

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA  
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

جامعة أمّار ثليجي بالأغواط

UNIVERSITE AMMAR THELIDJI LAGHOUAT

كلية التكنولوجيا

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL



## *Mémoire de MASTER*

**Domaine :** Sciences et Technologies

**Filière :** Génie civil

**Option :** Matériaux de construction (M.D.C)

**Présenté par :**

DADA EL-Hadja et LAMRI Nacira

### Thème

---

**Etude rhéologique des mortiers autoplaçants à base des  
ajouts cimentaires quaternaires.**

---

*Soutenu publiquement devant le jury composé de :*

Mr. BENABED Benchâa

M.C.B

Président

Mr. BOUZIANI Tayeb

M.C.A

Examineur

Mr. BELAIDI Akram Salah Eddine

M.C.A.

Encadreur

Mr. OUAI Aissa

Ingénieur Principal CTC

Co-Encadreur

*Année Universitaire 2014/2015*

# DEDICACES

Je dédie ce travail  
A mes chers parents,  
A mes frères et sœurs,  
A mes nièces et neveux

El Hadja

A ma très chère **mère**,  
A la mémoire de mon père **Tahar**,  
A la mémoire de mon mari **Aissa**,  
A mes enfants **Mohamed Diaa Eddine, Selma, Noussiba**,  
A ma très chère **Hadjer**  
A toute ma famille

Je dédie ce travail

Nacira

## **REMERCIEMENTS**

Ce travail a été réalisé au laboratoire de recherche de génie civil à l'université Ammar Thelidji Laghouat.

Nous remercions tout d'abord Dieu "ALLAH" de nous avoir donné le courage et la volonté de pouvoir poursuivre ce travail.

Nos remerciements profonds vont en premier lieu à notre encadreur Dr. Belaidi A.S.E Maître de conférence et notre Co-encadreur Monsieur Ouai A., 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 Dr. Benaabed B. Maître de conférences, pour l'honneur qu'il nous a fait présidant le jury de notre soutenance, ainsi que au Dr. Bouziani T. Maître de conférences, pour avoir accepté de participer à la critique et au jugement de ce travail.

Nos remerciements vont aussi à Mr. Mouatah K. chef département de génie civil de l'université Amar Thelidji.

Nous tenons à remercier également Mr. Krobba H. et Mr. Zireg A. ; ainsi à tous l'effectif de laboratoire de génie civil et tout qui nous aidé de près ou de loin.

## ملخص

تعتبر الخرسانة ذاتية الرص من بين التقنيات الجديدة التي عرفها قطاع البناء. من أهم خصائصها أنها خرسانة سائلة، هذه الخاصية تأتي نتيجة استعمال كمية معتبرة من العجينة والمملدن، كما أنها خاضعة لقوة ثقلها فقط دون الحاجة إلى عملية الرج. ولأسباب اقتصادية وميكانيكية يمكن استبدال الإسمنت ببعض الإضافات المعدنية.

والهدف من عملنا هو دراسة تأثير الإضافات المعدنية المحلية مثل خبث الأفران (مصنع الحجار) والبوزولان الطبيعي (بني صاف) وكذا بقايا حجر الرخام على الخصائص الريولوجية (اللزوجة وحدود القص) والخصائص الميكانيكية (مقاومة الضغط الميكانيكي) للملاط ذاتي التوضع، وقد تم تحضير هذه الأخير بأنواع مختلفة من الاسمنت: ثنائية التركيب، ثلاثية التركيب ورباعية التركيب.

وقد تحصلنا على النتائج تؤكد أن هذه الإضافات لها تأثيرات إيجابية على الخصائص الريولوجية للملاط ذاتي التوضع وخاصة باستعمال اسمنت بثلاثة تركيبات وأربعة تركيبات مما يؤكد ضرورة إنتاج هذا النوع من الاسمنت. أما بالنسبة لمقاومة الخرسانة فإن الإضافات الاسمنتية تلعب دور هام في زيادة المقاومة في المدى القصير والمدى البعيد.

**كلمات المفاتيح:** الريولوجيا، خبث الأفران، البوزولان الطبيعي، بقايا الرخام، اللزوجة، حدود القص.

## Résumé

Les Bétons autoplaçants sont une nouvelle génération des bétons, qui se mettent en place sans vibration et caractérisés par une grande fluidité. Cette fluidité est obtenue grâce à l'utilisation d'un volume de pâte élevé qui est d'ailleurs responsable de leur comportement rhéologique.

Pour des raisons à la fois économique et mécanique, il est recommandé de substituer une partie de ciment par des additions minérales.

L'objectif de notre travail consiste en l'étude des effets de l'incorporation d'ajouts minéraux tels que : la pouzzolane naturelle de Béni-Saf, le laitier de haut fourneau d'El- Hadjar, et la poudre de marbre sur les paramètres rhéologiques tel que (le seuil de cisaillement et la viscosité) et mécaniques (résistance mécanique à la compression à jeune âge) des mortiers autoplaçants élaborés selon des différents combinaisons en systèmes binaire, ternaire et quaternaire.

Les résultats que nous avons acquises confirmant que ces ajouts ont des effets positifs sur les propriétés rhéologiques de mortier autoplaçant, en particulier l'utilisation des ciments ternaires et quaternaires ce qui confirme la nécessité de produire ce type de ciment. En ce qui concerne la résistance du béton, les additions minérales jouent un rôle important dans l'augmentation de la résistance à court et à long terme.

**Mots clé :** Rhéologie, laitier, pouzzolane, poudre de marbre, viscosité, seuil de cisaillement.

## Abstract

The self-compacting concretes are a new generation of concretes, which are taking place without vibration, characterized by high fluidity. This fluidity is achieved through the use of a high volume of paste which is also responsible for their rheological behavior.

For reasons has both economic and mechanical, it is recommended to substitute a part of cement with mineral additions.

The aim of our work is the study of the effects of the incorporation of mineral additions such as: natural pozzolana Beni Saf, the blast furnace slag from el Hajar, and marble dust on rheological parameters such as (shear stress and viscosity) and physico-mechanical (mechanical compressive strength) of compacting mortars developed using different combinations in binary, ternary and quaternary.

The results we have obtained confirms that these additions have positive effects on the rheological properties of self-compacting mortar, particularly the use of ternary and quaternary cements which confirms the need to produce this type of cement. Regarding the strength of concrete, mineral additives play an important role in increasing the short and long-term resistance.

**Keywords:** Rheology, Blast furnace slag, Natural pozzolana, marble, shear stress and viscosity. Yield stress

## Table des matières

Table des matières .....	5
Liste des Tableaux.....	8
Liste des Figures.....	9
Introduction générale.....	12
<b>Chapitre 1 : Etude bibliographique.....</b>	<b>14</b>
1.1. Introduction .....	14
1.2. Définition des Bétons Autoplaçant.....	14
1.3. Objectifs des Bétons Autoplaçants .....	14
1.4. Spécificité de la composition des BAP.....	15
1.4.1. Une quantité de fines importante .....	15
1.4.2. Un volume de pâte élevé .....	15
1.4.3. Utilisation de superplastifiants .....	15
1.4.4. Un faible volume de gravillon.....	16
1.4.5. Utilisation d'un agent de viscosité (rétenteur d'eau) .....	16
1.5. Constituants des Bétons Autoplaçants.....	16
1.5.1. Les Granulats.....	17
1.5.2. Le Liant .....	17
1.5.2.1. Le Ciment.....	17
1.5.2.2. Les Ajouts Minéraux.....	18
1.5.3. Eau.....	18
1.5.4. Adjuvant .....	18
1.6. Différents types d'ajouts.....	20
1.6.1. Les additions pouzzolanique .....	20
1.6.1.1. La Pouzzolane .....	20
1.6.1.2. Laitiers de hauts fourneaux .....	21
1.6.1.3. Fumées de silice .....	22
1.6.1.4. Les cendres volantes .....	22
1.6.2. Les additions inertes ou quasi-inertes .....	22
1.6.2.1. Les fillers calcaire .....	23
1.6.2.2. La poudre de marbre .....	23
1.6.3. Effet du superplastifiant .....	24
1.7. Caractéristiques des bétons autoplaçants.....	26
1.7.1. Propriétés des BAP à l'état frais .....	26
1.7.1.1. Le Remplissage .....	26
1.7.1.2. La Résistance à la ségrégation .....	26
1.7.1.3. La Capacité de passage .....	26
1.7.2. Propriétés de BAP à l'état durci .....	28
1.7.2.1. Résistance à la compression.....	28
1.7.2.2. Résistance à la traction.....	28
1.8. Caractérisation des BAP à l'état frais.....	28
1.8.1. Essai d'étalement.....	29
1.8.2. Essai de l'écoulement à l'entonnoir (V- funnel) .....	30
1.8.3. Essai de la boîte en « L ».....	30
1.8.4. Essai de la stabilité au tamis.....	32
1.9. Formulation des bétons autoplaçants.....	32
1.9.1. Méthodes basées sur l'optimisation des Mortiers .....	33
1.9.2. Méthode basées sur l'optimisation du volume de pate .....	33
1.9.3. Méthode basées sur l'optimisation du squelette granulaire .....	34

<b>Chapitre 2 : Rhéologie des bétons autoplaçants</b> .....	36
2.1. Notions fondamentales de rhéologie .....	36
2.1.1. Définition de la rhéologie.....	36
2.1.2. Le seuil de cisaillement .....	37
2.1.3. La Viscosité.....	38
2.1.4. Le Mouvement de cisaillement .....	38
2.1.5. La Thixotropie.....	40
2.1.6. Rhéofluidification et rhéoépaississement.....	40
2.2. Appareils de mesure rhéologique .....	41
2.3. Description de l'appareil .....	42
a. L'Agitateur.....	42
b. Le Récipient .....	43
c. La Pâle .....	43
2.3.1. Principe de fonctionnement des rhéomètres.....	43
2.3.2. Les différents types des Rhéomètres .....	44
2.3.3. Les rhéomètres type Couette .....	45
2.3.4. Les rhéomètres existants .....	48
a. Rhéomètre Cimagraf-IMG.....	48
b. Rhéomètre two-points test .....	50
c. Rhéomètre IBB .....	51
d. Rhéomètre BML .....	51
e. Rhéomètre ICAR .....	53
f. Rhéomètre BTRHEOM .....	54
g. Rhéomètre Esttelé .....	56
2.4. Loi de comportement rhéologique des matériaux .....	58
2.5. Etude rhéologique des mortiers autoplaçants .....	60
2.6. Formulation de mortier autoplaçant .....	60
2.6.1. Influence des paramètres de composition des MAP .....	62
2.6.2. L'influence de superplastifiant.....	63
2.6.3. L'influence de pouzzolane .....	64
2.6.4. L'influence de laitier de haut fourneau .....	64
2.6.5. L'influence de poudre de marbre .....	67
2.6.6. Corrélation entre les essais empiriques et les mesures rhéologiques .....	68
2.7. Conclusion.....	68
<b>Chapitre 3 : Caractérisation des matériaux et procédure expérimentale</b> .....	70
3.1. Introduction .....	70
3.2. Caractérisation des matériaux et méthodes d'essais.....	70
3.2.1. Le sable .....	70
a. Analyse granulométrique .....	70
b. Equivalent de sable .....	71
c. Masse Volumique spécifique.....	72
d. Coefficient d'absorption .....	73
3.2.2. Le ciment.....	73
3.2.3. Additions .....	74
a. Pouzzolane .....	74
a. Laitier de haut fourneau .....	75
b. Poudre de marbre .....	75
3.2.4. Superplastifiant.....	76
3.2.5. L'eau de gâchage.....	76
3.3. Procédure expérimentale .....	77

3.3.1.	Formulation des MAP .....	77
a.	Rapport Eau/Poudre (E/P).....	77
b.	Rapport Sable/Mortier (S/M).....	78
c.	Variation du rapport Superplastifiant/Liant (Sp/L).....	78
d.	Substitution du ciment par les additions .....	78
3.3.2.	Essais expérimental .....	81
a.	Essai d'étalement de MAP .....	81
b.	Essai d'écoulement à l'entonnoir en V (V-Funnel ) .....	82
c.	Essai de mesure des caractéristiques rhéologique .....	83
d.	Confection et conservation des éprouvettes.....	84
e.	Essai de compression de MAP .....	84
3.4.	Conclusion .....	85
<b>Chapitre 4 : Présentation et analyse des résultats</b> .....		86
4.1.	Introduction .....	86
4.2.	Mortier de référence .....	86
4.3.	Influence des ajouts minéraux sur les MAP à base des ciments binaires.....	87
4.3.1.	Influence de laitier de haut fourneau.....	87
a.	Influence de laitier sur l'état frais du mortier .....	87
b.	Influence de laitier à l'état durci .....	95
4.3.2.	Influence de pouzzolane naturelle.....	97
a.	Influence de pouzzolane sur l'état frais du mortier .....	97
b.	Influence de pouzzolane à l'état durci .....	101
4.3.3.	Influence de poudre de marbre.....	102
a.	Influence de poudre sur l'état frais du mortier.....	102
b.	L'effet de la poudre de marbre à l'état durci .....	106
4.4.	Influence des ajouts minéraux sur les MAP à base des ciments ternaires.....	107
4.3.4.	L'influence de la pouzzolane naturelle avec le laitier de haut fourneau .....	107
a.	L'effet de pouzzolane naturelle avec le laitier sur l'état frais.....	107
4.3.5.	L'influence de pouzzolane naturelle avec la poudre de marbre.....	116
a.	L'effet de la pouzzolane naturelle avec la poudre de marbre sur l'état frais .....	116
4.3.6.	L'influence de laitier avec de la poudre de marbre .....	122
a.	L'effet de laitier avec la poudre de marbre sur l'état frais.....	122
4.5.	Influence des ajouts minéraux sur les MAP à base des ciments quaternaires.....	130
4.3.7.	Influence de laitier avec la pouzzolane et la poudre de marbre sur l'état frais	130
a.	Seuil de cisaillement et viscosité .....	131
b.	L'étalement au mini cône.....	134
c.	Temps d'écoulement à l'entonnoir V .....	135
4.3.8.	Influence de laitier avec la pouzzolane et la poudre de marbre à l'état durci ..	135
<b>Conclusion générale</b> .....		137
<b>Perspectives et recommandations</b> .....		139
<b>Références bibliographiques</b> .....		140

## Liste des Tableaux

Aucune entrée de table d'illustration n'a été trouvée.

Tableau 2- 1 Modèle Rhéologique .....	59
Tableau 3-1. Analyse chimique de la pouzzolane naturelle.....	75
Tableau 3-2. L'analyse chimique de laitier de haut fourneau. ....	75
Tableau 3-3. L'analyse chimique de la poudre de marbre. ....	75
Tableau 3-5. Différentes Combinaison des MAP ternaire et quaternaire. ....	79

Aucune entrée de table d'illustration n'a été trouvée.

## Liste des Figures

Figure 1-1. Compositions du béton autoplaçant et du béton conventionnel.....	17
Figure 1-2. Les utilisations des superplastifiants .....	19
Figure 1-3. Pouzzolane naturelle.....	21
Figure 1-4. Laitier de haut fourneau broyé .....	21
Figure 1-5. Poudre de Marbre .....	23
Figure 1- 6 Floc de ciment en absence de superplastifiant.....	24
Figure 1-7. Adsorption de superplastifiant sur une particule de ciment.....	25
Figure 1-8. Répulsion électrostatique entre deux particules de ciment de charges contraires munies des molécules de superplastifiant adsorbées sur leur surface. ....	25
Figure 1-9. Représentation en plan d'un blocage de granulats à travers deux armatures.....	27
Figure 1-10. Essai d'Étalement.....	29
Figure 1-11. L'entonnoir en V (V-Funnel) .....	30
Figure 1-12. Risque de blocage au droit des armatures.....	31
Figure 1-13. Boite en « L » .....	31
Figure 1-14. Essai de stabilité au tamis.....	32
Figure 1- 15 Notion d'excès de pâte : la pâte remplit la porosité (1) et écarte les granulats (2).....	34
Figure 2-1. Mouvement de cisaillement entre deux surfaces planes.....	39
Figure 2-2. Phénomènes thixotrope et anti thixotrope .....	40
Figure 2-3. Rhéogramme des différents comportements .....	41
Figure 2-4. Composants du rhéomètre ; (a) agitateur ; (b) récipient ; (c) pâle.....	42
Figure 2-5. Position de la pâle dans le mortier.....	43
Figure 2-6. Représentation schématique du principe de fonctionnement des rhéomètres rotatifs à cylindres coaxiaux. ....	46
Figure 2-7. Représentation schématique du principe de fonctionnement.....	46
Figure 2-8. Représentation schématique du principe de fonctionnement des rhéomètres rotatifs à cône – plan ..	47
Figure 2-9. Représentation schématique du principe de fonctionnement des rhéomètres rotatifs à plan – plan. ..	48
Figure 2-10. a) vue générale du rhéomètre Cemagref –IMG, b) cylindres intérieur et extérieur.....	49
Figure 2-11. Rhéomètre Two-Point .....	50
Figure 2-12. Rhéomètre IBB.....	51
Figure 2-13. Rhéomètre BML.....	52
Figure 2-14. Rhéomètre ICAR.....	53
Figure 2-15. Profil vitesse pour le rhéomètre ICAR .....	53
Figure 2-16. Le rhéomètre BTRHEOM .....	55
Figure 2-17. Profil vitesse pour BTRHEOM. ....	55
Figure 2-18. Schéma de principe dispositif expérimental et du rhéomètre à béton.....	56
Figure 2-19. Profil vitesse pour le rhéomètre Estellé et al .....	57
Figure 2-20. Contribution de phase solide et de la phase liquide à la résistance au cisaillement du béton.....	59
Figure 2-21. Influence du superplastifiant sur l'étalement et la viscosité d'un béton .....	63
Figure 2-22. Etalement en fonction du rapport A/A+C.....	64
Figure 2-23. Evolution de l'étalement de BAP en fonction de dosage de laitier .....	65
Figure 2-24. Evolution de la ségrégation statique en fonction de dosage de laitier .....	66
Figure 2-25. L'évolution de la ségrégation dynamique en fonction de dosage de laitier .....	66
Figure 2-26. Etalement par cône d'Abrams des BAP en fonction de la teneur en laitier [26] .....	67
Figure 3-1. Tamiseuse électrique. ....	70
Figure 3-2. Courbe granulométrique du sable.....	71
Figure 3- 3. Essai de l'équivalent de sable.....	72
Figure 3-4. Essai de la masse volumique spécifique.....	72
Figure 3-5. Teste de pré- séchage avec le cône et le piston. ....	73
Figure 3-6. Ciment CPJ-CEMII/A-L 42,5R.....	73
Figure 3-7 Essai de la densité spécifique .....	76
Figure 3-8. Superplastifiant haut réducteur d'eau .....	76
Figure 3-9. Rhéomètre avec système d'acquisition.....	79
Figure 3-10. Séquence de malaxage lors de l'élaboration du mortier .....	81
Figure 3-11. Exécution et mesure d'étalement en mini-cône.....	82

Figure 3-12. Entonnoir V (V-Funnel) .....	82
Figure 3- 13. Positionnement de la pale de rhéomètre .....	83
Figure 3-14. Conservation d'éprouvettes .....	84
Figure 3-15. Presse d'écrasement des éprouvettes .....	85
Figure 4-1. Rhéogramme du mortier à base du ciment binaire avec du laitier .....	89
Figure 4- 2 Variation de Seuil de cisailent en fonction de la teneur en laitier .....	89
Figure 4-3. Variation de viscosité en fonction de la teneur en laitier .....	90
Figure 4-4. Variation d'étalement en fonction de la teneur en laitier .....	90
Figure 4-5. Variation de temps d'écoulement en fonction de la teneur en laitier .....	91
Figure 4-6. Rhéogramme des MAP en fonction de dosage de laitier avec ajustement de SP .....	93
Figure 4-7. Effet d'ajustement du dosage en SP sur le seuil de cisaillement $\tau_0$ .....	93
Figure 4-8. Effet d'ajustement du dosage en SP sur la viscosité $\mu$ .....	94
Figure 4-9. Effet d'ajustement du dosage en SP sur l'étalement .....	95
Figure 4-10. Effet d'ajustement du dosage en SP sur le temps d'écoulement. ....	95
Figure 4-11. Variation de la résistance à la compression des MAP en fonction de la teneur en laitier .....	96
Figure 4-12. Rhéogramme des MAP en fonction de dosage de pouzzolane .....	98
Figure 4- 13 Effet de dosage de pouzzolane sur le seuil de cisaillement des MAP. ....	99
Figure 4- 14 Effet de dosage de pouzzolane sur la viscosité des MAP. ....	99
Figure 4-15. Effet de dosage de pouzzolane sur l'étalement des MAP .....	100
Figure 4-16. Effet de dosage de pouzzolane sur le temps d'écoulement des MAP .....	101
Figure 4-17. Variation de la résistance à la compression des MAP en fonction de la teneur en pouzzolane. ....	102
Figure 4-18. Evolution de taux de cisaillement et la contrainte de cisaillement des MAP en fonction de dosage de poudre de marbre. ....	103
Figure 4-19. L'influence de la poudre marbre sur le seuil de cisaillement de MAP .....	104
Figure 4-20. Effet de dosage de Poudre de marbre sur la viscosité des MAP .....	104
Figure 4- 21 Effet de dosage de poudre de marbre sur l'étalement des MAP .....	105
Figure 4-22. Effet de dosage de poudre de marbre sur le temps d'écoulement des MAP .....	106
Figure 4- 23 Variation du Résistance à la compression des MAP en fonction de la teneur en poudre de marbre .....	107
Figure 4-24. Evolution de seuil de cisaillement et la viscosité des MAP en fonction de dosage de pouzzolane et laitier .....	109
Figure 4-25. Variation de seuil de cisaillement des MAP à base de ciment ternaire .....	110
Figure 4-26. Variation de viscosité des MAP à base de ciment ternaire (PZ + LHF) .....	110
Figure 4-27. Variation d'étalement des MAP à base de ciment ternaire (PZ + LHF) .....	111
Figure 4-28. Evolution de seuil de cisaillement des MAP en fonction de dosage de PZ et LHF avec un dosage de SP variable .....	113
Figure 4- 29 Homogénéité de galette .....	113
Figure 4-30. Evolution de viscosité des MAP en fonction de dosage de PZ et LHF avec un dosage de SP variable .....	114
Figure 4- 31 Variation d'étalement des MAP à base des ciments ternaire (PZ+LHF) avec un dosage de SP variable .....	114
Figure 4.32. Variation de temps d'écoulement des MAP ternaire (PZ+L) avec l'ajustement de dosage de SP. ....	115
Figure 4-33. Variation de la résistance à la compression des MAP à base de ciment ternaire (LHF+PZ) à jeune âge (1jour) .....	116
Figure 4- 33 Evolution de taux de cisaillement et la contrainte de cisaillement des MAP en fonction de dosage de pouzzolane et poudre de marbre .....	117
Figure 4-34. Variation de seuil de cisaillement des MAP ternaire (PZ+L) avec l'ajustement de dosage de SP. ....	118
Figure 4-35. Variation de viscosité des MAP à base des ciments ternaires (PZ+PM) .....	119
Figure 4-36. Variation d'étalement des MAP à base des ciments ternaires en fonction de taux d'ajouts. ....	120
Figure 4-37. Variation de temps d'écoulement des MAP à base des ciments ternaires en fonction de taux d'ajouts. ....	120
Figure 4-38. Variation de Résistance à la compression des MAP à base de ciment ternaire (PZ+PM) à jeune âge (1 jour) .....	121
Figure 4-39. Evolution de seuil de cisaillement et la viscosité des MAP en fonction de dosage de laitier et poudre de marbre .....	123
Figure 4-41. Variation de viscosité des MAP à base des ciments ternaires .....	124
Figure 4-42. Variation d'étalement des MAP à base des ciments ternaires .....	124
Figure 4-43. Variation de temps d'écoulement des MAP à base des ciments ternaires .....	125
Figure 4-44. Variation de seuil de cisaillement des MAP à base des ciments ternaires .....	127

Figure 4-43. Variation de viscosité des MAP à base des ciments ternaires .....	127
Figure 4-44. Variation d'étalement des MAP à base des ciments ternaires avec un dosage de SP variable .....	128
Figure 4-45. Variation de temps d'écoulement des MAP à base des ciments ternaires .....	129
Figure 4-46. Variation de résistance à la compression des MAP à base de ciment ternaire .....	130
Figure 4-47. Evolution de seuil de cisaillement et la viscosité des MAP en fonction de dosage de pouzzolane, laitier et poudre de marbre .....	132
Figure 4-48. Variation de seuil de cisaillement des MAP à base des ciments quaternaire.....	133
Figure 4-49. Variation de la viscosité des MAP à base des ciments quaternaires avec un dosage de SP variable. ....	133
Figure 4-50. Variation d'étalement des MAP à base des ciments ternaires .....	134
Figure 4-51. Variation de temps d'écoulement des MAP à base des ciments quaternaires .....	135
Figure 4-52. Variation de résistance à la compression des MAP à base de ciment.....	136

## Introduction générale

Tout comme dans le cas des autres industries, le besoin universel de conserver les ressources, de protéger l'environnement et de bien utiliser l'énergie doit nécessairement se faire ressentir dans le domaine de la technologie du béton. Par conséquent, on accordera beaucoup d'importance à l'usage de déchets et de sous-produits pour la fabrication du ciment et du béton.

Aujourd'hui, en totale continuité avec les bétons à hautes performances, c'est un Changement d'objectifs constituant une véritable révolution culturelle que proposent les bétons autoplaçants (BAP) : l'étude du matériau n'est plus seulement gouvernée par l'amélioration de la résistance et de la pérennité. Toutefois ces dernières propriétés restent calées à des niveaux équivalents ou supérieurs à celles des bétons courants. Ce sont désormais, avec les BAP, les aptitudes à être aisément mis en œuvre sans vibration qui sont devenues prioritaires. Ces aptitudes vont avoir de grandes conséquences en termes de délai d'exécution, de réduction de matériels, de qualité de bétonnage, de facilité de mise en œuvre, de respect du voisinage, de moindre pénibilité pour les ouvriers et de réaliser des structures spectaculaires caractérisées par la complexité des formes et la forte concentration en armatures.

A l'heure actuelle seul le BAP capable d'assurer ces dispositions par sa fluidité élevée, sa stabilité rhéologique. Par contre sa formulation sollicite un grand volume de ciment. L'augmentation de ce dernier est nécessaire pour permettre son écoulement, dont L'utilisation des ajouts cimentaires en remplacement au ciment est une solution judicieuse, du fait de leur grande disponibilité et leur prix modéré.

Les ajouts cimentaires qui ont représenté un sujet de recherche intéressent depuis de longues années, sont maintenant reconnus et acceptés comme des constituants souhaitables, voire indispensables au BAP pour des raisons technico-économiques et écologiques.

Le développement des bétons modernes exige une connaissance plus fondamentale des propriétés rhéologiques des matériaux à base de ciment. Les essais rhéologiques classiques ne sont pas toujours en mesure d'expliquer les propriétés particulières de certains mélanges. Il est donc nécessaire de développer des techniques de mesure capables de fournir certaines grandeurs rhéologiques des matériaux cimentaires comme la viscosité ou le seuil de cisaillement. L'utilisation d'un rhéomètre est le procédé privilégié pour atteindre cet objectif.

Les propriétés des BAP sont généralement liées aux celles de leurs mortiers autoplaçants (MAP) qui ont été abordés ici du point de vue rhéologique, c'est-à-dire de leurs capacités à s'écouler. Pour cela, la notion d'ouvrabilité et les besoins de la caractérisation rhéologique des matériaux cimentaires sont expliqués.

Dans le cadre de ce travail de recherche, Les changements rhéologiques des MAP impliqués dans les cas des mélanges composés de ciment plus des ajouts tel que le laitier de haut fourneau, la pouzzolane naturelle et la poudre de marbre en systèmes binaire, ternaire et quaternaire ont été évalués par des essais rhéologiques « classiques » et par des mesures des paramètres rhéologiques à l'aide d'un rhéomètre muni d'un système de mesure original.

L'objectif est de conclure les propriétés rhéologiques à partir des courbes d'écoulement de différents systèmes obtenues.

Le présent travail s'inscrit dans le cadre de développement durable notamment la valorisation des matériaux locaux, pour la préparation des MAP contenant des mélanges à base des ciments binaires, ternaires et quaternaires substitués par le laitier de haut fourneau, la pouzzolane naturelle et la poudre de marbre.

En plus de l'introduction générale ce mémoire s'articule sur quatre chapitres

- Le premier chapitre présente une synthèse bibliographique dans laquelle on traite le BAP on s'intéresse à ces constituants, à ces propriétés physico-mécaniques, ainsi qu'aux ajouts cimentaires
- Le deuxième chapitre est consacré à une étude bibliographique sur la rhéologie des bétons fluides leur propriétés rhéologiques, les dispositifs de mesure, les types des rhéomètres.
- Le troisième chapitre est destiné à la caractérisation des matériaux utilisés et aux essais ainsi nous expliquons la méthode de formulation des MAP et par la suite nous présentons les essais effectués sur le MAP à l'état frais et durci.
- Le quatrième chapitre nous exposons et analysons les différents résultats obtenus par les essais réalisés.

En fin nous donnons une conclusion générale dans laquelle nous exprimons les résultats obtenue ainsi que des perspectives pour des travaux future.

## **Chapitre 1 : Etude bibliographique**

### **1.1. Introduction**

Les bétons sont devenus les matériaux de la modernité et de l'innovation. L'étendue de leurs performances physiques, mécaniques et esthétiques s'élargit sans cesse. Les qualités initiales de résistances mécaniques se sont déclinées, différenciées. Les bétons s'adaptent désormais à toutes les exigences des concepteurs, aux contraintes des chantiers et aux agressions de l'environnement. Au fil des années, les caractéristiques du béton se sont complexifiées pour répondre à des utilisations de plus en plus diversifiées, à des résistances toujours plus importantes, à des exigences de durabilité plus fortes, à des contraintes esthétiques et à de nouvelles exigences de mise en œuvre (maîtrise de la rhéologie). Les BAP sont particulièrement parmi les bétons de demain, ils s'imposent progressivement. D'ici dix ans ces nouveaux bétons seront utilisés sur la grande majorité de nos chantiers.

### **1.2. Définition des BAP**

Le béton autoplaçant se distingue principalement du béton ordinaire par ses propriétés à l'état frais. En effet, le béton autoplaçant est un béton fluide et homogène qui se met en place sans vibration. Il est capable de s'écouler sous son propre poids dans les milieux confinés et reste homogène au cours d'écoulement et une fois mis en place (absence de ségrégation dynamique et statique). Grâce à son homogénéité, sa résistance à la ségrégation, et sa stabilité ce béton garantit des structures résistantes et durables. Les bétons autoplaçants sont des bétons spéciaux à haute performance qui se caractérisent essentiellement par leur fluidité à l'état frais et leur homogénéité à l'état durci.

### **1.3. Avantages des BAP**

Face à L'amélioration de la rentabilité de la construction, et l'absence du savoir-faire des ouvriers d'assurer constamment une mise en place correcte avec un béton de qualité et par conséquent l'intérêt technique et l'impact socio-économique. L'idée des BAP a été lancée au milieu des années 80 par des chercheurs de l'université de Tokyo, comme réponse à ses principaux objectifs.

- La suppression des opérations coûteuses en main d'œuvre (vibration).
- L'obtention d'une qualité, d'une régularité et d'une durabilité des bétons encore plus grandes.

- Le coulage facile de structures complexes et souvent fortement ferraillées
- L'allongement des temps d'ouvrabilité.
- L'amélioration de la qualité esthétique des parements. L'augmentation des cadences de production et de la productivité des chantiers et des usines
- La réduction de la pénibilité des tâches des ouvriers.
- La réduction des nuisances sonores sur les chantiers.
- L'obtention d'une parfaite planéité des hourdis et des dalles.
- La fabrication de ces bétons dans la majorité des centrales du réseau BPE et des usines de préfabrication à partir de matériaux courants disponibles localement.
- La diminution des reprises de bétonnage[1].

## 1.4. Particularité de la composition des BAP

Après plusieurs recherches effectuées en laboratoires, les essais ont montré que pour répondre aux exigences du cahier des charges, la composition d'un BAP doit avoir certaines caractéristiques, d'où Les approches de composition des BAP sont basées sur les critères suivants[2].

### 1.4.1. Une quantité de fines importante

Les compositions des BAP comportent une importante quantité de fines, (environ 500 kg/m<sup>3</sup> de diamètre inférieur à 80 µm) pour assurer la maniabilité et limiter les risques de ressuage et de ségrégation. Le liant utilisé est fréquemment un mélange de deux ou trois constituants, afin d'éviter l'élévation de température du béton lors de la prise.

### 1.4.2. Un volume de pâte élevé

Le rôle de la pâte (ciment + eau efficace + air occlus + additions) est d'écarter les granulats, afin de diminuer les frottements qui provoquent la limitation vis-à-vis de l'étalement du béton et la capacité de remplissage des coffrages, ainsi prévenir la formation de voûtes susceptibles de bloquer l'écoulement. Le volume de pâte dans les BAP est donc élevé (330 à 400 l/m<sup>3</sup>).

### 1.4.3. Utilisation de superplastifiants

La maniabilité des BAP est obtenue en ajoutant des superplastifiants. Cet ajout ne doit pas être très élevé (proche du dosage de saturation) sous peine d'augmenter la sensibilité du béton à des variations de teneur en eau vis-à-vis du problème de ségrégation et du ressuage. Les

superplastifiants permettent d'obtenir des bétons très fluides. Ces fluidifiants ont le rôle de défloculants, ils interagissent avec les particules du ciment et des fines en s'adsorbant à leur surface pour diminuer le phénomène de floculation au contact de l'eau. Ainsi les particules solides sont dispersées par combinaison d'effets électrostatiques et stériques et la proportion d'eau libre est plus importante.

#### **1.4.4. Un faible volume de gravillon**

Les risques de blocage pour un confinement donné augmentent avec l'augmentation des teneurs en gros granulats. Les BAP peuvent être réalisés avec des granulats roulés ou concassés, le diamètre maximal des gravillons dans un BAP étant compris entre 10 et 20 mm. Le rapport gravillon/sable pour les BAP est voisin de 1 [17].

#### **1.4.5. Utilisation d'un agent de viscosité (rétenteur d'eau)**

L'ajout d'un superplastifiant a pour effet d'augmenter l'ouvrabilité du béton et également de réduire sa viscosité. Afin de minimiser cette dernière, les BAP contiennent souvent un agent de viscosité. Ce sont généralement des dérivés celluloseux, des polysaccharides, des colloïdes naturels ou des suspensions de particules siliceuses, qui interagissent avec l'eau et augmentent sa viscosité.

Ils ont pour but d'empêcher le ressuage et les risques de ségrégation en rendant la pâte plus épaisse et en conservant une répartition homogène des différents constituants. Cependant, l'action de ces produits est, d'une certaine façon, opposée à celle des superplastifiants. La formulation d'un BAP requiert donc la sélection d'un couple (agent de viscosité - superplastifiants) compatibles et l'optimisation de leur dosage.

### **1.5. Constituants des Bétons Autoplaçants**

Vu les propriétés des bétons autoplaçants à l'état frais qu'ils doivent s'assurer et en face des bétons conventionnel, les BAP contiennent d'autres éléments qui sont le superplastifiant et les additions minérales. Du fait que le BAP est constitué d'une quantité de fines élevée, son volume d'air est faible. La teneur en eau du BAP est en général proche à celle du béton courant. Pour minimiser les frottements inter granulaires, le BAP comporte un volume des granulats faible par rapport au béton conventionnel (Figure 1.1).

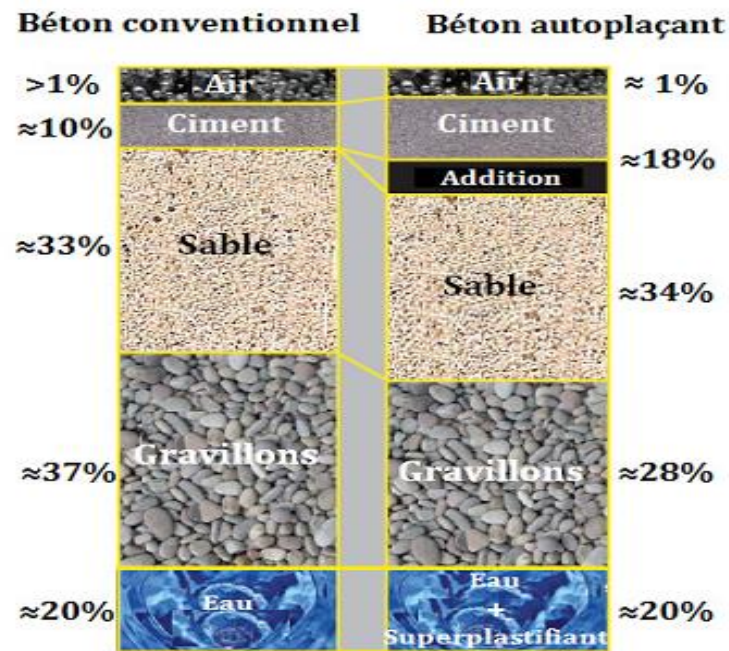


Figure 1-1. Compositions du béton autoplaçant et du béton conventionnel [5]

### 1.5.1. Les granulats

Les BAP sont réalisés avec des granulats roulés ou concassés, toutefois, comme pour un béton ordinaire, la forme des granulats a une influence sur le comportement rhéologique. Le coefficient de frottement est plus faible entre les granulats roulés qu'entre les granulats concassés. Les granulats roulés présentent par ailleurs un petit vide inter granulaire, ce qui nécessite une plus petite quantité de pâte de ciment pour le remplir. Cependant, pour le sable et face au problème de surexploitation des gisements, il est préférable d'utiliser un sable concassé qu'un sable roulé. De plus, sa granulométrie peut être rendue quasi uniformément riche sur une étendue granulaire imposée par criblage, ce qui n'est pas le cas pour un sable roulé qui a une granulométrie presque mono granulaire. De plus, le sable concassé apporte au mélange une part considérable de fines qui améliorent la maniabilité, la compacité, la résistance et la durabilité du béton. D'autre part la flottabilité des granulats concassés dans la pâte de ciment est meilleure, en raison de leur plus grande surface spécifique à masse identique. Afin d'empêcher tout risque de blocage lors du coulage, on limite en général le diamètre maximal des granulats à 16mm. [3]

### 1.5.2. Le liant

#### 1.5.2.1. Le ciment

Les BAP peuvent être réalisés avec la plupart des ciments. Cependant, compte tenu des exigences de démoulage aux jeunes âges, le ciment généralement utilisé pour la confection d'un

BAP est un ciment Portland qui contient au moins 95 % de clinker et éventuellement un constituant secondaire, soit le ciment Portland composé dont l'apport en clinker est de 65 à 94 %, le reste étant composé d'un ou de plusieurs ajouts. [4]

#### **1.5.2.2. Les ajouts minéraux**

Les additions minérales sont des matériaux minéraux finement broyés pouvant être partiellement substituées au ciment pour améliorer certaines de ses propriétés ou pour lui conférer des propriétés particulières. Les additions sont variées : le laitier de haut fourneau, les calcaires, les pouzzolanes naturelles (siliceuses ou calciques), les fumées de silice, les cendres volantes. Parmi ces additions ont des propriétés pouzzolaniques, c'est-à-dire qu'elles ne durcissent pas par elles-mêmes lorsqu'elles sont mélangées avec de l'eau, mais elles réagissent à température habituelle, en présence d'eau, avec l'hydroxyde de calcium ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) dissous issu des réactions d'hydratation, pour former des composés de silicates et d'aluminates de calcium développant des résistances.

#### **1.5.3. L'eau**

L'eau de gâchage doit être propre, elle ne doit pas contenir de matière en suspension ou delà des tolérances réglementaires suivantes :

- 15 g/l pour les bétons à haute résistance.
- 5 g/l pour les bétons à faible résistance

L'eau de gâchage ne doit pas contenir des sels dissous ou delà de :

- 15 g/l pour les bétons à hautes résistances.
- 30 g/l pour les bétons à faibles résistances. [3]

La pâte doit assurer une mobilité suffisante mais doit aussi inhiber tout risque de ségrégation et de ressuage. Un BAP sera composé d'une quantité de fines élevée et d'une quantité d'eau relativement faible (eau/ciment rarement supérieur à 0,55 voire 0,50). La fluidité souhaitée sera obtenue par l'utilisation de superplastifiants)

#### **1.5.4. Adjuvant**

Les adjuvants sont des produits chimiques incorporés au béton frais en faibles quantités, afin d'améliorer certaines propriétés, les principaux adjuvants sont :

a. Les superplastifiants

Ils permettent d'obtenir des bétons maniables et ouvrables par défloculation des grains de ciment. À une consistance donnée ils offrent la possibilité de réduire la quantité d'eau nécessaire à la fabrication et la mise en place du béton, et par conséquent augmenter les caractéristiques mécaniques du béton.

Il apparaît donc que les bétons modernes doivent satisfaire à la fois aux exigences de résistance et de maniabilité. Il s'agit de deux caractéristiques apparemment inconciliables puisque sans l'ajout de superplastifiant, l'augmentation des résistances ne s'obtient qu'avec une réduction d'eau. Or, une réduction d'eau diminue la fluidité. Un gain de maniabilité ne peut être obtenu qu'en augmentant la quantité d'eau de gâchage et donc au détriment des résistances finales du matériau. L'utilisation de superplastifiant dont l'action est schématisée sur la Figure 1-2 permet de concilier la diminution de la teneur en eau et la fluidité du béton tout en conservant de bonnes performances mécaniques du matériau.[4]

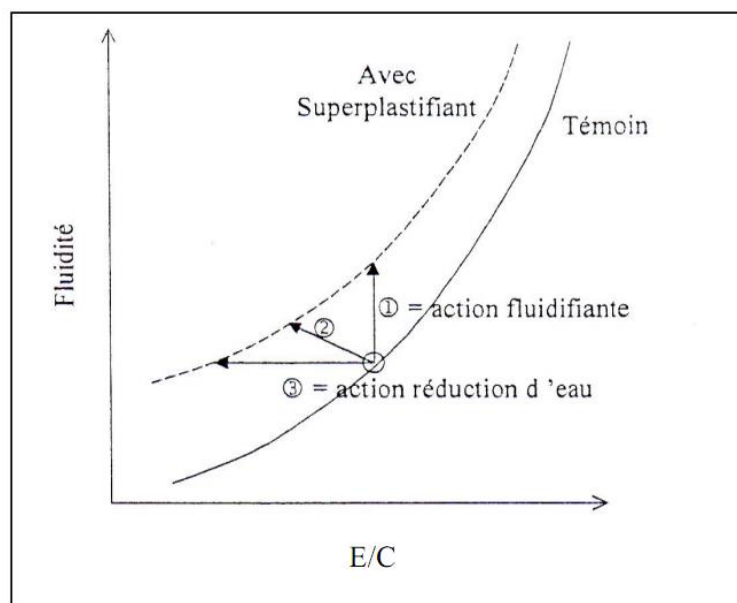


Figure 1-2. Les utilisations des superplastifiants

- 1 – Augmentation de la fluidité (teneur en eau égale)
- 2 – Diminution de la teneur en eau et augmentation de la fluidité
- 3 – Diminution de la teneur en eau (à fluidité égale).

b. Les agents de viscosité

Ce sont généralement de dérivées cellulosiques, de polysaccharides ou de suspensions colloïdales. Leur interaction avec l'eau permet d'augmenter la viscosité de celle-ci, et ce grâce aux longues chaînes de polymères qui les composent, et qui se fixent sur les molécules d'eau,

et par enchevêtrement augmente sa viscosité. Les agents de viscosité se présentent généralement sous forme de poudre et sont mélangés aux matériaux secs ou avec une partie de l'eau de gâchage. Contrairement aux SP qui diminuent le seuil de cisaillement et la viscosité, les agents de viscosité (ou agents de cohésion) les augmentent, empêchent le ressuage et limitent le risque de ségrégation en rendant la pâte plus épaisse. L'utilisation de ces adjuvants avec les superplastifiants rend la formulation des BAP plus complexe en raison de leurs effets contradictoires.[5]

## 1.6. Différents types d'ajouts

Les ajouts peuvent être naturels ou artificiels, inertes ou actifs Les ajouts peuvent réagir en tant que matériau hydraulique latent ou pouzzolanique, ou encore sous forme de fillers. Les ajouts cimentaires sont des matériaux présentant une granulométrie très fine et sont souvent incorporés dans le ciment, et quelquefois dans le béton. Les ajouts permettent soit d'améliorer les caractéristiques du béton ou de lui conférer des propriétés spécifiques. Les ajouts sont moins coûteux que le ciment portland et permettent d'obtenir un ciment composé plus économique. [6] Selon la norme ENV 206, paragraphe 3.1.5, il existe deux types d'addition : additions pouzzolaniques et additions inertes ou quasi-inertes.

### 1.6.1. Les additions pouzzolanique

Ce sont des matériaux siliceux ou siliceux-alumineux finement broyés caractérisés par leur potentiel pouzzolanique qui conduit vers l'augmentation des résistances à la compression à long terme. Parmi les additions les plus utilisées citons : la pouzzolane naturelle (PZN), la fumée de silice (FS), les cendres volantes (CV), le métakaolin (MK) et le laitier des hauts fourneaux (LHF).

#### 1.6.1.1. La pouzzolane

Les pouzzolanes sont exploitées pour la production des ciments composés. Ceux sont des matériaux naturels ou artificiels riches en silice et en alumine capables de réagir avec la chaux en présence de l'eau et de former à l'issue de cette réaction des produits manifestant des propriétés liantes. Les avantages du remplacement partiel du ciment par les matériaux pouzzolaniques sont divers. Ils participent au renforcement de la résistance aux attaques chimiques et de la durabilité, à la réduction des réactions alcalins agrégats et du retrait au séchage. Ils permettent la réduction de la quantité de clinker utilisée dans la composition du ciment.



*Figure 1-3. Pouzzolane naturelle*

#### **1.6.1.2. Laitiers de hauts fourneaux**

Le laitier de haut fourneau est un matériau hydraulique latente, c'est-à-dire qui présente des propriétés hydrauliques lorsqu'il a subi une activation convenable.

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 [7-8]. Shi et al. [8] montrent par exemple que les laitiers de hauts fourneaux adsorbent le superplastifiant. Il est donc possible que la demande en superplastifiant soit plus importante pour obtenir une même fluidité ou valeur de seuil de cisaillement.



*Figure 1-4. Laitier de haut fourneau broyé*

### **1.6.1.3. Fumées de silice**

Les fumées de silice sont formées de particules sphériques très fines environ (1 $\mu$ m) présentant une très forte teneur en silice (SiO<sub>2</sub>) amorphe. Elle provient de la réduction de quartz de grande pureté par du charbon dans des fours à arc électrique utilisés pour la production de silicium et d'alliages de ferroélectrique. Les fumées de silices ont des propriétés pouzzolaniques. L'influence des fumées de silice doit être clarifiée. Pour certains auteurs [7][8] ; elles augmentent les valeurs de seuil de cisaillement et de viscosité en augmentant la compacité des mélanges, Alors que pour Carisward [9], par exemple, les fumées de silices ne modifient pas la viscosité. Par rapport à la rhéologie d'un mélange de référence, Ferraris et al.[10] montrent que l'utilisation de fumées de silice augmente la demande en eau et en superplastifiant que ce soit pour des pâtes de ciment ou pour des bétons.

### **1.6.1.4. Les cendres volantes**

Les cendres volantes sont obtenues par des dépoussiérages électrostatique ou mécanique de particules pulvérulentes provenant du courant des gaz de chaudière, alimentées au charbon pulvérisé. Le remplacement d'une partie du ciment par des cendres volantes à un faible influence sur le seuil de cisaillement et la viscosité des pâtes de ciment. Certains auteurs remarquent cependant que leur utilisation peut améliorer la fluidité, car leur forme sphérique permet de réduire les frottements entre les grains de ciment. Ferraris et al. [10] montrent par ailleurs que le diamètre moyen des cendres volantes à une légère influence sur la valeur du seuil d'écoulement, les mélanges les plus fluides étant obtenus avec les particules les plus fines (diamètre moyen 3,1  $\mu$ m). Associées à un superplastifiant, les cendres volantes permettent de réduire le dosage en adjuvant nécessaire à l'obtention d'une certaine fluidité, mais le Rapport E/C doit être suffisamment important (équivalent au rapport utilisé pour l'échantillon Témoin) sinon la demande en adjuvant augmente fortement.

### **1.6.2. Les additions inertes ou quasi-inertes**

Ce sont des additions finement broyées ayant une finesse presque identique à celle du ciment Portland [5]. En général, ces additions n'ont pas une activité pouzzolanique et qui par leur composition granulométrique, améliorent les propriétés physiques du ciment portland (ouvrabilité, pouvoir de rétention d'eau). [2] Parmi les fillers calcaires les plus utilisés dans la fabrication des BAP, on distingue : la poudre de calcaire (PCL), la poudre de craie (PCR).

### 1.6.2.1. Les fillers calcaire

Les produits désignés dans le commerce comme fillers sont des poudres fines à granulométrie contrôlée, dont les plus gros grains ne dépassent pas 80 microns obtenus par broyage ou par pulvérisation de certaines roches (calcaires, basalte, bentonite, cendres volantes poudre de marbre ...). Les fillers se différencient les uns des autres par :

- Leur origine, leurs compositions chimiques et minéralogiques, leurs défauts de structure, les impuretés qu'ils contiennent.
- Leur finesse, la forme des grains, leur état de surface.
- Leur dureté, leur porosité.

Un filler est dit calcaire s'il contient au moins 90% de carbonate de calcium. Dans les autres cas, le filler est désigné par le nom de sa roche d'origine

### 1.6.2.2. La poudre de marbre

Le marbre est une roche métamorphique résultant de la transformation d'un calcaire pur. Le degré de pureté du marbre est responsable de sa couleur et de son aspect : il est blanc si la roche dont il provient était principalement composée de calcite (100 %  $\text{CaCO}_3$ ). Mis en œuvre dans la construction et la décoration. Une grande quantité de poudre est générée lors de la découpe. Son utilisation en remplacement du calcaire, dans la production de ciment, dans la mesure où elle n'altère pas trop les caractéristiques du béton, permettra de réduire l'impact de sa mise en décharge.



Figure 1-5. Poudre de Marbre

### 1.6.3. Effet du superplastifiant

Ajoutés en faible dose (n'excédant pas 5 % de la masse du ciment), les superplastifiants ont pour rôle de contrer le phénomène naturel d'agglomération et de floculation de la pâte de ciment en interagissant avec les grains de ciment et en se plaçant à la surface de ces derniers. La figure I.6 montre la floculation des grains de ciment.

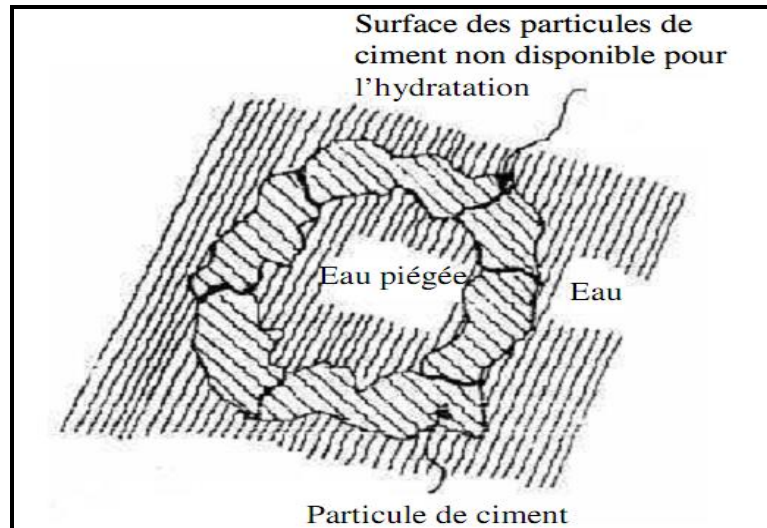


Figure I- 6 Floc de ciment en absence de superplastifiant [23]

L'effet général est une répulsion lorsque la distance entre particules est faible. Ceci aura pour conséquence de libérer l'eau piégée dans les floccs (Figure I.6) et augmenter la quantité d'eau libre pour assurer une bonne fluidité du mélange. Le mécanisme de défloculation et de dispersion dans les matériaux cimentaires créé par les superplastifiants peut se résumer en deux étapes : l'adsorption et la défloculation [11].

