

UNIVERSITE DE BLIDA-1

Faculté de Technologie

Département de Génie Civil

THESE DE DOCTORAT

Spécialité : Génie Civil

**ETUDE DES PROPRIETES RHEOLOGIQUES ET
MECANIQUES DU BETON A BASE DE SABLE DE
CONCASSAGE :**

APPLICATION AU BETON POMPE

Par

Salim SAFIDDINE

Devant le jury composé de :

S. KENAI	Professeur, Université de Blida 1	Président
A. YAHIA	Professeur, Université de Sherbrooke, Canada	Examineur
K. EZZIANE	Professeur, Université de Chlef	Examineur
M. ABDESSEMED	MCA, Université de Blida 1	Examineur
F. DEBIEB	Professeur, Université de Médéa	Rapporteur
B. MENADI	Professeur, Université de Blida 1	Co-encadreur
E-H. KADRI	Professeur, Université de Cergy Pontoise, France	Invité

Blida, Septembre 2018

ملخص

منذ سنوات عديدة، أصبح استخدام رمل المحاجر في الخرسانة كمورد بديل للإستغلال المفرط لرمال الوديان ممارسة شائعة. خلافا لرمال الوديان، رمال المحاجر هي زاوية الشكل وتحتوي على كميات مفرطة من المواد الناعمة. ونتيجة لذلك، حدثت مشاكل في الحالة اللينة كما هو الحال في الحالة الصلبة للخرسانة. في مواجهة هذه المشكلة، تم إنشاء العديد من الدراسات في إطار تثمين هذا النوع من الرمال في الخرسانة و الملاط. و بالتالي، فإنه من المثير للاهتمام العثور على عناصر علمية موثوق بها لمعرفة دور رمال المحاجر و المواد الناعمة في التنبؤ بخصائص الخرسانة، وخاصة الخرسانة المضخة.

في هذا السياق، اعتمد هذا البحث في المقام الأول على تشخيص رمال المحاجر (الحجر الجيري والسيليسي) والمواد الناعمة. ثم يتم إدراج هذه الأخيرة في مخاليط إسمنتية من أجل تحديد آليات عملها في الاتصال مع المكونات المختلفة للخرسانة من خلال قياس خصائصها الريولوجية والميكانيكية. ويتكون الجزء الريولوجي من دراسة تأثير رمال المحاجر التي تحتوي على المواد الناعمة (0 و 5 و 10 و 15 و 20%) على قابلية التشكل واللزوجة وعتبة التدفق للخرسانة و الموائع التي تكونه : مائع المواد الناعمة، مرق الأسمنت والملاط. وأجريت اختبارات ريومترية على كل من هذه الموائع. وقد تم تحديد تأثير تركيز العناصر الصلبة على تغير العوامل الريولوجية لهذه الأخيرة. النتائج التي تم الحصول عليها تبين أن الخرسانة و الملاط يمكن اعتبارهما سائل بينغهام. ومن ناحية أخرى، يمكن اعتبار مرق الأسمنت سائل هيرشيل-بولكلي من خلال إظهاره لسلوك ريوسائلي. و هكذا، وعلى جميع مستويات القياس، تتأثر اللزوجة وعتبة التدفق بوجود رمال المحاجر وبزيادة محتواها من المواد الناعمة. أجريت دراسة الخواص الميكانيكية على قياس قوة الضغط والشد عند 7 و 28 يوما على عينات الملاط والخرسانة. تظهر النتائج التجريبية أن رمال المحاجر لا تضعف القوة الميكانيكية.

الكلمات الجوهرية: رمال المحاجر، المواد الناعمة، ريولوجي، النماذج الريولوجية، اللزوجة، عتبة التدفق، مقاومة.

Résumé

L'utilisation du sable de concassage (SC) dans la production des bétons, en tant que ressource alternative au sable de rivière surexploité, est devenue une pratique courante depuis de nombreuses années. Contrairement au sable de rivière, les SCs sont anguleux et ils contiennent des quantités excessives de fines. Par conséquent, des problèmes à l'état frais comme à l'état durci sont survenus dans le béton. Face à cette problématique, plusieurs études ont été réalisées dans le cadre de la valorisation de ce type de sable dans le béton et le mortier. Ainsi, il est intéressant d'avoir des éléments fiables pour la prise en compte scientifique du rôle des SCs et leurs fines dans la prédiction des propriétés des bétons, notamment pompés.

Dans ce contexte, cette recherche s'est appuyée tout d'abord sur la caractérisation des SCs (calcaire et siliceux) et des fines calcaires de concassage. Ensuite, ces derniers sont ajoutés aux mélanges cimentaires pour déterminer leurs mécanismes d'action en contact avec les différents constituants du béton, en mesurant leurs propriétés rhéologiques et mécaniques. La partie rhéologique consiste à étudier l'influence des SCs contenant des fines (0, 5, 10, 15 et 20 %) sur l'ouvrabilité, la viscosité et le seuil de cisaillement du béton et les suspensions qui le composent à savoir : la suspension de fines, le coulis de ciment et le mortier. Des essais rhéométriques ont été réalisés sur chacune de ces suspensions. L'influence de la concentration des éléments solides sur l'évolution des paramètres rhéologiques a été identifiée. Les résultats obtenus montrent que le béton et le mortier peuvent être considérés comme des fluides de Bingham. Par contre, le coulis de ciment peut être assimilé à un fluide d'Herschel-Bulkley en montrant un comportement rhéofluidifiant. Ainsi, la viscosité et la contrainte seuil de cisaillement sont affectées par la présence des SCs et par l'augmentation de la teneur en fines calcaires dans le SC. L'étude des propriétés mécaniques du mortier et du béton est menée par la mesure de la résistance à la compression et à la traction à 7 et 28 jours. Les résultats expérimentaux montrent que les SCs n'affectent pas la résistance mécanique du béton.

Mots clés : Sable de concassage, Fines calcaires, Rhéologie, Modèles rhéologiques, Viscosité, Contrainte seuil, Résistance.

Abstract

The use of crushed sand (CS) in concrete production as an alternative resource to replace the over exploited river sand, has become a common practice from many years. Compared to river sand, CSs are angular and contain excessive amounts of fines, which may affect the fresh and hardened properties of concrete in an either positive or negative way. Facing this problem, several studies have been carried out in the scope of the reuse this type of sand in concrete and mortar applications. Hence, it is interesting to have reliable elements for the scientific consideration of the role of CSs and their fines in the prediction of the properties of concrete, especially pumped concrete.

In this context, this research was based firstly on a characterization of CSs (limestone and siliceous) and limestone crushed fines. Then, the latter are incorporated in cementations mixtures in order to determine their mechanisms of action in contact with the various ingredients of the concrete by assessing their rheological and mechanical properties. The rheological part consists of studying the influence of the CSs containing fines (0, 5, 10, 15 and 20%) on the workability, the viscosity and the yield stress of the concrete and the suspensions which compose it: the suspension fine, cement grout and mortar. Rheometric tests were carried out on each of these suspensions. The influence of the concentration of solid elements on the evolution of the rheological parameters has been identified. The results obtained show that concrete and mortar can be considered as Bingham fluids. On the other hand, the cement grout can be assimilated by Herschel-Bulkley fluid by showing a shear thinning behavior. Thus, the viscosity and the yield stress are affected by the presence of CSs and by the increase of the content of limestone fines in the CS. The study of the mechanical properties is conducted on the measurement of the compressive and tensile strength at 7 and 28 days on mortar and concrete specimens. Experimental results show that CSs do not affect the mechanical strength.

Key words: Crushed sand, Limestone fines, Rheology, Rheological models, Viscosity, Yield stress, Strength.

REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail, je remercie ALLAH le Miséricordieux de m'avoir donné la force et la patience à achever ce mémoire.

Cette recherche a été réalisée sous la direction de Monsieur Farid DEBIEB, Professeur à l'Université de Médéa. Je tiens à lui témoigner toute ma gratitude pour la confiance qu'il a manifestée à mon égard, pour son aide et son soutien permanents. Ses conseils précieux ont permis à ce travail d'aboutir.

Je souhaite exprimer mes profonds remerciements à Monsieur Belkacem MENADI, Professeur à l'Université de Blida-1, pour avoir Co-encadré cette thèse. Il m'a fait bénéficier de ses compétences et conseils avisés permanents.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à Monsieur El-Hadj KADRI, Professeur à l'Université de Cergy Pontoise, pour son aide, sa gentillesse et sa disponibilité. Mes séjours en France m'étaient très bénéfiques.

Mes remerciements vont à Monsieur Said KENAI Professeur à l'Université de Blida-1, à Monsieur Ammar YAHIA Professeur à l'Université de Sherbrooke, à Monsieur EZZIANE Karim Maître de Conférence à l'Université de Blida et à Monsieur ABDESSEMED Mouloud Maître de Conférences à l'Université de Blida-1, qui ont bien voulu faire partie du jury et d'apporter leur vive contribution à l'enrichissement de ce travail.

Je tiens à exprimer mes plus sincères remerciements à Monsieur K. AMOKRANE, Maître de Conférences à l'Université de Médéa, A. BENMOUNAH Professeur à l'Université de Boumerdès, à Monsieur Y. BENNA chargé de recherche à CNERIB et à Monsieur L. COURARD, Professeur à l'Université de Liège, pour leur disponibilité et leurs aides.

J'exprime ma gratitude à l'ensemble du personnel de : LME et Hall technologique de l'université de Médéa, LGEOMAT de l'université de Blida, L2MGC de l'université de Cergy Pontoise, LMMC de l'université de Boumerdès et GRANITEX à Alger, qui ont mis à ma disposition tous les moyens pour réaliser mes essais.

Mes remerciements vont particulièrement à ma mère et à mon père pour leur amour, leur gentillesse, leurs encouragements continus ainsi que leurs efforts et leur grand sacrifice.

Je remercie chaleureusement ma femme, mes frères, mes sœurs, toute ma famille et mes amis pour leurs soutiens et leurs encouragements permanents tout au long de ce travail.

J'adresse mes vifs remerciements à tous mes collègues et en particulier Monsieur H. Soualhi, Monsieur B. BENABED et Monsieur A-S-E. BELAIDI. Je remercie mes amis pour leurs soutiens et leurs encouragements.

Enfin, mes sentiments vont à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

TABLE DES MATIERES

RESUME.....	1
REMERCIEMENTS.....	2
TABLE DES MATIERES	3
LISTE DES ILLUSTRATIONS, FIGURES ET TABLEAUX.....	4
INTRODUCTION GENERALE	7
1. SABLE DE CONCASSAGE	11
1.1. Introduction	11
1.2. Valorisation du sable de concassage.....	11
1.3. Aperçu sur la normalisation des sables de concassage.....	13
1.4. Réactivité des fines calcaires	15
1.5. Compacité d'empilement des granulats concassés	17
1.6. Sable de concassage.....	18
1.6.1. Influence des propriétés physiques des sables de concassage.....	18
1.6.2. Influence du type de sable	20
1.6.3. Influence de la pétrographie des sables.....	22
1.6.4. Influence des propriétés morphologiques des particules.....	23
1.6.5. Influence de concentration volumique solide.....	24
1.6.6. Influence du superplastifiant.....	25
1.6.7. Influence du volume de pâte	26
1.6.8. Influence d'impureté argileuse	27
1.6.9. Travaux Algériens sur le sable calcaire de concassage.....	28
1.7. Effet des fines calcaires de concassage sur les matériaux cimentaires.....	32
1.7.1. Effet des fines calcaires sur l'ouvrabilité.....	33
1.7.2. Effet de la morphologie des fines	34
1.7.3. Effet de la finesse et de la surface spécifique des fines.....	35
1.7.4. Effet de la teneur en MgO sur la viscosité des suspensions du calcaire....	37

1.7.5. Effet des fines calcaires sur les propriétés rhéologiques sous pression	38
1.7.6. Etude de l'effet de la teneur en fines de concassage dans le sable.....	39
1.7.7. Effet du rapport E/C.....	40
1.7.8. Etude comparative de l'effet de divers fillers	40
1.7.9. Effet des fines à l'état durci	43
1.7.10. Utilisation des fillers calcaires dans le ciment	45
1.7.11. Travaux algériens sur les fines calcaires de concassage.....	46
1.8. Conclusion	47
2. RHEOLOGIE DES SUSPENSIONS.....	48
2.1. Introduction	48
2.2. Notions de base	48
2.2.1. Ouvrabilité et méthodes d'essai empiriques.....	48
2.2.2. Terminologie rhéologie.....	49
2.2.3. Typologie de l'écoulement.....	51
2.2.4. Thixotropie	53
2.2.5. Dilatance	54
2.2.6. Description physique de la viscosité	54
2.2.7. Description physique du seuil de cisaillement.....	57
2.3. Rhéologie des suspensions cimentaires	57
2.3.1. Essai et cahier des charges rhéologique.....	58
2.3.2. Modèles rhéologiques prédictifs.....	60
2.4. Relation entre les paramètres rhéologiques du béton et ses suspensions	62
2.5. Influence des composants.....	63
2.6. Influence de l'air occlus	65
2.7. Comparaison des résultats obtenus par différents rhéomètres	66
2.8. Corrélation entre les propriétés rhéologiques et les essais empiriques	68
2.9. Taux de cisaillement maximum pour différents types de procédés	70

2.10. Unités rhéologiques fondamentales versus unités rhéologiques machines	70
2.11. Influence du potentiel zêta sur la rhéologie	71
2.12. Relation rhéologie - pompabilité	72
2.12.1. Pompabilité du béton.....	72
2.12.2. Ecoulement dans un tube circulaire	73
2.12.3. Ecoulement du béton dans les tuyaux de pompage.....	76
2.12.4. Influence de la rhéologie sur le pompage.....	78
2.12.5. Influence du pompage sur les propriétés rhéologiques	79
2.13. Conclusion	80
3. MATERIAUX ET ESSAIS.....	81
3.1. Introduction	81
3.2. Caractérisation des matériaux et malaxage des mélanges	83
3.2.1. Présentation des matériaux utilisés	83
3.2.2. Préparation des matériaux	88
3.3. Description des mélanges et désignation	88
3.3.1. Malaxage des mélanges	88
3.3.2. Suspension de fines.....	90
3.3.3. Coulis de ciment.....	90
3.3.3. Mortier	90
3.3.4. Béton.....	91
3.4. Méthodes d'essais	92
3.4.1. Essais effectués sur ciment et fines	93
3.4.1.1. Essai de demande en eau	93
3.4.1.2. Calcul des coefficients de distributions granulométriques.....	94
3.4.2. Essais effectués sur sables.....	95
3.4.2.1. Equivalent de sable.....	95
3.4.2.2. Analyse granulométrique	96

3.4.2.3. Masse volumique	96
3.4.2.4. Coefficient d'absorption.....	96
3.4.2.5. Facteurs de morphologie	96
3.4.2.6. Angle de frottement.....	96
3.4.3. Essais effectués sur coulis de ciment.....	98
3.4.3.1. Essai au cône de Marsh.....	98
3.4.3.2. Essais rhéométriques.....	99
3.4.4. Essais effectués sur mortier à l'état frais.....	101
3.4.4.1. Essai au mini-cône.....	101
3.4.4.2. Essai au cône d'écoulement	103
3.4.4.3. Essai au maniabilimètre	104
3.4.4.4. Mesure des propriétés rhéologiques	105
3.4.5. Essais effectués sur béton à l'état frais	112
3.4.5.1. Cône d'Abrams	112
3.4.5.2. Mesures rhéométriques	112
3.4.6. Mesure de la résistance mécanique du béton et du mortier.....	118
3.5. Récapitulation des essais effectués	120
4. ANALYSE ET INTERPRETATION DES RESULTATS	121
4.1. Introduction	121
4.2. Caractérisation des matériaux utilisés.....	121
4.2.1. Compacité d'empilement du ciment et du sable.....	122
4.2.2. Propreté des sables	122
4.2.3. Mesure du coefficient d'absorption.....	123
4.2.4. Analyse granulométrique.....	124
4.2.5. Angle de frottement.....	125
4.2.6. Morphologie des particules de sable	126
4.2.7. Coefficients de distributions granulométriques des sables et fines	127

4.3. Mesure des propriétés rhéologiques	127
4.3.1. Suspension des fines	128
4.3.2. Coulis de ciment.....	129
4.3.2.1. Mesure du temps d'écoulement à travers le cône de Marsh	129
4.3.2.2. Essais rhéométriques sur les coulis de ciment.....	130
a) Modélisation du comportement rhéologique des coulis de ciment.....	132
b) Etude du seuil de cisaillement	135
c) Etude de la viscosité	136
4.3.3. Mortier	139
4.3.3.1. Mesure du temps d'écoulement au maniabilimètre b et à travers le cône d'écoulement	139
a) Influence du rapport E/C	139
b) Influence des fines calcaires de concassage.....	141
c) Influence du temps de repos.....	142
d) Influence du volume de la fraction sableuse	144
e) Influence du superplastifiant	144
4.3.3.2. Mesure de l'affaissement et de l'étalement	146
a) Influence de la teneur en fine dans le SC	146
b) Influence de la nature du SC et de la concentration massique de la fraction sableuse	147
4.3.3.3. Mesure de l'air occlus	148
4.3.3.4. Essais rhéométriques sur le mortier.....	149
4.3.3.5. Corrélation entre les essais rhéométriques et empiriques	153
4.3.3.6. Effet de la nature et du type de sable sur les propriétés rhéologiques du mortier... ..	154
4.3.3.7. Effet de la concentration massique de SC sur les propriétés rhéologiques du mortier.. ..	155

4.3.3.8. Effet de la morphologie des sables sur les propriétés rhéologiques du mortier.....	156
4.3.3.9. Mise en évidence de la corrélation entre les propriétés rhéologiques et les facteurs morphologiques	157
4.3.4. Rhéologie du béton et son MBE.....	159
4.3.4.1. Mise en évidence de la corrélation entre les propriétés rhéologiques du béton et son MBE	159
4.3.4.2. Mesures des propriétés rhéologiques du béton et son MBE	161
4.3.4.3. Comparaison des propriétés rhéologiques du béton avec le SC et le SR.....	163
4.4. Mesure des propriétés mécaniques du béton et son MBE	164
4.4.1. Influences de la teneur en fines dans le SC	165
4.4.1.1. Cas des mortiers	165
4.4.1.2. Cas du béton et son MBE	166
4.4.2. Influences de la nature et du type de sable.....	169
4.4.3. Influences de la fraction sableuse calcaire.....	171
CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS	173
REFERENCES.....	178
ANNEXES	

LISTE DES FIGURES

Chapitre 1 : SABLE DE CONCASSAGE

Figure 1.1 : Représentation schématique des compacités	18
Figure 1.2 : Evolution du seuil de cisaillement versus la viscosité plastique des mortiers à base de différents types de sables	20
Figure 1.3 : Variation de la demande en eau (E/C) en fonction de l'affaissement.....	21
Figure 1.4 : Evolution de la résistance mécanique à la compression en fonction de l'affaissement pour un dosage en ciment de a) 300 kg/m ³ et b) 350 kg/m ³	22
Figure 1.5 : Développement de la résistance à la compression du béton avec des SCs provenant de différentes sources (granit (G), calcaire (L) et dolomite (D)).	23
Figure 1.6 : Evolution du seuil de cisaillement versus viscosité plastique des mortiers en fonction du type de sable	24
Figure 1.7 : Evolution a) du seuil de cisaillement et b) de la viscosité plastique des mortiers en fonction du dosage en superplastifiant	25
Figure 1.8 : Evolution a) du seuil de cisaillement et b) de la viscosité plastique des mortiers en fonction du volume de pâte	26
Figure 1.9 : Evolution : a) des rapports E/C et E/C _{eq} b) de la densité c) de la porosité, en fonction de la teneur en fines dans le sable	29
Figure 1.10 : Effet des fines calcaires sur la résistance à la compression de divers mélanges de béton.....	30
Figure 1.11 : Effet de la teneur en DS sur a) le mini-slump, b) le temps d'écoulement en V-funnel et c) les mesures de la viscosité, des mortiers à base de sable binaire (CS / DS)	32
Figure 1.12 : Micrographies obtenues au MEB de particules de a) cendres volante et b) fines calcaires	35
Figure 1.13 : Evolution des propriétés rhéologiques en fonction de la surface spécifique et de teneur en fines	36

Figure 1.14: Evolution de a) l'étalement b) la viscosité et c) le seuil de cisaillement en fonction de la surface spécifique BET (H ₂ O)	36
Figure 1.15 : Effet de la teneur en MgO sur la viscosité des suspensions du carbonate de calcium avec : a) avec 2% de superplastifiant polyacrylate (Sp), taux de cisaillement = 100 s ⁻¹ , la taille moyenne des particules (Φ_{moy}) 0,75 μ m, et b) avec Sp=0,7% et Φ_{moy} = 3 μ m.....	38
Figure 1.16 : Effet de la teneur en fines calcaires sur les variations a) du seuil de cisaillement et b) de la viscosité plastique sous pression	39
Figure 1.17 : L'évolution a) du seuil de cisaillement et b) de la viscosité en fonction de la teneur en fines dans le sable.....	40
Figure 1. 18 : Comparaison entre la résistance du gel après 10 min de repos (à faible oscillation) en fonction du volume de a) SF non densifiée et b) calcaire au fil du temps (25 minutes d'intervalle) avec 0,79% de plastifiant sec ajouté en masse de la poudre.....	41
Figure 1.19 : Modélisation statistique de diverses réponses rhéologiques pour les ciments ternaires OPC-LF-SF : fillers calcaires (LF) et fumée de silice (SF)	42
Figure 1.20 : Dosages requis en superplastifiant (SPA) à différentes teneur en fines pour une contrainte seuil de 20 Pa.....	42
Figure 1.21 : Variation a) du rapport E/C et b) de la résistance à la compression et à la flexion en fonction du taux de filler	47

CHAPITRE 2 : RHEOLOGIE DES BETONS FRAIS

Figure 2.1 : Représentation a) en 2D et b) en 3D de l'écoulement visqueux	50
Figure 2.2 : Rhéogrammes a) contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement b) viscosité apparente en fonction du taux de cisaillement, pour différents fluides : Newtonien, de Bingham, de Bingham modifié (BM) et de Herschel-Bulkley (H-B).....	52
Figure 2.3 : Représentation schématique de la boîte de cisaillement et différents modes de cisaillement.....	54
Figure 2.4 : Représentation graphique de la viscosité : apparente, plastique et différentielle dans le cas des fluides Newtoniens et non newtoniens.	55

Figure 2.5 : Relation entre la viscosité relative et la concentration pour les principales expressions dans la littérature	62
Figure 2.6 : Effet de : b) la texture des sables et leur teneur et c) l'addition de différents adjuvants et d'eau sur les propriétés rhéologiques du béton.....	64
Figure 2.7 : Figure centrale: Rhéogrammes montrant l'influence de l'air, de l'eau, de la silice et du SP sur la limite d'élasticité et la viscosité plastique, sur la base des courbes d'écoulement indiquées sur les figures latérales	65
Figure 2.8 : Comparaison des résultats obtenus par différents rhéomètres.....	66
Figure 2.9 : Comparaison des paramètres rhéologiques entre les rhéomètres BTRHEOM et ICAR.....	67
Figure 2.10 : Volume de la matrice nécessaire pour avoir un affaissement de 650mm en fonction a) de la viscosité plastique et b) du seuil de cisaillement de la matrice correspondante	68
Figure 2.11 : Corrélation seuil de cisaillement-slump. Résultats expérimentaux pour différents rhéomètres et corrélation numérique . b) comparaison entre l'affaissement et le seuil de cisaillement.	69
Figure 2.12 : Comparaison entre a) l'étalement au mini-cône et le seuil de cisaillement et b) le temps d'écoulement et la viscosité plastique. Chaque point représente une mesure et non pas une moyenne (donc on ne peut pas calculer l'incertitude)	69
Figure 2.13 : Taux de cisaillement pour différents tests correspondant aux différents types de manipulation du béton	70
Figure 2.14 : Potentiel Zeta des pâtes de ciment et de poudres calcaires en fonction de différents dosages en superplastifiant	72
Figure 2.15 : Evolution a) de la vitesse de cisaillement à travers un tuyau et b) de la vitesse	75
Figure 2.16 : Ecoulement du béton dans les tuyaux de pompage	76
Figure 2.17 : Evolution des paramètres rhéologiques à travers un tuyau de pompage.....	77
Figure 2.18 : Evolution de la vitesse de cisaillement et de la vitesse moyenne à travers un tuyau de pompage.....	77

Figure 2.19: Corrélation entre la perte de pression par unité de longueur et a) la viscosité à un taux de cisaillement de 10 / s et b) le seuil de cisaillement	78
---	----

CHAPITRE 3 : MATERIAUX ET ESSAIS

Figure 3.1 : Photos des sables de concassage a) calcaire et b) siliceux	84
Figure 3.2 : Courbes granulométriques de différents sables étudiés	86
Figure 3.3 : Images MEB des fines calcaires de concassage	86
Figure 3.4 : Granulométrie des fines par laser et distributions granulométriques cumulées.....	87
Figure 3.5 : Courbes granulométriques du ciment et des fines calcaires	87
Figure 3.6 : Passage de l'état de boulettes à l'état de pâte homogène	94
Figure 3.7 : Définitions des facteurs d'aspect, de forme et de circularité	96
Figure 3.8 : Détermination de l'angle de frottement	98
Figure 3.9 : Cône de Marsh	99
Figure 3.10 : Image du Rhéomètre AR 2000 avec la géométrie Vane	100
Figure 3.11 : Protocole d'essai rhéologique sur le coulis de ciment.....	101
Figure 3.12 : Dimensions du mini-cône par rapport au cône d'Abrams.....	102
Figure 3.13 : Essai d'affaissement et d'étalement pour le mortier au mini-cône	103
Figure 3.14 : Cône d'écoulement	104
Figure 3.15 : Principe de fonctionnement du maniabilimètre B	105
Figure 3.16 : Essais sur la consistance du mortier (Maniabilimètre B)	105
Figure 3.17 : (a) Rhéomètre et (b) position de la Vane dans le récipient du mortier.....	107
Figure 3.18 : Profil de la vitesse de rotation imposée P257, de la Vane	107
Figure 3.19 : Evolution du couple de rotation en fonction du temps pour l'essai à vide.....	109
Figure 3.20 : Schéma du cisaillement du béton dans le récipient	113
Figure 3.21 : Schéma du principe de fonctionnement du rhéomètre.....	115

Figure 3.22 : Photo du rhéomètre à béton et la pale (double U)	116
Figure 3.23 : Profil expérimental adopté pour l'essai rhéologique sur le béton (P48).....	118
Figure 3.24 : Presse hydraulique pour mortier (Quantech 3R)	119
Figure 3.25 : Malaxeur, table vibrante et presse hydraulique (Perrier/3R) pour béton.....	120
Figure 3.26 : Récapitule des mélanges confectionnés et les sables utilisés	120

CHAPITRE 4 : ANALYSE ET INTERPRETATION DES RESULTATS

Figure 4.1 : Courbes granulométriques des SC en fonction de leur teneur en fines calcaires	125
Figure 4.2 : Angle de frottement du SC en fonction de sa teneur en fines	125
Figure 4.3 : Evolution du temps d'écoulement des suspensions de fines	128
Figure 4.4 : Evolution du temps d'écoulement des coulis de ciment avec SP.....	129
Figure 4.5 : Evolution de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement des coulis de ciment sans Sp.....	131
Figure 4.6 : Evolution de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement des coulis de ciment avec Sp	131
Figure 4.7 : Rhéogrammes du coulis	133
Figure 4.8 : Courbe type d'un essai en géométrie Vane	134
Figure 4.9 : Evolution du seuil de cisaillement en fonction de la concentration volumique solide des coulis de ciment sans adjuvant - Modélisation par le modèle de Legrand -	136
Figure 4.10 : Evolution de la viscosité de cisaillement en fonction du taux de cisaillement des coulis de ciment sans Sp.....	137
Figure 4.11 : Evolution de la viscosité apparente des CC en fonction a) du taux de cisaillement et, b) de la concentration volumique solide.	138
Figure 4.12 : Evolution du temps d'écoulement des mortiers M°1 à travers le cône d'écoulement en fonction du rapport E/C.	139

