La surface développée du mélange des graviers.....</i>	<i>41</i>
<i>Tableau 3.12. La surface développée de sable.....</i>	<i>41</i>
<i>Tableau 3.13. Proportion des MBE pour 1.5 litres</i>	<i>41</i>
<i>Tableau 3.14. Composition des MBE en fonction de volume de pâte pour 1.5 litres.</i>	<i>42</i>
<i>Tableau 3.15. Composition des MBE en fonction des additions minérales.....</i>	<i>43</i>

Liste des symboles

TM_i : tamis supérieur.

Tm_i : tamis inférieur.

RM_i : refus supérieur.

Rm_i : refus inférieur.

dt : le temps

dF : Projection de la force de frottement tangentielle.

dS : Surface élémentaire d'une couche cisillée.

τ : Contrainte de cisaillement [Pa].

τ_0 : Seuil de cisaillement [Pa].

Sp : Teneur en superplastifiant.

CaO : Oxyde de calcium

SiO_2 : Silice

Al_2O_3 : Alumine

Fe_2O_3 : Oxyde de fer

MgO : Oxyde magnésium

Na_2O : Oxyde de sodium

K_2O : Oxyde de potassium

SO_3 : Trioxyde de soufre

C_3S : Silicate tricalcique (Aalite)

C_2S : Silicate bicalcique (bélite)

C_3A : Aluminate tricalcique (célite)

C_4AF : Alumino-ferrite tétracalcique

PMS : Poly Mélamines Sulfonâtes

PC : Polycarboxylates

$Ca(OH)_2$: Chaux

CSH : Silicates de calcium hydratés

Introduction générale

La rhéologie est définie comme étant la science qui traite l'écoulement, les déformations, et plus généralement la viscosité des matériaux sous l'action type des contraintes. La rhéologie est capable d'intégrer l'étude de l'ensemble des substances, qu'elles soient liquides ou solides. L'intérêt de la rhéologie grandit chaque jour depuis l'apparition des nouveaux matériaux aux comportements complexes tels que : pâtes, additions, polymères, etc. Parmi ces matériaux les bétons à faible impact environnemental, qui sont des bétons économiques et écologiques obtenus en réduisant la quantité de clinker et en incorporant des matériaux de substitution [1]. Devant les besoins sans cesse croissant des ressources en matériaux et aux exigences et conditions de préservation de l'environnement dans une vision de développement durable, il est devenu nécessaire et pertinent de prospecter et étudier toutes les possibilités et opportunités de réutilisation et de valorisation des déchets et sous-produits industriels.

Le développement des bétons à faible impact environnemental exige une connaissance plus fondamentale de leurs propriétés rhéologiques et leur ouvrabilité, pour limiter les difficultés liées au malaxage, à l'écoulement dans les coffrages, au maintien de la stabilité rhéologique, à la capacité à se consolider ainsi que la réalisation d'une finition de surface adéquate. Les paramètres rhéologique et l'ouvrabilité de ces bétons dépendent fortement de leur composition telles que le Eau/Ciment (E/C), granulométrie de granulats, la pâte, les additions minérales, les adjuvants, etc. Il est utile de préciser que le volume de pâte est un facteur important influe la rhéologie du béton. Le rôle de la pâte (ciment + adjuvant + eau + air) étant précisément d'écarter et de limiter le frottement entre les granulats [2]. De même degré d'importance que les paramètres de formulation, les conditions climatiques et le temps pendant lesquels le béton est mis en œuvre, sont des facteurs déterminants pour le comportement rhéologique et l'ouvrabilité des bétons. Les conditions climatiques lors de la mise en œuvre ont une grande influence sur la qualité finale du béton. Le béton est sensible à la température qui agit sur sa rhéologie et son évolution dans le temps, la vitesse de prise, la cinétique de durcissement, l'évaporation et la dessiccation du béton. Il convient de se préoccuper de cette sensibilité aux températures dès la préparation du béton, puis, pendant son transport, sa mise en œuvre, son durcissement et sa cure jusqu'à maturité.

L'objectif de ce travail de recherche est de contrôler le comportement rhéologique de ce béton à travers son mortier équivalent, et d'identifier soigneusement l'effet de volume de pâte et de la température sur ses paramètres rhéologiques, son ouvrabilité ainsi que sa stabilité dans le temps.

Le travail expérimental est divisé en trois phases, dont la première phase est focalisée sur l'étude de l'influence de volume de pâte de ciment pure sur la rhéologie, l'ouvrabilité et leur rétention dans le temps. En revanche la deuxième phase est spécifiée pour l'étude de l'effet de température le comportement rhéologique et l'ouvrabilité des mortiers de bétons équivalents où le ciment ordinaire est substitué partiellement par différentes additions minérales telles que la poudre de marbre, la pouzzolane naturelle et le laitier de haut fourneau, tandis que la troisième phase est établie pour l'étude de l'effet de couple température/temps sur les paramètres rhéologiques l'ouvrabilité et le temps d'écoulement qu'ont été mesurés respectivement par un rhéomètre, un mini cône, un maniabilimètre.

En plus de l'introduction générale ce mémoire s'articule sur quatre chapitres. Dans le premier chapitre nous prestons une synthèse bibliographique dans laquelle nous traitons les mortiers de béton équivalent, leur principe et calcul et les additions minérales. Le deuxième chapitre consacré à un état de connaissance de la rhéologie, les notions de base et les facteurs influencent la rhéologie. Le troisième chapitre est destiné à la caractérisation des matériaux utilisés ainsi nous expliquons la méthode de formulation des mortiers de béton équivalent et par la suite nous présentons les essais effectués sur le mortier. Dans le dernier chapitre nous exposons les différents résultats obtenus par les essais réalisés, après nous les analysons et les discutons. Enfin, une conclusion et des recommandations sont données afin de poursuivre le travail dans cet axe de recherche.

1. Mortier de béton équivalent

1.1 Béton à faible impact environnemental

1.1.1 Introduction

L'impact environnemental du béton, sa fabrication et ses applications sont complexes. Le composant majeure du béton est le ciment, qui a ses propres impacts environnementaux et sociaux et contribue largement à ceux du béton. L'industrie du ciment est l'un des principaux producteurs de dioxyde de carbone (CO_2), un puissant gaz à effet de serre. Le béton endommage la couche la plus fertile de la terre, la couche arable. Une nouvelle forme de béton potentiellement durable a été récemment créée pour en faire le type de matériau de construction plus respectueux de l'environnement. Le béton dans sa forme traditionnelle est fabriqué à partir de ciment mélangé avec une gamme d'agréments grossiers tels que du gravier, du calcaire ou du granit, et des particules plus fines des agrégats tels que du sable ou des cendres volantes. Ceux-ci sont mélangés avec de l'eau, pour former un collage de structure à séchage rapide, qui peut facilement être manipulée sous de nombreuses formes. C'est le matériau de construction le plus couramment utilisé dans le monde. Malheureusement, le béton n'est pas un matériau respectueux de l'environnement, soit à fabriquer, soit à utiliser, voire à éliminer. Car pour gagner les matières premières pour fabriquer ce matériau, beaucoup d'énergie et de l'eau doit être utilisée, et l'extraction du sable et d'autres agrégats provoque la destruction de l'environnement et la pollution. Le béton est également considéré comme une énorme source d'émissions de carbone dans l'atmosphère. Certains prétendent que le béton est responsable jusqu'à 5% de la quantité totale d'émissions de carbone dans le monde, ce qui contribue au gaz à effet de serre [3]. La raison de l'énorme popularité du béton est le résultat d'un certain nombre d'avantages bien connus, tels que faible coût, disponibilité générale et large applicabilité. Mais cette popularité du béton entraîne également un coût environnemental élevé. Les milliards de tonnes de matières naturelles extraites et transformées chaque année, par leur volume, sont tenus de laisser une marque substantielle sur l'environnement. Les plus dommageables sont les énormes quantités d'énergie nécessaires pour produire du ciment Portland ainsi que les grandes quantités de CO_2 rejetées dans l'atmosphère dans le processus. Différents efforts en cours pour améliorer le respect de l'environnement du béton pour le rendre approprié comme matériau de « construction verte ». Le plus efficace à cet égard est l'utilisation de substituts appropriés pour le ciment Portland, en particulier ceux qui sont sous-produits de procédés industriels, comme les cendres

volantes, les scories de haut fourneau granulées broyées et les fumées de silice. Aussi les efforts pour utiliser des matériaux recyclés appropriés comme substituts des granulats de béton gagnent en importance, sous forme d'agrégat de béton recyclé, de verre post-consommation, de pneus, etc.[4]. Mais en identifiant et en exploitant les propriétés spécifiques inhérentes à divers déchets ou sous-produits, il est possible d'ajouter de la valeur à ces matériaux et augmentent leurs chances de succès dans une économie de l'offre et de la demande axée sur le marché

1.1.2 Importance des bétons à faible impact environnemental

L'objectif principal d'une production de bétons à faible impact environnemental est de réduire les résidus nocifs produits dans diverses industries et de rendre le béton économique. Pour ce faire, une nouvelle technologie a été développée. La technologie examine toutes les étapes du cycle de vie de la construction en béton, c'est-à-dire la conception structurelle, les spécifications, la fabrication et la maintenance, et inclut tous les aspects de la performance, c'est-à-dire les propriétés mécaniques, y compris (résistance, retrait, rampement, comportement fixe, etc.), la qualité d'exécution, comme l'opérabilité, le développement de l'énergie, le traitement, etc.

Quant aux aspects environnementaux, ils sont :

- Réduction de 30% des émissions de CO₂ dans l'industrie du béton ;
- Utilisation accrue des déchets dans l'industrie du béton de 20% ;
- Amélioration de la résistance à l'amortissement du bâtiment ;
- Pour un développement permanent et sans pollution de l'environnement ;
- La résistance à la rotation du béton écologique est presque égale à celle du béton ordinaire ;
- Vitesse de construction, réduisant le temps total de construction ;
- Bonne résistance à la chaleur et au feu et insonorisée par rapport aux roches de granit traditionnelles ;
- La durabilité est considérée comme une protection contre la corrosion comme le gel, les nouveaux mécanismes de dégradation, etc.

1.2 Formulation de mortier de béton équivalent

1.2.1 Introduction

C'est une nouvelle façon d'aider à l'utilisation des additifs pour béton. Il consiste en une conception, une composition de béton, un mortier appelé mortier de béton équivalent (MBE), ses propriétés rhéologiques liées aux propriétés du béton. L'objectif est de réduire le nombre de déchets de béton. La méthode, la portée et les limites du développement de la méthode sont présentées par la suite. Le mode de fonctionnement et l'équipement nécessaires sont détaillés aussi. Un exemple de la relation entre les caractéristiques d'écoulement mesurées sur MBE et celles mesurées sur le béton d'accompagnement est fourni. En plus de la surveillance rhéologique, une surveillance thermique MBE peut être effectuée. Il permet d'anticiper les effets de divers ajouts sur performance des mortiers à béton équivalent. Les transformations observées par observation thermique se sont révélées refléter des écarts de résistance à des temps très courts. En combinant surveillance rhéologique et thermique, la méthode MBE permet une sélection rapide parmi différents matériaux répondant aux exigences d'efficacité (rapport dose / coût), de maintenance rhéologique et de temps de coffrage.

1.2.2 Principe de la méthode de mortier de béton équivalent

Pour contourner la difficulté à reproduire en laboratoire les conditions exactes du malaxage du béton en centrale et pour limiter la lourdeur des études sur béton, il s'est avéré nécessaire d'utiliser une méthode d'essai rapide et capable de fournir des résultats pouvant être corrélés avec ceux qui seraient obtenus sur le béton. La méthode retenue consiste à travailler sur la phase mortier du béton avec prise en compte *de la surface développée des gravillons retirés*. Pour cette raison, la méthode a été appelée méthode du mortier de béton équivalent ou méthode MBE [5].

Pour utiliser cette méthode, il convient de connaître au préalable les éléments d'identification des constituants et les bases de composition suivante :

- La granulométrie de chaque classe de granulats ;
- Leurs masses volumiques ;
- Leurs taux d'absorption d'eau ;
- Leurs teneurs en eau totales ;

- La nature et le dosage en ciment (ou en liant équivalent) ;
- Les caractéristiques des adjuvants ;
- La composition granulaire du mélange.

Ces éléments préalables peuvent être complétés par la connaissance des contraintes particulières imposées par le chantier (durées de transport, variations de températures, conditions de coulage...).

Les différents essais rhéologiques qui seront appliqués sur le mortier restent du même type que ceux qui le seront sur le béton correspondant. Ainsi aux essais d'affaissement au cône d'Abrams et d'étalement du béton correspondront les essais d'affaissement et d'étalement au mini-cône du mortier MBE. Les corrélations établies sont généralement bonnes dans les domaines d'emplois respectifs de chaque essai.

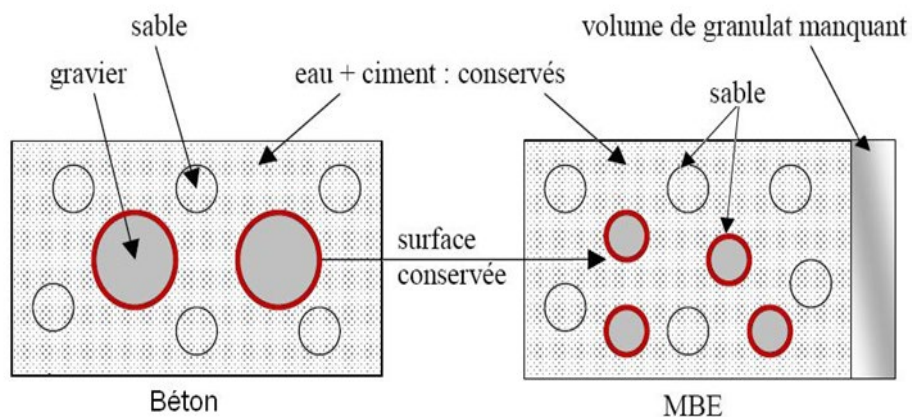


Figure 1-1. Passage du béton au MBE.

1.2.3 Calcul de mortier de béton équivalent (MBE)

L'approche du mortier de béton équivalent (MBE) a été initialement développée au CTG (Guerville, France) [5], pour faciliter la sélection des adjuvants lors de la formulation d'un béton en utilisant des tests sur mortier au lieu de tests sur béton. En fonction des essais préalables réalisés, les résultats obtenus peuvent être utilisés de façon qualitative ou quantitative.

L'expérience accumulée au cours des dernières années dans de nombreuses applications industrielles a confirmé la validité de cette méthode. Cependant, l'ensemble de ces exemples concernait des bétons d'ouvrabilité classique

1.2.4 Caractéristiques du béton de base

Composition de la méthode MBE débute nécessite une parfaite connaissance des caractéristiques du béton qui sont liées à sa destination et qui sont en général connues quand on part d'un béton existant. Il est donc nécessaire pour établir les grandes lignes de la formule de béton, de connaître les points suivants

- Pour le béton :
 - Catégorie du béton ;
 - Classe de consistance.
- Pour les constituants :
 - Ciment ;
 - Adjuvants ;
 - Sable, gravillons ;
 - Eau de gâchage ;
 - Additions.
- Sa mise en œuvre :
 - Températures du béton frais et extérieur ;
 - Conditions de coulage et de serrage ;
 - Durée et conditions de transport.

Une fois ce béton défini (cahier des charges établi), on calcule le mortier équivalent correspondant "MBE" selon la méthode d'essai

1.2.4.1 Calcul des surfaces développées par les granulats

La première partie de la transformation consiste à évaluer la surface développée par chacun des granulats dans le béton. Pour ce faire, il faut d'abord admettre les hypothèses suivantes :

- 1- Les particules constituant les granulats sont des sphères parfaites,
- 2- Malgré leur porosité ces sphères sont considérées indéformables dans l'eau.
- 3- À l'intérieur de chaque tranche granulaire, la densité de la particule moyenne est considérée indépendante de sa taille et reste égale à celle du granulat considéré.

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 du sable

1.2.5 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.

1.2.5.1 Calculs de la granulométrie du mélange de gravillons du béton

Gravillons G3 et G4, qui présentent les caractéristiques suivantes :

Tableau 1.1 *Caractéristiques des gravillons du béton*

Caractéristiques des gravillons du béton			
Gravillon	Dosage dans le béton	Masse volumique	Refus au tamis (t_i)
G ₃	g_3	ρ_3	R_{i3}
G ₄	g_4	ρ_4	R_{i4}

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 :

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

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

$$\rho_g = (g_3 \cdot \mu_3 + g_4 \cdot \mu_4) / (g_3 + g_4) \dots\dots\dots(2)$$

1.2.5.2 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

1.2.5.3 Calcul de la masse de chaque tranche granulaire

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

$$Mi = (Rm_i - RM_i) \cdot (g_3 + g_4) / 100 \dots\dots\dots(3)$$

1.2.5.4 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 :

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

1.2.5.5 Calcul du volume de la particule moyenne dans chaque tranche

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

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

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

1.2.5.6 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 :

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

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

1.2.5.7 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.

$$\omega = 1 / \rho_g \dots \dots \dots (7)$$

1.2.5.8 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, ces paramètres ont été définis aux paragraphes précédents.

1.2.5.9 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

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

1.2.5.10 Calcul de la surface développée par les particules 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 :

$$S_i = N_i . s_i \dots \dots \dots (10)$$

1.2.5.11 Calcul de la somme de l'ensemble des surface 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 :

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

1.2.6 Cas des gravillons de masses volumiques différentes

Dans ce cas, le calcul doit être effectué séparément pour chaque gravillon et dans ce contexte le calcul de la surface développée par chaque classe de gravillons du béton est organisé chronologiquement comme suit :

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

1.2.7 Cas des sables du béton

Il convient de déterminer la surface développée par le sable du béton et qui sera utilisé dans le mortier MBE. La démarche adoptée est rigoureusement identique à celle utilisée pour les gravillons même dans le cas d'emploi de deux sables de masses volumiques distinctes.

1.2.7.1 Calcul de la composition du mortier de béton équivalent

La correction granulaire du mortier MBE est généralement réalisée à partir des sables du béton. Il convient donc d'adopter la démarche suivante :

- 1- Calculer les surfaces développées (S_{dsi}) par chaque sable (S_i) du béton comme indiqué précédemment ;
- 2- Déterminer les taux de correction par chaque sable selon la méthode décrite ci-dessous.

Si la composition du béton de départ est caractérisée par les éléments suivants :

Tableau 1.2 Nomination des différents paramètres de composition du béton et caractérisation physiques.

Constituants	Composition (kg/m ³)	Masse volumique (kg/dm ³)	Absorption d'eau (%)	Extrait sec (%)
Ciment C	C	ρ_c		--
Sable S ₁	s ₁	ρ_1	Abs ₁	--
Sable S ₂	s ₂	ρ_2	Abs ₂	--
Gravillon G3	g ₃	ρ_3	Abg ₃	--
Gravillon G4	g ₄	ρ_4	Abg ₄	--
Eau efficace	E _{eff}	1	--	--
Adjuvant A ₁	a ₁	ρ_{a1}	--	xta ₁
Adjuvant A ₂	a ₂	ρ_{a2}	--	xta ₂

La composition du mortier de béton équivalent sera définie comme suit :

Tableau 1.3 Nomination des différents paramètres de Composition du MBE corrigé par les sables du béton.

Constituants	Composition (kg/m ³)	Masse volumique (kg/dm ³)	Absorption d'eau (%)	Extrait sec (%)
Ciment C	C	ρ_c		--
Sable S ₁	s' ₁	ρ_1	Abs ₁	--
Sable S ₂	s' ₂	ρ_2	Abs ₂	--
Adjuvant A ₁	A ₁	ρ_{a1}	--	xta ₁
Adjuvant A ₂	A ₂	ρ_{a2}	--	xta ₂

Où les quantités s'₁ et s'₂ sont calculées de façon à assurer le postulat d'équivalence entre les surfaces développées respectivement par les sables S₁ et S₂ du MBE d'une part et par tous les granulats du béton (S₁, S₂, G₃, G₄) d'autre part. Ce postulat peut encore s'écrire plus simplement au niveau des surfaces développées (SD) :

$$SD (s'_1 - s_1 + s'_2 - s_2) = SD (g_3 + g_4)$$

Les quantités s'₁ et s'₂ peuvent être alors déduites comme suit :

$$SDs'_1 + SDs'_2 = SDs_1 + SDs_2 + SDg_3 + SDg_4$$

En outre

$$\frac{s'_1}{s'_2} = \frac{s_1}{s_2}$$

Soit :

$$\frac{SDs'_1}{SDs'_2} = \frac{SDs_1}{SDs_2}$$

Donc

$$SDs'_1 = \frac{SDs_1}{SDs_2} \times (SDs_1 + SDs_2 + SDg_3 + SDg_4 - SDs_1)$$

Ou encore

$$SDs'_1 \times \left(1 + \frac{SDs_1}{SDs_2}\right) = \frac{SDs_1}{SDs_2} \times (SDs_1 + SDs_2 + SDg_3 + SDg_4)$$

$$SDs'_1 = \frac{SDs_1}{SDs_2} \times \frac{(SDs_1 + SDs_2 + SDg_3 + SDg_4)}{1 + \frac{SDs_1}{SDs_2}}$$

Et

$$s'_1 = \frac{SDs'_1 \times s'_1}{SDs_1}$$

s'_2 pouvant être calculé de la même façon.

1.2.8 Bilan des compositions du mortier (MBE)

Tableau 1.4 Composition du MBE suivant le type de correction.

Constituants	Composition de	Composition du MBE		
Possibles du mortier	la Phase mortier du Béton	Corrigé par sable standard	Corrigé par le sable du béton	Non corrigé
Ciment C	C	c	C	c
Sable S ₁	s ₁	s ₁	s' ₁	s ₁
Sable S ₂	s ₂	s ₂	s' ₂	s ₂
Sable correcteur Sc		s _c		

1.2.9 Corrélation entre le béton et le mortier

Afin de valider le postulat énoncé plus haut, nous avons défini des formulations pour lesquelles seule la nature du ciment et, le dosage et la nature de l'adjuvant variaient. Cinq

compositions de béton dosés $\sim 400 \text{ kg/m}^3$ de ciment CPA-CEM I contenant différents superplastifiants ont été testés. Pour chacune d'elles, des suivis rhéologiques sur MBE et sur béton ont été effectués.

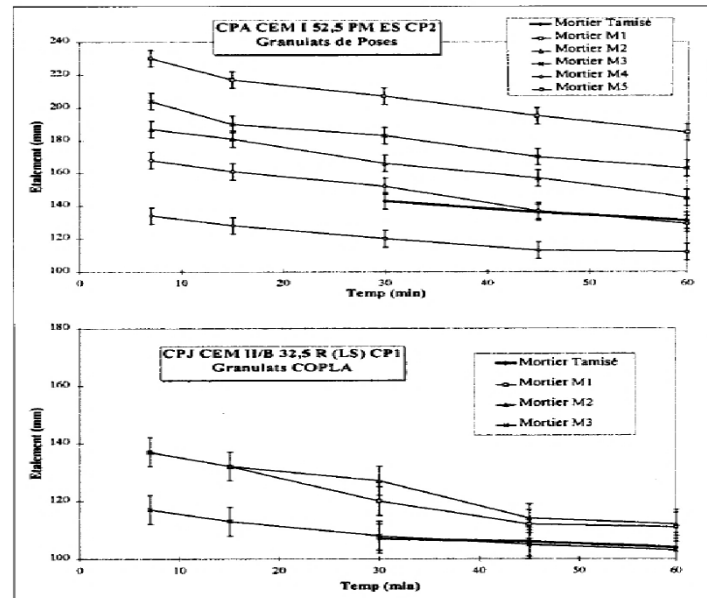


Figure 1-2. L'évolution de l'étalement du mortier tamisé du béton et des mortiers potentiellement équivalents [6].

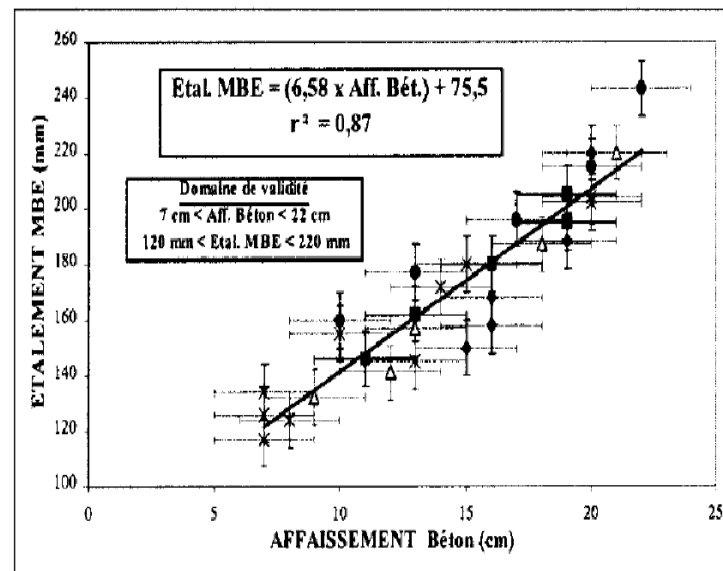


Figure 1-3. Corrélation entre l'étalement MBE/Affaissement béton [6].

La Figure 1.3 présente l'ensemble des résultats obtenus. Chaque point correspond à une échéance donnée. La relation entre l'étalement MBE et l'affaissement béton peut être

modélisée par une droite avec une corrélation satisfaisante (coefficient de corrélation de 0,87) dans les plages de mesures étudiées.

1.3 Les additions minérales

1.3.1 La pouzzolane naturelle

Les pouzzolanes naturelles sont exploitées pour la production des ciments composés. Ce sont des matériaux naturels riches en silice SiO_2 , d'alumine Al_2O_3 et d'oxyde ferrique Fe_2O_3 [2] ne possèdent pas de propriétés liantes, mais quand elles sont sous forme de poudre très fine, capables de réagir avec la chaux en présence de l'eau à température ordinaire et de former à l'issue de cette réaction des produits possédant des propriétés liantes. Les avantages du remplacement partiel du ciment par la pouzzolane naturelle sont divers. Elles permettent la réduction de la quantité de clinker utilisée dans la composition du ciment. Elles participent à l'amélioration de l'ouvrabilité et du comportement rhéologique et mécanique dans certaine mesure. Ainsi au renforcement de la résistance aux attaques chimiques et de la durabilité [7]. En Algérie, ce matériau est disponible en abondance dans la région de l'Ouest exactement à Beni-Saf. Elle est commercialisée principalement par la société < *Ferphos* >. Belaidi et al [8] ont montré que l'addition de PZ jusqu'à 15% améliore la déformabilité des BAP (Fig. 1.4.).