L'adsorption c'est le processus par lequel le superplastifiant vient se fixer à la surface des grains de ciment par attraction électrostatique ou via une complexation avec les ions calcium présents en solution [12] comme illustré sur la (Figure I.7).

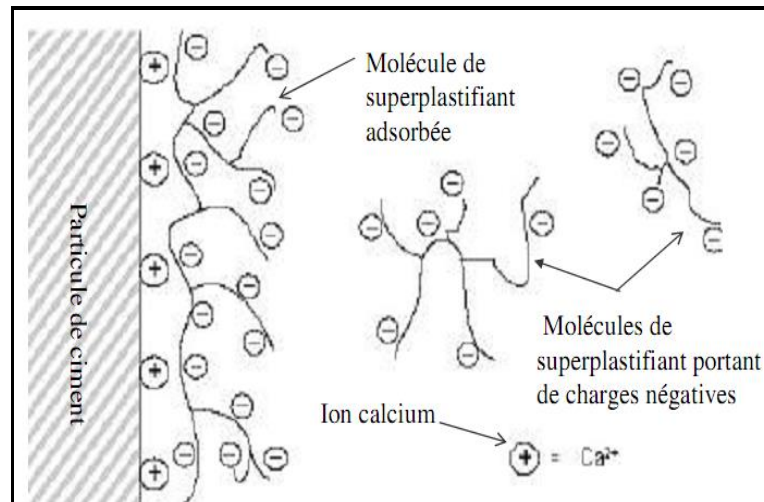


Figure 1-7. Adsorption de superplastifiant sur une particule de ciment [23]

Une fois les molécules de superplastifiant adsorbées à la surface des particules de ciment, deux effets principaux peuvent être à l'origine de la dispersion :

- Augmentation des forces répulsives (effet électrostatique)
- Augmentation de l'effet stérique.

Ces deux effets se résument comme suit :

Défloculation et dispersion par répulsion électrostatique (Figure I.8). Par adsorption à l'interface solide - liquide, les molécules de polyélectrolyte neutralisent les différentes charges des particules et donnent la même charge électrostatique à chaque grain de ciment contribuant à modifier les forces électrostatiques. Ces charges de mêmes signes causent des forces répulsives qui favorisent la dispersion et améliorent la fluidité du mélange.

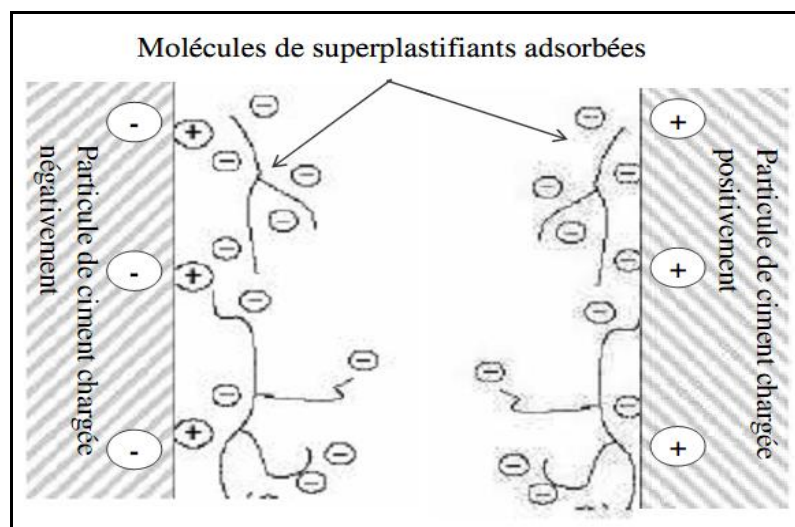


Figure 1-8. Répulsion électrostatique entre deux particules de ciment de charges contraires munies des molécules de superplastifiant adsorbées sur leur surface.

## 1.7. Caractéristiques des BAP

### 1.7.1. Propriétés des BAP à l'état frais

Les propriétés générales d'un BAP à l'état frais sont la fluidité et l'homogénéité. Ces propriétés sont étudiées sur plusieurs aspects, et peuvent se diviser en trois critères mesurables par des tests empiriques: le remplissage, la résistance à la ségrégation, et la capacité à passer à travers les obstacles que nous appellerons capacité de passage[13][14].

#### 1.7.1.1. Le remplissage

Le remplissage du béton, ou la déformabilité, est un critère qui découle directement de sa fluidité. Le béton autoplaçant est capable de remplir les vides et les espaces difficiles dans un milieu confiné, en se déformant sous l'effet de son propre poids, et sans sollicitations. Le remplissage est observé sous deux aspects : la capacité de remplissage et la vitesse de remplissage.

Le premier aspect est lié à la capacité de déformation du béton, il traduit le pourcentage rempli ou la distance atteinte dans l'espace. Le second est lié à la vitesse de déformation, il traduit ainsi la vitesse d'écoulement du béton. Le test d'étalement au cône d'Abrams donne des indications sur les deux aspects [10].

#### 1.7.1.2. La résistance à la ségrégation

La ségrégation d'un mélange correspond à l'absence d'homogénéité dans la distribution des constituants ce qui provoque généralement une séparation de phases solide et liquide ou bien une séparation des phases solides en fonction de leurs dimensions[2].

La ségrégation peut donc se manifester dans un béton de façons différentes, comme la séparation entre la pâte et les granulats, la séparation entre le gravier et le mortier qui peut conduire à un blocage en zones confinées, et une répartition non homogène de l'air occlus. Pour éviter la ségrégation, il faut réduire la quantité d'eau libre dans le béton en réduisant le rapport E/C du béton. La résistance à la ségrégation du béton peut aussi être augmentée en élevant la viscosité de l'eau dans la suspension, avec certains agents de viscosité

#### 1.7.1.3. La capacité de passage

Le béton autoplaçant doit réunir à la fois la fluidité (la capacité de remplissage) et la résistance à la ségrégation pour produire un bon écoulement. Cependant, dans les milieux confinés, il faut que le béton puisse s'écouler dans les espaces étroits et entre les

armatures. En effet, le blocage des granulats est provoqué par la quantité importante de granulats dans le béton, et par la taille des plus gros granulats par rapport à l'ouverture entre armatures ou dans un confinement [13].

Le mécanisme de blocage peut être illustré dans un plan par le schéma de la figure 1-9 ci-dessous qui montre un béton s'écoulant entre deux armatures avant et au moment du blocage.

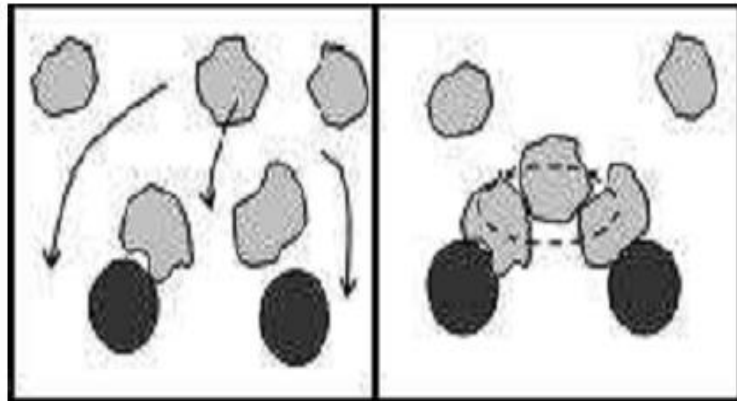


Figure 1-9. Représentation en plan d'un blocage de granulats à travers deux armatures.

Donc, un béton est qualifié d'autoplaçant s'il satisfait les propriétés citées ci-dessus, en trouvant le bon compromis entre des caractéristiques presque contradictoires : fluidité et résistance à la ségrégation. Pour résumer, on présente les propriétés des BAP, les moyens de les obtenir et les actions entreprises pour leur mise en œuvre dans le tableau 1.1.

Tableau 1-1. Propriétés de BAP à l'état frais.

Propriétés d'un BAP	Moyens d'obtention	Action à mener dans la formulation
Remplissage (fluidité)	Réduction des Frictions Entre les particules	Augmentation du volume de pate
	Optimisation de la pate	Utilisation des superplastifiants
		Optimisation du rapport E/C
Résistance à la ségrégation	Réduction de l'eau libre Dans le béton	Réduction du rapport E/C
		Utilisation de matériaux de grande Surface
		Utilisation d'agents de viscosité
Capacité de Passage	Réduction de blocage des Granulats	Réduction du volume de gravier
		Réduction de la taille maximale des granulats

## **1.7.2. Propriétés de BAP à l'état durci**

### ***1.7.2.1. Résistance à la compression***

La résistance à la compression est la contrainte maximale sous laquelle une éprouvette du béton se rompt. Elle est influencée principalement par deux facteurs à savoir :

Le rapport Eau/Ciment (E/C) ou Eau/Poudre (E/P) et la teneur en ciment (ou poudre). L'augmentation du premier mène à une diminution de la résistance à la compression, pendant que l'augmentation du deuxième conduit à une augmentation de la résistance du béton.

Du moment que le BAP est formulé avec un faible rapport E/P (0,28 à 0,42) et une teneur en poudre élevée (450 à 600 kg/m<sup>3</sup>), sa résistance à la compression est plus grande que celle du béton vibré. En ce qui concerne l'effet des ajouts minéraux sur la résistance du BAP, plusieurs chercheurs ont rapporté l'effet bénéfique des ajouts pouzzolaniques [15], alors que d'autres chercheurs ont montré l'effet négatif des fillers calcaires sur la résistance à la compression du BAP [16]. Uysal et Yilmaz [16] ont étudié l'effet de la poudre de marbre, poudre de calcaire et poudre de basalte sur les propriétés des BAP. Ces auteurs ont rapporté que la résistance diminue au fur et à mesure que la teneur en addition augmente. Les mêmes auteurs ont trouvé des résistances à 28 jours variant respectivement entre 70 et 78, 60 et 69, 62 et 72 MPa, pour les trois types d'addition (la poudre de marbre, poudre de calcaire et poudre de basalte).

Des BAP contenant différents teneurs en cendres volantes, laitier de HF et fumée de silice ont développé des résistances à la compression, à 28 jours, qui varient respectivement entre 42 et 68, 65 et 73, 71 et 76 MPa.

### ***1.7.2.2. Résistance à la traction***

En général, la résistance à la traction dépend de la résistance à la compression. En effet, l'augmentation de la résistance à la compression mène vers l'augmentation de la résistance à la traction. Comme la résistance à la compression des BAP est plus grande que celle des bétons vibrés, la résistance à la traction des BAP est également plus grande.

## **1.8. Caractérisation des BAP à l'état frais**

En France, trois essais de caractérisation des bétons autoplaçants à l'état frais ont été recommandés par l'Association Française de Génie Civil « AFGC » en juin 2000 [12]. Initialement provisoires, ces recommandations sont devenues par la suite des essais de référence

pour valider une formule de BAP. L'ouvrabilité des bétons autoplaçants se décompose en trois caractéristiques :

- La mobilité en milieu non confiné (décrit par l'essai d'étalement) ;
- La mobilité en milieu confiné (décrit par la boîte en L) ;
- La stabilité (résistance à la ségrégation et au ressuage).

L'essai d'étalement modifié fut développé par J-Ring au Japon publié par le Groupe Holcim Bétons dans ces recommandations et peut remplacer la boîte en L pour la mobilité en milieu confiné.

### 1.8.1. Essai d'étalement

L'essai le plus courant, car le plus facile à mettre en œuvre, permettant d'évaluer la fluidité est l'essai d'étalement réalisé avec le cône d'Abrams. Le principe de cet essai est de mesurer le diamètre moyen final que prend le béton après le soulèvement vertical du cône (figure I.5).

Le diamètre de la galette de béton est le paramètre caractérisant de la fluidité, plus il est grand, plus le béton est fluide (grande capacité de remplissage). L'étalement final d'un béton autoplaçant peut varier entre 50cm et 80cm en fonction de l'utilisation du béton. Ceci permet aussi de détecter visuellement les premiers signes de ségrégation du béton (présence d'une épaisseur de laitance en périphérie de la galette, accumulation de gravier au centre d'une galette de mortier). Le temps de passage de la galette de béton à un diamètre de 50cm ( $T_{50}$ ) donne une idée sur la vitesse de déformation du béton. Cette mesure, le  $T_{50}$ , est une valeur qualitative. En général, des valeurs élevées de  $T_{50}$  traduisent un béton de vitesse de déformation faible (viscosité élevée). Pour un béton autoplaçant, la littérature mentionne des valeurs allant jusqu'à 7 secondes. Cependant, certains auteurs considèrent que cette valeur peut atteindre 12 secondes, pour des bétons autoplaçants avec une faible vitesse de déformation.

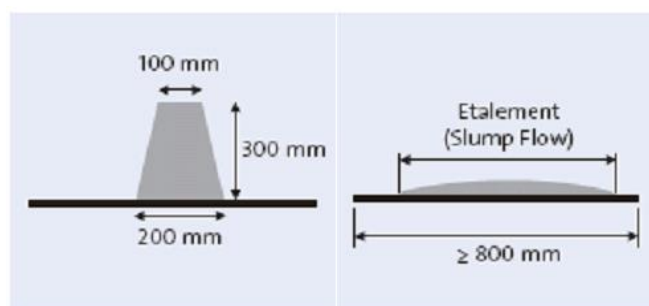


Figure 1-10. Essai d'Etalement

### 1.8.2. Essai de l'écoulement à l'entonnoir (V- funnel)

Cet essai permet une évaluation qualitative du béton autoplaçant, il caractérise la capacité de passage du béton à travers un orifice. L'entonnoir existe en dimensions différentes, et il est destiné à imposer un écoulement du même type que celui imposé entre deux armatures parallèles. Le plus souvent, la partie inférieure de l'entonnoir est rectangulaire de dimensions 7,5 cm x 6,5 cm. Elle est équipée d'une trappe. L'essai consiste à observer l'écoulement du béton à travers l'entonnoir et à mesurer le temps d'écoulement entre le moment où la trappe est libre et le moment où on aperçoit le jour par l'orifice. Le béton autoplaçant doit s'écouler avec une vitesse constante ; un simple changement de vitesse de l'écoulement est un signe de blocage, donc de ségrégation dans le béton. Cet essai permet aussi d'évaluer la viscosité du béton lors de l'écoulement : pour des bétons de même étalement au cône d'Abrams par exemple, la viscosité est d'autant plus élevée que la durée de l'écoulement à l'entonnoir est longue. Le temps d'écoulement du béton autoplaçant à l'entonnoir doit être généralement inférieur à 12 secondes. Quelques recommandations visent un temps compris entre 5 secondes et 12 secondes pour obtenir un béton de viscosité suffisante (Figure 1.6).

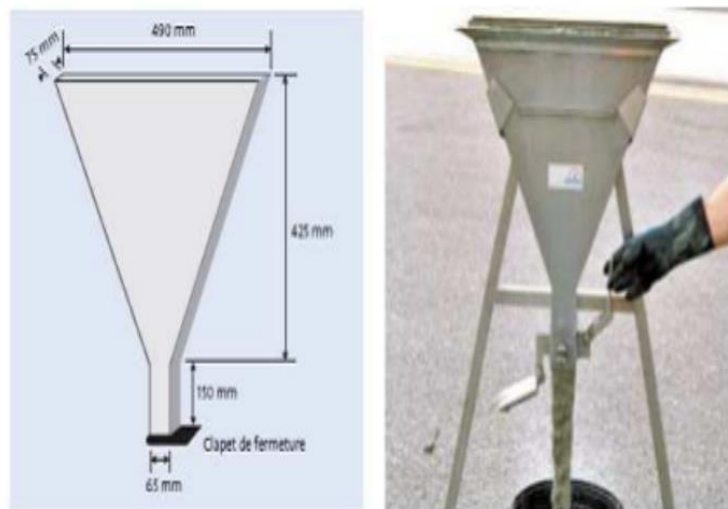


Figure 1-11. L'entonnoir en V (V-Funnel)

### 1.8.3. Essai de la boîte en « L »

L'essai à la L-Box est recommandé par l'AFGC [16]. Il permet de tester la mobilité du béton en milieu confiné et de vérifier que sa mise en place ne sera pas contrariée par des phénomènes de blocage (Figure 1.7)

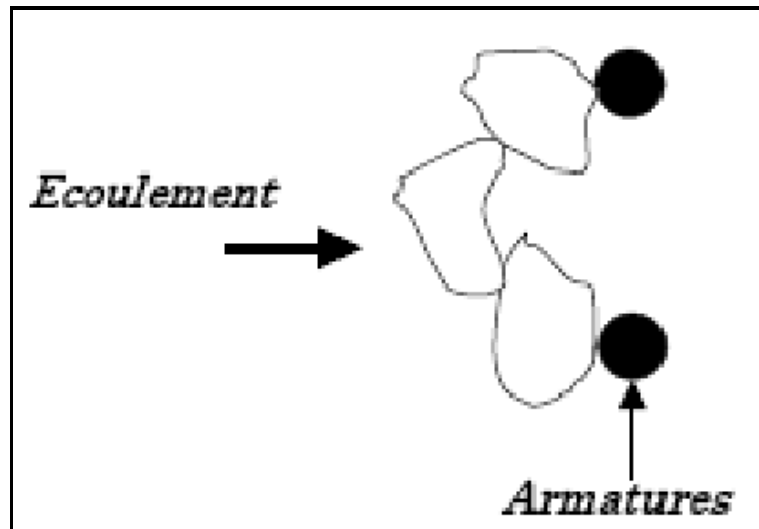


Figure 1-12. Risque de blocage au droit des armatures [34]

Le dispositif d'essai est constitué d'une boîte en forme de L (Figure 1.10). La partie verticale est séparée de la partie horizontale par une trappe. Des armatures peuvent être intercalées avant la trappe. L'AFGC [16] recommande l'utilisation de trois barres de 14 mm de diamètre, espacées de 39 mm. Le mode opératoire de l'essai à la L-Box est le suivant : la partie verticale du dispositif est remplie de béton (volume nécessaire de l'ordre de 13 L). Après arasement, le matériau est laissé au repos pendant 1 min. La trappe est ensuite soulevée afin de laisser s'écouler le béton à travers le ferrailage. A la fin de l'essai, les hauteurs de béton, de la partie verticale et de l'extrémité de la partie horizontale, sont mesurées (respectivement  $H_1$  et  $H_2$ ). Le rapport  $H_2/H_1$  permet de caractériser la dénivellation et doit être supérieur à 0,8. Un mauvais écoulement du béton à travers le ferrailage et un amoncellement de granulats au niveau de la grille sont signes d'un problème de blocage ou de ségrégation.

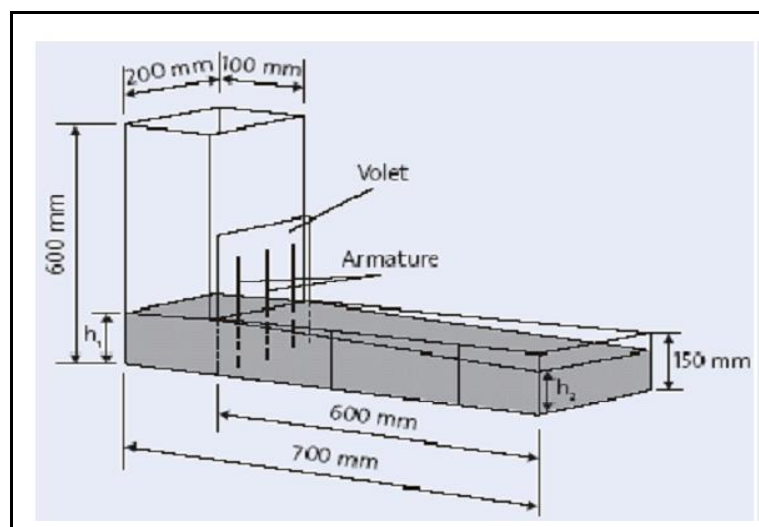


Figure 1-13. Boite en « L »

#### 1.8.4. Essai de la stabilité au tamis

L'essai de la stabilité au tamis (Figure 1.11) permet de qualifier les bétons autoplaçants vis à vis du risque de ségrégation. Il s'agit de verser 10 litre du béton juste après le malaxage dans un seau, puis couvrir le seau pour protéger le béton de la dessiccation et laisser reposer durant 15 mn. Verser 5 kg du béton au centre d'un tamis 5mm, à une hauteur de chute de 50cm, on récupère le béton passant dans un récipient. Après 2mn On mesure le pourcentage en poids de laitance par rapport au poids de l'échantillon passant au travers le tamis. On peut considérer qu'une valeur inférieure à 15 % de laitance est caractéristique d'un béton stable. [26]

**Critères d'acceptabilité** : La mesure du pourcentage de laitance conduit à classer les formules de béton autoplaçants de la façon suivante :

- $0\% \leq \text{Plaitance} \leq 15\%$  → stabilité satisfaisante
- $15\% < \text{Plaitance} \leq 30\%$  → stabilité critique (essai de ségrégation à réaliser in situ)
- $\text{Plaitance} > 30\%$  → stabilité très mauvaise.

Ces critères sont particulièrement adaptés aux applications en éléments verticaux.

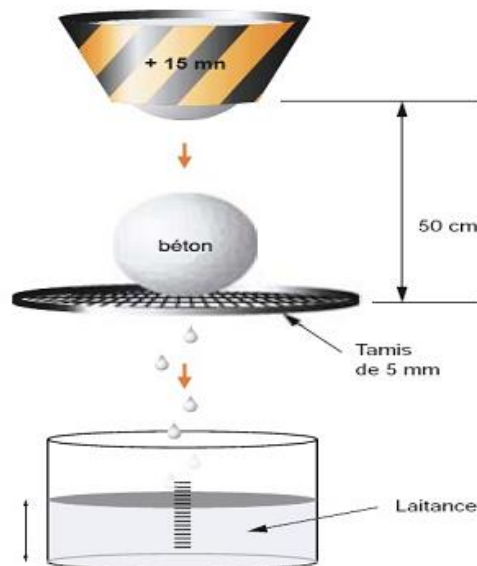


Figure 1-14. Essai de stabilité au tamis [6]

### 1.9. Formulation des bétons autoplaçants

Les deux principales propriétés recherchées des BAP sont une grande fluidité et une grande résistance à la ségrégation. Ces deux propriétés sont à priori contradictoires pour un béton

ordinaire, l'obtention de l'une se fait au détriment de l'autre. La formulation d'un BAP requiert une étude précise notamment dans le choix des constituants.

L'étape de formulation consiste à choisir une proportion optimale et bien précise des différents constituants dans le but d'obtenir les meilleures caractéristiques rhéologiques du béton. Le facteur le plus important dans la formulation d'un BAP est l'eau. En effet le principe de ce type de béton est de diminuer la quantité d'eau utilisée tout en assurant une bonne maniabilité à l'état frais. Beaucoup de recherches ont été faites sur l'optimisation et le développement de formulations de bétons autoplaçants. L'objectif principal de ces recherches est l'amélioration des performances du béton à l'état frais et durci [30]. Plusieurs approches de formulation des BAP ont été élaborées à travers le monde (approche japonaise, approche chinoise, approche suédoise, approche du LCPC, etc.) pour répondre aux exigences d'ouvrabilité de ce type de béton. Philippe Turcry [14] a regroupé ces méthodes en trois grandes familles qui sont ;

### **1.9.1. Méthodes basées sur l'optimisation des Mortiers**

Okamura, le concepteur des BAP, propose de les formuler en composant en premier lieu le mortier du béton. Dans le mortier, la proportion de sable est posée arbitrairement. Il reste ensuite à trouver expérimentalement les dosages en eau et en superplastifiant, pour un liant donné (rapport massique ciment sur addition fixé), et suivant certains critères de rhéologie. La formule finale est obtenue en ajoutant au mortier un volume de gravillons limité, de manière sécuritaire, à la moitié de leur compacité [17]. A la suite d'une optimisation identique du mortier, Ouchi et al proposent de doser les gravillons en cherchant expérimentalement leur volume limite menant à un blocage. Ce volume est évalué en comparant l'écoulement du mortier dans un entonnoir avec et sans gravillons. La formulation d'un BAP par le biais de son mortier trouve sa justification dans quelques publications

### **1.9.2. Méthode basées sur l'optimisation du volume de pâte**

Le béton est considéré ici comme un mélange biphasique, avec une phase solide, les granulats, et une phase liquide, la pâte. Dans le cas d'un BAP, la pâte joue un rôle prédominant. Plusieurs auteurs introduisent la notion d'excès de pâte schématisée sur la figure. La formulation consiste à déterminer la quantité de pâte en excès optimale pour fluidifier le BAP et limiter les problèmes de blocage.

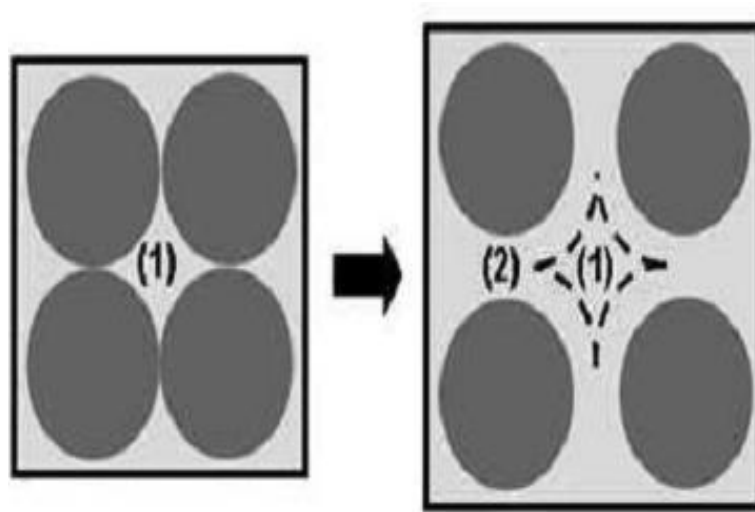


Figure 1- 15 Notion d'excès de pâte : la pâte remplit la porosité (1) et écarte les granulats (2)

Turucry [14] ont obtenu par l'expérience des équations reliant l'épaisseur de la pâte autour des granulats et les constantes du modèle de Bingham (seuil de cisaillement et viscosité) du béton, exprimées par rapport à celles de la pâte. Lors de la formulation, il faut d'abord optimiser et caractériser la rhéologie de la pâte, puis déterminer à l'aide de ces équations la proportion minimale de pâte nécessaire pour fluidifier le béton. Les auteurs ne proposent pas de méthode pour doser la pâte par rapport au blocage.

### 1.9.3. Méthode basées sur l'optimisation du squelette granulaire

La formulation des bétons peut passer par une optimisation de la porosité du système formé par les grains solides, du ciment aux gravillons. Il est connu par exemple que la résistance à la compression augmente avec la compacité de la pâte. L'ouvrabilité est elle-aussi tributaire de l'arrangement du squelette granulaire. Reprenons la figure 1.10, en considérant maintenant que la phase interstitielle est l'eau de gâchage, et non plus la pâte. Plus la quantité d'eau qui écarte les grains (2) est importante, plus la suspension est fluide. A quantité d'eau constante, si on minimise la porosité (1) de l'empilement de grains, on maximise en conséquence le volume d'eau disponible pour fluidifier le mélange. Cet exemple simple nous montre donc le lien entre compacité et rhéologie. Sedran et de Larrard ont développé un modèle décrivant mathématiquement un empilement, à partir des caractéristiques des grains qui le composent (forme, granulométrie). Le modèle permet le calcul de la compacité du béton et d'un indice représentatif de son degré de serrage. A l'aide de ces variables sont modélisées la viscosité et le seuil de cisaillement du béton.

Le modèle est implanté dans un logiciel (Bétonlab Pro2), qui permet de plus de simuler les autres propriétés du béton (résistance, déformations différées, etc...). Ses auteurs proposent un cahier des charges spécifique pour les BAP, avec des indices pour estimer la capacité de remplissage et la stabilité du béton.

## **Chapitre 2 : Rhéologie des mortiers autoplaçants**

### **2.1. Notions fondamentales de rhéologie**

#### **2.1.1. Définition de la rhéologie**

Mot inventé en 1929 par Bingham à partir du verbe grec rhéo "couler" et du mot logos "étude", est une branche de la physique Qui étudie la déformation et l'écoulement de la matière. Celle-ci se déforme quand on exerce sur elle une force, cette dernière changeant la forme et les dimensions de la matière. On dit que l'élément est en écoulement si le degré de déformation change en fonction du temps (dérivée par rapport au temps de la déformation). Le comportement rhéologique d'un élément de volume d'un corps est la manière dont ces déformations correspondent aux contraintes imposées sur ce corps.

Le but nécessaire de l'étude du comportement rhéologique d'un corps est d'estimer le système de forces nécessaire pour causer une déformation spécifique. Dans le domaine de construction, la connaissance du comportement rhéologique ou bien des propriétés rhéologiques a une importance cruciale, étant donné que les propriétés du béton frais telles que la déformabilité, la capacité de passage, la résistance à la ségrégation et sa mise en place (transport, pompage, collage et vibration) sont affectées par son comportement rhéologique [5]. En outre, la qualité du béton durci est aussi influencée par le comportement rhéologique du béton frais. L'obtention de la contrainte de cisaillement  $\tau$  et de la vitesse de cisaillement ou taux de déformation  $\dot{\gamma}$  permet d'établir des rhéogrammes ou courbes d'écoulement. Ces dernières relient généralement les contraintes de cisaillement aux vitesses de cisaillement et permettent d'accéder à la viscosité et au seuil de cisaillement du matériau. La connaissance de ces deux dernières grandeurs est primordiale pour le choix et l'optimisation du dosage des constituants des bétons autoplaçants (BAP). En effet, les BAP sont des suspensions de particules de caractéristique morphologique, mécanique et physico-chimique très diverses dans l'eau. Une première simplification consiste à considérer leur comportement rhéologique à l'état frais comme résultant de l'interaction entre une phase visqueuse constituée par la pâte de ciment et une phase granulaire composée par l'ensemble des granulats [18].

La pâte de ciment est une suspension de ciment dans l'eau à laquelle peuvent être ajoutées les additions minérales (filler calcaire, fumée de silice, pouzzolane), des superplastifiants et des agents de viscosité. La phase granulaire (gravier et sable) résiste

au cisaillement par un processus faisant intervenir essentiellement l'enchevêtrement et le frottement des grains. Le seuil de cisaillement est contrôlé par le nombre et la nature des contacts entre les grains.

La phase visqueuse agit sur l'écoulement par l'intermédiaire de sa viscosité. Par un processus de lubrification et d'écartement des granulats, la pâte interstitielle contribue à la réduction des frottements inter granulaires qui génèrent des contraintes empêchant l'écoulement.

### **2.1.2. Le seuil de cisaillement**

Le seuil de cisaillement est la contrainte de cisaillement minimale pour initier l'écoulement d'un matériau ou le stopper. Diverses appellations existent dans la littérature parmi lesquelles le point de fluage, le seuil de plasticité, le seuil de cisaillement, le seuil de rigidité, la contrainte seuil. En dessous du seuil de cisaillement, le matériau se comporte comme un solide élastique et ne s'écoule pas. Il existe deux seuils d'écoulement conduisant à des notions physiques très différentes.

- Le seuil de cisaillement statique est la contrainte nécessaire à fournir pour déclencher l'écoulement du matériau. Il correspond à la contrainte minimale fournie pour obtenir le premier signe d'écoulement (passage de l'état solide à l'état viscoplastique). Sa mesure est faite sur une suspension totalement structurée et donc vierge de toute sollicitation par application d'une contrainte croissante jusqu'à la valeur provoquant l'écoulement du matériau.

- Le seuil de cisaillement dynamique est la contrainte minimale pour stopper l'écoulement (passage de l'état viscoplastique à l'état solide). Il est obtenu par interpolation de la courbe d'écoulement à une vitesse de cisaillement nulle.

Les seuils statique et dynamique ont des implications pratiques importantes en génie civil.

Le seuil statique permet de réduire les pressions latérales et la ségrégation statique des BAP dans les coffrages de grande hauteur.

Le seuil dynamique peut être à l'origine de l'arrêt de l'écoulement dans les coffrages et les moules. Les seuils d'écoulement doivent être faibles dans le cas des BAP pour leur permettre de s'écouler sous leur propre poids.

### 2.1.3. La viscosité

La viscosité dynamique  $\mu$  ou viscosité apparente du fluide caractérise la facilité plus ou moins grande de déplacement (diffusion) d'une molécule dans un environnement encombré par d'autres molécules (friction). C'est la caractéristique du fluide qui engendre des forces de frottement lorsque ce dernier est mis en écoulement. Mathématiquement, elle est définie comme le rapport entre contrainte de cisaillement  $\tau$  et vitesse de cisaillement ou taux de cisaillement  $\dot{\gamma}$  ; On distingue différents types de viscosité :

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

$$\mu = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad \text{Equation 2- 1}$$

**La viscosité cinématique** : c'est le rapport de la viscosité dynamique à la masse volumique

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad \text{Equation 2- 2}$$

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

### 2.1.4. Le mouvement de cisaillement

Le mouvement d'un échantillon entre deux surfaces planes, l'une au repos, l'autre animée d'un déplacement parallèle à elle-même. Ce mouvement peut être celui d'une peinture brossée sur un mur, d'une crème cosmétique étendue sur la peau, du beurre étalé sur une tranche de pain ... (Figure 2.1).

Sous l'effet de ce cisaillement, le matériau s'écoule en couches planes, parallèles entre elles, animées de vitesses différentes qui varient continûment entre 0 pour la couche au contact de la surface fixe et  $V$  pour la couche au contact avec la surface mobile. On admet en effet que les couches de matériau au contact avec les deux surfaces planes sont solidaires de ces surfaces ; c'est ce qu'on appelle l'hypothèse de non-glissement à la paroi. Deux grandeurs vont permettre de caractériser quantitativement le cisaillement.

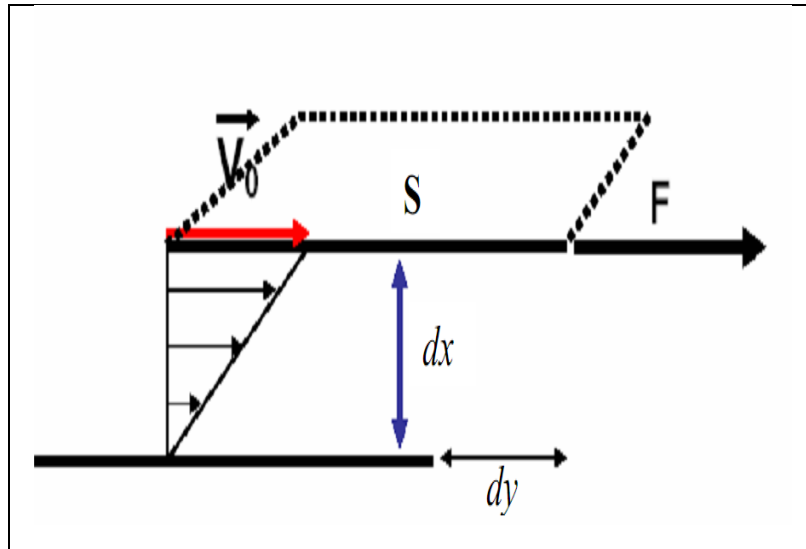


Figure 2-1. Mouvement de cisaillement entre deux surfaces planes [24]

Le déplacement entre les deux plans est défini comme la déformation, symbole  $\gamma$  suivant la relation

$$\gamma = \frac{dx}{dz} \quad \text{Equation 2- 3}$$

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

$$\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt} = \frac{d}{dt} \left( \frac{dx}{dz} \right) = \frac{d}{dz} \left( \frac{dx}{dt} \right) = \frac{dv}{dz} \quad \text{Equation 2- 4}$$

L'une est **la vitesse de cisaillement**, encore appelée **gradient de vitesse**, qu'on notera  $\dot{\gamma}$ : elle caractérise la variation de la vitesse entre les couches limites et est égale au quotient de la vitesse  $V$  et de l'épaisseur  $e$  de l'échantillon. La vitesse étant une longueur divisée par un temps, ce quotient s'exprime donc en inverse de seconde ( $s^{-1}$ ). La valeur de la vitesse de cisaillement dépend par conséquent, non seulement de la vitesse de déplacement de la couche mobile mais aussi, et de façon critique, de l'épaisseur  $e$  cisailée. Si cette dernière est faible, on peut atteindre des vitesses de cisaillement très élevées, même avec des vitesses de déplacement relativement faibles, et inversement.

### 2.1.5. La thixotropie

Après avoir dépassé le seuil de cisaillement, le matériau commence à s'écouler. Si l'effort nécessaire pour maintenir un écoulement constant diminue en fonction du temps (ou si l'écoulement s'accélère en fonction du temps à effort constant), on dit que ce matériau est thixotrope. Dans le cas contraire, on dit qu'il est antithixotrope. Ces deux phénomènes sont caractérisés dans la figure 2-3. Il faut noter que la thixotropie, ainsi que l'antithixotropie, sont définies comme étant des phénomènes réversibles.

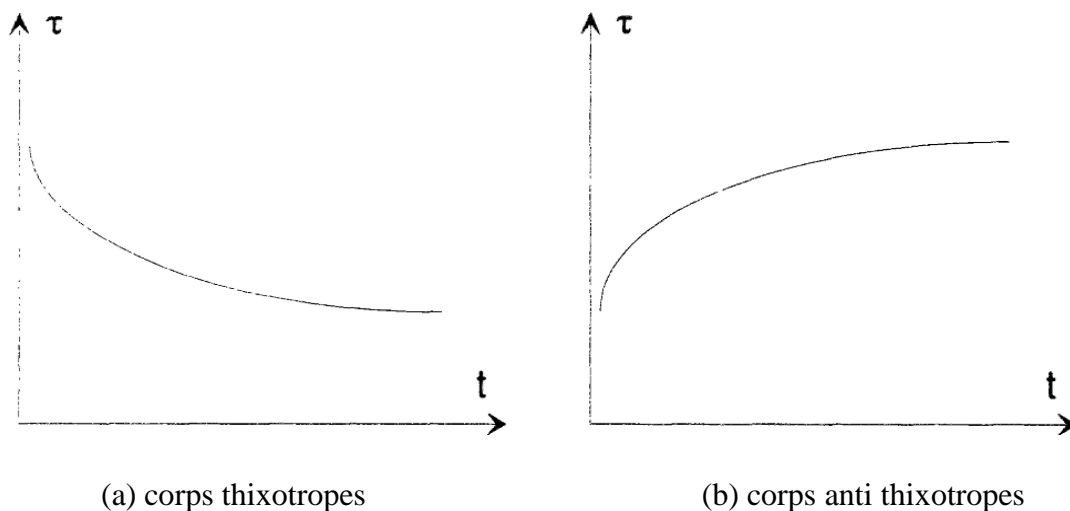


Figure 2-2. Phénomènes thixotrope et anti thixotrope [23]

### 2.1.6. Rhéofluidification et rhéoépaississement

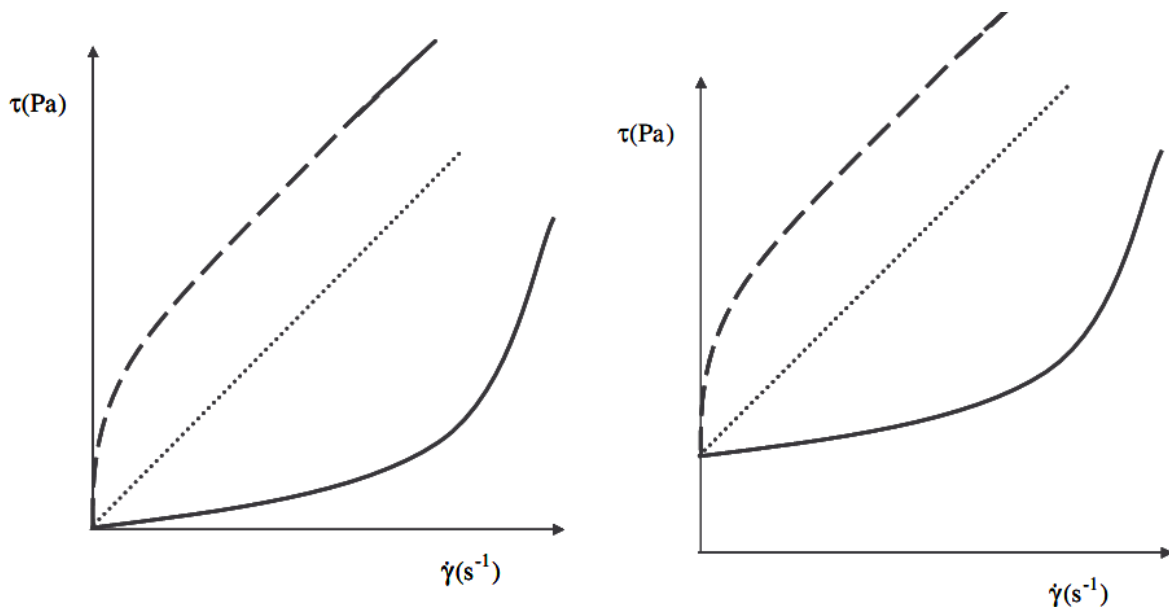
Certains fluides s'écoulent dès qu'ils sont soumis à une contrainte de cisaillement si petite soit-elle. Ce sont des fluides exclusivement visqueux (Figure 2.3 a). Le plus simple de ces fluides est le fluide newtonien caractérisé par une relation linéaire entre la contrainte et la vitesse de cisaillement. Les viscosités apparentes sont égales à la viscosité plastique.

Si la courbe d'écoulement présente une concavité tournée vers l'axe des vitesses de cisaillement, le fluide est dit rhéofluidiant. Dans le cas contraire, il est rhéoépaississant (encore appelé dilatant).

Autrement dit, le fluide rhéofluidifiant (encore appelé pseudo-plastique) a une viscosité apparente qui diminue quand la contrainte augmente. La contrainte croît moins vite que la vitesse de cisaillement et l'écoulement est de plus en plus rapide quand la contrainte augmente.

D'autres fluides s'écoulent une fois le seuil de cisaillement dépassé. Ce sont des fluides viscoplastiques (Figure 2.3 b), les fluides sont binghamiens ils sont soumis à une contrainte critique appelée seuil d'écoulement, le matériau ne s'écoule qu'au-delà de cette contrainte critique. Le fluide est à seuil de contrainte (encore appelé plastique).

- |       |                 |       |                 |
|-------|-----------------|-------|-----------------|
| ----- | Rhéofluidifiant | ----- | Rhéofluidifiant |
| ..... | Newtonien       | ..... | Binghamien      |
| _____ | Rhéopaississant | _____ | Rhéopaississant |



a) Comportement exclusivement visqueux                      b) Comportement viscoplastique

Figure 2-3. Rhéogramme des différents comportements [24]

**2.2. Appareils de mesure rhéologique**

Les propriétés du béton frais sont très importantes car si le béton ne peut être placé correctement, les propriétés désirées à l'état durci ne seront pas obtenues. Pour chaque application, les caractéristiques requises pour le béton frais sont différentes. Les besoins de mise en place, de pompabilité, de résistance à la ségrégation définissent si un béton a de bonnes propriétés à l'état frais. Le développement de nouveaux bétons intensifie le besoin de caractériser encore mieux le comportement du béton lors de l'écoulement. De nombreux ajouts cimentaires et adjuvants ont fait leur apparition au cours des dernières décennies. L'importance de la maniabilité et de sa mesure ont pris du même une importance primordiale. Auparavant, un béton plus fluide était automatiquement associé avec les problèmes de

ségrégation et une faible résistance en compression. De nos jours, il est maintenant possible de produire un béton très fluide ayant d'excellentes propriétés mécaniques.

Les bétons autoplaçants sont beaucoup plus fluides que les mélanges de bétons traditionnels. Les tests empiriques conventionnels ne suffisent plus pour certains cas à bien caractériser le comportement lors de l'écoulement et de la mise en place du béton frais.

Plusieurs essais empiriques existent à l'heure actuelle. Plusieurs sont normalisés alors que d'autres ne le sont pas. Certains tentent de décrire l'écoulement propre du béton frais, d'autres décrivent un aspect précis de la maniabilité du béton alors qu'ou développement des rhéomètres, de nouveaux essais et plus sophistiqué décrivent de mieux en mieux l'écoulement du béton sur une base rhéologique.

### 2.3. Description de l'appareil

Le rhéomètre se compose de trois parties principales (Figure 2.4) :

- (a) un agitateur à régulation électronique de la vitesse permettant l'enregistrement des couples.
- (b) un récipient.
- (c) une pôle en acier.

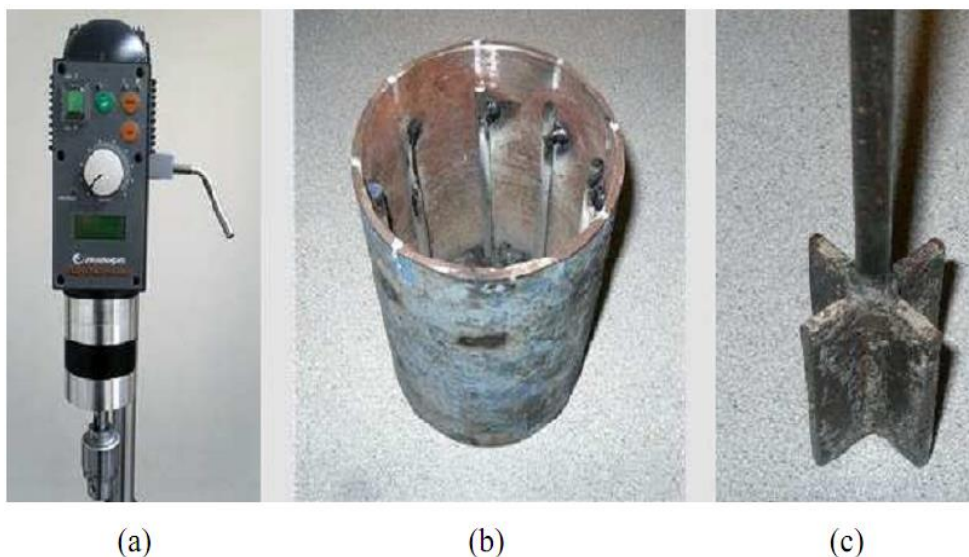


Figure 2-4. Composants du rhéomètre ; (a) agitateur ; (b) récipient ; (c) pôle [21]

#### a. L'Agitateur

L'agitateur est l'élément principal pour la réalisation des essais, il est fixé à un bras, via une mâchoire, qui est elle-même fixée sur un trépied. L'agitateur est piloté par un ordinateur à l'aide d'un logiciel (Watch & Control).

b. Le Récipient

Le récipient pour béton est un cylindre de 30 cm de diamètre et de 32,5 cm de hauteur. Afin d'optimiser l'adhérence du béton sur la paroi extérieure du récipient des baguettes en acier ont été soudées. Le récipient spécifique pour les mortiers est aussi cylindrique de 10 cm de diamètre et de 13cm de hauteur (Figure 2.5).

c. La Pâle

La pâle en forme de croix est fixée dans le mandrin de l'agitateur. La pâle pour mortier mesure 10 cm de hauteur et 5cm de diamètre.

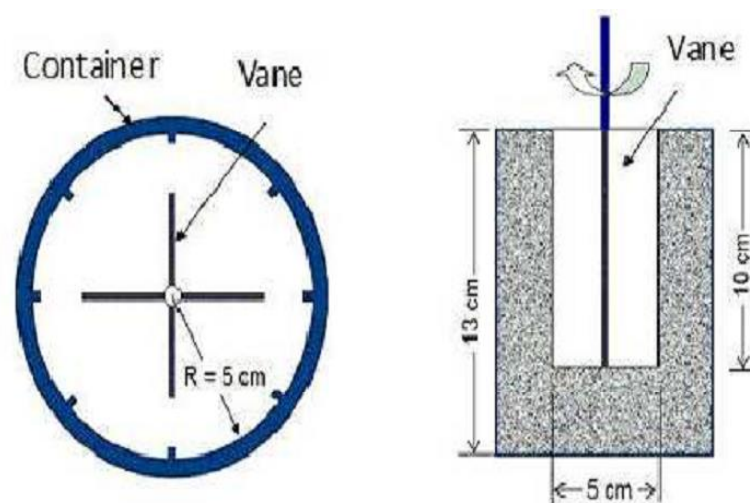


Figure 2-5. Position de la pâle dans le mortier [21]

### 2.3.1. Principe de fonctionnement des rhéomètres

Le principe consiste à mettre en rotation à différentes vitesses la pâle dans le récipient cylindrique un échantillon de mortier frais et à mesurer les couples exercés pour maintenir la rotation. Un essai rhéologique s'effectue en imposant une vitesse de rotation décroissante à la pale entre coupé de paliers de stabilisations afin d'effectuer les mesures. Toutes les secondes, le logiciel de pilotage de l'agitateur enregistre le couple de rotation ( $M$ ) correspondant à la vitesse de rotation ( $\Omega$ ) imposée. Le résultat brut d'un essai réalisé avec le rhéomètre se présente sous la forme d'une fonction linéaire liant le couple et la vitesse de rotation : [19]

$$M = M_0 + k \Omega \quad \text{Equation 2- 5}$$

$M$  (N.m) le couple total appliqué sur le mortier ;

$M_0$  (N.m) le couple à l'origine (frottement intrinsèque de l'agitateur) ;

$k$  (Nms) un coefficient de proportionnalité ;

$\Omega$  (tour/s) la vitesse de rotation de la pâte.

### 2.3.2. Les différents types des rhéomètres

Comprendre les caractéristiques d'écoulement nécessite de comprendre leur réponse à une contrainte imposée. Pour mesurer les caractéristiques rhéologiques d'un fluide, il suffit de mesurer la relation entre la contrainte et le taux de déformation du fluide en fonction du temps. Le rhéomètre est l'appareil conçu spécialement pour ces mesures. Il est à noter que pour un fluide newtonien, il ne suffit que d'un point de mesure, alors que pour un fluide non newtonien, il est nécessaire de prendre plusieurs points de mesure.[20]

Différents types d'appareils de mesures rhéologiques existent sur le marché, [21] , les plus utilisés dans le cas des matériaux cimentaires sont des rhéomètres et viscosimètres coaxiaux à géométrie rotative. La géométrie rotative est constituée de deux surfaces solides coaxiales animées de vitesses de rotation différentes autour de leur axe. Généralement, une seule des surfaces est mobile. Son principe de fonctionnement consiste à obliger le fluide à s'écouler dans l'espace annulaire ou entrefer compris entre les deux surfaces en appliquant à l'une des surfaces un couple  $M$  ou une vitesse de rotation  $\Omega$  constants et à mesurer respectivement une vitesse de rotation  $\Omega$  ou un couple  $M$ . La variation de  $\Omega$  ou de  $M$  permet d'obtenir plusieurs points et ainsi de déterminer les courbes d'écoulement. La connaissance de  $\Omega$  et de  $M$  permet d'accéder à la vitesse de cisaillement et à la contrainte de cisaillement.

Les rhéomètres sont des appareils utilisés pour déterminer le comportement rhéologique des matériaux Ils peuvent être classés grossièrement en trois grandes catégories, selon leur régime de fonctionnement.

- Les rhéomètres fonctionnant en régime permanent, ils permettent de déterminer les caractéristiques en écoulement des substances liquides.
- Les rhéomètres fonctionnant en régime transitoire, ils permettent de déterminer les caractéristiques viscoélastiques des substances liquides ainsi que des solides.
- Les rhéomètres fonctionnant en régime dynamique (sinusoïdal), ils permettent de déterminer de manière très complète les caractéristiques rhéologiques, y compris des propriétés en régime d'écoulement et des propriétés viscoélastiques de matériaux liquides ou solides [22].

Deux types de rhéomètres permettent d'étudier le comportement rhéologique des matériaux cimentaires fonctionnant en régime permanent se distinguent :

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

### 2.3.3. Les rhéomètres type Couette

#### a. Les rhéomètres rotatifs aux cylindres coaxiaux

La géométrie de Couette est composée de deux cylindres coaxiaux en rotation relative. Le rayon intérieur est noté  $R_i$  et le rayon extérieur  $R_e$  (et on a donc  $R_e > R_i$ ). L'entrefer  $e$  est l'espace entre les deux cylindres, et on a :  $e = R_e - R_i$ . La hauteur du cylindre intérieur est notée  $h$ . Le cylindre extérieur fixe avec un fond (« cup » en anglais ; il s'agit donc d'un récipient cylindrique destiné à contenir le fluide) et un cylindre intérieur tournant (« bob » en anglais ; le Couette cylindrique est donc parfois dénommé en anglais « bob and cup»). La (Figure 2.6) représente une coupe de profil d'une géométrie de Couette cylindrique. Le rhéomètre impose un couple au cylindre tournant et mesure la vitesse de rotation de ce cylindre.