Figure 4.13 : Mesure du temps d'écoulement de M1 au Maniabilimètre B pour différents rapport E/C en fonction de la concentration volumique solide des fines dans le SC.....	140
Figure 4.14 : Evolution du temps d'écoulement du mortier M1° à travers le cône d'écoulement en fonction de leur concentration en fines.....	141
Figure 4.15 : Evolution du temps d'écoulement des mortiers M1° en fonction du temps de repos.....	143
Figure 4.16 : Influence du volume de la fraction sableuse calcaire sur l'évolution du temps d'écoulement des mortiers au maniabilimètre B.....	144
Figure 4.17 : Influence du Sp sur l'évolution du temps d'écoulement au maniabilimètre des mortiers M3L et M3L°.....	145
Figure 4.18 : Influence des fines sur les propriétés d'écoulement des M1°.....	147
Figure 4.19 : Influence la nature du sable et de la concentration massique de la fraction sableuse sur l'évolution de l'affaissement au mini-cône.....	148
Figure 4.20 : Evolution de l'air occlus en fonction de la teneur en fines dans le SC dans le mortier avec Sp (M1°).....	149
Figure 4.21 : Rhéogrammes montrent l'évolution des couples en fonction de la vitesse de rotation.....	150
Figure 4.22 : Rhéogrammes montrent l'évolution de la contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement.....	150
Figure 4.23 : Influence des fines sur la contrainte seuil de différents mortiers.....	151
Figure 4.24 : Influence des fines sur la viscosité de différents mortiers	152
Figure 4.25 : Corrélation entre l'affaissement et la contrainte seuil de différents mortiers	153
Figure 4.26 : Corrélation entre le temps d'écoulement et la viscosité de différents mortiers	154
Figure 4.27 : Effet de la nature et le type de sable sur les propriétés rhéologiques.	155
Figure 4.28 : Effet de la concentration massique des SCs sur les propriétés rhéologiques du mortier.....	156

Figure 4.29 : L'évolution de la viscosité plastique en fonction du seuil de cisaillement des mortiers à base de LS, SS et SR.....	157
Figure 4.30 : Corrélation entre les facteurs de morphologie de particules de sable et les propriétés rhéologiques des mortiers.....	158
Figure 4.31 : Corrélation entre l'étalement du MBE et l'affaissement du béton.....	160
Figure 4.32 : Exemple de corrélation entre l'étalement du MBE et l'affaissement du béton.....	161
Figure 4.33 : Comparaison entre l'évolution du seuil de cisaillement des bétons et leurs MBE.....	162
Figure 4.34 : Comparaison entre l'évolution de la viscosité plastique des bétons et leurs MBE.....	163
Figure 4.35 : Evolution a) du seuil de cisaillement et, b) de la viscosité plastique des bétons à base de SC et SR.....	164
Figure 4.36 : Evolution de la résistance a) à la traction et, b) à la compression du M1° (avec 1,1% de Sp) à 7 et à 28 jours en fonction de la teneur en fines dans le SC.....	166
Figure 4.37 : Evolution de la résistance à la compression du béton (à affaissement constant), à 7 et à 28 jours, en fonction de la teneur en fines dans le sable.....	167
Figure 4.38 : Evolution de la résistance mécanique à 7 et à 28 jours des MBEs à base de SS en fonction de la teneur en fines dans le sable.....	168
Figure 4.39 : Evolution de la résistance mécanique des MBEs à base de SS et LS en fonction de la teneur en fines dans le sable.....	169
Figure 4.40 : Comparaison entre les résistances à la traction des mortiers à base de SS, SC et SR à 28 jours.....	170
Figure 4.41 : Comparaison entre les résistances à la compression des mortiers à base de SS, SC et SR à 28 jours.....	170
Figure 4.42 : Comparaison entre la résistance à la compression du B10 et du BR, à 7 et à 28 jours.....	171
Figure 4.43 : Comparaison des résistances mécaniques des mortiers à base SC à 28 jours, en fonction du rapport S/C (M1S1 : S/C=1 ; M2S1 : S/C=2).....	172

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre 1 : SABLE DE CONCASSAGE

Tableau 1.1: Pourcentage des fines admises dans le sable concassé selon diverses normes pour la confection des bétons et mortiers.	14
Tableau 1.2 : Compacités des granulats concassés pour différents modes de mise en place.....	18
Tableau 1.3 : Diminution de la résistance par accroissement de 1% d'argile dans le sable.....	27

CHAPITRE 2 : RHEOLOGIE DES BETONS FRAIS

Tableau 2.1 : Modélisation mathématique de quelques comportements rhéologiques indépendants du temps.	53
Tableau 2.2 : Différents types de forces dans une suspension des particules dans l'eau.....	56
Tableau 2.3 : Modèles rhéologiques de la viscosité.....	61
Tableau 2.4 : Modèles du seuil de cisaillement.....	64
Tableau 2.5 : Propriétés rhéologiques en unités fondamentales de pâte de ciment, mortier et béton.	67

CHAPITRE 3 : MATERIAUX ET ESSAIS

Tableau 3.1 : Composition chimique de ciment.....	83
Tableau 3.2 : Analyses chimiques des sables concassés : calcaire et siliceux.....	85
Tableau 3.3 : Caractéristiques physiques des sables concassés : LS et SS	85
Tableau 3.4 : Récapitulation des opérations de malaxage.....	89
Tableau 3.5 : Désignations des coulis de ciment et sa suspension de fines correspondante	90
Tableau 3.6 : Compositions et désignations des mortiers.....	91
Tableau 3.7 : Formulations retenues pour les essais sur les bétons et leurs MBEs.....	92

Tableau 3.8 : Principaux paramètres morphologiques...	97
---	----

CHAPITRE 4 : ANALYSE ET INTERPRETATION DES RESULTATS

Tableau 4.1 : Valeurs d'équivalent de sable et bleu de méthylène	122
Tableau 4.2 : Coefficient d'absorption de LS à différentes teneur en fines	123
Tableau 4.3 : Analyse granulométrique de sable de concassage.	124
Tableau 4.4 : Coefficients de forme de différents sables utilisés	126
Tableau 4.5 : Calcul des paramètres de description des distributions granulométriques.	127
Tableau 4.6 : Valeurs des paramètres du modèle d'Herschel-Bulkley - Cas des coulis de ciment sans Sp.	133
Tableau 4.7 : Valeurs des paramètres du modèle d'Herschel-Bulkley - Cas des coulis de ciment avec 1% de Sp	133
Tableau 4.8 : Influence du Sp sur le temps d'écoulement au maniabilimètre des mortiers M3L et M2L	145

LISTE DES SYMBOLES ET DES ABREVIATIONS

Ab	Absorption (%)
ACI	American concrete Institute (Institut Américain du Béton)
ASTM	American Society for Testing and Materials
B	Béton
BAP	Béton autoplaçant
BHP	Béton de Haute Performance
BO	Béton Ordinaire
C	Ciment
CC	Coulis de ciment
CP	Ciment Portland
CPA CEM I 52.5	Ciment Portland ordinaire de Classe 52,5
C-S-H	Silicate de Calcium Hydraté
CV	Cendre Volante
D	La plus grande dimension des grains (mm)
E	Dosage en Eau
E/C	Rapport Eau/Ciment
E/L	Rapport Eau/Liant
F	Fines
FS	Fumé de Silice
G	Gravier
G/C	Rapport Gravier/Ciment
G/S	Rapport Gravier/Sable
L	Liant
LS	Sable calcaire
MBE	Mortier de béton équivalent
M _f	Module de finesse
S	Sable
SC	Sable de concassage
SF	Suspension de fines
Sp	Superplastifiant
SR	Sable roulé
SS	Sable siliceux
V _{Eau}	Volume d'eau (m ³)
V _{Fines}	Volume des fines (m ³)
V _{Sable}	Volume du sable (m ³)
V _{si}	Valeur spécifiée inférieure (%)
V _{ss}	Valeur spécifiée supérieure (%)
d	La plus petite dimension des grains (mm)
f _{c7}	Résistance à la compression à 7 jours
f _{c28}	Résistance à la compression à 28 jours

f_{t7}	Résistance à la traction à 7 jours
f_{t28}	Résistance à la traction à 28 jours
t	Temps d'écoulement (s)
μ	Viscosité (Pa.s)
τ	Contrainte de cisaillement (N/m ²) ou (Pa)
τ_0	Seuil de cisaillement (N/m ²) ou (Pa)
γ	Déformation de cisaillement
$\dot{\gamma}$	Gradient de vitesse (s ⁻¹)
\emptyset	Concentration volumique solide (%)
λ	Facteur d'encombrement

INTRODUCTION GENERALE

La demande d'agrégats pour produire du béton reste élevée dans de nombreux pays à travers le monde, alors que les ressources naturelles diminuent. En Algérie, le béton a été traditionnellement à base de sable naturel roulé. Toutefois, l'offre de ce type d'agrégats est inégalement répartie, avec une rareté dans certaines régions. Ainsi, étant donné que ces gisements sont importants pour la valeur naturelle et culturelle du pays. Alors, il est intéressant de les préserver.

En revanche, l'Algérie est un pays vaste, riche en ressources naturelles et dispose une population jeune qui est évaluée à 41 millions d'habitants en 2016 contre 29 millions en 1996, avec un taux de croissance actuel estimé à 2%. Ce qui mène à des besoins très importants en termes d'infrastructures. Afin de répondre aux exigences de cet accroissement populaire, l'état déployait des ressources financières importantes en entreprenant des méga voire des giga projets à l'horizon 2016, tels que : construction de quatre millions de logements ; nouvelles villes ; barrages et transferts d'eau ; projet autoroutier : 4.500 km ; projet ferroviaire : 12.500 km ; 10.000 ouvrages d'art ; 25 km de tunnels ; 13 usines de dessalement d'eau de mer ; 10 centrales électriques ;..., grands consommateurs de sables et gravillons. En conséquence, une exploitation effrénée des sables des plages et d'oueds a été enregistrée. Ce qui présente une menace certaine pour les nappes alluviales et les sites maritimes. En fait, les mesures restrictives prises dans ce cadre préservent notre environnement mais accentuent l'indisponibilité de ce matériau, notamment les exigences de la norme algérienne NA 5043 adoptée depuis novembre 2007 [1] et la note consiste à l'interdiction absolue de l'extraction du sable d'oued en 2009. A cet effet, le problème de sable est de nouveau posé d'une manière plus accrue. Pour compenser la production réduite, il faut trouver un matériau alternatif qui peut remplacer le sable roulé. La seule alternative existante, disponible localement et trouvée en quantités suffisantes, est bien le sable de concassage. Ce type d'agrégat diffère généralement de l'agrégat roulé

dans la forme des particules et leur granulométrie, mais il présente un matériau de substitution possible aux ressources traditionnelles à savoir les sables de mer et d'oued. Fort heureusement que l'Algérie dispose une géologie favorable et une grande variété de gisements potentiellement aptes à donner des granulats à béton. La quasi-totalité des granulats sont issus de roches massives principalement calcaires, dont l'utilisation des sables issus de ces roches constitue une action d'intérêt général et de portée nationale, et représente une solution prometteuse dans le secteur du bâtiment et travaux publics. Néanmoins, la connaissance et la gestion de cette richesse minérale constituent un élément décisif pour le développement durable. Par exemple, selon la direction des mines de la wilaya de Médéa, parmi les 42 carrières autorisées en 2017 à travers toute la wilaya, seules 25 sont opérationnelles. Ces dernières comptent 15 carrières de calcaire pour agrégats et 3 carrières de sable de construction. Mais, la production reste toujours faible avec 1475480 m³ d'agrégats et 2100 m³ de sable de construction.

Contrairement au sable roulé issu de la désagrégation des roches où les grains sont arrondis avec des surfaces plus lisses, les grains du sable concassé sont anguleux et ont une abrasivité très grande avec des surfaces plus rugueuses. Mais généralement, ce dernier présente une meilleure distribution granulaire. En fait, de nombreuses propriétés d'agrégats dépendent des propriétés de la roche mère (par exemple : composition chimique et minéralogique). Certaines propriétés telles que la forme, la taille des particules et la texture des grains de sable ne sont pas observées dans la roche mère. Tandis que, d'autres propriétés telle que l'absorption peuvent changer en raison du concassage. La forme dépend de la nature et du degré de stratification de la roche mère, du type de concasseur utilisé et de la granulométrie acquise. Toutes ces propriétés ont une influence importante sur la qualité des mortiers et bétons à l'état frais et durci. Cependant, le béton à base de sable concassé présente souvent une plus grande demande d'eau pour obtenir la même maniabilité que le béton correspondant à base de sable roulé. Ceci est préjudiciable aux performances des bétons et rend la mise en place plus délicate.

Cependant, lors de concassage des roches massives, des quantités excessives de fines sont générées, et par conséquent, le sable résultant

contiendra des quantités relativement importantes de fines. Ces fines sont principalement de même nature que la roche mère. Néanmoins, ces fines peuvent être argileuses si le gisement est sale. Il est communément établi que la teneur en fines d'un sable dépend de la structure pétrographique de la roche mère. A cet effet, les normes européennes EN 12620, 2000 [2] et EN 13139, 2003 [3], spécifient les exigences de classement des sables de concassage, qui sont différentes de celles des sables roulés. La différence est liée à la quantité et à la qualité des particules très fines, souvent appelées fines ou poussière de sable de concassage, définies comme étant particules passant à 80 μm , selon la norme NF P 18-540, 1997 [4]. Pour le béton ordinaire, on tolère une teneur en fines allant jusqu'à 16% en masse pour les sables concassés. En Algérie, la majorité des stations de concassage produit des sables avec une teneur en fines dépassant largement cette limite. S'il existe une hésitation à utiliser des sables concassés dans la production de béton, c'est à cause de cette forte teneur en fines par rapport au sable de rivière. En revanche, l'utilisation de sable concassé lavé est généralement limitée en raison du volume élevé de pâte de ciment nécessaire pour obtenir une bonne ouvrabilité du béton. Dans notre travail, nous allons étudier l'influence de la teneur en fines, en remplacement partiel dans le sable, jusqu'à 20 %.

L'objectif principal de cette étude est de clarifier l'influence de sable de concassage et ses fines sur les propriétés rhéologiques et mécaniques des mortiers et bétons. Cela nécessite des études sur les effets de la forme et la qualité du sable, la quantité de fines et aussi bien l'addition des adjuvants sur les propriétés du béton à l'état frais et durci. Ainsi, on va essayer de comprendre la relation entre le pompage du béton et ses propriétés rhéologiques, notamment l'évolution du comportement rhéoépaississant ou rhéofluidifiant avec l'augmentation de la teneur en fines, qui représente un vrai défi pour les ingénieurs.

Cependant, l'intérêt général de cette recherche est la valorisation du sable de concassage Algérien pour la confection des bétons hydrauliques avec ou sans superplastifiant, en tant que ressource alternative aux sables roulés surexploités. Ainsi, cette recherche doit permettre de mesurer l'influence du taux de fines (0, 5, 10, 15 et 20%) sur les propriétés rhéologiques et mécaniques de mortier et béton

ordinaire. Finalement, il est intéressant d'avoir des éléments fiables pour la prise en compte scientifique du rôle des fines calcaires de concassage dans la prédiction des propriétés des mortiers et bétons, notamment pompés.

Bien sûr, la rhéométrie de béton n'est pas une tâche facile. Le béton est décrit par les rhéologues comme l'un des matériaux les plus difficiles à caractériser. Des précautions doivent être prises lors de la réalisation des mesures et un esprit très critique doit analyser les résultats. A cet effet, ce travail peut aussi avoir une grande importance pour l'étude fondamentale des propriétés rhéologiques du béton à base de sable de concassage, et en particulier l'influence de ses fines calcaires. Les résultats obtenus peuvent conduire à la compréhension fondamentale de l'écoulement de ce type de béton dans les tuyaux de pompage et nous permettre de résoudre les problèmes techniques que les utilisateurs ont entrepris au niveau des chantiers.

Pour ce faire, après une introduction générale et une présentation des objectifs et problématiques de la recherche, cette thèse se décompose en quatre chapitres :

Les deux premiers chapitres sont consacrés à une revue bibliographique. Le premier chapitre donne un aperçu général sur l'effet des sables de concassage et leurs fines sur les propriétés rhéologiques et mécaniques, avec une comparaison entre l'influence des fines calcaires et autres fillers. Le deuxième chapitre est dédié à la présentation d'éléments théoriques sur la rhéologie, donnant une courte introduction à la rhéologie, une étude plus détaillée sur la rhéologie des suspensions, les procédures de mesure, la rhéologie des matériaux cimentaires et la relation entre la rhéologie des bétons et leur pompabilité.

Les deux derniers chapitres, se concentre davantage sur les essais effectués et les résultats obtenus. Le troisième chapitre s'attache à présenter le programme expérimental, les matériaux et les équipements nécessaires adoptés dans cette recherche. Le quatrième chapitre présente la synthèse et l'interprétation des résultats obtenus.

A la fin, nous clôturons ce travail par les conclusions les plus importantes et les perspectives pour un éventuel approfondissement de cette étude.

CHAPITRE 1 :

SABLE DE CONCASSAGE

1.1. Introduction

Les granulats alluvionnaires, occupent plus de 70 % en volume dans la composition d'un béton, représentent désormais une ressource non renouvelable dont l'accessibilité diminue. A cet effet, plusieurs pays ont été amenés à prendre des mesures de préservation des ressources alluvionnaires en imposant des règles strictes limitant les prélèvements. Par conséquent, les formulations actuelles de béton visent à augmenter la part de granulats concassés de roche massive. En fait, ces matériaux et notamment le sable font l'objet de plusieurs travaux de recherche pendant les trois ou quatre dernières décennies dans le but de les valoriser dans le béton hydraulique. Ce chapitre présente une synthèse bibliographique des principaux travaux traitant l'effet des SCs et leurs fines sur les mortiers et bétons à l'état frais et durci.

1.2. Valorisation du sable de concassage

En Tunisie par exemple, le ministère de l'équipement de l'habitat et de l'aménagement des territoires a lancé une étude visant à valoriser les sables calcaires de concassage pour leur emploi dans les différents domaines de la construction. Un long parcours a été déjà achevé suite à l'achèvement des études en 2007 par Achour et al. [5-7], en 2010 par Akrouf et al. [8] en 2012 par Joudi-Bahri et al. [9, 10] et en 2012 par R'Mili et Ben Oueddou [11]. En fait, ces travaux montrent concrètement la faisabilité du béton calcaire en Tunisie. Ils ont également contribué à la rédaction du premier manuel technique sur l'utilisation des ressources calcaires dans ce pays [12]. Ainsi, le Maroc a élaboré la norme NM 10.1.165, 1995 [13] et la loi N° 08-01, 2002 [14].

Jadis en Europe, des travaux de valorisation des SCs ont été enregistrés dans divers pays. Par exemple en France, les travaux de recherche réalisés en 1984 par Cadron et al. [15] et Coquillat et al. [16], étaient la base des normes françaises sur ce sujet telles que la norme : NF EN 206-1, 2004 [17], qui prend en

compte l'activité des fines calcaires dans le liant équivalent avec un coefficient d'activité k vaut 0,25, bien entendu, qu'elle limite leur utilisation selon la classe d'exposition du béton. Ailleurs en Suède, afin de mieux comprendre l'influence des caractéristiques des SCs sur l'ouvrabilité du béton, un projet de recherche a été lancé en 2003 réalisé Westerholm [18-20]. Ce projet a été inclus dans le cadre d'un plus grand programme de développement national suédois (MinBaS) dans l'industrie des minéraux et des agrégats. Le programme a été financé à la fois par le gouvernement et les entreprises participantes. Ainsi, la production de sable naturel en 2004, était d'environ 21 millions de tonnes et selon les décisions politiques, l'objectif est de réduire la production à 12 millions de tonnes en 2010.

En Algérie, plusieurs études [21-32] sur le mortier et le béton ont été développées dans le but d'éclaircir l'influence des SCs et leurs fines sur les propriétés du béton durci. Mais peu d'études ont été menées sur la caractérisation rhéologique du béton à l'état frais [26, 30, 33, 34] et sa pompabilité. En fait, on était parmi les premiers pays africains entreprenant des études techniques portant sur l'utilisation généralisée et la valorisation du SC pour la confection du béton hydraulique à travers plusieurs travaux de recherche, notamment ceux réalisés en 2000 par Benna et Dahli [35] sous la direction du centre national d'études et de recherches intégrées du bâtiment (CNERIB). Il en résulte l'élaboration de la loi № 05-12 en 2005 [36] et l'instruction interministérielle [37] organisant la généralisation progressive de l'usage des sables concassés dans le bâtiment, en précisant les spécifications techniques auxquelles doivent répondre ces matériaux pour bétons hydrauliques et enrobés bitumineux. Ainsi, une nouvelle cartographie à travers plusieurs wilayas a été mise en place en vue de répertorier les carrières susceptibles de fournir des SCs, et des autorisations ont été attribuées pour la production exclusive de ce type de sable. Par contre, sur le plan technique et notamment sur site, le problème de SCs est toujours soulevé surtout en ce qui concerne sa propreté et l'effet de leurs fines sur les propriétés rhéologiques et mécaniques du béton. En plus, la majorité des stations ne comportent pas les équipements nécessaires permettant le lavage des sables et l'élimination des argiles afin d'avoir un taux de fines toléré. Les statistiques montrent que l'activité de concassage des granulats est très dispersée et elle est très loin d'être restructurée suite au nombre élevé des propriétaires des stations

de concassage à l'échelle nationale. En revanche, l'authentification de ce patrimoine minéral incombe à l'office national de recherche géologique et minière (ORGM). Ainsi, ce dernier devrait relever l'importance de nouveaux gisements et l'immense potentiel minier national afin de fixer les choix et les orientations stratégiques, notamment en matière de ressources granulaires, en fonction des impératifs économiques et sociaux. A cet effet, une nouvelle cartographie des gisements a été réalisée par l'ORGM à travers 16 wilayas du pays. D'autres études sont aussi au menu en 2016 à travers une mission similaire qui va concerner plusieurs régions du sud-est et de l'ouest pour confirmer ce potentiel minier. Toutefois, ce type de sable doit répondre à des exigences réglementaires précises par les pouvoirs publics notamment en ce qui concerne les propriétés physiques, mécaniques et chimiques. Malgré tous ces travaux, le SC reste toujours un sujet d'actualité pour les chercheurs dans le monde entier, en l'occurrence [38-44(2018)]

En effet, les divers travaux réalisés jusqu'ici dans le monde sur le SC et ses fines, étudiaient généralement l'état durci, montrent bien la possibilité d'utiliser ce genre de matériaux dans la confection du béton hydraulique, mais avec un écart flagrant dans le taux de fines toléré d'une norme à une autre. En Algérie, jusqu'à maintenant la qualité du béton obtenu à base de ce type de sable fait en nombreux cas l'objet de débat technique notamment avec une teneur élevée en fines pour un béton pompé.

1.3. Aperçu sur la normalisation des sables de concassage

Des normes ont été établies précisant la teneur admissible de leurs fines, souvent appelées « fillers » ou bien aussi « poussière de concassage », selon le cas d'utilisation. Du point de vue physique, le sable concassé et ses fines jouent deux rôles : un rôle de dilution (ils prennent la place des grains de ciment, tout en étant moins coûteux) ; et un rôle de renfort mécanique (ils bloquent la propagation de fissures dans la pièce durcie) [45]. En fait, plusieurs normes prenaient en compte les résultats des études qui ont été publiées dans cet axe de recherche. Les fines de concassage sont une matière fine formée pendant le processus de broyage de la roche en gravillon concassé ou en sable concassé. Selon Dreux et Festa [46], le vocable de « fines » de la norme NF P 18-540, désigne l'ensemble des grains passant au tamis de 80 μm , alors que les précédentes normes, la

teneur en fines était définie par le passant à 63 μm . Par contre, British Standard BS 882: Partie 2: 1983 [47], selon [48], précise les exigences de classement de granulats concassés selon la teneur en fines, à savoir les particules passant de tamis 75 μm . Selon la norme EN 206-1 (2004) [17] des bétons, les additions minérales pouvant être quasiment inerte (type I) ou à caractère hydraulique ou pouzzolanique (type II). Elles peuvent être ajoutées au béton pour améliorer certaines de ses propriétés ou lui confère des propriétés particulières [21, 49]. Ainsi, selon de-Larrard [50], les fines calcaires ne sont ni inertes, ni gratuites, et qu'une petite quantité de ce produit est toujours bénéfique sitôt que le ciment contient des aluminates. La quantité optimale des fines calcaires augmente quand la dose de superplastifiant augmente et quand la résistance visée diminue. De même, l'incorporation de fines calcaires est plus attrayante quand le taux de C_3A du ciment est élevé.

Plusieurs pays limitent la teneur en addition type I dans les agrégats pour béton ou mortier (Tableau 1.1). Principalement, ces additions ont deux propriétés :

- 1- L'activité d'origine physique des additions chimiquement inertes (les additions calcaires) : il a été montré [51-54] que l'hydratation du silicate tricalcique est plus rapide en présence des fines calcaires. Ainsi, l'effet filler fait partie de cette propriété. Cet effet traduit par l'existence d'un dosage optimal pour lequel la porosité du béton est minimale.
- 2- La réaction pouzzolanique : c'est la réaction chimique en solution entre la silice (SiO_2) provenant de la dissolution d'une poudre siliceuse et l'hydroxyde de calcium $\text{Ca}(\text{OH})_2$ produit par l'hydratation du ciment.

Tableau 1.1: Pourcentage des fines admises dans le SC selon diverses normes pour la confection des bétons et mortiers [21] (légèrement modifié).

Pays	Allemagne	Canada	Italie	Belgique	USA	France	Royaume-Uni	Algérie
Norme et référence	DIN 4226	CSA A231	Uni 7 163	NBN 589-102	ASTM C33	NF P 18 541, 301, X 540	BS 822	DTR BE 2.1
Date	1971	1973	1972	1969	1997	1994-1983-1997	1992	1991-2010
Teneur en fines dans le sable (%)	< 4	< 3-5	< 3-5	< 3-5	< 5-7	< 12-18	< 16	< 16

Les teneurs en fines sont exprimées en pourcentage massique.

Il est à noter que l'article 10 de la norme française NF équivalente XP P 18-545 [55] distingue quatre catégories (A, B, C, D) correspondant à quatre niveaux de qualité.

La norme EN 206-1 [17] des bétons admet que les fillers calcaires actifs, en présence d'une masse de ciment CEM I 42,5 ou 52,5 N ou R, peuvent être comptés dans le liant (L) équivalent en tenant compte d'un coefficient d'activité égal à 0,25 c-à-d : $L=C+0,25.A$. ainsi, il est cité dans [10]. Le rapport maximal de fillers pouvant être pris en compte dans le liant équivalent : $A / (A + C)$, est fonction de la classe d'exposition du béton.

Selon Courard et al., cité par [10], les normes belges depuis longtemps considéraient les fillers calcaires comme inertes vis-à-vis la réactivité chimique dans les mélanges cimentaires. Pourtant, de nombreuses études ont montré qu'une certaine activité « liante » pouvait leur être attribuée. Par exemple, une étude a été menée au Sud de la Belgique afin d'évaluer l'effet de l'application du coefficient k à différents fillers calcaires de production locale. Le concept du coefficient k, tel que défini dans la norme européenne EN 206-1 pour les additions à caractère hydraulique et pouzzolanique, a été utilisé pour formuler les bétons. Les résultats de cette recherche intégrant des aspects de durabilité à long terme ont montré que, malgré la diminution de la teneur en ciment et l'augmentation du rapport E/C des bétons à base de fillers calcaires, des propriétés équivalentes sont obtenues en termes de résistance à la compression, d'absorption d'eau par immersion, de retrait de séchage et de résistance à la carbonatation. Par contre, l'absorption d'eau capillaire est systématiquement augmentée et un gonflement important est observé avec certains fillers en cas d'immersion dans une solution à haute teneur en sulfates. Les résultats indiquent également que la contamination des fillers par des particules argileuses contribue à augmenter la demande en eau des bétons [10].

1.4. Réactivité des fines calcaires

Le calcaire a généralement été considéré comme un additif inerte dans une pâte de ciment hydratante. Bien qu'il soit convenu que le calcaire n'est pas pouzzolanique, plusieurs études ont montré qu'il a une réactivité significative. Il en résulte des carbo-aluminates de calcium selon la réaction chimique (1.1) :



Il est rapporté par Nehdi [56] que, plusieurs auteurs ont observé que l'hydratation de C_3A a été supprimée par des ajouts de $CaCO_3$ en raison de la formation de carboaluminate de calcium sur les grains de C_3A . Il a été noté en outre que la formation d'ettringite et sa conversion en mono-sulfo-aluminate ont été accélérées en présence de $CaCO_3$. A l'inverse, Vernet a suggéré que la formation précoce de l'ettringite est similaire avec ou sans l'ajout de calcaire. Mais lorsque le gypse est épuisé, la réaction de calcaire domine, et après la consommation de C_3A , les composés stables sont l'ettringite et le monocarboaluminate [56].