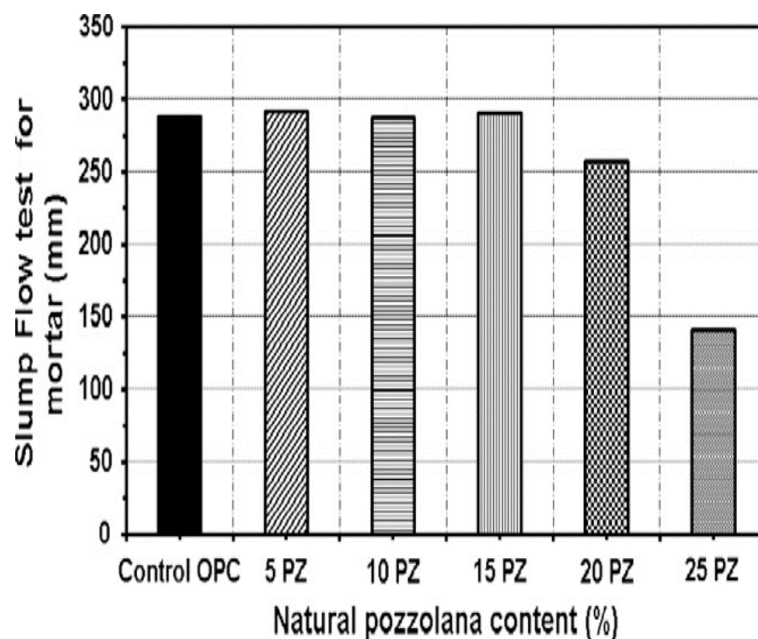


Figure 1-4. Variation de l'étalement des bétons autoplaçants en fonction du pourcentage de pouzzolane naturelle [8].

1.3.2 Le laitier de haut fourneau

Le laitier de hauts fourneaux est un sous-produit des usines sidérurgiques formé essentiellement de silicates et d'aluminosilicates de calcium et d'autres substances minérales. Une fois sorti du four, 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. Le laitier de haut fourneau est un matériau hydraulique latente, c'est-à-dire qui présente des propriétés hydrauliques lorsqu'il subit une activation convenable. En Algérie, le LHF est actuellement utilisé pour la production des ciments résistants aux sulfates avec le ciment Portland artificiel à faible teneur en C_3A [9]. Les résultats des recherches sur l'incorporation du LHF dans les ciments et les bétons sont positives autant sur le plan technique, économique qu'environnemental, ce qui encourage de plus en plus les industries de ciment à l'utiliser avec de grandes quantités. En effet, l'utilisation du laitier permet (1) d'améliorer l'ouvrabilité et d'augmenter la pompabilité du béton, (2) diminuer la chaleur d'hydratation, (3) augmenter la résistance à long terme, (4) réduire la perméabilité, (5) conférer au béton une résistance élevée à la pénétration des ions chlorures, (6) réduire les émissions de dioxydes de carbone liée à la production du clinker.

Le remplacement d'une partie du ciment par des laitiers de hauts fourneaux permet Globalement de réduire le seuil de cisaillement et la viscosité des pâtes de ciment [10], Li et Ding [11] ont trouvé que l'incorporation du laitier à raison de 20 à 30% dans le mortier améliore son ouvrabilité.

1.3.3 Les cendres volantes

Les cendres volantes sont des sous-produits de la combustion du charbon pulvérisé dans les centrales de production d'énergie électrique. Elles sont collectées à partir des gaz de combustion par des dépoussiéreurs électrostatiques ou des filtres à manches. Les cendres volantes se présentent sous forme de particules fines sphériques ou exosphériques creuses. La **Figure1.5.** montre des images de cendres volantes obtenues au microscope électronique à balayage et qui permettent de visualiser leur forme sphérique. Les tailles des particules de cendres volantes varient au moins de 1 μm (micromètre) à 100 μm , seulement 10 % à 30 % des particules sont plus grandes que 45 μm . La surface spécifique est typiquement de 300 à 500 m^2/kg , bien que certaines cendres volantes puissent avoir des surfaces plus faibles que 200 m^2/kg et plus grandes que 700 m^2/kg . La cendre volante est principalement un verre de silicate contenant de la silice, de l'alumine, du fer et du calcium. Elle peut contenir également

des constituants mineurs comme le magnésium, le soufre, le sodium et le potassium. Les phases cristallines sont présentes en petites quantités. La densité relative (masse volumique) des cendres volantes est généralement comprise entre 1,9 et 2,8 et la couleur est généralement grise ou beige.

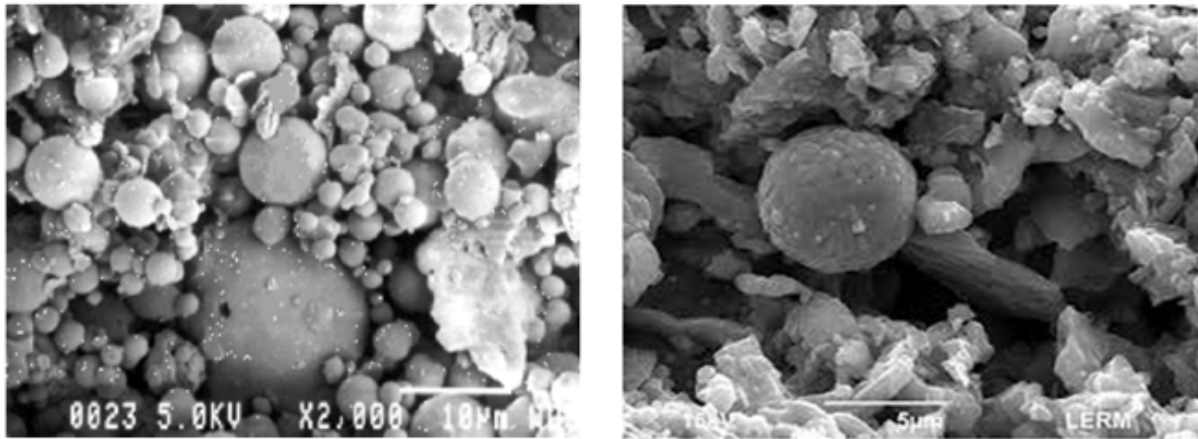


Figure 1-5. Micrographies au MEB de cendres volantes [12].

Les cendres volantes sont largement utilisées dans le béton comme addition et comme pouzzolane. Lorsqu'elles sont mélangées au ciment et l'eau, elles s'hydratent et réagissent avec la portlandite libérée lors de l'hydratation du clinker pour former des **C-S-H**. Grâce à leurs diverses propriétés, elles permettent lorsqu'elles sont bien utilisées, d'améliorer la maniabilité du béton, d'augmenter ses résistances mécaniques et d'améliorer sa durabilité. De plus leur utilisation dans les bétons présente une contribution importante à la construction durable. [13].

1.3.4 Le métakaolin

Le métakaolin est un produit généralement obtenu par calcination des argiles renfermant du kaolin afin d'obtenir l'état amorphe de ce dernier. Il est composé essentiellement de silice active (amorphe) et d'alumine. Il est considéré aujourd'hui comme une pouzzolane. Changling et al [14] ont étudié la stabilité thermique et l'activité pouzzolanique de kaolins calcines dans les différentes zones de température : 550-700 ° C, 648 - 982 ° C ; 538 - 932° C ; 680 - 980° C, ou 850° C. Ils ont observé que le métakaolin pur est obtenu après calcination du kaolin de 650 à 800 ° C et qu'à 950 ° C, il y a recristallisation et formation de la mullite avec une diminution importante de la phase amorphe entre 800 et 900 ° C. Ils ont conclu que la réactivité pouzzolanique des kaolins est maximale après calcination entre 550 et 800 ° C

[15]. La morphologie des métakaolins est ordinairement proche de la morphologie de la kaolinite de départ, cette dernière se présentant sous forme de feuillets hexagonaux, accolés les uns aux autres et d'une épaisseur de quelques Angströms. Lors de la transformation de la kaolinite en métakaolin, les feuillets s'écartent en libérant l'eau libre de l'interfeuillé comme illustre sur les images au microscope électronique à balayage (**Figure 1-6**). De plus l'altération notable du métakaolin vient certainement du broyage qui intervient après la phase de d'hydroxylation dans le processus de calcination habituel. Les particules plus fines avec une forme lamellaire comme le métakaolin entraînent une bonne cohésion et une meilleure résistance à la ségrégation. Le métakaolin est également très efficace dans la réduction ou l'élimination du ressuage, ce qui peut poser des problèmes d'écaillage rapide sur la surface des échantillons.

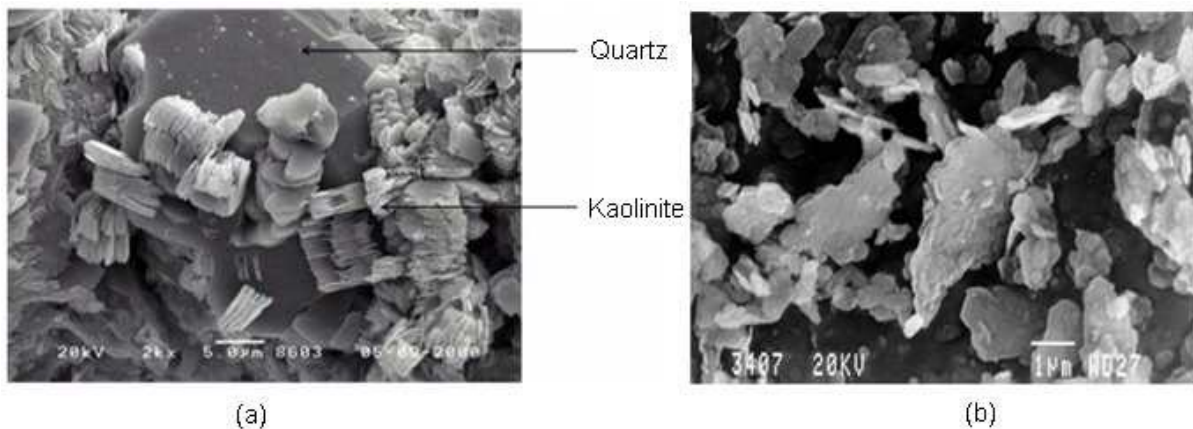


Figure 1-6. Photographie au MEB de kaolinite (a), Photographie au MEB de métakaolin (b) [15].

Depuis quelques années, le métakaolin (MK) fait l'objet de nombreuses investigations de par les propriétés intéressantes qu'il peut prodiguer aux bétons grâce à ses propriétés pouzzolaniques. Les principales caractéristiques de ce produit résident dans sa composition chimique ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$), sa finesse (surface spécifique entre 15 et 20 m^2/g), et sa phase amorphe. Celles-ci permettent au MK de donner une activité pouzzolanique plus ou moins élevée ; parfois, elle est comparée avec celle de la fumée de silice.

Aujourd'hui, le métakaolin est qualifié comme une pouzzolane très active pouvant remplacer partiellement le ciment portland dans la pâte de ciment, le métakaolin par le biais de sa silice active (amorphe) réagit avec la portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$, produit d'hydratation du clinker, pour former du gel de C-S-H principal responsable du développement des résistances mécaniques [16].

1.3.5 Les fillers calcaires

Le filler calcaire est un matériau inerte très finement broyé à une finesse à peu près identique à celle du ciment Portland, qui peut être un matériau naturel ou provenant du traitement de certains minéraux inorganiques. En raison de ses propriétés physiques, il a un effet bénéfique sur certaines caractéristiques du béton (maniabilité, perméabilité, masse volumique).

L'utilisation des fillers calcaires dans l'industrie du ciment et du béton est assez récente. Les additions calcaires dans les matrices cimentaires ont déjà fait l'objet de plusieurs études, essentiellement en France et aux Etats-Unis d'Amérique [17].

Ils sont soit récupérés lors du concassage des granulats calcaires et peuvent alors contenir des résidus argileux et des matières organiques, soit obtenus par broyage du matériau cru. Leur composition chimique est celle du carbonate de calcium (CaCO_3) mais ils peuvent contenir aussi du magnésium (sous forme $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), s'il réagit de calcaires dolomitique.

Les calcaires peuvent avoir des origines géologiques différentes, métamorphique (il s'agit de marbres) ou sédimentaire. Ils peuvent aussi exister sous plusieurs formes polymorphiques (calcite, aragonite, vaterite).

La rhéologie des pâtes, des mortiers et des bétons dépend de la qualité du filler et de sa finesse. Si le filler est finement broyé, il y aura une réduction de la quantité d'eau pour une maniabilité fixe, surtout pour des rapports $E/C < 0,40$. Il est important de signaler que la présence de fines d'argile dans le filler peut augmenter la demande en eau. (Alexander, 1972 citer par Manai, Khaled[17] rapporte que l'ouvrabilité du béton augmente avec la finesse du filler calcaire jusqu'à 500 m²/kg. Au-delà de cette limite, il peut y avoir des problèmes de maniabilité.

1.3.6 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 uniquement composée de calcite (100 % CaCO_3). Mis en œuvre dans la construction et la décoration. Une grande quantité de poudre est générée lors de coupage, façonnage et lustration des pierres de marbre. La substitution de ciment par la

poudre de marbre apporté un effet bénéfique sur le comportement rhéologique. Comme tous les ajouts incorporés dans le mortier et le béton elle n'altère pas trop les caractéristiques du béton, et permettra de réduire l'impact de sa mise en décharge. Belaidi et al [8] ont étudié l'incorporation de la poudre de marbre dans le mortier auto plaçant. Ils ont conclu que la substitution du ciment avec des teneurs de poudre de marbre de 5 à 30% conduit non seulement à une diminution du seuil de cisaillement, mais aussi la viscosité plastique.

1.4 Conclusion

La réduction des impacts environnementaux est aujourd'hui incontournable et doit passer par des solutions constructives innovantes, à la fois utilisatrices de matériaux à faible émission et dont les procédés de production restent peu énergivores. Le développement de bétons à base de liant constitué d'autres matières premières que le clinker, telles que du laitier de haut fourneau, du calcaire, des cendres volantes..., associées à un procédé de production optimisé, devraient permettre de répondre à ces objectifs tout en garantissant les performances à court et à long terme, dont une bonne durabilité.

2 Etat des connaissances sur la rhéologie

2.1 Introduction

La rhéologie est un mot qui vient du rio grec et des logos qui signifient respectivement flux et étude. , Est une branche de la physique qui étudie l'écoulement ou la déformation d'objets sous l'influence de pressions appliquées, qui varient dans le temps dans le domaine du génie civil, avec le développement de nouveaux bétons et de techniques de placement comme le pompage et la pulvérisation, la maîtrise des comportements rationalisés à l'état frais devient cruciale pour faciliter sa mise en œuvre.

2.2 Notion de base sur la rhéologie

2.2.1 Contrainte de cisaillement

Au cours d'un mouvement laminaire de cisaillement, les couches sont animées d'un mouvement relatif les unes par rapport aux autres. Il en résulte l'apparition de contraintes τ [Pa], qui s'exerce tangentielllement à la surface de la couche [18]. Donc, on peut dire que la contrainte de cisaillement est la force que l'on exerce par unité de surface du fluide :

$$\tau = \frac{df}{ds} \dots \dots \dots (2.1)$$

Où :

df : projection de la force de frottement tangentielle.

ds : surface élémentaire d'une couche cisailé

2.2.2 Le taux de cisaillement

Le taux de cisaillement n'est autre que la variation de la vitesse en fonction de l'épaisseur et aussi appelé vitesse de cisaillement et par abus de langage on dit parfois cisaillement : il s'agit donc également dans cette configuration du gradient de vitesse : il s'agit donc également dans cette configuration du gradient de vitesse qui s'écrit sous la forme : [19]

$$\dot{\gamma} = \frac{df}{dt} = \frac{V_0}{d} \dots \dots \dots (2.2)$$

Où:

df (V_0) : projection de la force de frottement tangentielle.

dt: le temps

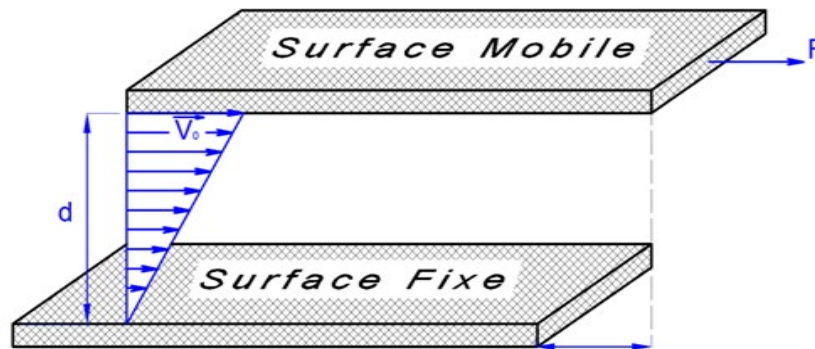


Figure 2-1. *Liquide entre deux plans sous cisaillement. Le plan supérieur est en mouvement à une vitesse par rapport à celle du plan du bas et d est la distance séparant les deux plans [20].*

2.2.3 La viscosité

La viscosité est une propriété importante des fluides qui décrit une résistance des liquides à l'écoulement et qui est liée à la friction interne qui a lieu dans le fluide. Le type de comportement d'écoulement le plus courant est l'écoulement en cisaillement où les couches de fluide se déplacent les unes par rapport aux autres en réponse à une force de cisaillement.

Cette force externe prend la forme d'une contrainte de cisaillement définie comme étant la force agissant sur une unité de surface de fluide. Ce phénomène donne lieu à ce qu'on appelle un gradient de vitesse sur l'épaisseur de l'échantillon. La viscosité de cisaillement ou la viscosité dynamique relative à ce processus correspond au rapport entre la contrainte de cisaillement et le gradient de vitesse [21].

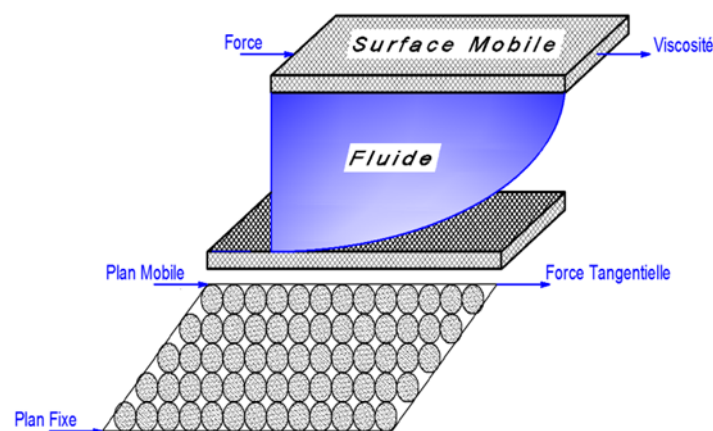


Figure 2-2. *Schéma glissement des couches [22].*

2.2.4 Le seuil de cisaillement

Le seuil de cisaillement est la force minimale requise pour déplacer un fluide soumis à une contrainte de cisaillement. En dessous de ce seuil, le liquide a les propriétés d'un solide flexible, mais une fois que la pression atteint ce seuil, le béton se comporte comme un fluide newtonien qui a une viscosité plastique.

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

De Larrard et al. [23], ont considéré que le seuil de cisaillement τ_0 [Pa] est la manifestation macroscopique du frottement entre les grains composant le squelette granulaire du béton y compris les grains de ciment et les particules ultrafines (figure 2.3) [23]

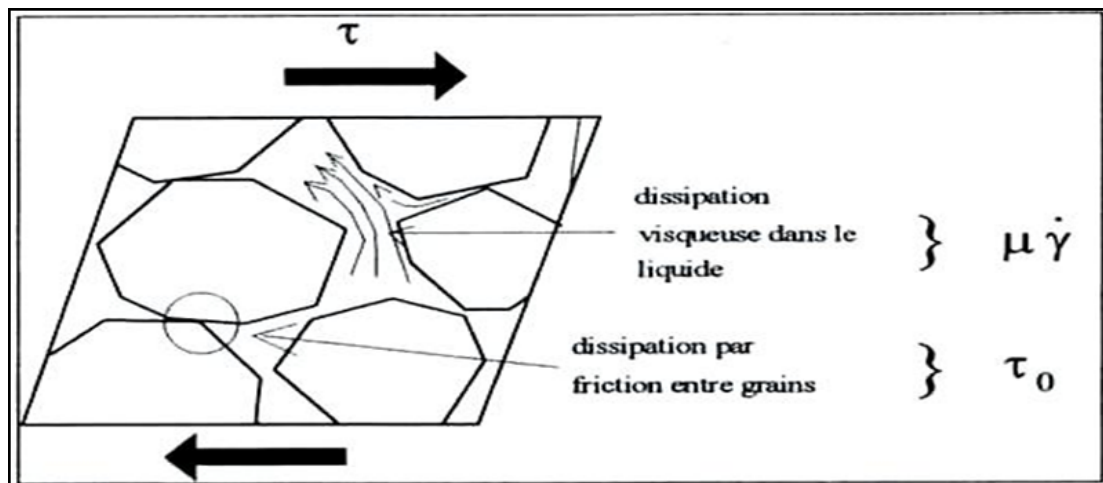


Figure 2-3. Contributions de la phase solide et de la phase liquide à la résistance au cisaillement du béton [22].

2.2.5 La thixotropie

La thixotropie a été définie comme étant la variation de la contrainte de cisaillement (taux de cisaillement) avec le temps lorsque le fluide est soumis à un taux de cisaillement (contrainte de cisaillement) constant [24]. Ce phénomène est expliqué par une rupture progressive de la structure des particules sous cisaillement. Un comportement réversible est possible : une fois le cisaillement stoppé et après une période de repos, le fluide retrouve sa structure initiale (restructuration). Les liaisons qui forment ces réseaux physiques sont progressivement rompues aux taux de cisaillement croissants. Cette rupture provoque

inévitavelmente une diminution progressive de la viscosité jusqu'à atteindre un niveau d'équilibre, fonction de la contrainte et/ou du taux de cisaillement imposé(e).

Toutefois, en l'absence de cisaillement et progressivement au cours du temps, la reconstitution de ce réseau se fait sous l'action du mouvement brownien. La thixotropie est caractérisée par une diminution réversible de la viscosité apparente lors d'une sollicitation à vitesse constante. Cette propriété est généralement caractéristique des suspensions floculées. Elle est liée à la destruction progressive des flocs sous cisaillement [25]. Les rhéogrammes de telles suspensions présentent une boucle d'hystérésis, c'est à dire que la courbe de montée en cisaillement ne coïncide pas avec la courbe de descente (**figure 2.3**). Dans le cas des matériaux cimentaires, on a une suspension que l'on peut assimiler généralement à un corps de Bingham. Bien que plusieurs études du comportement rhéologique des matériaux cimentaires aient été effectuées, il est encore difficile de donner une définition exacte des propriétés de ces derniers à cause de la multitude des facteurs qui influencent ce comportement rhéologique [28].

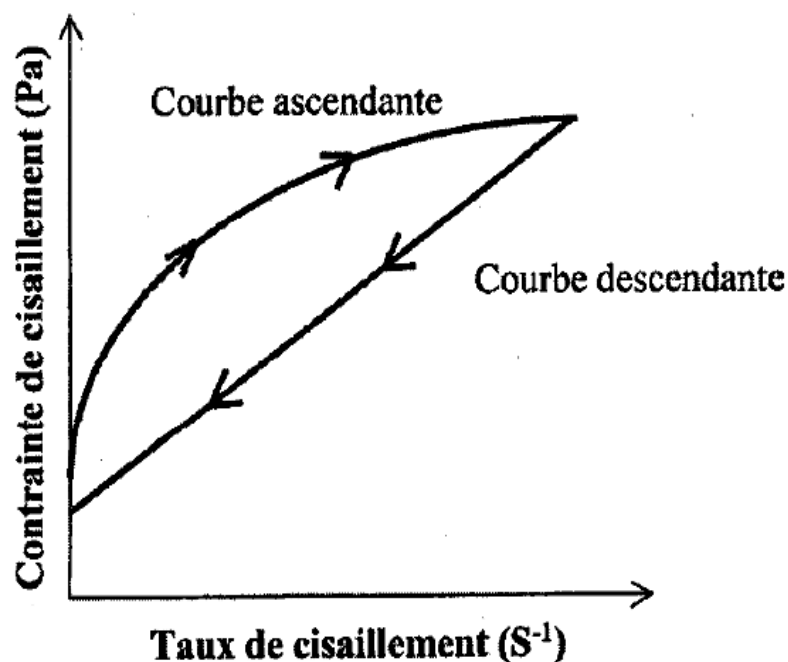


Figure 2-4. Comportement d'un corps thixotrope [22].

2.2.6 Loi de comportement de rhéologie

De nombreux auteurs ont montré que le comportement rhéologique du mortier ou du béton à l'état frais est bien représenté par celui des fluides de Bingham [26]. Dans ce cas, le comportement du béton à l'état frais est complètement décrit via deux paramètres : le seuil de cisaillement (τ_0) et la viscosité plastique (μ).

En effet, pour mettre le béton à l'état frais en mouvement, un effort minimal équivalent au seuil de cisaillement doit être fourni. Une fois le mouvement amorcé, la force requise pour déformer le béton est directement proportionnelle au taux de cisaillement appliqué, ce taux étant relié à la viscosité plastique du matériau. La loi de comportement rhéologique du béton peut s'écrire par l'expression :

$$\tau = \tau_0 + \mu \dot{\gamma} \dots \dots \dots (2.3)$$

Avec :

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

Le terme τ_0 apparait comme la contribution de la phase solide et le terme $\mu \cdot \dot{\gamma}$ comme celle de la phase liquide comme c'est illustré sur la **figure 2.3**.

2.3 Facteurs influencent la rhéologie

2.3.1 Volume de pâte

La pâte de ciment est principalement composée de ciment (C) et d'eau (E). Soit E et C les concentrations massiques (eau) de l'unité de volume de mastic. Une fois le ciment mélangé avec de l'eau, l'humidité commence et les propriétés de la pâte changent avec le temps. Tant que cette hydratation n'est pas très avancée, la pâte reste plus ou moins élastique, lui permettant d'épouser la forme souhaitée par formage. [36].

2.3.1.1 Rôle de la pâte dans la rhéologie

La pâte de ciment joue un rôle très important dans la fixation des squelettes en béton. C'est l'un des facteurs affectant la qualité, le prix et les caractéristiques rhéologique et les performances mécaniques du béton. En général, la matrice de ciment pur est pratiquement peu utilisée et même pour déterminer la classe de résistance du ciment, elle est mesurée au mortier. Souvent, une ou plusieurs substances supplémentaires sont ajoutées avec du ciment

pour affecter les qualités de la matrice. De plus, divers ajouts jouent un grand rôle dans la modification des propriétés en fonction de leurs domaines d'utilisation [37].