Le fluide en contact avec la surface solide a la même vitesse que celle-ci, c'est-à-dire qu'il y adhère parfaitement. Ce qui implique une vitesse de glissement nulle entre la paroi et le fluide. Ce critère est appelé condition de non glissement à la paroi. Pour les suspensions, un problème du glissement aux parois peut survenir lors de l'écoulement. La conséquence du glissement est la mesure d'une viscosité du fluide plus faible que la viscosité réelle et une discontinuité du champ des vitesses [23].

Pour éviter ce glissement aux parois, lorsque le fluide étudié est une pâte granulaire, on recouvre le cylindre extérieur (c'est-à-dire la surface cylindrique à l'intérieur du récipient) avec les particules composant la pâte (à l'aide de ruban adhésif double face), afin d'obtenir une surface intérieure de même rugosité que la pâte. Pour la rugosité de la surface du cylindre intérieur, on utilise un « croisillon » (« vane » en anglais) comme cylindre tournant, c'est-à-dire un axe muni de pales. Le croisillon, en tournant autour de son axe pour induire l'écoulement, décrit un cylindre fictif dont la rugosité à la distance  $R_i$  de l'axe est celle de la pâte granulaire. L'utilisation du croisillon permet ainsi d'éviter le glissement aux parois.

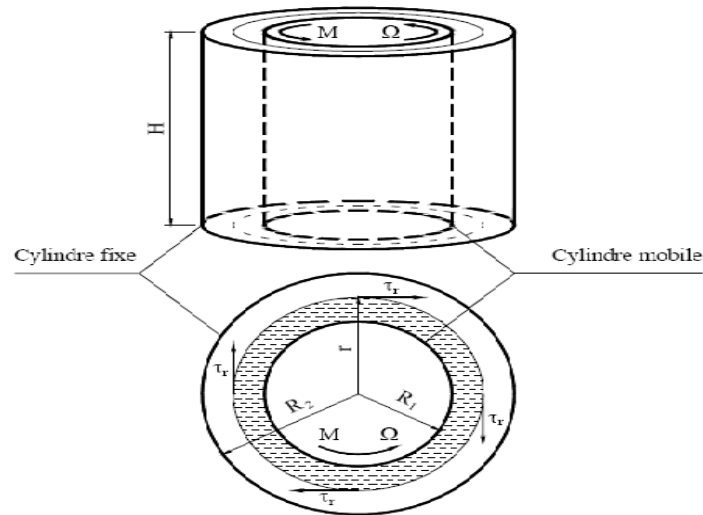


Figure 2-6. Représentation schématique du principe de fonctionnement des rhéomètres rotatifs à cylindres coaxiaux.[24]

b. Les rhéomètres plans à translation

Le principe de fonctionnement de ce type de rhéomètres est représenté schématiquement sur la Figure.13. Le fluide étudié est cisailé entre deux plans solides parallèles de même surface  $S$  et espacés l'un de l'autre d'une distance  $d$  dont un plan est fixe et l'autre est animé d'une vitesse constante  $V$  de translation sous l'action d'une force  $F$  constante.[22]

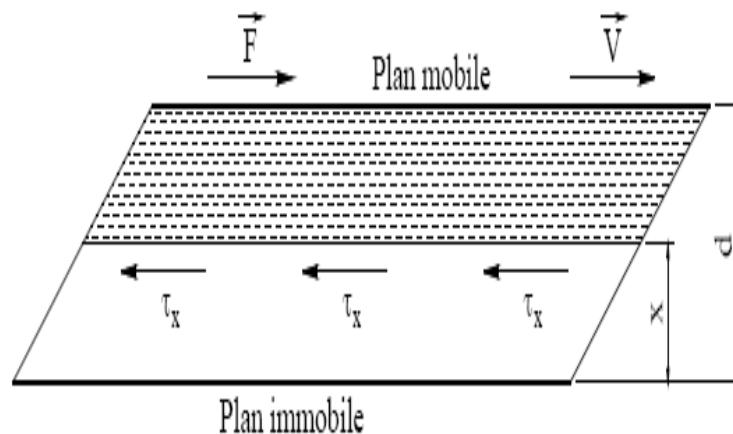


Figure 2-7. Représentation schématique du principe de fonctionnement [24]

c. Les rhéomètres rotatifs à cône-plan

La géométrie cône-plan est composée d'un plan fixe et d'un cône de symétrie cylindrique tronqué à sa base (pour éviter en pratique les frottements du cône sur le plan fixe, car le sommet fictif du cône est en contact avec ce plan). Le plan fixe est dans la pratique un disque coaxial avec le cône. Le fluide étudié est compris entre le cône et le plan.

Le principe de fonctionnement consiste à cisailier un échantillon de fluide entre un plateau fixe et un cône de rayon  $R$ , perpendiculaire au plateau, en rotation. Sous l'effet d'un couple de rotation  $M$  constant le cône est animé d'une vitesse angulaire  $\Omega$  constante. L'angle  $\varphi$  entre les génératrices du cône et le plateau est très faible, inférieur à  $5^\circ$ . La Figure 2-8 représente schématiquement le principe de fonctionnement des rhéomètres rotatifs à cône - plateau.[23]

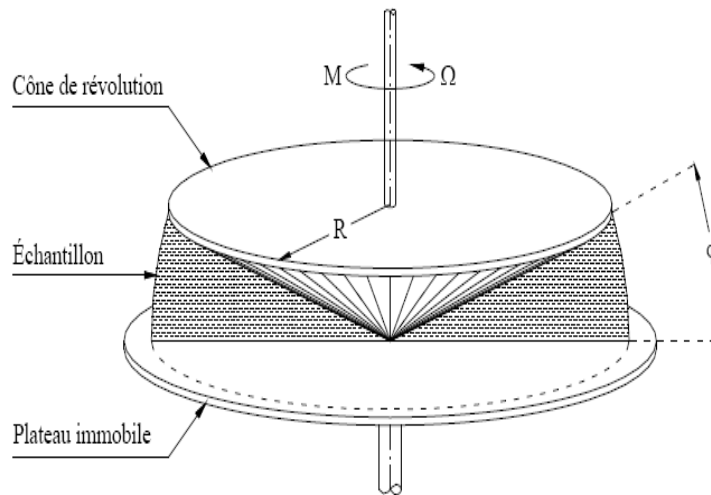


Figure 2-8. Représentation schématique du principe de fonctionnement des rhéomètres rotatifs à cône – plan [24]

#### d. Les rhéomètres rotatifs à plan-plan

Dans un rhéomètre plan-plan, le fluide est entre deux disques circulaires de rayon  $R$  coaxiaux séparés par un entrefer  $e$  comme présenté sur la Figure 2.6. Leur surface peut être lisse ou rugueuse (permet d'éviter le glissement aux parois).

Le disque inférieur est fixe, l'écoulement dans cette géométrie est généré par la rotation du cylindre supérieur.

Calculer les propriétés d'écoulement d'un fluide avec ce type de géométrie est compliqué car contraintes et taux de cisaillement dépendent de la distance à l'axe de rotation [20]. La géométrie cône-plan s'affranchit de ce problème car le cisaillement est homogène dans l'entrefer.

Utiliser une géométrie cône-plan est donc préférable pour un mélange homogène. En revanche, l'utilisation de la géométrie plan-plan se justifie pleinement pour les suspensions granulaires.

En effet, il est possible d'adapter la taille de l'entrefer en fonction du type de fluide utilisé et donc en fonction de la taille des particules et on ne rencontre pas de problèmes liés à la pointe.

D'autre part, il a été observé que l'éjection de l'échantillon de la périphérie des disques se produit pour des gradients de cisaillement plus élevés qu'en cône-plan.

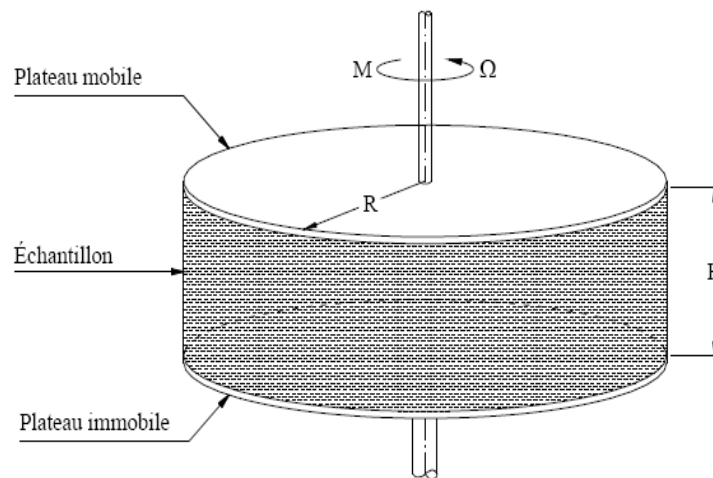


Figure 2-9. Représentation schématique du principe de fonctionnement des rhéomètres rotatifs à plan – plan [24]

#### e. Les rhéomètres de type poiseuille

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

### 2.3.4. Les rhéomètres existants

Après avoir parlé brièvement des type d'appareils de mesures rhéologiques selon le principe de fonctionnement, nous allons maintenant présenter les rhéomètres à béton qu'ont fait l'objet ces vingt dernières années de nombreux développements. Nous présentons ici les rhéomètres les plus utilisés.

#### a. Rhéomètre Cemagref-IMG

Le rhéomètre Cemagref-IMG présenté sur la figure. 2.10 est une géométrie à cylindres coaxiaux (rayon intérieur  $R_1 = 38$  cm, rayon extérieur  $R_2 = 60$  cm,  $e = 22$  cm) fonctionnant à vitesse imposée. Le cylindre extérieur est fixe tandis que le cylindre intérieur est mobile. Les

parois de ce dernier sont couvertes de grilles et celles du cylindre extérieur sont garnies de lames verticales pour éviter les glissements et permettre une meilleure adhérence du matériau. La condition ( $e = 5 D_{max}$ ) conduit pour les bétons, du fait de leur large étendue granulométrique, à avoir un appareillage gigantesque. Ainsi, pour les suspensions de grosses particules, il est très difficile d'avoir à la fois les conditions ( $e = 5 D_{max}$ ) ou ( $e = 30 D_{max}$ ) et ( $R2/R1 = 1.21$ ). [12]



*Figure 2-10. a) vue générale du rhéomètre Cemagref-IMG, b) cylindres intérieur et extérieur [22]*

### **Procédure d'essai**

Les tests sont effectués par un contrôle manuel de la puissance du moteur. La procédure est la suivante:[22]

- Le couple nécessaire pour contrer le frottement du joint est mesuré en présence d'une petite quantité de béton dans le rhéomètre (environ 55 mm de béton est nécessaire pour couvrir le joint) pour des vitesses de rotation décroissantes.
- Le rhéomètre est ensuite rempli de béton et la hauteur du béton est mesurée.
- La vitesse de rotation est rapidement augmentée au maximum puis diminue en 6 à 8 paliers pour une durée d'environ 10 s chacun, réduite au minimum. le Couple et la vitesse de rotation sont enregistrés à une fréquence de 5 Hz.
- Pendant l'essai, la largeur de la zone cisailée est manuellement évaluée avec une règle sur la surface supérieure du béton pour différentes vitesses de rotation.

Tattersall a été le pionnier dans l'utilisation d'appareils adaptés à la rhéologie des suspensions granulaires en introduisant des rhéomètres de type malaxeur appelé MKI.

*b. Rhéomètre two-points test*

Le principe de l'appareil a été modifié (géométrie de l'agitateur par Tattersall et deux versions ont été développées : le MK2 et le MK3).

- Le MK2, plus connu sous le nom de "two-point test" ou appareil de tattersall est conçu pour les bétons de grandes maniabilités (affaissements supérieurs à 75 mm au cône d'Abrams).

L'agitateur de forme cylindrique est garni de pales de forme hélicoïdale ininterrompue. Cette configuration permet de créer un mouvement ascendant pour lutter efficacement contre la tendance naturelle du béton à la sédimentation. La cuve est également munie de pales parallèles à son axe pour éviter le glissement aux parois. Le béton dans la cuve est cisailé de manière concentrique. Cet appareil était le siège d'un champ de vitesse inconnu et complexe du fait de l'absence de symétrie. L'auteur en était resté à une description analogique du comportement du matériau, au moyen d'une relation entre le couple résistant et la vitesse de rotation [12]. Malgré les imperfections et sa taille gigantesque comparée au BTRheom, « le plus ancien » et « le plus célèbre » two-point test reste l'un des appareils le plus utilisé en laboratoire.

- Le MK3 est utilisé pour les bétons de faibles maniabilités (affaissements inférieurs à 50mm). L'agitateur en forme de H effectue lors des essais un mouvement planétaire. Ce mouvement permet de conserver l'échantillon homogène lors des essais.



Figure 2-11. Rhéomètre Two-Point [22]

*Procédure d'essai*

Des études antérieures ont montré que procédure de test consiste à obtenir la relation de Couple / Vitesse de rotation en un seul passage à vitesse décroissante de 6,2 rad/s à 0,62 rad/s (60 tr/min à 0,6 tr/min) pendant 30s [22].

c. Rhéomètre IBB

Beaupré a repris la configuration de MK3 pour construire « UBC rhéomètre ». Complètement automatisé et commercialisé sous le nom de IBB (Figure 2.12). L'essai est piloté par ordinateur. Les vitesses et les couples sont mesurés et enregistrés automatiquement sur l'ordinateur à l'aide d'un capteur de vitesse et d'une cellule de charge. Le seuil de cisaillement et la viscosité plastique sont donnés directement par l'appareil en unité machine, c'est-à-dire respectivement en (N.m) et (N.m.s). Les vitesses imposées ne sont pas fixes, donnant une plus grande marge de manœuvre à l'opérateur qui peut dès lors choisir les paramètres d'essais qui conviennent le mieux à son essai.

l'IBB a été testé avec succès dans une large gamme de bétons allant des bétons d'affaissement de 20 mm au cône d'Abrams, aux BAP, aux bétons hautes performances (BHP), aux bétons pompés, aux bétons de fibres, etc.

L'IBB est constitué d'un agitateur en forme de H qui peut tourner en mouvement planétaire ou axial dans une cuve cylindrique fixe. Les dimensions de la cuve varient ou non selon la nature du matériau (béton ou mortier) cisailé et la version portable ou non. La quantité de béton (21 litres) utilisée pour chaque essai est plus importante que pour la plupart des rhéomètres à béton.



Figure 2-12. Rhéomètre IBB [22]

d. Rhéomètre BML

Le principe de l'appareil de Tattersall a été modifié par Wallevik et Gjorv en développant le Rhéomètre BML (Building Material Learning) (Figure 2.13). C'est un rhéomètre à cylindres coaxiaux. Le cylindre intérieur est fixe tandis que le cylindre extérieur

tourne autour de l'axe à une vitesse angulaire fixe. Les cylindres sont munis de redans parallèles à leur axe. Cette configuration permet une meilleure adhérence du matériau aux outils et limite le glissement à la surface des cylindres. A cause des effets tridimensionnels au fond et à la surface de la cuve, le gradient de vitesse et la contrainte sont mesurés dans une zone intermédiaire où le gradient de vitesse est radial.

Sa géométrie permet de développer facilement les équations et de déterminer les paramètres rhéologiques en unités fondamentales. Le pilotage (vitesse de rotation, protocole opératoire), l'acquisition des résultats de mesures (couple et vitesse de rotation) et le calcul des résultats bruts sont entièrement automatisés et réalisés en temps réel à l'aide d'un logiciel spécifique nommé "freshwin".

Les dimensions de l'appareil ( $R_2 = 145$  cm,  $R_1 = 100$  mm, hauteur effective  $L = 150$  cm) sont satisfaisantes du point de vue de l'effet de paroi [21].



*Figure 2-13. Rhéomètre BML [23]*

### Procédure d'essai

L'appareil est piloté par le logiciel Fresh-Win, chaque test prend environ 3 min à 5 min, à partir du remplissage du récipient. Au cours de l'essai, le matériau est cisailé pendant environ une minute. Plusieurs systèmes de mesure peuvent être utilisés en fonction de la taille maximale des agrégats dans la suspension à tester. Les paramètres de chaque système de mesure sont intégrés dans le logiciel FreshWin.

e. Rhéomètre ICAR

Le rhéomètre ICAR (International centre aggregate research) a été développé par Eric P. Koehler en 2007. Il est composé de 3 parties : Un récipient cylindrique d'une hauteur  $H= 30$  cm et d'un diamètre  $D= 30,5$  cm, Une pale en acier d'une hauteur  $h= 12,5$  cm et d'un diamètre  $d= 12,5$  cm et Un agitateur

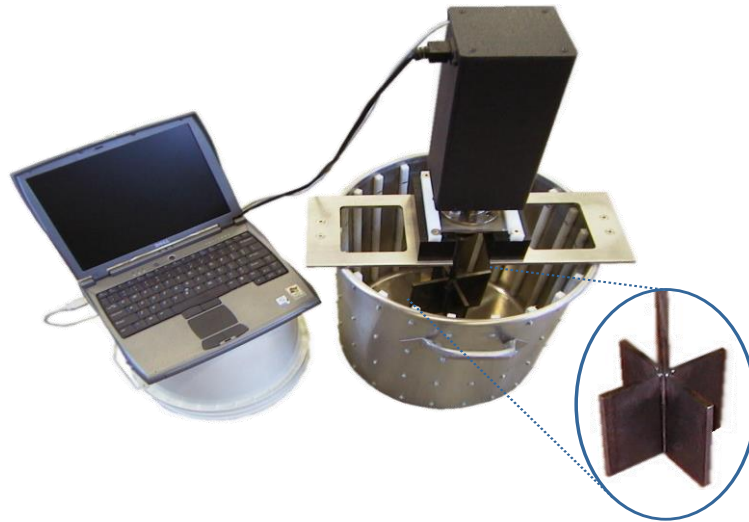


Figure 2-14. Rhéomètre ICAR [22]

Procédure d'essai

- Une fois le récipient est rempli de béton, on émerge la pale dans le récipient et le béton sera cisailé en imposant le profil vitesse représenté dans la figure 2.15.
- L'essai est fait en moins d'une minute.[22]

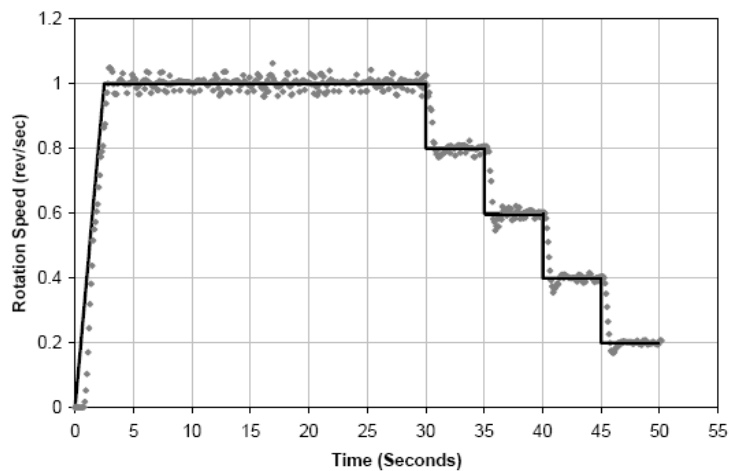


Figure 2-15. Profil vitesse pour le rhéomètre ICAR

*f. Rhéomètre BTRHEOM*

Après l'analyse des défauts des rhéomètres précédents, le rhéomètre LCPC ou BTRheom (Figure 2.16) a été développé au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées de Paris par une équipe dirigée par De Larrard. Cet appareil est destiné à la mesure des propriétés rhéologiques des bétons d'affaissements au cône d'Abrams supérieurs à 100 mm, des bétons autoplacants avec des granulats de diamètres inférieurs à 25 mm en présence ou non de vibration[21].

Les principales grandeurs rhéologiques mesurées par cet appareil sont :

- Le seuil de cisaillement avec ou sans vibration et le seuil de cisaillement au repos,
- La viscosité plastique avec ou sans vibration,
- La dilatance du béton.

Le rhéomètre BTRheom est un appareil qui peut être utilisé sur chantier comme en laboratoire. C'est un rhéomètre plan-plan dont le pilotage (vitesse de rotation, vibration), l'acquisition des résultats de mesures (couple et vitesse de rotation) sont entièrement automatisés et réalisés en temps réel à l'aide d'un logiciel spécifique nommé "ADRHEO". Le rhéomètre BTRHEOM est composé de 8 parties indépendantes :[21]

- Un récipient dont le volume intérieur est un cylindre creux, contenant l'échantillon de béton ;
- Une pièce tournante permettant de mettre la section supérieure de l'échantillon en rotation. Cette pièce est constituée de trois parties : des pales supérieures de 20 mm de profondeur (ce qui correspond à la taille maximale du plus gros grain), ayant la forme d'une roue à rayons ; une jupe interne (celle-ci est en fait un axe creux) de 2 cm de rayon ; une jupe externe cylindrique de 12 cm de rayon. Ces trois parties sont solidaires les unes des autres. La jupe externe cylindrique permet de garder une configuration symétrique par rapport au plan médian horizontal de l'échantillon ;
- Un système de joints de feutre dont l'un est posé dans une gorge située sur l'extérieur de la jupe de la pièce tournante ; l'autre, de type autocollant, est collé sur la paroi intérieure de l'axe creux de la même pièce, dans le plan médian de l'échantillon. Ce système est destiné à limiter les remontées de matériau entre la paroi extérieure de la pièce tournante et la paroi intérieure du récipient.
- Un système de pales de blocage de même forme et taille que les pales de la pièce tournante, placées au fond du récipient, pour empêcher la rotation de la section inférieure de l'échantillon.

- Un disque solidaire d'un axe, posé à la surface de l'échantillon en cours d'essai, capable de mesurer la hauteur de ce dernier.
- Le corps de l'appareil de forme cylindrique, coiffé par un plateau supportant le récipient. Il contient les deux moteurs à courant continu du rhéomètre, le premier servant à mettre le système de pales supérieures en rotation, et le deuxième permettant d'appliquer une vibration verticale sur le plateau, indépendamment du reste du corps.
- Une boîte d'alimentation.
- Enfin, un micro-ordinateur pour le pilotage des essais et l'acquisition des mesures.



Figure 2-16. Le rhéomètre BTRHEOM [23]

### Procédure de l'essai

L'essai se déroule selon le profil vitesse suivant :[21]

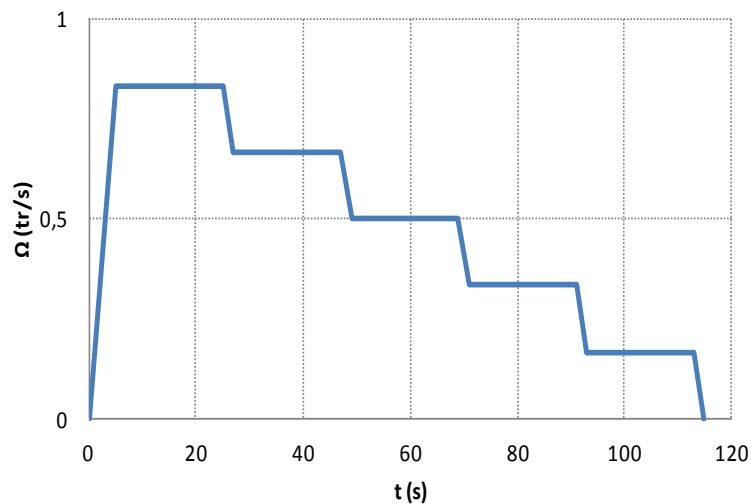


Figure 2-17. Profil vitesse pour BTRHEOM.

g. Rhéomètre Esttelé

Le rhéomètre a été développé par Esttelé et al. Il est composé de 3 parties. Un récipient cylindrique d'un diamètre  $D=35$  cm, avec une paroi interne rigoureuse, une pale en acier d'une hauteur  $h=15$  cm et d'un diamètre  $d=15.6$  cm et un moteur équipé d'un capteur de couple de capacité de 100 Nm et d'une vitesse de rotation maximale de 120 tr/min.[22]

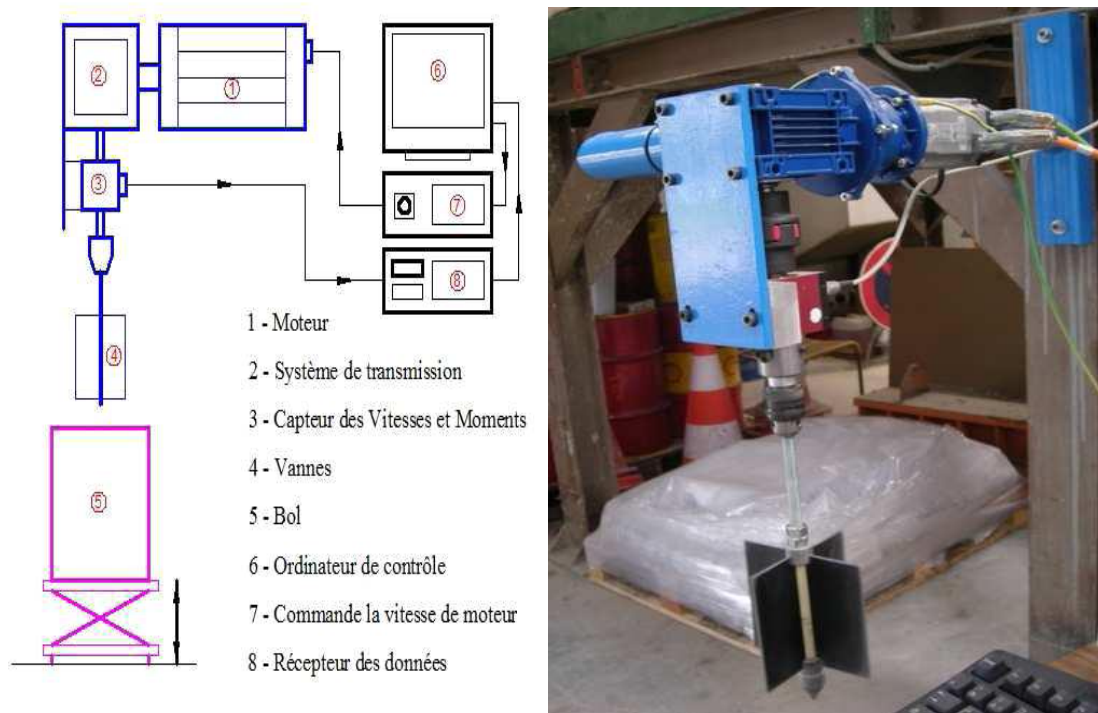


Figure 2-18. Schéma de principe dispositif expérimental et du rhéomètre à béton [24]

Procédure d'essai

- Le béton est placé dans le récipient cylindrique.
- Le récipient est levé à l'aide d'une table élévatrice jusqu'à immersion de l'outil dans le béton de façon que la pale soit à l'arase du béton.
- Le logiciel associé permet de générer et lancer le profil de cisaillement présenté dans la figure 2-19.

L'acquisition des données, vitesse vraie de rotation de l'outil  $\Omega$  et couple  $M$ , est instantanée

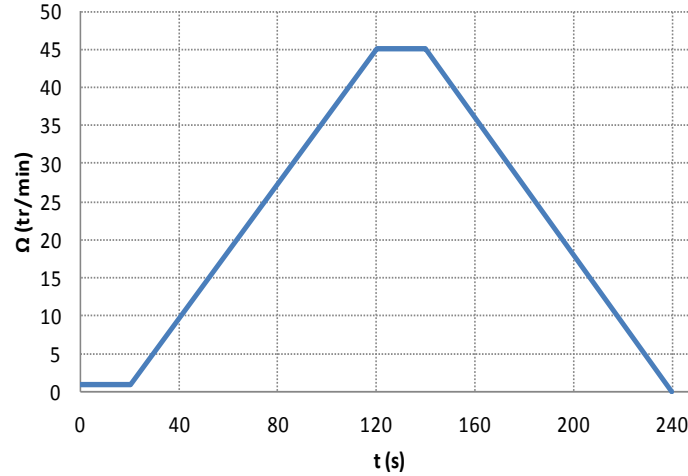


Figure 2-19. Profil vitesse pour le rhéomètre Estellé et al [24]

L'exploitation des résultats

L'exploitation des mesures rhéométriques consiste à déterminer l'évolution de la contrainte de cisaillement ( $\tau$ ) en fonction du taux de cisaillement ( $\dot{\gamma}$ ) à partir des couples ( $M_i - \Omega_i$ ) mesurés. , la vitesse de cisaillement s'exprime par les équations (2-6) et (2-7), lorsque respectivement le fluide est partiellement cisailé ou complètement cisailé dans l'entrefer

$$\dot{\gamma} = 2M \frac{d\Omega}{dM} \tag{Equation 2-6}$$

$$\dot{\gamma} = 2 \frac{M \frac{d\Omega}{dM}}{\left(1 - \frac{R_b^2}{R_c^2}\right)} - \frac{\Omega - M \frac{d\Omega}{dM}}{\text{Ln}\left(\frac{R_b}{R_c}\right)} \tag{Equation 2-7}$$

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

Le taux de cisaillement engendré par une vitesse de rotation  $\Omega_i$  peut donc être calculé par l'équation (2-8) ci-dessous :

$$\dot{\gamma}_i = \max(\dot{\gamma}_{j[2-6]}; \dot{\gamma}_{j[2-7]}) \tag{Equation 2-8}$$

Avec

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

Ainsi la contrainte correspondante à la vitesse de rotation  $\Omega_i$  s'obtient via l'équation (2-9) ci-dessous :

$$\tau_i = \frac{1}{2}(\tau_{j-1} + \tau_{j+1}) \quad \text{avec} \quad \tau_j(M) = \frac{M_j}{2\pi h R_b^2} \quad \text{Equation 2- 9}$$

Les équations (2-8) et (2-9) permettent de passer du couple ( $M_i - \Omega_i$ ) au couple ( $\tau_i - \dot{\gamma}_i$ ) et de déterminer les paramètres rhéologiques du béton testé.

## 2.4. Loi de comportement rhéologique des matériaux

Le développement de rhéomètres dédiés à l'étude de la rhéologie des bétons frais a permis d'identifier le comportement des bétons à l'état frais [21]. Plusieurs modèles ont été établis (Tableau 2-1) et beaucoup de travaux ont traité de la pertinence et de l'adaptabilité de ces modèles décrire le comportement rhéologique des bétons. Il en ressort que le modèle Herschel-Bulkley (Equation 2-10) permet la meilleure description de l'écoulement des bétons.

$$\tau = \tau_0 + K(\dot{\gamma})^n \quad \text{Equation 2- 10}$$

Où  $\tau$  est la contrainte de cisaillement (Pa),  $\tau_0$  le seuil d'écoulement en cisaillement (Pa),  $K$  le coefficient de viscosité ou facteur de consistance ( $\text{Pa}\cdot\text{S}^n$ ),  $n$  l'indice de viscosité et  $\dot{\gamma} = \frac{\partial y}{\partial t}$  la vitesse de déformation ( $\text{S}^{-1}$ ) si  $n > 1$  le béton est dit rhé-épaississant, si  $n < 1$ , il est dit Rhé-fluidifiant et si  $n = 1$  le fluide est Bingham.

Certain auteurs ont montré que le modèle de Herschel-Bulkley (Equation 2-10) permet une bonne description du comportement rhéologique des bétons cependant la nécessité d'identifier trois paramètres,  $\tau_0$ ,  $K$  et  $n$ , rend l'utilisation de ce modèle difficile car elle est couteuse en temps et en techniques d'expérience.

En pratique, on considère que le comportement des bétons à l'état frais s'apparente à celui d'un fluide viscoplastique à seuil et suit le modèle de Bingham (Equation 2-11)

$$\tau = \tau_0 + \mu\dot{\gamma} \quad \text{Equation 2- 11}$$

Avec :

$\tau$  (Pa) est la contrainte de cisaillement                       $\mu$ (Pa.s) est la viscosité plastique

$\tau_0$  (Pa) est le seuil de cisaillement                               $\dot{\gamma}$  (1/s) est le taux de cisaillement

Le terme  $\tau_0$  apparait comme la contribution de la phase solide et le terme  $\mu \dot{\gamma}$  comme celle de la phase liquide.[22]

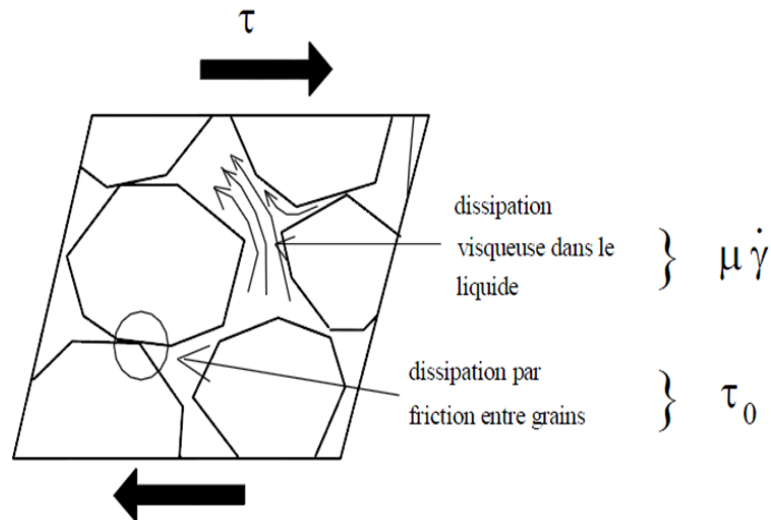


Figure 2-20. Contribution de phase solide et de la phase liquide à la résistance au cisaillement du béton [5]

Le comportement du béton à l'état frais est complètement décrit via deux propriétés **le seuil de cisaillement ( $\tau_0$ )** et **la viscosité plastique ( $\mu$ )**. 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.

Tableau 2- 1 Modèle Rhéologique

Auteurs	Modèles
Einstein (1911)	$\mu = \mu_0(1 + [\mu]\Phi)$
Arrhenius (1917)	$\mu = \mu_0 \exp([\mu]\Phi)$
Mooney (1951)	$\mu = \mu_0 \exp\left(\frac{[\mu]\Phi}{1 - \Phi/\Phi_{\max}}\right)$
Krieger et Dougherty (1959)	$\mu = \mu_0 \left(1 - \frac{\Phi}{\Phi_{\max}}\right)^{-[\mu]\Phi_{\max}}$
Thomas (1965)	$\mu = \mu_0(1 + 2,5\Phi + 10,05\Phi^2 + 0,00273e^{16,6\Phi})$
Stedman et al. (1990)	$\mu = \mu_0 \left(1 + 0,75 \frac{\Phi/\Phi_{\max}}{1 - \Phi/\Phi_{\max}}\right)^2$
Ferraris et de Larrard(1998)	$\mu = \exp\left[26,75\left(\frac{\Phi}{\Phi^*} - 0,7448\right)\right]$
Sedran (1999)	$\text{Log } \mu = 7,14 \frac{\Phi}{\Phi_{\max}} - 3,15 + 0,809 \left(1 - \frac{S_p}{S_p^*}\right)^2$

<p><math>\mu</math> est la viscosité de suspension ;</p> <p><math>\mu_0</math> est la viscosité du fluide ;</p> <p><math>[\mu]</math> est le coefficient de viscosité intrinsèque (2,5 pour les sphères).</p>	<p><math>\Phi</math> est la concentration de solide ;</p> <p><math>\Phi_{\max}</math> est la concentration maximale de solide ;</p> <p><math>K</math> est une valeur constante ;</p> <p><math>Sp</math> est la teneur en superplastifiant ;</p> <p><math>Sp^*</math> est la teneur en saturation de superplastifiant.</p>
---	---

## 2.5. Etude rhéologique des mortiers autoplaçants

Le fait que les propriétés des BAP sont généralement liées aux celles de leurs mortiers autoplaçants (MAP). Il est intéressant d'étudier le comportement rhéologique des bétons autoplaçant sur des mortiers autoplaçants. Cette démarche présente l'avantage de rendre les essais moins lourds vue que le volume du matériau requis devient plus faible.

Dans le BAP, la phase du mortier est une phase très importante car elle fournit la lubrification entre les particules des gros granulats, et la stabilité globale du béton.

Pour que le mortier puisse être considéré comme autoplaçant, il doit répondre à deux exigences essentielles : présenter une fluidité élevée et une résistance suffisante aux ségrégations statique et dynamique. En termes de rhéologie, cela revient à abaisser le seuil de cisaillement du mortier, tout en maintenant la viscosité plastique du mélange. A cet égard pas mal de recherches ont été faite dont les auteurs ont étudiés la rhéologie des mortiers autoplaçants partent de formulation, l'influence des ajouts minéraux et de superplastifiant, ainsi que la résistance mécanique. Ce pendant nous citons quelques travaux.

D'après la littérature, plusieurs chercheurs ont évalué la fluidité du mortier par les essais empirique étalement au mini cône et l'essai de l'entonnoir (V-funnel) car il existe une corrélation entre ces essais et mesures rhéologique effectuées par un rhéomètre.

## 2.6. Formulation de mortier autoplaçant

Le béton autoplaçant est généralement considéré comme un mélange bi-phasique, constitué d'une phase granulaire et d'une phase fluide. Grace à l'évolution du BAP à travers le monde, de nombreuses méthodes de formulation ont été publiées dont les plus répandues sont mentionnées dans le premier chapitre. Elles ont été élaborées pour répondre aux exigences d'ouvrabilité des bétons autoplaçants. Le principe est d'obtenir des compositions fluides et en même temps stables vis-à-vis au phénomène de ségrégation. La fluidité peut être obtenue par

l'introduction des superplastifiants hauts réducteurs d'eau et la stabilité peut être obtenue par l'introduction des adjuvants viscosifiants ou l'introduction des additions minérale.

La formulation d'un BAP par le biais de son mortier trouve sa justification dans quelques publications.[24] [25] montrent à cet effet que la rhéologie d'un béton se corrèle bien avec celle de son mortier.

La formulation des MAP la plus connue est celle développée à l'Université de Kochi. Le principe de cette approche repose sur les conditions suivantes [17]:

1. Limitations de volume des granulats (volume important de pâte).
2. Diminution du rapport E/L.
3. Utilisation des superplastifiants.

Cette méthode présente l'avantage d'être applicable même en utilisant des matériaux locaux, mais à condition de faire quelques modifications notamment au niveau de la teneur en sable[26]. Du moment que la rhéologie du BAP est fortement liée à celle du mortier autoplacant (MAP) et en suivant les étapes de la méthode générale, la formulation du mortier autoplacant constitue une étape primordiale en vue de confectionner un BAP.

Les mortiers autoplacants sont caractérisés par une grande déformabilité (faible seuil de cisaillement) permettant d'assurer l'écoulement sous l'effet gravitaire du BAP, et par une viscosité appropriée pour supporter les gros granulats et éviter tout risque de ségrégation du BAP. Du moment que le mortier occupe un volume important dans les BAP (presque 70% du volume du BAP) [27], les résultats d'essais sur le MAP seront concluants et peuvent donner une grande idée sur le comportement rhéologique du BAP. Selon Domone et Jin [25] les mortiers sont testés pour les raisons suivantes :

- ✓ Les BAP comportent un faible volume de gravillons par rapport aux bétons ordinaires (31% à 35%), donc les propriétés des mortiers sont dominantes ;
- ✓ L'évaluation des propriétés du mortier constitue une étape intégrale dans la formulation des BAP ;
- ✓ Tester un mortier est plus commode qu'un béton.

Les mortiers sont testés à travers les essais empiriques, (l'étalement au mini-cône et l'essai d'écoulement au mini-entonnoir en V). Ce pondent, ils ont très efficace à la présence d'un rhéomètre. Ces tests ont pour but de déterminer la teneur en eau (rapport Eau/Poudre), la

teneur en sable (rapport Sable/Mortier) et le dosage en superplastifiant (rapport superplastifiant / Poudre)[26][28].

### **2.6.1. Influence des paramètres de composition des MAP**

Le mortier autoplaçant correspond à l'ensemble ciment, additions, eau efficace, air, adjuvants. Chacun de ces éléments joue un rôle différent dans le comportement du mortier frais, l'étude du comportement rhéologique de l'ensemble devient particulièrement difficile si on désire la conduire en analysant l'influence de tous les éléments.

Un des arguments souvent avancé en faveur de l'utilisation des ajouts minéraux est qu'ils permettent d'économiser de l'énergie et de préserver les ressources naturelles comparées au ciment Portland. Cet argument est en partie juste, mais le principal argument en faveur de l'incorporation de ces matériaux dans les mortiers et bétons est en réalité qu'ils apportent des avantages techniques considérables. En effet, ils affectent la cinétique de la réaction d'hydratation, influencent les caractéristiques rhéologiques des mortiers et bétons à l'état frais et contribuent positivement aux résistances mécaniques des mortiers et bétons à l'état durci, ceci en raison de leur composition chimique, de leur réactivité, de leur granulométrie ainsi que de la forme de leur élément.

L'utilisation des additions minérales est intéressante sur le plan rhéologique car ils sont d'une part moins réactifs à court terme que le ciment, ce qui permet d'avoir un temps prolongé d'ouvrabilité et d'autre part, la combinaison de plusieurs matériaux cimentaires ayant des granulométries différentes permet aussi d'améliorer la granulométrie totale des particules fines ainsi que celle du mélange de béton. Ceci favorise l'augmentation de la stabilité et l'accroissement de la déformabilité du béton. D'autre part, le grand volume d'additions minérales utilisées dans les mortiers autoplaçants pour remplacer une partie du ciment contribue à la réduction de la chaleur d'hydratation et du retrait du béton. En général, une matière pouzzolanique tel que la cendre volante améliore la déformabilité du béton (particules sphériques et lisses), le laitier est supposé d'améliorer la résistance et la maniabilité (particules vitreuses). La fumée de silice augmente la résistance à la séparation des constituants du béton et réduit significativement les phénomènes de ressuage et de ségrégation. (Khayat et Guizani, cités par [29]).

Généralement les BAP contiennent une quantité de ciment et de fines de l'ordre de 500 kg/m<sup>3</sup> de dimension inférieure à 80 µm. Les additions utilisées sont en général des cendres

volantes, fumées de silice, laitier de haut fourneau ou les fillers calcaires. Nous allons nous intéresser dans notre étude à la formulation des MAP avec les pouzzolanes naturelles, le laitier de haut fourneau et la poudre de marbre en raison de leur coût essentiellement et leur disponibilité en abondance dans notre territoire.

### 2.6.2. L'influence de superplastifiant

L'apparition des bétons autoplaçants et des bétons à Hautes performances (BHP) Est fortement liée aux progrès réalisés dans le domaine des adjuvants et plus particulièrement celui des superplastifiants (SP). L'action principale des superplastifiants est de flocculer les grains de ciment. Une action de répulsion électrostatique agit en neutralisant les charges électriques présentes à la surface des grains et/ou par répulsion stérique en écartant les grains les uns des autres, grâce à des chaînes moléculaires très longues. L'eau piégée par les floccs est de nouveau disponible pour la maniabilité du béton (cf. Figure 1.4). Il est alors possible de mettre en œuvre des bétons très fluides, avec des rapports E/C faibles. [30]

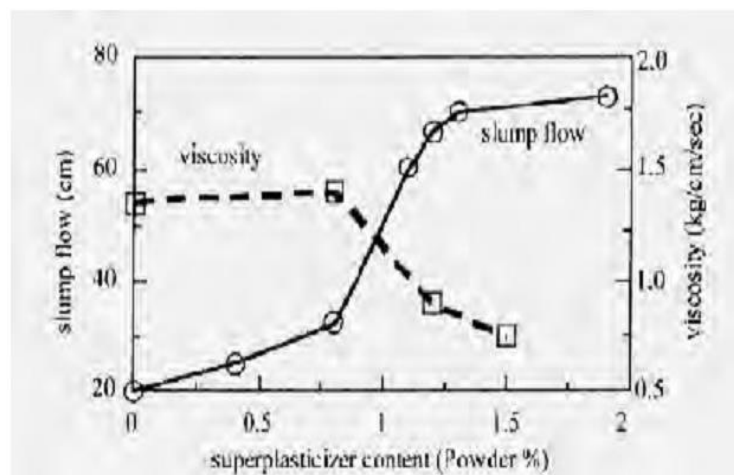


Figure 2-21. Influence du superplastifiant sur l'étalement et la viscosité d'un béton [26]

Le premier effet du superplastifiant est évidemment d'augmenter l'étalement du béton Cette tendance est clairement constatée sur l'étude de [31], ou ils ont notés que l'augmentation du dosage en superplastifiant a engendré une augmentation du taux de ségrégation. Ceci confirme l'influence positive de ce produit vis-à-vis de la ségrégation statique du BAP. Sandrine Bethmont [34] a également étudié le mécanisme de ségrégation des bétons autoplaçants. Elle a constaté que l'effet du superplastifiant au-delà du dosage de saturation produit une ségrégation et un ressuage dont le volume d'eau de ressuage augmente lorsque le dosage en superplastifiant augmente.

### 2.6.3. L'influence de pouzzolane

Les pouzzolanes naturelles sont des produit généralement d'origine volcanique, ou des roches sédimentaires, présentant des propriétés pouzzolaniques. Elles sont essentiellement composées de silice réactive (dans des proportions supérieures à 25%), d'alumine et d'oxyde de fer. D'après Belaidi [6], l'incorporation de la pouzzolane naturelle seule (5-15%) améliore l'ouvrabilité des mortiers et des bétons autoplaçants, Par contre, l'utilisation de plus de 15% de la pouzzolane affecte négativement l'ouvrabilité. Bolifa [35] a confirmé que le seuil de cisaillement et la viscosité des mortiers à base de la pouzzolane diminuent en fonction de la croissance du taux de substitution

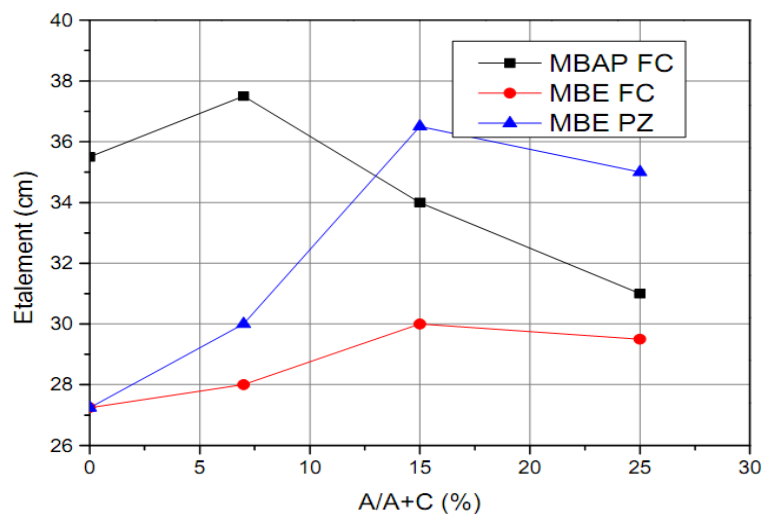


Figure 2-22. Etalement en fonction du rapport A/A+C [35]

D'autre Kaf et al. [33] ont étudiés la substitution de ciment par la pouzzolane, ils ont conclure que la perte de fluidité et de l'étalement des pâtes à base des additions binaires et ternaires ont été visiblement influencées par le dosage élevé de la pouzzolane. La fluidité de ces pâtes était acceptable avec le dosage optimal de 30 % de pouzzolane.

Ouai et bedj [37] ont conclu que l'incorporation de la pouzzolane seule dans le ciment avec un taux variant entre (5 à 30%) provoque une chute significative de l'ouvrabilité des MAP, ces derniers présentent des valeurs d'étalement variées entre 18.95 et 12 cm respectivement. Notons que le dosage en superplastifiant reste constant à 1% du poids de ciment pour tous les mortiers.

### 2.6.4. L'influence de laitier de haut fourneau

Le laitier de haut fourneau est un matériau hydraulique latent, c'est-à-dire qui présente des propriétés hydrauliques lorsqu'il a subit une activation convenable. 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 [7][8]. Shi et al. [8] montrent par exemple que les laitiers de hauts fourneaux adsorbent le superplastifiant. Il est donc possible que la demande en superplastifiant soit plus importante pour obtenir une même fluidité ou valeur de seuil de cisaillement. D'après Zahouani [3], l'incorporation du laitier dans la composition d'un BAP améliore la fluidité et l'homogénéité (évite le ressuage et la ségrégation), son action varie selon son dosage faible ou élevé. Agissant comme un correcteur granulométrique, les laitiers diminuent la porosité du béton et augmentent donc sa résistance.

Chahine [38] a conclu que l'ajout du laitier comme addition au BAP a entraîné une légère diminution de l'ouvrabilité et du seuil de viscosité de la pâte due vraisemblablement à la finesse de l'addition ( $\phi < 80\mu\text{m}$ ), alors pour garder une même fluidité et éviter cette diminution de l'ouvrabilité, on peut augmenter le dosage en superplastifiant jusqu'à son point de saturation. En effet, on remarque plus le dosage en laitier augmente, plus l'étalement diminue.

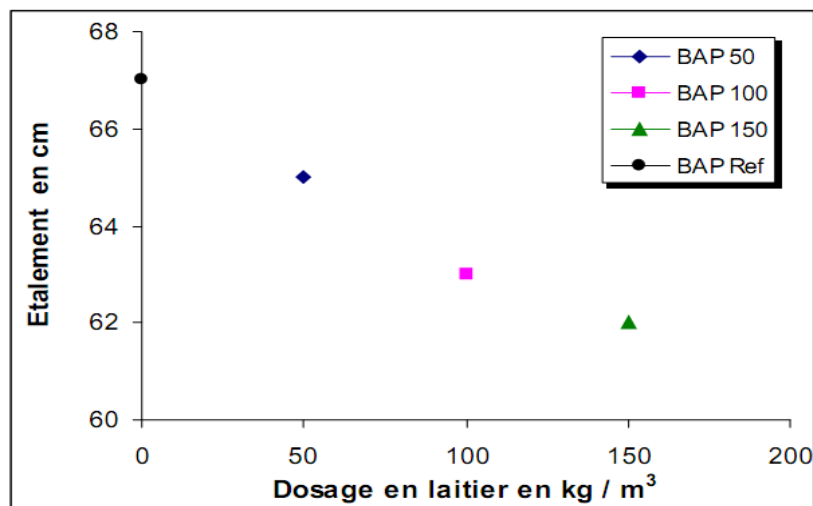


Figure 2-23. Evolution de l'étalement de BAP en fonction de dosage de laitier [38]

L'augmentation du dosage en laitier, conduit à une légère diminution de la ségrégation, par conséquent une amélioration de la stabilité.

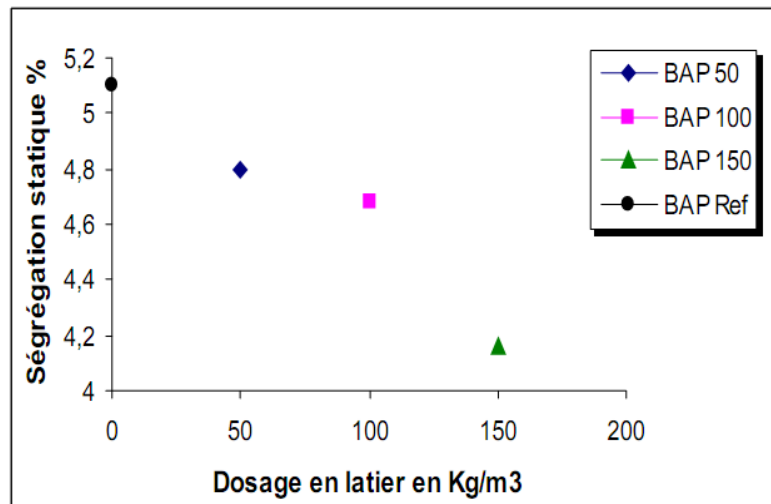


Figure 2-24. Evolution de la ségrégation statique en fonction de dosage de laitier [38]

Pour ségrégation dynamique qu'il n'y a pas une grande influence. Pour un dosage en superplastifiant fixe, la substitution de ciment par une quantité de laitier conduit à une légère diminution de la mobilité, par contre l'augmentation de l'ajout en laitier conduit à une diminution peu significative de la mobilité du béton à travers le ferrailage.