Ramachandran et Chun-Mei [57] ont étudié de l'hydratation du silicate tricalcique de rapports eau/ciment de 0,7 et 2,0 en présence de 0, 5, 10, 15 et 50% $CaCO_3$, de différentes tailles moyennes de particules (3,2 ; 4,4 ; 10,7 ; 14,5 ; 21,0 et 77,0 μm). L'addition de $CaCO_3$ accélère l'hydratation notamment avec l'augmentation de sa finesse.

Vikan et Justnes [53] et Kadri et al. [54] ont rapporté des tendances similaires où la substitution de 10% de ciment portland par des fines calcaires a amélioré l'hydratation du C_3S et la formation d'hydroxyde de calcium, probablement parce qu'il offrait des sites de nucléation pour sa croissance. D'autre part, Ushiyama et al., cité par [56], ont suggéré que l'ajout de petites quantités de carbonates retarde l'hydratation précoce de l'alite (C_3S), tandis que l'ajout de grandes quantités accélère son hydratation.

Il existe encore d'autres preuves de la réactivité du calcaire proviennent de l'utilisation d'agrégats calcaires dans le béton. Plusieurs travaux de recherche, entres autres [53, 54, 58], ont conclu que les agrégats calcaires formaient des liaisons plus intimes par rapport aux autres minéraux et que la calcite ne pouvait pas être considérée comme véritablement inerte dans le béton.

Des essais ont été réalisés par Valcuende et al. [59] afin d'étudier l'évolution du retrait avec l'âge dans les bétons autoplçants (BAP) fait avec $E/C=0,6$ et différent filler calcaire en présence d'un agent de viscosité (VMA). Les résultats montrent que les fillers calcaires accélèrent les réactions d'hydratation et de fournir une structure plus fine poreuse.

Il est rapporté ainsi par [56] qu'une réaction possible entre la calcite et l'hydroxyde de calcium $Ca(OH)_2$ peut expliquer la même réactivité entre la roche de carbonate et la pâte de ciment, ce qui a entraîné la formation d'un hydrate de

carbonate de calcium basique. Bien que les données sur la réactivité du calcaire soient nombreuses, il n'est pas clair quelle est l'importance de cette réactivité, quelles sont les conditions nécessaires pour qu'elle se produise, notamment en présence de différents adjuvants.

1.5. Compacité d'empilement des granulats concassés

Par définition, la compacité des granulats représente le volume du matériau occupé par les particules solides. Il s'agit d'une grandeur qui intéresse un grand nombre de secteurs, notamment les bétons hydrauliques. Dans ces derniers, l'incorporation d'éléments ultrafins a permis de les rendre plus performants et d'accroître leur durée de vie. Elle a également impliqué pour les chercheurs de revenir aux fondamentaux de la physique des milieux granulaires et de faire appel aux modèles d'empilement. Pour le cas binaire, nous postulons l'existence de deux domaines : « grains fins dominants » et « gros grains dominants », avec une zone intermédiaire supplémentaire où le mélange est optimum. Lorsque les fractions granulaires ne possèdent pas des rapports de tailles infinis, deux interactions géométriques se développent : l'effet de paroi et l'effet de desserrement.

- La première peut se décrire ainsi : une grosse particule isolée constitue un « intrus » contre lequel viennent se ranger les petites particules, créant un supplément de vides à l'interface.
- La seconde se produit lorsque les petits grains sont insuffisamment fins pour se glisser entre les gros [60].

Trois états de compaction reproductibles ont été identifiés dans la littérature pour des sphères uniformes : compacité lâche aléatoire Φ_l , compacité dense aléatoire Φ_m , compacité maximale Φ_M (figure 1.1). Il est à noter que la compacité dense aléatoire d'empilement n'est pas à confondre avec la compacité maximale d'empilement. Cette dernière, souvent non mesurable, équivaut à un arrangement parfait de particules avec une énergie maximale apportée au système [61]. Le tableau 1.2 illustre un exemple des compacités des granulats concassés.

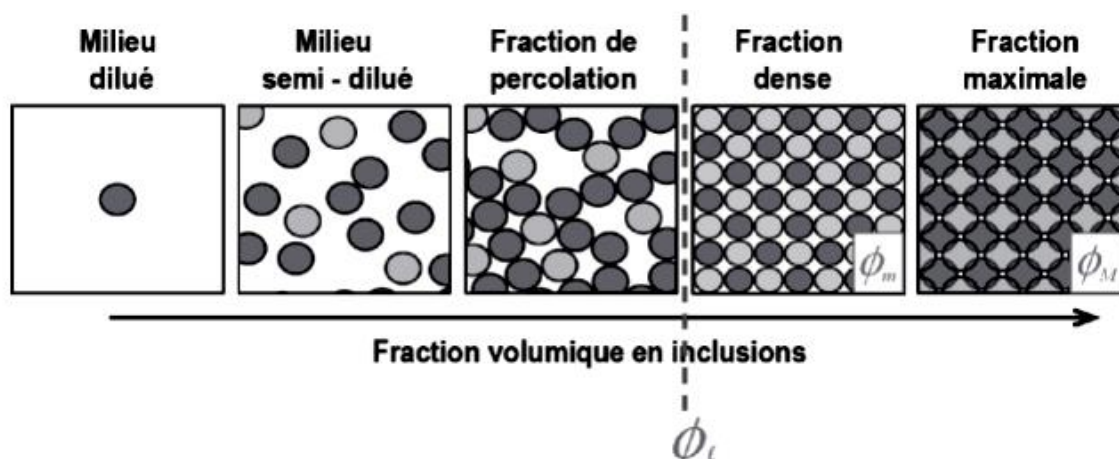


Figure 1.1 : Représentation schématique des compacités (Selon Yammine et al. 2008, Extrait de [61])

Tableau 1.2 : Compacités des granulats concassés pour différents modes de mise en place (Selon Boutefas 2012, Extrait de [62])

Calibre granulats	Sable 0/4 $d > 0,063$ mm	G1 4/8	G2 8/16	G3 16/25
ρ (g/cm ³)	2,55	2,52	2,53	2,54
C_{exp} (versement)	0,588	0,524	0,518	0,520
C_{exp} (tige)	0,600	0,536	0,530	0,535
C_{exp} (table à choc)	0,655	0,591	0,577	0,579

1.6. Sable de concassage

1.6.1. Influence des propriétés physiques des SCs

Selon Neville [63], de nombreuses propriétés de SC dépendent des propriétés de la roche mère (par exemple : la composition chimique et minéralogique). Certaines propriétés telles que la forme, la taille des particules et la texture de surface sont indépendantes de la roche mère, tandis que d'autres propriétés telles que l'absorption peuvent changer en raison du concassage. Ainsi, la forme dépend du degré de broyage, du type de concasseur utilisé et du taux de réduction de taille. Toutes ces propriétés ont une influence importante sur la qualité des mortiers et bétons frais et durcis [64].

La teneur en fines d'un matériau est une des données importantes qu'il est souhaitable de prévoir au moment de l'étude d'un gisement. Il est communément établi que la teneur en fines d'un sable dépend de la structure pétrographique, de la taille des grains et en partie du type de concasseur. Il apparaît qu'une connaissance précise de la pétrographie (analyse de la dimension du grain, des composants minéralogiques, de la microfissuration) associée à une analyse du pourcentage de fines de la fraction 0/4 après concassage de gravillons dans la

machine Los Angeles peut permettre de déterminer assez précisément le pourcentage de fines d'un 0/4 produit par une installation [15].

Toutefois, une étude a été faite par Alhozaimy [65], sur des SCs avec un taux d'absorption de 1,3 à 1,9%. L'auteur a trouvé que ces derniers pouvaient absorber jusqu'à 75% de leur capacité d'absorption lorsqu'ils sont mélangés dans du béton. La quantité restante (25%) s'ajoutera à l'eau libre, en augmentant ainsi le rapport efficace en E/C. Ce phénomène a été démontré par l'augmentation de l'affaissement initial et la diminution de la résistance à la compression par rapport aux mélanges avec agrégats humides.

Cependant, l'influence de la source minéralogique des sables concassés a été également étudiée dans [64]. Deux mélanges contenant du ciment de 450 et 485 kg/m³ et un rapport faible en E/C sont analysés. Les résultats ont montré clairement que la forme et la texture des sables concassés affectent l'ouvrabilité du béton. Mais, la résistance à la compression du béton est améliorée [64].

Des travaux de recherches ont été réalisés en Suède [18-20], ont montré clairement que les propriétés des sables concassés influençant fortement les propriétés rhéologiques des mortiers (Figure 1.2) et bétons. En effet, l'affaissement des bétons variait entre 5 mm et 200 mm selon le sable utilisé. Dans les essais de mortier, le seuil de cisaillement et la viscosité plastique variaient respectivement, entre 96 - 550 Pa et 1,3 - 8,8 Pa.s. De même, il a été montré que les mortiers à base de sable concassé présentent généralement à la fois un seuil de cisaillement et une viscosité plastique plus élevés que le mortier de référence à base de sable roulé.

Cependant, comme les sables utilisés dans cette étude ont montré de grandes variations dans la quantité de fines, la surface spécifique et la forme des particules, il est difficile de trouver des corrélations claires entre ces paramètres et les propriétés rhéologiques du mortier. En ce qui concerne la valeur d'équivalent de sable (ES), pour des valeurs inférieures à 75%, une augmentation significative des seuils de cisaillement et donc de la demande d'eau a été observée avec une diminution des valeurs ES. Cependant, la relation entre l'ES et la viscosité plastique est plus floue.

Les résultats de ce travail indiquent que la forme des particules influence principalement la viscosité plastique du mortier. Les mortiers confectionnés avec C7 et C9 présentaient une contrainte élevée et une viscosité plastique

relativement faible. Cela diffère du schéma général de la Figure 1.2 où une contrainte élevée est accompagnée d'une viscosité plastique élevée. En conséquence, cela signifie que ces mortiers présentent une résistance initiale élevée au mouvement, mais bien en mouvement, ils s'écoulent plus facilement qu'un mortier avec un seuil de cisaillement correspondant, mais une viscosité plastique plus élevée [20].

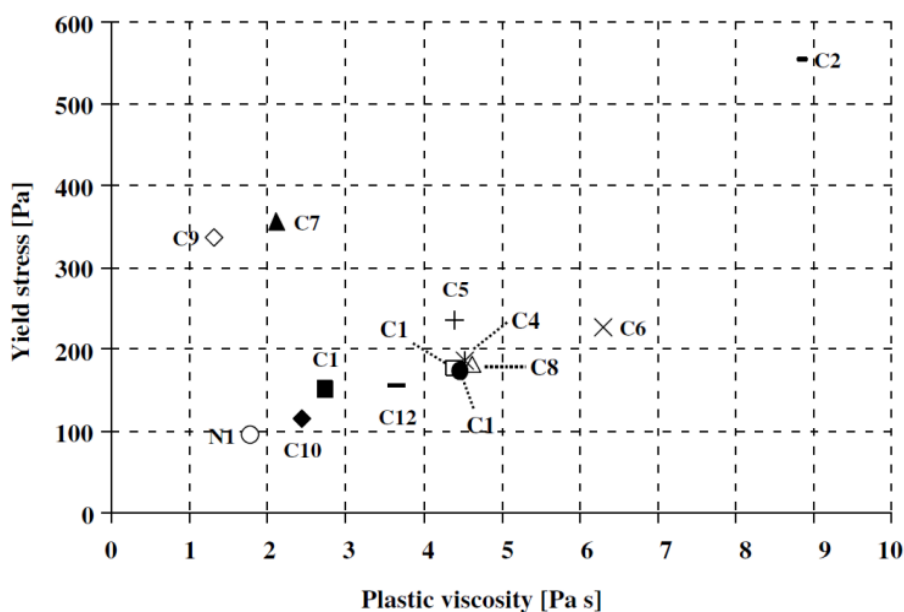


Figure 1.2 : Evolution du seuil de cisaillement versus la viscosité plastique des mortiers à base de différents types de sables [20].

1.6.2. Influence du type de sable

Dans le même contexte, une étude expérimentale a été réalisée en Tunisie par Akrouf et al. [8], afin de quantifier l'influence d'une substitution partielle ou totale du sable siliceux par un sable calcaire concassé, sur les performances des bétons. Les résultats obtenus ont prouvé que les bétons à base de sable calcaire concassé présentent des performances proches de celles des bétons à base de sable siliceux. En effet, pour une ouvrabilité comparable, le rapport E/C des bétons à base de sable calcaire concassé est de 13 à 16% supérieur à celui des bétons fabriqués avec du sable siliceux, pour une teneur en ciment de 300 kg/m³. Tandis que, l'effet est plus élevé lorsque la teneur en ciment augmente : E/C est supérieur d'environ 20% pour les bétons dosés à 350 (Figure 1.3) et 400 kg/m³ [8].

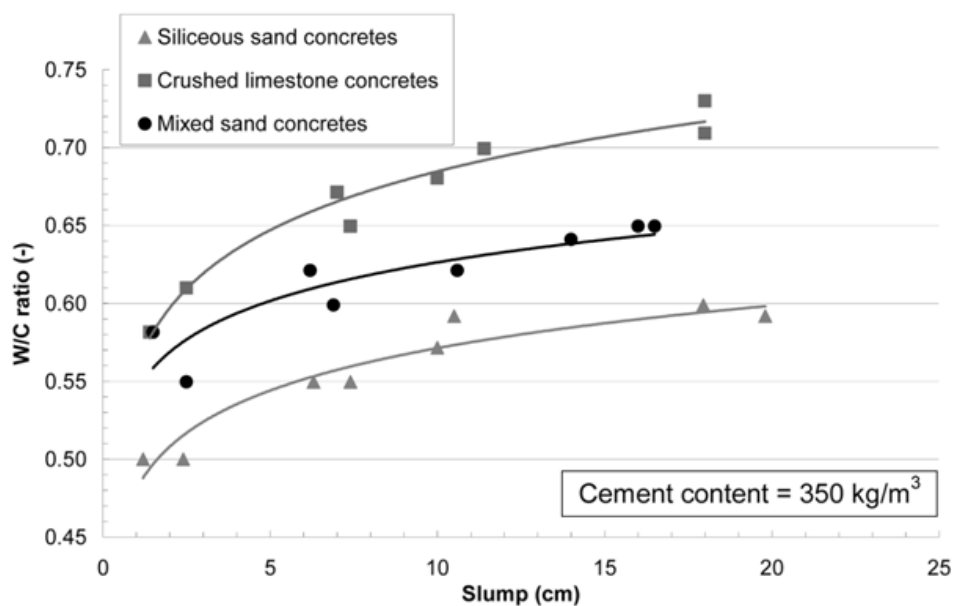


Figure 1.3 : Variation de la demande en eau (E/C) en fonction de l'affaissement [8].

En revanche, il a été souvent rapporté dans la littérature que le SC et le sable de désert renfermant des teneurs importantes en fines. Ces deux sables peuvent être des composants intéressants des BAP. A cet effet, une étude a été réalisée par R'mili et al. [11], consiste à incorporer le SC dans la composition des bétons et à étudier l'effet de son remplacement progressif par le sable de désert sur le comportement à l'état frais et durci des BAP. L'étude expérimentale montre que les paramètres d'ouvrabilité des BAP sont améliorés pour un remplacement inférieur ou égal à 30% du SC par le sable de désert. Cependant, à une teneur élevée en sable de désert, des quantités supplémentaires en eau sont nécessaires, pour répondre aux propriétés de BAP [11].

En revanche, dans [8] il a été observé que la différence de la résistance mécanique est plus grande (22%) avec un dosage en ciment de 350 kg/m³. Par contre, cette différence est d'environ 11% pour un dosage de 300 kg/m³ et 19% pour un dosage de 400 kg/m³ de ciment (Figure 1.4).

Dans la même étude, les auteurs ont trouvé qu'avant la fissuration des poutres en béton armé (sous une contrainte inférieure à 3 MPa), le sable calcaire concassé n'a pas d'influence significative sur le comportement en flexion. Mais après la fissuration, le béton à base de sable siliceux assure le meilleur comportement vis-à-vis de déformation de la poutre mais avec une très faible variation par rapport au béton à base de sable concassé. Ainsi, compte tenu des

mesures effectuées sur les dalles en béton armé, les performances du béton à base de SC sont plus faibles que celles des autres bétons [8].

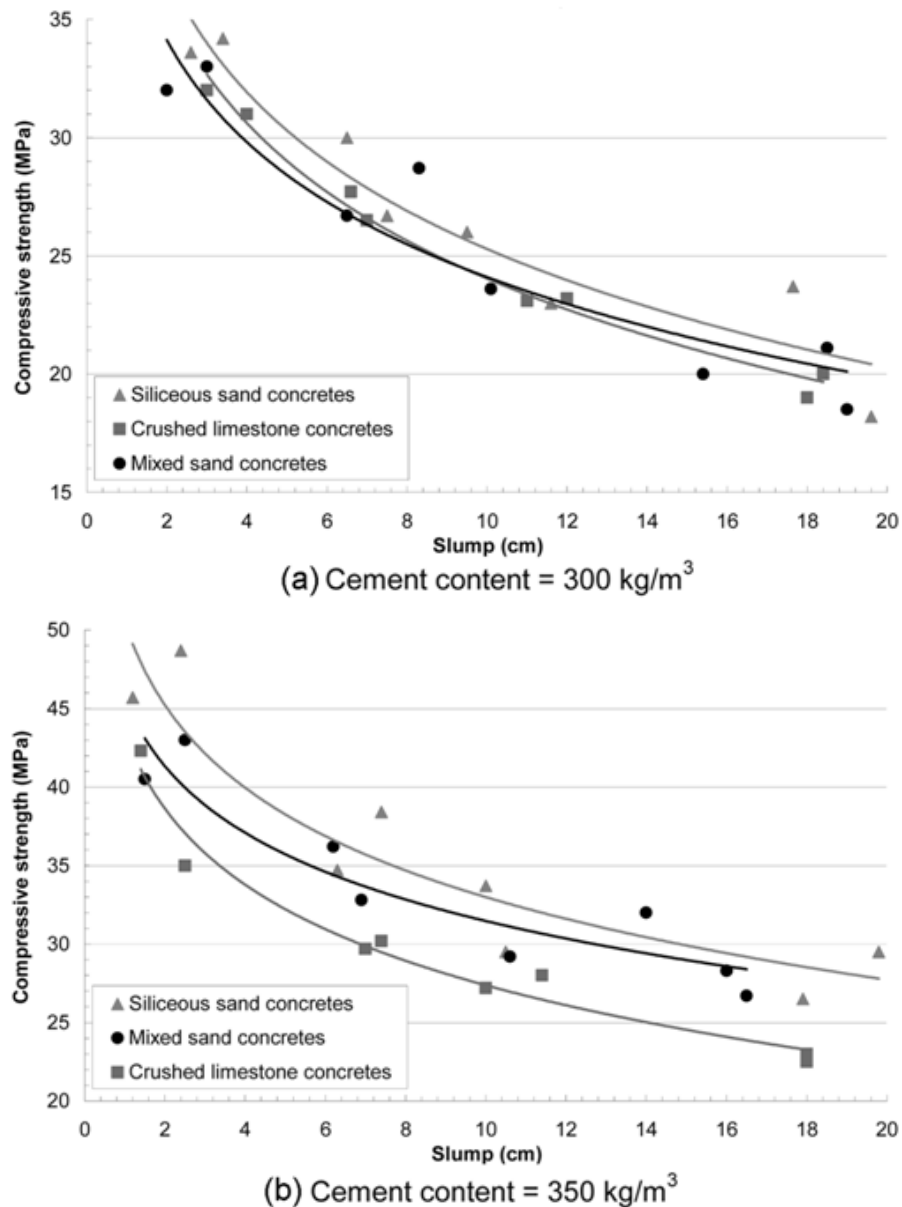


Figure 1.4 : Evolution de la résistance mécanique à la compression en fonction de l'affaissement pour un dosage en ciment de a) 300 kg/m³ et b) 350 kg/m³ [8].

1.6.3. Influence de la pétrographie des sables

Des études ont été réalisées en Argentine [64] sur quatre sables avec des caractéristiques pétrographiques différentes, dont trois concassés (granite, calcaire avec 10,6% de poussière et dolomie), mais avec granulométrie similaire. Ainsi, un sable siliceux naturel (NS), ayant des particules arrondies et lisses, a été utilisé comme référence. Pour tous les sables concassés, la teneur en poussières

est supérieure à la limite proposée (7%) selon la norme ASTM C 33, mais inférieure à celle proposée par la norme BS 882 (16%). Les résultats ont montré que le béton à base du sable concassé présente une résistance plus élevée qu'à base de sable naturel correspondant à tous les âges de test, alors que son module élastique est inférieur à 28 jours et il est le même à long terme. Ainsi, le sable concassé de granit apparaît comme le sable le plus avantageux par rapport aux autres (Figure 1.5).

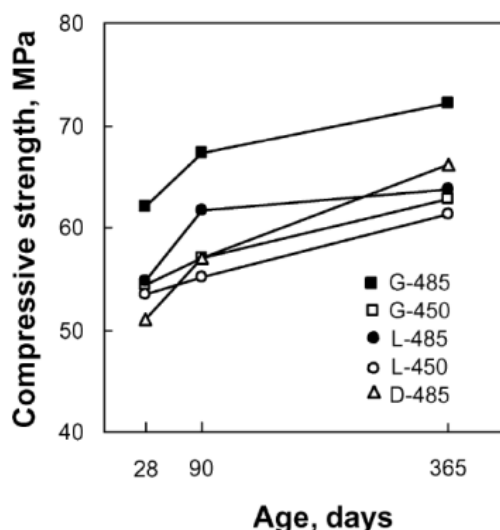


Figure 1.5 : Développement de la résistance à la compression du béton avec des SCs provenant de différentes sources (granit (G), calcaire (L) et dolomite (D)) [64].

1.6.4. Influence des propriétés morphologiques des particules

Westerholm et al. [20] ont observé que la différence entre les propriétés rhéologiques des mortiers à base des sables concassés de part et sable naturel d'autre part, est uniquement au niveau de la viscosité plastique (Figure 1.6). La différence peut être considérée comme un effet de forme de particule, c'est-à-dire que la viscosité plus élevée des mortiers à base de sable concassé est le résultat d'une interférence accrue des particules entre les particules non sphériques. Il est bien connu que tout écart par rapport à une forme de particule sphérique entraîne une augmentation de la viscosité pour la même concentration volumique solide.

Bigas et Gallias [66] ont également étudié l'effet de la morphologie sur la demande en eau ainsi que l'agglomération et la compacité d'empilement granulaire des mélanges de 18 additions minérales de nature et provenance différentes. Concernant la demande en eau, les procédures normalisées existantes (Essai Vicat sur pâtes de consistance normalisée NF EN 196.3 et Essai

au cône de Marsh sur coulis NF P 18-507) sont confrontées à un essai simple et rapide basé sur l'agglomération des particules de l'addition sous l'action des forces capillaires d'une goutte d'eau, qui a été utilisée dans cette étude. Les résultats obtenus montrent que la forme et particulièrement la texture affectent de manière significative la demande en eau et par conséquent la compacité d'empilement. Ils ont également constaté que pour les particules sphériques (rondes) et polygonales (angulaires), la demande en eau de ces ajouts fins dépend de la taille moyenne des particules et de la surface spécifique BET. Par contre, les additions en forme irrégulière (forme et texture complexes avec surface rugueuse) ont des exigences d'eau beaucoup plus élevées indépendamment de la taille et de la surface spécifique. Ainsi, il a été démontré que l'agglomération et les forces de surfaces électriques jouent un rôle crucial dans le comportement des particules de mélanges ciment-additions minérales.

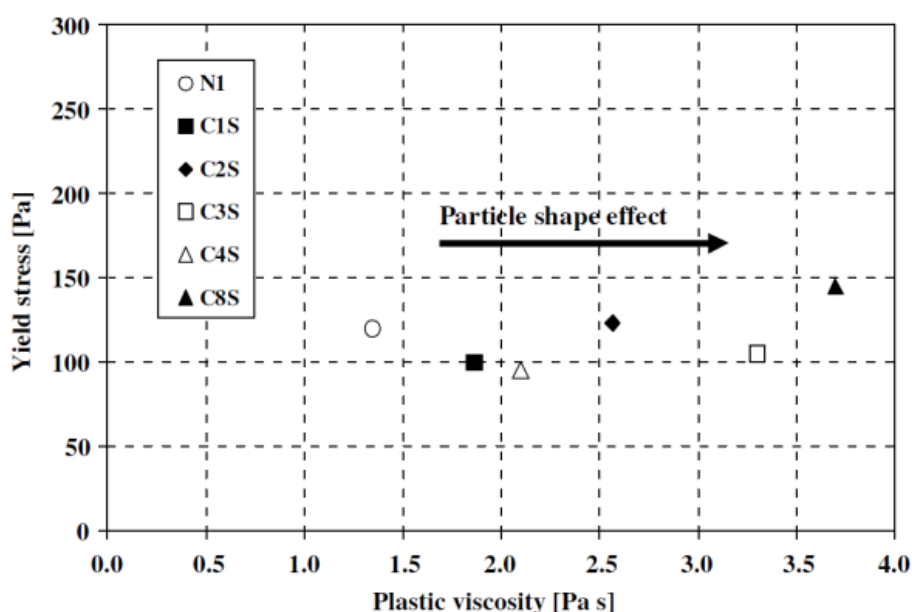


Figure 1.6 : Evolution du seuil de cisailment versus viscosité plastique des mortiers en fonction du type de sable [20].

1.6.5. Influence de concentration volumique solide

Une autre étude, réalisée par Hafid [67], a montré que la consistance augmente beaucoup plus rapidement que le seuil d'écoulement lorsque la concentration en particule augmente. La conséquence de cette observation est qu'une augmentation de la consistance ne sera pas forcément capturée par un essai d'étalement. Ceci est d'autant plus vrai que la taille des particules est petite.

Il a réussi à prédire la consistance d'une suspension composée de sables de formes différentes à partir d'une mesure de seuil. À partir d'une mesure d'étalement, il a pu donc prédire la consistance (mesurée de façon locale) de ses suspensions [67].

1.6.6. Influence du superplastifiant sur le mortier à base de SC

Selon Hagemeyer, cité par Nehdi [68], il a été constaté que les dispersants les plus efficaces pour le carbonate de calcium sont des composés polyphosphates inorganiques. D'autres composés inorganiques telles que les silicates sont beaucoup moins efficaces. Si la suspension est maintenue pendant une période prolongée ou à des températures élevées, il est recommandé d'utiliser un dispersant de polyacrylate, seul ou en combinaison avec un polyphosphate.

Les auteurs en [20], ont pu montrer que la « demande d'eau », exprimée par les paramètres rhéologiques des mortiers à base de SC était légèrement plus élevée et dans certains cas bien supérieure au mortier correspondant avec sable naturel. En utilisant un superplastifiant efficace, il est possible de réduire le seuil de cisaillement et la viscosité plastique des mortiers (Figure 1.7).

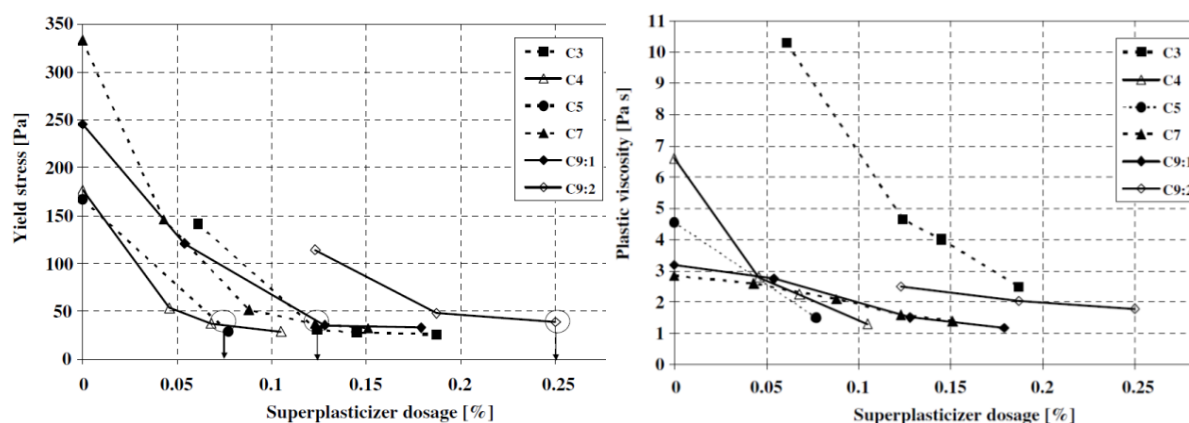


Figure 1.7 : Evolution a) du seuil de cisaillement et b) de la viscosité plastique des mortiers en fonction du dosage en superplastifiant [20].

Les résultats ainsi trouvés dans [64], ont montré que le béton à base de sable concassé nécessite une augmentation du superplastifiant pour obtenir le même affaissement.