2.3.1.2 Influence de volume de pâte sur l'ouvrabilité

L'ouvrabilité représente la propriété la plus importante de béton frais. Mais les méthodes actuellement disponibles pour déterminer cette propriété sont sensibles à l'opérateur. Il existe différents tests et méthodes pour déterminer les propriétés de béton à l'état frais et leurs valeurs diffèrent de l'un à l'autre et par conséquent, les propriétés d'un même mélange de béton fabriqué dans les mêmes conditions varieront en fonction de test et de l'opérateur. Plusieurs facteurs influencent l'ouvrabilité des mortiers et des bétons parmi lesquels le volume de leurs pâtes (ciment + adjuvant + eau + air) qui joue un rôle important dans l'amélioration de l'ouvrabilité. La présence d'un volume élevé de pâte dans la matrice diminue les frottements et écarte les gros grains et par conséquent augmente l'ouvrabilité.

2.3.2 **Effet de températures sur la rhéologie**

L'effet de la température sur la viscosité des pâtes de ciment est directement lié à leurs compositions chimiques. Les travaux de Griesser [27] illustrés sur la **figure 2.5** montrent que les ciments riches en C_3A se manifestent par un plus fort seuil d'écoulement.

En général, le seuil de cisaillement augmente avec la température, cette dépendance est plus prononcée en cas du ciment C riche en C_3A (12.6%) où sa valeur double lorsque la température passe de 20 à 30°C. Le coefficient de viscosité relative a tendance à diminuer avec l'élévation de température et semble relié au type de superplastifiant utilisé comme le montre la **figure 2.6**. La viscosité augmente au cours du temps et autant plus si la température ambiante est élevée surtout entre 20 et 30° C. Golaszewski et Szwabowski [26] observent une forte influence de l'élévation de la température sur le comportement rhéologique des mortiers accompagné d'une augmentation du seuil d'écoulement et une diminution de la viscosité plastique. Avec l'élévation de la température la contrainte de cisaillement diminue, cette diminution est beaucoup plus marquée en présence d'un superplastifiant

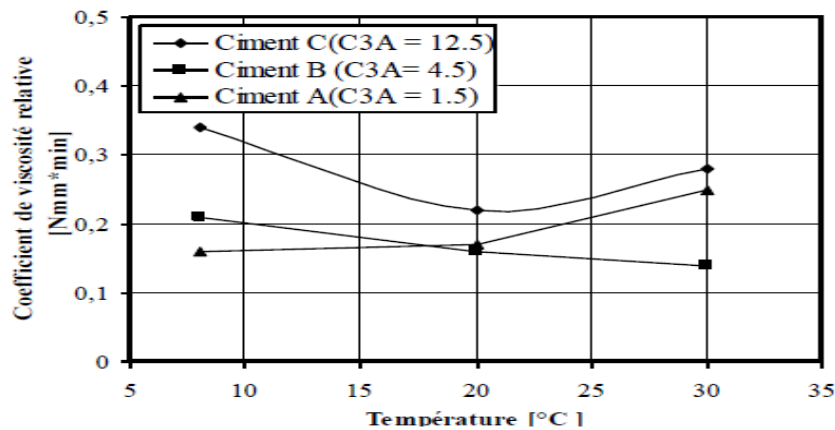


Figure 2-5. : Coefficient de viscosité en fonction de la température et le dosage en SP. [27]

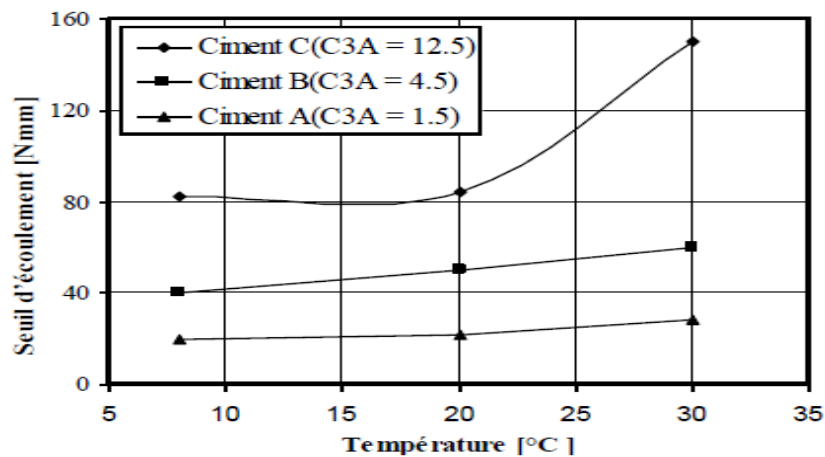


Figure 2-6. : Variation du seuil d'écoulement en fonction de la température pour différentes pâtes de ciments [27].

2.3.3 Effet de temps sur la rhéologie

Au fil du temps, en raison de la progression de la réaction d'hydratation, la quantité d'hydrates augmente. La formation de l'ettringite augmente et conduit au renforcement de la suspension en augmentant la concentration en solides, ce qui signifie une augmentation exponentielle des valeurs seuils et de la viscosité plastique lors des premiers temps.

Le temps occupe une place particulière étant donné qu'il s'agit du seul facteur qui ne fait pas intrinsèquement partie de la composition du béton. La durée de la période où le béton frais reste suffisamment maniable est limitée dans le temps à cause du processus d'hydratation. Quand cette limite est dépassée, le béton perd sa maniabilité et son comportement rhéologique est modifié. La figure 1.14 montre que le seuil de cisaillement de deux pâtes différentes après 5 et 60 minutes. On constate qu'à 5 minutes ces pâtes présentent un même comportement

(Binghamien). Après 60 minutes la courbe du ciment (C) se différencie complètement de celle du quartz (S). Le seuil de cisaillement ciment (C) a augmenté. Il a fallu briser des liaisons chimiques pour atteindre ensuite un comportement Binghamien par contre la courbe du quartz (S) reste identique et n'est pas affectée par le temps [22].

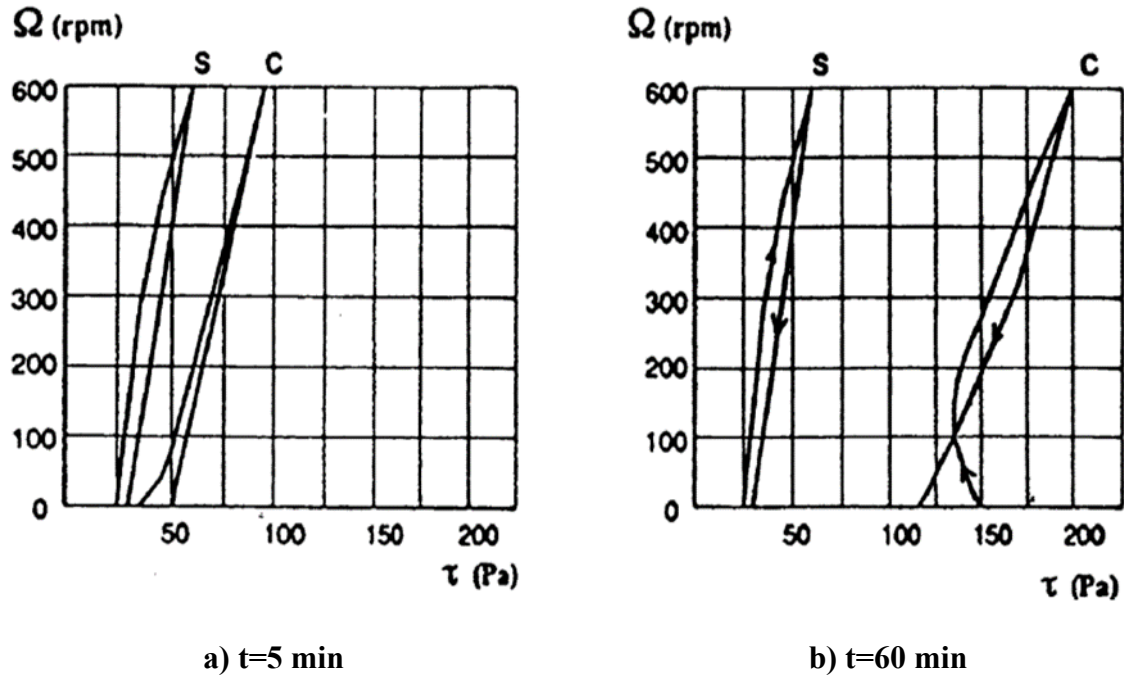


Figure 2-7. : Évolution du comportement rhéologique en fonction du temps Pâte E/C=0,4 S : Quarts (pâte inerte), C : Ciment (pâte active) [22].

2.4 Conclusion

Un comportement rationalisé des matériaux en béton est important Surtout pour la mise en œuvre du béton. Les paramètres de débit doivent être mesurés avec addition nouveaux composants en béton tels que les additifs organiques et additifs métalliques. De plus, les paramètres externes spécifiques au type doivent être respectés, et les facteurs importants qui régissent un comportement rationalisé tels que l'équipement utilisé, le type de climat et l'intervalle de temps entre le remplissage et la coulée.

3 Matériaux et méthodes expérimentales

3.1 Introduction

Le but de ce travail est d'étudier l'influence de volume de pâte et le couple température/temps après malaxage sur le comportement rhéologique des matériaux cimentaires à base des additions minérales à différente température, afin de contribuer à minimiser les facteurs qui influencent les bétons frais, par conséquent attribuer à optimiser les performances mécaniques et la durabilité des bétons durcis plus tard dans une seconde phase.

Ce chapitre présente dans un premier temps les caractéristiques des différents constituants utilisés. Puis, la procédure de malaxage ainsi que les essais de rhéologie et d'ouvrabilité qu'ont été réalisés sur les mortiers à l'état frais. L'étude expérimentale a été réalisée au niveau du laboratoire du Génie Civil de l'université de Laghouat sous des conditions climatiques variables.

3.2 Matériaux utilisés

3.2.1 Ciment

Le ciment Portland utilisé est de type CEM I 42,5/ES (NF P 15-301), commercialisé par la cimenterie d'Aflou. Les principales propriétés chimiques, physiques et minéralogiques de ce ciment sont données dans le **Tableau 3.1**.

Tableau 3.1 Caractéristiques minéralogique du ciment CEMI 42.5/ES (cimenterie d'Aflou)

Eléments	SO ₃	CL	P.A.F	C ₃ S clinker	C ₂ S clinker	C ₃ A clinker	C ₄ AF clinker
Teneur %	2,3	0,028	2,04	62	13	1,5	1,7
Garanties	(NA 237) < 3.5%	(NA 5080) ≤ 0.1%	(NA 237) ≤ 5%	Calculé selon Bogue	Calculé selon Bogue	Calculé selon Bogue	Calculé selon Bogue
Surface spécifique Blaine (cm ² /g)	3600						
Masse volumique (g/cm ³)	3.15						

3.2.2 Additions minérales

Pour donner à l'étude un caractère assez approprié et généralisé, il a été décidé de mener un travail de recherche en examinant les additifs minéraux de divers caractères minéraux et de la nature disponibles sous forme de dépôts naturels ou de sous-produits industriels. L'objectif du programme pilote est de mettre en évidence tous les effets physiques et chimiques des additifs minéraux sur la matrice de ciment à l'état frais et de comparer les résultats obtenus avec les travaux antérieurs.

Trois additifs minéraux ont été utilisées dans leur nature minérale, morphologique et chimique dans cette étude, à savoir la poudre de marbre (PM), ajouter le laitier de haut fourneau (LHF), et la pouzzolane naturelle (PZ).

3.2.2.1 Laitier haut fourneau (LHF)

Le laitier de haut fourneau est un sous-produit de la production de fonte dans les aciéries. Sa production est liée à la production de fonte à partir de laquelle sera fabriqué l'acier.

Ce matériau ne trouve son utilisation que dans certains domaines très restreints comme la confection des routes et en cimenterie. Ses particules sont des grains transparents clairs isotropiques désignant le verre de forme angulaire avec un aspect poreux. Les principales caractéristiques de cette matière sont représentées dans le tableau suivant :

Tableau 3.2 Caractérisation chimique et physico-mécaniques du laitier.

Analyse (%)	Poudre de marbre
SiO ₂	42.20
Al ₂ O ₃	5.85
Fe ₂ O ₃	1.90
CaO	42.20
MgO	4.72
Na ₂ O	0.12
K ₂ O	0.43
S ₃ O	1.54
PAF	0.83
Densité	2.80
Surface spécifique Blaine (cm ² /g)	3800
Taux de verre (%)	80

3.2.2.2 Pouzzolane (PZ)

La pouzzolane est une roche naturelle qui correspond à des projections volcaniques. Sa couleur varie généralement du noir au rouge selon le degré d'oxydation du fer, présent respectivement sous forme de magnétite ou d'hématite. Les ajouts de pouzzolanes sont obtenus en broyant les roches naturelles des gisements volcaniques.

Le tableau présente quelques caractéristiques de pouzzolane :

Tableau 3.3 *Caractérisation chimique et physico -mécaniques de la pouzzolane.*

Analyse (%)	Poudre de marbre
SiO ₂	46.40
AL ₂ O ₃	17.50
Fe ₂ O ₃	10.50
CaO	10.50
MgO	3.80
Na ₂ O	3.40
K ₂ O	1.50
S ₃ O	0.40
PAF	4.31
Densité	2.69
Surface spécifique Blaine (cm ² /g)	3200
Taux de verre (%)	15

3.2.2.3 Poudre de Marbre (PM)

Le calcaire en marbre est du calcaire solide ou du carbonate de calcium. Sa couleur est d'un blanc pur avec de la brillance. Il est utilisé comme matériau de remplissage dans les peintures et plâtres conventionnels, selon la taille de sa molécule, en plâtre fin et en plâtre.

La poudre du marbre utilisée est le déchet des marbreries dues au découpage des pièces en marbre blanc. Les caractéristiques chimiques de cette poudre sont données dans le tableau 3.4

Tableau 3.4 Caractérisation chimique et physico -mécaniques de la poudre de marbre.

Analyse (%)	Poudre de marbre
SiO ₂	0.60
Al ₂ O ₃	0.40
Fe ₂ O ₃	0.20
CaO	55.60
MgO	0.10
NaCO ₃	0.90
Cl	0.10
LOI	42.10
Densité	2.67
Surface spécifique Blaine (cm ² /g)	2126

3.2.3 Superplastifiant

Pour notre étude, nous utilisons une sorte de plastifiant supérieur, selon la norme EN 206-1. Certaines propriétés de ces produits sont fournies par la société algérienne GRANITEX et commercialisées sous MEDAFLOW (30), Le tableau 3.5 présente certaines des caractéristiques de ces produits.

Nous avons choisi le Superplastifiant MEDAFLOW (30), car il donne de bons résultats à des températures élevées.



Figure 3-1. Superplastifiant utilisé.

Tableau 3.5 Caractérisation chimique et physico -mécaniques de la poudre de marbre

Superplastifiant	PC
Teneur en extrait sec	%30
Forme	Liquide
Couleur	Brun
PH	7
Masse volumique	1,07g/cm ³
Dosage recommandé	0.2 à 3 %
Nature chimique	Polycarboxylate

3.2.4 Granulats

Le sable est le constituant du squelette granulaire qui a le plus d'impact sur le mortier, Il joue un rôle primordial en réduisant les variations volumiques, les chaleurs dégagées et le prix de revient des bétons. Il doit être propre et ne pas contenir d'éléments nocifs.

Nous avons utilisé du sable alluvionnaire (0/5 mm) d'oued M'zi (Laghout), du gravier calcaire utilisé dans deux catégories (3/8 mm et 8/15 mm) de carrière concassage Ouazzane, (Laghout). Leurs caractéristiques physiques sont présentées ci-dessous

3.2.4.1 Masse volumique apparente

C'est la masse de l'unité de volume apparent du matériau, déterminée selon la norme NEF 18-555 par relation suivante :

$$\rho_{app} = \frac{M_1 - M_0}{V_{app}} \dots\dots\dots (3.1)$$

Avec :

ρ_{app} : Masse volumique apparente du matériau [g/cm³].

M_1 : Masse du récipient plein du matériau [g].

M_0 : Masse du récipient vide [g].

V_{app} : Volume du récipient [cm³]. ($V_{app}=1000\text{cm}^3$).

3.2.4.2 Masse volumique absolue

C'est la masse de l'unité de volume absolue sans vides du matériau, déduction faite de tous les vides, aussi bien des vides entre les grains que des vides à l'intérieur des grains. Déterminée selon la norme NEP 18-555 par la relation suivante :

$$\rho_{abs} = \frac{M}{V_2 - V_1} \dots\dots\dots (3.2)$$

Avec :

ρ_{abs} : Masse volumique absolue du matériau [g/cm³].

M : Masse d'agrégats[g].

V₂: Volume total [cm³].

V₁: Volume de vide [cm³].

3.2.4.3 Coefficient d'absorption

3.2.4.3.1 Sable

Il est défini comme étant le rapport de l'augmentation de la masse de l'échantillon du sable après imbibition par l'eau, à sa masse sèche. Cette imbibition est obtenue par immersion de l'échantillon dans l'eau pendant 24 heures à 20°C.

Après imbibition dans l'eau pendant 24 heures, étaler l'échantillon sur une surface plane non absorbante et le soumettre à un flux d'air chaud, tout en le remuant afin que la surface externe des grains sèche. En plaçant le matériau dans un moule tronconique, posé sur une surface plane non absorbante, et en le compactant légèrement, on vérifie que celui-ci s'écoule en démoulant. Le coefficient d'absorption est déterminé selon les normes NF P 18-554.

3.2.4.3.2 Grapiers

Il s'agit d'immerger l'échantillon dans l'eau pendant 24 h à 20°C la pression atmosphérique, en suite peser l'échantillon après l'avoir épongé soigneusement avec un chiffon absorbant.

Le coefficient d'absorption sera calculé en utilisant la même équation (3.3) donnée précédemment.

$$Ab = \frac{(Mh - Ms)}{Ms} \dots\dots\dots (3.3)$$

3.2.4.4 Equivalent de sable

Un test pour mesurer la propreté du sable (pour déterminer, par exemple, son aptitude à une utilisation dans le béton) en exprimant un rapport volumétrique conventionnel entre le sable et les éléments fins. Après lavage, le frittage est effectué dans une éprouvette puis au

repos, sa valeur est donnée par le quotient, multiplié par cent, de la hauteur de la partie sable à la hauteur totale (floculation + partie sable).

Il a été réalisé conformément à la norme NF P 18-598. Cet essai consiste à plonger une masse définie de sable dans une éprouvette normalisée remplie par une solution lavante, après agitation, on laisse décanter le mélange pendant 20 minutes, ensuite on mesure la hauteur du sédiment (h_1) et du sédiment + floculant (h_2). L'équivalent de sable est donné par la relation suivante :

$$E_S = 100 \times \frac{h_1}{h_2} \dots \dots \dots (3.4)$$

L'équivalent de sable de notre sable est de 86,8 sous-pression dont la norme $E_{sv} \geq 85$ et de 88,5 avec piston dont la norme $E_{sp} \geq 80$ ce qui signifie que le sable est très propre. Le Tableau 3.6, regroupe les résultats des propriétés physiques des agrégats utilisés.

Tableau 3.6. Propriétés physiques des agrégats utilisés.

Caractéristique des agrégats	Norme d'essai	Granulats		
		Sable	Gravies	
		0/5	3/8	8/15
Masse volumique apparente (g/cm^3)	NF P 18-554	1.564	1.319	1.255
Masse volumique absolue (g/cm^3)		2.61	2.66	2.62
Coefficient d'absorption (%)		0.51	2.08	2.49
Equivalent de sable E_{sv}	NF P 18-598	88.5	--	

3.2.4.5 Analyse granulométrique des granulats

On peut définir l'analyse granulométrique par tamisage c'est un ensemble des opérations aboutissant à la séparation selon leur grosseur des éléments constituant l'échantillon, en employant des tamis à maille carrée afin d'obtenir une représentation de la répartition de la masse des particules à l'état sec en fonction de leur dimension. L'essai est de déterminer la distribution granulaire des granulats supérieurs à 80 microns par tamisage à sec, qui est réalisé selon la norme NF EN 933-1.

3.2.4.5.1 Sable

L'analyse granulométrique réalisée sur un échantillon de 2000 g du sable alluvionnaire permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant l'échantillon. Une analyse de la taille des particules effectuée sur un échantillon de 2000 g de sable alluvial permet de déterminer les différents

pourcentages de taille et de poids des différentes familles de grains de l'échantillon. Et les résultats présentés dans (tableau 3.7).

Tableau 3.7. Résultats de l'analyse granulométrique du sable.

Provenance : Carrière d'oued M'zi Laghouat.				
Ech : sable alluvionnaire. Poids initial : 2000 g				
Tamis (mm)	Refus Partiel (g)	Refus Cumulé (g)	Refus Cumulé (%)	Passant (%)
6.300	0	0	0	100
5.000	26	26	1.3	98.7
4.000	26	52	2.6	97.4
2.500	52	104	5.2	94.8
1.000	166	270	13.5	86.5
0.500	440	710	35.5	64.5
0.315	956	1666	83.3	16.7
0.125	296	1962	98.1	1.9
0.080	20	1982	99.1	0.9
Fond	16	1998	99.9	0.1

3.2.4.5.1.1 Module de finesse

Est une caractéristique importante surtout en ce qui concerne les sables. Un bon sable à béton doit avoir un module de finesse M_f compris entre 2,2 et 2,8 ; au-dessous, le sable a une majorité d'éléments fins et très fins, ce qui nécessite une augmentation du dosage en eau ; au-dessus, le sable manque de fines et le béton y perd en ouvrabilité.

En analysant la taille des particules, nous pouvons déduire la précision de l'unité de sable, Norme (NF EN 933-1), [38], qui est définie comme 1/100 de la somme du rejet cumulé exprimée en pourcentage sur le tamis à chaîne suivant : 0,16 ; 0,315 ; 0,63 ; 1,25 ; 2,5 ; 5 mm, car nous avons constaté que le module de finesse de notre sable est égal à 2,45.

3.2.4.5.2 Gravier

Les résultats de l'analyse granulométrique des graviers 3/8 et 8/15 sont regroupés sur le (Tableau 3.7) et le (Tableau 3.8) et présenté dans (la Figure 3.2).

Tableau 3.8. Analyse granulométrique du gravier 3/8.

Provenance : carrière concassage Ouazzane, (Laghout)				
Échantillon : Gravier calcaire 3/8. Poids initial : 3000 g				
Tamis (mm)	Refus Partiel (g)	Refus Cumulé (g)	Refus Cumulé (%)	Passant (%)
10	00	00	00	100
8,0	120	120	4	96
6,3	1206	1326	44.2	55.8
5,0	1152	2478	82.6	17.4
4,0	464	2942	98.06	1.94
3,15	16	2958	98.60	1.4
Fond	40	2998	99.93	0.07

Tableau 3.9. Analyse granulométrique du gravier 8/15.

Provenance : carrière concassage Ouazzane, (Laghout)				
Échantillon : Gravier calcaire 8/15. Poids initial : 3000 g				
Tamis (mm)	Refus Partiel (g)	Refus Cumulé (g)	Refus Cumulé (%)	Passant (%)
20	00	00	00	100
16	16	16	0.53	99.47
12.5	352	368	12.26	87.74
10	1456	1824	60.8	39.2
8	986	2810	93.66	6.34
6.3	154	2964	98.8	1.2
Fond	17.6	2981.6	99.38	0.61

La figure suivante regroupe les résultats de l'analyse granulométrique de sable et des graviers 3/8 et 8/15.

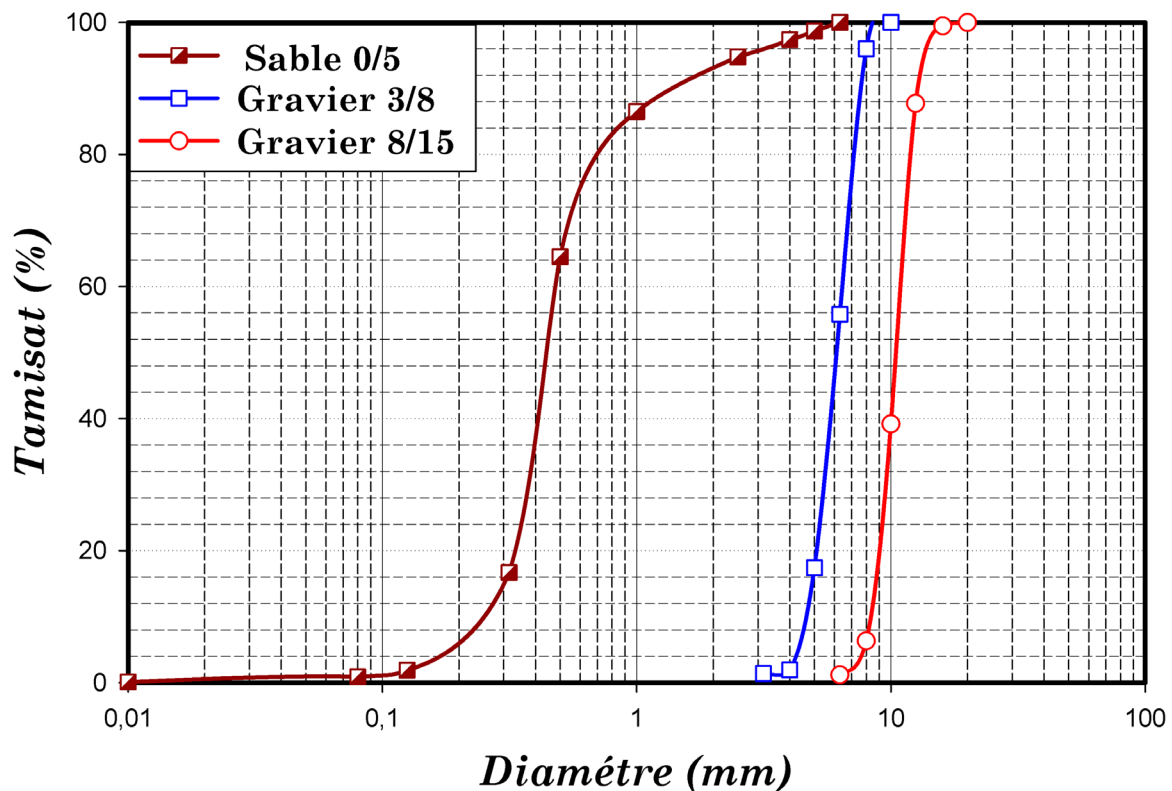


Figure 3-2 Analyse granulométrique des granulats.

Pour les deux graviers, le pourcentage de la quantité perdue au cours de l'essai est de $0.07\% < 2\%$ et de $0.61\% < 2\%$ respectivement, de ce fait, les résultats de ces analyses sont acceptés. Les graviers concassés adhèrent bien à la pâte de ciment et offrent au béton de bonnes caractéristiques mécaniques.