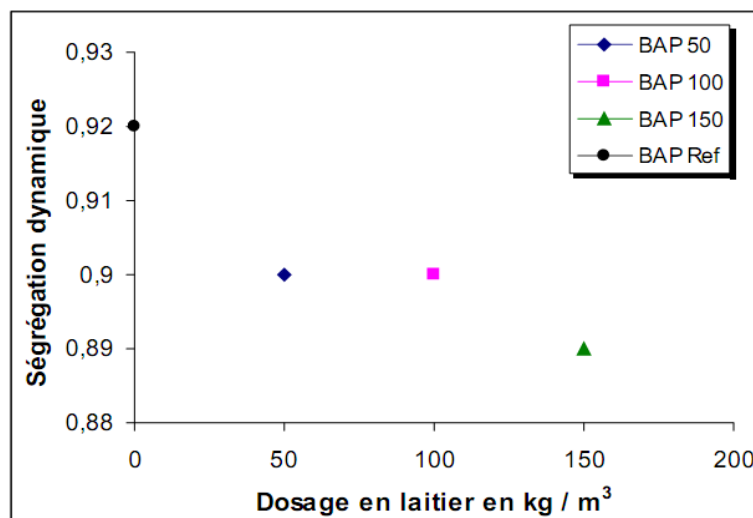


Figure 2-25. L'évolution de la ségrégation dynamique en fonction de dosage de laitier [38]

La diminution de l'ouvrabilité a été confirmée par les données bibliographiques Park, Noh, [7] Carisward et al. [9] Shi et al. [8]

L'ajout de laitier granulé conduit à une diminution de l'ouvrabilité des BAP, car le laitier adsorbe le superplastifiant par conséquent, le seuil de la viscosité de mélange diminue.

Visa versa Boukendakdji [26] a remarqué que l'étalement des mélanges de béton confectionnés avec des superplastifiants PC (à base de polycarboxylate), sont plus élevés par

rapport aux mélanges avec des superplastifiants PNS (à base de naphthalène sulfonates). Il a montré aussi que pour les deux types des superplastifiants, la pente du graphe diminue à partir de plus de 15% de laitier, ce qui veut dire que ce pourcentage est le meilleur du point de vue ouvrabilité

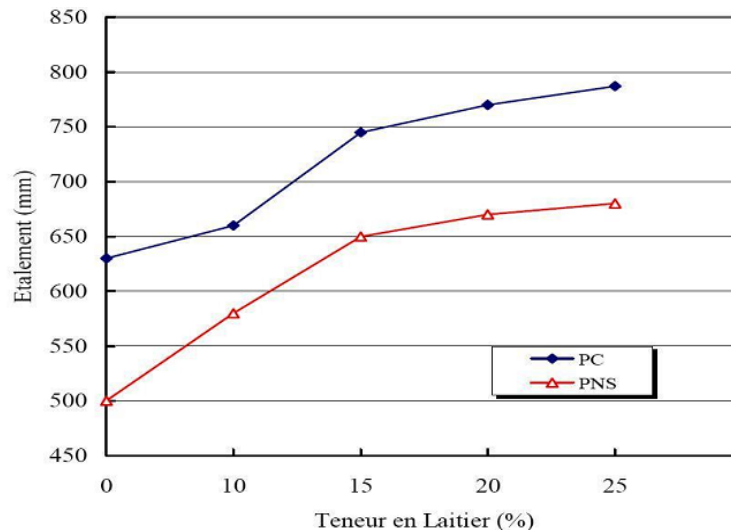


Figure 2-26. Etalement par cône d'Abrams des BAP en fonction de la teneur en laitier [26]

### 2.6.5. L'influence de poudre de marbre

La poudre de marbre c'est un déchet résultant de coupage, façonnage et lustration des pierres de marbres. Comme tous les ajouts incorporé dans le mortier autoplaçant, elle influencé positivement les propriétés rhéologique des MAP.

Belaidi et al. [36] a étudié l'incorporation de la poudre de marbre dans le mortier autoplaçant. il a conclu que la substitution du ciment avec des teneurs de poudre de marbre de 5 à 30% ont apporté un effet bénéfique sur le comportement rhéologique des mortiers autoplaçant.

Cependant Boukhalkhal [5] a confirmé que l'injection de poudre de marbre dans les BAP conduit non seulement à une diminution du seuil de cisaillement, mais aussi la viscosité plastique ; Comme il a fait part que la substitution de 20% de ciment par de la poudre de marbre est le plus efficace, autant pour la déformabilité, la capacité de passage, la résistance à la ségrégation et l'ouvrabilité que pour la rhéologie.

### **2.6.6. Corrélation entre les essais empiriques et les mesures rhéologiques**

Les différentes études issues de la littérature montrent qu'il existe une relation viscosité-temps d'écoulement. En revanche, la relation entre le seuil d'écoulement d'un BAP et son étalement, même si elle existe, semble difficilement quantifiable. Ceci pourrait s'expliquer par la différence entre les modes de mesures, un manque de sensibilité des appareils utilisés, ou encore par la difficulté de modéliser le comportement du matériau. Dans le cas des bétons traditionnels, la relation affaissement-seuil d'écoulement a clairement pu être mise en évidence [21], mais pour ces bétons, les valeurs de seuil sont bien plus élevées donc moins proches de la précision des appareils. L'existence d'une telle relation a également été mise en évidence dans le cas des mortiers et des pâtes de ciment. Notons que pour ces matériaux, les rhéomètres et/ou les géométries utilisées pour les mesures ne sont pas les mêmes que ceux utilisés pour les bétons.

Plusieurs chercheurs se sont intéressés à trouver des corrélations entre les caractéristiques rhéologique ( $\tau_0$ ,  $\mu_p$ ) et les grandeurs spécifiques obtenues à travers les essais empiriques les plus couramment utilisés (l'étalement et le temps d'écoulement). La majorité des auteurs s'accordent sur la nécessité de recourir à au moins deux essais empirique différents pour établir des relations entre grandeurs spécifiques et caractéristiques rhéologiques des bétons. Ainsi, il est maintenant admis que la viscosité est corrélée au temps d'écoulement mesuré au V-funnel, alors que le seuil de cisaillement dépend de l'étalement.[24]

## **2.7. Conclusion**

Ces deux chapitres ont été consacrés à une recherche bibliographique, d'une part pour une connaissance des travaux effectués sur la formulation et les propriétés rhéologiques des mortiers et bétons autoplaçants et pour se familiariser avec les nouveaux appareils. Et d'autre part elle sera la base des données pour la compréhension des phénomènes expérimentaux observés dans les différentes études rhéologiques et mécaniques.

Beaucoup de travaux ont penché vers la formulation des bétons autoplaçant et l'intérêt socio- économique et environnemental de l'incorporation des additions minérales. Plusieurs auteurs ont montré l'effet de la pouzzolane, le laitier et la poudre de marbre seul (combinaison binaire), ou des deux ensembles (combinaison ternaire). Beaucoup des études ont été faite dans le but d'améliorer la rhéologie des mortiers et bétons autoplaçants menu par des essais empiriques, toutefois reste peu des travaux qu'ont été axés sur l'étude de la rhéologie des

mortiers autoplacants formulés avec substitution de ciment de différents pourcentage de pouzzolane, laitier et poudre de marbre en combinaison binaire, ternaire et quaternaire menu par des essais à l'aide de rhéomètre. A cet effet nous visons à étudier l'écoulement des mortiers autoplacants par un rhéomètre dont lequel nous mesurons le taux de cisaillement  $\tau_0$  et la viscosité  $\eta$  des mélanges binaires, ternaires et quaternaires. On effectuons des substitutions de ciment en remplacement par combinaison binaire de pouzzolane, laitier et la poudre de marbre comme par combinaison ternaire de pouzzolane- laitier, pouzzolane- poudre de marbre et laitier- poudre de marbre, aussi par combinaison quaternaire de pouzzolane, laitier et poudre de marbre.

## **Chapitre 3 : Caractérisation des matériaux et procédure expérimentale**

### **3.1. Introduction**

Dans ce chapitre, nous exposons dans un premier temps les caractéristiques des matériaux utilisés pour la préparation des mortiers autoplaçants à base de différents pourcentages d'ajouts minéraux, il s'agit du sable, de ciment (C), de pouzzolane naturelle (Pz), le laitier de haut fourneau (L), de la poudre de marbre (PM), du superplastifiant (Sp) et de l'eau (E). Nous passons par la suite à la description de la méthode de formulation et procédure expérimental tout on base sur la rhéologie des mortiers autoplaçants à l'état frais. Nous terminons par la résistance mécanique des MAP à jeune âge.

### **3.2. Caractérisation des matériaux et méthodes d'essais**

#### **3.2.1. Le sable**

Le sable utilisé est un sable alluvionnaire provient d'oued M'zi wilaya de Laghouat. Les caractéristiques principales requises pour un sable à béton sont la propreté, définie par l'essai d'équivalent de sable la granulométrie déterminée par le module de finesse, la masse volumique et le coefficient d'absorption, ils sont déterminé par les essais suivants :

##### *a. Analyse granulométrique*

L'analyse granulométrique a été réalisé selon la norme NF EN 933-1, à l'aide d'une tamiseuse électrique (figure 3.1) où le sable passe à travers une série de tamis décroissante des mailles en (mm) 5 ; 2.5 ; 1.25 ; 0.63 ; 0.315 ; 0.16 ; 0.08.



*Figure 3-1. Tamiseuse électrique.*

A partir de l'analyse granulométrique on peut déterminer les caractéristiques des granulats et en particulier le module de finesse de sable alluvionnaire qui est défini comme le 1/100 de la somme des refus exprimés en pourcentage sur les différents tamis de la série suivante :

0.16 ; 0.315 ; 0.63 ; 1.25 ; 2.5 ; 5 (mm). A savoir  $M_f = 1,65$

La courbe granulométrique présentée dans la Figure 3.2.

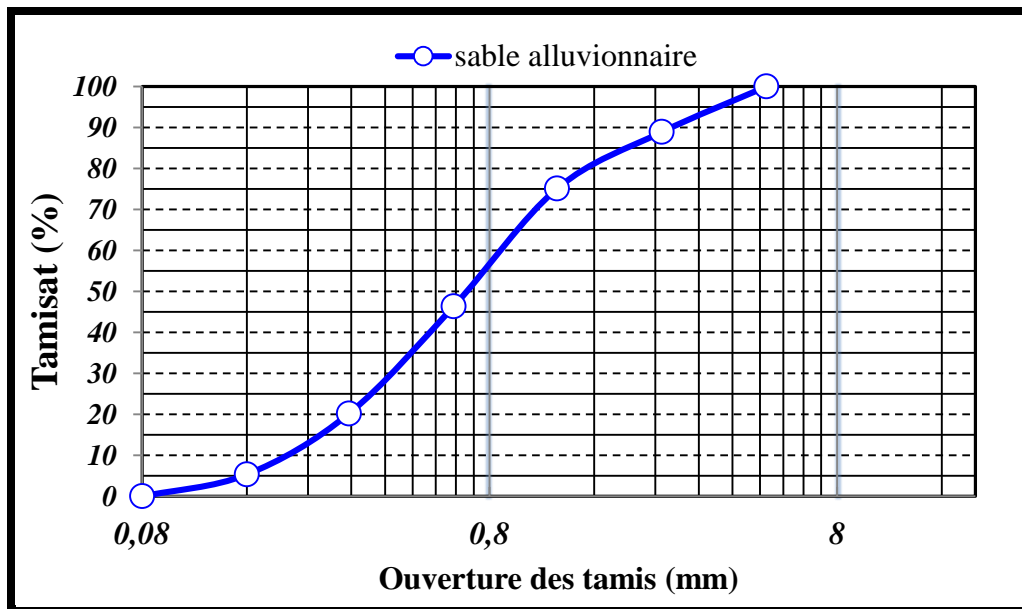


Figure 3-2. Courbe granulométrique du sable

#### b. Equivalent de sable

L'équivalent de sable ( $E_s$ ) permet de contrôler la propreté d'un sable et de déterminer le pourcentage des poussières nuisibles. Il a été réalisé conformément à la norme NF P 18-598. Cet essai consiste à plonger une masse définie de sable dans une éprouvette normalisée remplie par une solution lavante, après agitation, on laisse décanter le mélange pendant 20 minutes, (figure 3.3) ensuite on mesure la hauteur du sédiment ( $h_1$ ) et du sédiment + flocculant ( $h_2$ ). L'équivalent de sable est donné par la relation suivante :

$$E_s = 100 \cdot \frac{h_1}{h_2} \quad \text{Equation 3-1}$$

L'équivalent de sable de notre sable est de 86.2 sous-pression dont la norme  $E_{sv} \geq 85$  et de 91,6 avec piston dont la norme  $E_s \geq 80$  ce qui signifie que le sable utilisé est un sable très propre



Figure 3- 3. Essai de l'équivalent de sable.

c. Masse Volumique spécifique

On entend par masse spécifique la masse de l'unité de volume absolue d'un corps (volume matière plein). L'essai consiste à introduire dans un éprouvette gradué rempli d'un volume d'eau  $V_1$ , une masse de sable  $M_a$  et on mesure le volume de l'eau et le sable soit  $V_2$ .

La masse volumique spécifique du sable peut être calculée par la formule :

$$\gamma_{abs} = \frac{M_a}{V_1 - V_2} \quad \text{Equation 3- 2}$$

Dans notre cas la masse volumique de sable alluvionnaire :  $\gamma_{abs} = 2727 \text{ kg/m}^3$



Figure 3-4. Essai de la masse volumique spécifique.

d. Coefficient d'absorption

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

On procède à un pré-séchage avec un séchoir pour éliminer l'eau entre les grains, Pour le sable il faut utiliser le cône et le piston (Figure 3-3) jusqu' a ou le sable ne sera pas cohérents et par la suite l'en mettre à l'étuve au point ou la masse reste constante et ne change pas. Donc le coefficient d'absorption du sable  $A_b$  est déterminé par la formule suivante :

$$A_b = \frac{Mh - Ms}{Ms} \times 100 \quad \text{Equation 3- 3}$$

Pour notre sable le coefficient d'absorption d'eau = 0.9



Figure 3-5. Teste de pré- séchage avec le cône et le piston.

### 3.2.2. Le ciment

Le ciment utilisé pour la préparation de différents mélanges est un ciment portland artificiel CPJ-CEMII /A-L de classe 42,5 R nommé le Rocher noir de Cimpor (ciment de Portugal) c'est un ciment composé qui contient 80% à 94% de clinker plus moins de 10% de calcaire comme addition lors du broyage d'une finesse de 3000  $\text{cm}^2/\text{g}$ . La densité spécifique du ciment (rocher noir) utilisé dans notre étude est de 3,10.



Figure 3-6. Ciment CPJ-CEMII/A-L 42,5R

### 3.2.3. Additions

#### a. Pouzzolane

La pouzzolane utilisée dans la formulation du mortier autoplaçant est une pouzzolane naturelle de provenance du gisement de Béni- Saf. Cette pouzzolane est fournie sous forme de roches concassées. Elle est essentiellement composée de silice et d'alumine. Nous avons utilisé l'appareil de micro Deval pour broyer la pouzzolane, avec une quantité des billes pesant 1 kg et 1 kg de pouzzolane à broyer dans chaque compartiment pendant 12 h, après séchage à l'étuve à 105°C, la pouzzolane broyée a été tamisée en utilisant un tamis 80 µm.

Au fur et à mesure nous avons déterminé la densité spécifique à travers l'essai de densimètre le Chatelier (Figure 3.6). D'où nous avons le rempli jusqu'au niveau 0 avec l'éthanol et on verse dedans une masse de 64 g de pouzzolane broyé et tamisé pesé par une balance a grande précision, nous avons agité et laissé incliné à 45°C pendant 15 mm pour éliminer l'air entrainé par la poudre de pouzzolane lorsque liquide est stabilisé nous avons lit sur la graduation le volume du pouzzolane introduite et calculé la densité par la formule suivant :

$$\gamma = \frac{m}{V_1 - V_0} \quad \text{Equation 3- 4}$$

Nous avons trouvé la densité spécifique de pouzzolane = 2,79

Et par la suite nous présentons l'analyse chimique de Pouzzolane dans le tableau (3.1)



Equation 3-5. Essai de la densité spécifique

Tableau 3-1. Analyse chimique de la pouzzolane naturelle

Eléments	$SiO_2$	$CaO$	$MgO$	$AL_2 O_3$	$Fe_2 O_3$	$K_2O$	$Na_2O_2$	$SO_3$	$Cl$
Teneurs(%)	45,67	8,98	3,45	15,10	10,14	0,4	0,68	0,19	--

a. Laitier de haut fourneau

Le laitier de haut fourneau provient du complexe sidérurgique d'El-Hadjar se présente sous forme de grains sphériques, de couleur jaune claire, nous avons d'abord procédé à son Étuvage à 105 °C afin d'éliminer l'humidité et facilité son broyage, le laitier a été broyé à l'aide de l'appareil micro-Deval avec une charge de 2kg de billes et 1kg de laitier dans chaque compartiment pendant 12 h. En vue d'avoir une finesse désirée, le laitier a été tamisé en utilisant la tamiseuse suscitée avec un tamis de 80  $\mu m$  de diamètre. De même que la pouzzolane la densité spécifique a été mesurée Par le densimètre le chatelier. Alors que la valeur déterminée est = 2,56 tandis que l'analyse chimique de laitier de haut fourneau est présenté dans le tableau (3.2).

Tableau 3-2. L'analyse chimique de laitier de haut fourneau.

Eléments	$SiO_2$	$CaO$	$MgO$	$AL_2 O_3$	$Fe_2 O_3$	$SO_3$	$Cl$
Teneurs(%)	36,60	37,75	3,77	6,38	6,94	0,19	--

b. Poudre de marbre

La poudre de marbre utilisé dans cette étude, est commercialisée par la société MCA (société de fabrication de marbre carrelage et Agglo-Marbre) installée à Bordj Bou Arreridj. De même que la pouzzolane et le laitier de haut fourneau la densité spécifique de la poudre de marbre a été mesurée par le densimètre le chatelier (Figure 3.5). Alors que la valeur déterminée est = 2,61 tandis que l'analyse chimique de la poudre de marbre est présenté dans le tableau 3.3.

Tableau 3-3. L'analyse chimique de la poudre de marbre.

Eléments	$SiO_2$	$CaO$	$MgO$	$AL_2 O_3$	$Fe_2 O_3$	$K_2O$	$Na_2O_2$	$SO_3$	$TiO_2$	$P_2O_5$
Teneurs(%)	0,42	56,01	0,12	0,13	0,06	0,01	0,43	0,01	0,01	0,0



Figure 3-7 Essai de la densité spécifique

### 3.2.4. Superplastifiant

L'adjuvant utilisé est un superplastifiant haut réducteur d'eau fabriqué par la société Granitex et commercialisé sous le nom de MEDAFLOW30 (Figure 3.6). Il est à base de poly carboxylates d'éther qui améliorent considérablement les propriétés des bétons et mortiers. Sa plage normale d'utilisation est fixée par la fiche technique 0.5% à 2% (en extrait sec) du poids de ciment. Il est sous forme liquide de couleur brun clair de 30% d'extrait sec. Sa densité est de 1.07 et son PH est de 6 à 6.5 et d'une teneur en chlore inférieure à 1 g.



Figure 3-8. Superplastifiant haut réducteur d'eau

### 3.2.5. L'eau de gâchage

Nous avons utilisé l'eau potable du robinet exempté d'impuretés.

### 3.3. Procédure expérimentale

#### 3.3.1. Formulation des MAP

Les BAP possèdent des propriétés spécifiques et contradictoires à l'état frais : une grande déformabilité, une grande capacité de passage et une grande résistance à la ségrégation. En termes de rhéologie, cela revient à abaisser le seuil de cisaillement du mortier, tout en maintenant la viscosité plastique du mélange. Ces propriétés doivent être en balance pour obtenir un bon BAP.

La simplicité et l'avantage de la formulation proposée par Okamura [28] dite la méthode générale d'être applicable même en utilisant des matériaux locaux, mais à condition de faire quelques modifications notamment au niveau de la teneur en sable. Le fait que la rhéologie du BAP est fortement liée à celle du mortier autoplaçant (MAP), et vu les propriétés du mortier qui sont dominante dans les BAP, vu l'utilité de connaissance des propriétés de mortier et vu la commodité de tester un mortier. Nous avons consacré ce travail à l'étude des paramètres rhéologique des mortiers autoplaçant ou nous fixons comme but essentiel l'influence de la pouzzolane naturelle, de laitier de haut fourneau et la poudre de marbre, comme ajout minéral, sur les caractéristiques rhéologiques et mécaniques des mortiers autoplaçants. Pour cela, on a fixé tous les autres paramètres, à savoir la quantité de sable dans le mortier donc le rapport Sable/Mortier, le rapport Eau/Liant ainsi que le pourcentage en superplastifiant par rapport au liant.

Dans le BAP, la phase du mortier fournit la lubrification entre les particules des gros granulats, et la stabilité globale du béton. Les propriétés du mortier sont semblables à celles du BAP lui-même, c'est-à-dire un faible seuil de cisaillement pour assurer l'écoulement sous le seul effet de la gravité et une viscosité plastique suffisante afin d'assurer la non ségrégation du béton durant l'écoulement.

Pour la formulation du mortier autoplaçant. La sélection du rapport sable/mortier et du rapport Sp/L est ajustée par l'essai d'étalement, dont le diamètre de la galette obtenu doit être compris entre  $270 \text{ mm} \leq Et \leq 330 \text{ mm}$ , et par l'essai de l'entonnoir en V (V-funnel), dont le temps d'écoulement obtenu doit être compris entre 2 et 10 secondes. [29]

##### a. Rapport Eau/Poudre (E/P)

Certains auteurs cités dans [36] ont trouvé que des rapports E/P variant entre 0,84 et 1,07 en volume ou entre 0,28 et 0,45 en masse sont convenables pour produire un BAP de bonnes

caractéristiques à l'état frais et à l'état durci. Des valeurs prises en dehors de ces plages peuvent causer un blocage ou une ségrégation du BAP.

Boukendakdji [28] a rapporté qu'il faut aller jusqu'à un rapport E/P égale à 0,4 pour obtenir un MAP satisfaisant ayant un étalement supérieur à 27 cm. Pour tous les essais de mortier nous avons fixé le rapport eau/liant à 0,40.

*b. Rapport Sable/Mortier (S/M)*

Les auteurs de la méthode générale ont limité le volume du sable à 40% (Sable/Mortier= 0,4) de celui du mortier pour obtenir un meilleur MAP à base de matériaux locaux japonais [28]. Or, ceci est loin d'être toujours le cas, puisque l'utilisation du BAP à travers le monde a montré qu'il est nécessaire de modifier ce volume, pour qu'on puisse produire un MAP de grande déformabilité.

En Algérie Boukendakdji [28] a testé des BAP à base de matériaux locaux. Cet auteur a montré qu'un rapport S/M égal à 0,5 est adéquat pour obtenir un bon BAP. Le principe de la méthode de test consiste à rechercher la composition optimale pour les rapports Sable/Mortier de 0,6 ; 0,5 et 0,4 tout en faisant varier le rapport superplastifiant/liant (Sp/L).

*c. Variation du rapport Superplastifiant/Liant (Sp/L)*

Pour déterminer l'effet de la variation de la teneur en polycarboxylate (PC) sur le mortier à l'état frais, nous avons étudié la variation du diamètre d'étalement et du temps d'écoulement à partir de l'essai de l'entonnoir en V (V-funnel), en fonction du dosage en superplastifiant polycarboxylate (PC), Sp/L variant de 0,6% à 2%.

*d. Substitution du ciment par les additions*

Après avoir déterminé la teneur en eau, la teneur en sable et le dosage en superplastifiant, nous pouvons dire qu'on a obtenu la composition optimale du mortier autoplaçant de référence tout on maintient fixe les deux rapports Sable/Mortier de 0.50, et un dosage en eau E/P de 0.40, et chercher la meilleure formulation du MAP de référence. Comme point de départ, on prend le résultat des essais sur mortiers, du rapport Sp/L.

Il suffit de quelques mesures d'étalement (au mini cône) et de temps d'écoulement à l'entonnoir en V, pour trouver le meilleur rapport Sp/L donnant un bon mortier autoplaçant sans ségrégation ni ressuage Une fois que le MAP de référence est obtenu, tout en ajustant le rapport Sp/L.

Ce pendant nous avons passé ou mesures rhéologique (le seuil de cisaillement  $\tau_0$  et la viscosité plastique  $\eta_p$ ) afin de les prendre comme référence en l'absence d'une plage précise dont En

présence d'un rhéomètre (Figure 3.9) la fluidité du mortier reste estimative par un faible seuil de cisaillement et une viscosité plastique appropriée dans l'absence d'un modèle de corrélation comparatif pour l'ajustement des MAP.



Figure 3-9. Rhéomètre avec système d'acquisition

Donc l'étape suivante consiste à étudier l'influence de la pouzzolane naturelle, le laitier de haut fourneau et poudre de marbre sur les propriétés des MAP à l'état frais. Pour cela, nous allons substituer le ciment du mélange de référence par le laitier, la pouzzolane et la poudre de marbre en combinaison binaire ainsi par la pouzzolane-laitier, la pouzzolane-poudre de marbre et le laitier-poudre de marbre en combinaison ternaire à de composition sous cité dans le tableau 3.5 comme nous avons substitué le ciment avec un pourcentage de 60% d'ajout en combinaison quaternaire (Pouzzolane-laitier-poudre de marbre).

Tableau 3-4. Différentes Combinaison des MAP binaire, ternaire et quaternaire.

Notation	N°	Nomination	Ajouts utilisé (%)
		M Réf	Mortier confectionné avec 100% CPJ+0% ajout
Mortiers aux ciments binaires	01	M (5% LHF)	5% LHF+95% CPJ
	02	M (10% LHF)	10% LHF+90% CPJ
	03	M (15% LHF)	15% LHF+85% CPJ
	04	M (20% LHF)	20% LHF+80% CPJ
	05	M (25% LHF)	25% LHF+75% CPJ
	06	M (30% LHF)	30% LHF+70% CPJ
	07	M (5% PZ)	5% PZ+ 95% CPJ
	08	M (10% PZ)	10% PZ+90% CPJ
	09	M (15% PZ)	15% PZ+85% CPJ
	10	M (20% PZ)	20% PZ+80% CPJ
	11	M (25% PZ)	25% PZ+75% CPJ

	12	M (30% PZ)	30% PZ+70% CPJ
	13	M (5% PM)	5% PM+95% CPJ
	14	M (10% PM)	10% PM+90% CPJ
	15	M (15% PM)	15% PM+85% CPJ
	16	M (20% PM)	20% PM+80%CPJ
	17	M (25% PM)	25% PM+75% CPJ
	18	M (30% PM)	30% PM+70% CPJ
Mortiers aux ciments ternaires	19	M (10 PZ+10 L)	10% PZ+10% L+80% CPJ
	20	M (10 PZ+20 L)	10% PZ+20%L +70% CPJ
	21	M (10 PZ+30 L)	10% PZ+30% +60% CPJ
	22	M (20 PZ+10 L)	20% PZ+10% L+70% CPJ
	23	M (20 PZ+20 L)	20% PZ+20% L+60% CPJ
	24	M (20 PZ+30 L)	20% PZ+30% L+50% CPJ
	25	M (30 PZ+10 L)	30% PZ+10% +60% CPJ
	26	M (30 PZ+20 L)	30% PZ+20% +50% CPJ
	27	M (30 PZ+30 L)	30%PZ +30% L+40% CPJ
Mortiers aux ciments ternaires	28	M (10 PZ+10 PM)	10% PZ+10% PM+ 80% CPJ
	29	M (10 PZ+20 PM)	10% PZ+20%PM + 70% CPJ
	30	M (10 PZ+30 PM)	10% PZ+30% PM+ 60% CPJ
	31	M (20 PZ+10 PM)	20% PZ+10% PM+70% CPJ
	32	M (20 PZ+20 PM)	20% PM+20% PM+ 60% CPJ
	33	M (20 PZ+30 PM)	20% PZ+30% PM+50% CPJ
	34	M (30 PZ+10 PM)	30% PZ+10% PM+60% CPJ
	35	M (30 PZ+20 PM)	30% PZ+20% PM+ 50% CPJ
	36	M (30 PZ+30 PM)	30% PZ+30% PM+ 40% CPJ
Mortiers aux ciments ternaires	37	M (10 L+10 PM)	10% L+10% PM+80% CPJ
	38	M (10 L+20 PM)	10% L+20% PM+70% CPJ
	39	M (10 L+30 PM)	10%L +30% PM+60% CPJ
	40	M (20 L+10 PM)	20% L+10% PM+70%CPJ
	41	M (20 L+20 PM)	20% L+20% PM+60% CPJ
	42	M (20 L+30 PM)	20% L+30% PM+50% CPJ
	43	M (30 L+10 PM)	30% L+10% +60% CPJ
	44	M (30 L+20 PM)	30% L+20% +50% CPJ
	45	M (30 L+30 PM)	30% L+30% PM+40% CPJ
Mortiers aux ciments quaternaires	46	M (5L+5PZ+10PM)	5%L +5% PZ+10% PM+80% CPJ
	47	M (5L+5PZ+20PM)	5% L+5% PZ+20% PM+70% CPJ
	48	M (5L+5PZ+30PM)	5% L+5% PM+30% PM+60% CPJ
	49	M (10L+10PZ+10PM)	10% L+10% PZ+10% PM+70% CPJ
	50	M (10L+10PZ+20PM)	10% L+10% PZ+20% PM+60% CPJ
	51	M (10L+10PZ+30PM)	10% L+10% PZ+30% PM+50% CPJ
	52	M (15L+15PZ+10PM)	15% L+15% PZ+10% PM+60% CPJ
	53	M (15L+15PZ+20PM)	15% L+15% PZ+20% PM+50% CPJ
	54	M (15L+15PZ+30PM)	15%L +15% +30% PM+40% CPJ

La confection des mortiers autoplaçants, les proportions du mélange (ciment, sable, eau, superplastifiant et ajouts).

Pour le malaxage, Domone et Jin [25] proposent l'introduction du superplastifiant à partir de la deuxième minute après le commencement du malaxage. Dans nos essais nous avons opté pour cette méthode.

La séquence de malaxage adoptée pour tous les mélanges est la suivante :

- Mélanger à sec le ciment et le sable pendant environ une (1) minute afin d'homogénéiser le mélange (on a utilisé un malaxeur à mortier de 5 litres de capacité)
- Malaxer pendant une (1) minute avec la première quantité d'eau (Eau 1 = 70% Eau)
- Malaxer pendant une (1) minute avec le restant de l'eau de gâchage (Eau 2 = 30% Eau) mélangé avec le superplastifiant
- Malaxer le mélange pendant 3 minutes.

La séquence de malaxage du mortier est mentionnée sur la Figure

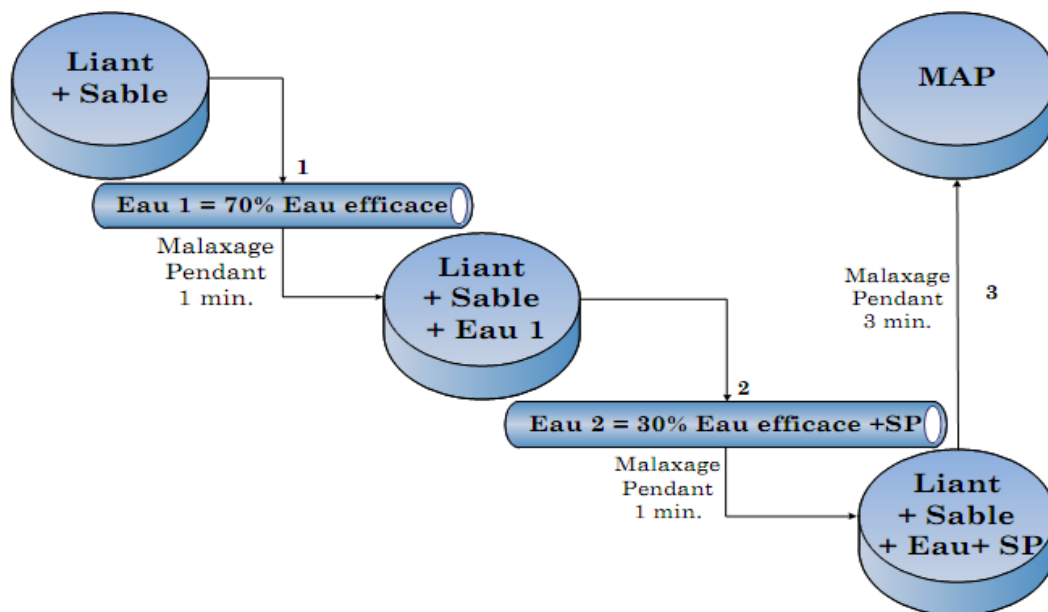


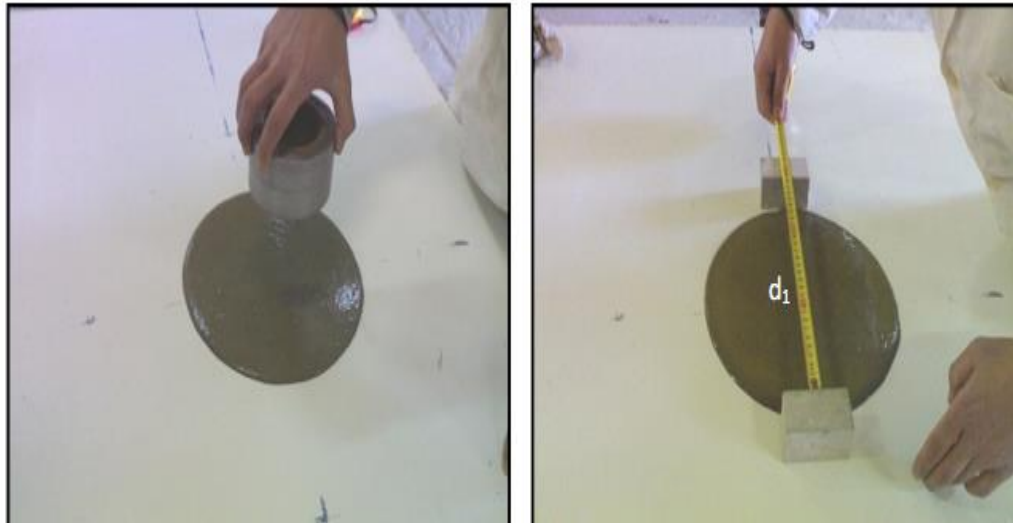
Figure 3-10. Séquence de malaxage lors de l'élaboration du mortier

### 3.3.2. Essais expérimental

#### a. Essai d'étalement de MAP

L'essai consiste à remplir un mini-cône en MAP, et à le soulever verticalement (Figure 3.11.1) Une fois que le cône est enlevé, le MAP s'étale sur la plaque. Après l'arrêt de l'écoulement, on mesure l'étalement selon deux diamètres perpendiculaires  $d_1$  et  $d_2$

(Figure 3.11.2). L'étalement final est la moyenne des deux valeurs obtenues. Un contrôle visuel de la galette du mortier peut s'avérer intéressant



(1)

(2)

Figure 3-11. Exécution et mesure d'étalement en mini-cône

b. Essai d'écoulement à l'entonnoir en V (V-Funnel)

Dans l'essai de l'entonnoir en V (V-funnel), consiste à remplir l'entonnoir en V en mortier autoplaçant tout en maintenant le clapet situé à la base de l'entonnoir fermé. Toute fois en démarre le chronomètre Dé en relâche le clapet pour permettre au MAP de s'écouler à travers l'orifice. Le temps d'écoulement est calculé entre l'instant de l'ouverture de clapet de l'entonnoir et l'instant de l'apparition de la première lumière en regardant verticalement vers le bas de l'entonnoir.

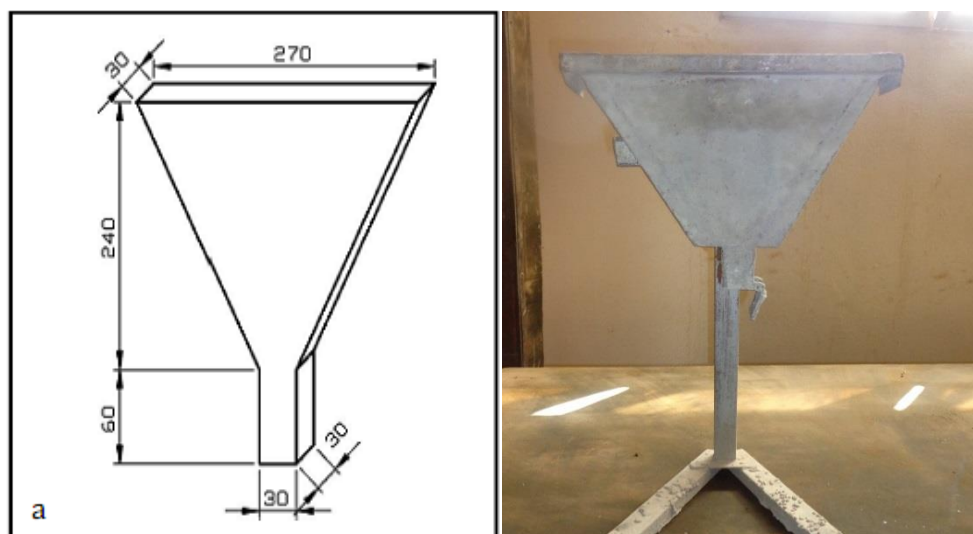


Figure 3-12. Entonnoir V (V-Funnel)

*c. Essai de mesure des paramètres rhéologique*

Les mesures des paramètres rhéologique des MAP sont exécutées avec le rhéomètre « Heidolph » (Figure 3.9). L'agitateur est l'élément principal pour la réalisation des essais. Il permet l'enregistrement des couples en fonction des vitesses de rotation imposées. Le fonctionnement de l'agitateur est piloté par un ordinateur à l'aide d'un logiciel (watch & control).

L'essai rhéologique s'effectue avec une série de paliers de vitesse de rotation décroissante. Au début de l'essai, la vitesse maximale est appliquée pour éliminer l'influence de la thixotropie plus rapidement [23]. Toutes les secondes, le logiciel enregistre le moment de rotation ( $M$ ) correspondant à la vitesse de rotation ( $\Omega$ ) imposée.

L'essai rhéologique se fait avec les étapes suivantes :

- ✓ 1<sup>ère</sup> 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<sup>ème</sup> étape : positionnement de la pale. Elle est centrée (suivant le diamètre du récipient) puis plongée au milieu la pale jusqu'à l'arase du MAP (Figure 3.12).
- ✓ 4<sup>ème</sup> 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<sup>ème</sup> 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 :

$$M = M_{total} - M_{vide} \quad \text{Equation 3- 6}$$

- ✓ 6<sup>ème</sup> étape : exploitation des mesures et calculs des paramètres rhéologiques.



Figure 3- 13. Positionnement de la pale de rhéomètre

L'exploitation des mesures rhéométriques consiste à déterminer l'évolution de la contrainte de cisaillement ( $\tau$ ) en fonction du taux de cisaillement ( $\dot{\gamma}$ ) à partir de la paire (Mi- $\Omega$ i) mesurée. En assimilant le comportement du MAP à un fluide binghamien, les paramètres rhéologiques  $\tau_0$  et  $\mu$  peuvent être calculés en utilisant les équations de Lanos. Néanmoins, deux cas sont envisageables : le cisaillement peut être total ou partiel.

d. Confection et conservation des éprouvettes

Lorsque la procédure de malaxage est achevée, et après avoir fait tous les essais relatifs aux mortiers à l'état frais, des éprouvettes de types prismatiques (4x4x16) sont coulées sans compactage pour réaliser les essais relatifs aux mortiers et à l'état durci, Après 24 heures, les éprouvettes ont été démoulés, et immergés ensuite dans l'eau (Figure 3.13) conservé pendant 1 jour dans une température de  $20 \pm 20^\circ\text{C}$  jusqu'à l'échéance de l'essai,



Figure 3-14. Conservation d'éprouvettes

e. Essai de compression de MAP

La résistance à la compression peut être mesurée sur des éprouvettes prismatique (4x4x16) ou

L'essai de compression se fait, dans notre cas, sur six morceaux de trois éprouvettes prismatiques qui ont été préalablement écrasées par flexion. L'éprouvette est soumise à une charge croissante jusqu'à la rupture moyennant une presse hydraulique de capacité de 2000KN, présenté dans la Figure 3 .15



Figure 3-15. Presse d'écrasement des éprouvettes

### 3.4. Conclusion

Dans notre travail, des matériaux disponibles dans le marché Algérien sont utilisés pour la préparation des mortiers et bétons autoplaçants. Notre objectif est la production d'un BAP économique et écologique. Afin d'atteindre ce but, on a procédé à la substitution du ciment par la pouzzolane, le laitier et la poudre de marbre. Les essais réalisés sur ces additions, nous ont permis de constater qu'il est possible de l'utiliser comme ajout minéral dans les BAP.

Pour formuler le BAP, des essais préliminaires ont été effectués sur le MAP pour déterminer la teneur en sable et le dosage en superplastifiant. L'effet de pouzzolane, laitier et la poudre de marbre sur la rhéologie des MAP a été étudié à travers l'essai d'étalement au mini-cône, l'essai d'écoulement à l'entonnoir en V et les essais rhéologique avec le rhéomètre.

## **Chapitre 4 : Présentation et analyse des résultats**

### **4.1. Introduction**

Les mortiers autoplaçants ont des qualités méritent d'être valorisées. En raison de leurs propriétés rhéologiques très spécifiques, leur compréhension nécessite des investigations plus approfondies. Dans ce travail, nous avons considéré une partie infime des paramètres influents sur leur comportement à l'état frais et à l'état durci. Des essais ont été faits prenant en compte l'influence des ajouts minéraux sur les propriétés rhéologiques et mécaniques à jeune âge vis à vis des mélanges à base des ciments binaire, ternaire et quaternaire substitué par le laitier de haut fourneau, la pouzzolane naturelle et la poudre de marbre. Des résultats et des observations intéressantes nous ont ainsi présentés dans ce chapitre.

### **4.2. Mortier de référence**

Pour la formulation du MAP, nous avons basé sur la méthode Okamura avec un ajustement au niveau de la teneur en sable, le rapport Eau/Liant (E/L) et le rapport Superplastifiant/Liant (Sp/L) pour s'adapter aux propriétés des matériaux locaux. La sélection du rapport sable/mortier et du rapport Sp/L est ajustée par les essais préliminaires d'une part tels que l'essai d'étalement, dont le diamètre de la galette obtenu doit être dans la plage de  $270 \text{ mm} \leq d \leq 330 \text{ mm}$ , et par l'essai de l'entonnoir en V (V-funnel), dont le temps d'écoulement obtenu doit être compris entre  $2 \text{ sec} \leq t \leq 10 \text{ secs}$ . Et d'autre part ce qui rend cette étude moins ardue est la disponibilité d'un rhéomètre par lequel les propriétés rhéologique se caractérisé généralement par un faible seuil de cisailent et une viscosité suffisante on suivant cette méthode le mortier autoplaçant de référence a été confectionné et les résultats sont récapitulés dans le Tableau 4-1 cité ci-dessous.

Tableau 4-1. Tableau récapitulatif des résultats de mortier autoplaçant.

Constituants du mélange pour le mortier de référence				
Ciment en (g)	Sable en (g)	Eau en (g)	Sp (%)	Medaflow 30 en (g)
1038,41	2045,3	70%=298,3 30%=127,9	1%	10,38
Résultats des essais de mortier de référence à l'état frais				
Étalement en (cm)	30	Mortier autoplaçant Normalisé	270mm ≤ d ≤ 330 cm	
Temps d'écoulement en (sec)	6,20		2 sec ≤ t ≤ 10 sec	
Seuil de cisaillement en (Pa)	21,58			
Viscosité en (Pa.s)	5,13			
Observations	Mortier homogène		Liant=0% additions	
Résultats des essais de mortier de référence à l'état durci				
Résistance en compression à jeune âge (1 jour)				19,77 MPa

D'après le tableau ci-dessus le mortier de référence présente un seuil de cisaillement de l'ordre de 21.5 Pa et une viscosité de l'ordre de 5 Pa.s. Dans le but de faire une étude sur l'influence des paramètres de formulation particulièrement l'effet de deux paramètres, l'effet des additions minérales et l'effet de dosage en superplastifiant sur les paramètres rhéologiques tous les résultats seront comparés à ces valeurs de mortier de référence qu'on appelle (MP0).

### 4.3. Influence des ajouts minéraux sur les MAP à base des ciments binaires

#### 4.3.1. Influence de laitier de haut fourneau

##### a. Influence de laitier sur l'état frais du mortier

Dans le but de chercher l'influence du dosage de laitier de haut fourneau sur les caractéristiques rhéologique et résistance mécanique à jeune âge des mortiers autoplaçant (MAP). Six dosages de laitier de haut fourneau broyé ont été utilisés en substitution de ciment dans les compositions des MAP comme ils ont été testés par 3 essais, deux sont classiques (l'étalement au mini-cône et l'écoulement à entonnoir V (V-Funnel)) et l'autre essai mesure les paramètres rhéologiques par un rhéomètre, dont les résultats sont présentés dans le tableau 4-2

Pour les compositions binaires des ciments MAP1, MAP2, MAP3, MAP4, MAP5 et MAP6 les principaux résultats des mesures rhéologiques sont comparés avec celle de mortier de référence MAP0 à savoir que les mesures rhéologiques tel que le seuil de cisaillement  $\tau_0$  et

la viscosité  $\mu$ , l'étalement au mini cône ainsi que l'écoulement en entonnoir V (V-Funnel) montrent ce qui suit.

Tableau 4-2. Compositions et résultats des essais d'ouvrabilité des MAP.

substitution du ciment par le laitier avec un dosage de SP (%) constant								
Mélange	MAP 0	MAP 1	MAP 2	MAP 3	MAP 4	MAP 5	MAP 6	
(%) de laitier	0%	5%	10%	15%	20%	25%	30%	
constituants	ciment en (g)	1038.41	1033.984	926.57	871.26	817.49	763.3	709.17
	laitier en (g)	0	51.7	102.95	153.75	204.37	254.43	303.93
	sable en (g)	2045.3	2045.3	2045.3	2045.3	2045.3	2045.3	2045.3
	70% Eau en (g)	298.3	297.3	296.2	295.2	293.8	292.6	291.5
	30% Eau en (g)	127.9	127.4	127	126.5	125.9	125.4	124.9
	SP (%)	1%	1%					
	MEDAFLOW 30 en (g)	10.38	10.34	10.3	10.25	10.22	10.18	10.13
Etalement en (cm)	30	26	26.5	23.5	24.5	23	21	
temps d'écoulement en (sec)	6.00	8.15	9.25	10.1	10.85	12.3	13.8	
seuil de cisaillement (Pa)	21.58	25.04	17.21	21.06	24.52	24.9	29.99	
viscosité (Pa.s)	5.13	7.06	5.48	6.05	7.05	6.31	7.08	
Observations	mortier de référence	Perte total d'ouvrabilité						

i. Le seuil de cisaillement et la viscosité

Les caractéristiques rhéologiques des mortiers autoplaçants sont affectées par l'addition du laitier de haut fourneau. Dans ce lieu on analysant l'effet du laitier de haut fourneau à travers les séquences des essais effectués sur les MAP composés par des pourcentages variés de 5%, 10%, 15%, 20%, 25% et 30% de laitier en substituant de ciment tout on fixant le rapport E/P à 0,4 et le rapport SP/P à 1% Les résultats présentés dans le tableau 4-2.

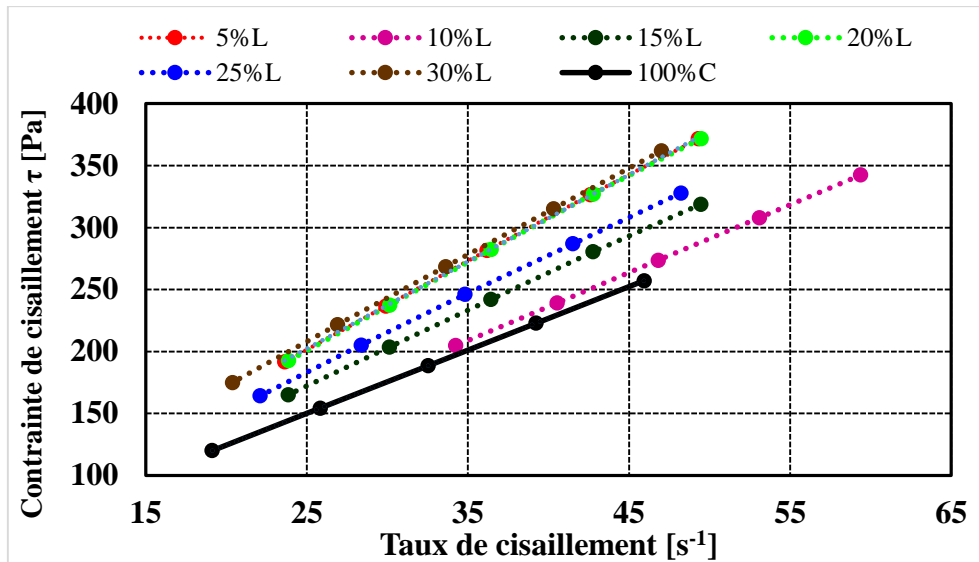


Figure 4-1. Rhéogramme du mortier à base du ciment binaire avec du laitier.

La figure 4.1 représente le rhéogramme de l'évolution de contrainte de cisaillement et le taux de cisaillement des MAP en fonction de dosage de laitier. Cette figure montre que l'incorporation du laitier a entraîné une augmentation de seuil de cisaillement par rapport au mortier de référence MAP0 confectionné de 100% du ciment due à l'absorption d'eau par le laitier, à l'exception de MAP2 et MAP3 confectionnés respectivement par 10% et 15% de laitier ont engendré une légère diminution de seuil de cisaillement  $\tau_0$  sera évoqué sur la figure 4.2.

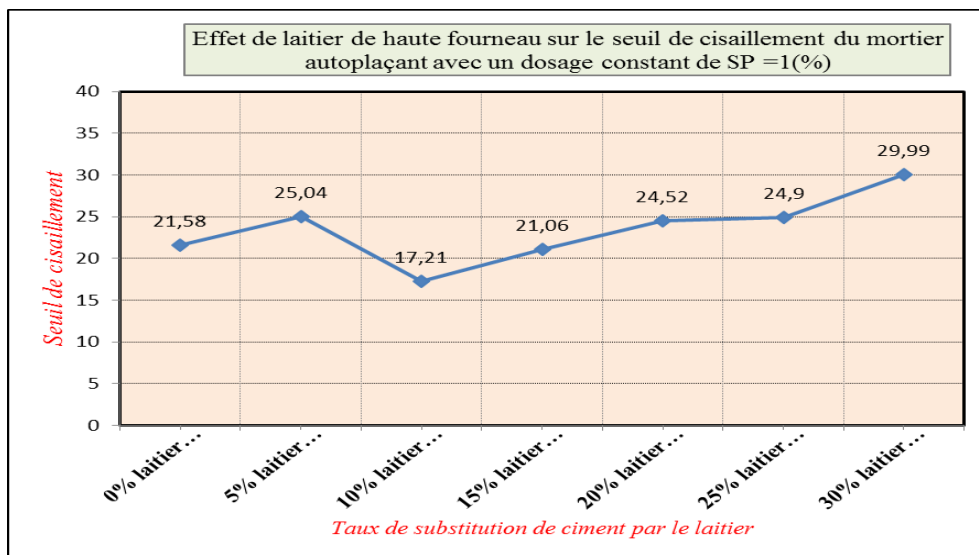


Figure 4- 2 Variation de Seuil de cisaillement en fonction de la teneur en laitier

La figure 4-3 présente la variation de viscosité en fonction de la teneur en laitier, cette figure montre un comportement presque similaire à celle de seuil de cisaillement obtenue par les MAP à base de ciment substitué par 10% et 15% de laitier. Par le même effet la viscosité  $\mu$

est influencée par la substitution de ciment par le laitier de haut fourneau car une variation d'accroissement approprié au seuil de cisaillement est indiquée sur la figure 4.3.