Selon de Larrard [50], l'effet accélérateur des fillers calcaires est contrôlé par la surface spécifique du produit. Mais, sans superplastifiant, un filler plus fin demande plus d'eau, en termes de seuil de cisaillement et d'affaissement, puisque

la contribution de la fraction granulaire au seuil de cisaillement augmente quand la taille des grains diminue. Un filler calcaire très fin (diamètre moyen $\leq 1 \mu\text{m}$) n'a donc d'intérêt que si une grande quantité de superplastifiant est utilisée. Pour cette raison, pour les BHP, les fillers calcaires sont concurrencés par les produits pouzzolaniques, comme les fumées de silice qui sont beaucoup plus réactives.

1.6.7. Influence du volume de pâte

Le béton avec sable concassé nécessite souvent une teneur légèrement supérieure en ciment pour atteindre la même ouvrabilité qu'un béton avec un sable naturel [20]. L'effet d'une teneur accrue en ciment à un rapport E/C constant sur les propriétés rhéologiques des mortiers a été étudié par Westerholm et al. [20], comme il est représenté sur la Figure 1.8.

Dans ces expériences, une pâte artificielle a été utilisée à la place d'une vraie pâte de ciment pour simuler l'effet d'une teneur accrue en ciment. Les résultats montrent que l'influence des caractéristiques de sables, notamment : la forme, la surface spécifique et la granulométrie, devient moins importante avec l'augmentation du volume de pâte. Ceci est une conséquence de la réduction de l'interaction des particules suite à l'augmentation de la distance interparticulaire et la diminution simultanée du volume de sable. Des résultats similaires ont été rapportés par [19], pour les micro-mortiers et les bétons. Les résultats montrent que pour certains mortiers, une légère augmentation du volume de pâte est suffisante pour abaisser la contrainte seuil à celle du mortier à base de sable naturel, tandis que d'autres nécessitent un volume de pâte plus élevé que 62%. L'augmentation nécessaire du volume de pâte pour abaisser la viscosité plastique semble être légèrement plus grande.

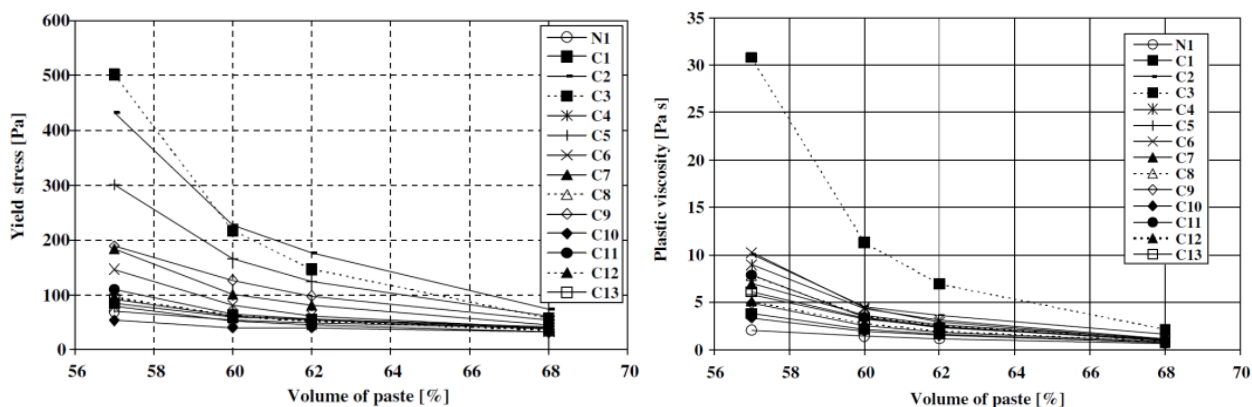


Figure 1.8 : Evolution a) du seuil de cisaillement et b) de la viscosité plastique des mortiers en fonction du volume de pâte [20].

1.6.8. Influence d'impureté argileuse

En Espagne, un programme de recherche assez exhaustif, a été réalisé par Ramirez et al. [58], dans le but de rassembler des données pour la révision de la norme Espagnole concernant la teneur en fines calcaires dans les SCs pour la confection de béton. Cette dernière a été initialement fixée à 5%, pour toutes les catégories des bétons. A cet effet, les auteurs ont étudié l'influence de la teneur en fines calcaires et argileuses sur les propriétés mécaniques des mortiers. D'abord, en ce qui concerne l'influence des fines calcaires sur tous les types de mortier préparés, ils ont constaté qu'on a un accroissement des résistances à la compression jusqu'à 20% de fines, pour la même ouvrabilité et une proportion d'argile dans le sable est inférieure ou égale 2%, pour un rapport ciment/sable inférieur à 1/3.

En revanche, en ce qui concerne l'influence des fines argileuses, l'augmentation de la proportion d'argile dans le sable fit chuter la résistance, de façon importante et linéaire. En terme quantitatif, l'augmentation de 1% d'argile dans le sable conduit aux diminutions moyennes de résistance indiquées dans le Tableau 1.3. Cette diminution de la résistance, avec chute échelonnée, due à l'argile, est, en général, supérieure à l'accroissement de la résistance produite par l'effet des fines calcaires. En observant ce phénomène d'un autre point de vue, on constate qu'un accroissement de 2% de la teneur en argile dans le sable concassé influe sur la variation du rapport E/C , plus qu'une modification de la teneur en fines calcaires de 3 à 20%. Pour la résistance à la traction en flexion, on constate des tendances similaires à celles mentionnées précédemment.

Tableau 1.3 : Diminution de la résistance par ajout d'argile dans le sable [58].

		Granulométrie			
		Grosse		Fine	
Ciment/Sable		1/3	1/4,2	1/4,2	1/6
Diminution moyenne de la résistance par accroissements d'un 1% d'argile dans le sable	Absolue (MPa)	3,0	3,0	3,2	2,2
	En pourcentage (%)	5	7	8	11

Il est rapporté par Nathan et al. [69], que de petites additions d'argiles au BAP (moins de 1% en masse de ciment) ont apporté des améliorations substantielles sur la stabilité. Il a également été montré que les argiles améliorent la cohésion des matériaux injectés à base de ciment à très faibles doses.

1.6.9. Travaux Algériens sur le sable calcaire de concassage

Dans le cadre de la valorisation du SC Algérien, plusieurs travaux ont été achevés jusqu'ici. En ce qui suit, on va citer quelques résultats obtenus par les chercheurs Algériens dans ce contexte.

Une autre étude, réalisée par Benachour et al. (2008) [21], s'est intéressée par le sable calcaire algérien contenant des proportions de fines élevées, atteindre 45% de la masse de sable. A cet effet, des mortiers ont été formulés en ajoutant des fines calcaires par substitution au sable, avec une ouvrabilité constante. Les propriétés microstructurales, mécaniques et de durabilité ont été étudiées simultanément en utilisant des techniques expérimentales variées. L'absence de constituants argileux potentiellement nocifs a été vérifiée par l'analyse XRD, tandis que la diminution du module de finesse du mélange sec (sable + fines) est prouvée comme étant conforme aux normes autorisées jusqu'à 35% des fines. La Figure 1.9 représente l'évolution du besoin en eau en terme du rapport habituel E/C et du rapport réel $E/(C+0,25F)$ en raison de l'activité calcaire (selon la norme française XP P18- 305). Elle est montrée qu'il y a une diminution de la demande d'eau jusqu'à 15% de fines, puis la demande d'eau augmente pour des teneurs en fines plus élevées. C'est la conséquence de deux effets opposés. De part, l'eau est adsorbée à la surface des particules de fines. Comme la surface spécifique des fines est plus élevée que celle du sable, la demande d'eau augmente du fait du phénomène d'adsorption. D'autre part, les particules fines remplissent les vides de sorte que l'eau a moins d'espace poreux disponible. Dans l'ensemble, moins d'eau libre est présente alors que la quantité d'eau adsorbée augmente. La porosité suit une évolution similaire au besoin en eau. La densité atteint un maximum situé entre 0 et 25% de fines, de sorte que l'effet de remplissage habituel est mis en évidence et perd moins de 10% de la valeur de référence (0% de fines) à 45% de fines.

Quant à eux, le module de Young et la perméabilité intrinsèque suivent symétriquement l'évolution du besoin en eau, c'est-à-dire de la porosité. En effet, la rigidité du mortier est directement entraînée par sa porosité : lorsque la porosité augmente, le module de Young diminue, c'est-à-dire que le mortier devient plus souple. L'augmentation de la porosité fournit également plus de place pour que le gaz passe à travers le mortier, ce qui induit une augmentation correspondante de sa perméabilité. De manière plus intéressante, la perméabilité intrinsèque reste

inférieure ou équivalente à celle sans fines, pour des quantités de fines allant jusqu'à 35%. La performance mécanique (compression et flexion) est améliorée par addition de fines, ou reste équivalente à la valeur de référence. Des résistances optimales en compression et en flexion sont obtenues entre 0 et 25% de pourcentage de masse de fines. Ceci est interprété comme étant dû à l'effet de remplissage de vide et au renforcement de la pâte de ciment (et / ou à la consolidation de la colle de ciment / agrégat de sable) permise par la présence de fines. A la lumière de cette étude, on conclut que les proportions de fines calcaires de 0 à 100 μm de masse de sable allant jusqu'à 35%, soit 105% de masse de ciment, n'affectent pas particulièrement les performances mécaniques, le retrait et la perméabilité : c'est économiquement important, en particulier en Algérie [21].

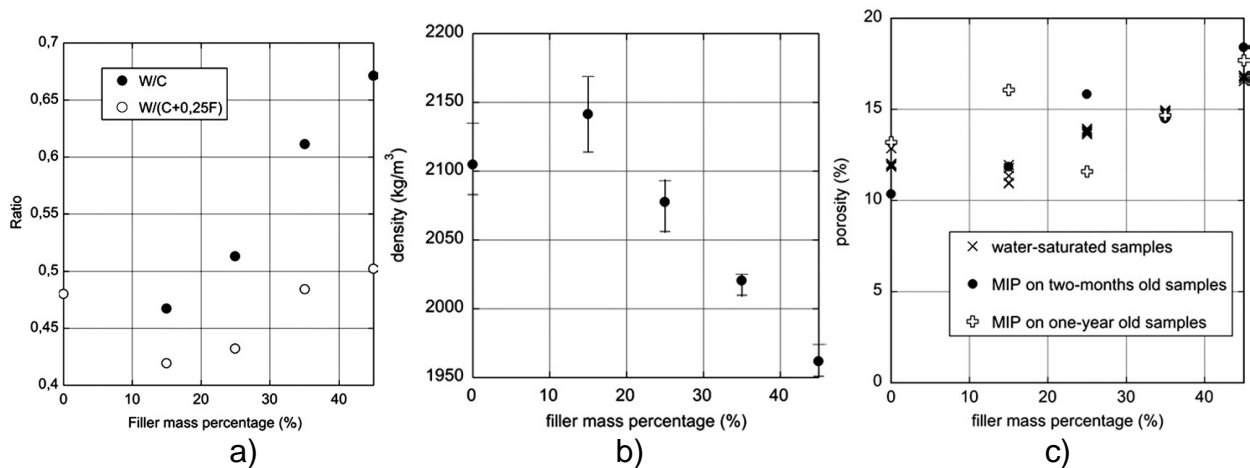


Figure 1.9 : Evolution : a) des rapports E/C et E/C_{eq} b) de la densité c) de la porosité, en fonction de la teneur en fines dans le sable [21].

Autre étude, a été réalisée par Menadi et al. [23] en 2009, examinant l'influence des fines calcaires de concassage sur les performances du béton (Figure 1.10). Quatre types différents de ciment ont été utilisés tout en maintenant un rapport E/C constant.

Sur la base des résultats de cette étude expérimentale, les conclusions suivantes ont été tirées :

- L'incorporation de 15% des fines calcaires dans le béton a entraîné une réduction de la résistance à la compression à 90 jours, à l'exception A15. Ainsi, il a provoqué une augmentation de la pénétration de chlorure et de la perméabilité aux gaz, tout en réduisant la perméabilité à l'eau.

- La résistance à la pénétration des ions chlorure et à la perméabilité aux gaz a diminué pour tous les mélanges de béton avec l'inclusion des fines calcaires à 15% de masse de sable. A cet effet, la teneur en fines calcaires dans le sable devrait être limitée pour les structures exposées au milieu marin.

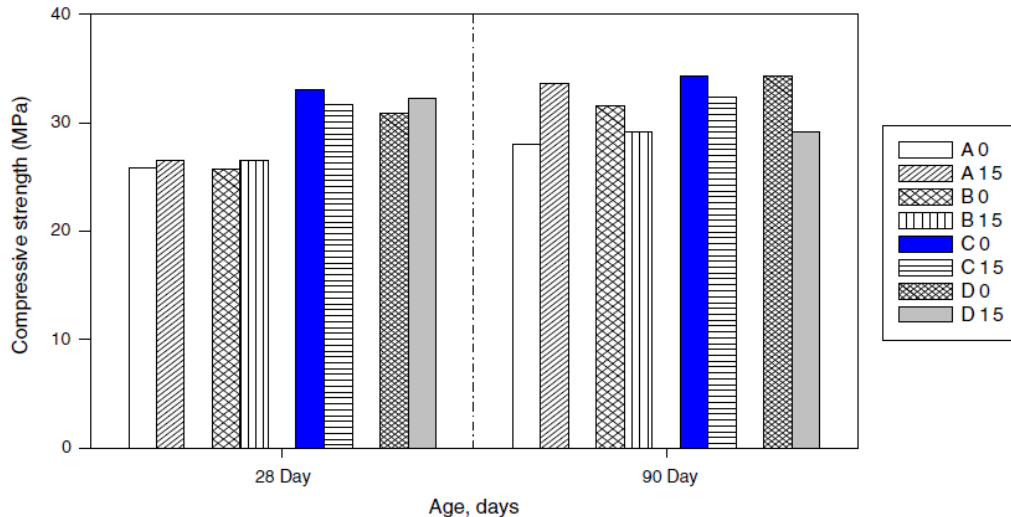


Figure 1.10 : Effet des fines calcaires sur la résistance à la compression de divers mélanges de béton [23].

Pour évaluer l'effet de différents types de sable sur les propriétés du BAP, une approche statistique a été proposée par Bouziani en 2013 [27]. En effet, une méthode de modélisation du mélange a été utilisée pour mettre en évidence les effets du sable de rivière (RS), du sable concassé (CS) et du sable de dune (DS) dans les systèmes binaires et ternaires, sur la fluidité, la capacité de remplissage, la ségrégation et la résistance mécanique des BAP. Les réponses des modèles statistiques dérivés sont l'affaissement, le temps V-funnel, le L-box, la stabilité et la résistance à la compression à 2, 7 et 28 jours. Les modèles mathématiques dérivés permettent d'illustrer la variation des différentes réponses à partir des courbes dans un contour ternaire par rapport aux proportions de RS, CS et DS. Cela offre la souplesse nécessaire pour optimiser les mélanges RS, CS et DS conviennent à des recommandations particulières. Les résultats ainsi obtenus, ont indiqué que les exigences de fluidité sont satisfaites si les proportions de CS dans les systèmes binaires avec RS ou ternaires sont inférieures à 60%. De plus, il a été montré que la capacité de remplissage peut être satisfaite en utilisant une proportion de CS supérieure à 30% dans le système binaire RS-CS et supérieure à 65% dans le système binaire CS-DS. D'autre part, des proportions supérieures à

50% de CS dans le système binaire RS-CS sont recommandées pour respecter les limites de stabilité. Les résultats ont indiqué également que la résistance à la compression à 2, 7 et 28 jours augmente avec l'augmentation de la proportion de CS dans les systèmes binaires et ternaires. L'augmentation de la résistance à la compression peut être attribuée au haut contenu des fines de concassage et à la forme angulaire des grains CS qui peuvent améliorer la compacité du sable [27].

Des essais, ont été réalisés en 2013 par Bedrina et al. [28], examinant l'effet de substitution du sable siliceux alluvionnaire (0%, 50% et 100%) au sable calcaire de concassage, sur la durabilité des mortiers exposés à différents milieux chimiques. Les résultats montrent que la présence du SC a un effet positif sur la durabilité. En plus, l'effet néfaste de HCl sur la durabilité a été considérablement réduit avec l'introduction du sable concassé. Cependant, cette substitution induit une amélioration de la résistance mécanique et à l'attaque par l'acide, ainsi une réduction : de perméabilité, de pertes de masse et de phénomène d'ascension capillaire [28]. Dans le même contexte et à travers une autre étude réalisée par en 2012 Benabed et al. [26], il a été démontré que l'utilisation d'un SC riche en fines calcaires peut être une source alternative fructueuse des ajouts minéraux. Les résultats expérimentaux indiquent que les propriétés rhéologiques et la résistance s'améliorent avec des mélanges binaires de SCs et de sables fluviaux mais diminuent avec des mélanges binaires de SC et dunaire, en particulier pour une teneur en sable dunaire plus élevée. Ainsi, le SC calcaires avec 10 à 15% de fines peut être utilisé avec succès dans la production du BAP avec de bonnes performances rhéologiques et mécaniques [26].

Ainsi en 2014, Benabed et al. [30], ont étudié les propriétés rhéologiques et mécaniques des mortiers autoplaçant. Des mélanges de mortier ont été préparés avec du sable concassé (CS), remplacé par du sable de dune (DS) à des pourcentages différents étalant de 0 à 100%. Cependant, lors d'un remplacement de DS avec des grands pourcentages ($\geq 75\%$), les mélanges deviennent plus fermes avec un écoulement plus lent et la viscosité du mélange augment (Figure 1.11). Ainsi, le comportement visqueux des mortiers dominant pour des vitesses de rotation faibles, tandis qu'à des vitesses plus élevées, le comportement fluide devient dominant. Cependant, la résistance à la compression et à la flexion a été affectée légèrement par une augmentation du remplacement de DS [30].

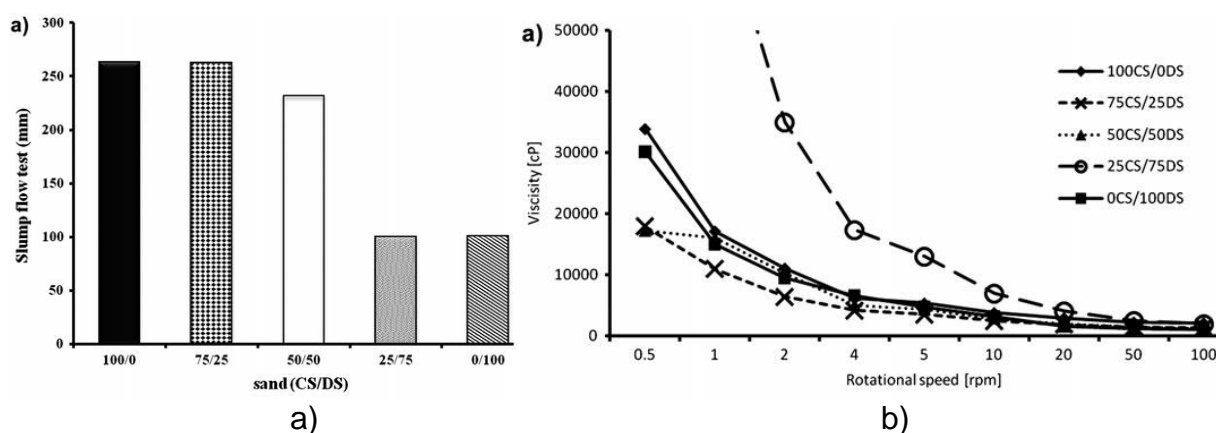


Figure 1.11 : Effet de la teneur en DS sur a) le mini-slump et b) les mesures de la viscosité, des mortiers à base de sable binaire (CS / DS) [30].

Plus récemment, les mêmes auteurs ont entrepris une étude expérimentale, en 2016 [34], pour déterminer l'effet de la teneur en fines calcaires de concassage sur les propriétés fraîches et durcies des mortiers de réparation autoplaçant (MRAP). Les mélanges MRAP ont été préparés en utilisant du sable concassé partiellement substitué par ces fines à des pourcentages variables allant jusqu'à 30%. Les résultats ont indiqué que les fines calcaires en tant que substituant du sable améliorent significativement les propriétés fraîches et durcies des MRAP avec une teneur optimale entre 10 et 15%. A cet effet, l'utilisation de ces fines dans le MRAP offrirait des avantages techniques, économiques et environnementaux [34].

1.7. Effet des fines calcaires de concassage sur les matériaux cimentaires

Par contrecoup à la pénurie de pétrole de 1974, le congrès des Etats-Unis a adopté une loi imposant aux producteurs de ciment de réduire leur consommation d'énergie. La crise énergétique a stimulé un intérêt mondial pour l'ajout de fillers au ciment portland comme moyen d'économiser de l'énergie. Dans ce contexte, le calcaire a suscité un intérêt accru à cause de sa disponibilité dans toutes les usines de ciment, donc il n'a pas de coût de transport supplémentaire associé à son utilisation possible en tant que fillers dans le ciment. La question de savoir si ces additions devraient être permises, a fait l'objet de plusieurs débats et de recherches.

Généralement, l'effet des fillers sur les propriétés du béton et du mortier, à l'état frais et durci, dépend de plusieurs facteurs, entre autres, la finesse, la granulométrie et la forme et la texture des particules [70]. Mais la relation entre les fillers et la rhéologie du béton, en particulier, est très compliquée. Elle dépend

aussi de l'agglomération, de la nature hydrophobe ou hydrophile et de la compatibilité des additions minérales avec un adjuvant donné, ainsi de leur affinité. Cao et al. [71] ont constaté que le seuil de cisaillement croît de manière significative en raison de l'agglomération, car les charges forment un réseau et nécessitent des forces plus importantes pour les casser ou les aligner. Cependant, Wang et al. [72] ont constaté que le stéarate de sodium modifie les caractéristiques de surface du carbonate de calcium, en le transformant d'hydrophile en hydrophobe. De plus, l'effet simultané des tensioactifs hydrophobes et hydrophiles augmente la mobilité en réduisant la viscosité de la pâte de ciment et l'effet lubrifiant des films hydrophobes [73]. Ainsi, il est rapporté dans la référence [74] que la plus grande affinité des cendres volantes pour les mélanges traditionnels observés sur les isothermes d'adsorption s'est traduite par un meilleur comportement rhéologique dans ces pâtes que dans le matériau de ciment calcaire.

Plusieurs travaux de recherche se sont intéressés par l'influence des fines calcaires dans le béton hydraulique et bitumineux. Leur présence dans le béton s'est exprimée de deux manières : soit par leur substitution avec le ciment ou bien se traduit par leur teneur dans les granulats concassés, notamment le sable. En fait, l'objectif tracé initialement de juste permettre l'utilisation de ces fines dans le béton a été dépassé largement en cherchant la teneur optimale, voire la teneur maximale, des fines dans le ciment ainsi que dans les sables concassés pour produire des bétons avec des performances admissibles. Ce dernier, représente un intérêt écologique et économique.

1.7.1. Effet des fines calcaires sur l'ouvrabilité

Il est rapporté par Nehdi [68] que, Brookbanks a observé une légère réduction du temps de prise pour une augmentation du taux d'addition de calcaire. Pour les matériaux utilisés, une réduction marginale a été observée à des remplacements plus élevés que 5%. Les fillers calcaires réduisaient considérablement la demande en eau et semblaient avoir aucun effet sur le pourcentage d'air occlus. A l'inverse, Ghezal a observé que les BAP contenant du ciment portland ordinaire, la fumée de silice et des fines calcaires présentaient des pertes rapides et sévères de slump. Bien que ces mélanges aient initialement requis un petit dosage de superplastifiant et ont donné d'excellentes propriétés rhéologiques par rapport ceux de contrôle, ils ont été rejetés car ils ne pouvaient

pas maintenir adéquatement l'ouvrabilité dans le temps. A cet effet, Nehdi [68] a signalé qu'il a été affirmé par certains chercheurs que les fillers calcaires aident à la production de béton fluide, alors que des résultats contradictoires soutiennent que les fillers calcaires ont causé des pertes importantes et bouleversantes de l'ouvrabilité du béton frais. Par conséquent, la sélection d'un type de fillers dans une suspension cimentaire n'est pas un problème banal. En fait, cette sélection ne peut pas être prédite à partir des caractéristiques physiques ou chimiques des fillers, mais devrait être expérimentale.

Dans le but de produire un béton à faible impact environnemental, une étude a été réalisée par Soualhi et al. [75], porte sur les propriétés rhéologiques des mélanges de béton incorporant divers types d'additions minérale en remplacement partiel de ciment (359 m²/kg). Les auteurs ont observé que l'augmentation du taux de substitution des fines calcaires (436 m²/kg) conduit à une augmentation de la viscosité plastique du béton. Inversement, selon Benaïcha et al. [76] la substitution du ciment (475 m²/kg) par les fines calcaires (555 m²/kg) a un effet favorable sur la fluidité du coulis, en diminuant son temps d'écoulement et sa viscosité. Ainsi, ils ont observé que le dosage de saturation des fines calcaires est d'environ 30%. Après cette dose, le temps d'écoulement a légèrement changé (environ 2 s). Cependant, le profil de la capacité de remplissage reste le même quelle que soit la teneur en fines.

1.7.2. Effet de la morphologie des fines

Il est usuellement reporté que : si le volume de la concentration des solides est tenu constant, l'incorporation des additions minérales améliore les performances du béton mais réduit la maniabilité. Etant donné que l'incorporation des particules fines conduit à une augmentation de la demande en eau à cause de la croissance de la surface spécifique du mélange. Cette idée est appuyée sur les résultats qui montrent que l'ajout des fines de fumée de silice augmente la demande en eau pour atteindre une ouvrabilité spécifique. Cependant, dans certains cas, il est reporté dans la littérature que l'utilisation des fines peut réduire la demande en eau [77]. En toute évidence, la forme sphérique minimise le rapport : surface/volume de la particule. Autrement dit, sur l'ensemble des formes en 3D, les fillers sphériques (comme les cendres volantes, Figure 1.12.a) donnent une surface spécifique minimale pour un volume donné par rapport aux fillers de

forme irrégulière (comme les fillers calcaires, Figure 1.12.b) : ce qui entraîne des exigences de fluidité moins sévères.

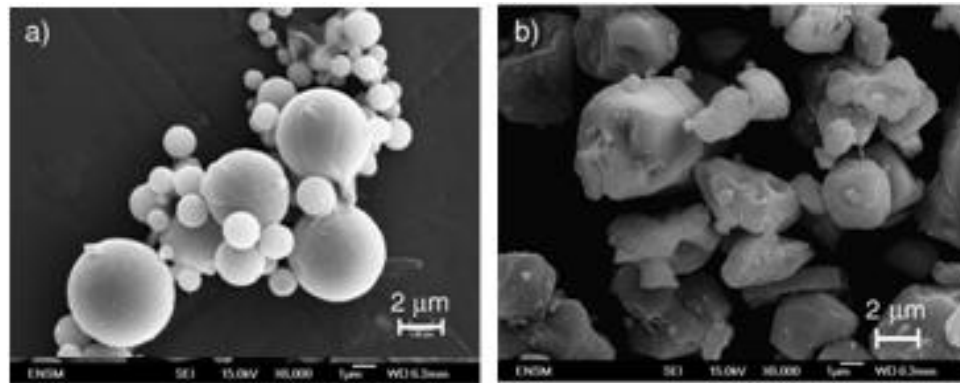


Figure 1.12 : Micrographies obtenues au MEB de particules de a) cendres volantes et b) fines calcaires [78].

Il est rapporté par [77] qu'une compacité plus élevée a été obtenue avec des particules sphériques en comparaison avec des particules concassées dans un état humide. Ce qui conduit à une rétention d'eau plus faible dans le cas des particules sphériques, et par conséquent, une demande d'eau pour une maniabilité donnée plus faible. Il a été rapporté aussi que, à une taille optimale des particules, la compacité et la fluidité sont maximales. Alors, il y a une forte dépendance entre la fluidité et la forme des particules.

1.7.3. Effet de la finesse et de la surface spécifique des fines

Il est rapporté par Westerholm et al. [20], que des quantités modérées de fines ont généralement un effet positif sur les propriétés du béton, c'est-à-dire la cohérence et l'ouvrabilité. Ainsi, des quantités croissantes de fines augmentent la quantité requise d'eau pour mouiller les surfaces des particules de manière adéquate et pour maintenir une ouvrabilité spécifiée. Selon les résultats obtenus par Nehdi [56], pour une teneur des fines inférieure à 10%, l'accroissement de la surface spécifique affecte la contrainte seuil, mais améliore la viscosité plastique (Figure 1.13).