3.2.5 Eau de gâchage

D'après notre étude, l'eau que nous utilisons devrait être dans un mélange du mortier, pur propre, exempt de sels et de matière organique. Dans notre cas nous utilisons de l'eau robinet de laboratoire de génie civil, De plus, elle respecte toutes les prescriptions de la norme P18-303.

3.3 Procédure expérimentale

3.3.1 Formulation de mortier de béton équivalence (MBE)

Dans nos expériences de laboratoire, le béton initial doit être formulé. Il existe de nombreuses méthodes formulation du béton, comme celles de Dreux-Gorisses, Bolomey,

Faury, Abrams, Vallette et Joisel. Il est de nature expérimentale, la méthode la plus pratique est la méthode Dreux-Gorisses.

Il s'agit d'un béton plastique (cône affaissé Abrams $A = 7 \pm 2$ cm). L'étude de la composition du béton consiste à déterminer le mélange optimal pour différents granulats ainsi que la dose de ciment et d'eau afin de produire du béton dont les caractéristiques sont requises. Il a ensuite été rénové avec Superplastifiant (SP).

La formule concrète, théoriquement trouvée, a été mise en œuvre expérimentalement, dont les proportions sont présentées dans le tableau 3.10

Tableau 3.10. Composition de béton

G/S	E/C	Sable (kg/m ³)	Gravier 3/8 (kg/m ³)	Gravier 8/15 (kg/m ³)	Ciment (kg/m ³)	Eau (kg/m ³)	Affaissement (cm)
1.54	0.4	689.2	159.7	898.3	357	207.7	7

Avec les progrès du progrès technique, l'émergence de nouvelles utilisations pour le béton, l'utilisation fréquente d'additifs et l'utilisation d'additions minérales ; tels que la poudre de marbre, la pouzzolane naturelle et le laitier de haut fourneau, se multiplient. Variables non contrôlées par la méthode des formules déjà mentionnée. Nous avons donc jugé nécessaire de recourir à des méthodes des formulations plus rationnelles, telles que celles du MBE (Mortier à béton Equivalent).

La maîtrise du MBE dépend directement de la configuration initiale du béton. Les mêmes ingrédients et les mêmes dosages ont été conservés, en plus d'enlever toutes les pierres. Cependant, il convient de garder à l'esprit que les quantités de particules de pâte et de sable fin qui adhèrent au gravier sont proportionnelles à la surface du gravier.

Donc Les surfaces spécifiques des sables et des gravillons utilisés ont été déterminés et présenter dans le Tableau 3.11 et Tableau 3.12.

Tableau 3.11. 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)	4.567	74.165	36.843	836.529	191.743	17.876	110.491	202.836
v _i (mm ³)	0.351	3.450	27.598	94.390	191.292	381.510	745.137	1 514.339
s _i (mm ²)	2.404	11.039	44.156	100.237	160.525	254.340	397.406	637.616
μ _i (kg/ m ³)	39.10 ⁻⁵	39.10 ⁻⁵	39.10 ⁻⁵	39.10 ⁻⁵	39.10 ⁻⁵	39.10 ⁻⁵	39.10 ⁻⁵	39.10 ⁻⁵
V _i (mm ³)	0.002	0.029	0.029	0.326	0.075	0.007	0.043	0.079
N _i	5080.811	8384.545	1048.068	3456.383	390.919	18.274	57.830	52.238
S _i (mm ²)	12214.586	92557.521	46278.760	346456.267	62752.147	4647.804	22982.107	33307.829
SD (mm ²)	621197.021							

Tableau 3.12. La surface développée de 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)	26.948	141.148	226.885	202.211	53.551	27.844	0
v _i (mm ³)	0.001	0.007	0.055	0.435	2.246	22.438	0
s _i (mm ²)	512006.680	345924.816	276606.086	123925.389	25141.822	3909.886	0
μ _i (kg/ m ³)	2 620	2 620	2 620	2 620	2 620	2 620	2 620
V _i (mm ³)	0.010	0.054	0.086	0.077	0.020	0.011	0
N _i	11323573.071	7650495.748	1561726.054	176777.512	9061.736	471.550	0
S _i (mm ²)	512006.680	345924.816	276606.086	123 925.389	25141.822	3909.886	0
SD (mm ²)	1287514.679						

Donc la quantité du sable nécessaire (S') dans le mortier est : **1382.07 g/l**

Après le calcul des surfaces développées, on a déduit la composition de mortier de béton équivalent. Les proportions du mélange de MBE pour 1,5 L sont présentées dans le Tableau 3.13.

Tableau 3.13. Proportion des MBE pour 1.5 litres

Sable (g)	Ciment (g)	Eau (g)	Affaissement (cm)
2073.1	964.7	382.7	3.5

3.3.2 Plan expérimentale

Notre étude est basée sur deux aspects :

D'une part, modifier la taille de la pâte et tester les paramètres rhéologiques et l'ouvrabilité des mortiers du béton équivalent (MBE) avec des dosages de 325, 350, 375, 400, 425 et 450 kg/m³ de ciment.

Et d'autre part, étudier l'effet du couple temps et température sur le comportement rhéologiques et l'ouvrabilité des MBE à base de ciment binaire (CPA + %PZ, CPA + %PM, CPA+ %LHF) à 30, 60 et 90 minutes après malaxage (dans le but d'étudier le maintien de maniabilité) à différentes températures 10 °C, 20 °C, 30 °C et 40 °C. toutes les formulations étudiées sont indiquées dans les Tableaux 3.14 et 3.15.

Tableau 3.14. Composition des MBE en fonction de volume de pâte pour 1.5 litres.

Ciment CEMI 42.5	Volume de pâte	Ciment CEMI 42.5	Sable Oued M'zi	Eau Totale	SP	SP
(Kg/m ³)	(m ³)	(g)	(g)	(g)	(g)	(%)
325	0.24	784.6	2718.7	229.603	6.67	0.85
350	0.26	826.5	2339.1	345.334	7.03	
375	0.27	866.7	2262.7	360.437	7.37	
400	0.29	905.3	2188.9	375.15	7.69	
425	0.31	942.1	2118.9	388.974	8.01	
450	0.33	977.4	2051.2	402.434	8.31	

Tableau 3.15. Composition des MBE en fonction des additions minérales.

Composition			Ciment CEMI 42.5	Sable Oued M'zi	Eau Totale	SP	SP
MBE			(g)	(g)	(g)	(g)	(%)
100% ciment (CPA)			826.5	2339.1	345.334	7.03	0.85
PM	5%	41.3	784.1	2336	344.87	7.02	
	10%	82.4	741.8	2332.8	344.397	7.01	
	15%	123.3	698.9	2327	345.27	6.99	
	20%	164.4	657.6	2326.5	343.474	6.99	
	30%	246	573.9	2320.3	342.547	6.97	
	40%	327.1	490.6	2314.1	341.633	6.95	
PZ	5%	41.3	784.2	2336.3	344.92	7.02	
	10%	82.5	742.1	2333.5	344.51	7.01	
	15%	123.5	700	2330.7	344.09	7.00	
	20%	164.5	658	2327.9	343.67	6.99	
LHF	5%	41.3	784.0	2336.1	344.876	7.02	
	10%	82.4	741.9	2333	344.43	7.01	
	15%	123.5	699.8	2329.9	343.58	7.00	
	20%	164.4	657.7	2326.9	343.52	6.99	

3.3.3 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 basent 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 :

1. Introduire en premier le ciment, le sable et l'addition dans la cuve du malaxeur et mélanger à sec pendant 1min à vitesse lente.

2. Ajouter les 2/3 de l'eau de gâchage et malaxer pendant 1 min à vitesse lente.
3. Introduire le 1/3 de l'eau de gâchage plus la quantité du superplastifiant progressivement en malaxant pendant 1 minute.
4. Malaxer pendant 2 minutes à vitesse rapide.
5. Préparer le mortier à l'essai d'affaissement et de rhéologie.

3.4 Caractérisation des MBEs

3.4.1 Essai au mini cône

Le mini cône permet d'évaluer l'ouvrabilité du mortier en fin de malaxage. Ce mini cône, illustré à la figure 3.8, a une hauteur de 150 mm, un diamètre de base de 100 mm et un diamètre supérieur de 50 mm. Le cône est placé au centre d'une plaque d'acier puis rempli du mortier. Immédiatement après le remplissage, le mini cône est retiré, le mortier est étalé sur la table et le diamètre moyen (en cm) de l'étalement ou l'affaissement sont mesurés.



Figure 3-3 Essai d'affaissement au mini cône.

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) disponible au niveau du laboratoire de génie civil de l'université de Laghouat. Il s'agit du temps nécessaire à un

volume de mélange frais pour atteindre un trait repère tracer sur le maniabilimètre sous l'effet des vibrations entraînées par un moteur.

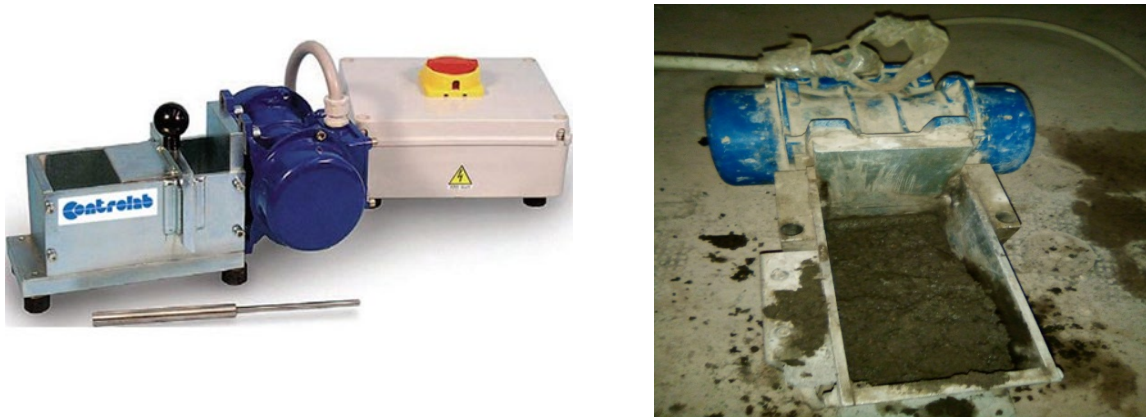


Figure 3-4 Essai de temps d'écoulement à l'aide de maniabilimètre LCPC type B.

3.4.3 Essai au rhéomètre

Pour déterminer, expérimentalement, le comportement rhéologique des mortiers, on a utilisé un rhéomètre rotatif ; Heidolph-RZR 2102 Control Z. Ce rhéomètre présenté sur la (Figure3.10) est composé d'un agitateur, un croisillon de dimensions 5x10 cm et d'un récipient cylindrique de dimension 10x15 cm.

L'essai rhéologique s'effectue avec un profil de vitesse de rotation décroissante. Au début de l'essai, la vitesse maximale est appliquée pour éliminer l'influence de la thixotropie plus rapidement. Toutes les secondes, le logiciel enregistre le moment de rotation (M) correspondant à la vitesse de rotation (Ω) imposée.

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 3-5. *Rhéomètre utilisé.*

3.4.3.1 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 3.6 illustre le profil choisi pour le déroulement des essais.

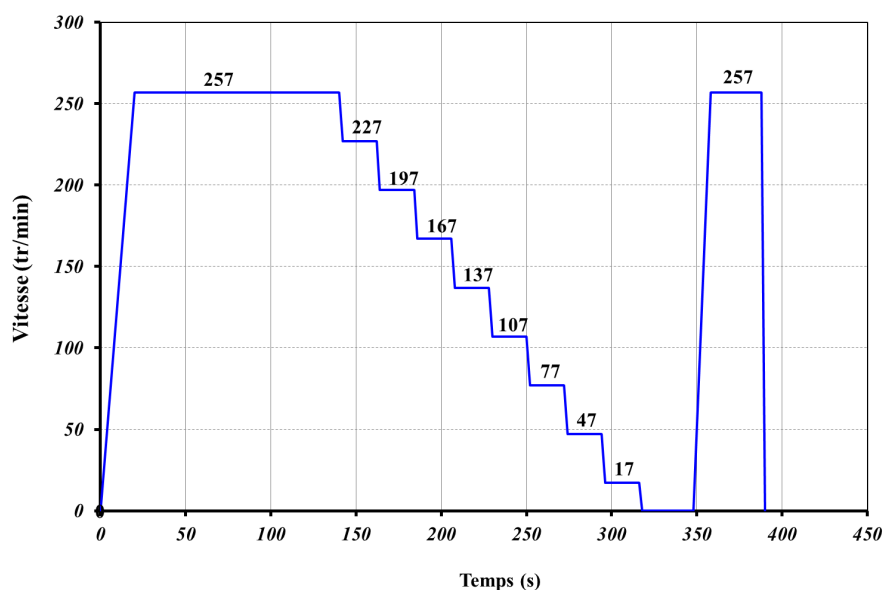


Figure 3-6. *Profil de vitesse utilisé.*

3.5 Conclusion

Les paramètres rhéologiques des différents mortiers sont mesurés par un rhéomètre développé au laboratoire 2MGC, de l'université de Cergy pontoise en France. L'ouvrabilité et le comportement rhéologique du mortier sont testés en variant le volume de pâte ainsi que le couple temps température avec des taux de substitution de l'addition minérale tout en prenant comme référence un mortier à base de 100% ciment. Les résultats de ces essais seront présentés dans le quatrième chapitre où une discussion des résultats obtenus sera donnée, afin de comprendre la contribution de chaque variante sur le comportement rhéologique du mortier et son interaction avec les différentes additions minérales.

4 Résultats et Interprétations

4.1 Introduction

La mise en œuvre des mortiers de béton équivalent (MBE) dépend principalement de leurs ouvrabilités et leurs comportement rhéologique. Cependant malgré les études portées sur les paramètres influencent l'ouvrabilité et les propriétés rhéologiques à savoir les paramètres de composition, ces dernières restent insuffisantes, semble être plus qu'important d'étudier l'effet de température et le temps pendant lesquels les MBE se mettent en œuvre.

Dans ce travail, nous nous intéressons à l'influence de volume de pâte de ciment et le couple température/temps sur les paramètres rhéologique et l'ouvrabilité des MBE. Des résultats et des analyses intéressantes nous ont ainsi présentés dans ce chapitre.

4.2 Etude rhéologie de mortier équivalence de référence

4.2.1 Les paramètres rhéologiques des mortiers de référence

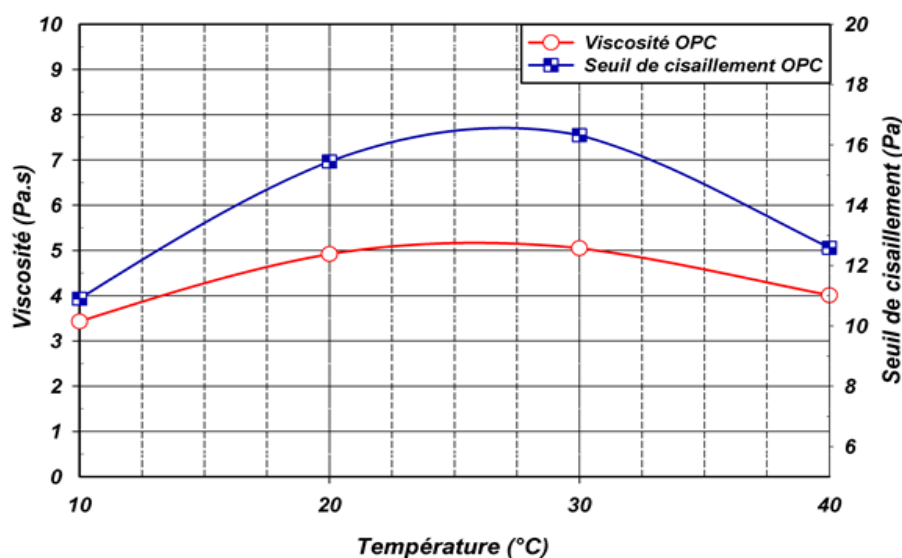


Figure 4-1. Influence de température sur les paramètres rhéologiques des MBE de référence.

La figure 4.1 présente l'influence de la température sur la viscosité et le seuil de cisaillement des MBE. On constate que les deux courbes procèdent un optimum, le seuil de cisaillement à 10 °C est de 11 Pa et poursuivre son augmentation jusqu'à une température de 30°C. Ce dernier atteint la valeur maximale de 17.5 Pa à 30 °C, ce qui s'explique par l'augmentation de la rigidité et le frottement entre les grains et la ductilité du mélange, puis le seuil de cisaillement diminue jusqu'à une valeur de 12 Pa à une température de 40 °C.

En ce qui concerne la viscosité, elle est également affectée par la température, et elle monte à une valeur de 3 Pa.s à 10°C, jusqu'à atteindre le pic entre 20 °C et 30 °C, à une valeur de 5 Pa.s, puis il diminue à 4 Pa.s à 40 °C. On remarque les deux courbes, atteignant un pic à 30 °C, ce qui explique que l'effet néfaste de l'environnement chaud sur les paramètres rhéologiques.

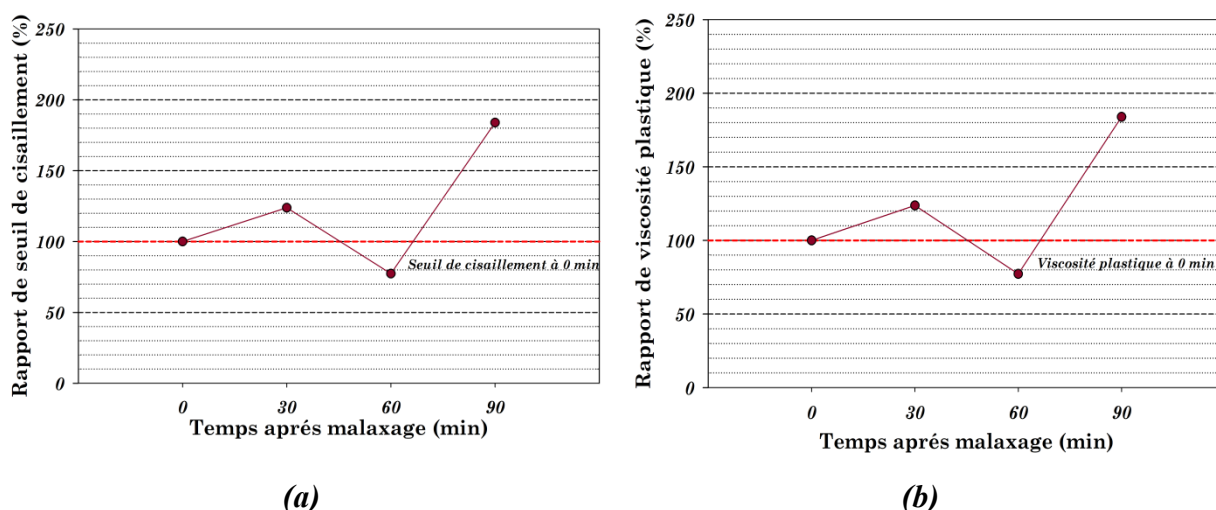


Figure 4-2. Influence du temps sur le seuil de cisaillement de MBE de référence.

Les figures 4.2 (a) et (b) présentent l'influence du temps après malaxage sur les paramètres rhéologiques de MBE de référence. Notez que les deux courbes ont la même allure tel qu'en constate que le seuil de cisaillement que la viscosité mesurer après 30 minutes de malaxage ont augmenté de 20% par rapport au le seuil de cisaillement que la viscosité mesurer après 0 minutes de malaxage. Par contre à 60 minute on a enregistré une forte diminution de 25% par rapport au mortier de référence (0 minutes). Cela explique probablement par la cinétique et le mécanisme de fonctionnement de superplastifiant qui assure un maintien de performance jusqu'à 60 minute, au-delà de 60 minute on remarque une forte augmentation des paramètres rhéologiques cela peut être dû au début de prise de mortier.

4.2.2 L'affaissement au mini-cône de mortier de référence

La figure 4.3 présente l'influence de la température sur l'affaissement et le temps d'écoulement des MBE, on remarque que l'affaissement à 10 °C est maximal de 10.5 cm, puis il diminue à environ de 8cm pour les températures de 20 °C à 40 °C, Ceci s'explique par l'effet négatif de température sur l'ouvrabilité de mortier. Plus la température est élevée, plus le mortier a perdu l'ouvrabilité prouver par le durcissement du mélange.

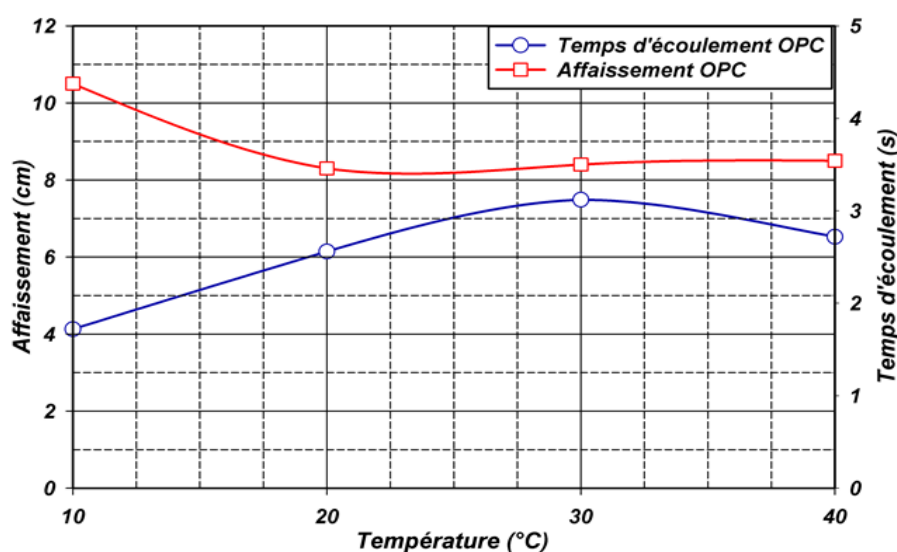


Figure 4-3. Influence de la température sur l'affaissement et le temps d'écoulement des MBE de référence.

Et on remarque aussi à une température de 10 °C, on enregistre un temps d'écoulement de 1.72 s, et il augmente jusqu'à 2,56 s à 20 °C à, et il poursuivre son augmentation pour atteindre une valeur max de 3,12 s à une température de 30 °C. Cela s'explique par le fait que la température affecte négativement le temps d'écoulement. On constate aussi la concordance des résultats entre les paramètres rhéologiques et les résultats de

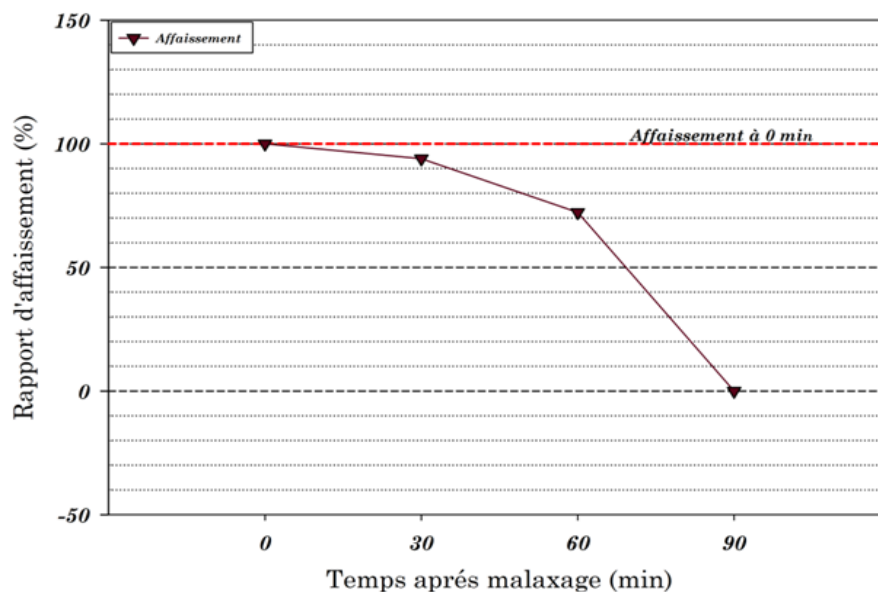


Figure 4-4. Influence du temps après malaxage sur l'affaissement des MBE de référence.

La figure 4.4 représente le pourcentage d'affaissement en termes de temps après le malaxage. Après le malaxage, on a mesuré une valeur d'affaissement de 10.5 cm ce qui correspond à un affaissement de 21 cm dans le béton pour permettre la bonne mise en œuvre de ce type du béton dans le chantier, puis elle a commencé de diminuer de 8, 30 et 100% pour 30, 60 et 90 minutes respectivement, qui est due à l'effet de temps et au commencement de prise de la pâte du mortier.

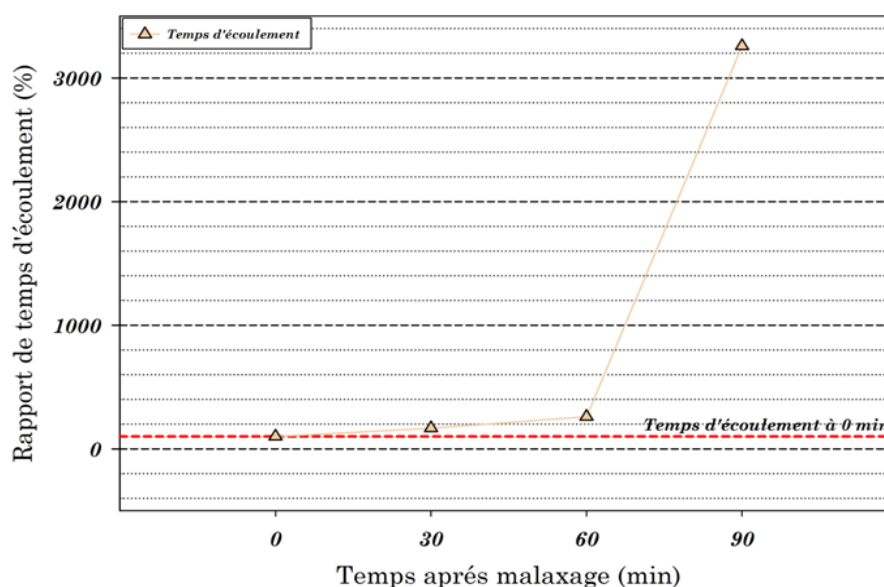


Figure 4-5. Influence du temps après malaxage sur le temps d'écoulement des MBE de référence.

La figure 4.5 représente le pourcentage du temps d'écoulement en termes de temps après le malaxage. On remarque que plus le temps après le malaxage est long, plus le débit augmente, et cela s'explique par l'effet du facteur température et temps ensemble, et que dans les 90 minutes on peut dire que le mortier a perdu sa maniabilité.