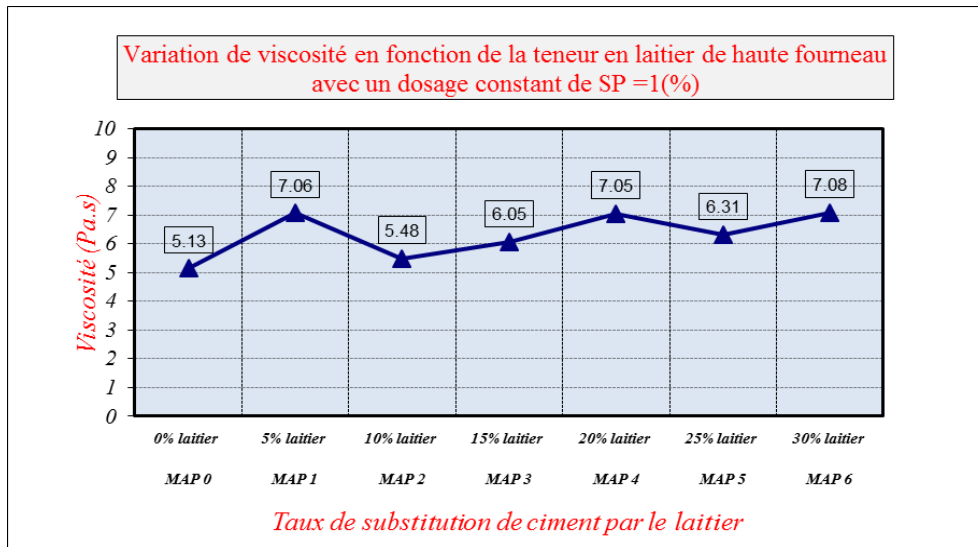


Figure 4-3. Variation de viscosité en fonction de la teneur en laitier

ii. L'étalement au mini cône

La figure 4-4 présente la variation d'étalement en mini cône en fonction de dosage d'ajout. Le laitier de haut fourneau additionné a affecté négativement l'ouvrabilité des MAP car l'étalement de tous les MAP n'a pas atteint les limites inférieures de la plage distinguée. Une importante perte d'ouvrabilité a été subie en remplacement du ciment par 30% de laitier. Et cela peut être expliqué par l'augmentation de seuil de cisaillement remarqué dans la figure 4.2.

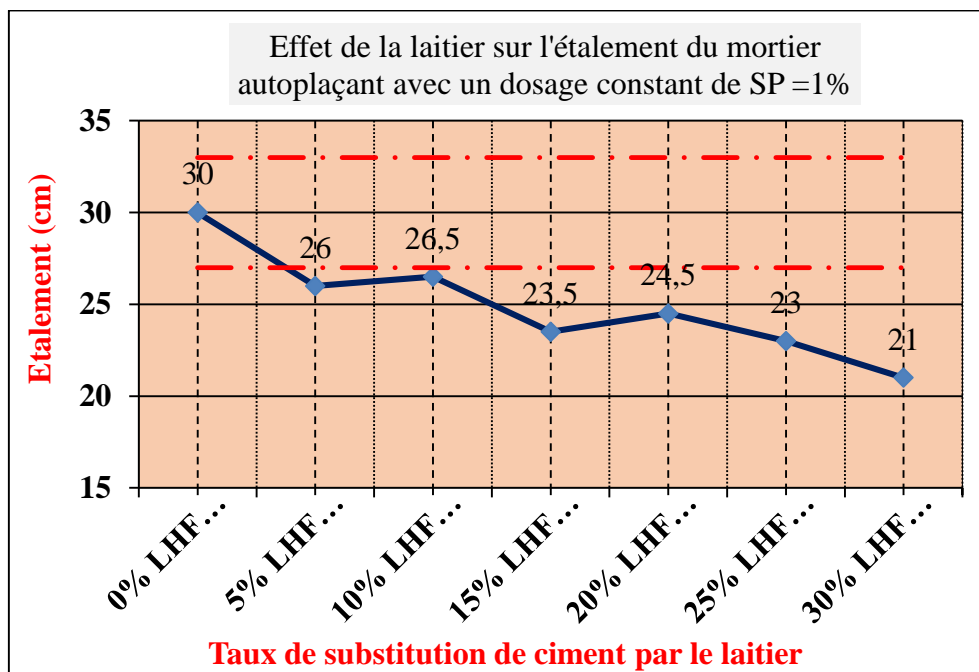


Figure 4-4. Variation d'étalement en fonction de la teneur en laitier.

iii. Le temps d'écoulement à l'entonnoir V

Les résultats présentés dans le tableau 4-1 ainsi par la figure 4.5 présentent l'effet de différent dosage du laitier sur les MAP. On remarque une augmentation de temps d'écoulement au-delà de 15% du laitier a dépassé le domaine préférentiel et cela est dû à probablement à l'augmentation de viscosité des mélanges. L'addition de 30% de laitier a donné un mortier ferme qui présente un blocage au niveau d'orifice de V-funnel.

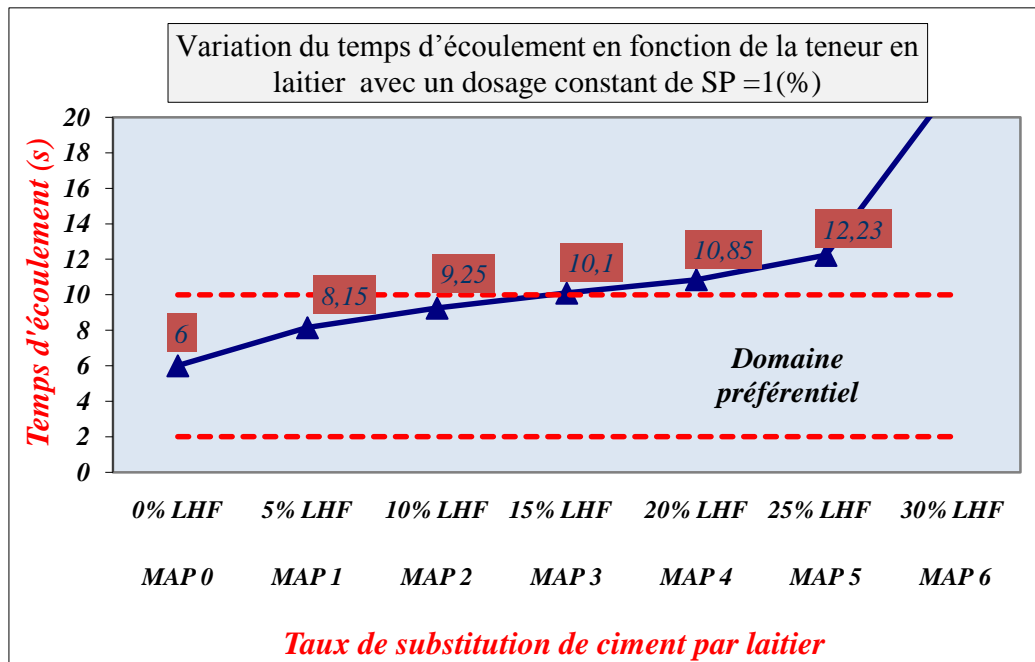


Figure 4-5. Variation de temps d'écoulement en fonction de la teneur en laitier.

Après l'analyse des paramètres rhéologiques, l'étalement et le temps d'écoulement des MAP à base de ciment binaire, On a constaté que l'addition de laitier de haut fourneau a affecté le seuil de cisaillement et la viscosité pour des pourcentages de 5%, 10%, 15%, 20%, 25% et 30% avec un dosage de SP/L = 1% dont une grande diminution d'ouvrabilité est apparu parallèlement approuvé par [7-8,10]. A cet effet on concluant que la perte total de l'ouvrabilité est dû principalement à l'augmentation de quantité de substitution du ciment par le laitier et la consommation du superplastifiant par le liant qui ne permet pas de défloculer convenablement l'empilement des grains de ciment et les particules du laitier, et par conséquent nous a conduit à augmenter le dosage en superplastifiant analysé par la suite.

iv. L'effet de correction du dosage en SP

Afin d'améliorer les caractéristiques des MAP confectionné avec de laitier en remplacement du ciment par des pourcentages varié de 5% à 30%. Nous avons effectués les mêmes essais de mesure des paramètres rhéologiques, le seuil de cisaillement  $\tau_0$  et la viscosité

$\mu$  par le rhéomètre, l'étalement au mini cône et l'écoulement à entonnoir V sur les mêmes compositions MAP1, MAP2, MAP3, MAP4, MAP5 et MAP6 à base de laitier on analysant l'effet d'ajustement du dosage en superplastifiant à 1,3%, 1,4% et 1,5% respectivement. Les résultats sont présentés dans le tableau suivant (tableau 4 -3) :

Tableau 4-3. Composition et résultats des essais d'ouvrabilité des MAP (variation de SP).

substitution du ciment par le laitier avec un dosage de SP (%) variable								
Mélange	MAP 0	MAP 1	MAP 2	MAP 3	MAP 4	MAP 5	MAP 6	
(%) de laitier	0%	5%	10%	15%	20%	25%	30%	
constituants du mélange	ciment en (g)	1038.41	982.28	926.57	871.26	817.49	763.3	709.17
	laitier en (g)	0	51.7	102.95	153.75	204.37	254.43	303.93
	sable en (g)	2045.3	2045.3	2045.3	2045.3	2045.3	2045.3	2045.3
	70% Eau en (g)	298.3	295.8	294.2	293.2	291.8	290.6	289.1
	30% Eau en (g)	127.9	126.8	126.1	125.7	125.1	124.6	123.9
	SP (%)	1%	1.30%	1.40%				1.50%
	MEDAFLOW 30 en (g)	10.38	13.44	14.41	14.35	14.31	14.25	15.2
Etalement en (cm)	30	31	31	30	30	28.5	29.5	
temps d'écoulement en (sec)	6.00	5.4	6.7	5.84	5.84	9	5.94	
seuil de cisaillement (Pa)	21.58	20.67	21.01	16.44	15.97	23.71	13.44	
viscosité (Pa.s)	5.13	4.83	5.2	4.72	4.8	7.24	4.28	
Observations	mortier de référence	Une amélioration d'étalement et diminution de $\tau_0$						

#### Le seuil de cisaillement et la Viscosité au rhéomètre

Le mortier autoplaçant se caractérise généralement par une fluidité élevée et une grande résistance à la ségrégation ces deux propriétés contradictoires s'expliquent par un seuil de cisaillement minimal et une viscosité appropriée.

La figure 4.6 décrit le comportement rhéologique des MAP en fonction du dosage de laitier avec l'ajustement en superplastifiant. L'addition de laitier de haut fourneau obéit à cette condition par un ajustement du dosage en superplastifiant ou on distingue une décroissance progressive du seuil de cisaillement (figure 4.7) des mortiers autoplaçants avec l'addition de laitier, à l'exception du mortier avec 25% de laitier où il présente une valeur supérieure à celle de référence.

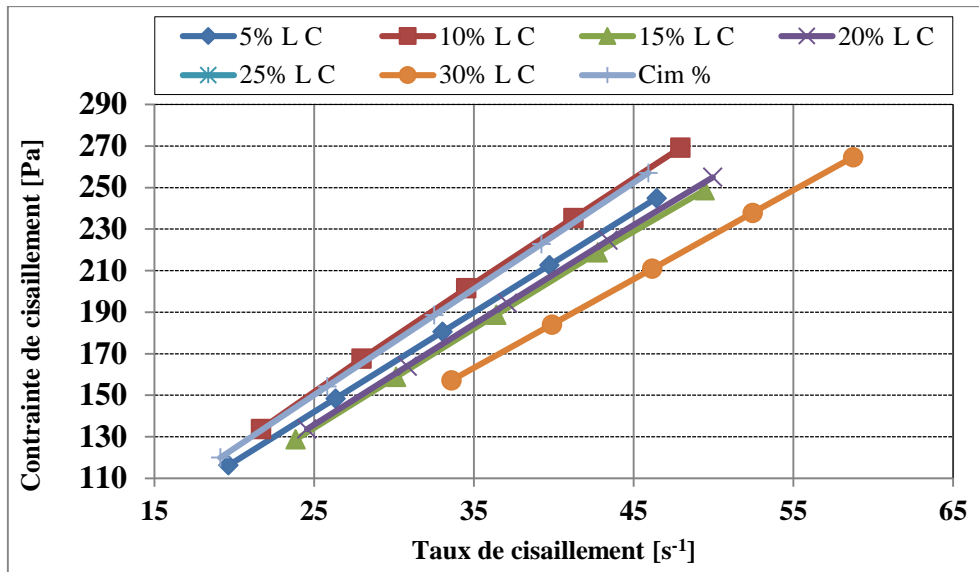


Figure 4-6. Rhéogramme des MAP en fonction de dosage de laitier avec ajustement de SP

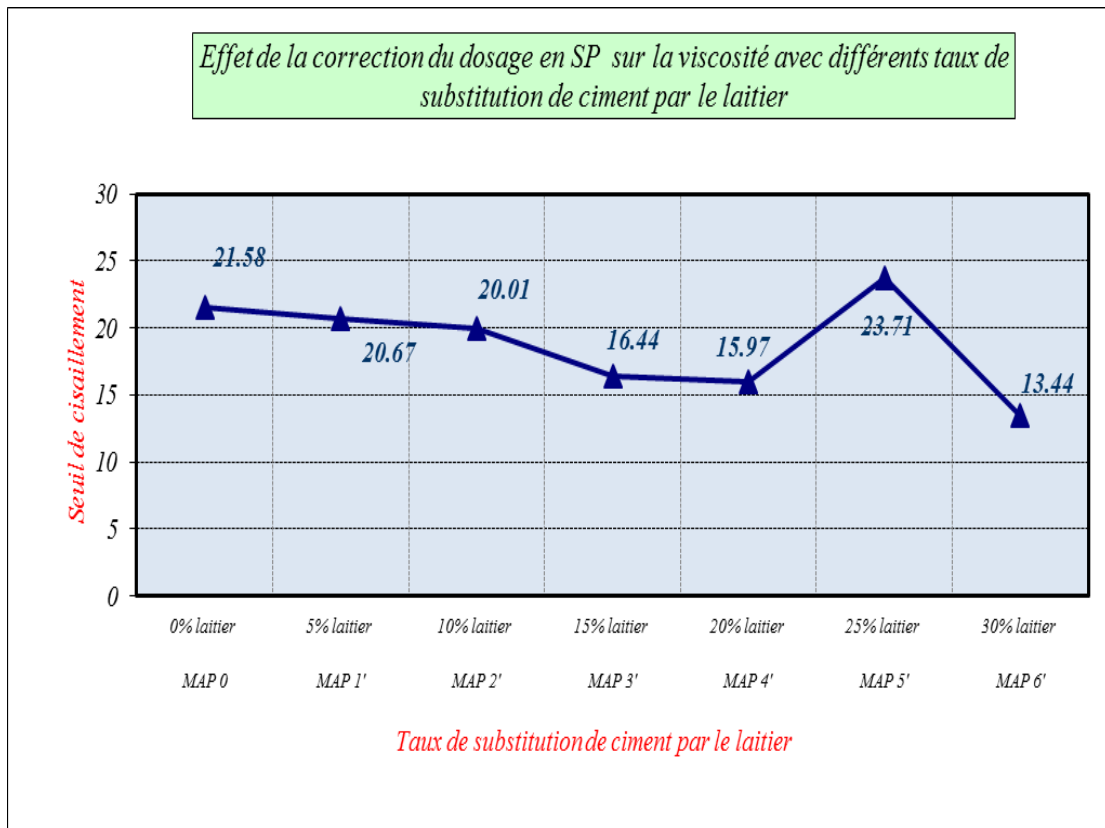


Figure 4-7. Effet d'ajustement du dosage en SP sur le seuil de cisaillement  $\tau_0$ .

Les figures 4.7 et 4.8 clarifient l'effet d'ajustement du dosage en SP sur le seuil de cisaillement  $\tau_0$  et sur la viscosité  $\mu$ . On remarque que la viscosité reste presque stable par rapport à celle de mortier de référence. A l'exception de mortier avec 25% de laitier qui présente une viscosité élevée. Par ailleurs les résultats obtenus permettent de mettre en évidence l'effet favorable de l'ajustement du dosage en superplastifiant.

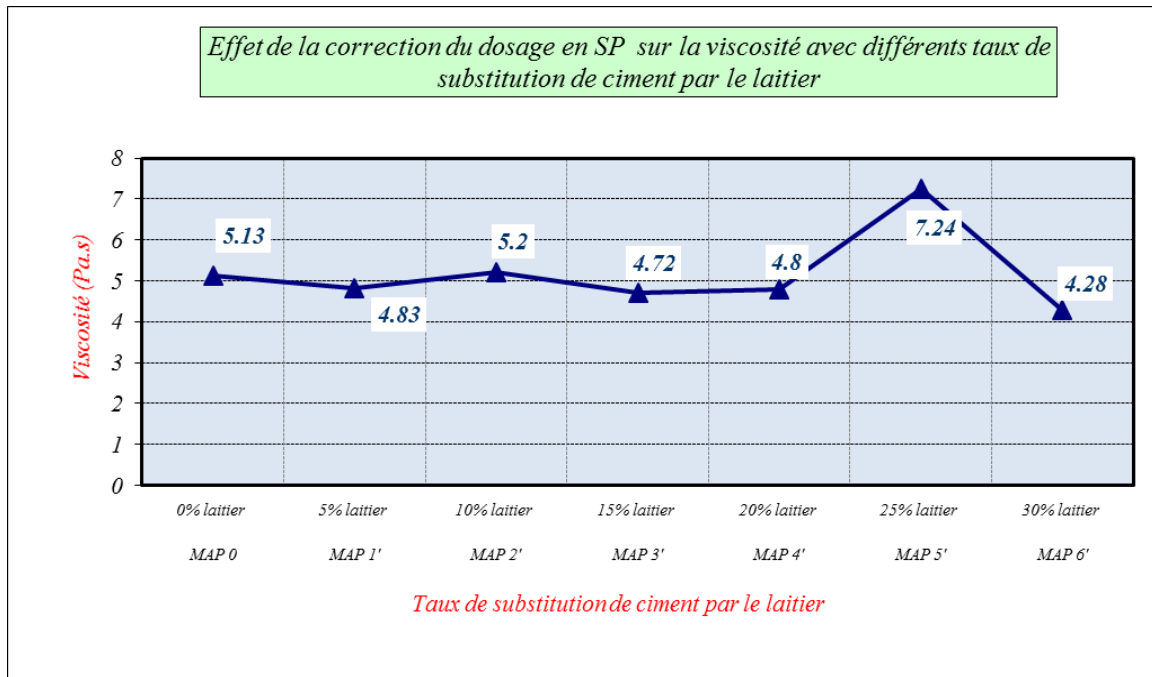


Figure 4-8. Effet d'ajustement du dosage en SP sur la viscosité  $\mu$ .

#### Étalement au mini cône et écoulement à l'entonnoir en V

L'effet de l'ajustement du dosage en superplastifiant sur l'étalement et le temps d'écoulement des MAP à base de ciment et de laitier présenté par les figures 4.9 et 4.10 montrent que, l'ajustement du dosage en SP de 1,3% à 1,5% conduit à une augmentation significative de l'étalement.

Pour un dosage en SP de 1,3% et 1,4% dans le MAP1 et MAP2 respectivement les mélanges obtenus sont plus fluides que le mortier de référence, ce qui se traduit par une valeur d'étalement égale à 31 cm supérieur à celle de mortier témoin et un temps d'écoulement plus au moins proche. Également entre MAP3 et MAP2 ont le même diamètre de galette et un temps d'écoulement moins vis-à-vis le mortier de référence fabriqué sans ajouts. Au-delà de 20% de remplacement de ciment par le laitier de haut fourneau, le MAP4 a subi une diminution d'étalement ce qui m'oblige à augmenter le dosage en superplastifiant. Pour le MAP5 à 1,4% de SP à monter la plus faible valeur d'étalement et la plus forte valeur de temps d'écoulement par le V-funnel, ceci peut expliquer par le fait que le laitier à consommer beaucoup de superplastifiant. Ces résultats mettre en évidence la pic observer sur les figures 4-7 et 4-8. Notons que l'étalement obtenu est compris entre 28,5 et 31 cm ainsi que le temps d'écoulement compris entre 4.28 et 7.24, donc toutes les valeurs obtenues sont à l'intérieur du domaine ciblé 27 à 33cm et 2 à 10 sec respectivement, ce qui vient de dire qu'on est à l'intérieur de la plage des dosages efficaces.

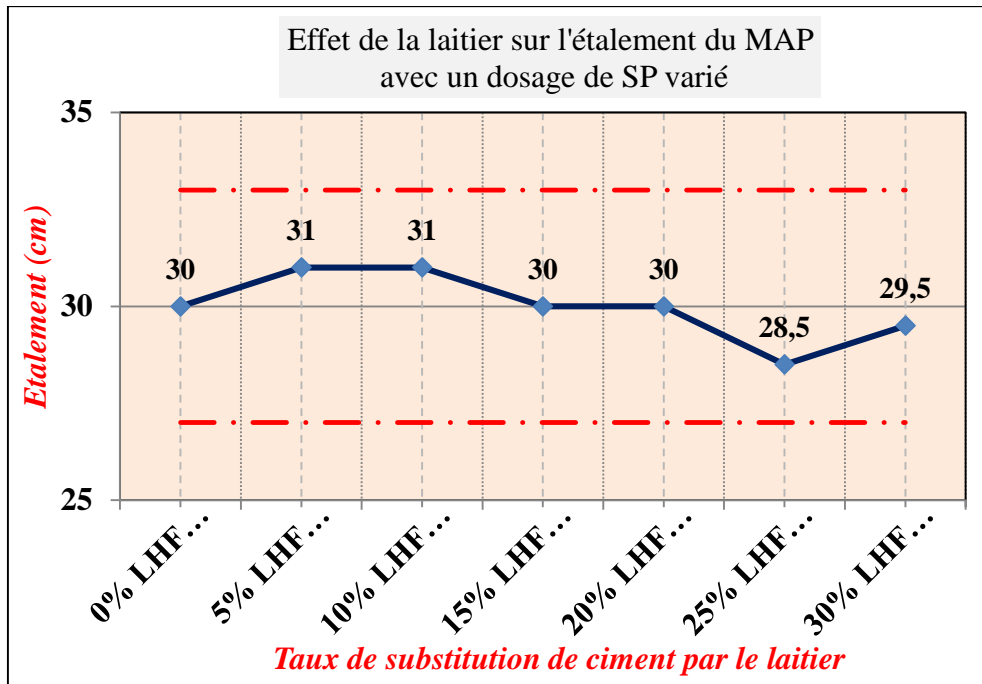


Figure 4-9. Effet d'ajustement du dosage en SP sur l'étalement

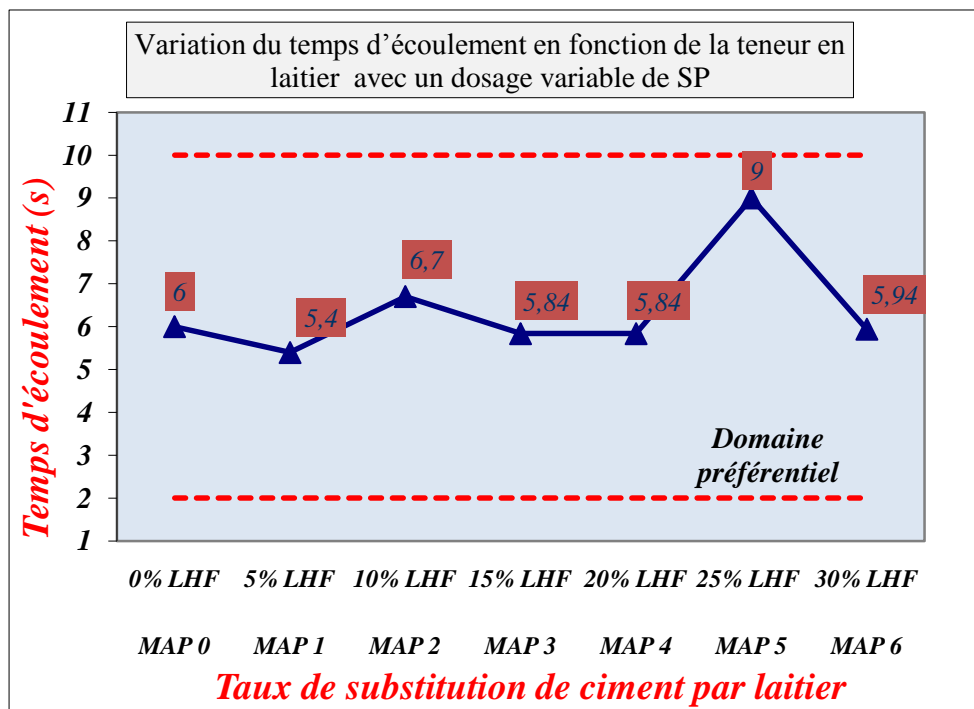


Figure 4-10. Effet d'ajustement du dosage en SP sur le temps d'écoulement.

**b. Influence de laitier sur l'état durci**

Par un effet chimique ou pouzzolanique : la réaction chimique entre la silice apportée par le laitier et la portlandite produite par l'hydratation du ciment conduit à l'accroissement de résistance par la formation de nouveaux hydrates (CSH) à long terme [réf].

Par effet filler ou effet de remplissage : le laitier de haut fourneau broyé incorporé dans le mortier modifie la compacité du mélange, qui peut compenser un déficit en particules fines, le mélange se trouve alors optimisé par remplissage d'une partie de volume de vide. Pour mettre au point, nous avons étudié le comportement mécanique à jeune âge (24 heures) des mortiers autoplaçants fait à base de ciment et de laitier de haut fourneau en composition binaire. Les résultats sont présentés dans le tableau 4-4.

Tableau 4-4. Résistance à la compression à jeune âge des MAP à base de laitier.

Substitution du ciment par le laitier avec un dosage de SP (%) variable							
Mélange	MAP 0	MAP 1	MAP 2	MAP 3	MAP 4	MAP 5	MAP 6
% Laitier	0%	5%	10%	15%	20%	25%	30%
SP %	1%	1.3%	1.4%	1.4%	1.4%	1.4%	1.5%
$R_{c1j}$ (MPa)	19.77	40.48	37.94	31.29	26.23	24.97	22.05

Les résultats montrent que l'incorporation du laitier a un effet bénéfique sur la résistance des mortiers à jeune âge, aussi nous avons constaté que la résistance à la compression commence à augmenter par rapport à celle de MAP de référence. Cette augmentation est due à l'effet de remplissage avec des taux de substitution bien déterminés car au-delà de 15% de laitier une chute considérable a été constatée, voir (Figure 4.11).

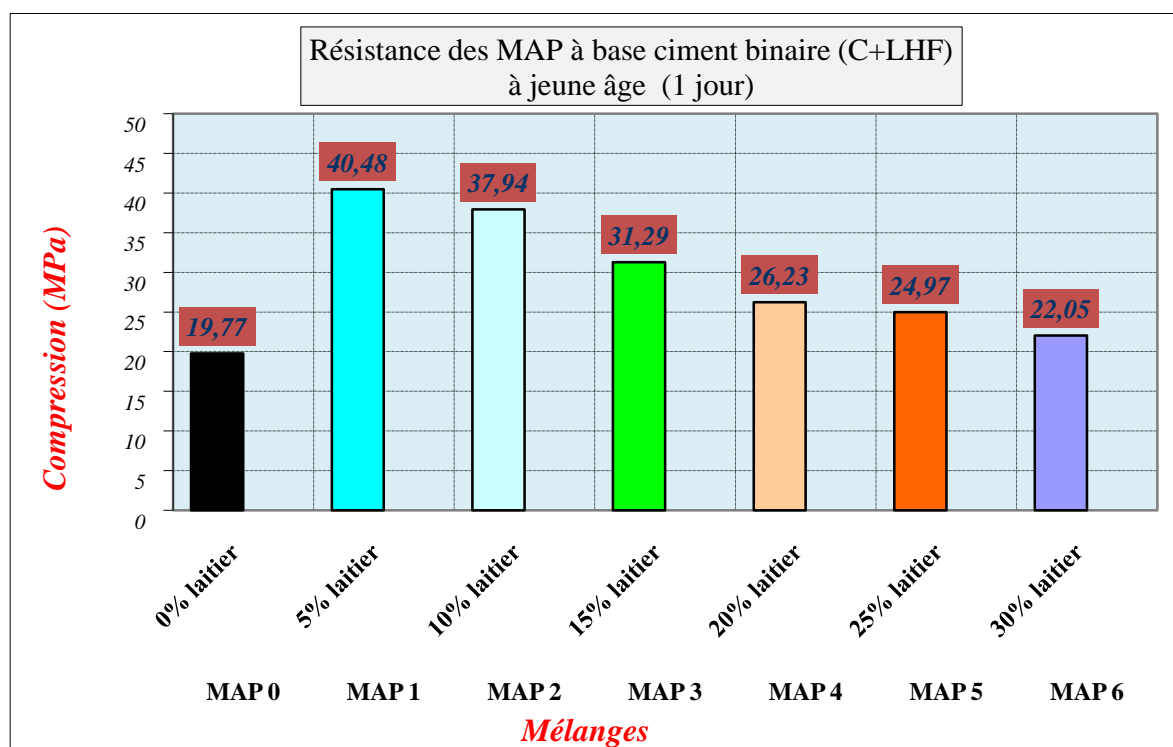


Figure 4-11. Variation de la résistance à la compression des MAP en fonction de la teneur en laitier

### 4.3.2. Influence de la pouzzolane naturelle

#### a. Influence de la pouzzolane sur l'état frais du mortier

Afin d'évaluer les modifications induites par la pouzzolane naturelle sur le besoin en adjuvant. Nous avons testé 6 compositions des MAP confectionnés à base de ciment binaire constitués de ciment et de la pouzzolane naturelle, avec un taux de substitution de ciment par la pouzzolane variant entre 5 à 30 %. Notons que le dosage du superplastifiant et le rapport E/P, ainsi que le rapport sable /mortier sont maintenus constants pour l'ensemble des MAP afin de pouvoir analyser les propriétés à l'état frais.

Les différentes compositions et résultats des MAP sont donnés dans le tableau 4. 5 ci-dessous.

Tableau 4-5. Composition et résultats des essais d'ouvrabilité des MAP

substitution du ciment par la pouzzolane avec un dosage de SP (%) constant								
Mélange		MAP 0	MAP 7	MAP 8	MAP 9	MAP 10	MAP 11	MAP 12
(% de pouzzolane)		0%	5%	10%	15%	20%	25%	30%
constituants du mélange	ciment en (g)	1038.41	983.31	929.37	876.85	822.56	769.65	716.93
	pouzzolane en (g)	0	51.75	103.26	154.74	205.64	256.55	307.25
	sable en (g)	2045.3	2045.3	2045.3	2045.3	2045.3	2045.3	2045.3
	70% Eau en (g)	298.3	297.9	297.3	296.3	295.9	295.2	294.4
	30% Eau en (g)	127.9	127.7	127.4	127	126.8	126.5	126.2
	SP (%)	1%	1%					
	MEDAFLOW 30 en (g)	10.38	10.35	10.33	10.32	10.28	10.26	10.24
Etalement en (cm)		30	26.5	27.25	27	27.5	28.25	28.5
temps d'écoulement en (sec)		6.00	9.4	8.33	7.25	7.74	7.9	8.1
seuil de cisaillement (Pa)		21.58	26.05	20.55	14.88	21.87	20.35	19.79
viscosité (Pa.s)		5.13	6.24	5.09	4.47	5.57	5.44	5.14
Observations		mortier de référence	Perte ouvrabilité	Ouvrabilité obtenue				

Pour les compositions référencées de MAP7 au MAP12 les principaux résultats des essais rhéologique des MAP en comparaison avec le mortier de référence MAP0 confectionné sans ajout à savoir les propriétés rhéologique basant sur seuil de cisaillement  $\tau_0$  et la viscosité  $\mu$  mesuré par le rhéomètre, l'étalement au mini cône ainsi que l'écoulement en entonnoir V (V-funnel) montrent ce qui suit.

i. Le seuil de cisaillement et la viscosité

Evolution de seuil de cisaillement et la viscosité des MAP en fonction de dosage de pouzzolane sont présentés par la figure 4.12. Cette figure montre que l'ajout de pouzzolane avec un taux de 5%, à diminuer la fluidité du mélange car une élévation du seuil de cisaillement  $\tau_0$  a été engendrée ainsi que l'augmentation du dosage de l'ajout à 10% a été capable de changer le comportement rhéologique, toute fois une réduction unique a été menu par l'introduction de 15 % de pouzzolane en substitution de ciment dont elle est visualisé sur. (Figure 4.7)

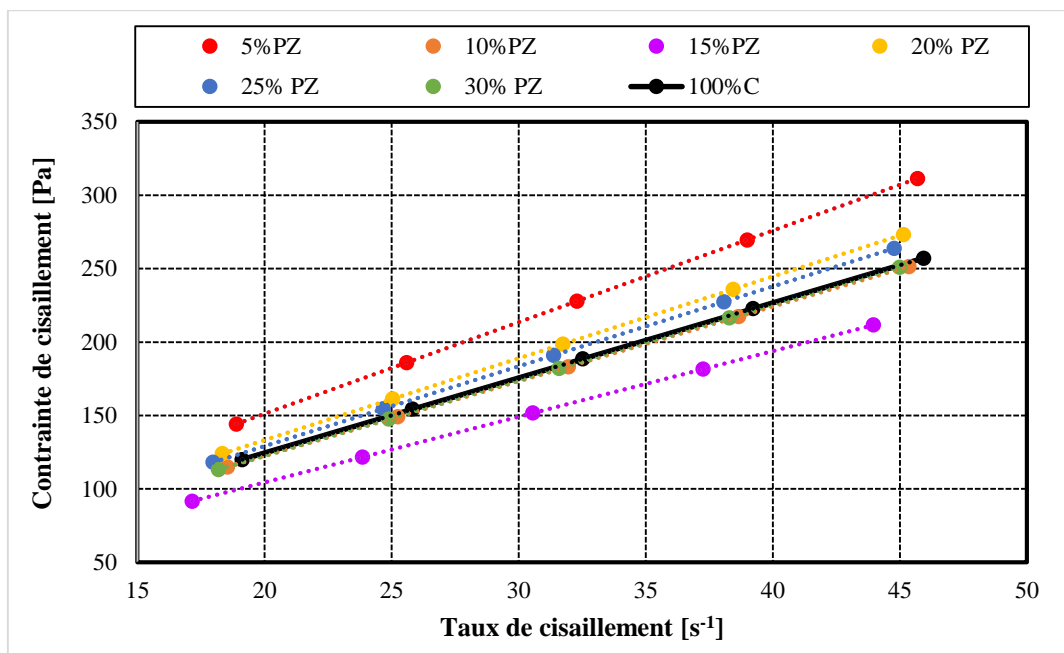


Figure 4-12. Rhéogramme des MAP en fonction de dosage de pouzzolane

Les résultats obtenus représenté graphiquement sur le rhéogramme montrent que les mélanges ont presque les mêmes paramètres rhéologiques à l'exception de MAP7 formulé par l'addition de 5% de pouzzolane, qui présentent un seuil de cisaillement et viscosité de 26.05 et 6.24 respectivement. Par contre la fluidité du MAP 9 confectionné par 15% d'ajouts présente les plus faibles valeurs de seuil de cisaillement et de viscosité de 14.88 et 4.47 respectivement. A cet effet on résulte que l'élévation de seuil de cisaillement est établie par l'augmentation de la viscosité ce qui s'explique graphiquement par la pente de la droit du rhéogramme.

La figures 4.8 et figure 4.9 montre l'effet de dosage de pouzzolane sur le seuil de cisaillement des MAP et sur la viscosité. Selon Belaidi [6] l'étalement est presque constant avec l'augmentation de la teneur en pouzzolane jusqu'à une teneur de 15%. Au-delà de cette valeur de substitution l'étalement a subi une diminution. Ce qui confirme notre étude ou une diminution considérable de seuil de cisaillement jusqu'à 15 % de substitution. Au-delà de cette

valeur le seuil de cisaillement à reprendre l'augmentation. Nous pouvons aussi le justifier par certains avantages techniques que présente l'utilisation des pouzzolanes dans le béton ne peuvent pas être atteints lorsqu'un CPA est utilisé seul. Parmi ces avantages, mentionnons une plus grande ouvrabilité, une maniabilité accrue [34].

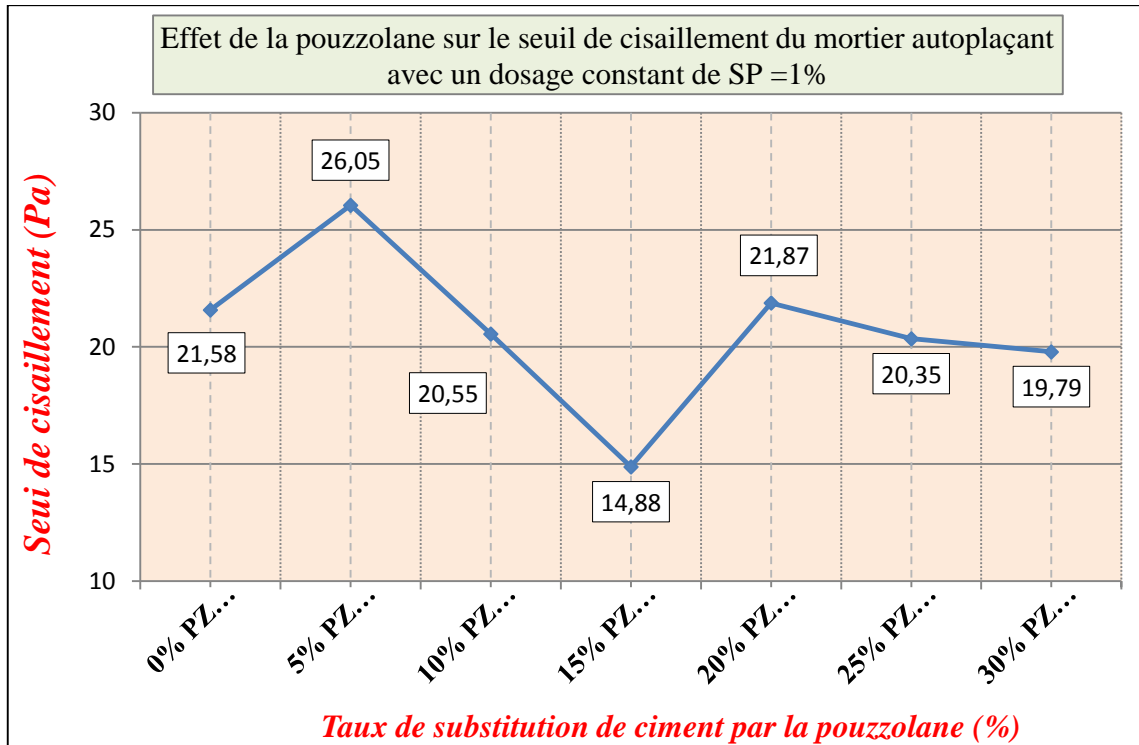


Figure 4- 13 Effet de dosage de pouzzolane sur le seuil de cisaillement des MAP.

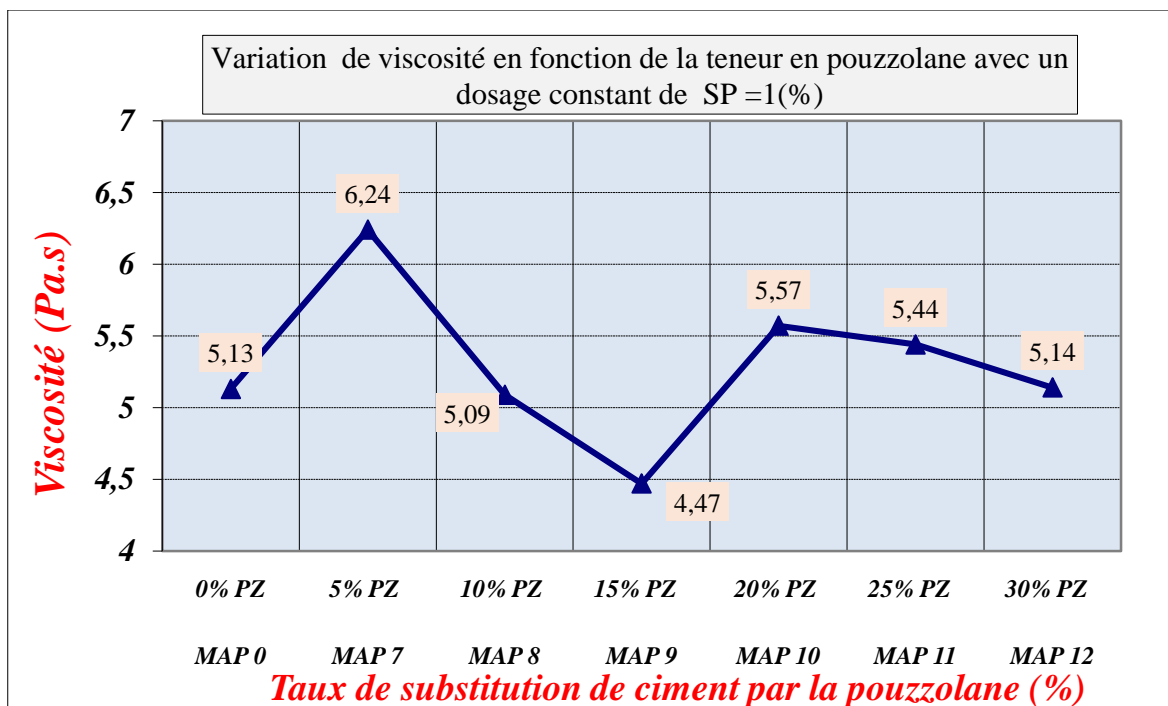


Figure 4- 14 Effet de dosage de pouzzolane sur la viscosité des MAP.

ii. Étalement au mini cône

Effet de dosage de pouzzolane sur l'étalement des MAP présenté par la figure 4-15. Les compositions des MAP testées ont des valeurs d'étalements inférieures à celle correspondante au MAP0 formulé sans aucune addition ou ils ont gardé leur fluidité par l'effet de filler de la pouzzolane à l'exclusion du MAP7. On note ici que toutes les valeurs de l'étalement par le mini cône sont dans l'intervalle 27 à 33 sauf MAP7, on remarque une augmentation de seuil de cisaillement a généré la réduction de l'étalement vers la limite inférieure de l'intervalle préconisé par AFGC [16], alors que la nécessité d'améliorer son ouvrabilité est judicieuse.

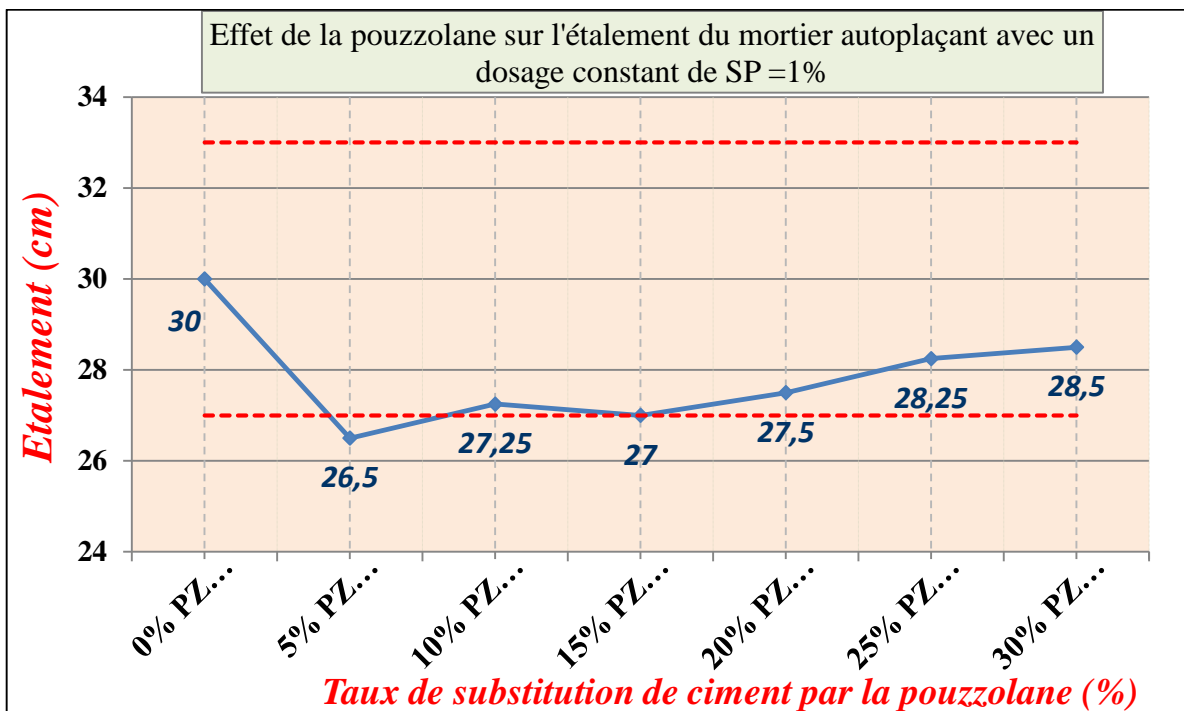


Figure 4-15. Effet de dosage de pouzzolane sur l'étalement des MAP

iii. Temps d'écoulement à l'entonnoir V

Pratiquement la pouzzolane naturelle a un effet positif sur l'écoulement car le temps d'écoulement affiché sur le tableau 4.5 montre que toutes les valeurs sont maintenues dans l'intervalle 2 à 10. Les résultats sont visualisés sur la figure 4-16.

La substitution du ciment par la pouzzolane naturelle a affecté positivement les paramètres rhéologiques des mortiers autoplaçant à l'exception de mortier avec 5% de pouzzolane, dont un ajustement du dosage de superplastifiant est nécessaire.

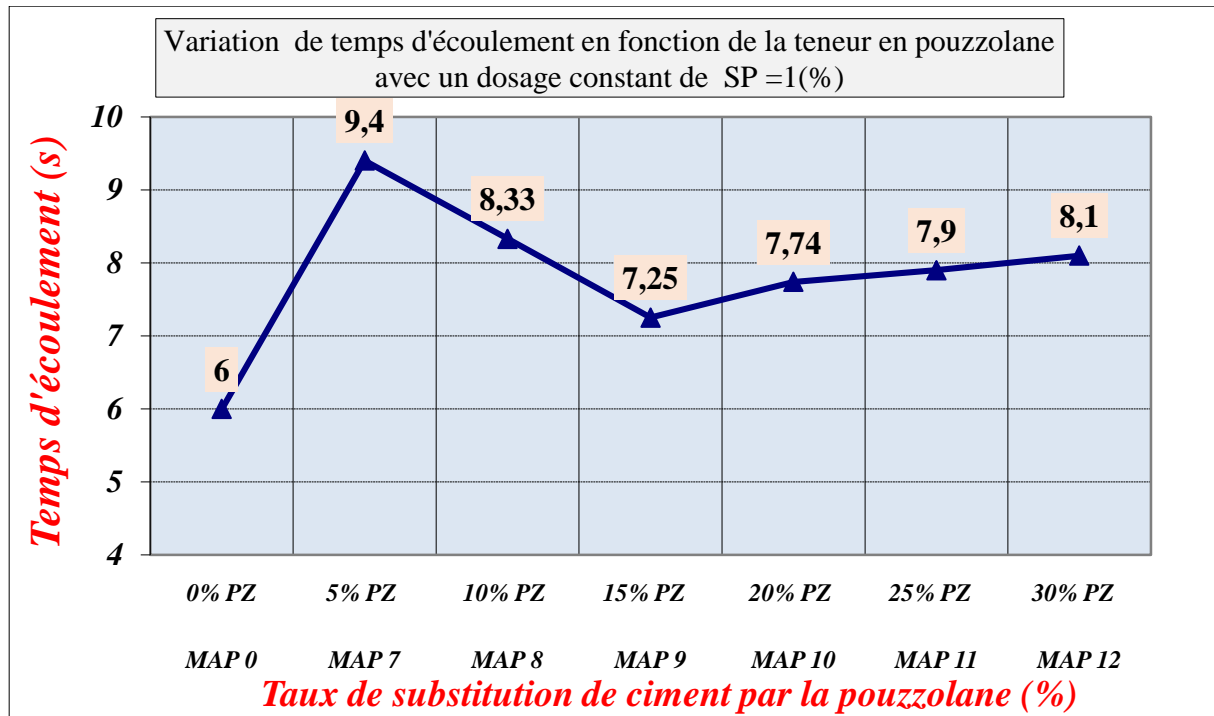


Figure 4-16. Effet de dosage de pouzzolane sur le temps d'écoulement des MAP

**b. Influence de pouzzolane à l'état durci**

Les réactions d'hydratation du ciment et de la pouzzolane peuvent être considérées séparément, bien que dans une certaine mesure elles se produisent en même temps. En fait pouzzolanique, qui est plus lente que la réaction d'hydratation du ciment, peut avoir lieu seulement après l'hydratation du ciment [réf].

L'introduction de pouzzolane en substitution de ciment avec des pourcentages varié de 5% à 30% n'a pas un grand effet sur le comportement mécanique tel que la résistance à la compression à jeune âge dont les résultats sont donné dans le tableau 4.6.

Tableau 4-6. Résistance à la compression à jeune âge des MAP à base de Pouzzolane

Substitution du ciment par la pouzzolane avec un dosage de SP (%) constant							
Mélange	MAP 0	MAP 7	MAP 8	MAP 9	MAP 10	MAP 11	MAP 12
% Pouzzolane	0%	5%	10%	15%	20%	25%	30%
SP %	1%						
<b>R<sub>clj</sub> (MPa)</b>	19.77	22.85	20.37	18.11	16.33	16.00	9.19

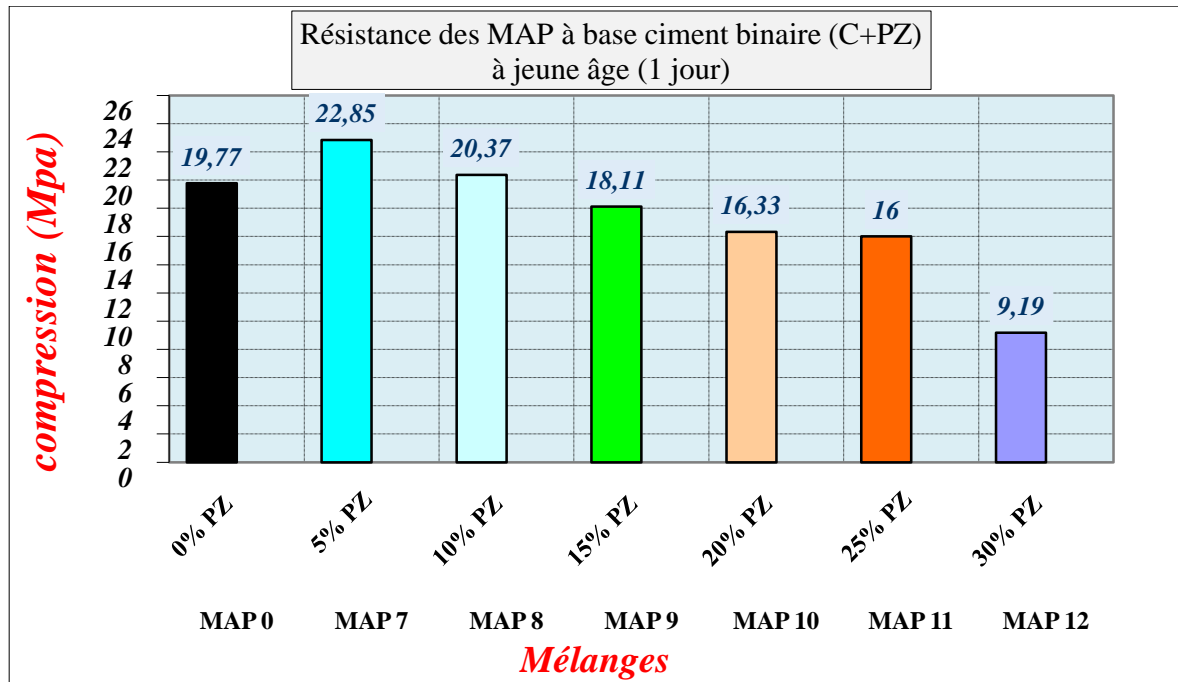


Figure 4-17. Variation de la résistance à la compression des MAP en fonction de la teneur en pouzzolane.

La variation de la résistance à la compression des MAP en fonction de la teneur en pouzzolane est décroissante au-delà de 15% de pouzzolane par rapport à celle de référence (figure 4.17). Cette chute de résistance a été constaté et justifier par la diminution de la quantité de ciment.

Par contre, les résultats obtenus montrent qu'une légère augmentation de résistance à la compression a été attribuée aux mortiers confectionnés avec une teneur de pouzzolane de 5% et 10% est cela est probablement dû à l'effet combiner de CPJ (existence des filler calcaire) et la pouzzolane naturelle.