Une étude a été réalisée par Esping [79] sur l'utilisation des fillers calcaires avec différentes surfaces spécifiques et leur effet sur les propriétés à l'état frais et durci de béton autoplaçant. La surface spécifique a été déterminée par la méthode BET simplifiée à l'aide de la vapeur d'eau.

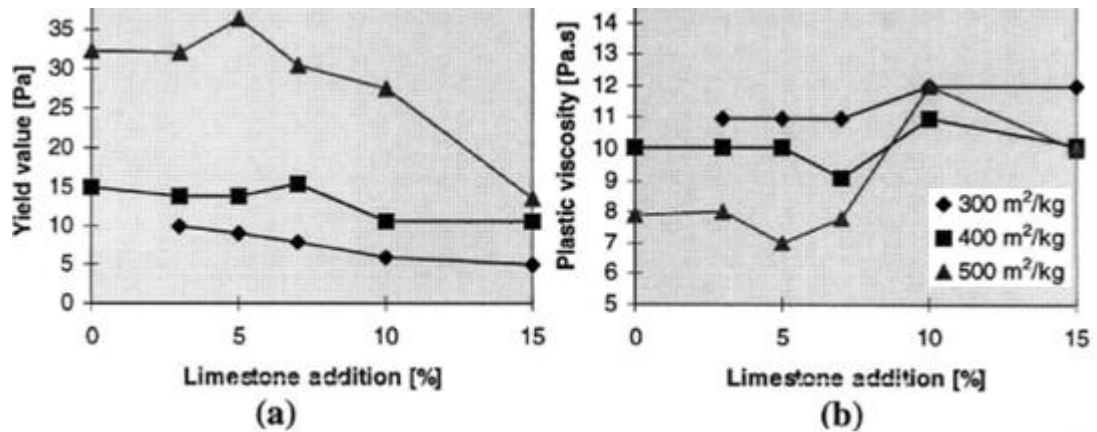


Figure 1.13 : Evolution des propriétés rhéologiques en fonction de la surface spécifique et de teneur en fines [56].

Il a été constaté que la mesure de la surface BET (H₂O) peut être utilisée pour évaluer les besoins en eau pour une ouvrabilité constante, où une augmentation de la surface BET (H₂O) de 1000 m²/kg correspond à une augmentation d'environ 0,8% en rapport E/C. Ainsi, qu'une augmentation de la surface spécifique des fillers calcaires de 2000 à 6000 m²/kg, conduit à un doublement du seuil de cisaillement et une augmentation de la viscosité plastique approximativement de 35 Pa.s à 50 Pa.s (Figure 1.14). Les résultats ont montré aussi que les fillers à grande surface se traduiront par une augmentation de retrait autogène, une diminution de l'évaporation, une faible tendance à la fissuration et une résistance à la compression plus grande [79].

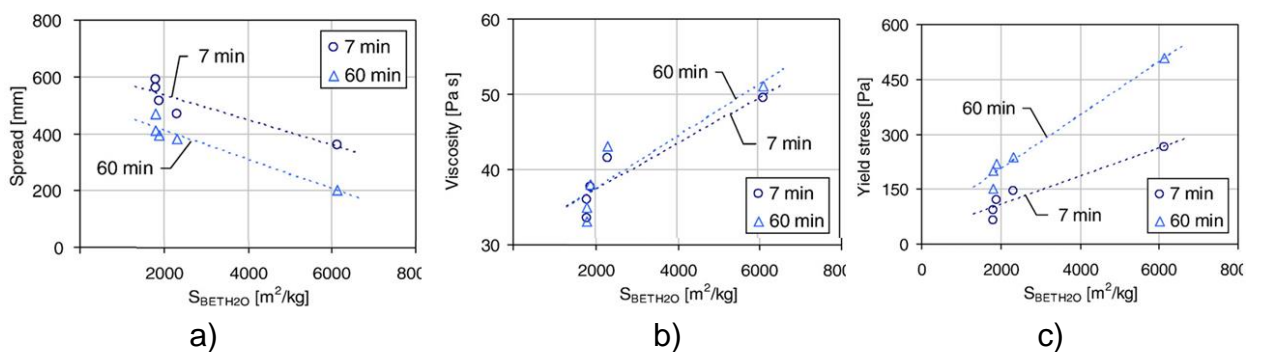


Figure 1.14: Evolution de a) l'étalement b) la viscosité et c) le seuil de cisaillement en fonction de la surface spécifique BET (H₂O) [79].

Selon Petit et Wirquin [80], la finesse des fillers est un facteur influençant la rhéologie des matériaux à base de ciment. Il a cité que le remplacement partiel en volume de ciment par des fillers calcaires de 500 à 1000 m² / kg de surface spécifique conduit à une amélioration de la fluidité et une réduction du seuil de

cisaillement. Ainsi, une addition excessive des fillers peut augmenter considérablement la demande en eau en raison de l'augmentation de la surface spécifique, ce qui donne un matériau plus ferme. Par ailleurs, Collins et Sanjayan [81] ont signalé que dans le béton contenant du laitier alcalin-activé comme liant, l'ouvrabilité est améliorée en remplaçant une partie du liant avec des fillers ultra-fines dont 90% en masse des particules sont inférieures à 13,7 μ m.

1.7.4. Effet de la teneur en MgO sur la viscosité des suspensions du calcaire

Il a été rapporté dans [68], que les fillers calcaires complètent le manque en particules fines de la granulométrie du ciment, ce qui peut améliorer à la fois la fluidité et la stabilité du béton frais. Ils remplissent également le vide intergranulaire ce qui réduit l'espace disponible pour l'eau et par conséquent la demande en eau. Dans les mélanges des bétons classiques, de légères réductions du temps de prise ont été souvent rapportés lors de fillers calcaires ont été utilisés, sans effets significatifs sur la maniabilité. Cependant, comme l'utilisation du béton à haute performance est en croissance, les fillers calcaires sont ajoutés dans les mélanges superplastifiés à faible rapport E/C. De plus en plus des fillers ont une quantité plus grande des fines sont spécifiées, car elles augmentent la densité d'empilement du système particulaire. Par conséquent, les pertes rapides de maniabilité ont été rapportées. Pourtant, cela ne semble pas se produire avec tous les fillers calcaires. A cet effet, des recherches ont été faites pour étudier cette question par Nehdi [68]. Divers fillers calcaires sont broyés à des tailles de particules submicroniques en présence du superplastifiant polyacrylate. Il a été démontré que l'efficacité du dispersant dépend de la teneur en oxyde de magnésium (MgO) dans les fillers (Figure 1.15). Ceci suggère que, lorsqu'un dispersant de type polyacrylate est utilisé dans un mélange à base de ciment, l'adjonction des fillers calcaires avec une teneur élevée en MgO va probablement inhiber les effets bénéfiques du superplastifiant et provoquer de fortes augmentations de viscosité. Par conséquent, il est recommandé que l'analyse de l'oxyde des fillers calcaires être inclus dans les publications qui traitent de l'effet de ces derniers sur les propriétés rhéologiques du béton [68].

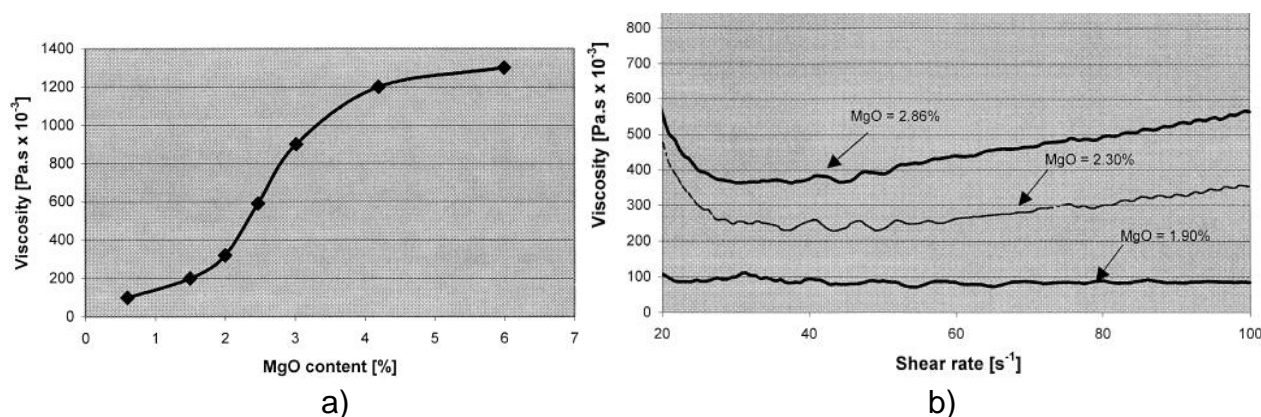


Figure 1.15 : Effet de la teneur en MgO sur la viscosité des suspensions du carbonate de calcium : a) avec 2% de Sp, taux de cisaillement=100 s⁻¹, $\Phi_{\text{moy}}=0,75$ μm , et b) avec Sp=0,7% et $\Phi_{\text{moy}}=3\mu\text{m}$ [68].

1.7.5. Effet des fines calcaires sur les propriétés rhéologiques sous pression

Petit et Wirquin [80] ont observé une augmentation exponentielle du seuil de cisaillement avec une pression croissante sur les mélanges réalisés avec divers contenus des fillers calcaires (Figure 1.16.a). Ils ont observé aussi que l'augmentation de la substitution du ciment dans le mortier par des fillers calcaires de 24% à 55% provoque une demande plus importante d'adjuvant haut réducteur d'eau de 0,51% à 1,97% pour une ouvrabilité constante (slump égal à 45cm), mais une réduction du seuil de cisaillement de 11,6 Pa à 4,5 Pa, a été également constatée. Ainsi, la composition du mortier, avec un rapport fillers calcaires/ciment (FC/C) vaut 24%, montre une valeur de seuil de cisaillement 150% plus grande que celle obtenue avec la composition de FC/C=55% indépendamment de la pression. Ainsi, le débit d'écoulement est diminué avec l'augmentation de la teneur en fillers. Par contre, une diminution exponentielle de la viscosité plastique a été observée avec une pression croissante, indépendamment de la teneur en fillers (Figure 1.16.b). Par conséquent, en augmentant le taux de cisaillement au niveau de la buse du cône de Marsh (sous pression croissante), les phases se séparent et une couche d'eau peut apparaître entre le mortier et la surface intérieure des parois lisses de la buse, ce qui facilite l'écoulement. Il a été rapporté que, si le matériau de la surface de la paroi ne peut pas disperser en particules, une couche va être formée qui agit comme un lubrifiant, facilitant ainsi le glissement. Ce glissement est plus prononcé que la concentration des solides augmente. Ces observations, faites au bas des essais rhéométriques, peuvent expliquer le fait que la diminution de la viscosité plastique avec la pression est plus importante

pour les mortiers à base de teneur plus élevée de fillers calcaires (FC/C = 55%) que sur des mélanges contenant 24% à 30% [80].

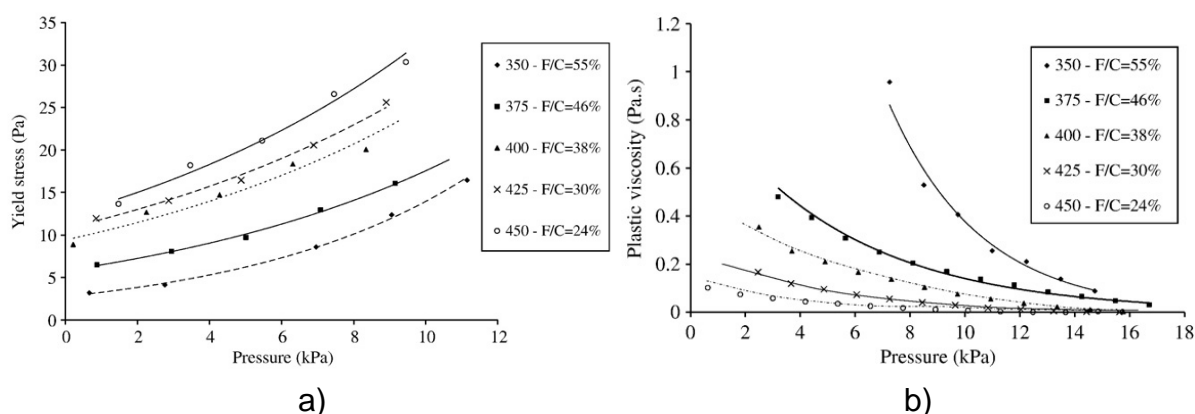


Figure 1.16 : Effet de la teneur en fines calcaires sur les variations a) du seuil de cisaillement et b) de la viscosité plastique sous pression [80].

Des autres travaux, réalisés par Svermova et al. [82], se sont intéressés par les paramètres du coulis de ciment et fines calcaires (99% CaCO₃ et 0,2% MgO) affectant le comportement rhéologique et la résistance à la compression. Dans cette étude, les auteurs ont adopté un modèle expérimental factoriel pour évaluer les effets combinés des facteurs suivants : rapport eau / liant (E/L), dose en superplastifiant (SP), dose en agent de viscosité (VA), et la proportion fines calcaires en remplacement du ciment (LSP). Pour un rapport E/L et dosages en SP et VA donnés, le mini-slump et le ressuage induit ont augmenté lorsque la proportion de LSP augmente, tandis que le seuil de cisaillement, la viscosité plastique et la résistance à la compression ont diminué. Le remplacement du ciment LSP a eu un effet plus important sur la résistance à la compression que le changement de rapport E/L.

1.7.6. Etude de l'effet de la teneur en fines de concassage dans le sable

Westerholm et al. [20], ont étudié l'effet de la teneur en fines calcaires de concassage sur les propriétés rhéologiques des mortiers. Sur la Figure 1.17.a), on peut voir que la contrainte seuil d'écoulement des mortiers commence à augmenter linéairement à des teneurs en particules fines supérieures à 16%. Par conséquent, au-delà de cette teneur en fines, la demande en eau des mortiers augmente en raison de la variation de la surface totale des agrégats fins. L'effet de la teneur en fines sur la viscosité plastique des mortiers semble être plus compliqué que l'effet sur le seuil de cisaillement. Pour le mortier témoin à base de

sable naturel N1, pratiquement aucun effet n'a pu être observé dans la fourchette étudiée de la teneur en fines (Figure 1.17.b).

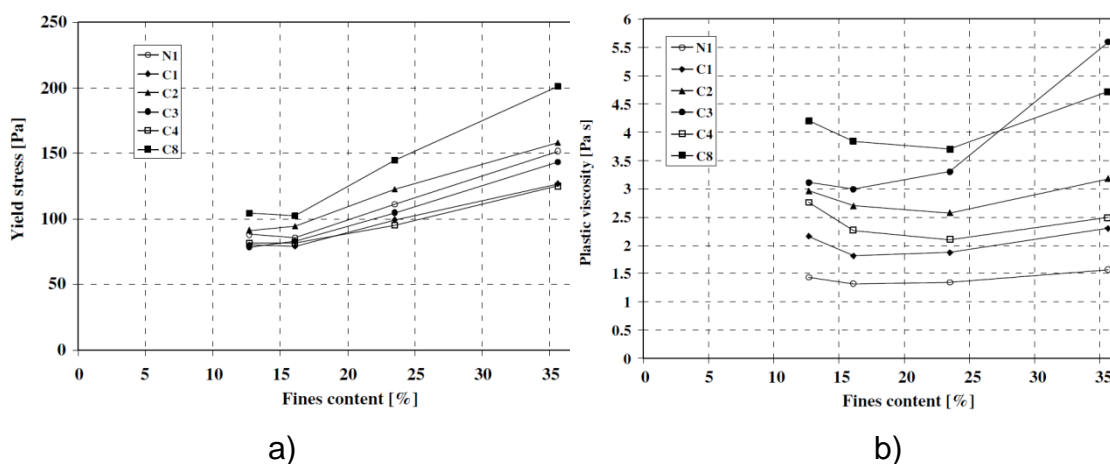


Figure 1.17 : Evolution a) du seuil de cisaillement et b) de la viscosité en fonction de la teneur en fines dans le sable [20].

Pour les mortiers avec des sables concassés, les résultats indiquent que la viscosité plastique passe par un minimum à une certaine teneur en fines. Selon les auteurs de cette étude [20], des effets similaires pour le béton ont été observés par Tattersall et Banfill. Ce minimum dépend, à la fois, de rapport E/C et de rapport agrégat /ciment (A/C). Cela suggère que l'effet trouvé dans les mortiers serait plus prononcé à un rapport A/C plus élevé.

1.7.7. Effet du rapport E/C

Autres recherches ont été réalisées par Yahia et al. [83], afin de comprendre l'effet d'une addition des fines calcaires, de surface spécifique vaut $480 \text{ m}^2/\text{kg}$, dans les mortiers autoplacants superplastifiés avec un rapport E/C variant de 0,35 à 0,45. Les résultats des essais ont montré que l'effet des fillers calcaires est principalement affecté par le rapport E/C et de leur teneur dans le mélange. Pour un rapport E/C donné, l'addition de fillers calcaires dans une certaine plage n'a pas un effet significatif sur la fluidité. Cependant, au-delà d'une dose critique, l'incorporation d'une certaine quantité a entraîné une augmentation substantielle de la viscosité du mortier.

1.7.8. Etude comparative de l'effet de divers fillers

Vikan et Justnes [53] ont étudié le comportement rhéologique de la pâte du ciment en fonction de remplacement du ciment par les fillers calcaires et la fumée de silice (FS). Ils ont trouvé qu'à la fois, la résistance à l'écoulement et la capacité

gélifiante sont diminuées avec l'augmentation du pourcentage de la substitution des fillers calcaires par le ciment inversement qu'avec FS. En revanche, la Figure 1.18 indique que les particules calcaires dispersent les particules de ciment plus efficacement que la FS. Toutefois, il est à signaler que le calcaire a une surface spécifique de $486 \text{ m}^2/\text{kg}$ qui est considérablement petite par rapport à celle de FS qui est de $22000 \text{ m}^2/\text{kg}$. Alors, l'effet de roulement à billes et la compacité de calcaire entre les particules de ciment n'est pas aussi efficace qu'avec les particules FS plus petites et plus sphériques. La capacité de dispersion de calcaire est donc probablement causée par une réactivité plus faible que le ciment et moins formation de gel que FS. De même, la Figure 1.18 illustre que le calcaire ne contribue pas à la formation du gel. Les graphes illustrent que la résistance à l'écoulement du gel est presque indépendante de calcaires remplacés jusqu'à 8% de volume, ensuite elle diminue. Il est intéressant de noter que la résistance du gel a la tendance à augmenter jusqu'à 9.5% de remplacement de calcaire, après 114 minutes de l'addition d'eau [53].

En revanche, Nehdi et al. [70], ont trouvé qu'en présence de superplastifiant, la substitution du ciment par des particules ultrafines améliorent les propriétés rhéologiques et permettent de fabriquer un béton à haute performance pourrait être mis en place plus aisément. Dans cette étude, des fillers calcaires ($\text{BET}=10000 \text{ m}^2/\text{kg}$) et de FS ($17500 \text{ m}^2/\text{kg}$) ont été utilisés (Figure 1.19).

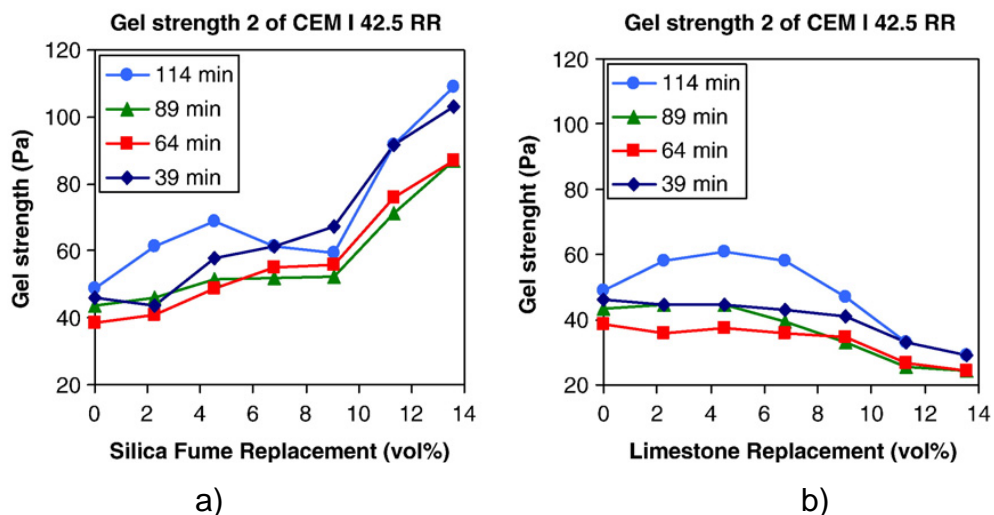


Figure 1. 18 : Comparaison entre la résistance du gel après 10 min de repos (à faible oscillation) en fonction du volume de a) FS non densifiée et b) calcaire au fil du temps avec 0,79% de plastifiant sec ajouté en masse de la poudre [53].

Il a été suggéré que ce n'est pas seulement la grande surface spécifique influençant la demande en superplastifiant car les particules ultrafines peuvent avoir une forte affinité pour l'adsorption des molécules de superplastifiant par les multicouches. Ainsi, les ultrafines ne semblent pas réduire d'une manière significative la perte d'affaissement. Par conséquent, il est possible d'élaborer des compositions à trois liants mélangés comprenant des fillers différents pour obtenir de meilleures caractéristiques rhéologiques.

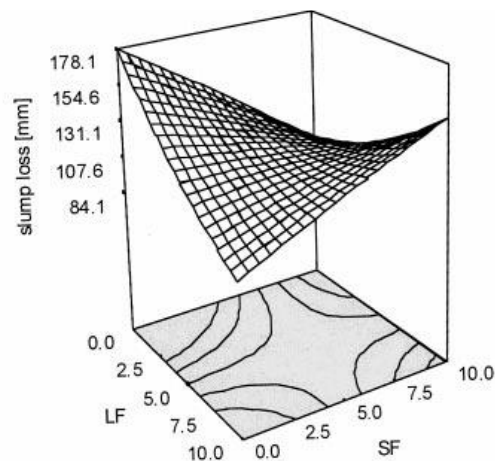


Figure 1.19 : Modélisation statistique de diverses réponses rhéologiques pour les ciments ternaires OPC-LF-SF : fillers calcaires (LF) et fumée de silice (SF) [70].

Ailleurs à Singapour, une étude a été faite par Ho [84], consiste à établir une comparaison entre l'addition des fines calcaires ($5946 \text{ cm}^2/\text{cm}^3$) et les fines de granit concassé ($6743 \text{ cm}^2/\text{cm}^3$) dans le ciment ($8364 \text{ cm}^2/\text{cm}^3$) sur le béton. Comparativement à l'utilisation des fines calcaires, les études sur pâtes et bétons ont confirmé que l'incorporation de fines de granit nécessitait une dose plus élevée en superplastifiant (Figure 1.20) pour avoir des propriétés rhéologiques similaires.

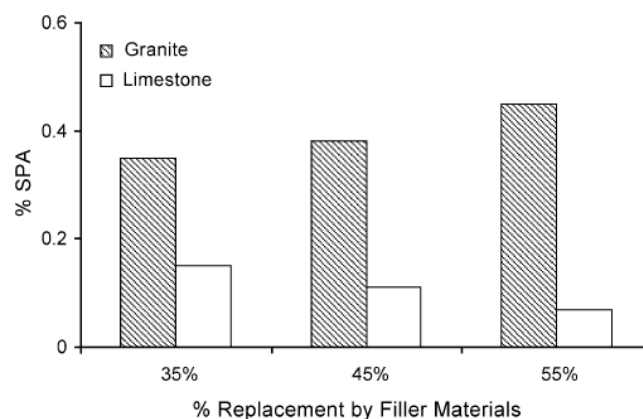


Figure 1.20 : Dosages requis en superplastifiant (SPA) à différentes teneur en fines pour une contrainte seuil de 20 Pa [84].

Cependant, Xiong et Jihong [85] ont étudié l'effet des additions ultrafines (UA) au ciment ($327 \text{ m}^2/\text{kg}$ - $D=14 \text{ }\mu\text{m}$), sur les propriétés rhéologiques de la pâte de ciment. Les UA utilisées dans cette étude sont : le laitier de haut fourneau (BFS) ($846 \text{ m}^2/\text{kg}$), la fumée de silice (SF) ($2030 \text{ m}^2/\text{kg}$ « BET » - $D=0,5 \text{ }\mu\text{m}$), la cendre volante (FA) ($D=2,9 \text{ }\mu\text{m}$), le calcaire (LS) ($763 \text{ m}^2/\text{kg}$ - $D=4,5 \text{ }\mu\text{m}$) et le gypse anhydre (AG) ($2621 \text{ m}^2/\text{kg}$ « BET »). Les résultats montrent que le seuil de cisaillement de la pâte de ciment est généralement diminué avec l'augmentation de la quantité d'UA, mais la viscosité varie considérablement avec les différents types et la quantité d'UA. Le LS, le SF, le FA et le BFS ont diminué la viscosité de la pâte de ciment, tandis que le AG a pu l'augmenter lorsque la quantité d'UA est inférieure ou égale à 15%. La viscosité et le seuil de cisaillement de la pâte de ciment sont diminués avec l'augmentation de la quantité d'UA ajoutée, dans laquelle l'effet du BFS est le plus significatif lorsque la quantité d'UA est supérieure à 15%. La viscosité et le seuil de cisaillement peuvent être diminués par une addition respective de 10% de LS, SF, FA ultra-fine ou d'une addition unique de 35% du laitier ultrafines. L'effet d'action est compris entre : BFS > LS > SF > FA. La viscosité et le seuil de cisaillement de la pâte de ciment peuvent être augmentés significativement par une seule addition de 10% d'AG ultrafine [85].

1.7.9. Effet des fines à l'état durci

Des études ont été réalisées par Achour et al. [5-7], permettant de mieux caractériser les ressources granulaires tunisiennes, en vue de leur utilisation dans la composition des bétons hydrauliques et dans certains mélanges routiers. Les performances à l'état durci des mortiers et bétons sans superplastifiant à base de granulats calcaires concassés de différentes carrières tunisiennes ont été étudiées dans le but d'évaluer la contribution des fillers calcaires à l'adhérence pâte-granat. Toutefois, le taux de fillers élevé dans la plupart des formules conduit à des paramètres d'adhérence variables selon les mélanges. L'hypothèse vraisemblable est que les fillers calcaires associés à la pâte de ciment modifient les propriétés de rigidité de la matrice, de sorte qu'elles se rapprochent de celle du granulat, améliorant ainsi le comportement mécanique de la liaison et, finalement, la résistance prévue du produit [5]. Dans cette étude, la résistance à la compression et à la traction et le module d'élasticité entre un jour et un an sur un vaste ensemble de mortiers et bétons ont été étudiés. A cet effet, un modèle

hyperbolique a été proposé pour prédire la relation entre les résistances à la compression et à la traction [6].

Dans le même contexte, une étude a été réalisée par Joudi-Bahri et al. [9] traitant les effets de la teneur en fines calcaires de concassage dans le SC sur les propriétés des bétons ordinaires sans superplastifiant. Ces bétons ont été réalisés avec deux granulats concassés et un SC de la même carrière de nature calcaire, afin d'éviter tout artefact. Cinq sables à teneur en fines calcaires respectivement égale à 1,8 ; 7,1 ; 12,5 ; 18 et 24% ont été préparés par mélange de sable concassé lavé et ses fines. Les bétons ont été conçus avec le logiciel BetonlabPro2, dont les algorithmes prennent en compte la présence des fines calcaires. Les résultats expérimentaux montrent que les bétons contenant de 100 à 150kg/m³ de fines calcaires présentent souvent des propriétés optimales, avec une ouvrabilité égale. Mais, des quantités plus importantes de fines ne détériorent pas de manière significative les propriétés des bétons, même si leur densité diminue. Ce comportement s'explique non seulement par l'effet liant attribué aux fines calcaires, mais aussi par une amélioration de la liaison pâte-agrégats [9]. Cette étude confirme que les fines calcaires sont bénéfiques aux propriétés du béton frais et durci. Avec la quantité de ciment utilisée, une quantité de fines de 100 à 130 kg/m³ permet d'augmenter la compacité et les performances mécaniques, et de réduire le ressuage sans nuire à l'ouvrabilité ou au retrait. Dans ces proportions, ces fines améliorent le comportement mécanique du béton et rendent la composition plus homogène et améliore la liaison pâte-agrégat. L'effet négatif de l'eau supplémentaire est ainsi compensé. En revanche, des quantités plus élevées atteignant 200 kg/m³ conduisent à une augmentation du rapport E/C et à une baisse de la compacité, mais les propriétés mécaniques ne sont pas affectées. Ces résultats montrent que toutes les catégories normatives de sables (f_3-f_{22}) peuvent être utilisées a priori dans les bétons ordinaires, à condition qu'elles répondent aux exigences des classes d'exposition. Les catégories f_{10} et f_{16} sont les plus intéressantes et permettent d'optimiser les propriétés des bétons (compacité, rapport E/C, résistance à la compression) [9]. En fait, selon les résultats obtenus par Shahul et al. [86], il a été prouvé que l'utilisation des fines de SC est possible même pour la fabrication du béton autoplaçant.