4.3 Influence de volume de pâte sur le comportement rhéologie des MBEs

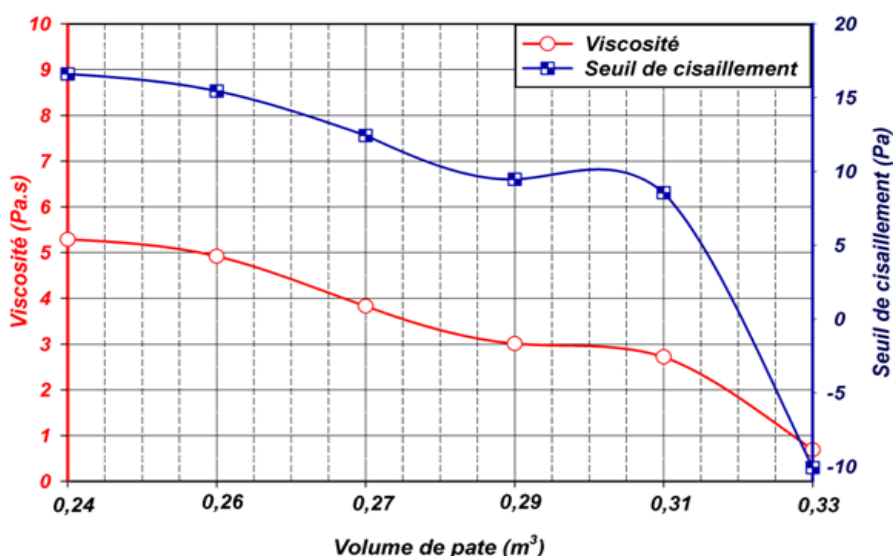


Figure 4-6. Influence de volume de pâte sur le comportement rhéologique des MBE.

La figure 4.6 présente l'influence de volume de pâte sur les paramètres rhéologiques des MBE, on remarque qu'avec l'augmentation de volume de pâte de 0.24 à 0.33 m³ la viscosité diminue de valeur 5.2 à 0.7 Pa.s sachant que le ciment est sans additions minérales et des mesures prise directement après malaxage. On remarque aussi la diminution de seuil de cisaillement avec augmentation du volume de pâte de valeur 15 à 10 Pa. Cela peut être expliqué par le rôle de volume de pâte dans la réduction des frottements entre les grains et aide à lubrifier le mélange.

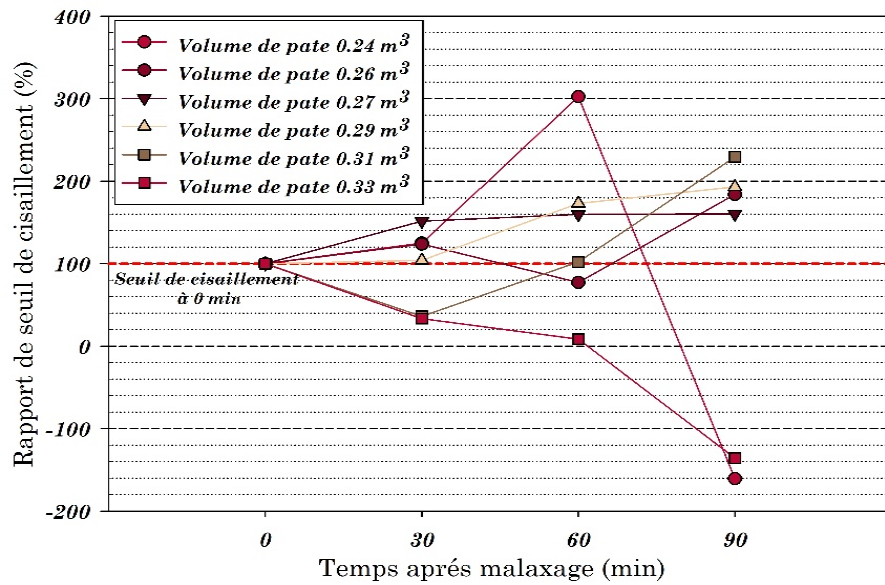


Figure 4-7. Evolution de seuil de cisaillement en fonction de volume de pâte et de temps.

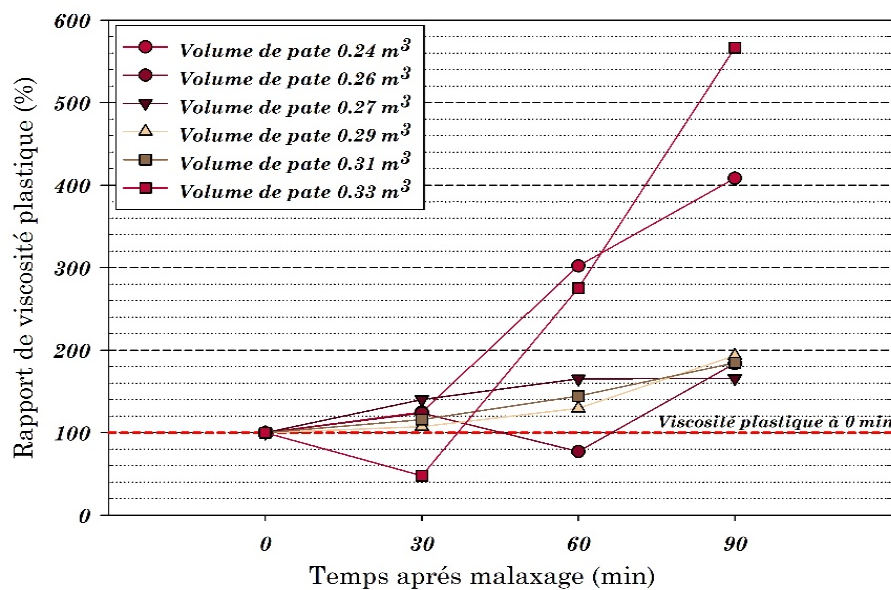


Figure 4-8. Evolution de la viscosité plastique en fonction de volume de pâte et de temps.

Les figures 4.7 et 4.8 montrent l'influence de volume de pâte sur le rapport de seuil de cisaillement et le rapport de viscosité respectivement. On remarque que l'augmentation de concentration du ciment de 325, 350, 375, 400, 425 et 450 kg/m³ et par conséquent l'augmentation de volume de pâte de 0.24, 0.26, 0.27, 0.29, 0.31 et 0.33 m³ à jouent un rôle de lubrifiant pour les grains du sable, ce qui conduit à diminuer les paramètres rhéologiques. Ces résultats montrent bien l'importance de volume de pâte dans l'étude rhéologique des

mortiers ou béton, d'où il est nécessaire de trouver un compromis entre le volume de pâte à l'état frais et le volume de pâte à l'état durci.

4.3.1 L'affaissement au mini au cône et temps d'écoulement

La figure 4.9 présente l'influence de volume de pâte sur l'affaissement et le temps d'écoulement des MBE. Il est apparu clairement l'effet important du volume de pâte sur l'ouvrabilité des MBE, dont on remarque qu'avec un volume de pâte de 0.24 à 0.33 m³, l'affaissement augmente de 5.3 à 13.3 cm respectivement. Il est à noter ici que la pâte est composée d'un ciment sans addition minéral et les mesures portées directement après malaxage. Parallèlement, nous avons observé que le volume de pâte a un effet bénéfique sur le temps d'écoulement, dont il a diminué de 4.69 à 0.4 s. avec l'augmentation de volume de pâte. Cela dû au rôle de la pâte dans la dispersion inter granulaire qui diminue les frottements entre les grains et aide à lubrifier le mélange. Ces résultats sont bien en concordance avec ceux de rhéologies (viscosité et seuil de cisaillement)

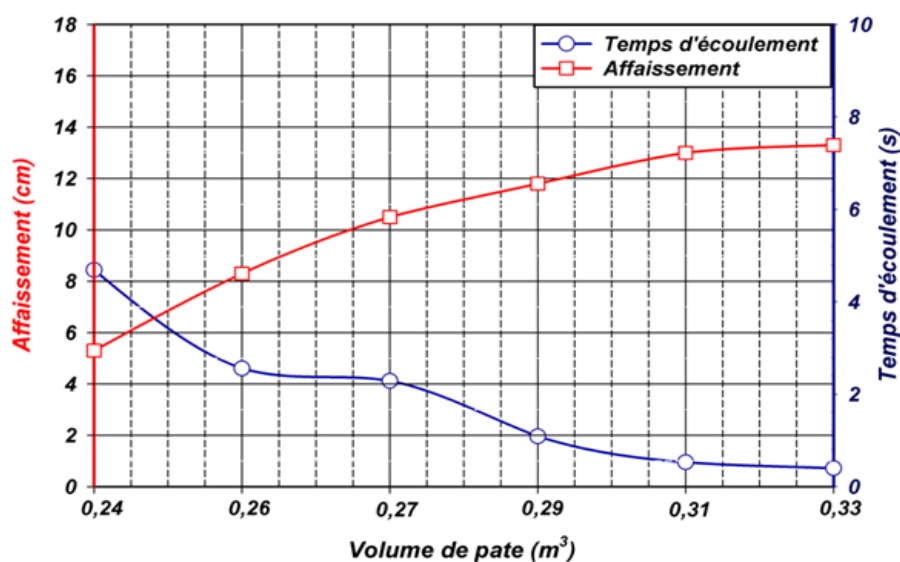


Figure 4-9. Influence de volume de pâte sur l'affaissement et le temps d'écoulement des MBE.

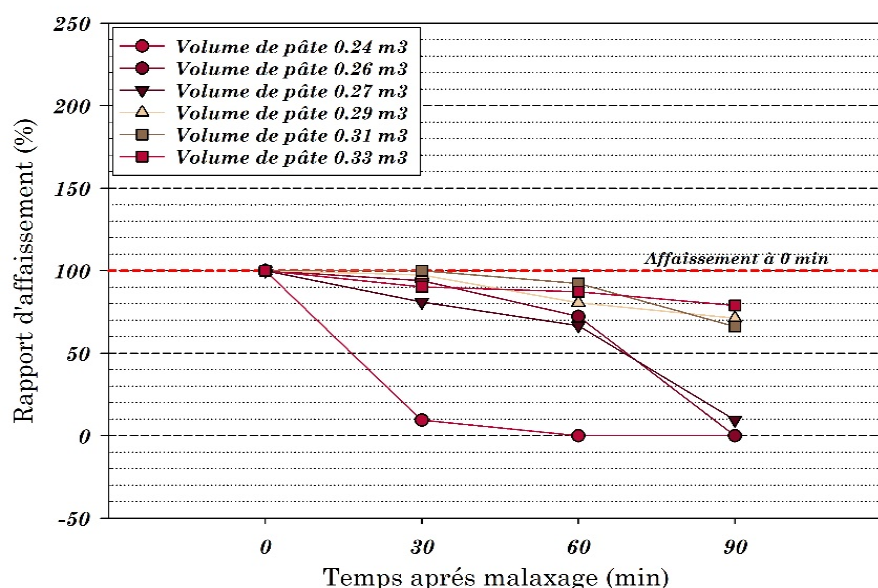


Figure 4-10. Evolution d'affaissement en fonction de volume de pâte et de temps.

La figure 4.10 représente l'évolution de la variation de l'affaissement par rapport à l'affaissement mesuré juste après malaxage. On constate que l'effet combiné de volume de pâte est bénéfique dans le maintien de l'affaissement, par contre le prolongement de la durée après malaxage affecte négativement l'affaissement, ces résultats confirment les résultats trouvés à l'aide de rhéomètre.

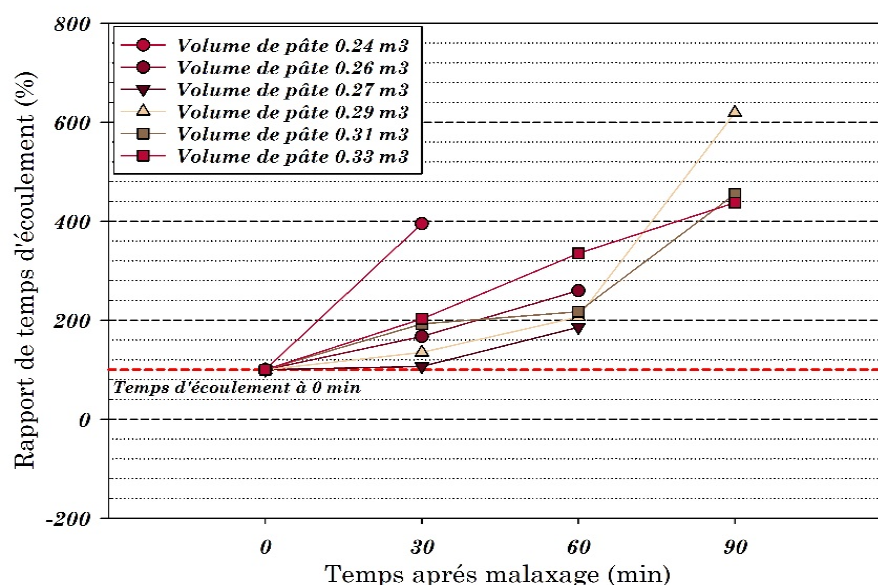


Figure 4-11. Evolution de temps d'écoulement en fonction de volume de pâte et de temps.

La figure 4.11 représente l'évolution de temps d'écoulement en fonction du volume de pâte et du temps. Nous remarquons que dans un volume de 0.24 m^3 une augmentation

significative du temps d'écoulement avec une augmentation du temps après le malaxage, où nous enregistrons le plus grand temps et pour les volumes entre 0.26 et 0.33 m³, le temps d'écoulement diminue à 30 et 60 minutes après malaxage. A partir de là nous concluons que le volume joue un rôle important pour influencer sur le temps d'écoulement, et ceci s'explique par la dispersion granulaire de la pâte plus la pâte est grosse, plus le frottement est absent.

4.4 Effet de températures sur le comportement rhéologie des MBEs

4.4.1 MBE à base de poudre marbre

4.4.1.1 Les paramètres rhéologiques des mortiers à base de poudre de marbre

Les figures 4.12 (a) et (b) représentent l'effet de la température sur le seuil de cisaillement pour les mortiers à base de poudre de marbre avec 0, 5, 10, 15, 20, 30 et 40 %.

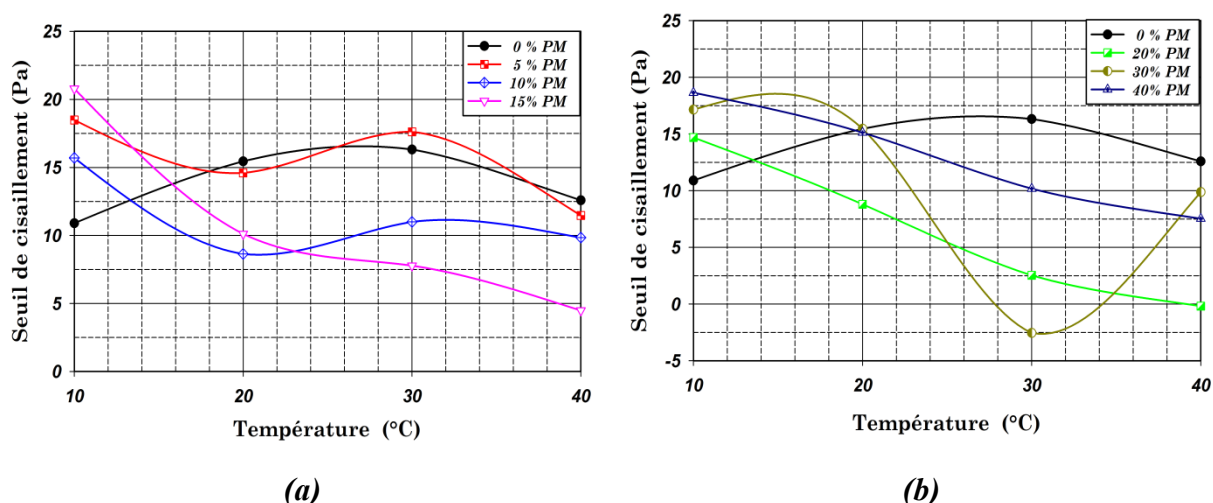


Figure 4-12. Effet de la température sur le seuil de cisaillement des MBEs à base de PM.

L'effet de la température sur les mortiers à base de poudre de marbre semble être moins important par rapport au mortier sans addition (0%PM). On constate l'augmentation de température diminue les paramètres rhéologiques, cela est expliqué par l'effet de dilution de la poudre de marbre (l'augmentation de rapport E/C). Une température de 20 °C semble être favorable pour le malaxage. Au-delà de 20 °C, le mortier dépend du pourcentage d'addition, ce qui donne les meilleurs résultats pour le seuil de cisaillement. Sauf pour MBE- moins de 5% de mortier qui a des seuils de cisaillement à 10 °C et 20 °C au-dessus de la référence. On constate aussi que l'effet de dilution semble être défavorisé dans la température de 10°C, cela peut être dû à l'effet de retard de fonctionnement de superplastifiant.

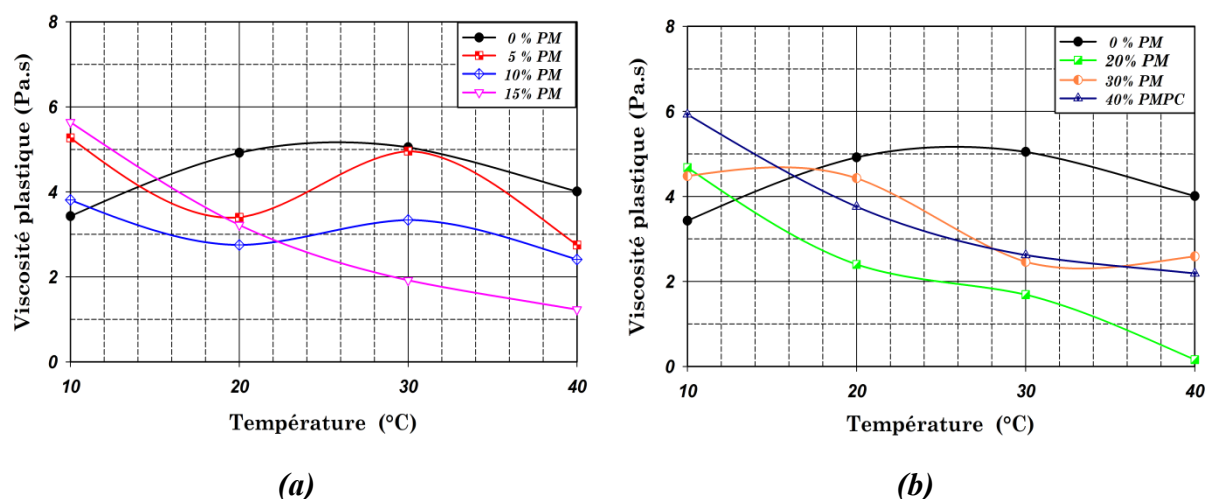


Figure 4-13. Effet de la température sur la viscosité des MBEs à base de PM.

La figure 4.13 (a) et (b) montrent l'effet de la température sur la viscosité des MBEs à base de poudre de marbre. Un comportement similaire est observé pour la viscosité à celle de seuil cisaillement ce qui confirme nos résultats, un effet positif est constaté pour la viscosité entre 20 °C et 40 °C pour tous les mélanges. Toujours le mortier MBE-PC-5% PM donne une viscosité inférieure à la référence. On note également que plus le pourcentage d'ajout de marbre est élevé et plus la température est élevée (supérieure à 20 °C), la viscosité du mélange est toujours inférieure à la viscosité du mélange de référence. On note aussi l'effet négatif de la température 10°C pour tous les mélanges, et cela est probablement dû à l'influence de cet environnement au fonctionnement de superplastifiant.

4.4.1.2 L'affaissement au mini cône

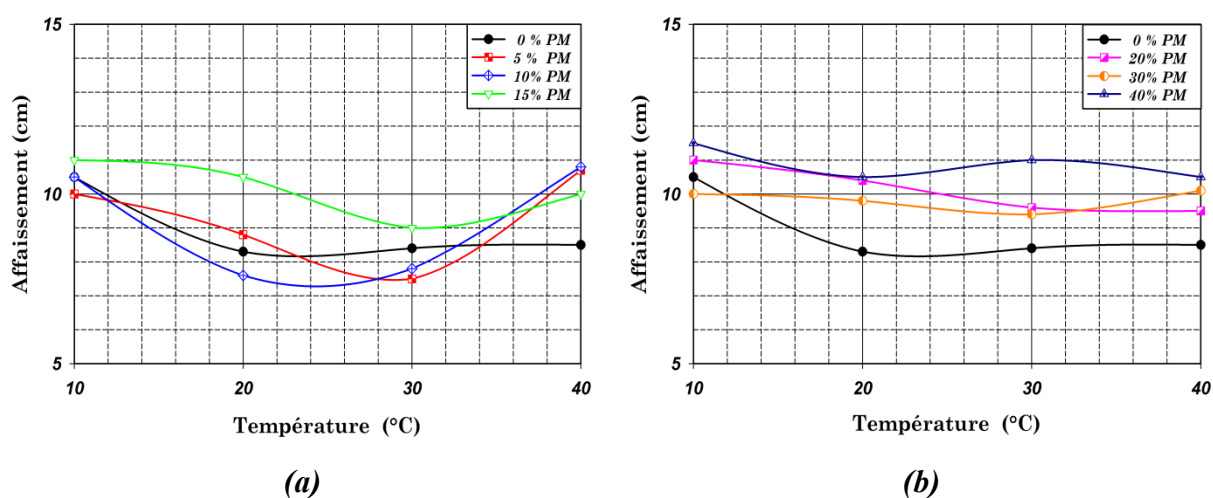


Figure 4-14. Effet de la température sur l'affaissement des MBEs à base de PM.

La figure 4.14 (a) et (b) montrent l'effet de température sur l'affaissement en fonction du pourcentage d'addition. Nous notons un effet de température positif sur l'affaissement MBE-PM par rapport au mortier de référence, et nous avons enregistré les meilleures valeurs d'affaissement pour la température dans l'environnement de 10°C comme température, à l'exception du mortier MBE-30% PM et MBE-40% PM. L'effet positif des températures élevées et basses reste perceptible pour tous les mélanges, idéale, ce qui permet de conclure que la température influe positivement sur l'affaissement, quel que soit le pourcentage de poudre de marbre.

4.4.1.3 Temps d'écoulement

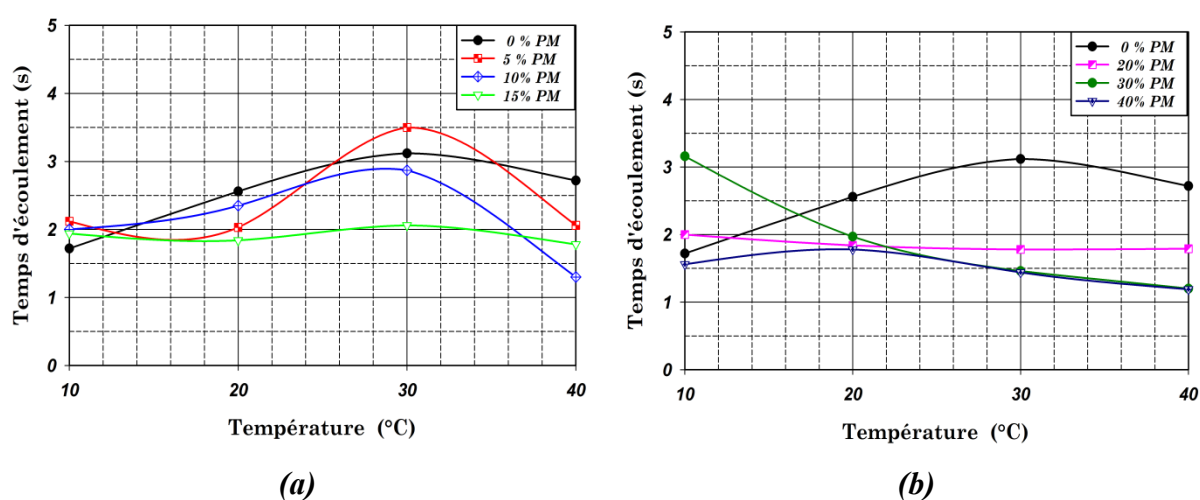


Figure 4-15. Effet de la température sur le temps d'écoulement des MBEs à base de PM.

La figure 4.15 (a) et (b) montre l'évolution du temps d'écoulement en fonction de la température pour les mortiers à base de poudre de marbre. L'augmentation de la température de 20 °C à 40 °C et l'addition minérale de 5 à 40% engendrent une diminution du temps d'écoulement, cela peut être expliqué par l'effet de dilution assuré par la poudre de marbre.

4.4.2 MBE à base de pouzzolane naturelle

4.4.2.1 Les paramètres rhéologiques des mortiers à base de poudre pouzzolane Naturelle

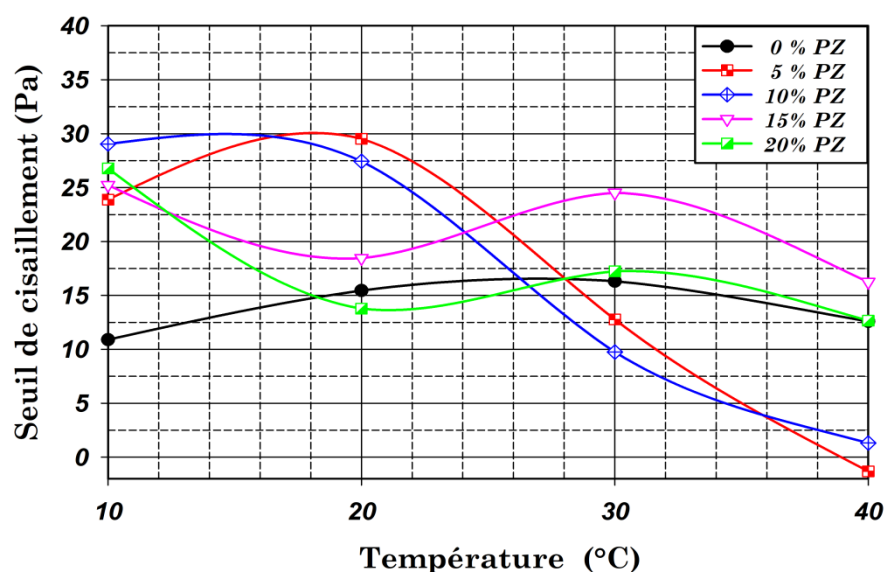


Figure 4-16. Effet de la température sur le seuil de cisaillement des MBEs à base de PZ.