### 4.3.3. Influence de poudre de marbre

#### a. Influence de poudre sur l'état frais du mortier

Afin d'analyser l'influence de la poudre de marbre sur l'ouvrabilité des MAP à l'état frais, également nous avons testé 6 compositions des MAP. Ces dernières ont été confectionnées à base de ciment et de la poudre de marbre. Notons que la poudre de marbre a été introduite par substitution au ciment avec un taux variant entre 5% à 30%. Le tableau 4-7 donne les compositions et résultats de ces 6 essais pour les MAP13 au MAP18 en comparaison avec le mortier de référence qui ne contient pas d'ajout.

Tableau 4-7. Compositions et résultats des essais d'ouvrabilité des MAP.

substitution du ciment par la poudre de marbre avec un dosage de SP (%) constant								
Mélange	MAP 0	MAP 13	MAP 14	MAP 15	MAP 16	MAP 17	MAP 18	
(%) de poudre de marbre	0%	5%	10%	15%	20%	25%	30%	
constituants du	ciment en (g)	1038.41	982.64	927.67	873.03	818.73	764.77	711.16
	poudre de marbre en (g)	0	51.72	103.07	154.06	204.68	254.92	304.78
	sable en (g)	2045.3	2045.3	2045.3	2045.3	2045.3	2045.3	2045.3
	70% Eau en (g)	298.3	297.4	296.3	295.3	294.2	293.2	292.1
	30% Eau en (g)	127.9	127.5	127	126.6	126.1	125.6	125.2
	SP (%)	1%	1%					
	MEDAFLOW 30 en (g)	10.38	10.34	10.31	10.27	10.23	10.2	10.16
Etalement en (cm)	30	26	28	27	32	32	32.25	
temps d'écoulement (sec)	6.00	8.88	7.44	8.17	6.1	5.98	6	
seuil de cisaillement (Pa)	21.58	22.18	17.83	17.96	21.95	9.94	16.44	
viscosité (Pa.s)	5.13	5.3	5.35	5.57	5.26	3.31	4.36	
Observations	mortier de référence	Perte d'ouvrabilité	Augmentation d'ouvrabilité					

i. Le seuil de cisaillement et la viscosité

La figure 4. 18 représente l'évolution de taux de cisaillement et contrainte de cisaillement des MAP en fonction de dosage de poudre de marbre, on remarque que le mélange est fluidifié par l'introduction de la poudre de marbre avec une teneur de 10% à 30% dont il a subi une diminution importante du seuil de cisaillement et de viscosité qui lui rendre moins visqueux et ce à partir de 25% de substitution de ciment par la poudre de marbre.

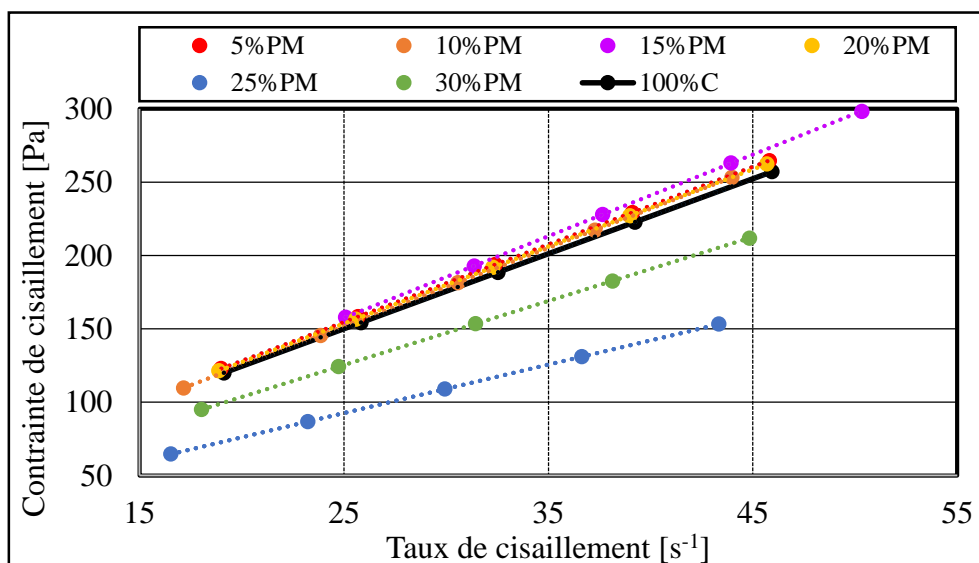


Figure 4-18. Evolution de taux de cisaillement et la contrainte de cisaillement des MAP en fonction de dosage de poudre de marbre.

Evolution de taux de cisaillement et la contrainte de cisaillement des MAP en fonction de dosage de poudre de marbre est présentée par le rhéogramme figure 4.18.

En remarque que le seuil de cisaillement est réduit par l'augmentation de la teneur en poudre de marbre plus spécifiquement pour le pourcentage de 25% et 30% , ou en remarque que la droit de 25% à une petite pente décrit sa viscosité car en peut dire de le 5%, 10%, 15% et 20% ont dans le même intervalle que celle du mortier de référence. Notant ici que MAP13 donne des paramètres rhéologiques similaire à celle de référence et cela est visualisé dans les figures 4.8 et la figure 4.9

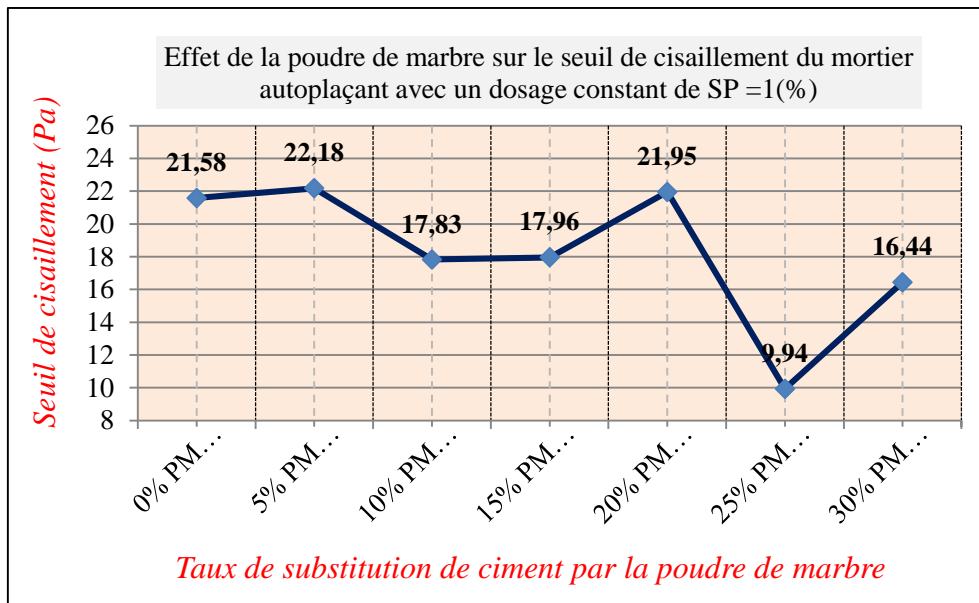


Figure 4-19. L'influence de la poudre marbre sur le seuil de cisaillement de MAP

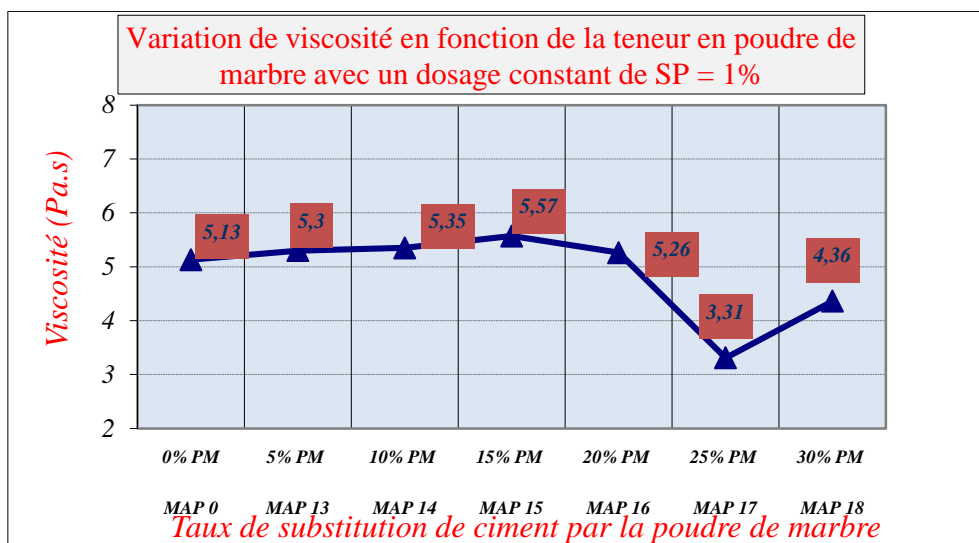


Figure 4-20. Effet de dosage de Poudre de marbre sur la viscosité des MAP.

ii. L'étalement au mini cône

L'étalement représenté par la figure 4.21 montre que l'étalement varie entre 27 à 32 cm lorsque la teneur en poudre de marbre augmente de 10 à 30%, ces valeurs montrent l'effet bénéfique de la poudre de marbre conçu par la fluidité désiré qui n'a pas dépassé la fourchette recommandée par AFGC [16]. L'addition de 5% de poudre de marbre a été écartée pour son effet négatif sur le l'ouvrabilité des MAP car une diminution d'étalement a été apparue. Selon Ouai et Bedj [34], ont montrer que l'influence du poudre de marbre a été bénéfique jusqu'à 20% au-delà un risque de ressuage est probable. Ainsi que Boukhalkhal [5] a confirmé l'homogénéité des MAP avec la substitution de ciment par la poudre de marbre et son effet bénéfique avec des dosages de 5% à 25%, alors que les deux pourcentages 30 et 35% sont écartés en raison du ressuage qui nuit l'homogénéité et réduit la résistance à la ségrégation.

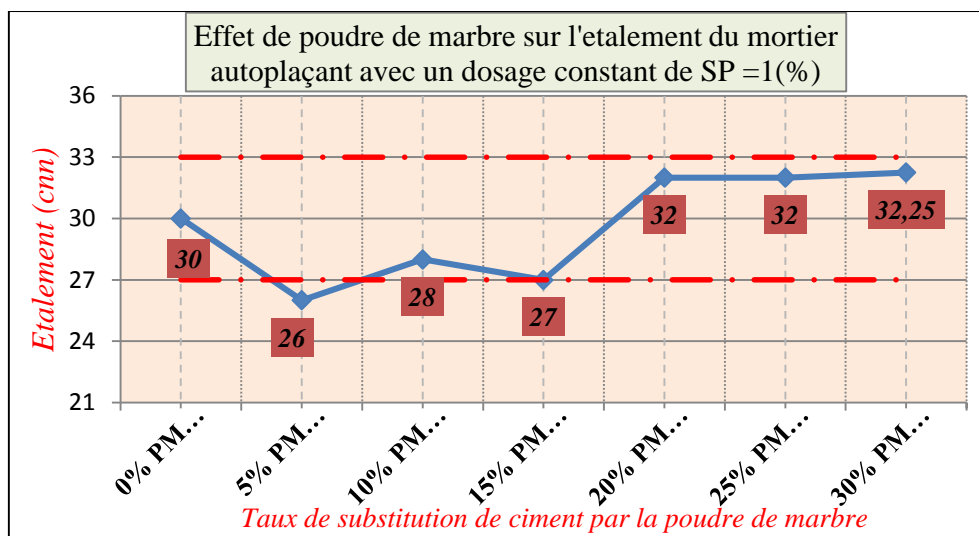


Figure 4- 21 Effet de dosage de poudre de marbre sur l'étalement des MAP

iii. Temps d'écoulement à l'entonnoir V

L'effet de dosage de poudre de marbre sur le temps d'écoulement des MAP est représenté par la figure 4 .22. Les résultats obtenus à travers l'essai d'entonnoir en V, montrent clairement que les compositions des mortiers confectionnées à base de liant contenant le ciment et la poudre de marbre, présentent des temps des écoulements situés dans la fourchette recommandée des MAP .Tout d'abord l'augmentation de taux de substitution du ciment par la poudre de marbre affecte à la fois de façon comparable le temps d'écoulement et l'étalement des mortiers.

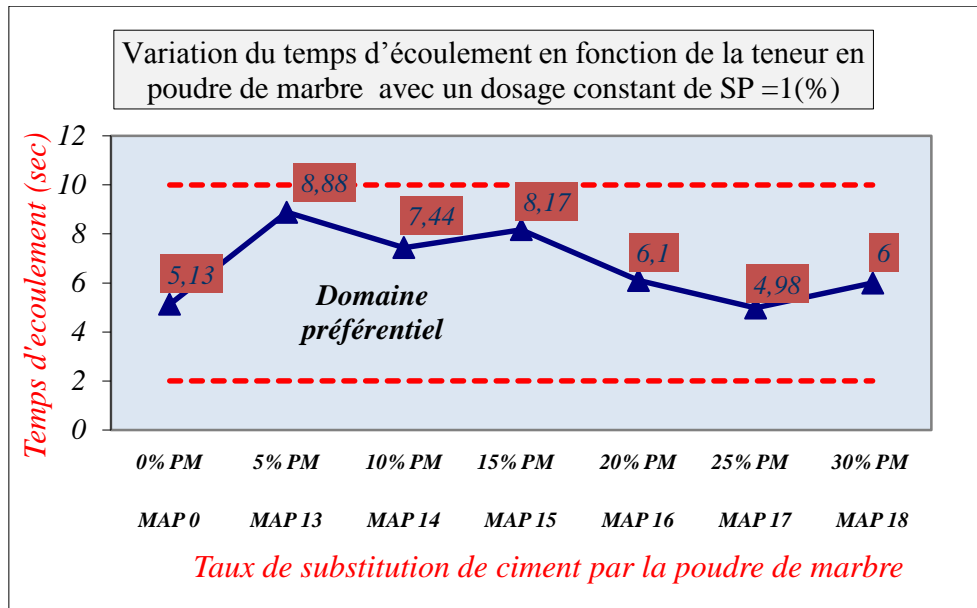


Figure 4-22. Effet de dosage de poudre de marbre sur le temps d'écoulement des MAP

**b. L'effet de la poudre de marbre à l'état durci**

En fait, la poudre de marbre appartient à la famille des fillers inertes ces fillers sont composées principalement de CaCO<sub>3</sub>. Cet élément accélère l'hydratation du C<sub>3</sub>S, ce qui améliore les résistances aux jeunes âges.

Le tableau 4-8 présente la résistance à la compression à jeune âge des mortiers autoplaçant à base de poudre de marbre.

Tableau 4-8. Résistance à la compression à jeune âge des MAP à base de poudre de marbre.

Substitution du ciment par la poudre de marbre avec un dosage de SP (%) variable							
Mélange	MAP0	MAP 13	MAP 14	MAP 15	MAP 16	MAP17	MAP 18
(%) de poudre de marbre	0%	5%	10%	15%	20%	25%	30%
SP %	1%	1.6%	1%				
R <sub>clj</sub> (MPa)	19.77	28.66	20.39	20.18	18.36	115.25	10.87

Selon les résultats en remarque que la résistance à jeune âge des mortiers confectionnés avec des ciments binaires à base de la poudre de marbre donne des résistances parfois supérieur et parfois similaire à celle de référence jusqu'à 20%. Au-delà de 20% la diminution est constaté est cela est dû essentiellement par le manque du ciment.

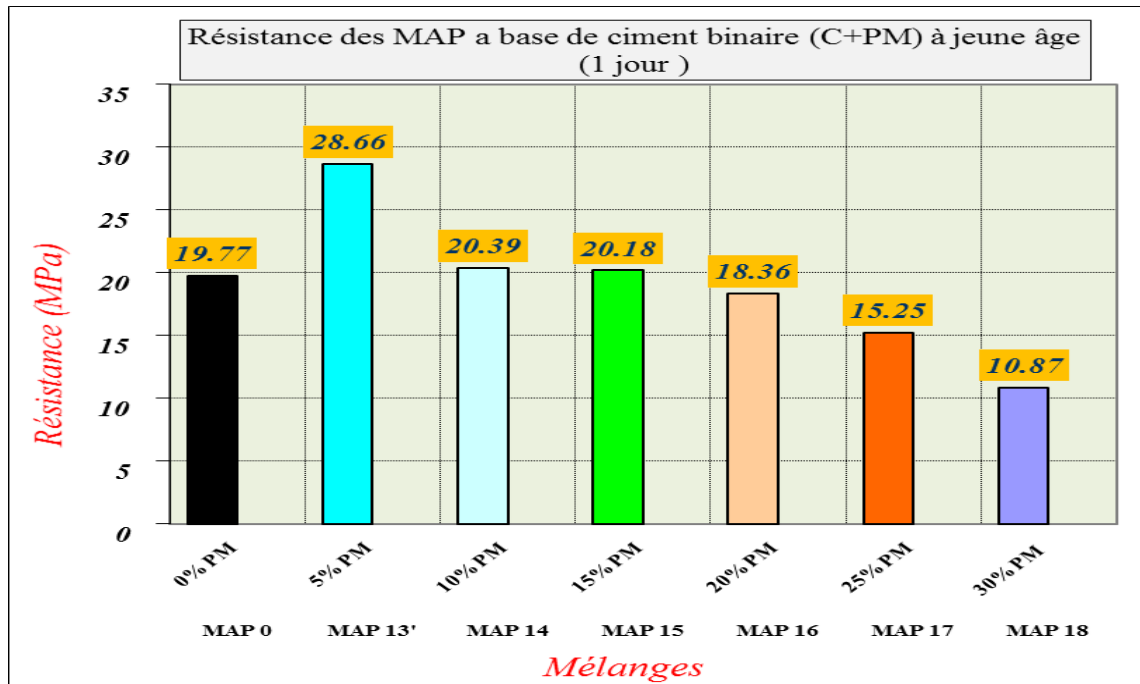


Figure 4- 23 Variation du Résistance à la compression des MAP en fonction de la teneur en poudre de marbre

#### 4.4. Influence des ajouts minéraux sur les MAP à base des ciments ternaires

##### 4.3.4. L'influence de la pouzzolane naturelle avec le laitier de haut fourneau

Après avoir connu l'effet de chaque ajout (soit la pouzzolane naturelle, le laitier de haut fourneau ou la poudre de marbre) sur le comportement rhéologique du mortier autoplaçant, on passe à la combinaison des deux ajouts (pouzzolane naturelle +laitier) ( pouzzolane naturelle + poudre de marbre) et ( laitier de haut fourneau + poudre de marbre) pour voir le comportement rhéologique des mortiers autoplaçants, pour cela nous avons substitué le ciment avec des pourcentages qui varient entre 20 à 60%.

##### a. L'effet de pouzzolane naturelle avec le laitier sur l'état frais

Afin d'étudier l'effet combiné de pouzzolane et de laitier sur les propriétés des mortiers autoplaçant à l'état frais, les compositions et résultats des essais d'ouvrabilité des mortiers ternaire sont illustrés dans le tableau 4-9. Nous avons préparé 9 échantillons des mortiers pour trois rapports différents de PZ/L et L/PZ de 1, 1/2 et de 1/3.

Tableau 4-9. Compositions et résultats des essais d'ouvrabilité des mortiers ternaire.

Mortier au ciment ternaire (CPJ+ PZ + LHF) SP (%) Constant											
Mélange		MAP 0	MAP 19	MAP 20	MAP 21	MAP 22	MAP 23	MAP 24	MAP 25	MAP 26	MAP 27
poudre	Ciments CPJ %	100%	80%	70%	60%	70%	60%	50%	60%	50%	40%
	pouzzolane %	0%	10%	10%	10%	20%	20%	20%	30%	30%	30%
	laitier %	0%	10%	20%	30%	10%	20%	30%	10%	20%	30%
constituants du mélange	ciments en (g)	1038.41	819.66	711.45	604.79	713.71	606.76	501.63	609.56	503.3	399.02
	pouzzolane (g)	0	102.46	101.64	100.8	203.92	202.25	200.65	304.78	301.98	299.26
	laitier (g)	0	102.46	203.27	302.39	101.96	202.25	300.98	101.59	201.32	299.26
	sable en (g)	2045.3	2045.3	2045.3	2045.3	2045.3	2045.3	2045.3	2045.3	2045.3	2045.3
	70% Eau en (g)	298.3	295	292.6	290.2	293.7	291.3	288.8	292.1	289.9	287.6
	30% Eau en (g)	127.9	126.4	125.4	124.4	125.9	124.9	123.8	125.2	124.2	123.2
	Sp	1%	1%								
	MEDAFLOW 30EN (g)	10.38	10.25	10.16	10.08	10.2	10.11	10.03	10.16	10.07	9.98
Etalement en (cm)	30	22	20	16.5	27.5	19	13.5	20	16.5	13.25	
temps d'écoulement (sec)	6	10	14	37.22	8.92	15.07	bloqué	15.35	38.01	bloqué	
seuil de cisaillement (Pa)	21.58	21.29	25.56	26.25	23.72	24.55	24.7	22.23	14.31	24.03	
viscosité (Pa.s)	5.13	5.49	6.88	8.35	6.83	6.1	7.86	5.31	4.55	6.84	
Observations	mortier de référence	Perte total d'ouvrabilité									

Pour les compositions des mortiers ternaires appelés MAP 19 au MAP 27. On remarque que la pouzzolane et le laitier on combinaison ont affectés négativement la rhéologie des mortiers autoplaçants et cela soit par la consommation du superplastifiant soit par l'absorption d'eau par ces fillers.

i. Le seuil de cisaillement et la viscosité

L'évolution de taux de cisaillement et la contrainte de cisaillement des MAP en fonction de dosage de pouzzolane et laitier sont apparu dans la figure 4.24. On observe que l'allure du rhéogramme des MAP à base de ciment ternaire avec (PZ+LHF) ressemble à celle des MAP à base de ciment binaire avec laitier, d'après cette évolution on peut exprimer l'influence de dosage de pouzzolane par rapport au dosage de laitier et l'inverse car on remarque que le MAP se comporte selon le dosage des composants, sachons que le comportement de chaque ajout en combinaison binaire dont la pouzzolane dilué le mélange et le laitier absorbe l'eau dans le mélange. A cet effet on a conclu que le mélange est moins visqueux avec l'augmentation du dosage de pouzzolane et le plus visqueux avec l'augmentation du dosage de laitier.

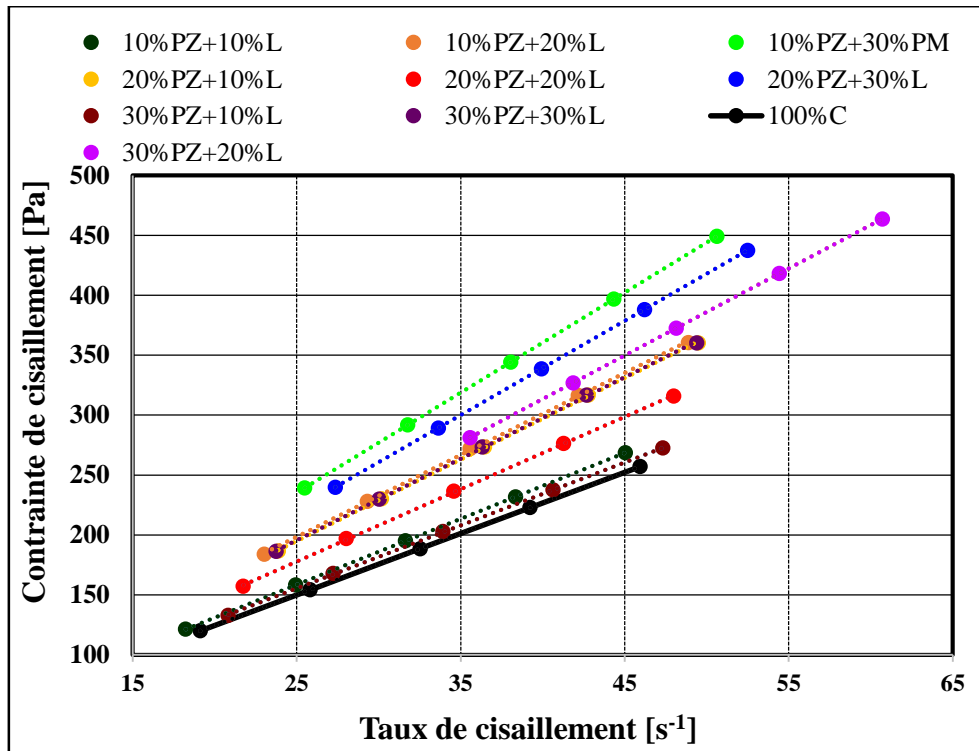


Figure 4-24. Evolution de seuil de cisaillement et la viscosité des MAP en fonction de dosage de pouzzolane et laitier

La figure 4.25 expose la variation de seuil de cisaillement à base de ciment ternaire (PZ + LHF) montre qu'une augmentation de seuil de cisaillement en comparaison avec le mortier de référence. La grande valeur a été observée par la substitution de ciment avec 40% d'ajout (10%PZ + 30%LHF), où la quantité de laitier est très élevée par rapport au pouzzolane ce pendant cette augmentation de seuil est justifié par l'absorption d'eau par le laitier qui a été déjà observé dans les MAP à base de ciment binaire.

La figure 4.26 expose la variation de viscosité des MAP à base de ciment ternaire (PZ + LHF) déduite par le rhéomètre montre que tous les mélanges sont plus visqueux que le mélange de référence. De même pour le MAP21 (10% PZ+30% LHF) a été remarqué par sa viscosité élevée. Le laitier a absorbé l'eau de superplastifiant, nous avons remarqué que la viscosité maximale est enregistrée dans le MAP21 par contre nous avons remarqué que la viscosité a diminuée dans le MAP24 (20%PZ +30%PHF) et cela est dû probablement à la quantité élevée de pouzzolane.

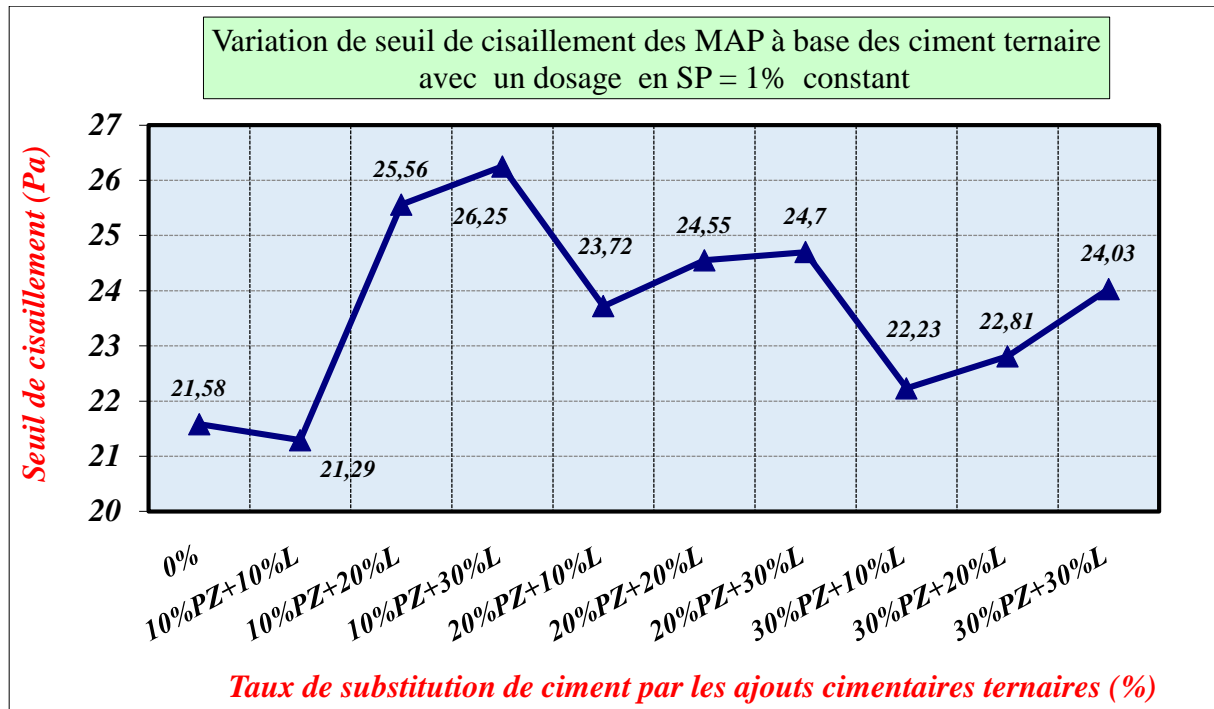


Figure 4-25. Variation de seuil de cisaillement des MAP à base de ciment ternaire (PZ + LHF)

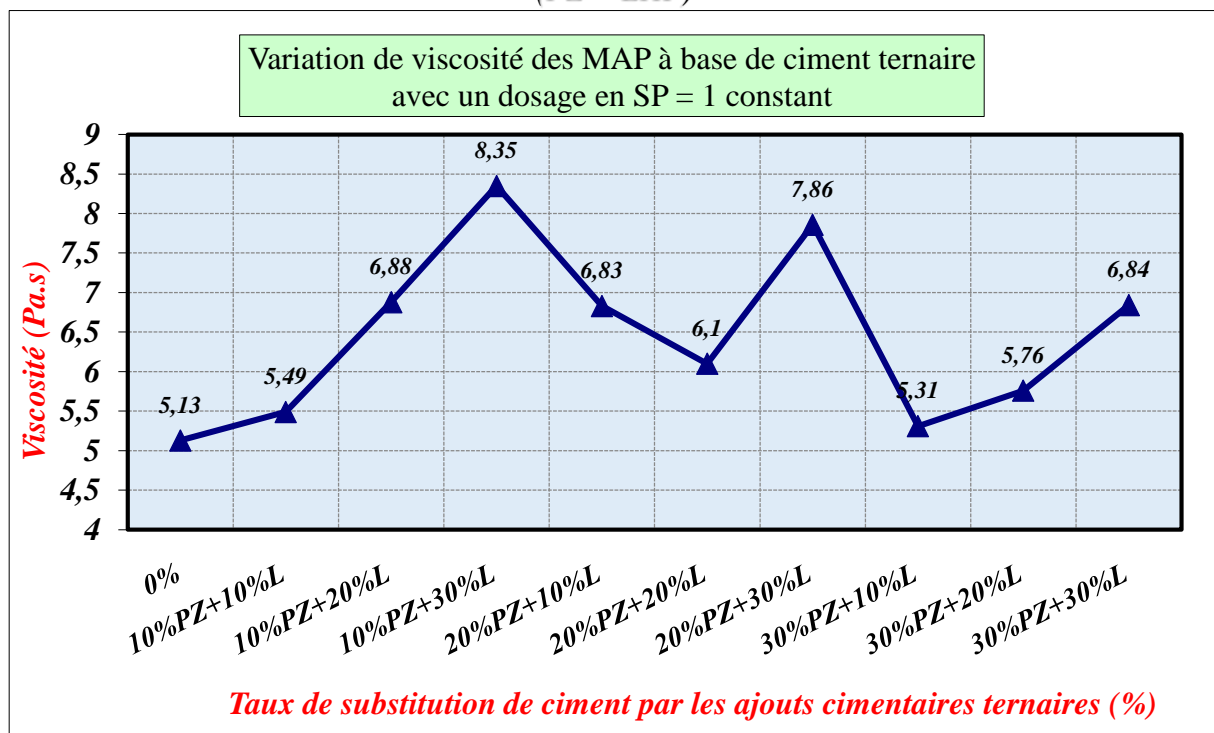


Figure 4-26. Variation de viscosité des MAP à base de ciment ternaire (PZ + LHF)

L'étalement au mini cône

La figure 4.27 représente la variation d'étalement des MAP à base de ciment ternaire (PZ + LHF) on remarque une chute importante des étalements des MAP formulé avec divers dosage de pouzzolane et de laitier contre un dosage constant de superplastifiant de 1% par rapport au

mortier autoplaçant de référence formulé sans l'ajout. À l'exception de MAP22 constitué par la substitution de ciment par 20% pouzzolane et 10% de laitier qu'a rempli les exigences recommandé.

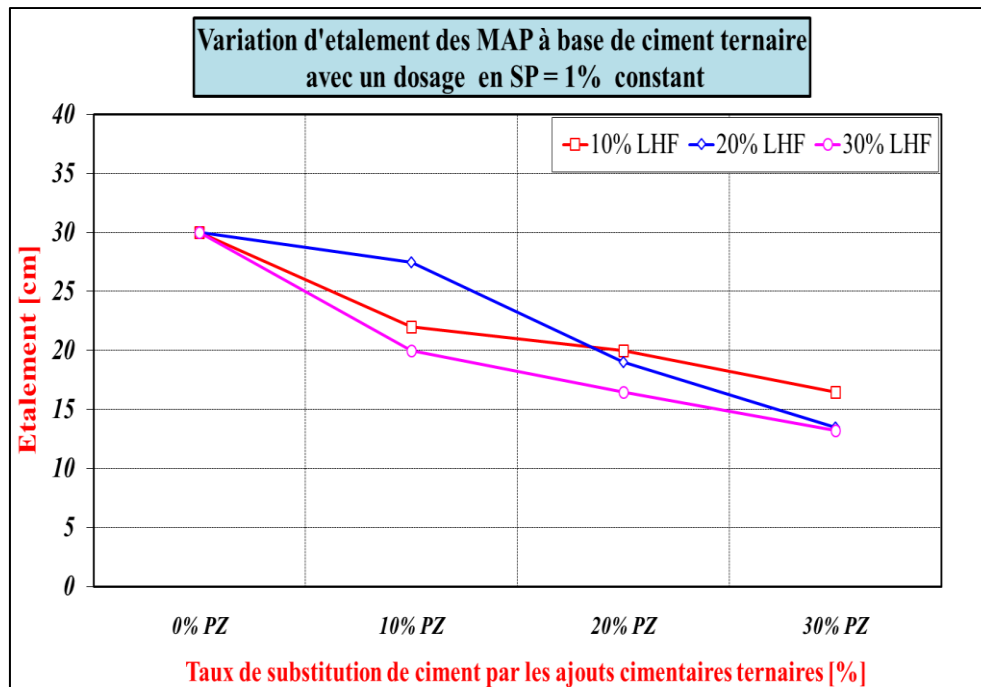


Figure 4-27. Variation d'étalement des MAP à base de ciment ternaire (PZ + LHF)

#### Temps d'écoulement à l'entonnoir V

On remarque que le temps d'écoulement des MAP confectionnés avec des ciments substitués par la pouzzolane et le laitier est dépassé le temps d'écoulement de mortier de référence. Toute fois une grande augmentation sont d'hors de l'intervalle ciblé de 2 à 10 s , aussi nous avons constaté un blocage pour le MAP 24 avec une substitution de 50% de ciment (20% PZ +30% LHF), et MAP27 avec une substitution de 60% de ciment d'un dosage de (30%PZ +30% LHF), à l'exception de MAP 22 de (70% CPJ + 20% PZ + 10% L) on remarque une fluidité moine que le MAP de référence mais elle reste toujours dans le domaine efficace.

#### ii. L'effet de l'ajustement de superplastifiant

Le tableau 4-10 montre les différentes compositions et les résultats des essais d'ouvrabilité des mortiers ternaire avec l'ajustement du dosage SP.

Tableau 4-10. Compositions et résultats des essais d'ouvrabilité des mortiers ternaire avec un ajustement de SP

Mortiers aux ciments ternaires (CPJ)+ PZ + LHF) SP (%) variable											
Mélange	MAP 0	MAP 19	MAP 20	MAP 21	MAP 22	MAP 23	MAP 24	MAP 25	MAP 26	MAP 27	
<b>poudre</b>	Ciments CPJ %	100%	80%	70%	60%	70%	60%	50%	60%	50%	40%
	pouzzolane %	0%	10%	10%	10%	20%	20%	20%	30%	30%	30%
	laitier %	0%	10%	20%	30%	10%	20%	30%	10%	20%	30%
<b>constituants du mélange</b>	ciments en (g)	1038.41	819.66	711.45	604.79	713.71	606.76	501.63	609.56	503.3	399.02
	pouzzolane (g)	0	102.46	101.64	100.8	203.92	202.25	200.65	304.78	301.98	299.26
	laitier (g)	0	102.46	203.27	302.39	101.96	202.25	300.98	101.59	201.32	299.26
	sable en (g)	2045.3	2045.3	2045.3	2045.3	2045.3	2045.3	2045.3	2045.3	2045.3	2045.3
	70% Eau en (g)	298.3	294	291.1	288.3	293.7	289.3	284.9	291.1	287.9	283.2
	30% Eau en (g)	127.9	126	124.8	123.5	125.9	124	122.1	124.8	123.4	121.4
	Sp %	1%	1.20%	1.30%	1.40%	1%	1.40%	1.80%	1.20%	1.40%	1.90%
	MEDAFLOW 30en (g)	10.38	12.29	13.21	14.11	10.2	14.16	18.06	12.19	14.09	18.95
Etalement en (cm)	30	29.5	28.5	27.5	27.5	27.5	27.75	27.5	27.5	27	
temps d'écoulement (sec)	6.00	7.21	7.84	8.11	8.92	8.53	10.54	8.42	9.58	9.8	
seuil de cisaillement (Pa)	21.58	19.78	20.86	18.05	23.72	11.63	20	18.2	18.27	17.54	
viscosité (Pa.s)	5.13	4.97	4.94	4.21	6.83	3.7	5.1	4.37	4.35	4.75	
<b>Observations</b>	mortier de référence	<b>SP Ajusté</b>									

Il est nécessaire d'ajusté le dosage en superplastifiant afin d'obtenir des MAP fluides, homogènes et résistant au ressuage et à la ségrégation. A cet effet nous avons recommencé les essais avec le même principe de composition et un ajustement en dosage de superplastifiant.

Le seuil de cisaillement et viscosité plastique

La figure 4.28 présente l'évolution de seuil de cisaillement des MAP en fonction de dosage de pouzzolane et du laitier avec le superplastifiant variable. Les résultats du ciment expérimental ternaire composé de (ciment + pouzzolane + laitier) montrent que les mélanges présentent une fluidité mise au point par efficacité de l'ajustement des dosages de superplastifiant décrite par la baisse visualisée de seuil de cisaillement  $\tau_0$  et de viscosité  $\mu$  par rapport au mortier de référence.

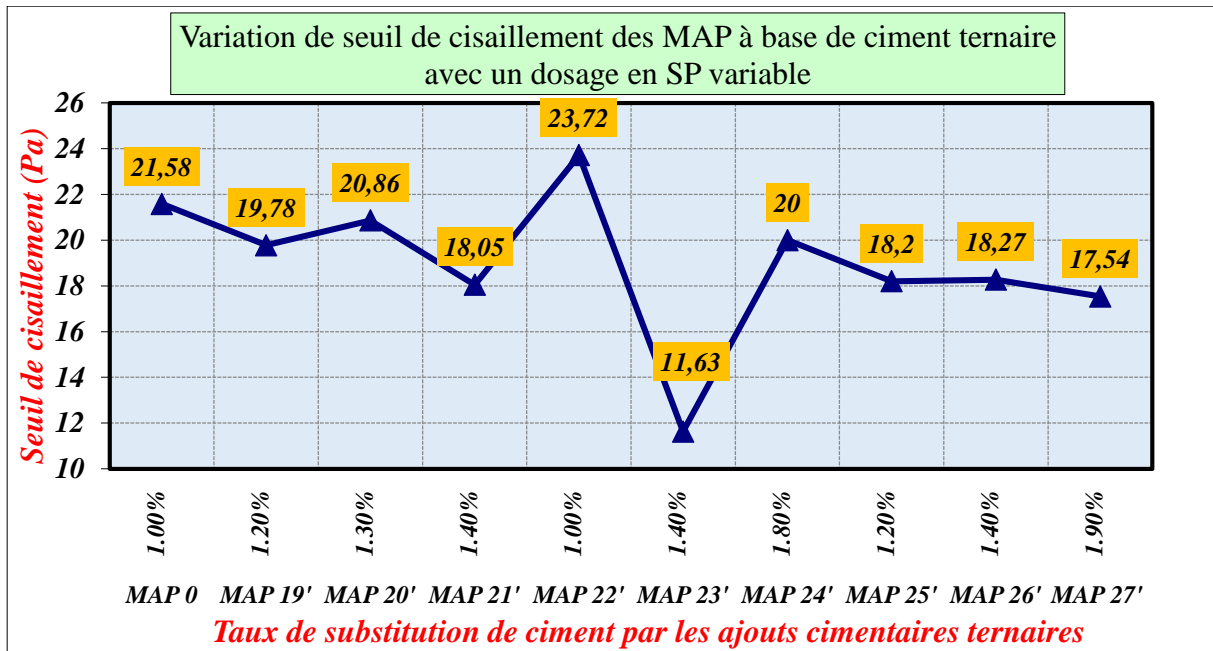


Figure 4-28. Evolution de seuil de cisaillement des MAP en fonction de dosage de PZ et LHF avec un dosage de SP variable

A l'exclusion de MAP24 composé par un ciment ternaire substitué par 20% de pouzzolane + 30% de laitier, et un dosage de superplastifiant de 1,8%. Nous avons remarqué que la galette du mélange est homogène avec un étalement de 27.75 cm voir (figure 4.29).

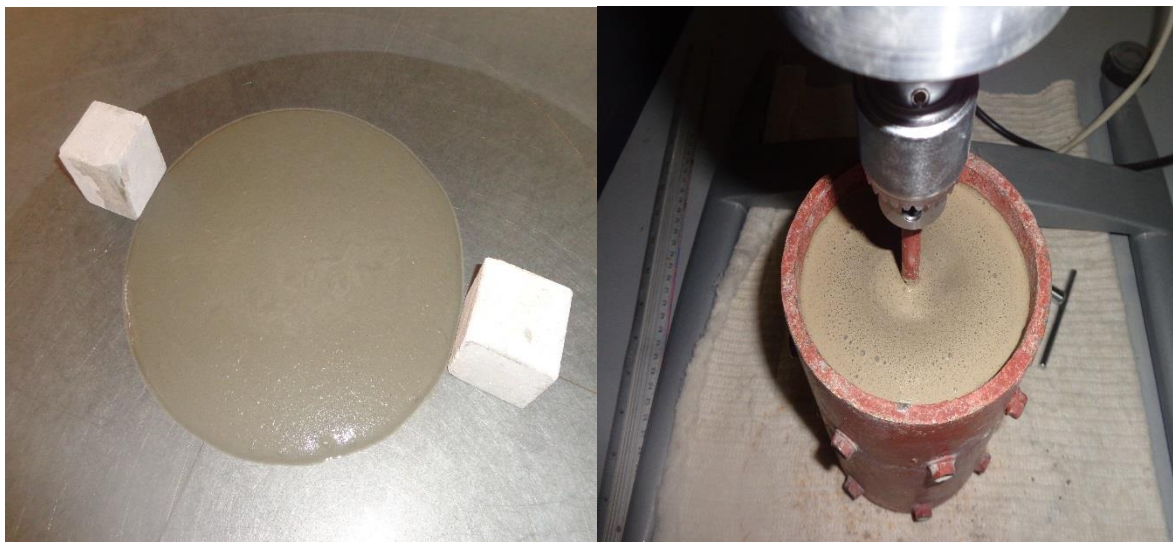


Figure 4- 29 Homogénéité de galette

La diminution de la viscosité est présentée par la figure 4.30 montrant l'évolution de viscosité des MAP en fonction de dosage de pouzzolane et de laitier avec un dosage de superplastifiant variable.

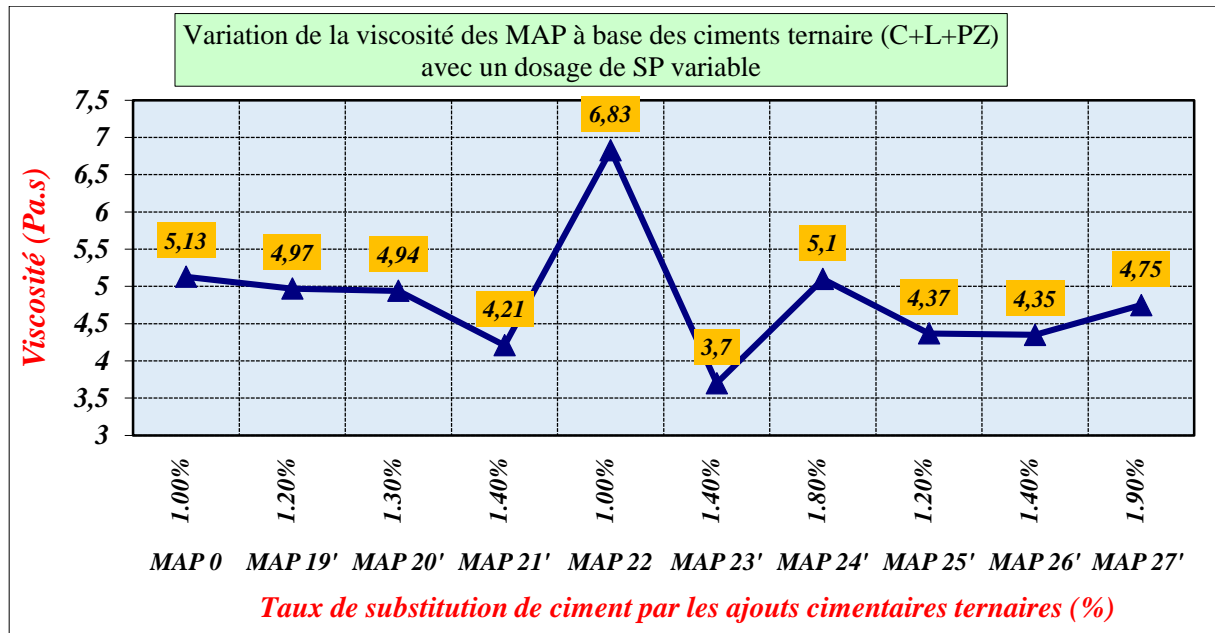


Figure 4-30. Evolution de viscosité des MAP en fonction de dosage de PZ et LHF avec un dosage de SP variable

L'étalement au mini cône

La figure 4.31 montre la variation d'étalement par le mini-cône des MAP à base des ciments ternaire en fonction de la teneur en pouzzolane et de laitier, sachant que le dosage de SP est variable. On constate que pour les mortiers à base de ciment ternaires (PZ/MP=1), apporte une amélioration de l'ouvrabilité jusqu'à 60% de substitution, on remarque que les étalements des MAP entrent dans l'intervalle recommandé.

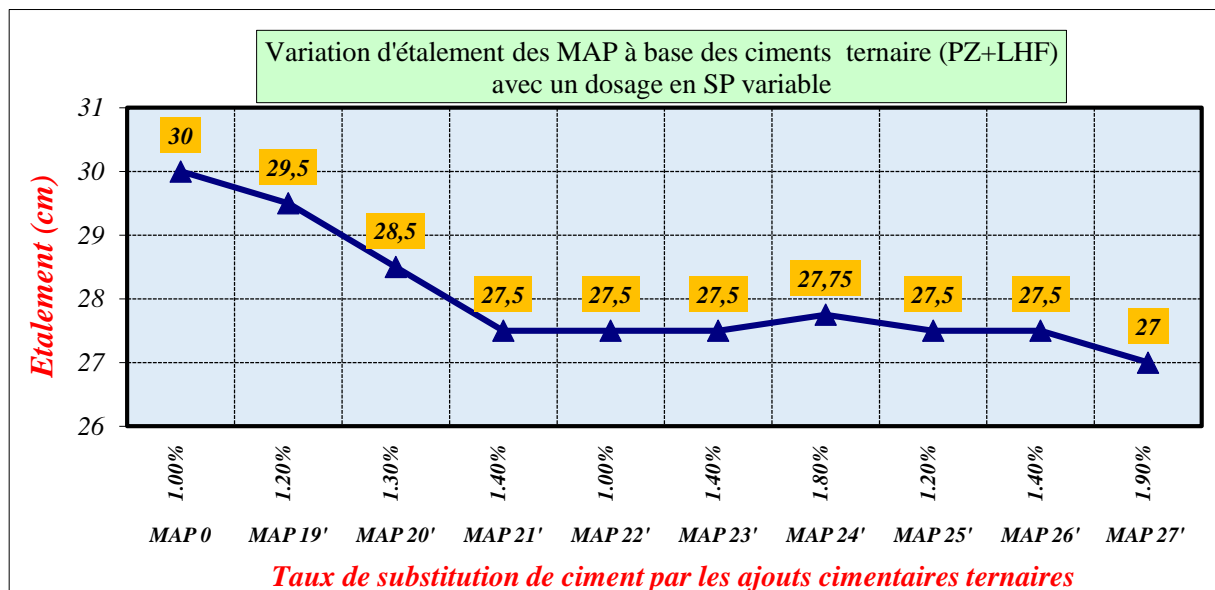


Figure 4- 31 Variation d'étalement des MAP à base des ciments ternaire (PZ+LHF) avec un dosage de SP variable

Temps d'écoulement à l'entonnoir V

La figure 4.32 représente la variation du temps d'écoulement à l'entonnoir v des mortiers ternaires (PZ+MP), et cela avec un dosage de SP variable.

On remarque que le temps d'écoulement a augmenté par rapport à ce de mortier de référence formulé par 100% ciment, notons que toutes les valeurs sont dans le domaine efficace. Sauf le MAP24 entraîné un léger dépassement au temps d'écoulement.

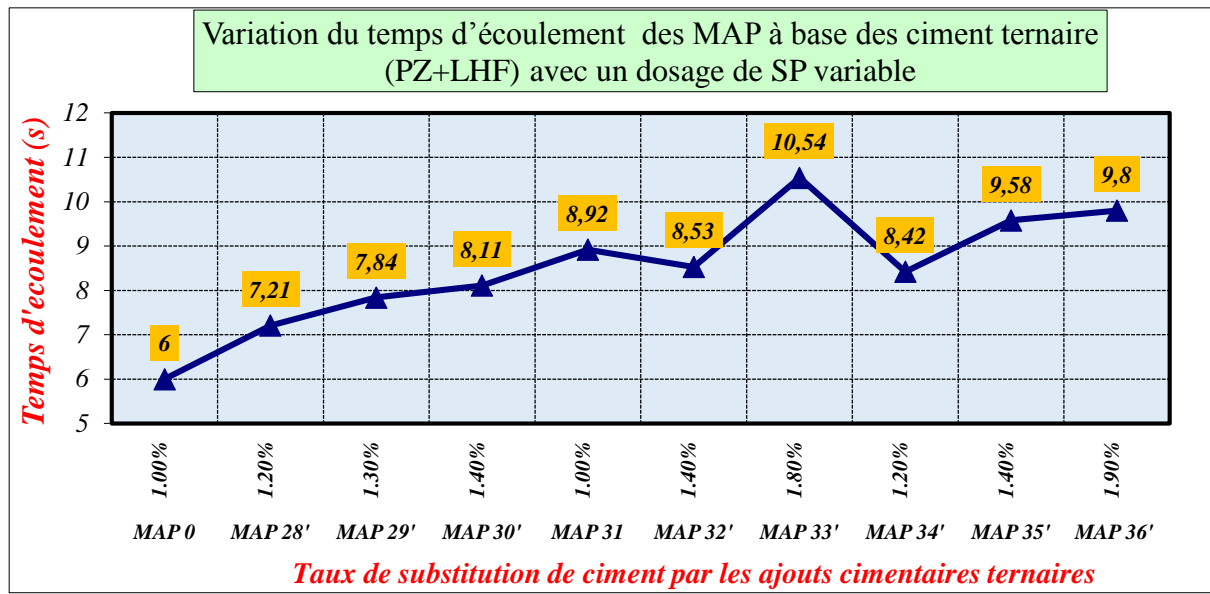


Figure 4.32. Variation de temps d'écoulement des MAP ternaire (PZ+L) avec l'ajustement de dosage de SP

iii. L'effet de la pouzzolane avec le laitier sur l'état durci

Afin d'étudier l'effet combiné de la pouzzolane et de laitier sur les propriétés des mortiers autoplaçant à l'état durci, nous avons préparé des éprouvettes de (4x4x16) cm, ces dernières écrasées à la presse de compression après 24 heures, les résultats obtenus sont récapitulées dans le tableau 4.11.

Tableau 4-11. Résistance à la compression des MAP à base de ciment ternaire à jeune âge.