Eren et Marar [87] ont étudié l'effet de la poussière de SC sur les propriétés du béton. Le remplacement de la poussière de concassage réduit le temps VeBe

et la perméabilité à l'eau. Cependant, il semble qu'il n'y ait pas d'effet clair sur la densité humide. La teneur optimale en est de 10% pour la résistance à la compression et la résistance à la rupture. Une autre étude réalisée en Chypre par Çelik et Marar [48], dans le but de connaître le pourcentage optimal de la teneur en fines dans le SC améliorant les performances du béton. Selon cette étude, les SCs produits dans cette région contiennent entre 17 à 25% de fines. Les résultats obtenus ont montré que l'ajout des fines de concassage à la composition du béton a affecté l'ouvrabilité et a diminué l'air occlus. Cependant, une teneur jusqu'à 10% de fines a conduit à une amélioration de la résistance mécanique. Au-delà de cette teneur, ces performances ont été diminuées progressivement. En revanche, une teneur supérieure à 5% de fines a réduit largement la résistance au choc du béton. Une teneur de 15% a donné une absorption minimale.

1.7.10. Utilisation des fillers calcaires dans le ciment

Les mécanismes fondamentaux de l'effet des fillers calcaires sur la rhéologie de la pâte de ciment, du mortier et du béton semblent être contrôlés par la distribution de la taille des particules des fillers. Dans la plupart des études, il a été rapporté que le calcaire est inter-granulaire avec le clinker, ce qui augmente la finesse totale du ciment en raison de la forte finesse du calcaire. Que ce soit l'utilisation de mélange ultrafine calcaire, lorsqu'il est dispersé avec un superplastifiant, peut jouer un rôle différent, semblable à l'effet de remplissage de fumée de silice sur les propriétés rhéologiques de la pâte de ciment et de béton, a été étudiée par Nehdi et al. [56,68,70,88]. Les additions ultrafines calcaires semblaient réduire la dose de superplastifiant et améliorer l'ouvrabilité du béton à haute performance. Plus les fillers calcaires et le taux de remplacement élevé, plus les valeurs de viscosité de la résistance à l'écoulement sont plus faibles [68].

En revanche, selon Baron et Douvre [89], les essais de performance de ciments, mortiers et bétons, contenant jusqu'à 30% de calcaire comme additifs, ont montré que ces ciments composés avaient des propriétés au moins égales, sinon meilleures, que celles des ciments classiques de même classe de résistance, avec en plus un aspect économique indiscutable. Ainsi, l'obtention d'un ciment avec 20% d'addition de calcaire permet une réduction de consommation d'énergie, d'environ 16 à 17%, et d'émissions de CO₂ et de NO₂.

1.7.11. Travaux algériens sur les fines calcaires de concassage

Une étude a été faite en 2008, par Benachour et al. [21], visant l'effet des fines de SC sur les performances du mortier. Tout d'abord, les fines calcaires de SC ont été analysées par DRX. L'analyse confirme qu'il n'y a pas d'autres minéraux que calcite CaCO_3 et des traces de dolomite $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$. Les résultats obtenus montrent l'existence d'une valeur de performance optimale (Figure 1.21). En particulier, pour des teneurs élevées de fines, la porosité diminue. Ceci est confirmé par les examens MEB de la microstructure et par des résultats d'absorption capillaire. En outre, la résistance à la compression et à la flexion reste remarquablement élevée quelle que soit la proportion de fines. Le retrait de séchage et la perte de masse ne sont pas touchés de façon spectaculaire.

D'autres recherches ont été réalisées en Algérie en 2009 par Guemmadi et al. [24], dans le but de déterminer le critère optimal d'utilisation de fines calcaires dans les mélanges cimentaires. Dans la même année, Sadhouari et al. [25] ont trouvé que les bétons formulés avec deux SCs locaux (Kristel et Sidi Ali-Benyoub) occasionnent une augmentation de résistance à la compression de 20% pour un optimum de fines de l'ordre de 15%. L'intérêt majeur de cette étude est la connaissance des effets des fines calcaires de concassage sur les caractéristiques mécaniques des mortiers et bétons. Cependant, la finesse des fines calcaires joue un rôle prédominant dans l'amélioration des performances mécaniques. Les résultats obtenus montrent que la présence de ces dernières en proportion modérée (entre 5 et 15%) dans un sable est une nécessité. Autrement dit, le SC constitue une solution idéale au problème d'approvisionnement à condition qu'il soit corrigé en fines ou combiné avec un sable de mer [25].

En 2010, Ezziane et al. [90] ont quantifié l'effet des fines calcaires ($\text{CaO}=52,6\%$, $\text{MgO}=0,5\%$ et $340 \text{ m}^2/\text{kg}$) sur le début et la fin de prise de ciment ($310 \text{ m}^2/\text{kg}$) par la détermination de leur énergie d'activation. Cette dernière dépend de la qualité du ciment utilisé, le rapport E/C et les additions minérales utilisées. Pour un remplacement jusqu'à 25 % de ciment par les fines calcaires, ils ont constaté une augmentation du temps de début et de fin de prise.

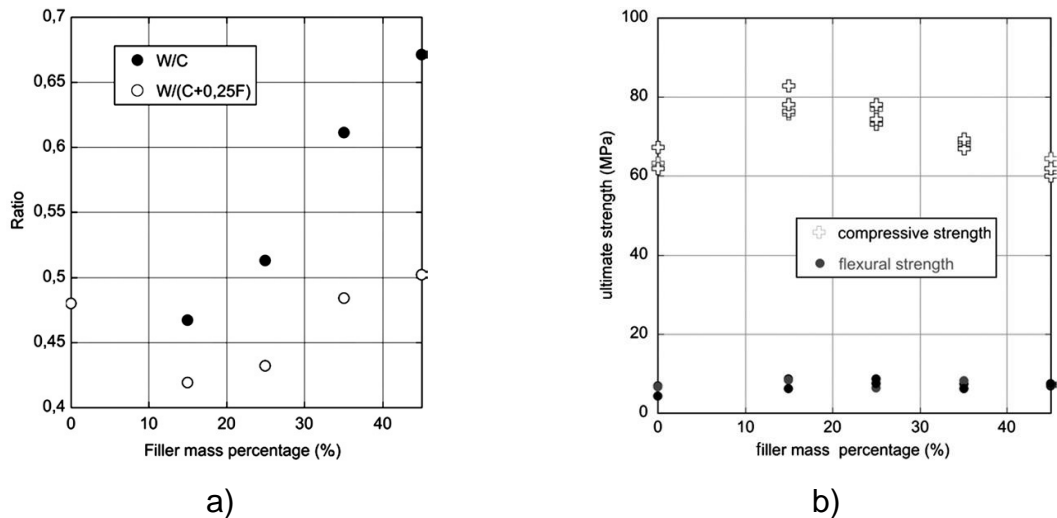


Figure 1.21 : Variation a) du rapport E/C et b) de la résistance à la compression et à la flexion en fonction du taux de filler [21].

1.8. Conclusion

De tout ce qui précède dans ce chapitre, on peut conclure qu'il ne faut jamais porter un jugement sur l'influence des additions minérales sans examen détaillé des paramètres étudiés. Ainsi, on a trouvé des résultats contradictoires sur ce sujet avec non seulement les fines calcaires, mais aussi pour la fumée de silice, les cendres volantes et le laitier. De façon que certains auteurs ont trouvé que ces additions améliorent l'ouvrabilité des suspensions cimentaires. En revanche, autres auteurs ont trouvé que ces additions affectent leurs paramètres rhéologiques. Cette contradiction peut être facilement justifiée en analysant les propriétés physiques des additions, notamment la surface spécifique, et les protocoles expérimentaux.

CHAPITRE 2 :

RHEOLOGIE DES BETONS FRAIS

2.1. Introduction

La mesure des propriétés rhéologiques du béton à l'état frais et leur évolution dans le temps est essentielle pour l'industrie du béton, puisque sa mise en place et ses performances à l'état durci sont fortement influencées par son comportement rhéologique. Néanmoins, une caractérisation adéquate de ces propriétés est nécessaire pour contrôler la qualité du béton frais et assurer la performance des structures en béton.

2.2. Notions de base

2.2.1. Ouvrabilité et méthodes d'essai empiriques

Des termes comme : l'ouvrabilité, la fluidité et la cohésion, sont utilisés parfois de façon interchangeable. Il est clair que la définition est descriptive et qu'aucun accord ne peut être trouvé. Sur le terrain, la situation est souvent pire parce que ces termes sont utilisés différemment par les différentes personnes en fonction des sentiments de la personne et ne sont pas fondés sur le comportement physique du matériel. L'ouvrabilité du béton est définie, selon l'American Concrete Institute [91], comme la facilité de mise en place du béton ou du mortier à un état homogène. Elle est habituellement quantifiée par l'affaissement, appelé aussi slump, qui peut donner une idée sur le seuil de cisaillement du béton, mais certainement pas de sa viscosité [92].

Une discussion intéressante, a été présentée par Tattersall [93], sur la subjectivité du terme ouvrabilité et d'autres termes similaires. Effectivement, on peut conclure qu'il n'y a aucune garantie qu'une telle terminologie signifie la même chose pour différentes personnes impliquées voire on peut avoir un désaccord entre ces personnes au sujet de la signification exacte du terme *ouvrabilité*. A cet effet, tous ces termes devraient être écartés en faveur des paramètres physiquement mesurables comme les propriétés rhéologiques, à savoir la viscosité. En effet, la rhéologie peut fournir des informations précieuses et pratiques sur la façon d'atteindre une optimisation du produit en utilisant les rhéogrammes. Sinon, l'optimisation est largement basée sur l'intuition [94]. Cependant, le développement des méthodes d'essai rhéométrique, qui peuvent être facilement

conduites par quiconque à tout moment et en tout lieu, reste un problème important. Des méthodes d'essai rhéologique du béton frais sont également nécessaires pour uniformiser les normes internationales. En parallèle, la sauvegarde de l'analyse théorique et/ou numérique est efficace pour concevoir des appareils d'essai rhéométrique appropriés [95].

En fait, une classe différente d'appareils d'essai, nommés viscosimètres et rhéomètres, a été développée dans la communauté de technologie du béton. Ces appareils avancés sont conçus dans le but d'être insensibles au mode d'opérateur et pour mesurer les paramètres rhéologiques des matériaux en termes de grandeurs physiques fondamentales, et non pas en fonction des détails de l'appareil [94]. Ainsi, ils présentent généralement des géométries classiques mais de grande taille, par exemple : vane test comme le rhéomètre ICAR (Koeler, 2004 ; Koeler et al., 2005) ; outils tournants comme le Mk two-point test (Domone et al., 1999) ; appareil IBB (Baupré, 1994) ; plan-plan comme le BTRheom (de Larrard et al., 1993 ; de Larrard et al., 1996) ; cylindres coaxiaux comme le viscosimètre BML (Wallewik, 1990 ; Wallewik et Gjorv, 1990) [96].

2.2.2. Terminologie de la rhéologie

Si la définition de la rhéologie est très simple : science de la matière en écoulement, son contenu mérite quelques explications. Interdisciplinaire par essence même, la rhéologie fait appel à la chimie, à la mécanique, aux mathématiques et à la biologie, qui lui fournissent des instruments de base, et se montre utile à chacune de ces disciplines. C'est aux Etats-Unis qu'Eugène Cook Bingham (1878-1945) a proposé en 1929 de créer le mot savant rhéologie. Tandis que, son émergence était liée à l'épanouissement de l'industrie des polymères. En effet, la rhéologie recouvre des activités scientifiques majeures et se trouve associée à des technologies irremplaçables [45]. Malheureusement, elle n'est pas assez enseignée ni prise en compte à ce jour en Algérie, où elle reste encore mystérieuse pour beaucoup, même pour certains scientifiques.

Sans vraiment détailler les définitions, nous présenterons les principales notions de base de la rhéologie. Cependant, nous invitons les lecteurs intéressés à consulter les références suivantes [33,45,97,98].

Tout d'abord, pour définir un liquide, il est utile de faire la distinction entre un solide élastique et un liquide visqueux. Cependant, afin de comprendre la notion d'un mouvement de cisaillement, nous nous référons à un exemple

particulièrement simple d'un fluide visqueux disposé entre deux plans parallèles, l'un mobile et l'autre fixe (Figure 2.1). Dans ces conditions, l'élément de volume a subi une déformation de cisaillement (γ), grandeur sans dimension, définie par l'équation (2.1) :

$$\gamma(x, t) = \frac{d\xi}{dy} = \tan \alpha \quad (2.1)$$

Deux grandeurs vont permettre de caractériser quantitativement le cisaillement :

L'une est la *vitesse de déformation* ($\dot{\gamma}$), encore appelée *vitesse ou taux de cisaillement* ou bien *gradient de vitesse*, est donnée par l'équation (2.2). Ce quotient s'exprime en inverse de seconde [s^{-1}] dans le système international (SI) :

$$\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt} = \frac{d}{dt} \frac{d\xi}{dy} = \frac{d}{dy} \frac{d\xi}{dt} = \frac{du(x,t)}{dy} \quad (2.2)$$

En effet, la vitesse de cisaillement et le gradient de vitesse sont des notions qui coïncident seulement, en toute rigueur, pour des écoulements présentant des symétries particulières comme l'écoulement plan ou l'écoulement à travers un tube cylindrique [45].

L'autre est la *contrainte de cisaillement* (τ), qui s'exprime en [Pa]. Sous l'effet du déplacement relatif des différentes couches, il apparaît des forces de frottement s'exercent tangentiellement à la surface de ces couches. Le rapport de ces forces à l'unité de surface définit ce qu'on appelle la contrainte de cisaillement. Pour certains fluides, le profil de vitesse est linéaire comme il est indiqué sur la Figure 2.1 et la force (F) appliquée à la plaque mobile de section (A) peut être déterminée par l'équation 2.3 :

$$\tau = \frac{F}{A} \sim \frac{\text{Vitesse maximale (U)}}{\text{Epaisseur de la zone cisailée (h)}} = \frac{du}{dy} \quad (2.3)$$

Autrement dit : $\tau \sim \dot{\gamma}$ ou bien : $\tau = (\text{constante}) \cdot \dot{\gamma}$

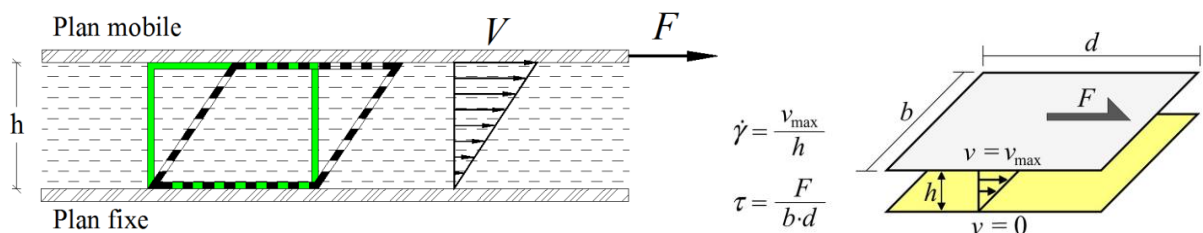


Figure 2.1 : Représentation a) en 2D et b) en 3D [99] de l'écoulement visqueux.

La constante de proportionnalité est le coefficient de viscosité dynamique (μ), a pour unité dans le SI [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$] (s'écrit souvent [Pa.s]), comme il est mentionné dans l'équation 2.4.

$$\tau = \mu \cdot \frac{du}{dy} \quad (2.4)$$

Les fluides obéis à cette relation, s'appellent des fluides newtoniens. Néanmoins, pour les fluides en général, la viscosité apparente n'est pas constante, mais dépend du taux de cisaillement. Dans ce cas, le fluide est désigné comme non-newtonien et la contrainte de cisaillement n'est pas directement proportionnelle aux taux de cisaillement. Dans cette gamme, il existe une classe de matériaux viscoplastiques. De tels matériaux sont caractérisés par une contrainte de cisaillement qui doit être dépassée avant qu'une déformation significative ne se produise. L'un des types les plus simples de matériaux viscoplastiques, qui constitue une classe importante, est le fluide de Bingham [94]. Il est communément admis que le béton et le mortier frais peuvent être considérés comme des fluides de Bingham, avec une bonne précision [94,96,98-101] ou par souci de simplification [102]. Ainsi, la détermination de la contrainte de cisaillement et de la vitesse de cisaillement permet de définir l'équation rhéologique d'état du matériau.

2.2.3. Typologie de l'écoulement

Intuitivement, il est clair que la valeur de la contrainte de cisaillement va en général croître avec la vitesse de cisaillement, mais le rapport entre ces deux grandeurs dépend des propriétés du fluide considéré. L'écoulement des fluides newtoniens est le cas le plus simple que l'on puisse trouver, dans ce cas, la vitesse de cisaillement et la contrainte de cisaillement sont reliées par une loi linéaire, la pente de la droite alors obtenue en traçant le rhéogramme est la viscosité du fluide. En général, les fluides homogènes pour lesquels la dissipation d'énergie est due aux collisions d'espèces moléculaires relativement petites ont un comportement newtonien ou de Bingham (à contrainte seuil : τ_0). Ces comportements se caractérisent par une proportionnalité entre la contrainte et la vitesse de cisaillement. Cependant, la majorité des fluides présentent toutefois des comportements non newtoniens qui font appel à l'utilisation de modèles rhéologiques plus complexes pour décrire leur comportement en écoulement (Figure 2.2).

Le graphe qui représente l'évolution de la contrainte en fonction de la vitesse de cisaillement, appelé rhéogramme, résume l'ensemble des propriétés d'écoulement du fluide considéré [45]. Selon l'allure du rhéogramme, on peut dresser la typologie de différents comportements. En fait, une utilisation systématique et complète du rhéogramme n'a été faite qu'en 1983 par Wallevik, en utilisant le Mk II [94].

La Figure 2.2.a) présente les rhéogrammes de deux grandes familles de comportement rhéologique des fluides. La première famille comprend les corps exclusivement visqueux dont le cas le plus courant est les fluides *newtoniens*. La seconde famille comprend les *corps viscoplastiques*. Pour ces corps, en plus de la viscosité, il faut vaincre une résistance supplémentaire avant que l'écoulement puisse s'amorcer. Il s'agit d'un seuil de plasticité aussi appelé seuil de cisaillement dans le cas des corps de *Bingham* [103].

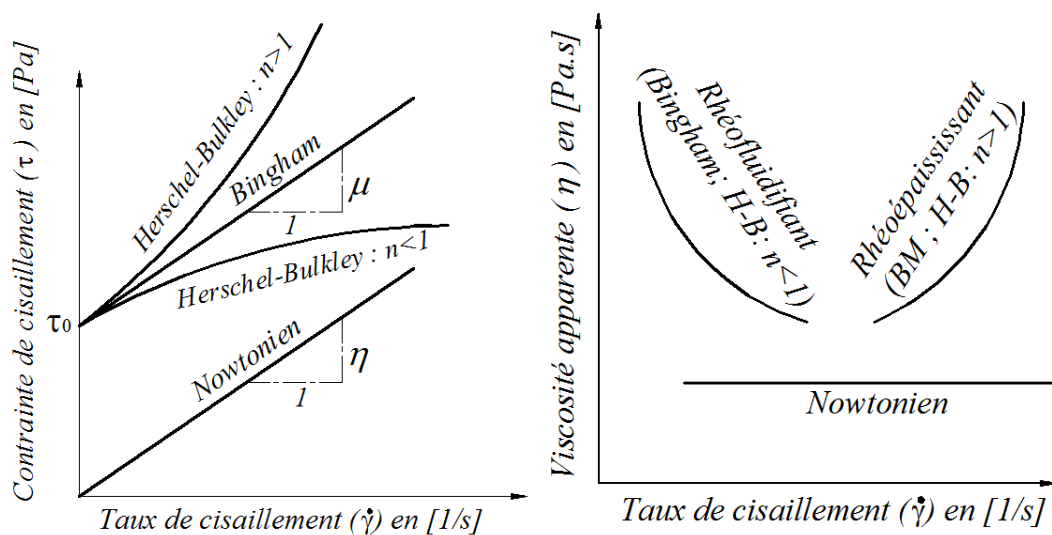


Figure 2.2 : Rhéogrammes a) contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement b) viscosité apparente en fonction du taux de cisaillement, pour différents fluides.

Dans la pratique, le modèle de Bingham [104-107], pour lequel la contrainte est la somme d'un terme productif (τ_0) et d'un terme de type newtonien, a été le plus souvent utilisé dans la littérature dans le but de la modélisation des écoulements du béton. Toutefois, ce modèle manque de sens physique [108] et, contrairement à un modèle de Herschel-Bulkley ou de Bingham modifié [109-114], il est incapable de représenter les données dans une gamme de taux de cisaillement de plusieurs décennies. De plus, ces matériaux sont souvent :

rhéofluidifiant dont la viscosité apparente décroît lorsque le cisaillement augmente, ou rhéoépaississant, encore appelé dilatant, dont la viscosité apparente croît lorsque le cisaillement augmente, [112,115-120] (Figure 2.2.b) ou encore thixotropes (comportement dépendant du temps) [121-124]. Cependant, les théories existantes restent loin d'être en mesure de prédire tous les aspects divers et complexes des propriétés rhéologiques des suspensions concentrées. Le tableau 2.1 illustre quelques exemples des modèles permettant de décrire le comportement rhéologique indépendants du temps, ainsi il donne une signature exhaustive des propriétés d'écoulement des suspensions cimentaires [112,125-127].

Tableau 2.1 : Modélisation mathématique de quelques comportements rhéologiques indépendants du temps.

Modèle	Typologie de l'écoulement	
Loi de puissance ou de Newton généralisée	$\tau = (k \cdot \dot{\gamma}^{n-1}) \cdot \dot{\gamma}$ <p>Avec</p> $\eta = \frac{f(\dot{\gamma})}{\dot{\gamma}} = k \cdot \dot{\gamma}^{n-1}$	<p>$n=1$ Fluide Newtonien (linéaire - visqueux) où k dans ce cas s'appelle viscosité apparente ou viscosité dynamique «η».</p> <p>$n>1$ Fluide rhéoépaississant (pseudoplastique) où k dans ce cas s'appelle viscosité plastique «μ».</p> <p>$n<1$ Fluide rhéofluidifiant (dilatant) «où : $k=\mu$».</p>
Loi de Herschel-Bulkley	$\tau = \tau_0 + k \cdot \dot{\gamma}^n$ <p>Avec</p> $\eta = \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} + k \cdot \dot{\gamma}^{n-1}$	<p>$n=1$ Fluide plastique de Bingham (linéaire à contrainte seuil) où k dans ce cas s'appelle viscosité plastique ou constante visqueuse «μ».</p> <p>$n>1$ Fluide rhéoépaississant (dilatant).</p> <p>$n<1$ Fluide rhéofluidifiant (pseudoplastique).</p>
Loi de Bingham modifié	$\tau = \tau_0 + k \cdot \dot{\gamma} + c \cdot \dot{\gamma}^2$ <p>Avec</p> $\eta = \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} + k + c \cdot \dot{\gamma}$	<p>Fluide rhéoépaississant (dilatant) où k dans ce cas s'appelle viscosité plastique «μ».</p>
<p>Avec : $\tau = f(\dot{\gamma})$: Contrainte de cisaillement (Pa) ; k : Facteur de cohérence (Pa.sⁿ) ; $\dot{\gamma} = \frac{\partial \gamma}{\partial t}$: Taux de cisaillement (1/s) ; n : Indice d'écoulement (-) ; $\eta = \frac{f(\dot{\gamma})}{\dot{\gamma}}$: Viscosité apparente (Pa.s) ; τ_0 : Seuil de cisaillement (Pa) ; c : Paramètre de second ordre (Pa.s²) ; μ : Viscosité plastique (Pa.s).</p>		

2.2.4. Thixotropie

La thixotropie a été définie comme la diminution de la viscosité pendant le cisaillement, au cours de temps, à cause de la reconstruction de la structure au repos. La thixotropie complique sérieusement les mesures rhéologiques [127]. Selon Tattersall et Banfill, rapporté par Chouinard [103], le béton frais est un corps thixotrope. Toutefois, il est généralement admis que le temps de cisaillement requis pour stabiliser la viscosité plastique est assez court.

2.2.5. Dilatance

Selon Chouinard [103], la dilatance est la propriété, que possède certains corps, d'augmenter leur volume lorsqu'ils se déforment. Il s'agit des corps bien compacts dont la compacité diminue lorsqu'ils sont cisailés. Selon le même auteur [103], les résultats obtenus par Hu en 1995, pour des bétons fluides indiquent qu'il ne semble pas y avoir de relation directe entre la dilatance et les propriétés rhéologiques du béton frais. La dilatance d'un béton dépend principalement des caractéristiques du squelette granulaire (taille et forme des gros grains : roulés, concassés, teneur en particules fines). La dilatance du béton frais pourrait dans certains cas poser des problèmes pendant le pompage du béton à cause de la restriction volumétrique, au cours de l'écoulement, due aux tuyaux de pompage. L'effet de la dilatance sur le pompage n'est pas vraiment étudié. La Figure 2.3 donne une représentation schématique de la boîte de cisaillement et différents modes de cisaillement y compris la dilatance.

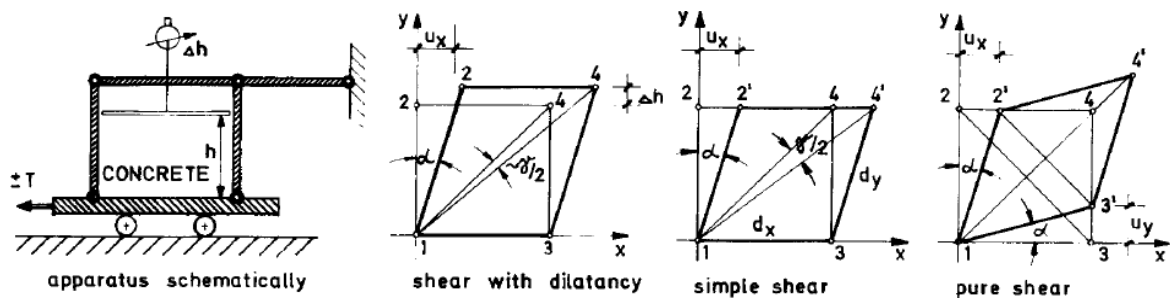


Figure 2.3 : Représentation schématique de la boîte de cisaillement et différents modes de cisaillement [128].

2.2.6. Description physique de la viscosité

- Définition

La viscosité est définie comme étant la tendance d'un fluide à résister à l'écoulement suite d'un frottement interne [129]. Elle dépend essentiellement de la cohésion et du taux de transfert de quantité de mouvement entre les molécules [130]. Autrement dit, cette résistance interne, appelée aussi dissipation visqueuse, est engendrée par le mouvement du liquide interstitiel dans la porosité d'un système granulaire sous frottement. Selon Coussot et Ancey, pour un matériau granulaire, le résultat macroscopique des dissipations est fonction de la teneur en solide et de la contribution des classes granulaires à la compacité d'ensemble, cité par [130]. Ces dissipations d'énergie sont traduites par la viscosité apparente de la

suspension. Celle-ci est fortement influencée par les conditions et les durées de sollicitations et de cisaillements.

Afin d'être cohérent dans l'écriture, deux définitions différentes de la viscosité seront appliquées : - Primo, la viscosité différentielle (η_{diff}), à une certaine vitesse de cisaillement, est l'inclinaison de la courbe d'écoulement à ce taux de cisaillement particulier [107,112]. Mathématiquement, selon Boisly et al. [107], c'est le coefficient du terme linéaire de la série de Taylor qui définit la pente de la fonction d'écoulement. Dans le cas du modèle de Bingham, elle représente la viscosité plastique (μ), et dans ce cas elle est constante quelle que soit la vitesse de cisaillement. Par contre, dans le cas du modèle de Bingham modifié, elle représente le paramètre $(\mu + c \cdot \frac{\partial \gamma}{\partial t})$.

- Secundo, la viscosité apparente (η), à une certaine vitesse de cisaillement, est l'inclinaison d'une droite reliant l'origine au point sur la courbe d'écoulement à la vitesse de cisaillement correspondante [107,112]. Elle est facilement déterminée en divisant la contrainte de cisaillement par la vitesse de cisaillement.