La figure 4.16 montre l'effet de température sur le seuil de cisaillement des MBEs à base de L'évolution des proportions de la pouzzolane naturelle en présence d'un superplastifiant, les températures de 10°C à 40 °C a un effet négatif sur le seuil de cisaillement. À l'exception des mélanges contenant des proportions de 5% et 10% de pouzzolane et une température égale ou supérieure de 30 °C, ces mélanges présentent un comportement contraire à celui des autres mélanges, principalement dû à l'effet de la pouzzolane naturel, qui agit comme un lubrifiant pour les granulats. Ceci a été confirmé par d'autres chercheurs Yoshioka K.[28]. Lorsque la température augmente, la contrainte de cisaillement diminue, cette diminution est plus prononcée en présence du superplastifiant.

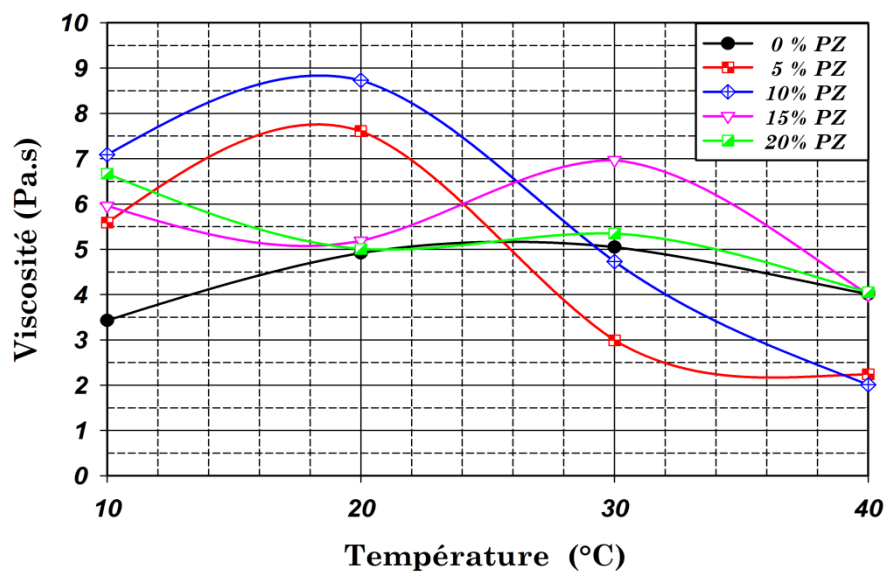


Figure 4-17. Effet de la température sur le seuil de cisaillement des MBEs à base de PZ.

La figure 4.17 montre l'effet de température sur la viscosité. On note aussi l'effet négatif de tous les mélanges entre 10 °C et 40 °C, et ce résultat est similaire à celui du seuil de cisaillement. Par contre, on note qu'il y a un effet positif des deux mélanges 5% et 10% au-delà de 30°C, cela a été prouvé par Yoshioka K et al [28], Il a tendance à avoir un coefficient de viscosité relative décroissant avec l'augmentation de la température. On remarque aussi que la viscosité de ces deux mélanges (5 et 10% PZ) a une tendance de diminuer à partir de 20 °C, ce qui présente un optimum vers cette température qui représente un environnement standard pour les essais.

4.4.2.2 L'affaissement au mini cône

La figure 4.18 représente la variation de l'affaissement en fonction de température pour les mortiers à base de pouzzolane naturelle. Les résultats obtenus montrent que les valeurs obtenues sont tous inférieure à 10 cm d'affaissement de départ ce qui confirme les résultats de la rhéologie. Cela est expliquer d'une part que la pouzzolane comme ajouts défavorise l'ouvrabilité des mortiers, et d'autre part l'augmentation d'une manière générale la température défavorise aussi l'ouvrabilité.

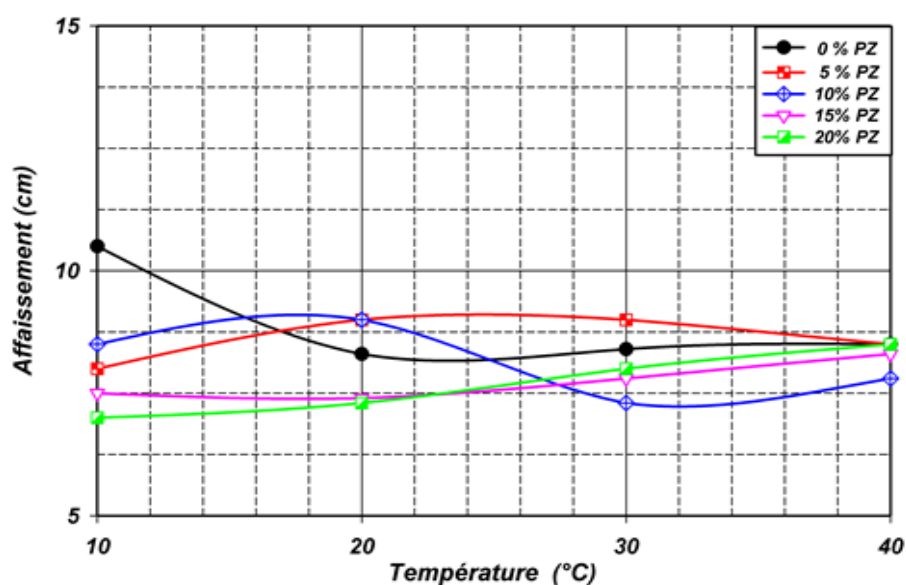


Figure 4-18. Effet de la température sur l'affaissement des MBEs à base de PZ.

4.4.2.3 Temps d'écoulement

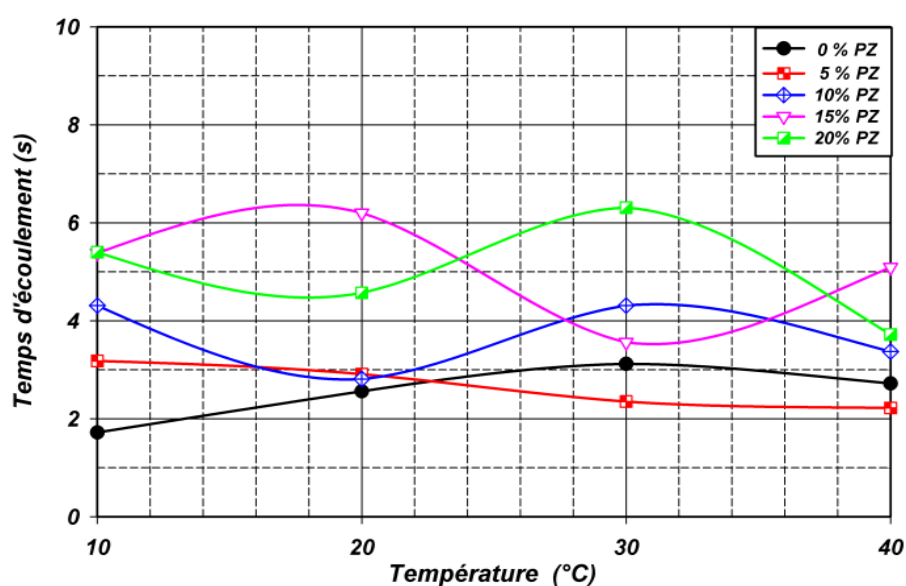


Figure 4-19. Effet de la température sur le temps d'écoulement des MBEs à base de PZ.

La figure 4.19 montre la variation de temps d'écoulement en fonction de température. On observe un comportement presque similaire à celui de l'affaissement et cela par l'intermédiaire des valeurs de passage de temps d'écoulement en utilisant le Mini-Maniabilimètre pour mortier supérieur au mortier de référence à toutes les températures. À l'exception de mélange de 5% de PZ qui présente des valeurs légèrement faibles par rapport à la référence à des température de 0 et 40° C.

Cela nous montre également que l'étude de la rhéologie à l'aide de rhéomètre nous montre clairement le comportement rhéologique mieux si on se limite par l'étude classique de la maniabilité.

4.4.3 MBE à base de laitier de haut fourneau

4.4.3.1 Les paramètres rhéologiques des mortiers à base de poudre de laitier de haut fourneau

La figure 4.20 montre l'évolution de seuil de cisaillement en fonction de la température pour les mortiers à base de laitier de haut fourneau.

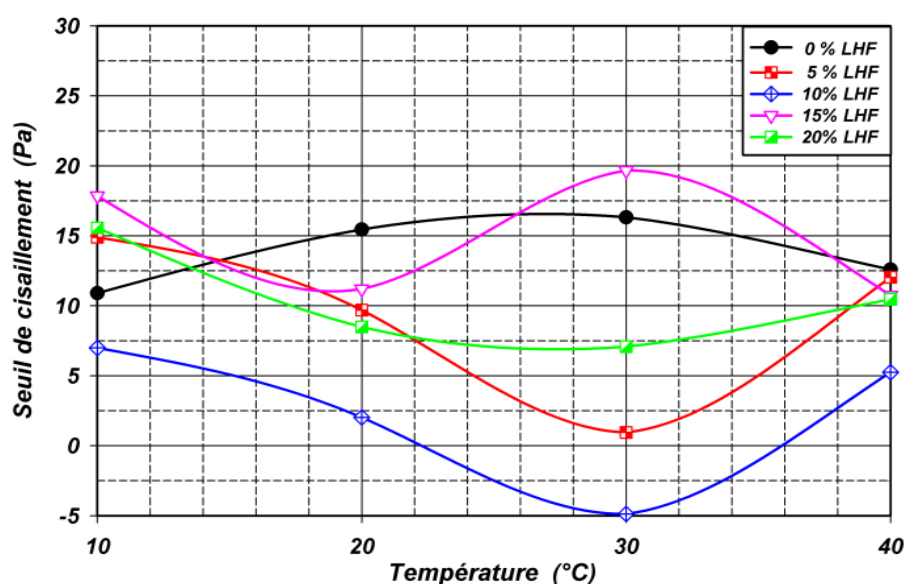


Figure 4-20. Effet de la température sur le temps d'écoulement des MBEs à base de LHF.

Selon ces résultats, on note que le seuil de cisaillement diminue considérablement pour presque tous les mélanges au-delà de 20°C, ce qui montre l'effet positif de laitier de hauts fourneaux dans l'amélioration des paramètres rhéologiques. On constate aussi un optimum vers la température de 30 °C pour une quantité de laitier supérieure à 10%. À l'exception de mélange avec 15% qui présente une valeur légèrement supérieure à la référence.

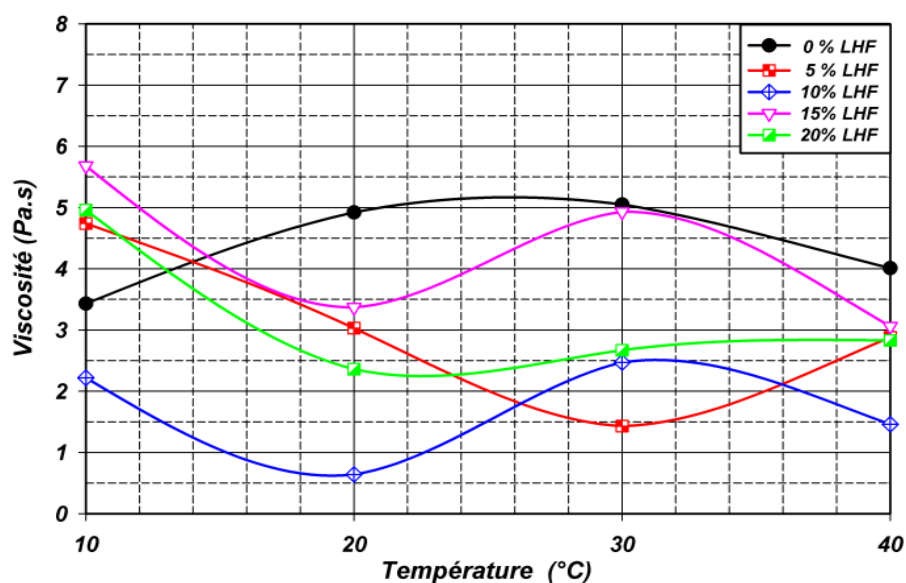


Figure 4-21. Effet de la température sur la viscosité des MBEs à base de LHF.

La figure 4.21 montre la variation de viscosité en fonction de la température pour les mortiers à base de laitier de haut fourneau. A travers ces résultats, on voit que les viscosités des mortiers avec additions sont inférieures à celles de mortier de référence. Les températures supérieures ou égales à 20 °C montrent leur efficacité dans la réduction de la viscosité, cela et peut-être dû à la propriété du laitier leur ajout avec une propriété hydraulique latente. D'où le superplastifiant se combine bien avec le laitier.

4.4.3.2 L'affaissement au mini cône

La figure 4.22 représente la variation de l'affaissement en fonction de la température pour les mortiers LHF.

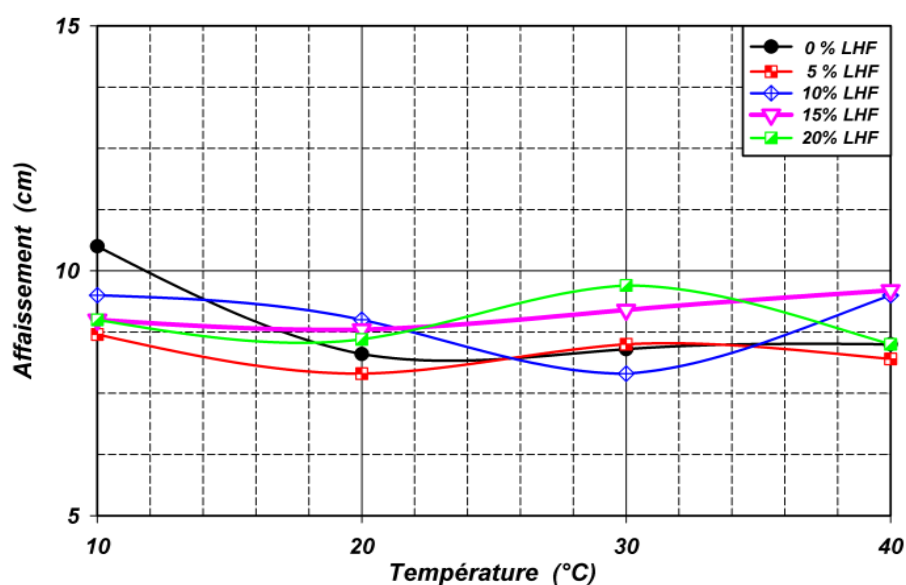


Figure 4-22. Effet de la température sur l'affaissement des MBEs à base de LHF.

Grâce aux résultats obtenus, dans tous les mélanges, les valeurs d'affaissement sont presque identiques par rapport au mortier de référence avec une légère variation en alentour de mélange de référence (100% ciment) en plus la basse température favorise la diminution de l'affaissement.

4.4.3.3 Temps d'écoulement

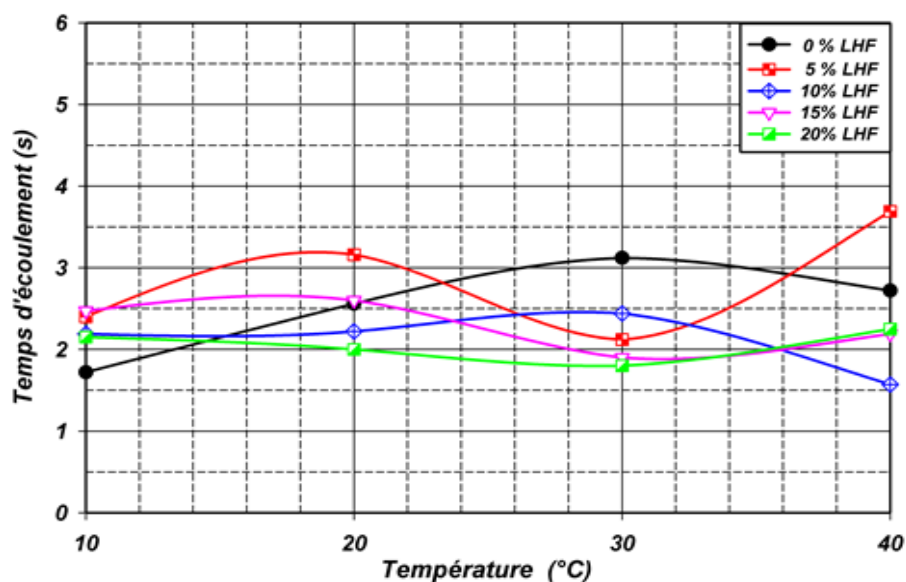


Figure 4-23. Effet de la température sur l'écoulement des MBEs à base de LHF.

La figure 4.23 représente l'effet de la température sur le temps d'écoulement. En suivant le comportement de l'écoulement du mélange, on constate que la vitesse d'écoulement est

moins élevée dans les mélanges contenant plus de pourcentages de laitier de haut fourneau, tandis que pour les mélanges dans lesquels le pourcentage de laitier est faible, l'écoulement est lent, à des températures supérieures à 20 °C, et la vitesse d'écoulement augmente légèrement pour tous les mélanges à 10 °C.

4.5 Influence de couple temps/températures sur le comportement rhéologique des MBEs

4.5.1 MBE à base de poudre de marbre

4.5.1.1 Les paramètres rhéologiques des mortiers à base de poudre de marbre

La figure 4.24 représente l'effet de couple du temps / température sur la viscosité plastique des mortiers à base de poudre de marbre.

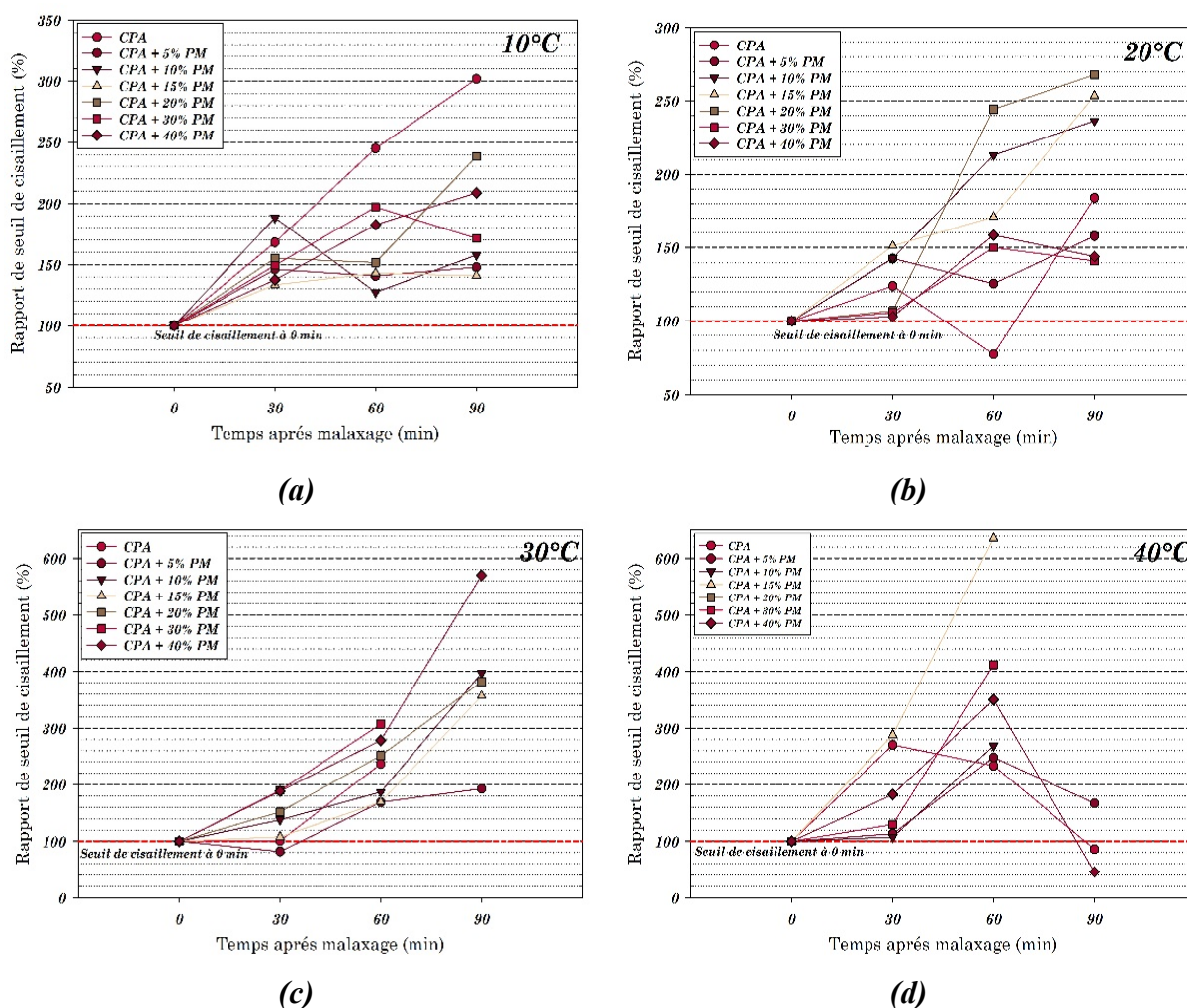


Figure 4-24. Effet de couple temps et température sur seuil de cisaillement des MBEs à base de PM.

On remarque que on a un effet négatif de couple temps/température sur le seuil de cisaillement dans presque tous les mélanges avec des valeurs max de rapport de seuil de cisaillement de 300, 270, 570 et 640 % pour des température 10, 20, 30 et 40°C respectivement. On constate aussi que le retard des mesures a 30, 60 et 90 min affecte aussi négativement le seuil de cisaillement. A l'exception de température 40°C d'où on remarque une baisse considérable après 90 min de repos de mélange cela peut-être dû à la ségrégation entre la partie solide et la partie fluide, et en peut aussi que l'augmentation de température retarde le fonctionnement de superplastifiant.

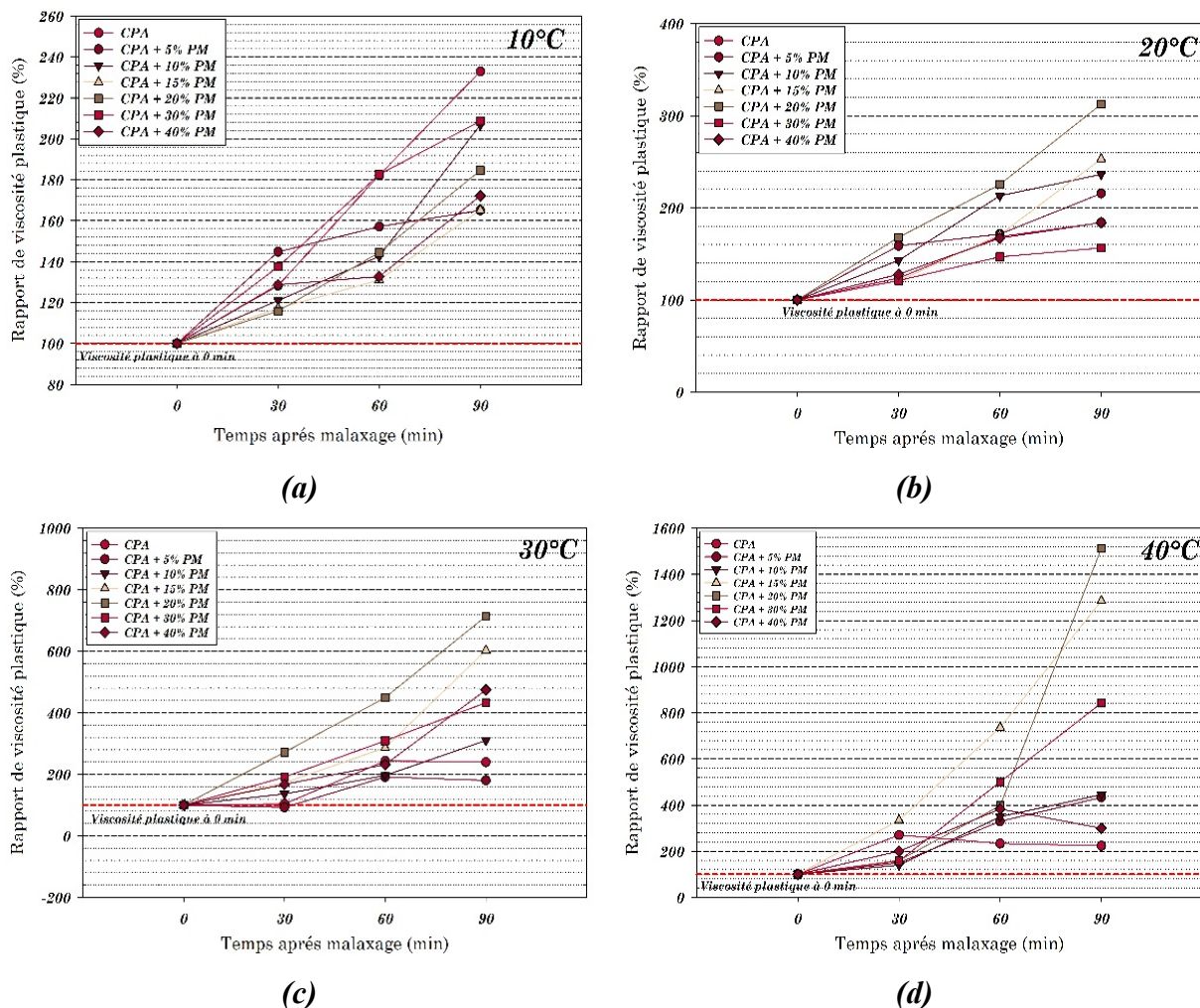


Figure 4-25. Effet de couple temps et température sur la viscosité plastique des MBEs à base de PM.

La figure 4.25 représente l'effet de couple temps et température sur la viscosité plastique des mortiers à base de poudre de marbre. À travers la courbe, on note que la valeur

de viscosité est élevée dans tous les mélanges, et qu'elle augmente avec le temps et la température, et on remarque que dans l'environnement standard (20°C) les valeurs de viscosité pour les mortiers à base de poudre de marbre se rapproche, par contre les autres environnements contribuent négativement sur la viscosité si on augmente le temps de repos après malaxage.