Substitution du ciment par pouzzolane et laitier avec un dosage en SP variable										
Mélange	MAP 0	MAP 19	MAP 20	MAP 21	MA P 22	MAP 23	MAP 24	MAP 25	MAP 26	MAP 27
Ciments	100%	80%	70%	60%	70%	60%	50%	60%	50%	40%
pouzzolane	0%	10%	10%	10%	20%	20%	20%	30%	30%	30%
Laitier	0%	10%	20%	30%	10%	20%	30%	10%	20%	30%
SP %	1%	1.20%	1.30%	1.40%	1%	1.40%	1.80%	1.20%	1.40%	1.90%
<b>R<sub>clj</sub> (MPa)</b>	<b>19.77</b>	<b>21.06</b>	<b>13.48</b>	<b>8.09</b>	<b>13.64</b>	<b>8</b>	<b>7.4</b>	<b>8.88</b>	<b>6.68</b>	<b>3.78</b>

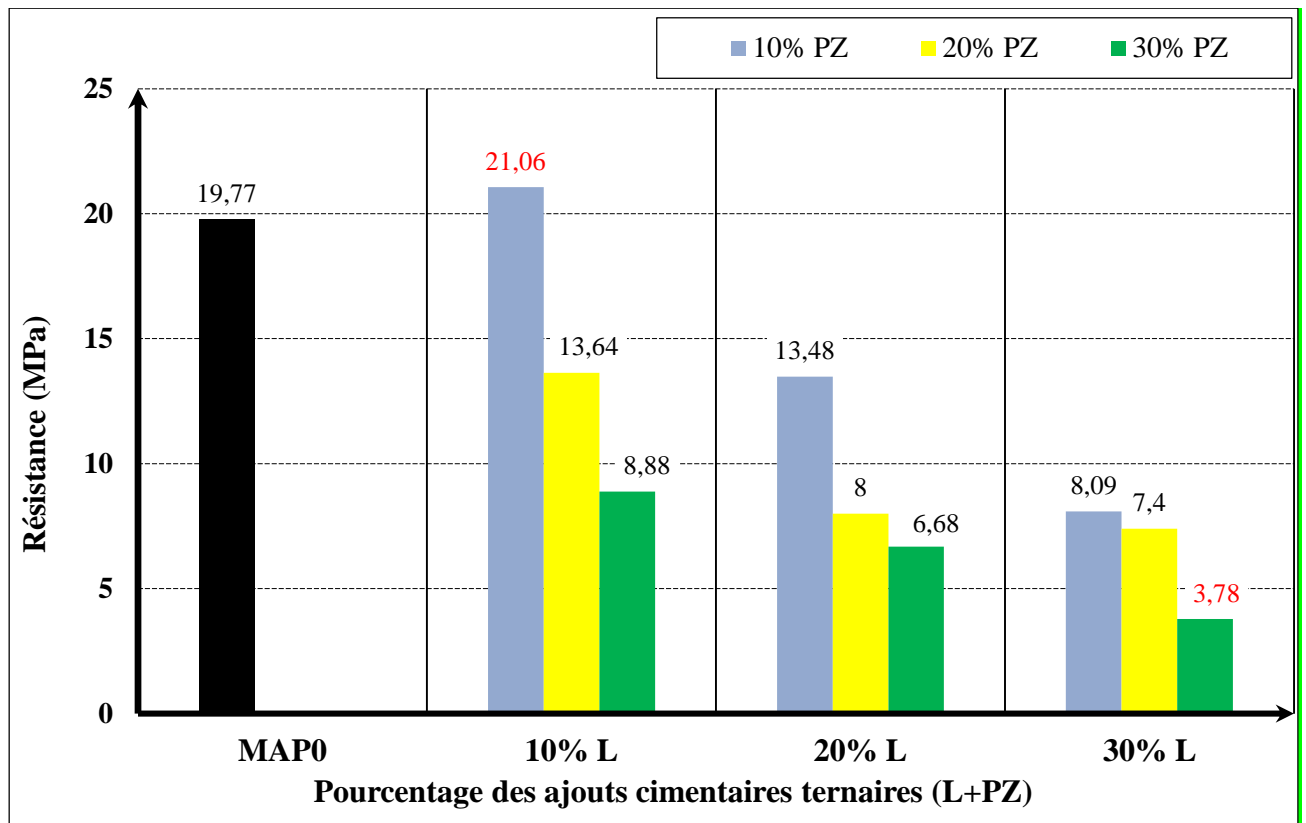


Figure 4-33. Variation de la résistance à la compression des MAP à base de ciment ternaire (LHF+PZ) à jeune âge (1jour)

On remarque que la résistance à la compression des MAP à base de ciments ternaire composés de pouzzolane et de laitier a augmentée par rapport à celle du MAP témoin, et cela dû probablement à l'effet de filler des ajouts à un dosage de 10%PZ + 10%LHF. Au-delà de ce pourcentage la résistance de tous les MAP à diminuée. D'après Ouai et Bedj [34] la résistance à la compression des MAP à base des ciments ternaire (PZ+LHF) se développe à long terme proportionnellement avec la réduction de pourcentage de laitier.

#### 4.3.5. L'influence de la pouzzolane naturelle avec la poudre de marbre

##### a. L'effet de la pouzzolane naturelle avec la poudre de marbre sur l'état frais

Afin d'étudier l'effet combiné de la pouzzolane et de la poudre de marbre sur les propriétés des mortiers autoplacant à l'état frais, les compositions et résultats des essais d'ouvrabilité des mortiers ternaire sont illustrés dans le tableau 4-12. Nous avons préparé 9 échantillons des mortiers pour trois rapports déferents de PZ/PM et PM/PZ de 1, 1/2 et de 1/3.

Tableau 4-12. Compositions et résultats des essais d'ouvrabilité des mortiers ternaire avec un ajustement de SP.

Mortier aux ciments ternaires (CPJ + PZ + PM) SP (%) variable												
Mélange		MAP 0	MAP 28	MAP 29	MAP 30	MAP 31	MAP 32	MAP 33	MAP 34	MAP 35	MAP 36	
poudre	Ciments CPJ %	100%	80%	70%	60%	70%	60%	50%	60%	50%	40%	
	pouzzolane %	0%	10%	10%	10%	20%	20%	20%	30%	30%	30%	
	poudre de marbre %	0%	10%	20%	30%	10%	20%	30%	10%	20%	30%	
constituants du	ciments CPJ en (g)	1038.41	821.02	712.55	605.94	714.91	608.28	502.84	609.48	503.87	400	
	pouzzolane en (g)	0	102.63	101.75	100.99	204.26	202.76	201.14	304.74	302.32	300	
	poudre de marbre (g)	0	102.63	203.59	302.97	102.13	202.76	301.7	101.58	201.55	300	
	sable en (g)	2045.3	2045.3	2045.3	2045.3	2045.3	2045.3	2045.3	2045.3	2045.3	2045.3	
	70% Eau en (g)	298.3	294	293.1	291	293.7	291.5	289.5	292.5	290.5	288.2	
	30% Eau en (g)	127.9	126	125.6	124.7	125.9	124.9	124.1	125.4	124.5	123.5	
	Sp%	1%	1.20%	1%								
	MEDAFLOW 30EN (g)	10.38	12.32	10.18	10.1	10.21	10.14	10.06	10.16	10.08	10	
Etalement en (cm)	30	27	29	27.5	28.25	28.25	29.75	27.5	27.75	27.25		
temps d'écoulement (sec)	6	7.1	7.19	6.96	7.36	7.24	5.33	8.34	6.57	7.41		
seuil de cisaillement (Pa)	21.58	16.3	21.11	20.57	20.04	19.78	13.52	13.89	18.09	15.69		
viscosité (Pa.s)	5.13	5.19	5.42	5.12	6.38	5.24	3.98	4.42	4.22	3.89		
Observations	mortier de référence	Ouvrabilité efficace										

i. Le seuil de cisaillement et la viscosité

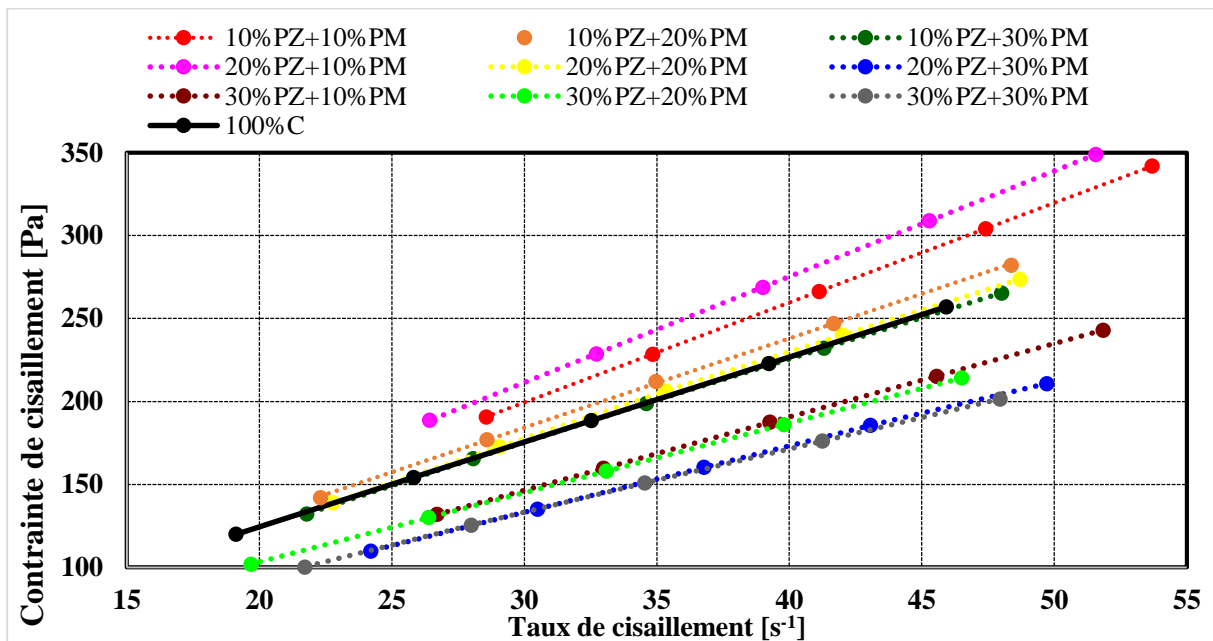


Figure 4- 34 Evolution de taux de cisaillement et la contrainte de cisaillement des MAP en fonction de dosage de pouzzolane et poudre de marbre

La figure 4.34 représente l'évolution de taux de cisaillement et la contrainte de cisaillement des MAP confectionnés à base de ciment ternaire composé de pouzzolane naturelle et de la poudre de marbre. Montre que tous les mélanges de MAP 29 au MAP 36 additionnés par un pourcentage de 1% de superplastifiant dont une réduction de seuil de cisaillement et de la viscosité par rapport au mortier de référence ce qui traduit par l'effet bénéfique de filler de la poudre de marbre.

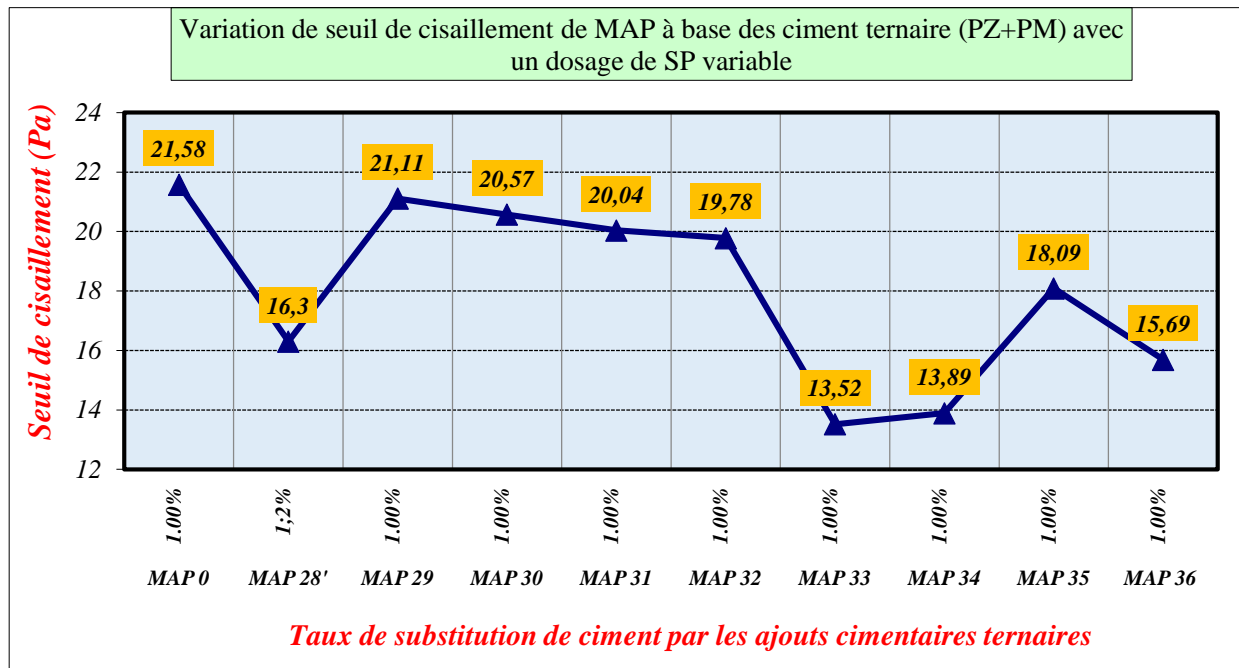


Figure 4-35. Variation de seuil de cisaillement des MAP ternaire (PZ+L) avec l'ajustement de dosage de SP

Notons que la diminution de seuil de cisaillement pour MAP28 à base de ciment ternaire composé de (10%PZ + 10%PM) est due à l'augmentation du dosage de superplastifiant. Par ailleurs nous avons remarqué une chute considérable de seuil de cisaillement et de viscosité par rapport au MAP de référence ont été menu par la substitution de 40% et 50% de ciment dans les MAP33 et MAP34 respectivement représenté dans les figures 4.35 et 4.36.

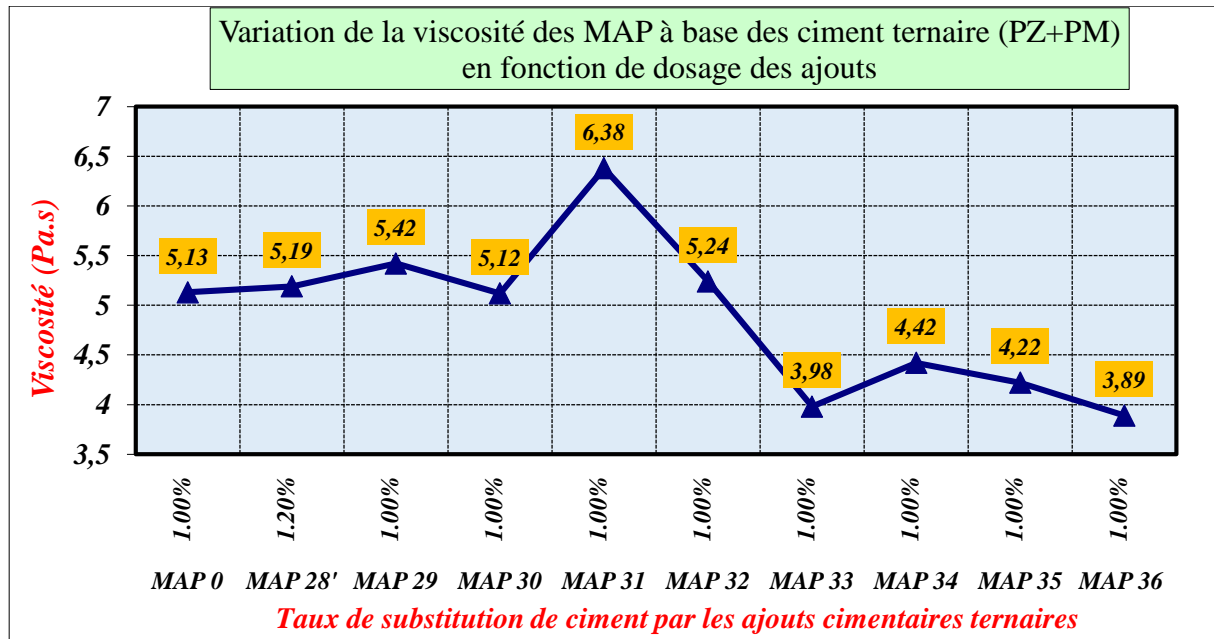


Figure 4-36. Variation de viscosité des MAP à base des ciments ternaires (PZ+PM)

ii. L'étalement au mini cône

L'étalement des MAP à base des ciments ternaire confectionnés par un taux de substitution par 20% à 60% des ajouts représenté dans la figure 4.36 montre que tous les MAP avec différents pourcentages des ajouts et dosage de 1% de superplastifiant, ont un étalement normalisé (Et = 27 à 33cm) et moins par rapport à l'étalement de mortier de référence sauf MAP 28 a perdu l'ouvrabilité pour un dosage de 20% d'ajouts qui a été rattrapée par l'augmentation du dosage de superplastifiant à 1.2%. Selon Belaidi [6] L'étendue de la perte d'ouvrabilité dépend de plusieurs facteurs à savoir : de la granulométrie et de la densité de tassement des particules, de la composition chimique du ciment, ou bien liés aux conditions ambiantes et du temps. Nous avons conclu que la pouzzolane et la poudre de marbre ont un effet clair sur l'ouvrabilité.

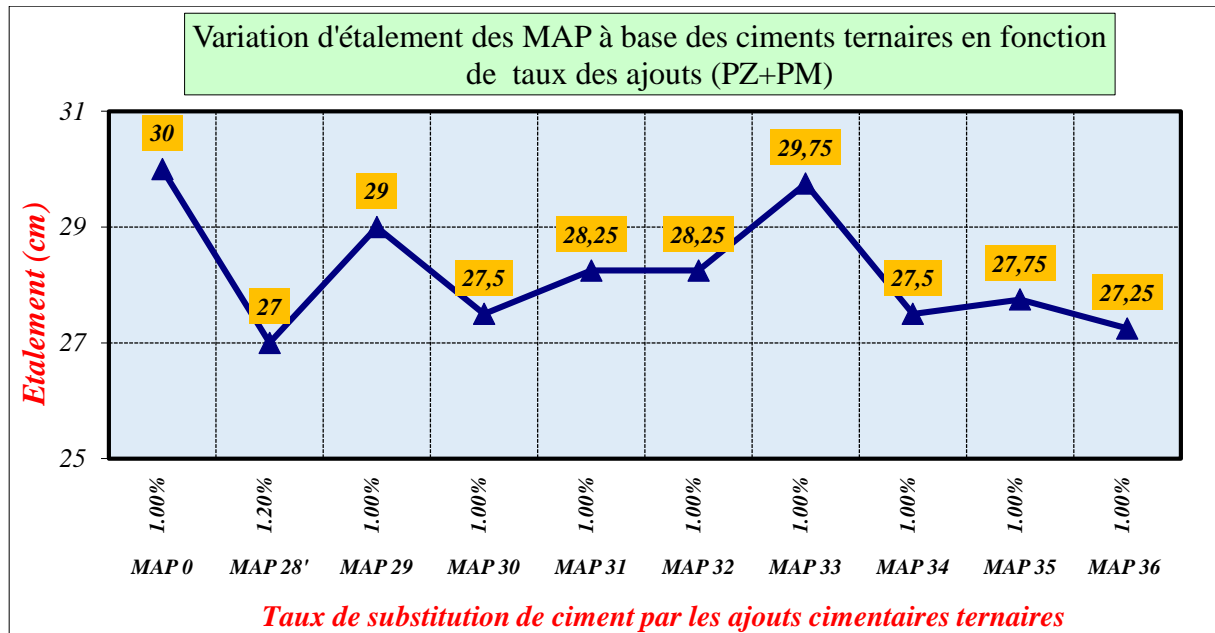


Figure 4-37. Variation d'étalement des MAP à base des ciments ternaires en fonction de taux d'ajouts.

iii. Temps d'écoulement

L'évolution des temps d'écoulements des MAP à base des ciments ternaires en fonction de la teneur en pouzzolane et la poudre de marbre est illustrée sur la figure 4.37. D'après les résultats obtenus, on constate une augmentation du temps d'écoulement par rapport à celui de mortier de référence, ajouter à cela nous avons remarqué que le temps de tous les MAP est resté dans le domaine efficace ( $T_e = 2$  à  $10$  s).

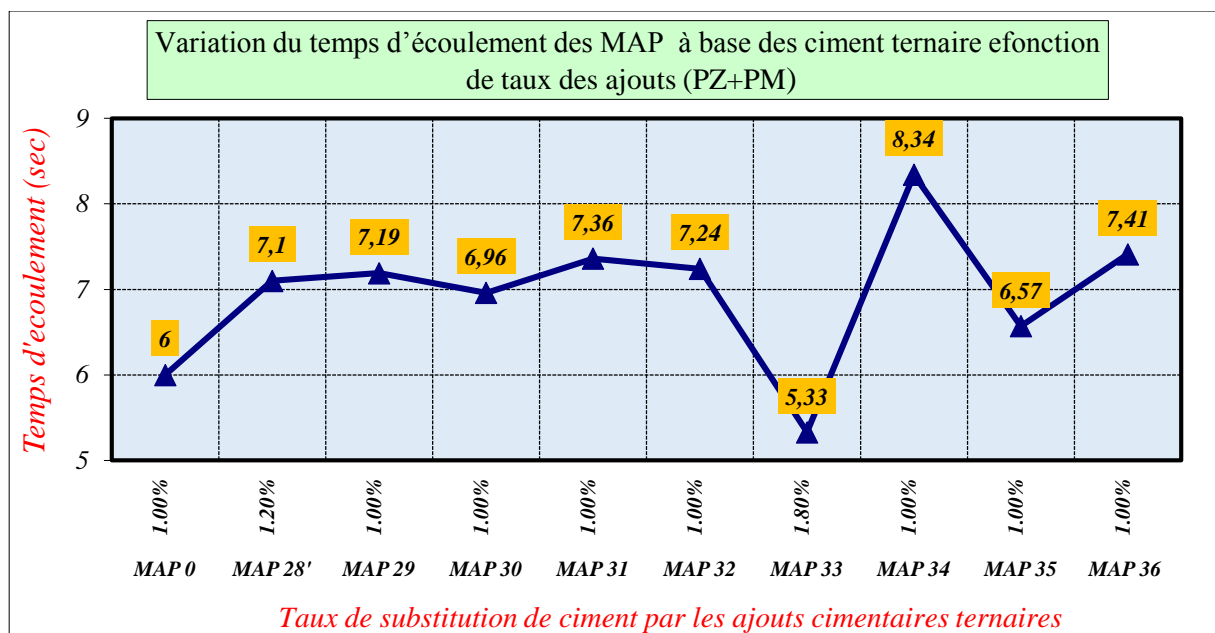


Figure 4-38. Variation de temps d'écoulement des MAP à base des ciments ternaires en fonction de taux d'ajouts.

iv. L'effet de pouzzolane avec la poudre de marbre sur l'état durci

Les résistances à la compression des MAP à base de ciment ternaire à jeune âge est illustré dans le tableau 4-13. D'après les résultats obtenus on remarque une diminution de résistance à la compression pour toutes les compositions à celle du mortier de référence comme on constate que la résistance à la compression est alternative avec l'augmentation de la poudre de marbre dans le mélange ce qui confirme que la pouzzolane développe ces résistances à long terme par son activité pouzzolanique.

Tableau 4-13. Résistance à la compression des MAP à base de ciment ternaire à jeune âge.

Mortiers aux ciments ternaires (CPJ + pouzzolane + poudre de marbre) SP % constant										
Mélange	MAP 0	MAP 28	MAP 29	MAP 30	MAP 31	MAP 32	MAP 33	MAP 34	MAP 35	MAP 36
% Ciments CRS	100%	80%	70%	60%	70%	60%	50%	60%	50%	40%
% pouzzolane	0%	10%	10%	10%	20%	20%	20%	30%	30%	30%
% poudre de marbre	0%	10%	20%	30%	10%	20%	30%	10%	20%	30%
SP %	1%									
<b>R<sub>clj</sub> (Mpa)</b>	<b>19,77</b>	<b>15,22</b>	<b>12,77</b>	<b>8,62</b>	<b>13,93</b>	<b>8,34</b>	<b>8,01</b>	<b>11,58</b>	<b>6,78</b>	<b>4,05</b>

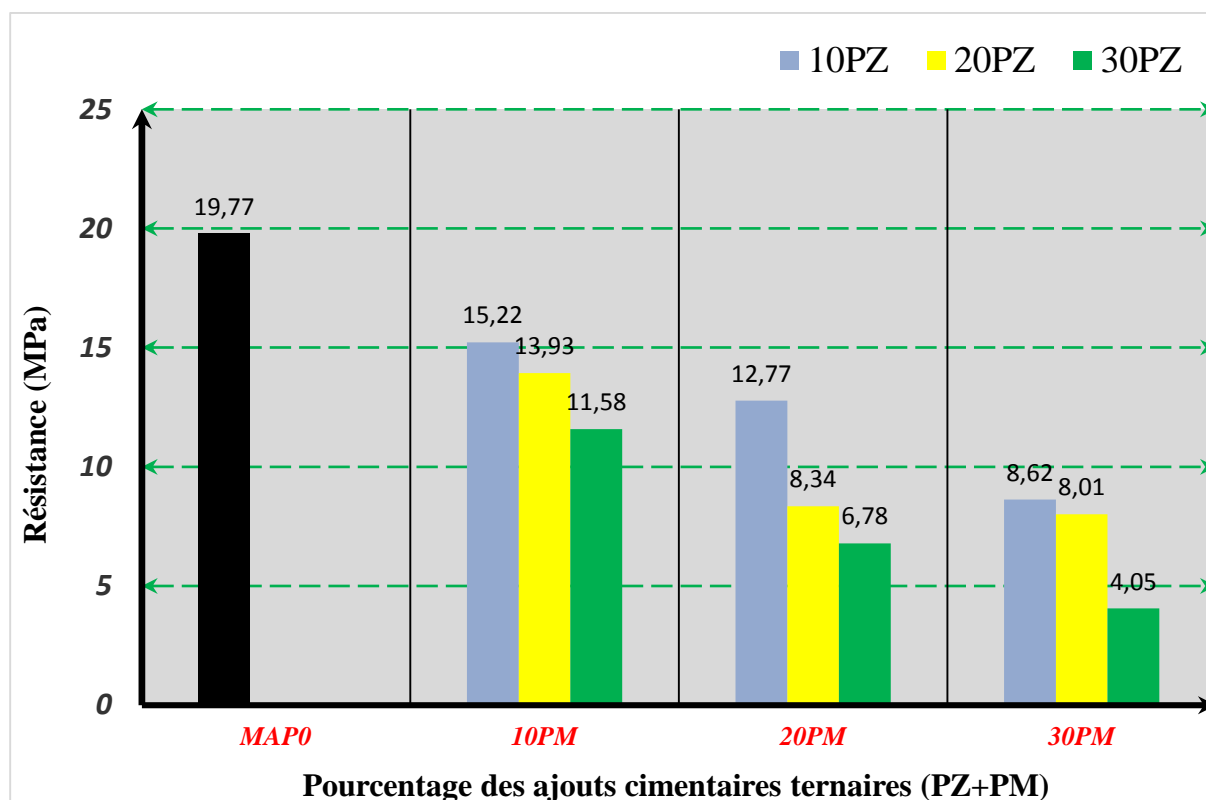


Figure 4-39. Variation de Résistance à la compression des MAP à base de ciment ternaire (PZ+PM) à jeune âge (1 jour)

#### 4.3.6. L'influence de laitier avec de la poudre de marbre

##### a. L'effet de laitier avec la poudre de marbre sur l'état frais

Quel que soit la nature des ajouts, ils affectent positivement ou négativement les mortiers autoplaçants. A ce lieu nous intéressons aux ajouts minéraux a s'avoir la pouzzolane naturelle, le laitier de haut fourneau et la poudre de marbre. Afin d'étudier l'effet du laitier + la poudre de marbre sur les MAP à l'état frais, nous avons analysé 9 échantillons avec différents dosage en ajouts dont les compositions et les résultats sont réuni dans le tableau 4-14.

Tableau 4-14. Compositions et résultats des essais d'ouvrabilité des mortiers ternaire avec un dosage en SP de 1% constant.

Mortier aux ciments ternaires (CPJ+LHF+PM) SP(%) constant												
Mélange		MAP 0	MAP 37	MAP 38	MAP 39	MAP 40	MAP 41	MAP 42	MAP 43	MAP 44	MAP 45	
poudre	Ciments CPJ %	100%	80%	70%	60%	70%	60%	50%	60%	50%	40%	
	laitier %	0%	10%	10%	10%	20%	20%	20%	30%	30%	30%	
	poudre de marbre %	0%	10%	20%	30%	10%	20%	30%	10%	20%	30%	
constituants du mélange	ciments en (g)	1038.41	817.36	709.95	603.96	710.05	603.76	499.01	603.27	498.6	395.7	
	laitier en (g)	0	102.17	101.42	100.66	202.87	201.25	199.6	301.64	299.16	296.77	
	poudre de marbre (g)	0	102.17	202.84	301.98	101.44	201.25	209.4	100.55	199.44	296.77	
	sable en (g)	2045.3	2045.3	2045.3	2045.3	2045.3	2045.3	2045.3	2045.3	2045.3	2045.3	
	70% Eau en (g)	298.3	294.2	292.1	289.9	191.6	289.6	287.4	289.3	287.2	284.9	
	30% Eau en (g)	127.9	126.1	125.2	124.2	125	124.1	123.2	124	123.1	122.1	
	Sp	1%	1%									
	MEDAFLOW 30EN (kg)	10.38	10.22	10.14	10.07	10.14	10.06	9.98	10.05	9.97	9.89	
Etallement en (cm)	30	21.75	27.25	28	20	25.5	29	16.5	17	24.5		
temps d'écoulement (sec)	6	11.57	8.53	9.41	11.65	8.96	6.09	15.11	17.2	10.07		
seuil de cisaillement (Pa)	21.58	17.85	17.9	23.8	19.2	16	13.15	19.32	16.68	16.87		
viscosité (Pa.s)	5.13	5.68	5.7	5.96	6.11	5.09	3.96	6.15	5.31	4.93		
Observations	mortier de référence	Perte d'ouvrabilité pour quelque MAP										

L'évolution de taux de cisaillement et la contrainte de cisaillement des MAP en fonction de laitier et poudre de marbre sont représentées par la figure 4-39. Le rhéogramme montre une diminution de seuil de cisaillement pour tous les MAP inférieur au seuil de cisaillement de mortier de référence à l'exception de MAP39 à base de ciment substitué par un pourcentage de 40% d'ajouts (10%L+30%PM) ou le seuil de cisaillement est supérieur à celui de mortier de référence et par conséquent tous les MAP toute fois les variations de seuil de cisaillement est plus éclairci sur la figure 4.41.

i. Le seuil de cisaillement et la viscosité

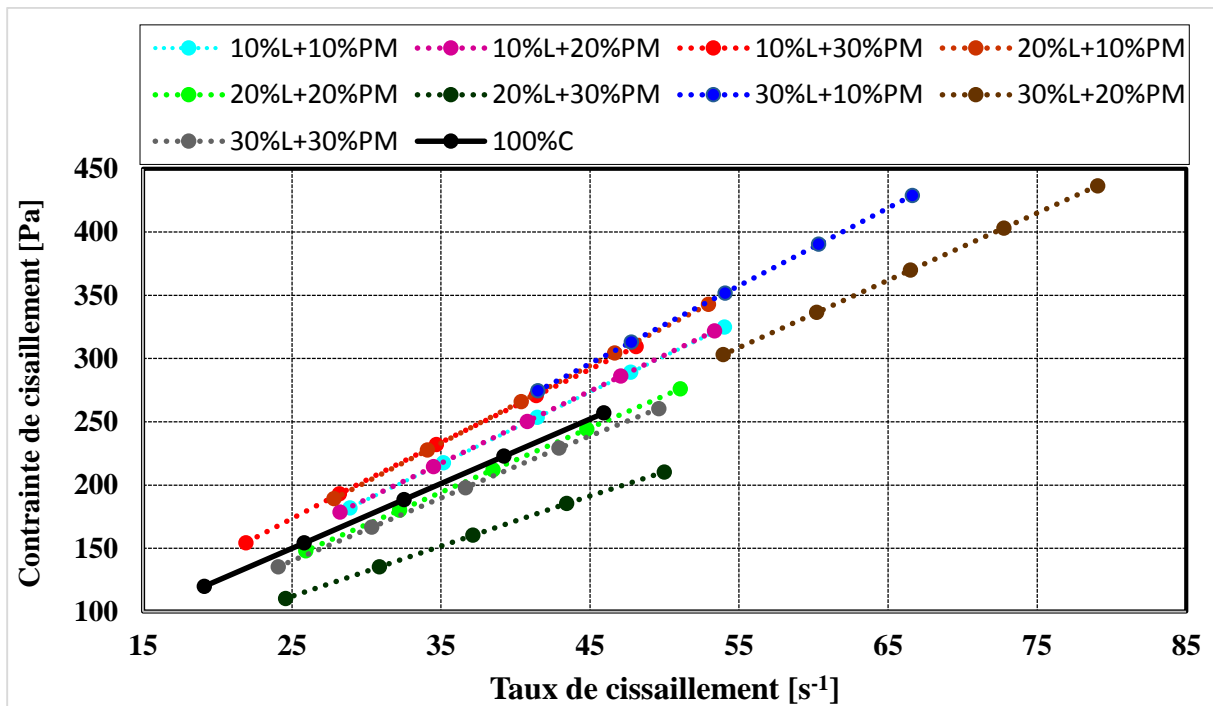


Figure 4-40. Evolution de seuil de cisaillement et la viscosité des MAP en fonction de dosage de laitier et poudre de marbre

De même pour la viscosité on remarque que la viscosité se variée avec la teneur en ajouts on constate qu'elle a diminué ou dessous de celle de mortier de référence pour MAP42 et MAP45, d'où la figure 4.41 montre cette variation.

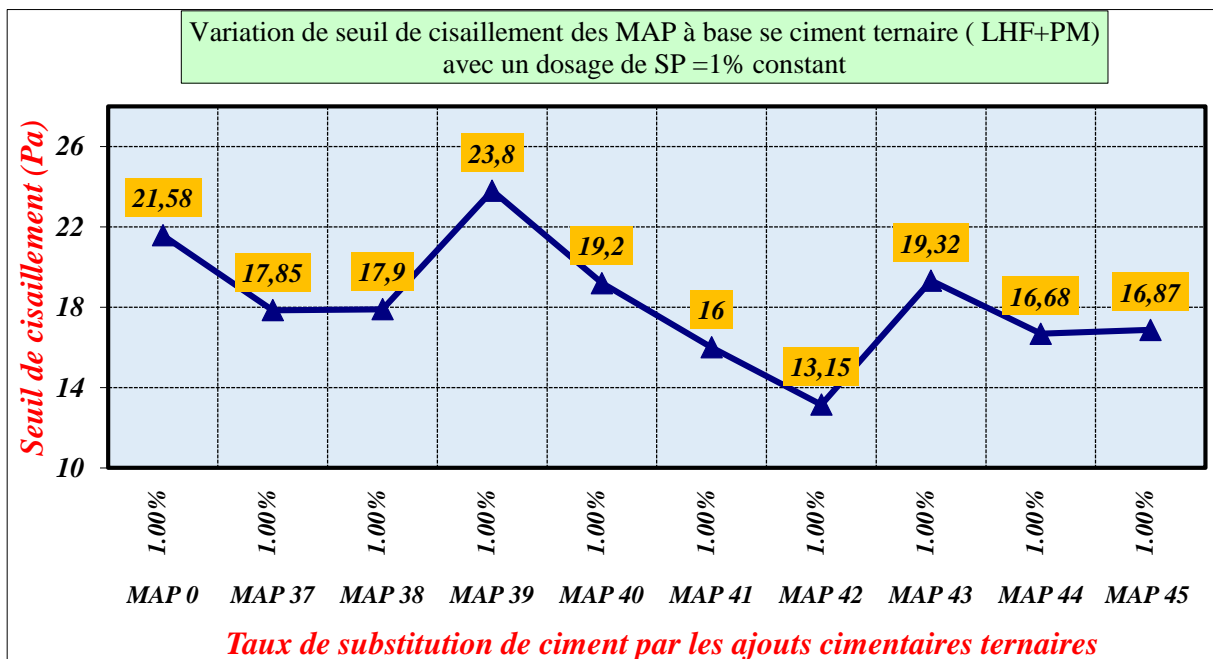


Figure 4-40. Variation de seuil de cisaillement des MAP à base des ciments ternaires

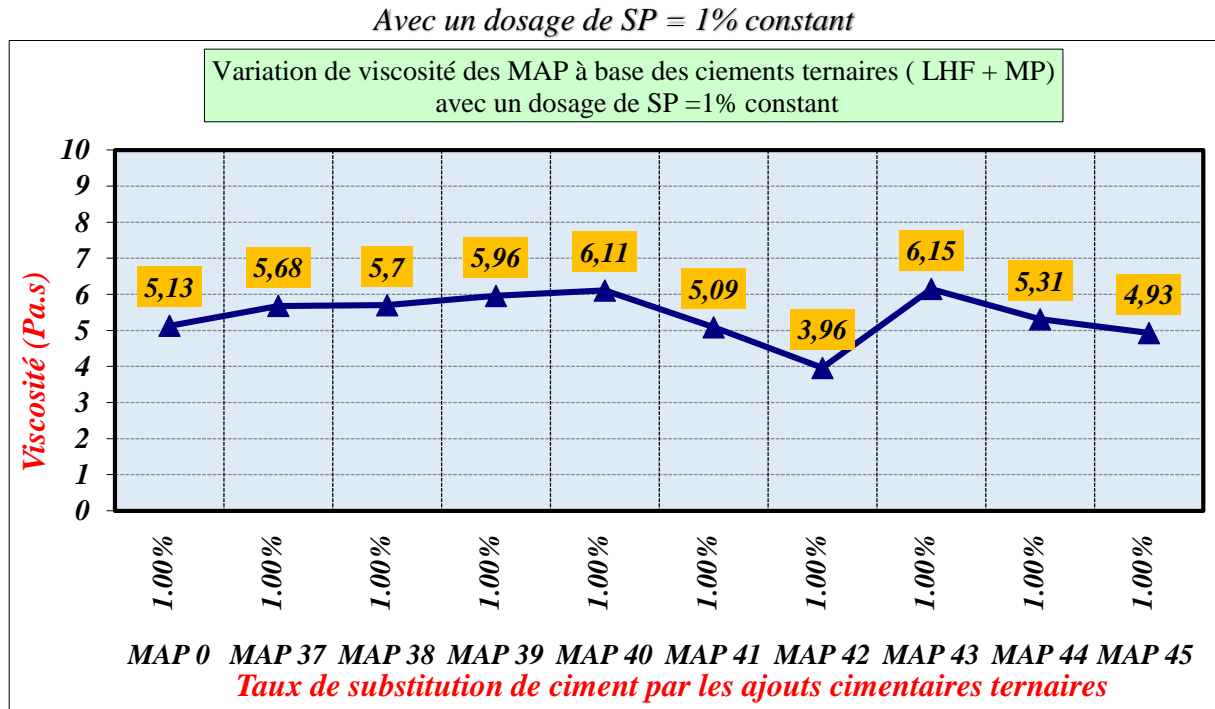


Figure 4-41. Variation de viscosité des MAP à base des ciments ternaires

ii. L'étalement au mini cône

La figure 4.42 présente la variation d'étalement des MAP à base de ciment ternaire avec un dosage de superplastifiant = 1%.

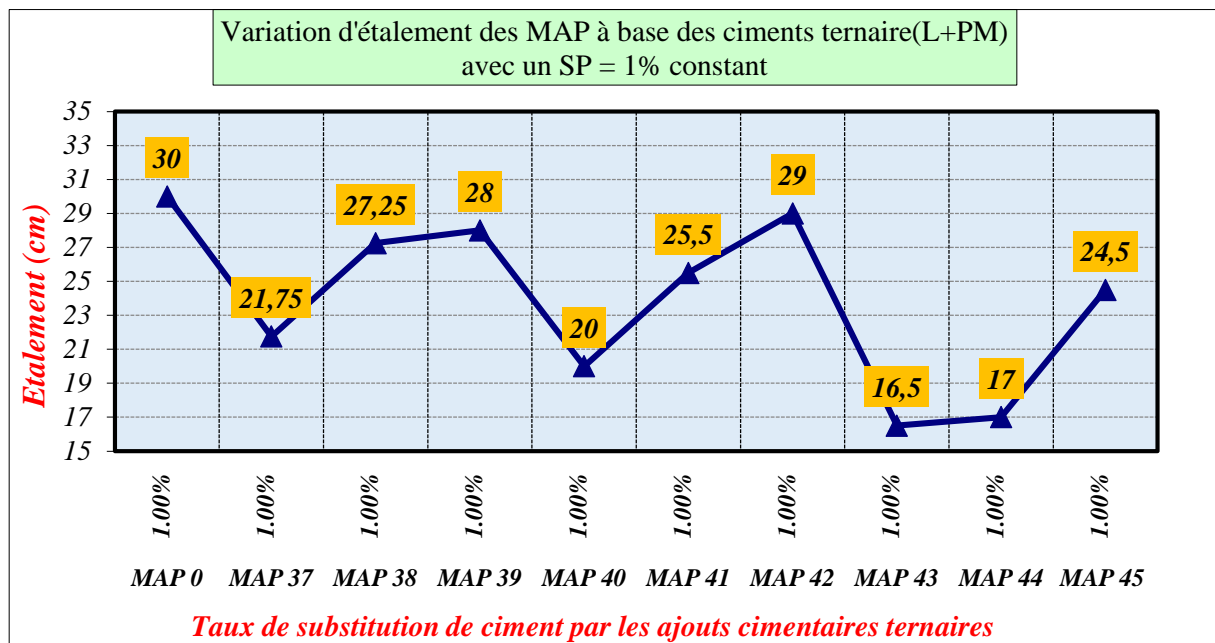


Figure 4-42. Variation d'étalement des MAP à base des ciments ternaires  
 Avec un dosage de SP = 1% constant

On remarque que l'étalement au mini cône est satisfaisante pour uniquement les trois mortiers MAP38 MAP39 et MAP42 avec dosage en ajout de 10%L+20%PM ; 10%L+30%PM et 20%L+30%PM successivement tandis que l'étalement des autre MAP sont inférieur du mortier de référence et ne soumise pas à la condition recommandé. A cet effet un ajustement de superplastifiant sera nécessaire.

#### Temps d'écoulement a l'entonnoir V

La variation de temps d'écoulement des MAP à base des ciments ternaire (LHF+PM) avec un dosage de superplastifiant = 1% constant est représenté par la figure 4.43 une grande augmentation de temps d'écoulement a été remarque par rapport au temps d'écoulement de mortier de référence ainsi l'intervalle préconisé. On constate que cette augmentation est variée entre 6,09 s à 17,2 dont elle augmente avec la teneur en laitier dans certain mélange. On liaison avec la viscosité en remarque qu'elle plus au moins élevé. A cet effet nous avons procédé à la correction des MAP qui n'ont pas satisfaire les critères exigé par un ajustement de dosage en superplastifiant.

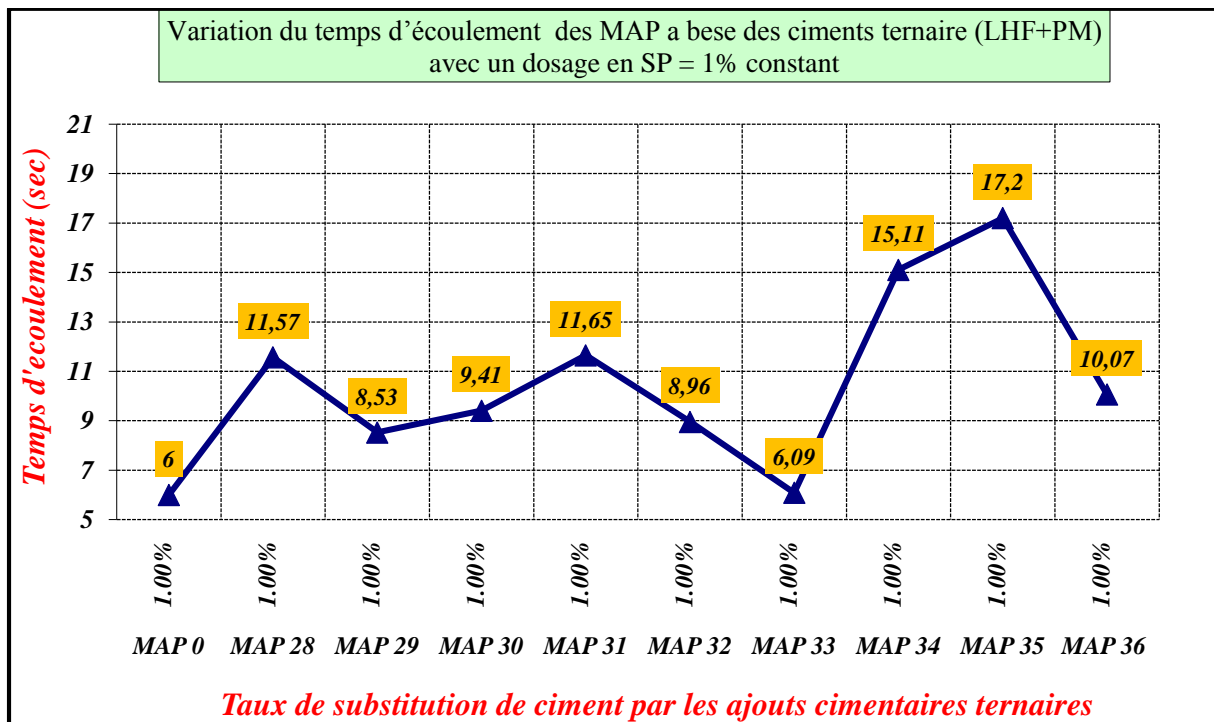


Figure 4-43. Variation de temps d'écoulement des MAP à base des ciments ternaires Avec un dosage de SP = 1% constant

iii. L'effet de l'ajustement de superplastifiant

Tableau 4-15 montre les compositions et résultats des essais d'ouvrabilité des mortiers ternaire avec un ajustement de SP.

Tableau 4-15. Compositions et résultats des essais d'ouvrabilité des mortiers ternaire avec un dosage en SP variable.

Mortiers aux ciments ternaires (CPJ+ LHF +PM) SP(%) variable											
Mélange		MAP 0	MAP 37	MAP 38	MAP 39	MAP 40	MAP 41	MAP 42	MAP 43	MAP 44	MAP 45
poudre	Ciments CPJ %	100%	80%	70%	60%	70%	60%	50%	60%	50%	40%
	laitier %	0%	10%	10%	10%	20%	20%	20%	30%	30%	30%
	poudre de marbre %	0%	10%	20%	30%	10%	20%	30%	10%	20%	30%
constituants du	ciments en (g)	1038.41	817.36	709.95	603.96	710.05	603.76	499.01	603.27	498.6	395.7
	laitier en (g)	0	102.17	101.42	100.66	202.87	201.25	199.6	301.64	299.16	296.77
	poudre de marbre (g)	0	102.17	202.84	301.98	101.44	201.25	209.4	100.55	199.44	296.77
	sable en (g)	2045.3	2045.3	2045.3	2045.3	2045.3	2045.3	2045.3	2045.3	2045.3	2045.3
	70% Eau en (g)	298.3	292.2	292.1	289.9	289.7	288.6	287.4	285.4	284.3	283
	30% Eau en (g)	127.9	125.2	125.2	124.2	124.1	123.7	123.2	122.3	121.8	121.3
	Sp%	1%	1.40%	1%	1.40%	1.20%	1%	1.80%	1.60%	1.40%	
	MEDAFLOW 30EN (kg)	10.38	14.3	10.14	10.07	14.2	12.08	9.98	18.1	15.96	13.85
Etalement en (cm)	30	30	27.25	28	27.75	29.5	29	29.25	28	27.5	
temps d'écoulement (sec)	6	6.84	8.53	9.41	9.02	8.3	6.09	7.88	8.35	7.53	
seuil de cisaillement (Pa)	21.58	21.54	17.9	23.8	20.27	19.5	13.15	14.63	16.05	16.13	
viscosité (Pa.s)	5.13	5.65	5.7	5.96	4.8	4.78	3.96	3.86	3.77	3.92	
Observations	mortier de référence	<b>Amélioration d'ouvrabilité</b>									

Afin d'avoir des MAP fluide, homogène et résistant au ressuage et à la ségrégation. Il est nécessaire d'ajusté le dosage en superplastifiant. A cet effet nous avons recommencé les essais avec le même principe de composition et un ajustement en dosage de superplastifiant

iv. Le seuil de cisaillement

La variation de seuil de cisaillement des MAP à base des ciments ternaire après l'ajustement de superplastifiant est représentée dans la figure 4.44.

On remarque une diminution considérable de seuil de cisaillement par rapport au seuil de cisaillement du mortier de référence. Tandis que le seuil de cisaillement du MAP39 est supérieur à celle de MAP de référence comme on remarque une légère augmentation de seuil de cisaillement avec l'ajustement de dosage de superplastifiant par rapport au seuil de cisaillement sans l'ajustement de dosage de superplastifiant pour certain mélanges.

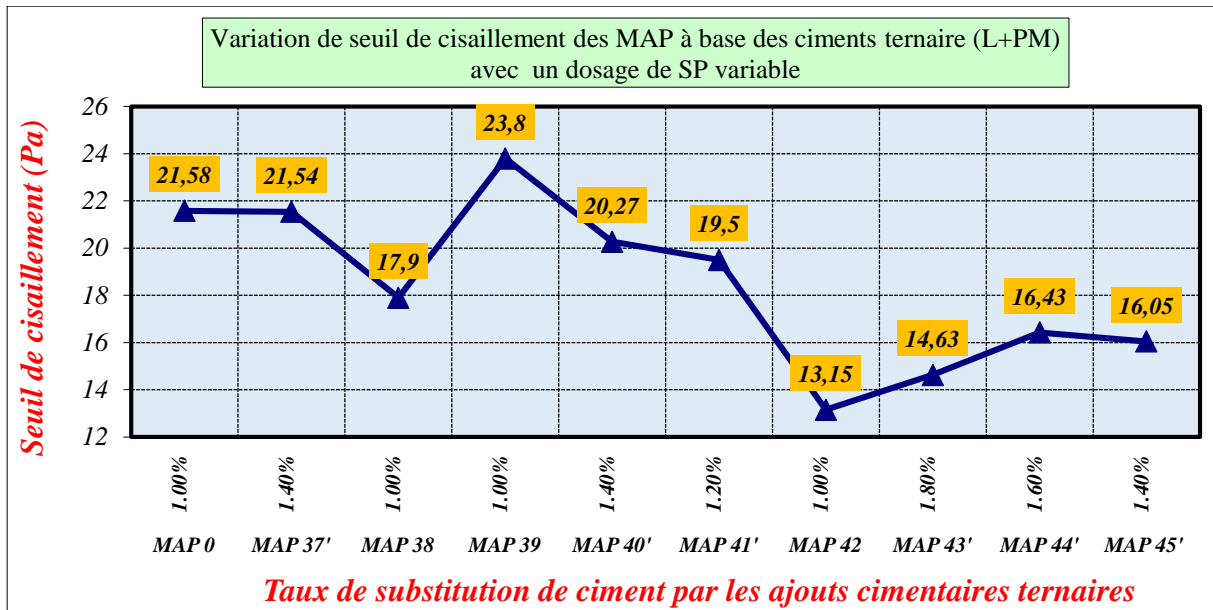


Figure 4-44. Variation de seuil de cisaillement des MAP à base des ciments ternaires Avec un dosage de SP variable

Parallèlement la variation de viscosité des MAP à base des ciments ternaire avec un dosage de superplastifiant variable est représenté dans la figure 4.45 la viscosité est diminué totalement pour tous les mélanges qu’ont subi un ajustement de dosage de superplastifiant, également on constate que la viscosité dépasse celle de mortier de référence cette augmentation est relative avec la teneur en laitier ainsi que d’après les résultats on a conclu que l’augmentation de la teneur en laitier réduit la viscosité.