L'appellation « viscosité apparente » sera utilisée dans ce manuscrit afin de faire une distinction nette entre la viscosité réelle (apparente) utilisée en rhéologie et la viscosité la plus connue dans la rhéologie du béton : la viscosité plastique (Bingham). La différence entre la viscosité différentielle et la viscosité apparente est illustrée sur la Figure 2.4.

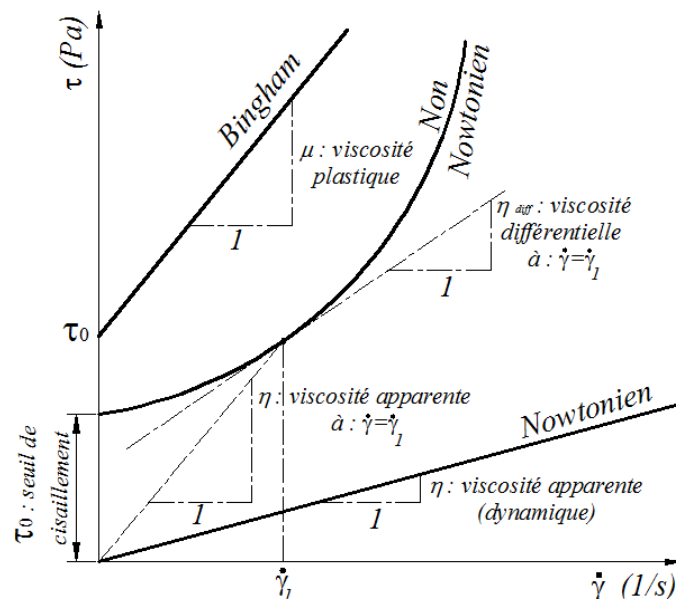


Figure 2.4 : Représentation graphique de la viscosité : apparente, plastique et différentielle dans le cas des fluides Newtoniens et non newtoniens.

- Origine de la viscosité dans une suspension

Généralement, il y a trois types de forces intervenant dans une suspension : les forces d'interaction colloïdales, les forces Browniennes et les forces visqueuses. Chacune de ces forces contribue à la présence de la viscosité [98].

Toutefois, il est rapporté par Coussot et Ancey [108] que le domaine de la rhéologie des suspensions a été développé par des physiciens extrapolant l'approche d'Einstein [131] sur les suspensions diluées de sphères dures à des systèmes concentrés. Ainsi, la viscosité de ces systèmes est liée à la viscosité du fluide interstitiel (μ_0) et de la concentration volumique solide (Φ), allant de modèles supposant uniquement des effets hydrodynamiques à des modèles essayant d'inclure des interactions colloïdales et des mouvements Browniens à différents niveaux en utilisant une fraction d'empilement maximale (Φ_m) ou une fraction de volume efficace. Ces mêmes auteurs [108] ont illustré une classification conceptuelle des régimes rhéophysiques des suspensions en fonction de $\dot{\gamma}$ et (Φ).

Dans un mélange de béton, la taille des particules varie de moins de 1 μm à quelques centimètres. Sans entrer dans les détails des charges intrinsèques de la matière, de l'ionisation, de l'adsorption ionique spécifique, du double couche électronique et du potentiel zêta ou d'autres concepts, nous pouvons simplement dire que la stabilité d'une telle suspension de particules dans l'eau est régie par diverses forces (par exemple : forces de gravité, forces capillaires, forces colloïdales -répulsives (électrostatiques) / forces attractives (van der Waals)-). Les forces résultantes dépendent principalement de la taille des particules des composants (Tableau 2.2).

Tableau 2.2 : Différents types de forces dans une suspension des particules dans l'eau. (Selon Kreijger, 1980; Extrait de [129]).

Taille des particules (mm)	Type des particules	Forces dominantes
> 1 mm	sable grossier, gravier	forces de cisaillement, gravité
0,1 – 1 mm	sable	forces capillaires
10^{-6} – 0,1 mm	particules de ciment, hydrates, fines des agrégats	forces colloïdales (forces électrostatiques, forces de van der Waals)

Dans la littérature, de nombreux chercheurs ont appliqué la théorie DLVO, établie par Derjaguin et Landau et Verwey et Overbeek, pour étudier la structure des suspensions cimentaires. Cette théorie, détermine l'état des suspensions en

se basant sur le bilan du potentiel énergétique répulsif lié à la répulsion électrostatique entre les couches diffuses et le potentiel énergétique attractif lié à l'attraction de Van der Waals [132].

2.2.7. Description physique du seuil de cisaillement

Le seuil de cisaillement (τ_0 ou τ_c) représente la contrainte qui devrait être appliquée à un matériau pour commencer l'écoulement [93]. Dans un rhéogramme, c'est le point d'intersection sur l'axe des contraintes de cisaillement (Figure 2.4). Selon Yammine [130], ce terme est couramment associé à un potentiel minimum d'interaction entre particules solides au repos qui serait influencé par la disposition des particules les unes par rapport aux autres, leur taille, le potentiel chimique du fluide suspendant, *etc.* Ainsi, c'est une manifestation soit des interactions électrostatiques type Van der Waals entre grains colloïdaux de tailles de l'ordre du micromètre, soit du frottement solide entre grains de tailles de l'ordre du millimètre. Il est rapporté par plusieurs auteurs que plus une classe de grains est fine, plus elle présente de contacts par unité de volume, et plus le frottement interne généré est important. Cependant, lors de l'écoulement d'un béton, chaque granulats entraîné par la pâte est gêné dans son mouvement par les granulats voisins. Or, l'origine physique du seuil est à la fois frictionnelle, impliquant des frottements et contacts directs entre granulats s'il est dominé par le mouvement des granulats, et colloïdale s'il est dominé par le mouvement de la pâte de ciment.

2.3. Rhéologie des suspensions cimentaires

En termes de rhéologie, il est naturel de considérer le béton frais, le mortier et la pâte de ciment comme différents types de suspensions. Traditionnellement, une suspension de particules se compose de deux phases, à savoir les particules en suspension et la matrice. Ainsi, le béton frais consiste en particules avec une large gamme de masse, de dimension, de forme et de texture de surface, suspendues dans une matrice. La distinction entre la matrice et les particules en suspension est une question de choix, contrairement à la suspension plus traditionnelle des sphères immergées dans un liquide newtonien [45]. Autrement dit, on peut considérer le mortier comme matrice, comme on peut considérer la pâte de ciment.

D'un point de vue chimique, le ciment est un silicate de calcium (parfois un aluminat de calcium). En revanche, d'un point de vue physique, il est composé

de particules minérales dont la taille est de l'ordre de la cinquantaine de micromètres [45]. Ainsi, les constituants du ciment Portland (C_3S , C_2S , ...) sont hydrauliques. Quelques heures après le gâchage, le matériau fait prise : il passe en quelques instants de l'état de suspension à celui de solide [133].

Ainsi, il est rapporté par Nehdi [56] que Powers décrit la pâte de ciment comme un produit floculant lorsqu'elle est concentrée, avec des particules formant un réseau tridimensionnel, au contraire lorsqu'elle est diluée, avec des particules formant des grappes dispersées.

Il est rapporté par [132], que pendant le broyage du ciment, les matériaux sont soumis à des chocs importants pour diviser les grains en plusieurs particules plus petites dont les tailles vont de quelques microns à une centaine de microns. Ces fractions s'accompagnent de la rupture des liaisons électriques entre les cations et les anions de la matière. Il existe donc, à la surface des grains, des sites chargés électriquement. En général, les grains de ciment sont davantage chargés négativement que positivement et les sites chargés négativement sont significativement plus étendus (3 fois environ) que ceux chargés positivement. Les charges négatives se situent souvent sur les sites plans alors que les charges positives se trouvent sur les sites anguleux (aspérités et arêtes) des grains de ciment. Ceci est dû d'une part à la saturation partielle des charges positives par des électrons libres présents dans l'atmosphère du broyeur, et d'autre part à la dimension plus grande des anions par rapport à celle des cations. Dès que le ciment est introduit dans l'eau, la phase aqueuse est pratiquement saturée en ions. Il existe donc dans les coulis cimentaires des interactions électrostatiques entre les ions et les grains cimentaires non saturés électriquement, auxquelles s'ajoutent, bien sûr, les interactions non électrostatiques toujours existantes entre les atomes, les molécules et donc les particules [132].

2.3.1. Essai et cahier des charges rhéologiques

Le béton frais fait partie des suspensions denses, et sa plasticité n'est qu'un état transitoire. Il est composé de particules de ciment, d'agrégats, d'eau et d'air, peut être caractérisé comme des particules solides en suspension (agrégats) dans des milieux visqueux (pâte de ciment). Cependant, les méthodes efficaces de manipulation, de transport, de pompage, de placement, de finition et de consolidation du béton dépendent de ses propriétés d'écoulement. Des méthodes empiriques traditionnelles ont été utilisées pour caractériser ces aspects

technologiques, mais l'utilisation croissante des adjuvants chimiques et des additions minérales avec la production des bétons spéciaux ont rendu ces techniques inefficaces et peu fiables [56].

Cependant, il est rapporté par Roussel et Coussot [134] qu'il existe dans le monde plus de 120 essais pour quantifier ou au moins qualifier la maniabilité d'un béton à l'état frais. Ces essais peuvent être de façon générale séparés en trois catégories :

- les essais empiriques dont le résultat est une quantité géométrique reliée à la forme de l'échantillon à l'arrêt de l'écoulement (slump, étalement, L-Box, table à choc) ;
- les essais empiriques dont le résultat est un temps nécessaire à l'écoulement d'une certaine quantité de matériau dans une géométrie donnée (cône de Marsh (Roussel, 2005), V-Funnel (Bartos, 2001), maniabilimètre (Baron et Lesage, 1965), cône modifié (De Larrard *et al.*, 1998)... ;
- les essais utilisant des rhéomètres à bétons.

Cependant, le béton frais doit répondre à des exigences très variées et parfois contradictoires. Pour pouvoir être coulé sans trop de difficultés, le béton doit répondre à un cahier de charges assez complexe en termes de rhéologie, d'autant qu'il ne s'agit pas d'un, mais de plusieurs cahiers de charges, en fonction de l'application à laquelle on le destine [45] :

- bétons pour pièces préfabriquées extrudées. Le béton est évidemment extrudé avant durcissement, mais à la sortie de la filière, il doit garder la forme de celle-ci. Il faut donc donner à la pâte une capacité (inhabituelle pour un fluide) à ne pas s'écouler sous son poids propre ;
- bétons pour chape autonivellante. Pour assurer la planéité de la chape avec un minimum d'intervention manuelle, le béton doit avoir une faible viscosité. Mais en même temps, les graviers ne doivent pas sédimenter trop vite faute de quoi ils s'accumuleraient en fond de coffrage.
- Bétons pour coffrages verticaux : la capacité à limiter la sédimentation des graviers est alors essentielle.
- Bétons pour injection dans des câbles de précontrainte. La viscosité doit alors être très faible. Le risque est alors que le sable, et même les grains de ciment, ne sédimentent.

Cette variété des missions impose une multiplicité des additifs destinés à modifier le comportement du matériau tels que : l'ajout des adjuvants et/ou l'ajout des fillers minéraux.

2.3.2. Modèles rhéologiques prédictifs

- Modèles pour la viscosité plastique

Selon Stickel et Powell [135], la viscosité relative (η_r) est une fonction de concentration (Φ), de nombre de Peclet ($Pe_{\dot{\gamma}}$) et de nombre de Reynolds ($Re_{\dot{\gamma}}$) (équation 2.5) :

$$\eta_r = f(\Phi, Pe_{\dot{\gamma}}, Re_{\dot{\gamma}}) \quad (2.5)$$

$$\text{Avec : } \eta_r = \frac{\eta}{\eta_0} ; Pe_{\dot{\gamma}} = \frac{6\pi\eta_0 a^3 \dot{\gamma}}{kT} \text{ et } Re_{\dot{\gamma}} = \frac{\rho_0 a^2 \dot{\gamma}}{\eta_0}$$

Cependant, pour les systèmes non browniens avec un faible nombre de Reynolds et un grand nombre de Peclet à l'état stationnaire, la viscosité relative est simplement fonction de la concentration (équation 2.6) [135] :

$$\eta_r = f(\Phi) \quad (2.6)$$

Toutefois, les propriétés rhéologiques du béton ont été décrites en utilisant l'équation (2.6) puisque le béton est classé comme une suspension dense et il est soumis à la gamme de taux de cisaillement applicable. Pour tenir compte des particules non mono-dimensionnées, la compacité d'empilement maximale, Φ_{\max} est introduite (équation 2.7) [136] :

$$\eta_r = f(\Phi, \Phi_{\max}) \quad (2.7)$$

Selon Chidiac et Mahmoodzadeh [100], deux approches différentes ont été postulées pour la modélisation de la viscosité plastique du béton frais : modèles phénoménologiques et modèles fondamentaux. Les modèles phénoménologiques sont fondés sur les observations. Le modèle le plus prometteur dans cette catégorie pour le béton frais est celui proposé par Ferraris et de Larrard [109,137]. Par contre, les modèles fondamentaux proposés pour quantifier la viscosité plastique sont basés sur la science de la rhéologie et la mécanique des fluides. Ces modèles sont divisés en deux groupes. Le premier groupe comprend les modèles qui prévalent dans la technologie du béton, tel que le modèle de Hu et de Larrard [138]. Tandis que le deuxième groupe compile les modèles proposés pour quantifier la viscosité plastique des suspensions concentrées dans le solvant. Pour le deuxième groupe, les modèles sont classés en quatre sous-groupes : modèles généralisés, approche analogue, méthode cellulaire et méthode

moyenne [100]. L'évaluation de ces modèles a révélé que la méthode cellulaire possède l'attribut nécessaire pour décrire la composition du mélange de béton et la flexibilité pour incorporer l'interaction des particules [136].

Il est rapporté par Mahmoodzadeh et Chidiac [136] que les modèles développés à partir des premiers principes (Tableau 2.3) pour estimer la viscosité plastique du béton frais avaient la tendance à combiner deux théorèmes : la théorie de modèle des suspensions sphériques multimodales, de Farris, et la théorie de modèles rhéologiques, de Roscoe ou de Krieger-Dougherty ou bien de Mooney. Ainsi, Murata et Kikukawa ont mis en œuvre l'équation de Roscoe pour quantifier la viscosité plastique du béton. Roscoe a stipulé qu'en augmentant la concentration, une certaine quantité de liquide va se figer entre les particules et entraîner une augmentation de la concentration effective en adoptant l'argument d'Einstein. De cette manière, une description mathématique de la viscosité plastique pour les suspensions concentrées en fonction de l'empilement des particules a été développée [136].

Ainsi, la Figure 2.5 illustre l'évolution de la viscosité relative et la concentration pour les quelques expressions.

Tableau 2.3: Modèles rhéologiques de la viscosité

Modèle de viscosité	Expression	
Einstein [131]	$\eta/\eta_0 = 1 + [\eta]\Phi$	Pour une suspension diluée et pas d'interactions entre particules
Roscoe [130]	$\eta/\eta_0 = (1 - 1,35\Phi)^{-k}$	Considère les interactions entre particules
Krieger-Dougherty [130]	$\eta/\eta_0 = (1 - \frac{\Phi}{\Phi_{\max}})^{-[\eta]\Phi_{\max}}$	Relation entre la viscosité et la compacité d'empilement solide maximale (packing)
Mooney [139]	$\eta/\eta_0 = \exp(\frac{[\eta]\Phi}{1 - \Phi\Phi_{\max}})$	
<p>Avec : η : la viscosité de la suspension ; η_0 : la viscosité de la phase liquide ; $[\eta] = \lim_{c, \epsilon \rightarrow 0} \left(\frac{\eta_{SP}}{c} \right)$: la viscosité intrinsèque de la suspension ; k une constante ; Φ_M : compacité d'empilement maximale possible ; Φ : la concentration volumique solide ;</p>		

- Modèles pour le seuil de cisaillement

Selon Legrand [140] et Ferraris et de Larrard [109,137], le seuil de cisaillement est aussi, comme la viscosité, fonction de la concentration volumétrique du matériau solide et de la compacité d'empilement maximale des

composants individuels. Le modèle a été montré pour produire une bonne adaptation aux données expérimentales. Ainsi, il est rapporté par [136], que Toutou et Roussel ont adopté la théorie de Coussot pour estimer le seuil de cisaillement. Toutefois, il convient également de noter les modèles phénoménologiques développés par Murata et Kukawa, Hu, Wallevik et Sedran.

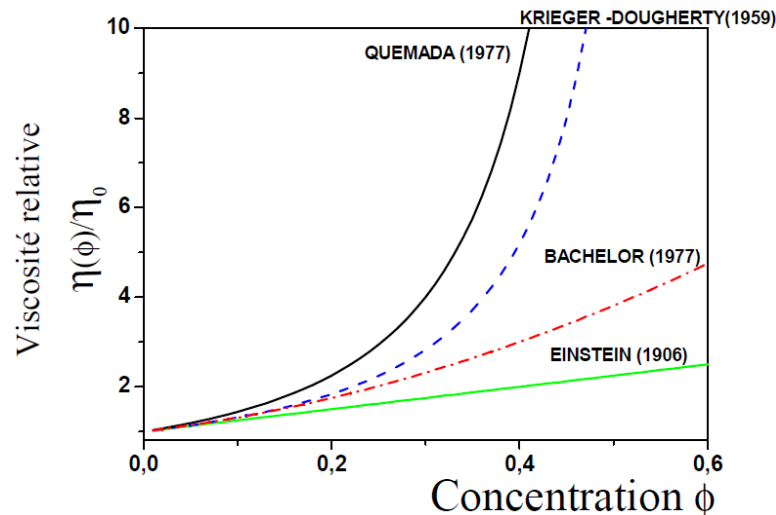


Figure 2.5 : Relation entre la viscosité relative et la concentration pour les principales expressions dans la littérature [67].

2.4. Relation entre la rhéologie du béton avec sa pâte et son mortier équivalent

Le comportement rhéologique d'un matériau dépend des conditions de l'expérience telles que la vitesse de cisaillement, la température, la puissance de malaxage. Par conséquent, pour faire une comparaison entre les propriétés rhéologiques du béton et sa pâte, il est important que cette dernière soit mesurée dans les mêmes conditions qu'elle rencontrera dans le béton. Selon l'étude effectuée par Ferraris [126], il n'y a pas de relation linéaire entre les paramètres rhéologiques du béton et sa pâte de ciment. La raison principale étant l'écart entre les agrégats qui varie avec la teneur en volume de la pâte de ciment dans le béton. Ferraris et al. [141] ont montré que la pâte de ciment a un comportement rhéologique différent en fonction de l'écart entre les plaques d'un rhéomètre qui simulent la distance entre les agrégats. La distance entre l'agrégat dépend de la teneur en volume de la pâte de ciment. Cette approche a été suivie par Yang et Jennings [142], pour déterminer l'influence des méthodes de mélange sur les propriétés d'écoulement de la pâte de ciment. Ces auteurs ont montré que le comportement rhéologique de la pâte de ciment pendant les deux premières

heures est fortement influencé par la méthode de malaxage. Il faut garder à l'esprit que toutes les méthodologies données ici supposent que le béton est formé de particules, mais qu'aucune force interparticulaire n'est directement considérée. La seule référence à l'interaction des particules est la reconnaissance que toutes les propriétés dépendent du temps, ce qui implique que des phénomènes tels que la floculation des particules de ciment et l'hydratation se produisent continuellement [126].

En revanche, une étude a été réalisée par Tahir et al. [143] pour estimer la demande en haut réducteur d'eau (HRE) de BAP à partir du mortier de béton équivalent (MBE) correspondant selon la méthode de Schwartzentruber and Catherine [144]. Les résultats obtenus ont montré que des corrélations peuvent être trouvées entre le seuil de cisaillement, la viscosité plastique et la thixotropie du béton et le MBE résultant. Ainsi, la demande en HRE du MBE, a une relation 1:1 par rapport au béton de référence. Toutefois, la thixotropie et la viscosité plastique apparente varient principalement avec la variation du rapport E/C. Par conséquent, selon ces auteurs, les tests à petite échelle du MBE peuvent donc être utilisés pour évaluer l'effet des caractéristiques du matériau sur les propriétés rhéologiques du béton fluide [143]. Par contre, les auteurs en [94], ont trouvé que lorsque le superplastifiant (SP) est ajouté au béton de référence, la viscosité plastique μ reste relativement peu affectée, tandis que pour la pâte de ciment, le SP pourrait réduire la viscosité plastique de manière similaire à celle de l'eau ajoutée. Ceci est moins constaté pour le mortier.

2.5. Influence des composants

L'influence de différentes variations dans la composition du béton sur ses propriétés rhéologiques, en particulier le seuil de cisaillement et la viscosité, a été évaluée en détail en [98,109,127,145]. Un bref aperçu de l'allure générale de ces effets est donné par les Figures 2.6 et 2.7.

D'abord, l'effet de la forme des sables et leur teneur, sur les propriétés rhéologiques du béton, est représenté sur la Figure 2.6 a) et l'effet de l'addition d'adjuvant et d'eau est donné par la Figure 2.6 b).

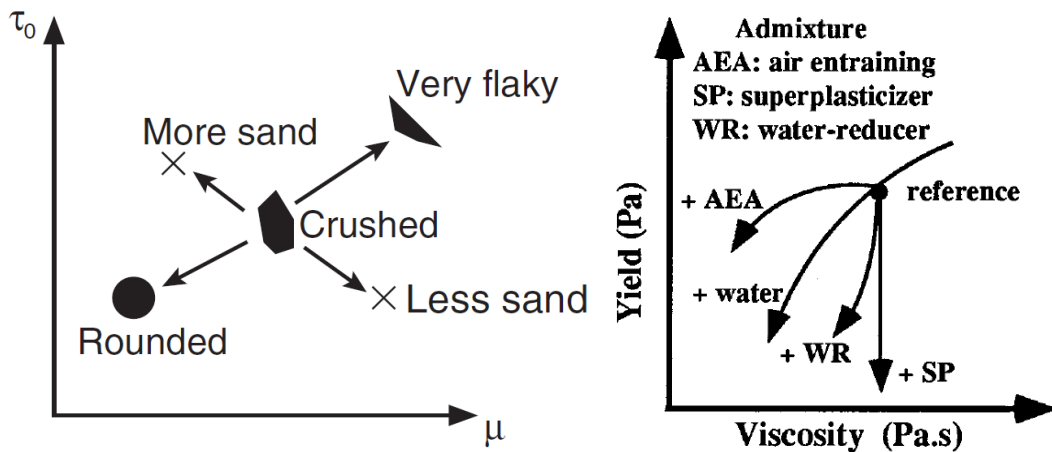


Figure 2.6 : Effet de : a) la texture des sables et leur teneur [94] et b) l'addition de différents adjuvants et d'eau sur les propriétés rhéologiques du béton (selon GjØrv, 1992 ; Extrait de [146])

Le tableau 2.4 propose une classification du comportement rhéologique en fonction des propriétés physico-chimiques du ciment. Un phénomène chimique survient quelquefois aussi, en présence de superplastifiant notamment. Il provient d'une adsorption préférentielle de l'adjuvant sur la phase sulfatée, celle-ci provoque une première hydratation qui précipite une couche d'hydrates sur les surfaces solides du système. Ce phénomène, souvent appelé *incompatibilité du couple ciment / superplastifiant*, provoque des frictions entre particules, ce qui a pour effet d'augmenter brusquement le seuil de cisaillement [50].

Ainsi, la Figure 2.7 illustre des rhéogrammes montrant l'influence de l'air, de l'eau, de la fumée de silice et du superplastifiant sur le seuil de cisaillement et la viscosité plastique. Cependant, on trouve des tableaux récapitulatifs similaires dans les références [127,147].

Tableau 2.4 Evolution des paramètres rhéologiques pendant la mise en œuvre du béton frais : Interprétation et remèdes [50].

Ca s	Seuil de cisaillement	Viscosité plastique	Slump	Surface supérieure de l'échantillon	Interprétation	Remède
I	→	→	→	-	Mélange stable	-
II	↑	→	↓	-	Activité chimique	Ajouter un retardateur de prise ou changer le système ciment/superplastifiant
III	↑	↑	↓	-	Absorption d'eau	Pré-saturer les granulats
IV	↓	→/↓	→/↑	Remonté de gros granulats	Ségrégation entre mortier et gravillon	Changer les granulats ou ajouter un agent de viscosité

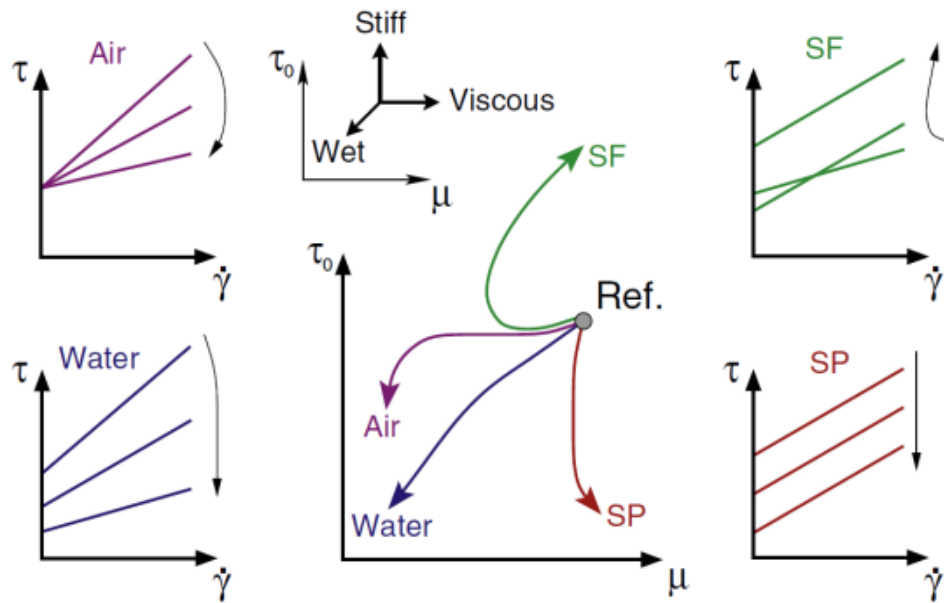


Figure 2.7 : Figure centrale: Rhéogrammes montrant l'influence de l'air, de l'eau, de la fumée de silice (SF) et du superplastifiant (SP) sur le seuil de cisaillement et la viscosité plastique, sur la base des courbes d'écoulement indiquées sur les figures latérales [94].

2.6. Influence de l'air occlus

En fait, le béton est une phase ternaire, contenant de l'air, de l'eau et beaucoup plus des particules solides. Il est rapporté dans la littérature que l'air occlus influence la rhéologie du béton, notamment lors de pompage [127]. A cet effet, un bref aperçu sera présenté sur la rhéologie des bulles d'air. Dans une suspension, les particules solides sont considérées comme non déformables. A cet effet, l'influence des bulles d'air, qui sont déformables, sur les propriétés rhéologiques n'a été pas prise en considération. Deux contraintes différentes sont appliquées sur les bulles d'air au cours de l'écoulement. La première c'est la contrainte de cisaillement, qui tend à les déformer sous forme de bandes plates dans la direction de l'écoulement. La seconde, c'est la tension superficielle, qui tend à les garder sous leur forme sphérique. Ainsi, on définit le nombre capillaire (Ca) comme le rapport entre la contrainte de cisaillement et la tension superficielle (équation 2.8).

$$Ca = \frac{a \cdot \dot{\gamma} \cdot \eta_0}{\Gamma} \quad (2.8)$$

Où a : rayon de la particule indéformable (m) ; η_0 : viscosité apparente de la suspension interstitielle (Pa.s) ; Γ : tension superficielle (N/m).

Pour $Ca \gg 1$, la contrainte de cisaillement dominant la tension superficielle. Dans ce cas, une perte remarquable d'énergie est apportée, en augmentant la viscosité apparente [127].

2.7. Comparaison des résultats obtenus par différents rhéomètres

De tout ce qui précède, il est clair que la rhéologie est l'outil logique pour caractériser et décrire le comportement d'écoulement, l'épaississement, la perte de maniabilité, la stabilité et même la compacité d'une suspension de particules à base de ciment comme la pâte de ciment, le mortier et le béton. Pour appliquer cet outil, il faut pouvoir évaluer et choisir le protocole expérimental et les paramètres matériels d'importance, pour pouvoir en obtenir des informations (par exemple la contrainte τ_0 et la viscosité plastique μ). Des efforts considérables ont été consacrés à l'obtention de données précises et reproductibles sur les paramètres du matériel rhéologique. Bien que la même tendance et le même comportement soient généralement atteints par différents types de dispositifs, la valeur absolue peut cependant un peu différer [94].