4.5.1.2 L'affaissement au mini cône

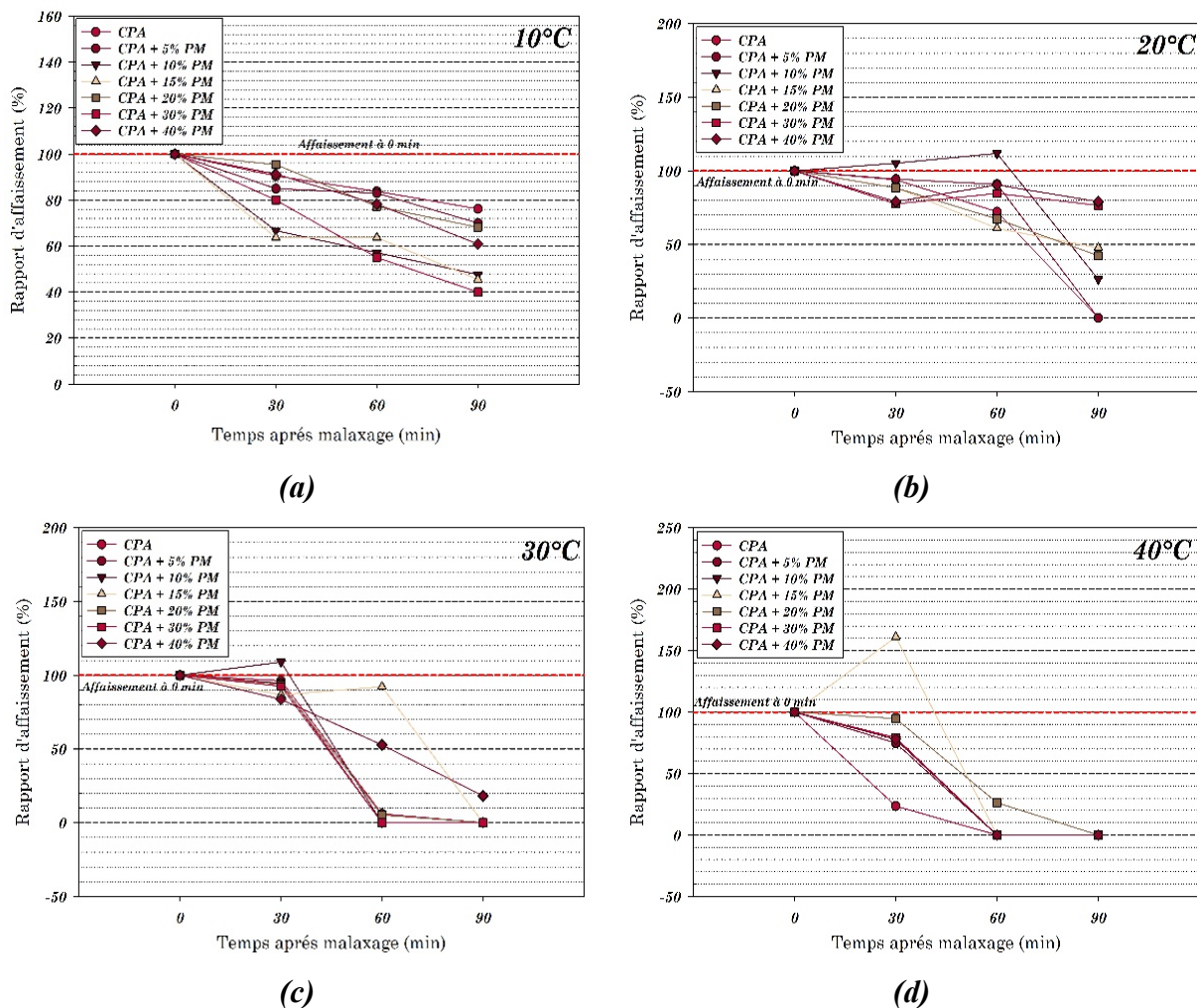


Figure 4-26. Effet de couple temps et température sur l'affaissement des MBEs à base de PM.

La figure 4.26 représente l'effet de couple température et temps sur la l'affaissement. Grâce aux résultats obtenus, on constate un effet similaire à ceux de seuil de cisaillement et la viscosité ce qui confirme ces résultats. L'effet à la fois de la température et du temps apparaît clair, car la valeur d'affaissement diminue avec l'augmentation de la température et du temps ensemble, et la valeur d'affaissement est nulle à 40 °C et un temps supérieur ou égale à 60 minutes.

4.5.1.3 Temps d'écoulement

La figure 4.27 représente l'effet de couple température et temps sur l'écoulement sur les mortiers à base de poudre de marbre.

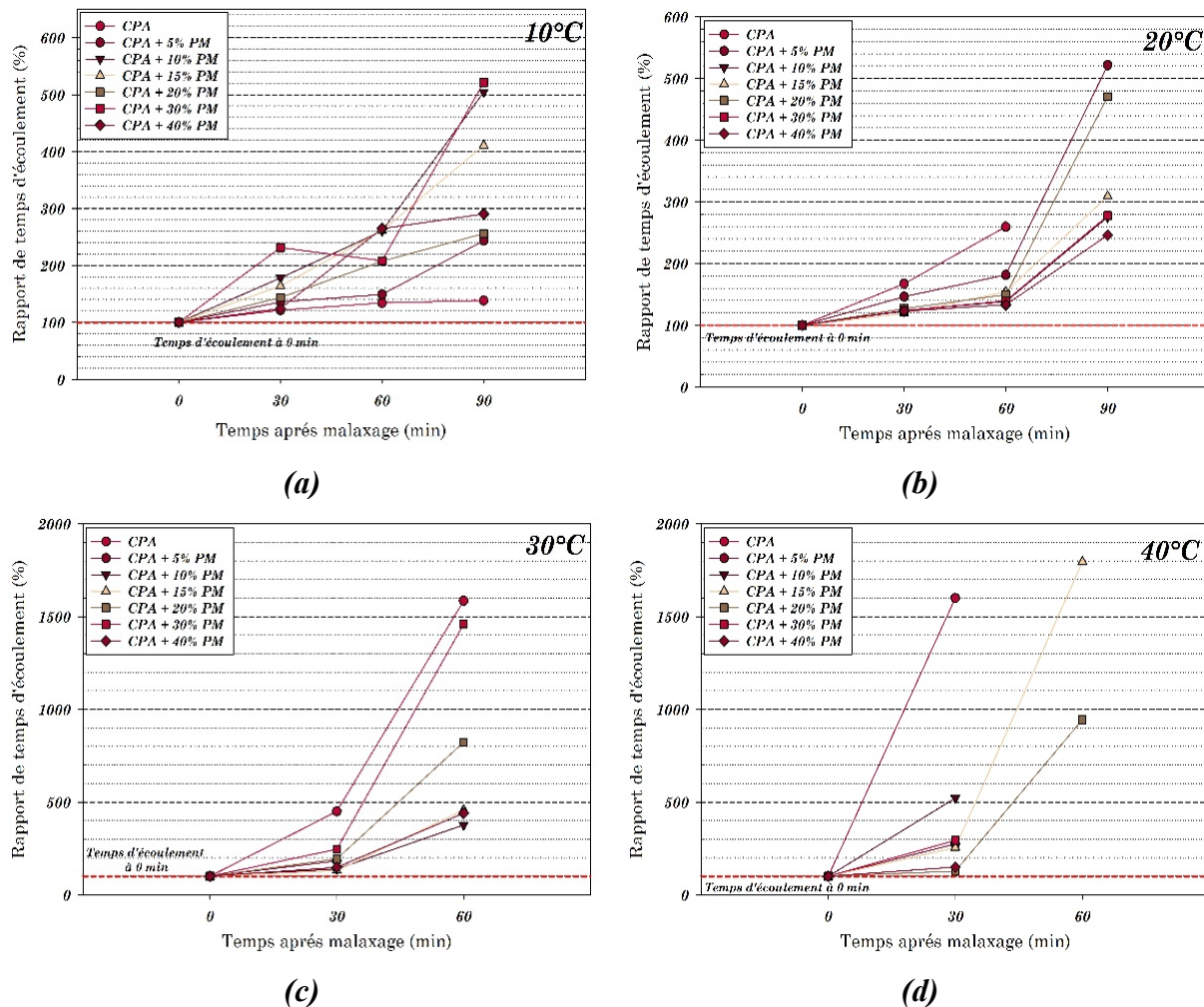


Figure 4-27. Effet de couple température et temps sur l'écoulement des MBEs à base de PM.

On remarque à travers les courbes que la vitesse d'écoulement suit une courbe ascendante selon deux pentes, l'une faible entre 0 et 30 minutes après malaxage et l'autre forte entre 60 et 90 minutes. Ces résultats montrent l'effet négatif de l'environnement et le retard de mise en œuvre de béton dans nos chantiers.

4.5.2 MBE à base de pouzzolane naturelle

4.5.2.1 Les paramètres rhéologiques des mortiers à base de poudre de pouzzolane naturelle

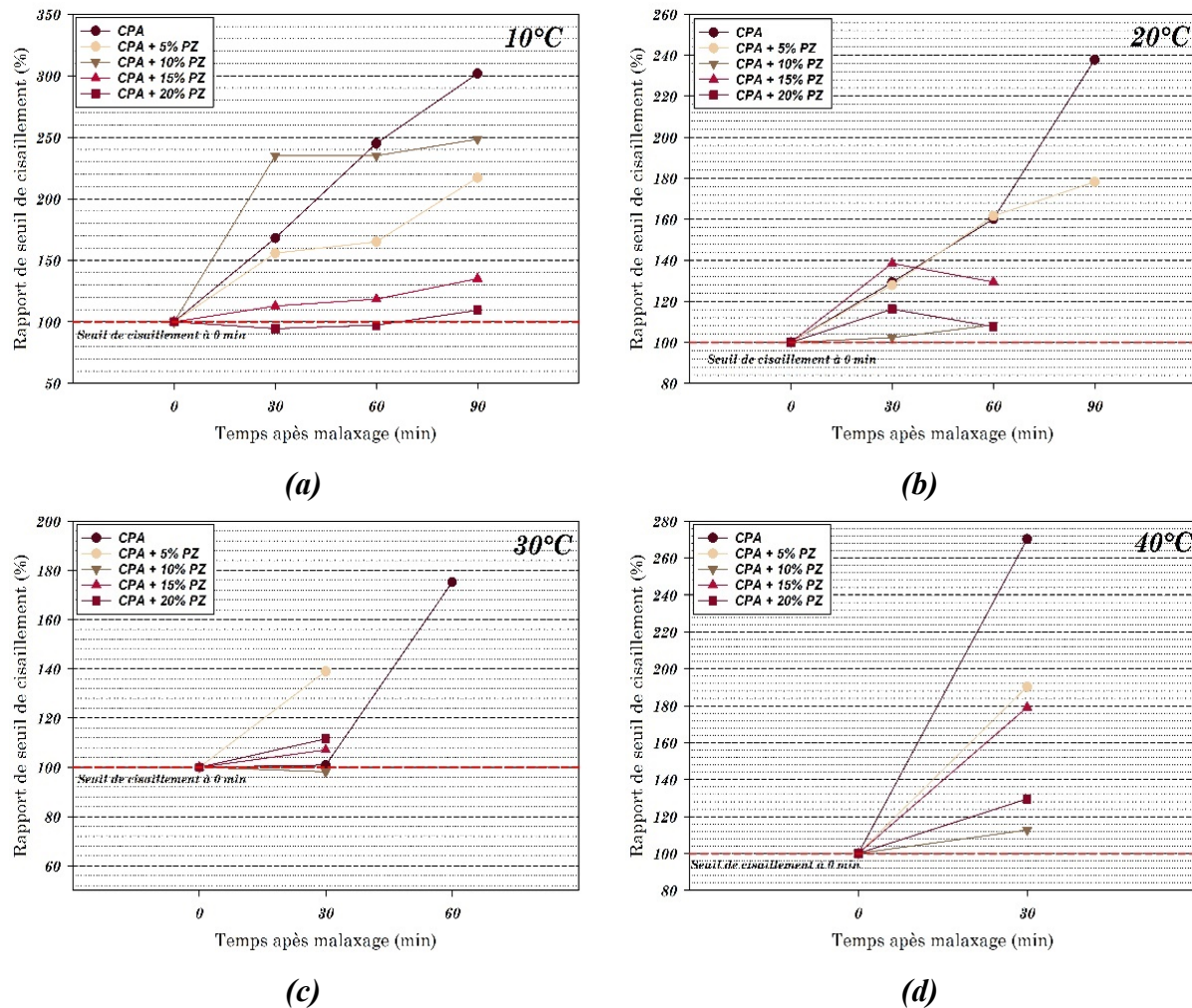


Figure 4-28. Effet de couple température et temps sur seuil de cisaillement des MBEs à base de PZ.

Les figures 4.28 et 4.29 montrent l'effet de couple température et temps sur le seuil de cisaillement et la viscosité respectivement pour les mortiers à base de pouzzolane naturelle. On observe que les mélanges contenant de la poudre de pouzzolane dans lesquels le seuil de cisaillement est affecté par les deux facteurs de température et de temps, comme on a constaté que l'environnement joue un rôle primordial dans ce type de mortiers, on remarque que l'environnement hivernale (10°C) diminue les paramètres rhéologique, un effet similaire est constaté pour l'environnement standard (20°C), sauf ici l'effet du temps après le malaxage entre en considération en se limite à 60 minutes. Pour l'environnement estival (30°C à 40°C) les paramètres rhéologiques sont presque impossibles de les mesurées, car les mélanges deviennent très fermes et la prise commence.

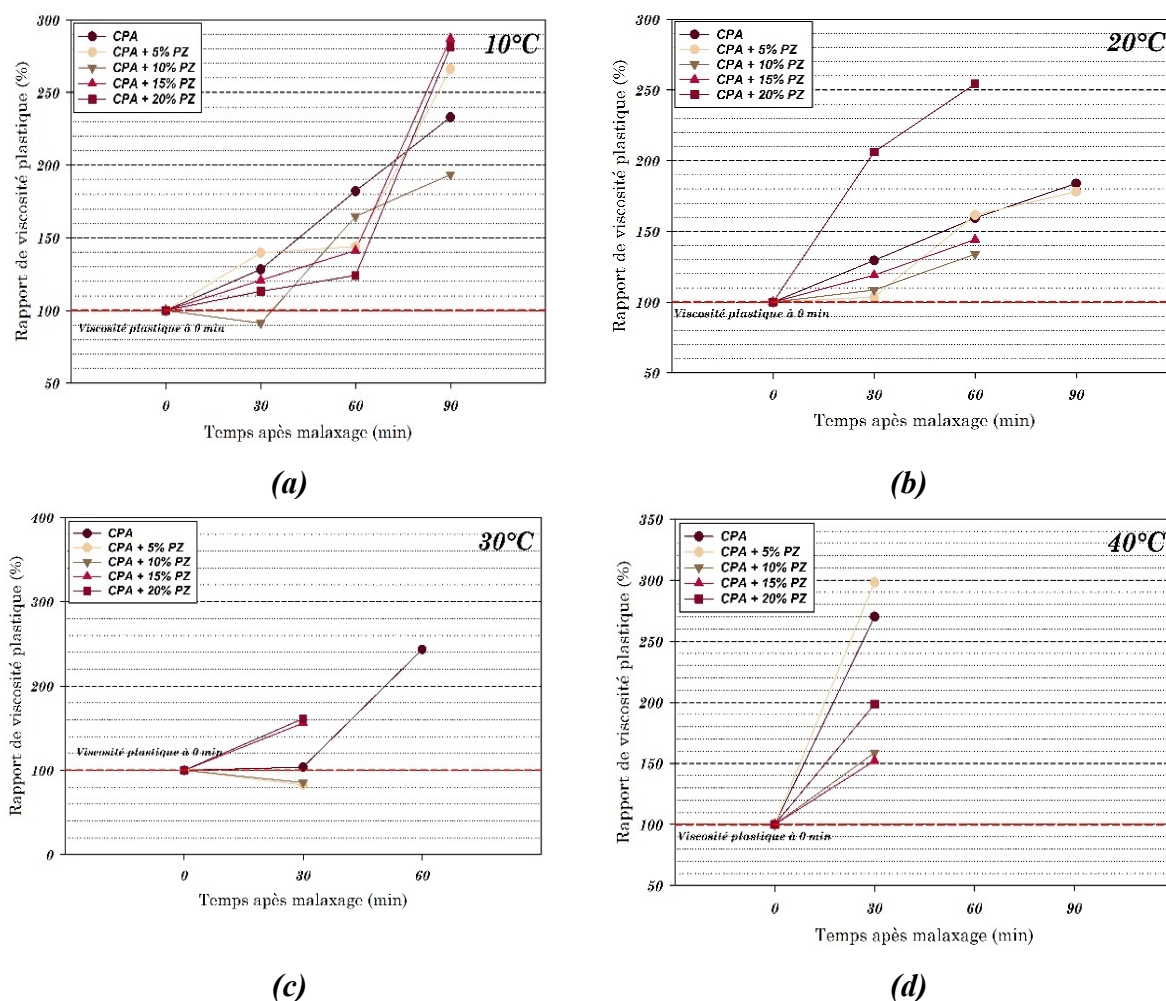
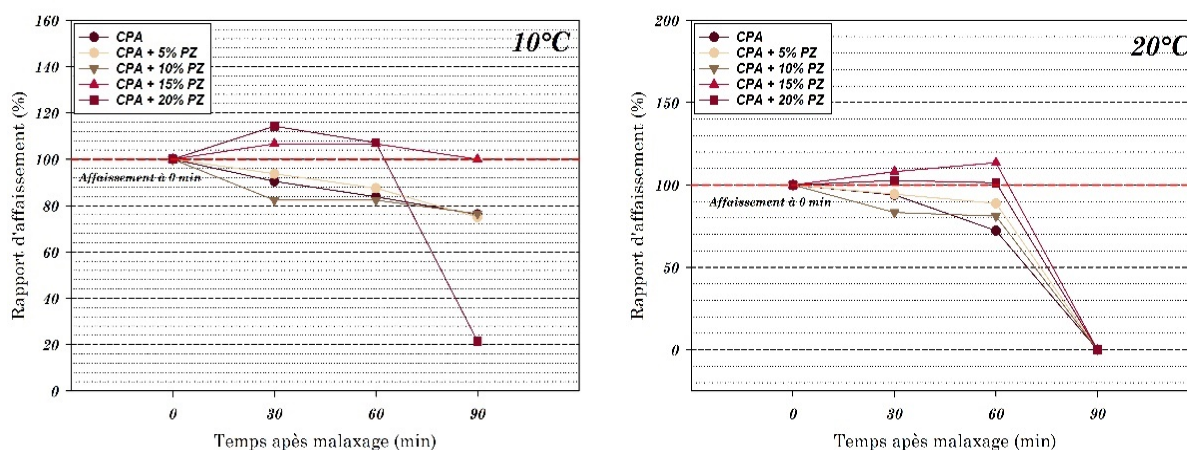


Figure 4-29. Effet de couple température et temps sur la viscosité plastique des MBEs à base de PZ.

4.5.2.2 L'affaissement au mini cône

Les figures 4.30 et 4.31 représentent l'effet de couple température et temps sur la l'ouvrabilité de mortiers à base de pouzzolane naturelle.



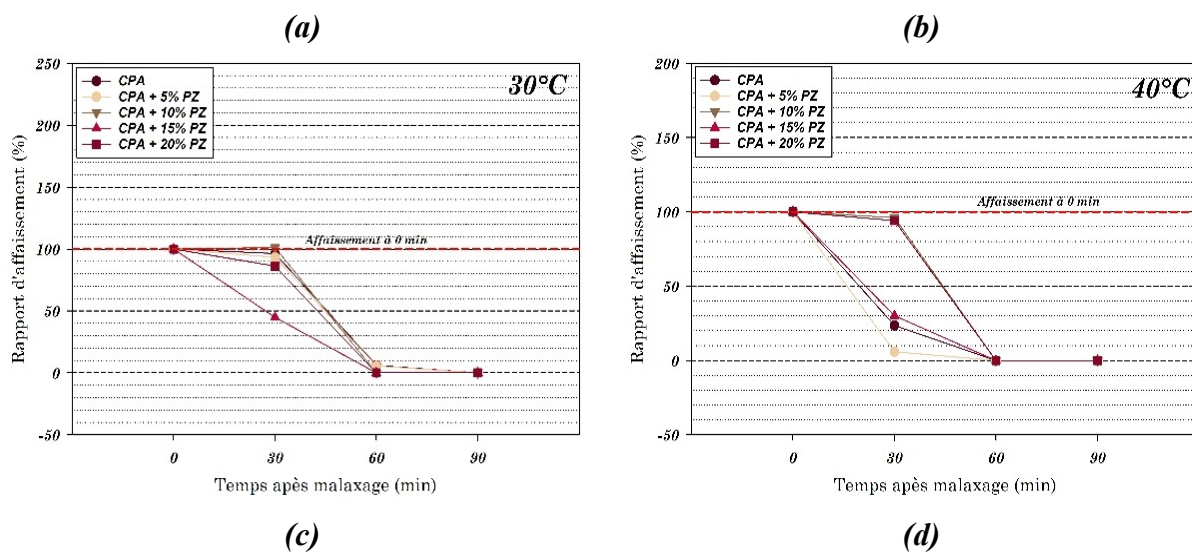


Figure 4-30. Effet de couple température et temps sur l'affaissement des MBEs à base de PZ.

4.5.2.3 Temps d'écoulement

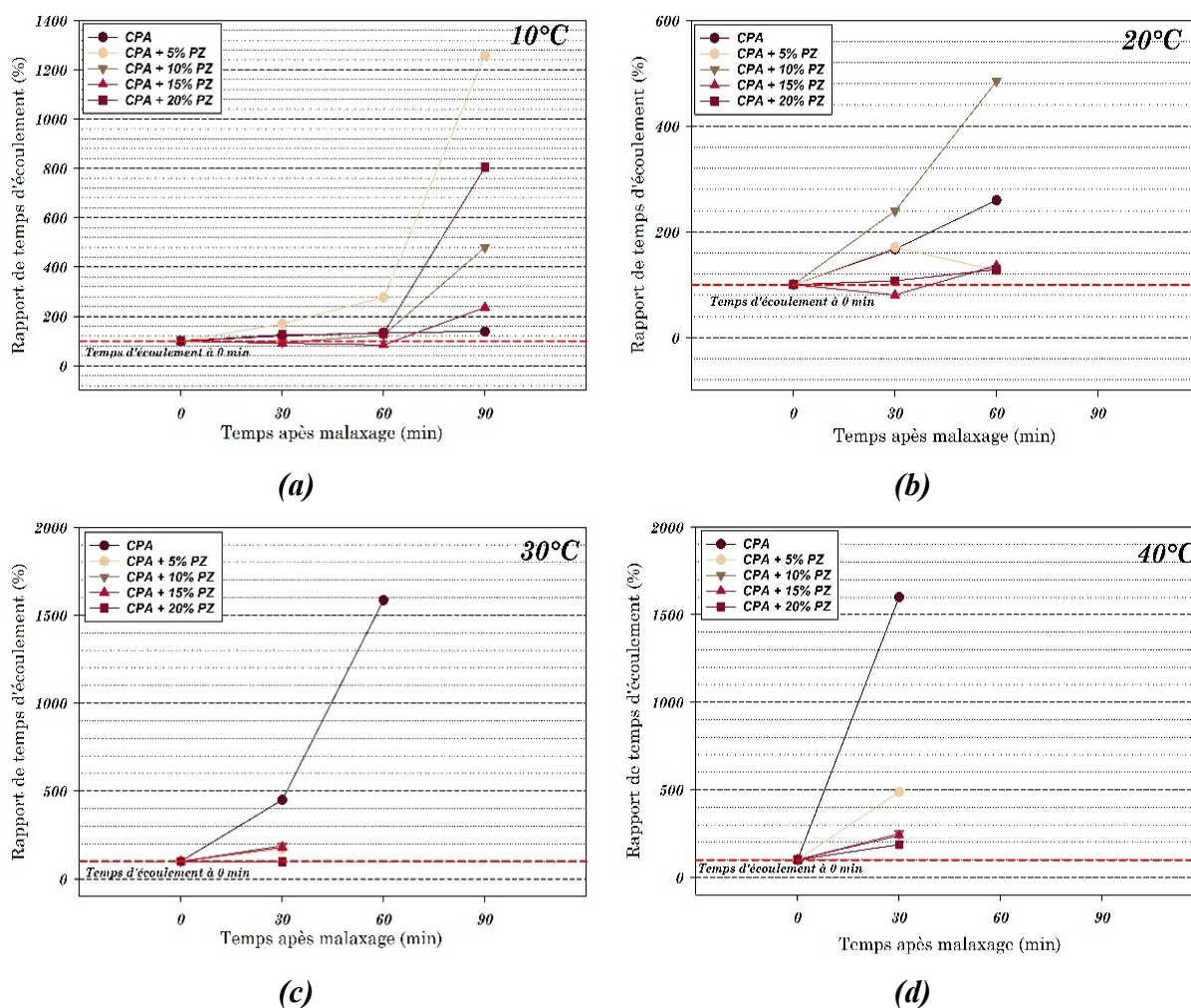


Figure 4-31. Effet de couple température et temps sur l'écoulement des MBEs à base de PZ.

En observant un effet similaire à celui des paramètres rhéologiques l'environnement de 10 et 20°C favorise le retard de mise en œuvre de 60 minutes pour 20°C et 90 minutes pour 10°C. Par contre l'environnement de 30 à 40°C défavorise la mise en œuvre et nous donnent une durée limite de 30 minutes maximum.

4.5.3 MBE à base de laitier de haut fourneau

4.5.3.1 Les paramètres rhéologiques des mortiers à base de poudre de laitier de haut fourneau

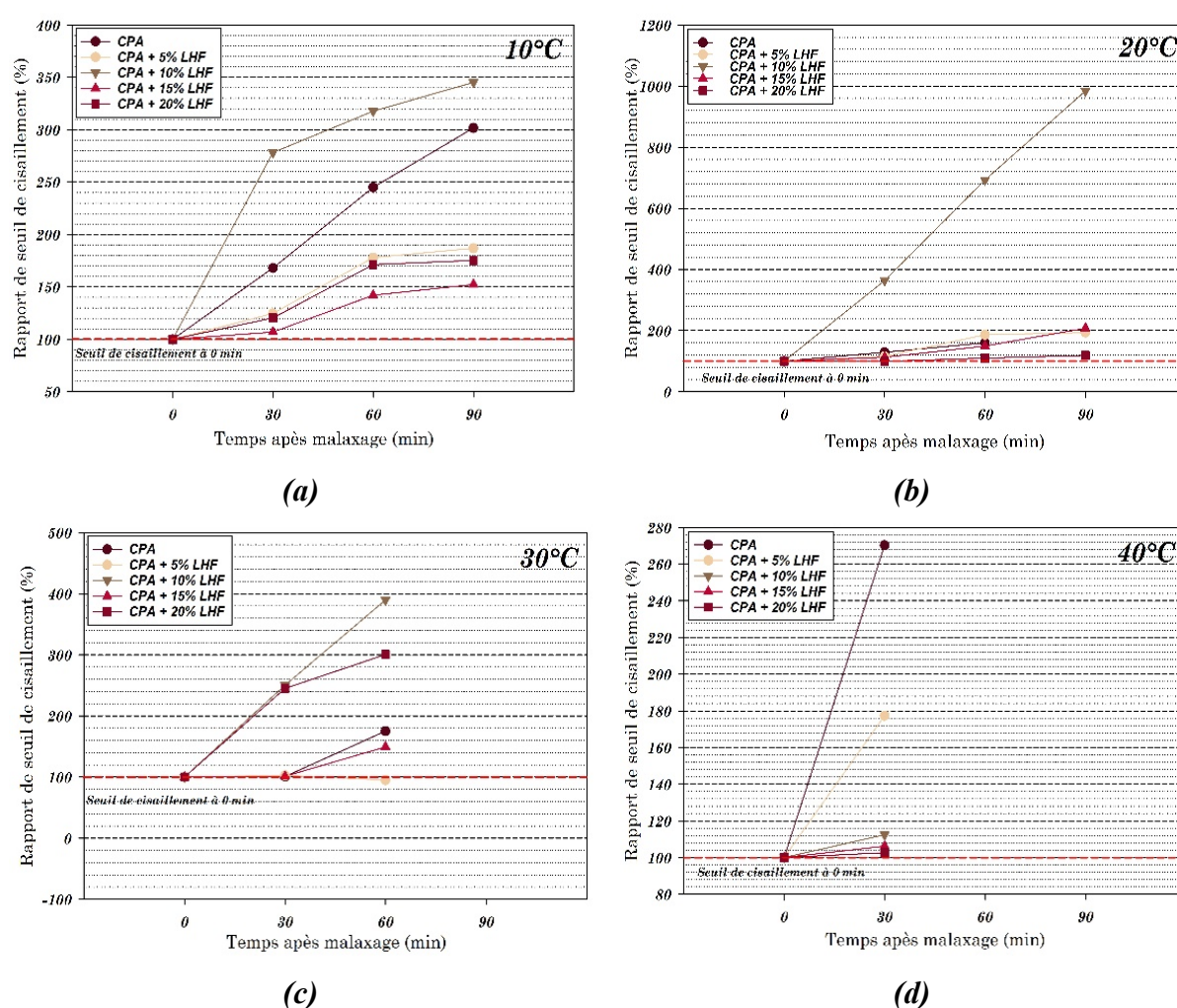


Figure 4-32. Effet de couple température et temps sur seuil de cisaillement des MBEs à base de LHF.