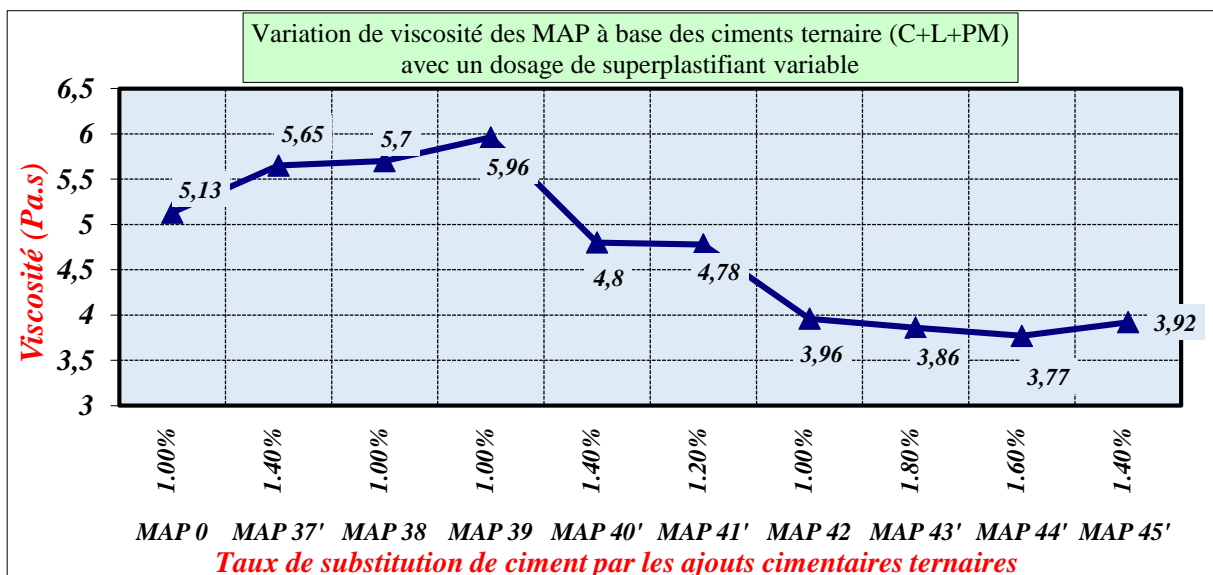


Figure 4-45. Variation de viscosité des MAP à base des ciments ternaires Avec un dosage de SP variable

v. L'étalement au mini cône

La figure 4.44 montre la variation d'étalement des mortiers à base des ciments ternaires avec un dosage de superplastifiant variable. On remarque que les étalements après l'ajustement de SP sont dans l'intervalle préconisé par AFGC de  $30 \pm 3$  cm [16].

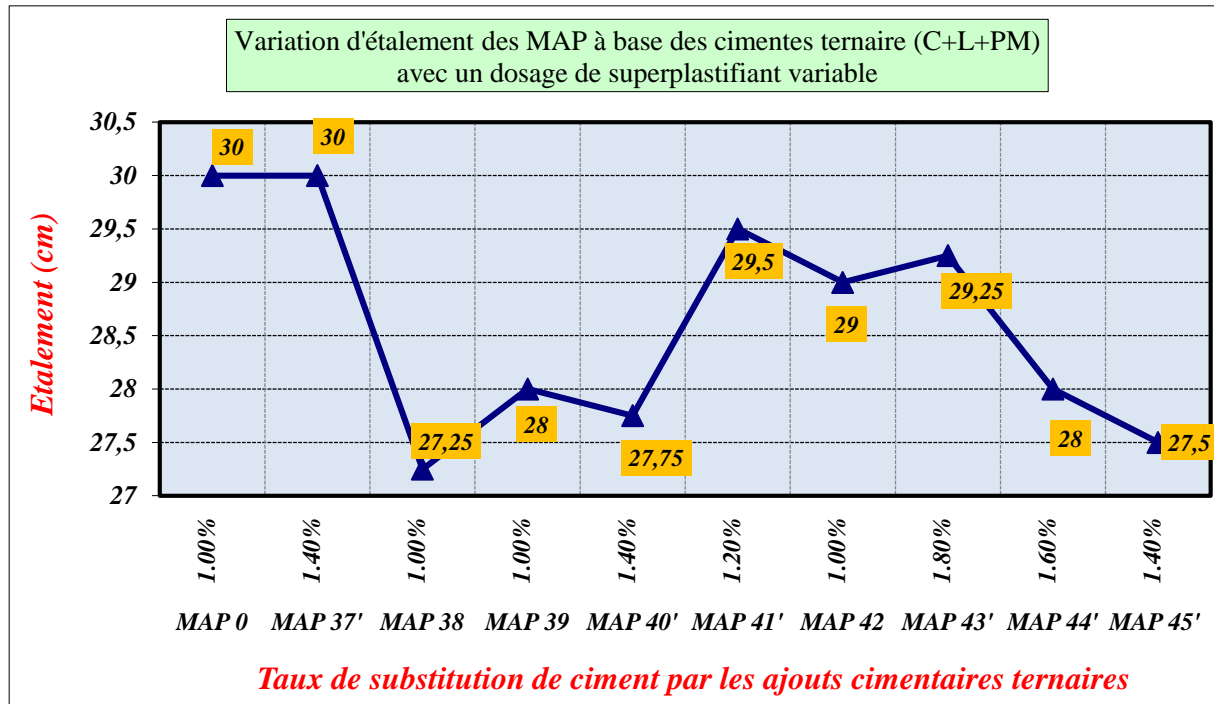


Figure 4-46. Variation d'étalement des MAP à base des ciments ternaires avec un dosage de SP variable

vi. Temps d'écoulement à l'entonnoir V

Le temps d'écoulement des MAP à base des ciments ternaire se varient selon la composition des mortiers autoplacants, cette variation est représenté dans la figure 4.45.

On remarque que le temps d'écoulement des MAP à base des ciments ternaire composés du ciment et de laitier et de poudre de marbre avec des pourcentages varient de 20% à 60% de substitution, et un dosage de superplastifiant variable est supérieur que le temps d'écoulement de mortier de référence, mais elles sont tous dans l'intervalle préconisé de 2 à 10 sec par Domone [37].

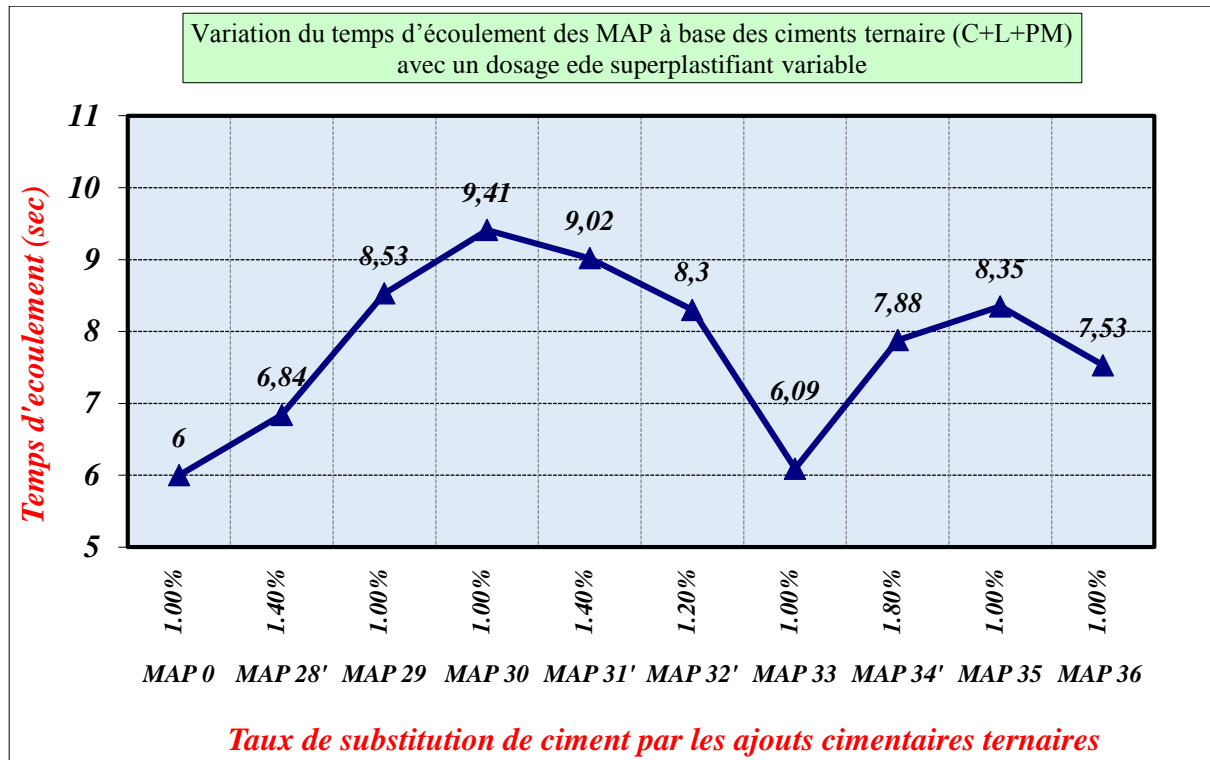


Figure 4-47. Variation de temps d'écoulement des MAP à base des ciments ternaires Avec un dosage de SP variable

vii. L'effet de laitier avec la poudre de marbre sur l'état durci

Il est connu que les ajouts cimentaire actif ou inerte affectent l'état durci des mortiers autoplaçant, d'où leur effet sur la résistance à la compression des MAP à base de ciment ternaire avec l'ajout de laitier et la poudre de marbre à jeune âge est représenté dans le tableau 4-16.

On remarque que la résistance à la compression de MAP37 constitué de 10%L+10%PM a augmenté par rapport à la résistance de mortier de référence tandis que une réduction de résistance de tous les MAP énormément pour MAP44 constitué de 30%L+30%PM dont elle représenté dans la figure suivante.

Tableau 4-16. Résistance à la compression des MAP à base de ciment ternaire à jeune âge

Mortier aux ciments ternaires (CPJ+LHF+PM) avec SP% variable										
Mélanges	MAP 0	MAP 37	MAP 38	MAP 39	MAP 40	MAP 41	MAP 42	MAP 43	MAP 44	MAP 45
% Ciments CPJ	100%	80%	70%	60%	70%	60%	50%	60%	50%	40%
% laitier	0%	10%	10%	10%	20%	20%	20%	30%	30%	30%
% poude de marbre	0%	10%	20%	30%	10%	20%	30%	10%	20%	30%
SP %	1%	14%	1%	1%	1.40%	1.20%	1%	1.80%	1.60%	1.50%
<b>R<sub>clJ</sub> (Mpa)</b>	<b>19.77</b>	<b>22.00</b>	<b>17</b>	<b>12.54</b>	<b>13.59</b>	<b>14.39</b>	<b>7.58</b>	<b>13.03</b>	<b>4.48</b>	<b>5.21</b>

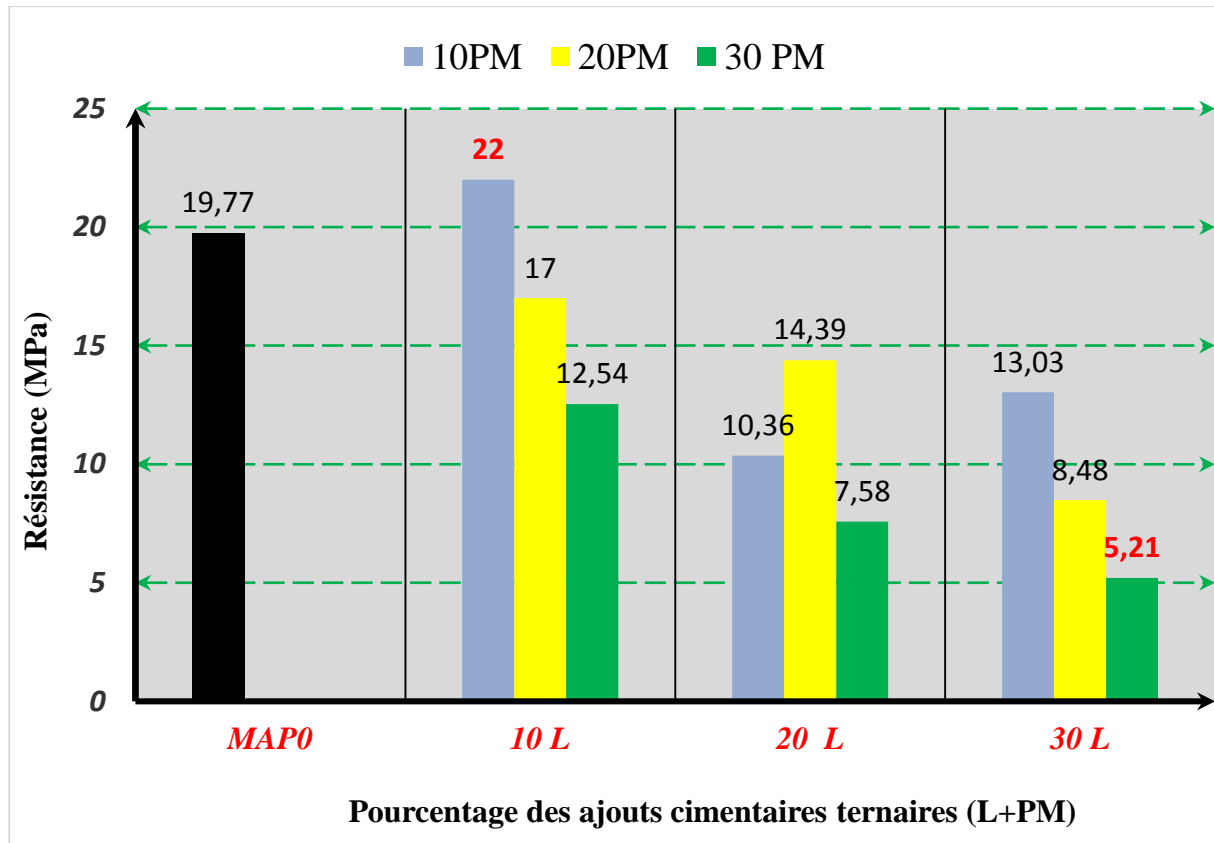


Figure 4-48. Variation de résistance à la compression des MAP à base de ciment ternaire (LHF+PM) A jeune âge (1 jour)

#### 4.5. Influence des ajouts minéraux sur les MAP à base des ciments quaternaires

##### 4.3.7. Influence de laitier avec la pouzzolane et la poudre de marbre sur l'état frais

Comme déjà mentionné, l'influence des ajouts minéraux sur les propriétés rhéologiques et mécaniques des mortiers autoplacants à base de ciment binaire (LHF, PZ, PM) et à base de ciment ternaire (LHF + PZ, PZ +PM, LHF + PM) à l'état frais et à l'état durci (jeune âge). Dans cette partie nous allons étudier l'influence des ajouts minéraux sur les propriétés rhéologiques et mécaniques des mortiers autoplacant à base de ciment quaternaire, dont les compositions et les résultats sont mentionnés dans le tableau 4-19.

Tableau 4-17. Compositions et résultats des essais d'ouvrabilité des mortiers quaternaire avec un dosage en SP variable.

Mortiers aux ciments quaternaires (CPJ + PZ +LHF +PM) SP% Variable												
Mélange		MAP 0	MAP 46	MAP 47	MAP 48	MAP 49	MAP 50	MAP 51	MAP 52	MAP 53	MAP 54	
poudre	Ciments CPJ%	100%	80%	70%	60%	70%	60%	50%	60%	50%	40%	
	pouzzolane %	0%	5%	5%	5%	10%	10%	10%	15%	15%	15%	
	laitier %	0%	5%	5%	5%	10%	10%	10%	15%	15%	15%	
	poudre de marbre %	0%	10%	20%	30%	10%	20%	30%	10%	20%	30%	
constituants du mélange	ciments en (g)	1038.41	819.01	711.09	604.95	712.33	606.02	501.16	606.26	501.37	397.96	
	pouzzolane (g)	0	51.19	50.79	50.41	101.76	101	100.23	151.56	150.41	149.23	
	laitier (g)	0	51.19	50.79	50.41	101.76	101	100.23	151.56	150.41	149.23	
	poudre de marbre (g)	0	102.38	203.17	302.48	101.76	202.01	300.7	101.04	200.55	298.47	
	sable en (g)	2045.3	2045.3	2045.3	2045.3	2045.3	2045.3	2045.3	2045.3	2045.3	2045.3	
	70% Eau en (g)	298.3	294.2	292.6	290.5	292.7	290.6	288.3	290	288.8	285.6	
	30 %Eau en (g)	127.9	126.2	125.4	124.5	125.5	124.5	123.6	124.3	123.8	122.4	
	Sp	1%	1.10%	1%						1.20%	1%	1.20%
	MEDAFLOW 30EN (g)	10.38	11.26	10.16	10.08	10.18	10.1	10.02	12.13	10.03	11.94	
Etallement en (cm)	30	27.25	30.5	30	29.5	30	29.25	28.75	29	28		
temps d'écoulement (sec)	6	7.63	6.46	6.63	7.97	6.49	6.53	7.19	7.32	6.55		
seuil de cisaillement (Pa)	21.58	25.8	12.72	13.39	21.43	16.69	16.43	20.39	17.15	17.04		
viscosité (Pa.s)	5.13	7.31	3.52	4.26	5.26	5.31	3.86	5.05	4.91	4.4		
Observations	mortier de référence	Ouvrabilité obtenue										

Il convient également de poursuivre une étude sur l'effet de substitution de ciment par la pouzzolane naturelle, le laitier de haut fourneau et la poudre de marbre dans une combinaison quaternaire sur les paramètres rhéologique des MAP. L'objectif est de trouver un compromis entre les critères des mortiers autoplaçants et les ajouts minéraux.

Un objectif important était de tester les mélanges avec les essais empirique et avec le rhéomètre adapté aux MAP, pour une autre gamme de mortier afin d'obtenir les grandeurs rhéologiques telles que le seuil de cisaillement et la viscosité plastique.

**a. Seuil de cisaillement et viscosité**

Après les effets étudiés sur la substitution des ciments par la pouzzolane naturelle, le laitier de haut fourneau et la poudre de marbre dans les mortiers autoplaçants en combinaison binaire et ternaire, il est très évident de clôturer cette étude par une combinaison quaternaire des même ajouts.

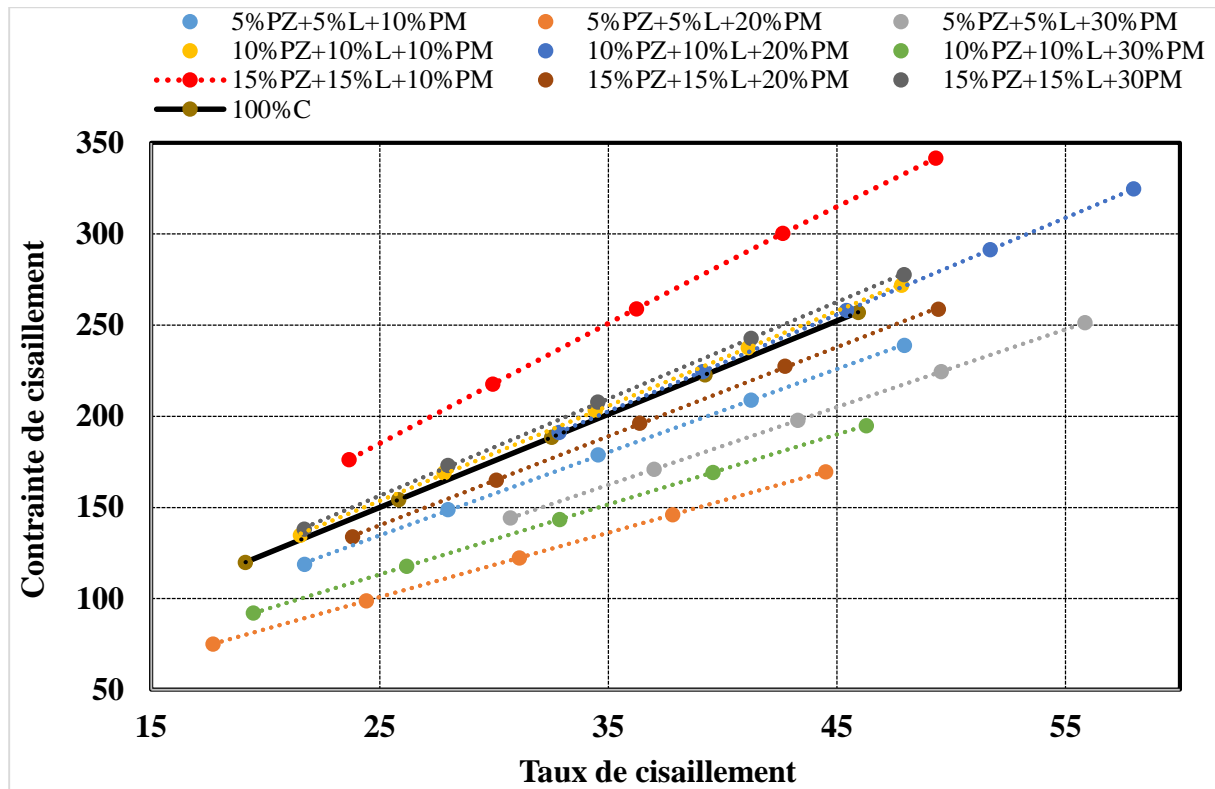


Figure 4-49. Evolution de seuil de cisaillement et la viscosité des MAP en fonction de dosage de pouzzolane, laitier et poudre de marbre

Cette étude a traité le comportement rhéologique à l'état frais des mortiers (MAP). Les propriétés à l'état frais ont été déterminées à l'aide du mini cône, du mini V-funnel et par un rhéomètre dont on a obtenu le rhéogramme figure 4.47 exprimant l'évolution de seuil de cisaillement et la viscosité des MAP en fonction de dosage de PZ, LHF et PM pour des pourcentages de substitution varient de 20%, 30, 40%, 50% et 60%. Nous avons remarqué en premier lieu une perte d'ouvrabilité pour les trois compositions MAP46 ; MAP 52 et MAP 54 ; ce qui nous conduit d'adopter un dosage convenable de superplastifiant.

Aussi nous avons constaté qu'une diminution de seuil de cisaillement pour toutes les compositions par rapport à celui du mortier de référence, à l'exception du MAP 46 (5%PZ+5%LHF+10%PM) qui présente une valeur supérieure.

La figure 4.48 représente la variation de seuil de cisaillement des MAP à base de ciment quaternaire.

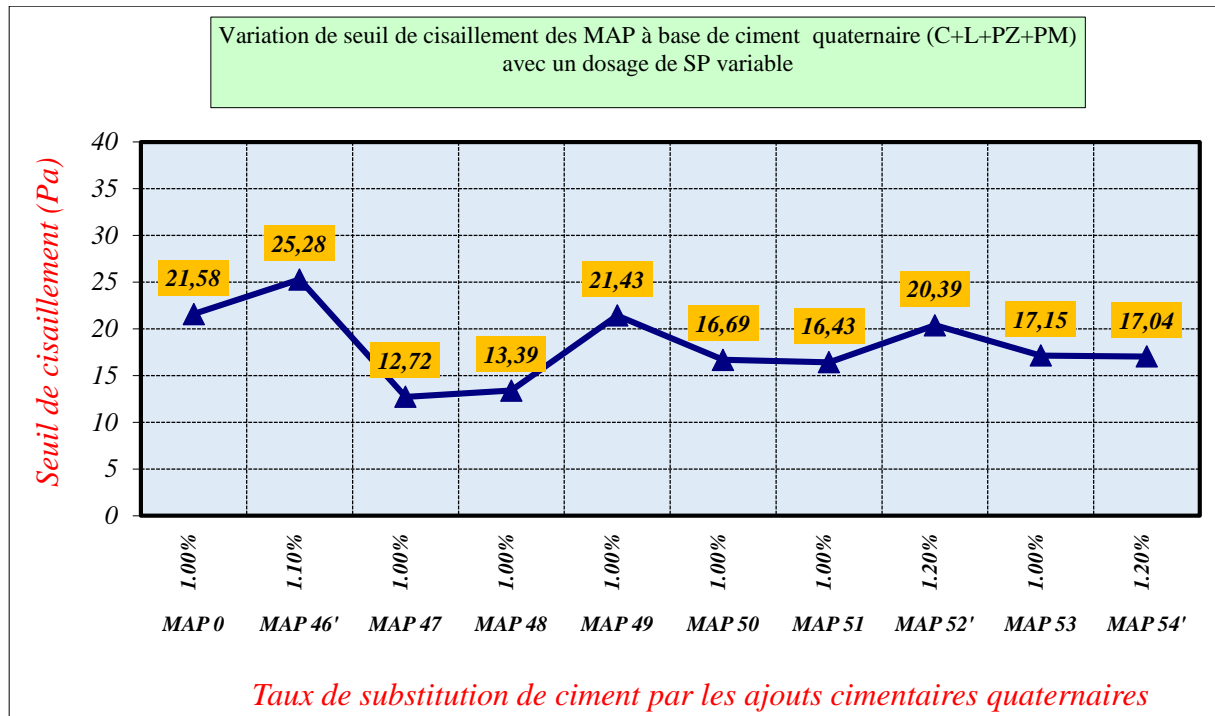


Figure 4-50. Variation de seuil de cisaillement des MAP à base des ciments quaternaire avec un dosage de SP variable

La figure 4.49 représente la variation de la viscosité des MAP à base des ciments quaternaires avec un dosage de superplastifiant variable.

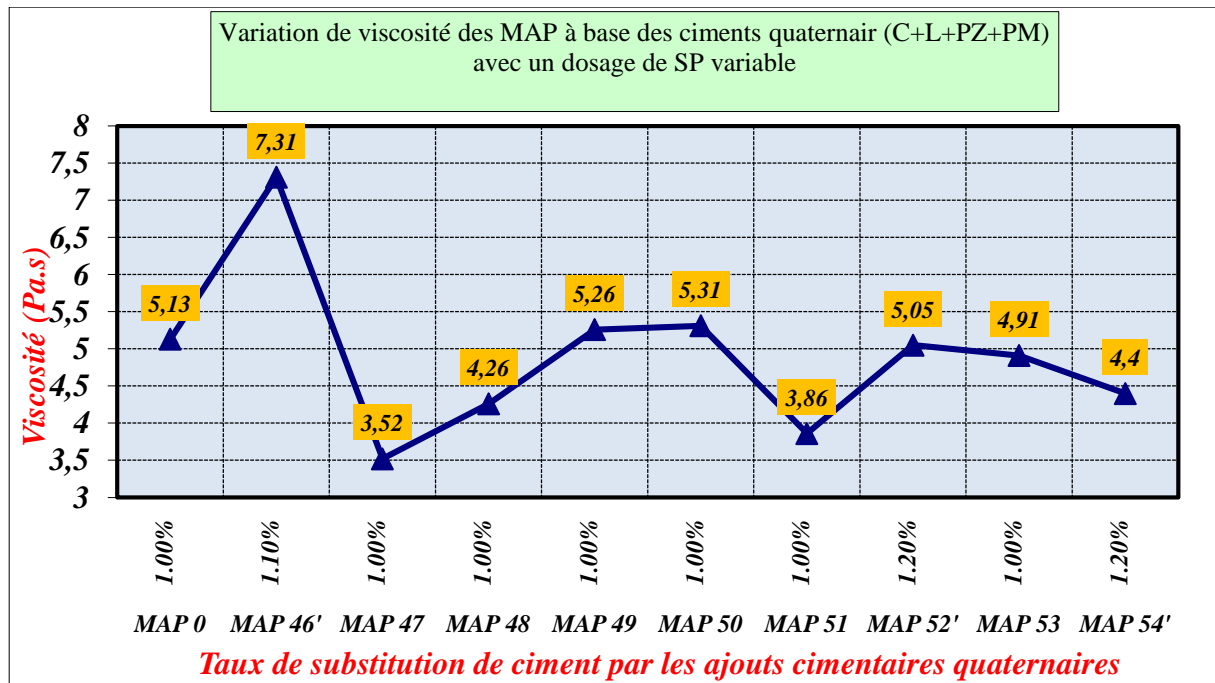


Figure 4-51 Variation de la viscosité des MAP à base des ciments quaternaires avec un dosage de SP variable.

On remarque que toutes les valeurs de viscosités de MAP sont réduites par rapport à celle du mortier de référence mis à part les viscosités de MAP 46 (5%PZ + 5%LHF + 10%PM),

et MAP 49 (10%PZ + 10%LHF + 10%PM) ainsi que le MAP 50 (10%PZ + 10%LHF + 20%PM) , ces dernières présentent une légère augmentation par rapport à celle du mortier de référence.

**b. L'étalement au mini cône**

L'effet des ajouts sur la rhéologie des MAP à base des ciments quaternaires composés de PZ + LHF + PM et avec l'utilisation d'un dosage de SP variable est exprimé par la variation d'étalement figure 4.50.

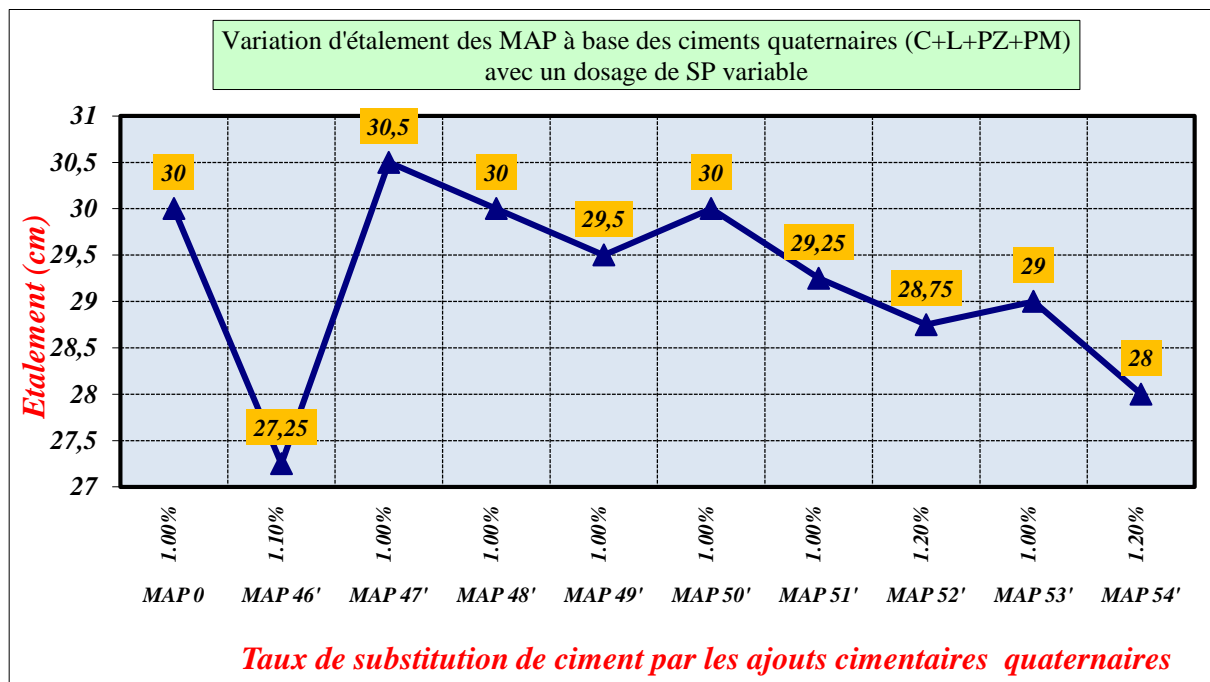


Figure 4-52 Variation d'étalement des MAP à base des ciments ternaires Avec un dosage de SP variable

On remarque qu'après l'ajustement du dosage de superplastifiant de 1.1% et 1.2% pour les trois mortiers MAP46 , MAP52 et MAP54 constitués de (5%PZ +5%LHF +10%PM), (15%PZ +15%LHF + 20%PM) et (15%PZ + 15%LHF + 30%PM) respectivement, on peut dire que tous les étalements sont analogue à celle du mortier de référence avec une petite chute dans MAP46'(5%PZ+5%LHF+10%PM). Notons ici que le MAP 1 (95%C + 5%L) a affecté négativement l'étalement pour un dosage de SP = 1%, également pour MAP 7 (95%C + 5% PZ), ainsi que le MAP 28 (80%C + 10%PZ + 10%PM) et MAP37 (80%C + 10%LHF +10%PM) pareillement ont affecté négativement l'étalement pour un dosage de superplastifiant égal à 1%.

### c. Temps d'écoulement à l'entonnoir V

La variation de temps d'écoulement des MAP à base des ciments quaternaires en substitution par la pouzzolane, le laitier et la poudre de marbre est représentée sur la figure 4.51.

Une augmentation de temps d'écoulement a été remarqué pour tous les MAP supérieure à celle du MAP0 mortier de référence, tandis le temps d'écoulement de tous les MAP sont inclus dans le domaine recommandé  $T_e = 2$  à 10 s.

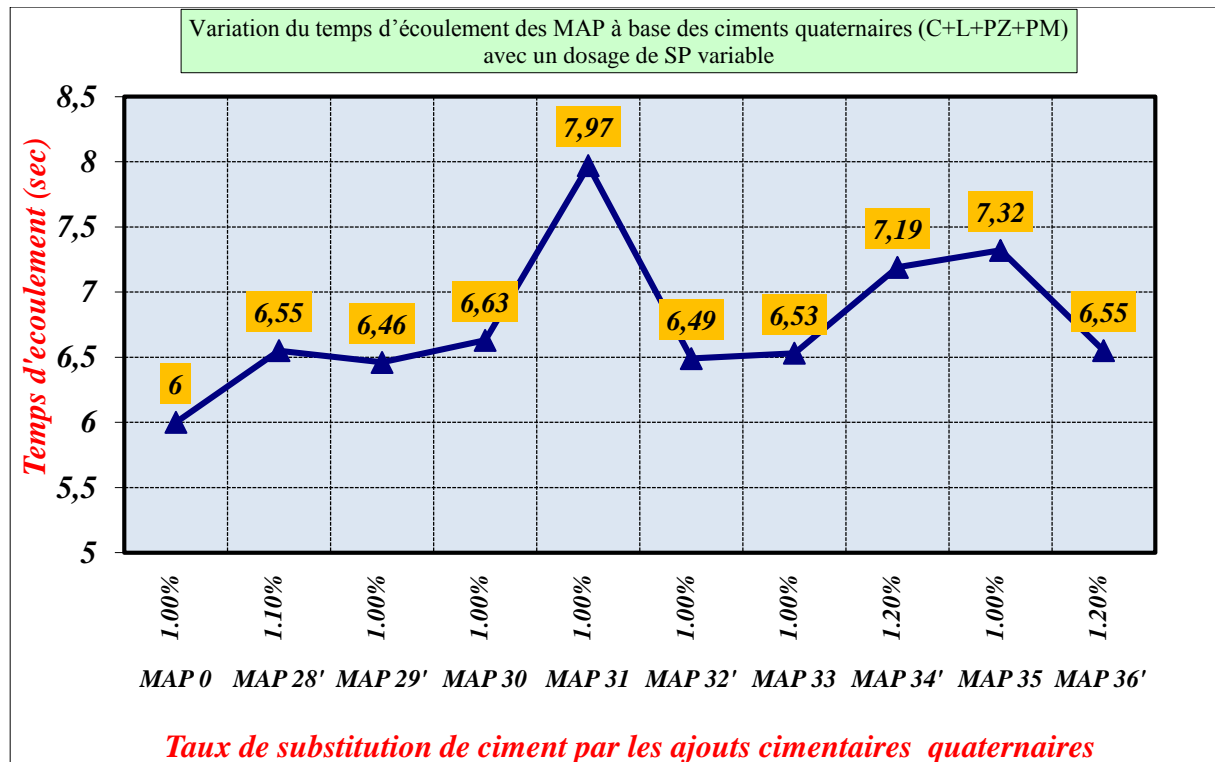


Figure 4-53 Variation de temps d'écoulement des MAP à base des ciments quaternaires avec un dosage de SP variable

#### 4.3.8. Influence de laitier avec la pouzzolane et la poudre de marbre à l'état durci

L'évolution des résistances à la compression des mortiers autoplaçants à base des ciments quaternaires (PZ + LHF + PM) à l'âge d'une journée est présentée sur le tableau 4-20

D'après les résultats obtenus on constate, pour toutes les compositions, une diminution de résistance par rapport de mortier de référence.

La figure 4-52 représente la variation de résistance à la compression des MAP à base de ciment quaternaire (PZ + LHF+PM) A jeune âge (1 jour). On constate la valeur maximale obtenue à jeune âge (1jour) est celle correspondre au pourcentage minimal de substitution car MAP46 (5%PZ+5%LHF +10%PM) présente la plus grande résistance de tous les mélanges ajouter à cela nous avons remarqué que la résistance est évoluée en fonction de pourcentage d'ajout. Donc la résistance augmente avec un faible taux de substitution (5%PZ+5%L+

10%PM), car si on dépasse le 20% d'ajout, la résistance sera chutée d'une façon considérable à celle de référence.

Tableau 4-18. Résistance à la compression des MAP à base de ciment quaternaire à jeune âge (1jour).

Mortiers aux ciments quaternaires (CPJ+PZ +LHF +PM) SP% variable										
Mélange	MAP 0	MAP 46	MAP 47	MAP 48	MAP 49	MAP 50	MAP 51	MAP 52	MAP 53	MAP 54
% Ciments CPJ	100%	80%	70%	60%	70%	60%	50%	60%	50%	40%
% pouzzolane	0%	5%	5%	5%	10%	10%	10%	15%	15%	15%
% laitier	0%	5%	5%	5%	10%	10%	10%	15%	15%	15%
% poude de marbre	0%	10%	20%	30%	10%	20%	30%	10%	20%	30%
SP %	1%	1.10%	1%	1%				1.20%	1%	1.20%
<b>R<sub>clJ</sub> (Mpa)</b>	<b>19.77</b>	<b>18.64</b>	<b>15.28</b>	<b>12</b>	<b>15.76</b>	<b>11.98</b>	<b>7.16</b>	<b>12.88</b>	<b>12.81</b>	<b>5.48</b>

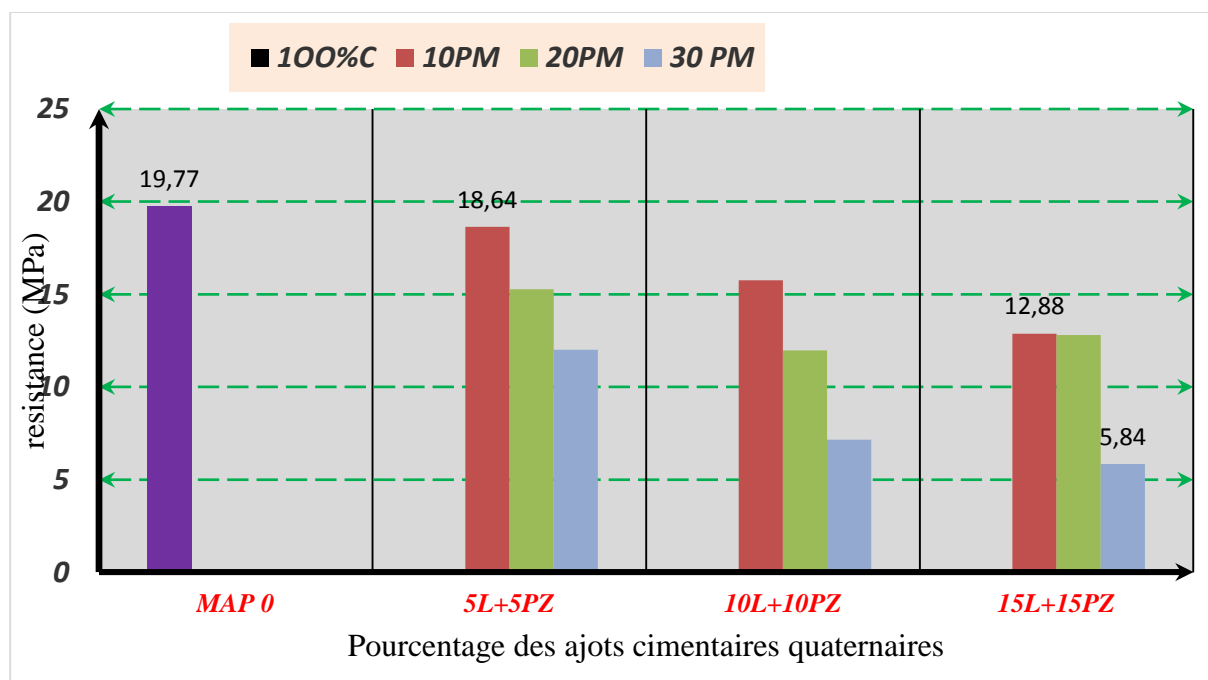


Figure 4-54 Variation de résistance à la compression des MAP à base de ciment quaternaire (PZ + LHF+PM) A jeune âge (1 jour).

## **Conclusion générale**

Grâce à des progrès scientifiques, ces dernières années ont vu une révolution dans le domaine du béton, avec l'apparition de bétons plus résistants, plus durables, ainsi que des bétons plus fluides appelés autoplaçants (BAP) qui améliorent d'ailleurs considérablement l'esthétique et la mise en place.

La maîtrise des propriétés rhéologiques des matériaux cimentaires est aujourd'hui primordiale en vue de répondre aux exigences grandissantes du monde industriel. Les avancées technologiques ont permis de mettre au point des bétons offrant de nouvelles performances tels que les bétons autoplaçants (BAP).

Les bétons autoplaçants sont des bétons spéciaux dont les qualités méritent d'être valorisées. En raison de leurs propriétés rhéologiques très spécifiques, leur compréhension nécessite des investigations plus approfondies. Cependant, ces bétons autoplaçants contiennent un volume élevé de pâte ce qui implique une quantité de ciment importante. Pour des raisons à la fois environnementale, mécanique et économique il est indispensable de substituer une partie de ciment par des ajouts minéraux. Les propriétés des BAP sont généralement liées aux celles de leurs mortiers autoplaçants (MAP) qui sont abordés ici du point de vue de la rhéologie, c'est-à-dire de leurs capacités à s'écouler. Pour cela, la notion d'ouvrabilité et les besoins de la caractérisation rhéologique des matériaux cimentaires sont expliqués.

Les objectifs fixés dans cette étude étaient de montrer l'influence de certains paramètres de composition sur le comportement rhéologique des mortiers autoplaçants. Suite à cette étude, nous avons pu tirer un certain nombre de conclusions relatives au comportement rhéologique mécanique des mortiers parmi ces résultats on peut citer :

- L'incorporation de la pouzzolane naturelle seule (10-30%) améliore l'ouvrabilité des mortiers autoplaçants. Ainsi que leurs paramètres rhéologiques.
- L'utilisation de la pouzzolane en substitution au ciment permet de réduire le seuil de cisaillement et la viscosité de mélange comme elle a augmenté la résistance à la compression à jeune âge, par contre elle diminue avec l'augmentation du pourcentage de pouzzolane.
- La substitution de la poudre de marbre seule à apporter un effet bénéfique sur l'ouvrabilité des mortiers autoplaçants (MAP) avec une diminution de seuil de cisaillement significative

et une fluidité exprimé par sa faible viscosité. Parallèlement à la pouzzolane la résistance à la compression a augmentée à jeune âge (1 jour) selon le pourcentage d'incorporation.

- L'introduction de laitier de haut fourneau seule (5%-30M) affect négativement l'ouvrabilité des mortiers autoplaçant traduit par l'augmentation de seuil de cisaillement et de la viscosité des MAP, ainsi l'incorporation du laitier a engendré la meilleur résistance à la compression à jeune âge de tous les compositions étudié
- La combinaison de pouzzolane naturelle et la poudre de marbre avec trois système de substitution ( $PZ/PM = 1$ ,  $PZ/PM = 1/2$  et  $PZ/MP=1/3$ ) à améliorer le comportement rhéologique des mélanges ternaires pour des teneurs de 20-60%. Dont le seuil de cisaillement et la viscosité sont réduits.
- La combinaison de pouzzolane naturelle et de laitier affecte négativement l'ouvrabilité, quelque mélange de la combinaison de laitier avec la poudre de marbre affectent négativement l'ouvrabilité engendré par l'augmentation de la viscosité des MAP. La résistance à la compression de pouzzolane avec le laitier est chutée avec un pourcentage de (30%PZ + 30%LHF).
- La combinaison de la pouzzolane et le laitier et la poudre de marbre affecte positivement l'ouvrabilité, à l'exclusion de trois compositions ont subi un ajustement de dosage de superplastifiant. Cette combinaison nous donne des résultats satisfaisants avec une réduction de seuil de cisaillement corrélatif avec l'étalement et une diminution de viscosité corrélative avec le temps d'écoulement.

Les résultats expérimentaux obtenus sont satisfaisants, pour tous les mélanges avec un simple ajustement au niveau de dosage en superplastifiant ce qui rend les mortiers autoplaçants.

L'industrie du ciment est l'une des principales activités de développement socioéconomique de notre pays, l'Algérie qui a opté pour une politique de construction en génie civil de grande envergure a besoin d'une consommation accrue en ciment ; mais constatons que malgré les efforts consentis par les entreprises productrices de ciment , l'offre reste inférieur à la demande. Les résultats obtenus dans cette étude, montrent que l'utilisation des ressources locales et la substitution d'une partie de ciment par le laitier de haut fourneau d'El Hadjar, la pouzzolane naturel de Beni-Saf et la poudre de marbre de Skikda, a des avantages sur le comportement des MAP notamment l'ouvrabilité, qui encourage la valorisation de ces matériaux dans la fabrication du béton et augmenter son dosage jusqu'à 60%. Voir ce qui permettra une nouvelle voie sur la valorisation de matériaux locaux dans le contexte de la protection de l'environnement et du développement durable.

## **Perspectives et recommandations**

Les travaux exécutés dans le cadre de ce mémoire ont été focalisés sur l'étude de l'effet de laitier, de pouzzolane naturelle et de poudre de marbre sur les propriétés rhéologiques et mécaniques des MAP. D'autres aspects restent à élucider et par conséquent, nous recommandons, pour de futurs travaux, ce qui suit :

- Elargir l'étude rhéologique pour déterminer les mêmes caractéristiques telles que, le seuil de cisaillement, taux de cisaillement, viscosité des mélange en utilisant un rhéomètre pour béton.
- Procéder à l'étude approfondis des interactions chimiques dans les ciments binaire, ternaire et quaternaire utilisé dans les mortiers autoplaçants.
- Proposer un modèle qui donne les paramètres rhéologiques tel que le seuil de cisaillement avec étalement et viscosité avec le temps d'écoulement.
- Etudier le retrait et le fluage des mortiers autoplaçant à base des ciments ternaire et quaternaire.
- Accomplir l'étude des mortiers autoplaçants à base des ciments ternaire et quaternaire par l'analyse des propriétés des ajouts additionnés tel que leur consistance et leur activité.

## Références bibliographiques

- [1] K. Touzouti, "Introduction aux nanociments et nanobéton," Mouloud mammri, Tizi-ouzou 2012.
- [2] S. Benakli, "caractérisation expérimentale des bétons autoplaçant obtenus par des déchets de construction," Mouloud mammri, Tizi-ouzou.
- [3] H. Zahouani and A. Touaiti, "Elaboration d'un béton autoplaçant a base de laitier de haut fourneau," Kasdi Merbah, Ouargla, 2011.
- [4] K. Mohamed Rissel, "Efet de l'attaque sulfatique externe sur la durabilite des bétons autoplaçants," D'orléans, France, 2009.
- [5] A. Boukhelkhal, "Rhéologie,caractéristique physico-mecanique et durabilié des bétons autaplaçants a base de la poudre de marbre," Université Ammar Telidji Laghouat, Laghouat, 2012.
- [6] A. S. E. Belaidi, "contribution a l'etude rhéologique et durabilité de béton autoplaçant : apport des ajouts cimentaires ternaires et fillers locaux et industriels," Saad Dahleb de blida, Blida, 2013.
- [7] Park and Noh, "Rheological properties of cementitious materials containing meneral admixture," *Cement and concrete research*, vol. 35, pp. 842–849, 2005.
- [8] Shi and AL, "A study of effect of superfine powders on fluidityof cement paste," *transactions of japan concrete institute*, vol. 20, pp. 9–14, 1998.
- [9] Carsward et Al, "Effect of constituents of the third international RILEM coference on scc," *reykjavil island*, pp. 143–153, 2003.
- [10] Ferraris and Obla et AL, "Influence of mineral admixtures on the rheology of cement paste and concrete," *Cement and concrete research*, vol. 31, pp. 245–255, 2001.
- [11] N. Otis, "Influence de divers superplastifiants sur le ressuage et l'interface pate/granulat dans les matériaeux cimentaire," Université de sherbrooke, Québec, canada.
- [12] H.-M. Benjamin, "Influence de le température sur la thixotropie des bétons autoplaçants," D'artois, France, 2009.
- [13] Association fransaice de genie civil, "Bétons autoplaçant- Recommandation provisoires." Document scientifique et technique, Oct-2006.
- [14] P. turcry, "<<retrait et fissuration des bétons autoplaçants>> influence de la formulation," thèse, l'école centrale de l'université de nantes.
- [15] M. Uysol and k Yilmaz, "Effect of mineral admixtures on properties of self compacting concrete," *Cement and concrete composites*, vol. 33, pp. 771–776, 2011.
- [16] AFGC, "Béton autoplaçant recommandation provisoires." annal du batiment et de travaux publics, juin-2000.
- [17] H. Okamura and M. Ouchi, "Self-compacting concrete," *Journal of advanced concrete technology*, vol. 1, no. 1, pp. 5–15, 2003.
- [18] A. Stéphan, "Durabilité des Bétons Autoplaçants," univesité de toulouse.
- [19] H. soualhi, E. . H. Kadri, T.-T. NGO, A. Bouvet, F. Gussigh, and S. Kenai, "A Vane Rheometer for fresh Mortar," *Appelied Rheology*, vol. 24, 2014.
- [20] B. Claire, "Ecoulement des suspensions granulaires modèles," Université de paris 6.
- [21] H. Chong, "Rhéologie des fluides," Ecole Nationale des ponts chaussées, France, 2010.
- [22] A. S. . Belaidi, "cour Rhéologie des matériaux." .
- [23] H. Nicolas, "Rhéologie des pates granulaires," Paris 6- Pierre et marie curie, france, 2006.
- [24] A. El Hilali, "etude experimentalede larhéologie et du comportement des betons autoplaçants ( BAP): influence des fines calcaires et des fibres vegetales," Cergy-pontoise, France, 2009.

- [25] P. Domone and J. Jin, "Properties mortar for self-compacting concrete," *Proceeding international symposium of self compacting concrete*, pp. 109–20, Sep. 1999.
- [26] O. Boukendakdji, "Étude de l'influence des paramètres de formulation sur les propriétés d'un béton autoplaçant: optimisation des conditions opératoires," université Saad Dhléblida, Algérie, 2010.
- [27] P. Domone, "Self-compacting concrete: an analysis of 11 years case studies," *Cement and concrete composites*, vol. 2, no. 28, pp. 197–208, 2006.
- [28] H. Okamura and K. Ozawa, "Mix-design for self compacting concrete," *Concrete library of Jsce*, no. 25, pp. 107–20.
- [29] N. Khadoudja Bixi, "Étude de retrait des bétons autoplaçants," Abou bekr Belkaid, Tlemcen, 2014.
- [30] H. Fares, "Propriétés mécaniques et physico-chimiques des bétons autoplaçants exposés à une température élevée," université de Cergy Pontoise, France, 2009.
- [31] N. Bouhamou, N. Belas, H. Mesbah, A. Mebrouki, and A. Yahia, "Influence des paramètres de composition sur le comportement du béton autoplaçant à l'état frais," *Afrique science*, vol. 1, no. 04, pp. 1–20, 2008.
- [32] S. Bethmont, "Mécanisme de ségrégation dans les bétons autoplaçants BAP," école nationale des ponts et chaussées, France, 2005.
- [33] K. Kaf and K. Hadj Aissa, "Étude de l'effet des ajouts minéraux en système binaire et ternaire sur les propriétés des mortiers auto-plaçants," Université Ammar Telidji Laghouat, Laghouat, 2014.
- [34] A. Ouai and A. R. Bedj, "L'effet synergique des ajouts cimentaires sur le comportement rhéologique des mortiers fluides," Université Ammar Telidji Laghouat, 2014.
- [35] C. Belghit, "Contribution à la formulation d'un béton autoplaçant à base de matériaux locaux: effet de laitier granulé micronisé sur l'ouvrabilité," Badji-Mokhtar, Annaba, 2009.
- [36] A. S. E. Belaidi, L. Azzouz, E. Kadri, and S. Kenai, "Effect of natural pozzolana and marble powder on the properties of self-compacting concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 31, no. 0, pp. 251–257, Jun. 2012.
- [37] P. Domone and J. Jin, "Properties mortar for self-compacting concrete," *Proceeding international symposium of self compacting concrete*, pp. 109–20, Sep. 1999.