La figure 4.32 représente l'effet de couple température et temps sur seuil de cisaillement, en suivant le comportement des mélanges contenant du laitier de haut fourneau, on constate que l'effet de la température et du temps sur le seuil de cisaillement est similaire à

celui des mortiers à base de pouzzolane naturelle d'où la diminution de température retard le début de prise et nous permet d'avoir une perte dans le seuil de cisaillement maximal après 90 minutes de l'ordre de 350 % à 10°C et 1000% à 20°C, tandis que à 30 et 40°C le début de prise commence tôt et on se limite à 60 minutes à 30°C et 30 minutes à 40°C. Cela est peut-être dû à la propriété hydraulique latente de laitier de hauts fourneaux.

La figure 4.33 représente l'effet de couple température et temps sur la viscosité plastique des MBEs à base de laitier de haut fourneau

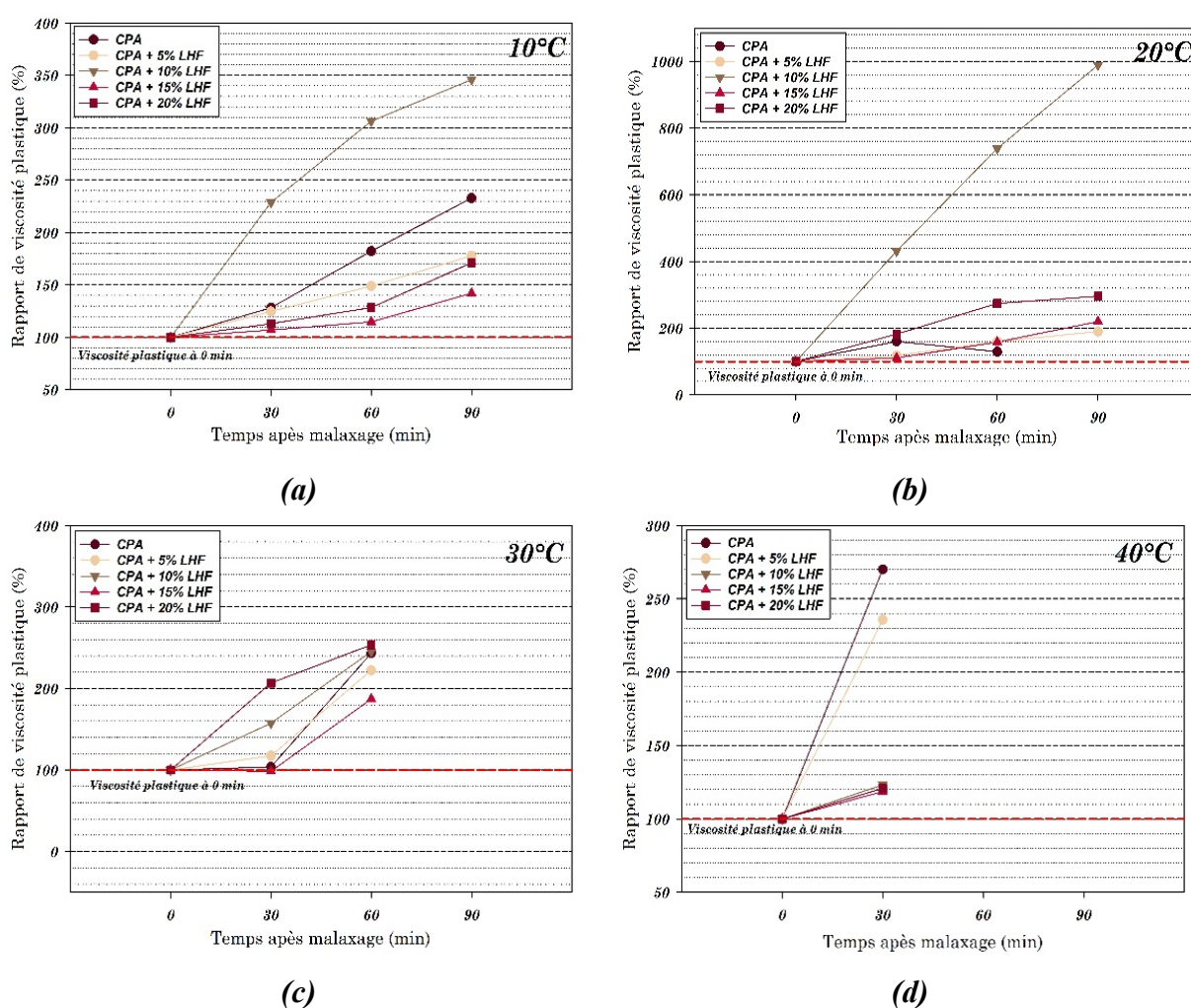


Figure 4-33. Effet de couple température et temps sur la viscosité plastique des MBEs à base de LHF.

Les résultats obtenus montrent l'influence à la fois de la température et du temps sur la viscosité des mélanges contenant du laitier de haut fourneau. On a constaté qu'au fur et à mesure que la température augmente avec le temps, la viscosité des mélanges augmente sous

l'influence de ce couple (température, temps), en plus des propriétés du laitier de haut fourneau jouent le même un rôle à ce du ciment.

4.5.3.2 L'affaissement au mini cône

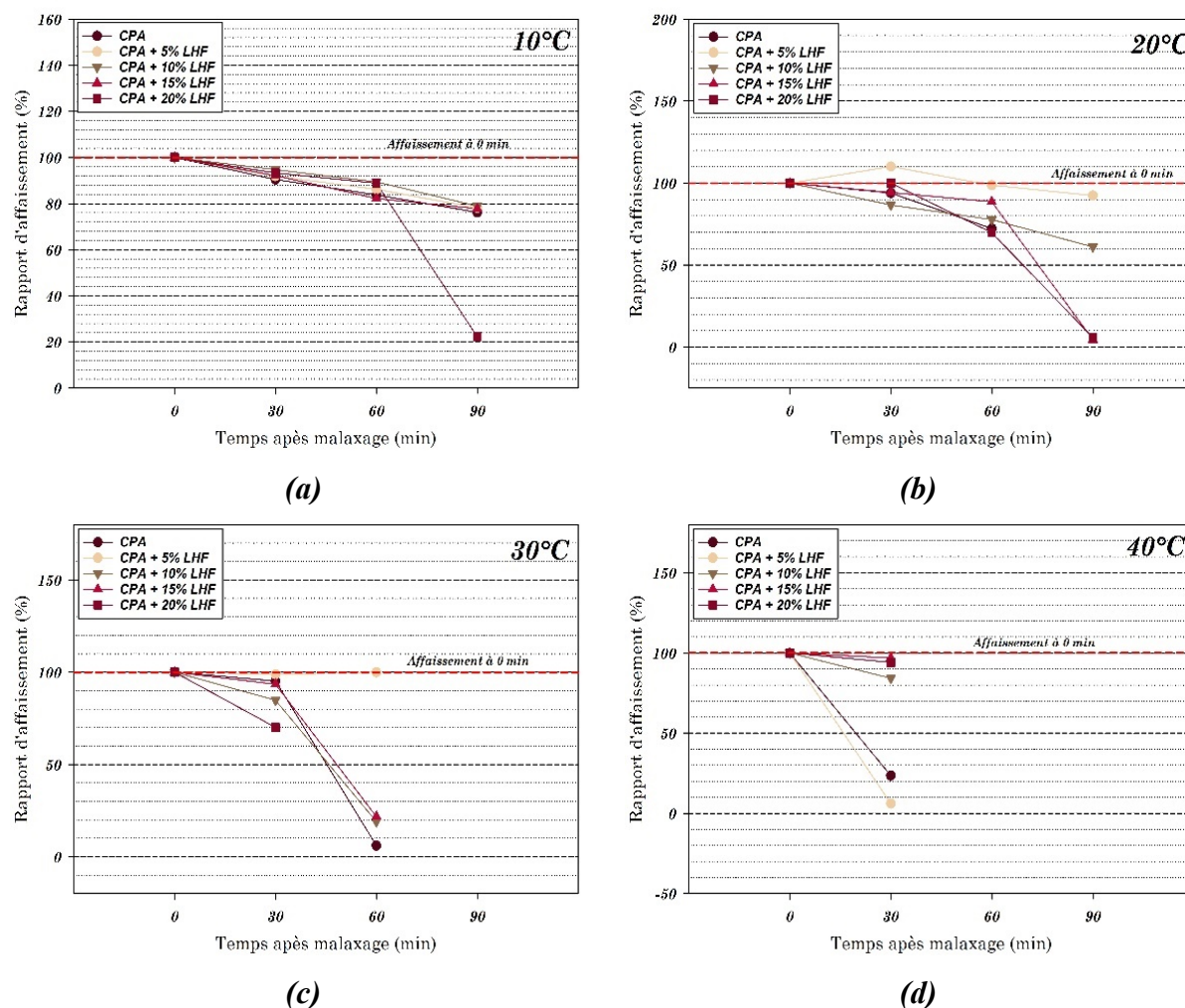
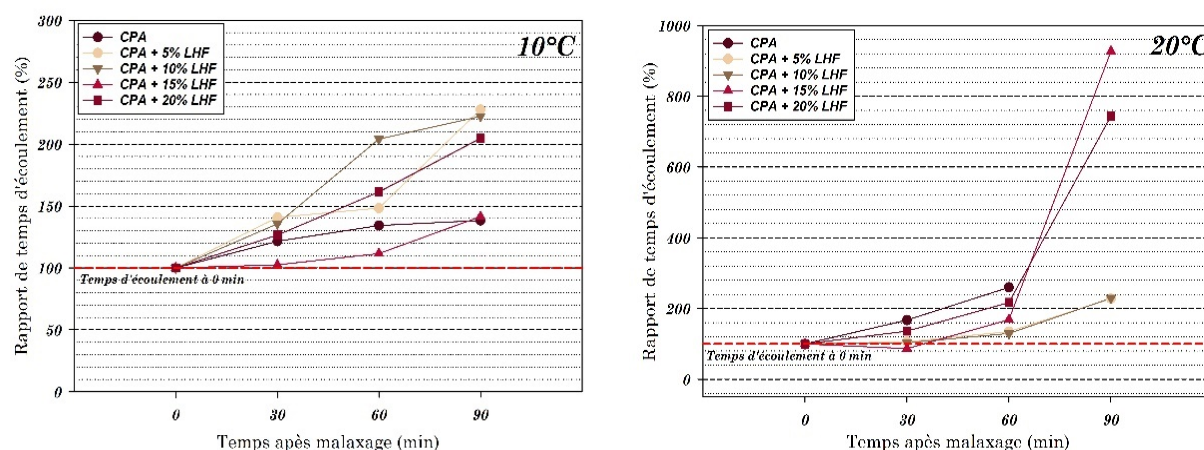


Figure 4-34. Effet de couple température et temps sur l'affaissement des MBEs à base de LHF.

4.5.3.3 Temps d'écoulement



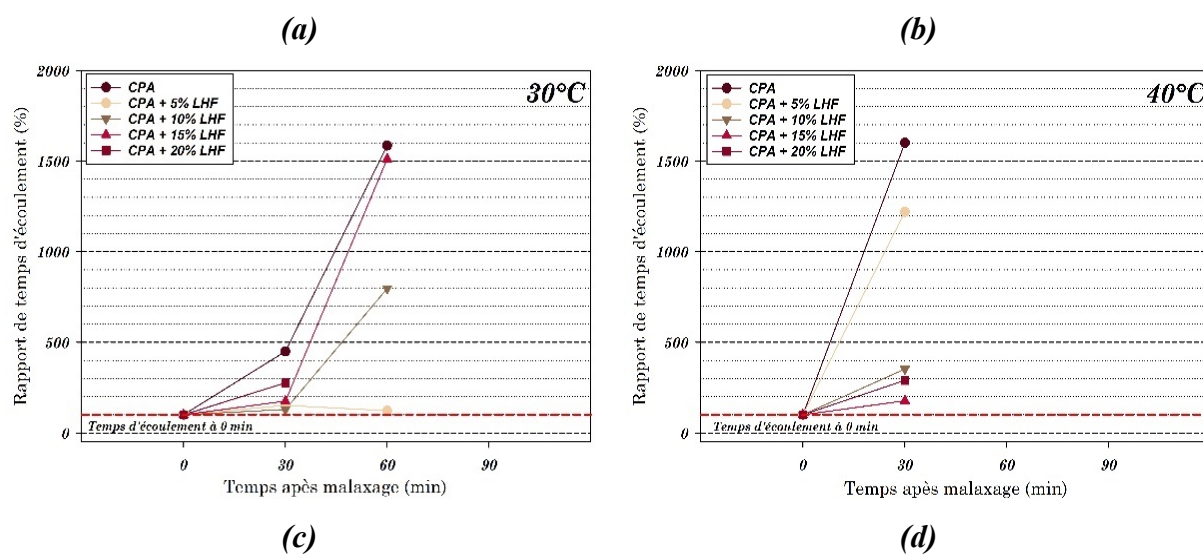


Figure 4-35. Effet de couple température et temps sur l'écoulement des MBEs à base de LHF.

La figure 4.34 et 4.35 représentent l'effet de couple température et temps sur l'ouvrabilité. Nous remarquons à travers les courbes que l'affaissement et du temps d'écoulement que la température et le temps affecte aussi négativement l'ouvrabilité des mortiers à base de laitiers de hauts fourneaux, surtout à 30 et 40°C la durée de mise en œuvre se limite à 60 minutes à 30°C et 30 minutes à 40°C.

Conclusion Générale

Le but de cette étude est d'étudier l'effet de la pâte de ciment et l'effet du couple de la température et du temps sur les performances à l'état frais du mortier équivalent au béton. De nombreux additifs sont combinés avec le mortier témoin, et l'étude s'est appuyée sur deux axes principaux :

- ☞ Varier le volume de pâte et mesurer les paramètres rhéologiques et l'ouvrabilité des mélanges de béton extraits de MBE formulés avec 325, 350, 375, 400, 425 et 450 kg/m³ de ciment.
- ☞ Etudier l'influence du couple température / temps sur le comportement rhéologique et l'ouvrabilité du MBE à partir de liants binaires (CPA+PM, CPA+PZ, CPA+LHF) et les mesures ont été faites à 0, 30, 60 et 90 min après malaxage à différentes températures (10, 20, 30 et 40 °C).

Le pourcentage de chaque addition était le suivant

- 1- Mortier de référence (100% ciment) ;
- 2- Mortier PM (5, 10, 15, 20, 30 et 40 % de poudre de marbre) ;
- 3- Mortier PZ (5, 10, 15 et 20 % de poudre de pouzzolane naturelle) ;
- 4- Mortier LHF (5, 10, 15 et 20 % de poudre de laitier de haut fourneau).

Les résultats montrent que :

- ☞ Les paramètres rhéologiques pour le mortier de référence semblent être affecté par l'augmentation de température, et aussi par le temps après malaxage.
- ☞ Le volume de pâte joue un rôle de lubrifiant dans la réduction des paramètres rhéologiques et l'ouvrabilité de mortier sans addition.
- ☞ Le prolongement de la durée après malaxage et l'augmentation de température influent négativement sur le comportement à l'état frais des mortiers à différents volumes de pâte.
- ☞ L'utilisation de la poudre de marbre semble l'addition la plus convenable dans l'amélioration des paramètres rhéologiques et l'ouvrabilité que ce soit après malaxage ou le maintien dans le temps dans les différentes températures.

- ☞ L'utilisation de pouzzolane naturel dans les MBE affecte négativement les paramètres rhéologiques et l'ouvrabilité surtout dans les climats chauds. Ce qui exige une attention particulière dans l'utilisation de ce type des additions pouzzolaniques.
- ☞ Le laitier de haut fourneau semble être moins affecté par rapport au pouzzolane naturel, et cela est dû probablement à la propriété d'hydraulique latente de laitier. Les paramètres rhéologiques et l'ouvrabilité sont moins affectés dans les différentes températures.
- ☞ L'effet combiné de la température et du temps après malaxage affectent négativement les mortiers à béton équivalent quel que soit le type d'addition utilisé avec un avantage pour la poudre de marbre et le laitier de haut fourneau suivie par le pouzzolane naturel.

Recommandations et perspectives

Cette recherche a été limitée à l'étude de l'influence de volume de pâte et le couple de température / temps après malaxage sur le comportement rhéologique des mortiers (MBE) à différentes températures. D'autres aspects restent à élucider et enrichir dans des futurs travaux de recherche, nous recommandons ce qui suit :

- Etude rhéologique des MBE avec des ciments ternaires;
- Faire une étude rhéologique avec l'utilisation des plans d'expériences pour avoir un modèle de comportement rhéologique qui estime les paramètres rhéologiques en fonction de la nature des additions et la température ;
- L'augmentation de la température vers 50°C ;
- Réaliser des essais à l'état durci, et faire une étude sur la durabilité des MBE ;
- Etude sur la tribologie des MBE-PM et MBE-PZ et MBE-LHF pour évaluer la pompabilité de ce type des mortiers ;

Annexe

FICHE FORMULE SECHE AU METRE CUBE									
26/02/2020		<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <th colspan="2">Classe vraie du ciment</th> </tr> <tr> <td style="width: 50%; text-align: center;">2j</td> <td style="width: 50%; text-align: center;">28j</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">10</td> <td style="text-align: center;">44</td> </tr> </table>		Classe vraie du ciment		2j	28j	10	44
Classe vraie du ciment									
2j	28j								
10	44								
	Masse V.App	Masse V.Ab	Coeff.ab						
Ciment		3,15							
Sable 0/5		2,62	0,51						
Gravier 3/8		2,66	2,08						
Gravier 8/15		2,61	2,49						
		Air occlus	1,50 %						
Date : 26/02/2020 13:29		Norme : XP P 18-305							
Composition : préliminaire		Désignation : BA 25 P 0/16							
Ouvrage : Béton									
Environnement : Sec		Quantité:	7,5 Litre						
Maniabilité : Plastique									
	Composition du béton								
	Quantité / m3		Quantité / D						
Matériaux	Volume L	Masse Kg	Volume L Masse Kg						
Ciment	113,33	357	0,85 2,68						
Sable 0/5	263,06	689,2	1,97 5,17						
Gravier 3/8	60,03	159,7	0,45 1,20						
Gravier 8/15	344,17	898,3	2,58 6,74						
Gravier 15/25	0	0,0	0,00 0,00						
Eau totale	207,7	207,7	1,56 1,56						
Eau absorbée	29,2	29,2	0,22						
Eau efficace	178,50	178,50	1,34						
Air occlus	15								
Somme V/M	974	2311,9	17,34						
G/S		1,54							
Etot/C		0,58							
Eeff/C		0,50							
Composition									

Références bibliographiques

- [1] H. Soualhi, «Optimisation de la viscosité des bétons a faible impact environnemental», Thèse de doctorat, université Cergy-Pontoise France, 2014.
- [2] A. S. E. Belaïdi, «Contribution à l ' étude rhéologique et durabilité de béton autoplaçant : Apport des ajouts cimentaires ternaires et des fillers locaux et industriels», Thèse de doctorat, Université Saad Dahleb Blida Algérie, 2013.
- [3] Z. Tafheem, S. Khusru, i S. Nasrin, «Environmental impact of green concrete in practice», en *International Conference on Mechanical Engineering and Renewable Energy*, 2011, vol. 22, p. 24.
- [4] V. Corinaldesi i G. Moriconi, «Behavior of beam-column joints made of sustainable concrete under cyclic loading», *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 18, núm. 5, p. 650-658, 2006.
- [5] Mohamed Redha Haifi, «Formulation des bétons autoplaçants», Thèse de magister, Université Mentouri de Constantine Algéria, 2011.
- [6] A. Schwartzentruber i C. Catherine, «La méthode du mortier de béton équivalent (MBE) - Un nouvel outil d ' aide à la formulation des bétons adjuvants», *Mater. Struct.*, vol. 33, núm. October, p. 475-482, 2000.
- [7] M. Ghrici, S. Kenai, i Said-Mansour, «Mechanical properties and durability of mortar and concrete containing natural pozzolana and limestone blended cements», *Cem. Concr. Compos.*, vol. 29, núm. 7, p. 542-549, 2007.
- [8] A. S. E. Belaidi, L. Azzouz, E. Kadri, i S. Kenai, «Effect of natural pozzolana and marble powder on the properties of self-compacting concrete», *Constr. Build. Mater.*, vol. 31, p. 251-257, 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.12.109.
- [9] B. Aboubakeur, «Comportement physico-mécanique et durabilité en climat chaud des mortiers autoplaçants a base d'ajouts binaires et ternaires», Thèse de doctorat, Université Amar Thelidji Laghouat Algérie, 2019.
- [10] C. K. Park, M. H. Noh, i T. H. Park, «Rheological properties of cementitious materials containing mineral admixtures», *Cem. Concr. Res.*, vol. 35, núm. 5, p. 842-849, 2005.

- [11] Z. Li i Z. Ding, «Property improvement of Portland cement by incorporating with metakaolin and slag», *Cem. Concr. Res.*, vol. 33, núm. 4, p. 579-584, 2003.
- [12] R. Barretta, L. Feo, i R. Luciano, «Some closed-form solutions of functionally graded beams undergoing nonuniform torsion», *Compos. Struct.*, vol. 123, p. 132-136, 2015, doi: 10.1016/j.compstruct.2014.12.027.
- [13] D. N. Nezhad, «Contribution à l'étude du comportement mécanique, du retrait et des propriétés de transport des bétons autoplacants avec additions minérales : approche expérimentale et numérique Thèse», Thèse de doctorat, Université européenne de Bretagne, 2016.
- [14] C. He, E. Makovicky, i B. Osbæk, «Thermal stability and pozzolanic activity of raw and calcined mixed-layer mica/smectite», *Appl. Clay Sci.*, vol. 17, núm. 3-4, p. 141-161, 2000, doi: 10.1016/S0169-1317(00)00011-9.
- [15] A. H. Asbridge, G. A. Chadbourn, i C. L. Page, «Effects of metakaolin and the interfacial transition zone on the diffusion of chloride ions through cement mortars», *Cem. Concr. Res.*, vol. 31, núm. 11, p. 1567-1572, 2001.
- [16] R. A. Sayanam, A. K. Kalsotra, S. K. Mehta, R. S. Singh, i G. Mandal, «Studies on thermal transformations and pozzolanic activities of clay from Jammu region (India)», *J. Therm. Anal. Calorim.*, vol. 35, núm. 1, p. 99-106, 1989.
- [17] K. Manai, *Étude de l'effet d'ajouts chimiques et minéraux sur la maniabilité, la stabilité et les performances des bétons autonivelants*. éditeur non identifié, 1995.
- [18] A. Poitou i G. Racineux, «A squeezing experiment showing binder migration in concentrated suspensions», *J. Rheol. (N. Y. N. Y.)*, vol. 45, núm. 3, p. 609-625, 2001, doi: 10.1122/1.1366717.
- [19] A. Darwiche, «Microrhéomètre sur puce pour l'étude de l'écoulement d'un liquide proche d'une surface liquide», 2012, [En línia]. Disponible a: [https://babordplus.univ-bordeaux.fr/notice.php?q=Ahmad Darwiche&spec_expand=1&start=0](https://babordplus.univ-bordeaux.fr/notice.php?q=Ahmad%20Darwiche&spec_expand=1&start=0).
- [20] Belaidi Akram Salah-Eddine, «Cours Rhéologie des matériaux», Université Amar Thelidji. Laghouat Algérie.
- [21] N. Huang, «Rheologie des pates granulaires», Thèse de doctorat, Université Paris 6 –

Pierre et Marie Curie, 2006.

- [22] M. Adjoudj, «Effet des additions minérales et organiques sur le comportement rhéologique du béton.», Thèse de doctorat, Université de Cergy-Pontoise France, 2015.
- [23] F. de Larrard i A. Belloc, «L ' influence du granulat sur la résistance à la compression des bétons», *Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées*, p. 41-52, 1999.
- [24] J. Mewis, «Thixotropy-a general review», *J. Nonnewton. Fluid Mech.*, vol. 6, núm. 1, p. 1-20, 1979.
- [25] C. Hu i F. de Larrard, «The rheology of fresh high-performance concrete», *Cem. Concr. Res.*, vol. 26, núm. 2, p. 283-294, 1996.
- [26] J. Gołaszewski i J. Szwabowski, «Influence of superplasticizers on rheological behaviour of fresh cement mortars», *Cem. Concr. Res.*, vol. 34, núm. 2, p. 235-248, 2004, doi: 10.1016/j.cemconres.2003.07.002.
- [27] A. GRIESSER, «Cement-superplasticizer interactions at ambient temperatures rheology, phase composition, pore water and heat of hydration of cementitious systems», Thèse de doctorat, Swiss federal institute of technology, 2002.
- [28] K. Yoshioka, E. Sakai, M. Daimon, i A. Kitahara, «Role of steric hindrance in the performance of superplasticizers for concrete», *J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 80, núm. 10, p. 2667-2671, 1997.