Une étude gigantesque a été réalisée au niveau du LCPC (Nante, France) [148], consiste à faire une comparaison entre plusieurs rhéomètres. Selon la Figure 2.8, extraite de cette étude, l'évolution de ces paramètres montre une certaine similarité, spécialement pour le seuil de cisaillement, même si les écarts sont importants en valeur absolue. Par conséquent, les paramètres identifiés pour chaque appareil ne peuvent être considérés comme intrinsèques [96]. Ainsi, un bon accord entre le système Mk (2 point) et le viscosimètre BML, a été constaté. Ces résultats, bien qu'encourageants, ne sont pas satisfaisants.

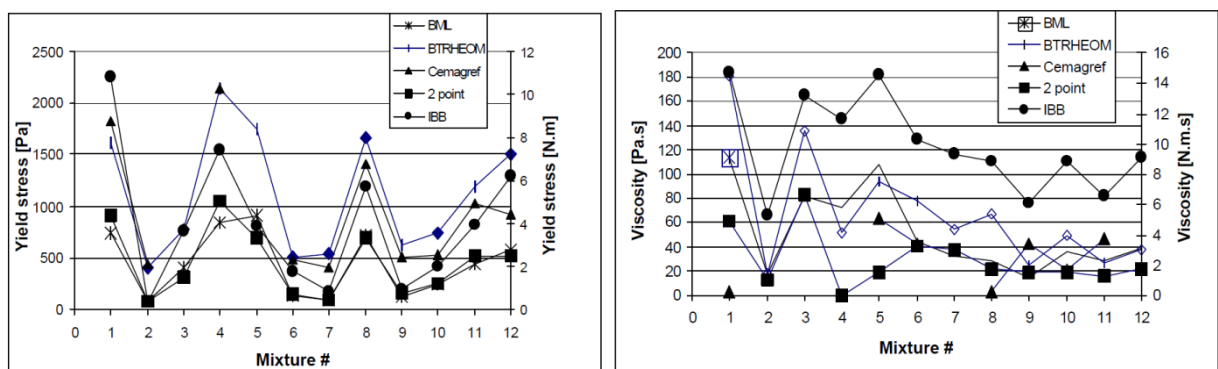


Figure 2.8 : Comparaison des résultats obtenus par différents rhéomètres. (selon Banfill et al.,2001, Extrait de [148])

La Figure 2.9 montre une comparaison des résultats entre le rhéomètre ICAR et le rhéomètre BTRHEOM. Une partie de la dispersion pour le seuil de cisaillement est probablement attribuable à l'erreur de décalage de couple nul dans le rhéomètre BTRHEOM. La dispersion de la viscosité plastique est élevée même si les tendances des changements dans la composition du béton sont généralement similaires. Cette différence en performance a également été identifiée par Ferraris et Brower (2001) pour le BTRHEOM et quatre autres rhéomètres du béton [98].

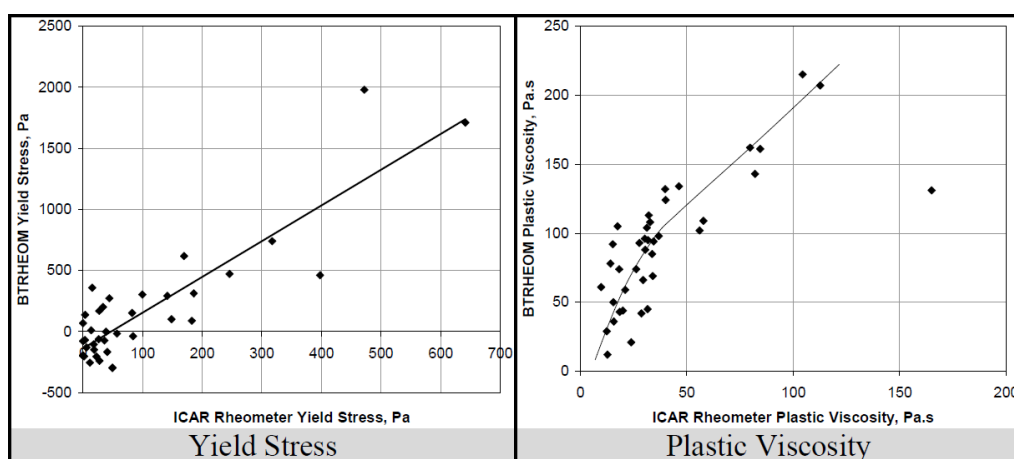


Figure 2.9: Comparaison des paramètres rhéologiques entre les rhéomètres BTRHEOM et ICAR [98].

Il convient de noter qu'il n'existe pas de méthode d'essai standard pour mesurer la viscosité plastique et le seuil de cisaillement du béton [100]. Cependant, selon la suspension considérée et notamment le rhéomètre utilisé, la valeur de la viscosité et du seuil de cisaillement peut couvrir des intervalles très larges. Banfill [149] a tenté de donner quelques ordres de grandeur dans le tableau 2.5.

Tableau 2.5 : Propriétés rhéologiques en unités fondamentales de pâte de ciment, mortier et béton [149].

	Pâte de ciment*	Mortier**	Béton fluide**	Béton ordinaire**
Seuil de cisaillement T_0 (Pa)	10-100	80-400	400	1000
Viscosité plastique μ (Pa.s)	0,01-1	1-3	20	100

* Rhéomètre à cylindres rotatifs coaxiaux

** Rhéomètre de type malaxeur

2.8. Corrélation entre les propriétés rhéologiques et les essais empiriques

Comme le montre la Figure 2.10, le volume de la matrice nécessaire pour fabriquer un BAP (avec un affaissement de 650 mm) dépend beaucoup du seuil de cisaillement du béton, avec un coefficient de corrélation de 0,91. Selon les résultats tracés dans la Figure 2.10.a, il n'existe pas de forte corrélation entre le volume de matrice nécessaire pour atteindre un BAP et la viscosité plastique de la matrice [137].

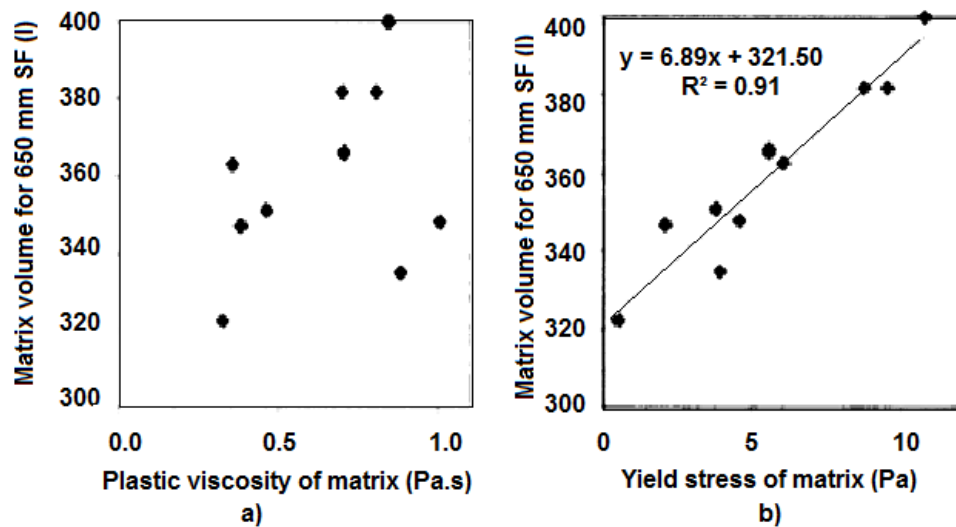


Figure 2.10 : Volume de la matrice nécessaire pour avoir un affaissement de 650mm en fonction a) de la viscosité plastique et b) du seuil de cisaillement [137].

La Figure 2.11.a) présente la corrélation numérique entre le seuil de cisaillement et l'affaissement obtenue par Roussel [150]. Ainsi, à partir de ces résultats prédictifs numériques, une approximation linéaire simple peut être écrite pour des affaissements entre 5 cm et 25 cm par l'équation 2.9 :

$$s = 25,5 - 17,6 \frac{\tau_0}{\rho} \quad (2.9)$$

Or, il a été rapporté par Chouinard [103], que la relation entre l'affaissement et le seuil de cisaillement est linéaire, comme il est montré sur la Figure 2.11.b).

Selon Ferraris et al. [92], l'évolution du seuil de cisaillement de la pâte de ciment en fonction de l'affaissement (Figure 2.12.a) montre une faible corrélation. Cependant, une approximation pourrait être obtenue en ajustant une ligne droite à travers les données. Cet ajustement n'a été pas fait ici, en raison de large diffusion des données. En revanche, l'évolution du temps d'écoulement pour 300 ml (au cône de Marsh) en fonction de la viscosité (Figure 2.12.b) ne montre aucune corrélation.

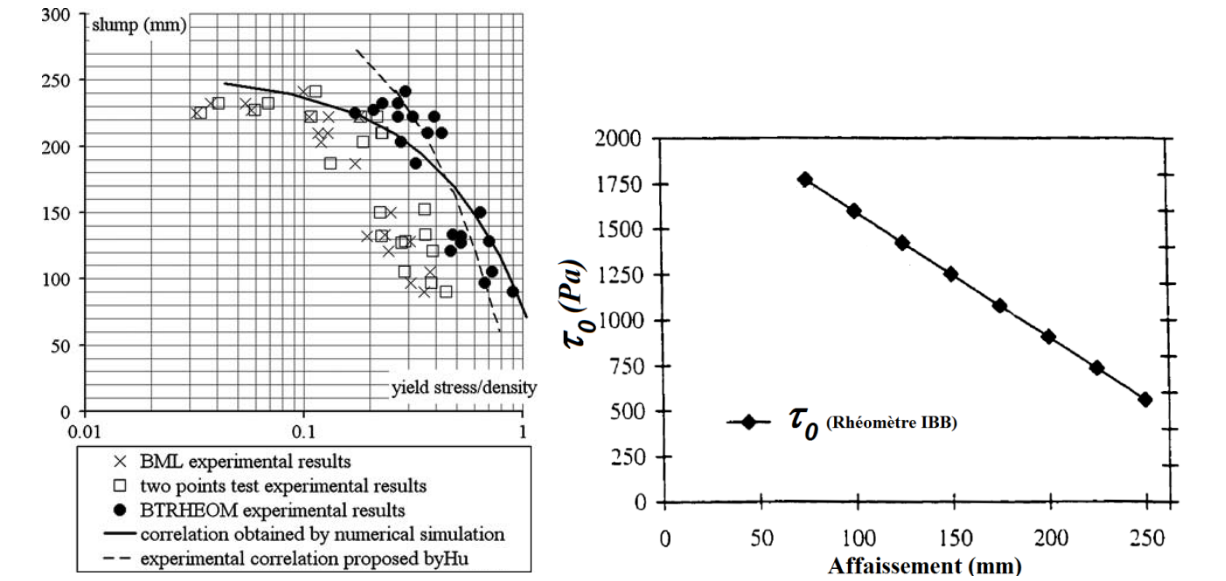


Figure 2.11 : Corrélation seuil de cisaillement-slump : a) résultats expérimentaux pour différents rhéomètres et corrélation numérique [150], b) résultats expérimentaux pour IBB rhéomètre (Extrait de [103] légèrement modifié).

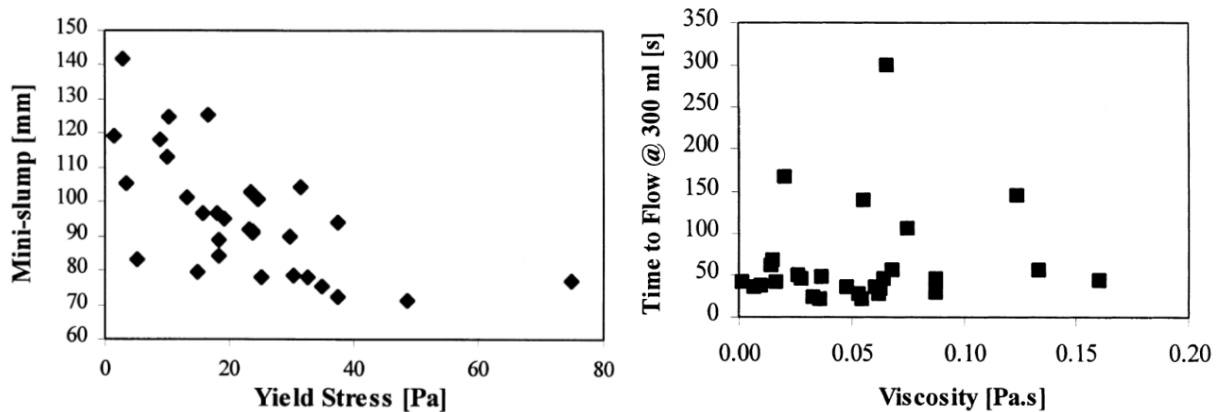


Figure 2.12 : Comparaison entre a) l'étalement au mini-cône et le seuil de cisaillement et b) le temps d'écoulement et la viscosité plastique. (Chaque point représente une mesure et non pas une moyenne : donc on ne peut pas calculer l'incertitude) [92].

Des résultats similaires ont été obtenus pour 500 ou 700 ml, car le temps d'écoulement a eu une relation linéaire avec la quantité de matériau mesurée. Néanmoins, dans certains cas, un temps d'écoulement plus faible correspond à une viscosité plus faible. A cet effet, il serait dangereux de s'appuyer sur le cône de Marsh pour sélectionner un matériau pour une certaine exigence de viscosité ou même classer les matériaux en fonction de la viscosité en raison du manque global de corrélation. Ce résultat est quelque peu inattendu, car on a supposé que le poids de la pâte de ciment était suffisamment élevé pour surmonter le seuil de cisaillement et, par conséquent, la vitesse de la pâte de ciment à travers le cône

d'écoulement dépend de sa viscosité. A partir des résultats obtenus, il semble que d'autres facteurs contribuent à l'écoulement comme le frottement et la sédimentation [92], et même encore la forme du cône selon Roussel et al. [151].

2.9. Taux de cisaillement maximum pour différents types de procédés

Dans la plupart des cas, les taux de cisaillement appliqués dans les rhéomètres en béton restent très bas. L'augmentation du taux de cisaillement dans le rhéomètre augmente le risque d'artefacts de mesure [127]. Un schéma illustratif (Figure 2.13) est donné par Artelt et Garcia [78], montre les vitesses de cisaillement appliquées pour différents tests correspondantes aux différents types de manipulation du béton. Un tableau similaire est donné par Hafid [67].

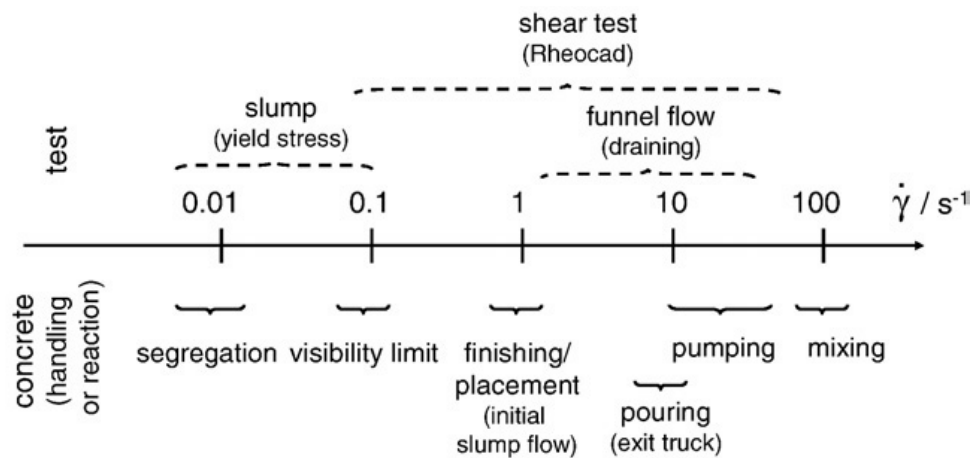


Figure 2.13 : Taux de cisaillement pour différents tests correspondant aux différents types de manipulation du béton [78].

2.10. Unités rhéologiques fondamentales versus unités rhéologiques machines

Actuellement, la détermination des propriétés rhéologiques exactes, dans les unités fondamentales, des matériaux cimentaires est devenue une étape nécessaire dans le domaine de la technologie de béton. Plusieurs types de rhéomètres et leurs équations de transformation correspondantes sont décrits dans la littérature.

On admet que la contrainte de cisaillement moyenne est proportionnelle au couple de malaxage (couple développé sur l'axe de l'agitateur), il apparait qu'il y a une relation linéaire entre les unités rhéologiques fondamentales et les unités rhéologiques machines [103]. Il y a divers techniques pour déterminer la relation entre les contraintes de cisaillement et le taux de cisaillement à partir de la vitesse de rotation et le couple engendré, autrement dit, détermination des constantes de

proportionnalité. Parmi les techniques disponibles, il s'agit de calculer le champ de contrainte effectif pour en déduire les constantes de proportionnalité. Cette technique peut être utilisée pour des rhéomètres dont la géométrie est simple et par conséquent facilement modélisable (rhéomètre à cylindres rotatifs coaxiaux ou tube capillaire). Évidemment, cette technique est difficilement réalisable dans le cas d'un rhéomètre de type malaxeur. Une autre technique consiste à utiliser des fluides dont les propriétés rhéologiques sont connues pour en déduire cette proportionnalité [103]. En effet, plusieurs chercheurs ont développé des formules de transformation.

Feys et al. [113], ont développé l'équation de transformation de Reiner-Riwlin, valable pour les rhéomètres de cylindres coaxiaux, pour le modèle de Bingham modifié, qui est une extension du modèle de Bingham avec un second ordre dans le taux de cisaillement. La transformation établie est démontrée compatible avec l'équation Reiner-Riwlin pour les modèles Bingham et Herschel-Bulkley. Sa validation a été également démontrée à partir des simulations numériques appliquées sur des données expérimentales. Les valeurs du seuil de cisaillement pour les trois modèles rhéologiques (appliqués sur les mêmes données expérimentales) sont comparées à la contrainte seuil calculée en utilisant l'affaissement. Les résultats ont montré que le modèle de Bingham modifié aboutit à des valeurs du seuil de cisaillement plus stables, indépendamment du comportement non linéaire. Ainsi, Güneyisi et al. [114], ont développé des formules pour les mêmes modèles.

2.11. Influence du potentiel zêta sur la rhéologie

Le potentiel zêta influe directement sur la stabilité des émulsions et des suspensions, sur la nature des interactions entre les particules et l'électrolyte mais aussi sur les caractéristiques rhéologiques. Une suspension présentant un potentiel zêta inférieur à $|10 \text{ mV}|$ est souvent instable, alors qu'une valeur supérieure à $|30 \text{ mV}|$ confère en général une bonne stabilité. Il est souvent considéré que, plus le potentiel zêta est élevé en valeur absolue, plus on se rapproche des conditions de stabilité des dispersions et inversement, plus le potentiel zêta est faible, plus on tend vers l'agrégation des particules [152]. Les résultats illustrés sur la Figure 2.14 montrent bien l'efficacité de dispersion des superplastifiants à travers le potentiel Zeta des pâtes à base de ciment et de fines calcaires [18].

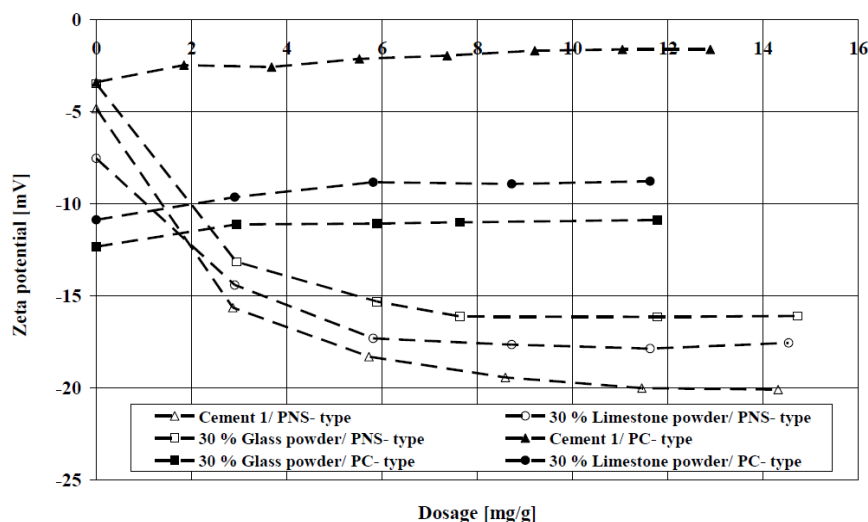


Figure 2.14 : Potentiel Zeta des pâtes de ciment et de poudres calcaires en fonction de différents dosages en superplastifiant (PNS: sulphonated naphthalene polymer, PC: polycarboxylated ether type of polymer) [18].

2.12. Relation rhéologie - pompabilité

Généralement, les propriétés rhéologiques du béton sont modélisées au moyen du modèle Bingham si aucun épaississement de cisaillement n'a été observé. Sinon, on fait appel au modèle de Bingham modifié.

Dans cette partie, le lien entre la rhéologie du béton et sa pompabilité sera discuté. D'abord, la formule de Poiseuille pour les liquides newtoniens sera étendue pour les matériaux non newtoniens comme le béton frais à travers les modèles de Bingham, Herschel-Bulkley et le modèle de Bingham modifié. L'avantage de ces modèles est que la perte de pression peut être prédite sur la base des propriétés rhéologiques du béton pompé et de la géométrie du tuyau utilisé. Ensuite, on va montrer, selon la littérature, les résultats des essais de pompage du béton à pleine échelle.

2.12.1. Pompabilité du béton

La pompabilité du béton est un concept complexe, qui nécessite l'introduction des notions telles que la stabilité et la mobilité sous pression. Selon Beaupré [146], elle est définie comme la mobilité et la stabilité du béton sous pression dans un tuyau, évidemment tout en maintenant ses propriétés initiales. Néanmoins, il est montré par Chouinard [103], qu'un mélange de béton qui contient suffisamment d'eau pour saturer complètement les vides de son squelette granulaire est plus facile à pomper qu'un mélange de béton non-saturé. En effet, de tous les constituants du béton, seulement l'eau est pompable à son état

naturel. Par conséquent, l'eau est le seul qui possède la capacité de transmettre la pression de pompage à tous les autres constituants du béton sans qu'il y ait frottement excessif entre les particules solides des mélanges.

Selon Wallevik [94], pomper un béton ordinaire (BO) avec succès, l'expérience a montré que la contrainte seuil τ_0 devait dépasser environ 150 Pa pour maintenir un degré suffisant de stabilité et d'homogénéité du béton frais. Par conséquent, il y aura un écoulement bouchon du béton dans le tuyau. Ainsi, le cisaillement du BO se produirait principalement dans la couche de glissement (couche limite) aux parois de la canalisation. Cette couche est largement maintenue par des ressuges sous pression du béton et, dans une certaine mesure, par des effets de dilatation.

En revanche, le BAP a un seuil de cisaillement beaucoup plus faible que BO, généralement inférieur à 50 Pa. Par conséquent, il y aura beaucoup moins de bouchon et donc plus de cisaillement dans tout l'échantillon de béton dans le tuyau. Bien sûr, il y aura un certain glissement entre le BAP et les parois de la conduite, généré par exemple par le cisaillement induit par une migration de particules. Étant donné qu'il y a plus de cisaillement transversal de la pipe à travers l'échantillon BAP, il s'est attendu à ce que la viscosité plastique contribue beaucoup plus à la résistance à l'écoulement global et donc à la pression de la pompe. Le BAP a généralement un volume de pâte beaucoup plus grand par rapport au BO, ce qui réduit tout effet potentiel de dilatation. Cet effet peut être un facteur de ségrégation majeur pour un BO pendant le pompage [94].

2.12.2. Ecoulement dans un tube circulaire

- La formule de Poiseuille pour les liquides newtoniens

La formule originale de Poiseuille est applicable si nous avons un écoulement unidimensionnel laminaire d'un fluide incompressible, sous condition de glissement nul aux parois. Comme il est connu en mécanique des fluides, l'évolution de la contrainte de cisaillement à l'intérieur d'un tube circulaire varie linéairement de zéro au centre à la valeur maximale près de la paroi (équation 2.10) [94]. Cette loi est une loi dite universelle, ce qui signifie qu'elle est indépendante des propriétés rhéologiques de la matière.

$$\tau_r = \tau_w \cdot \frac{r}{R} \quad (2.10)$$

Où r : paramètre radial, variant entre le centre 0 et le rayon R à la paroi, en (m) ;

τ_r et τ_w : respectivement l'effort de cisaillement à une distance « r » du centre et à la paroi, en (Pa).

L'incorporation du modèle rhéologique newtonien dans l'équation 2.10 délivre le taux de cisaillement à une distance « r » du centre (équation 2.11).

$$\dot{\gamma} = \frac{\tau_w}{\eta} \cdot \frac{r}{R} \quad (2.11)$$

L'intégration de cette dernière à « $-r$ », compte tenu de condition de glissement nul aux parois, délivre la vitesse. Ainsi, on obtient la formule de Poiseuille pour un fluide Newtonien traversant une conduite circulaire (équation 2.12) [94].

$$Q = \frac{1}{8} \cdot \frac{\pi \cdot \Delta P_{tot} \cdot D^4}{\eta \cdot L} \quad (2.12)$$

Où Q : débit (m^3/s) ; D : diamètre de la conduite en (m) ; L : longueur de la conduite en (m) ; ΔP_{tot} : perte de charge (pression) totale (Pa) ; η = viscosité du matériau (Pa.s).

- Formules de Poiseuille étendues pour les liquides non newtoniens

Selon Feys [127], une version étendue de la formule de Poiseuille a été développée pour le béton frais. Les trois modèles applicables au béton, présentés au-dessus (tableau 2.1), qui sont le modèle de Bingham (B), Herschel-Bulkley (HB) et le modèle de Bingham modifié (BM), étaient appliqués.

Comme la distribution des contraintes de cisaillement est une loi universelle, indépendamment des propriétés rhéologiques, la vitesse de cisaillement à une certaine distance r du centre du tuyau peut être calculée en incorporant les équations des modèles précédents dans l'équation 2.9 pour obtenir les équations (2.13, 2.14 et 2.15) [111] :

$$\dot{\gamma}_{r.B} = \frac{\tau_w \cdot \frac{r}{R} - \tau_{0.B}}{\mu_{p.B}} \quad \text{pour : } r > r_{plug} ; \text{ sinon : } \dot{\gamma} = 0 \quad (2.13)$$

$$\dot{\gamma}_{r.HB} = \left(\frac{\tau_w \cdot \frac{r}{R} - \tau_{0.HB}}{K_{HB}} \right)^{\frac{1}{n_{HB}}} \quad \text{pour : } r > r_{plug} ; \text{ sinon : } \dot{\gamma} = 0 \quad (2.14)$$

$$\dot{\gamma}_{r.BM} = \frac{-\mu_{BM} + \sqrt{\mu_{BM}^2 + 4 \cdot c_{BM} \cdot \tau_w \cdot \frac{r}{R} - 4 \cdot c_{BM} \cdot \tau_{0.BM}}}{2 \cdot c_{BM}} \quad \text{pour : } r > r_{plug} ; \text{ sinon : } \dot{\gamma} = 0 \quad (2.15)$$

L'équation 2.16 définit le rayon auquel le matériau est divisé en une partie non cisailée et une partie cisailée. La partie non cisailée est également appelée bouchon « *plug* » et est bien connue en cas de pompage. Noter que la vitesse de

cisaillement "Herschel-Bulkley" au rayon de la prise montre une inclinaison égale à l'infini, pour $n_{HB} > 1$.

$$r_{plug} = \frac{\tau_0}{\tau_w} \cdot R \quad (2.16)$$

Selon l'étude réalisée par Feys [127], l'évolution de la vitesse de cisaillement à travers le tuyau est représentée sur la Figure 2.15.a) et les équations de la distribution de la vitesse, ainsi obtenues de même manière que pour les liquides newtoniens, sont visualisées dans la Figure 2.15.b) sous les mêmes paramètres. Il est à noter que pour tous les matériaux de contrainte seuil, il existe une zone à taux de cisaillement nul, ce qui provoque un écoulement bouchon. Comme on peut le voir, la vitesse est constante dans le bouchon pour les matériaux de contrainte seuil. En raison de la rhéoépaississement par cisaillement, la vitesse moyenne et le débit sont plus faibles pour le modèle de Bingham modifié, par rapport au résultat pour le modèle de Bingham. Notons que l'équation dérivée dans le cas de Herschel-Bulkley, pose certains problèmes en raison de l'inclinaison infinie de la fonction de vitesse de cisaillement près du rayon de bouchon [111].

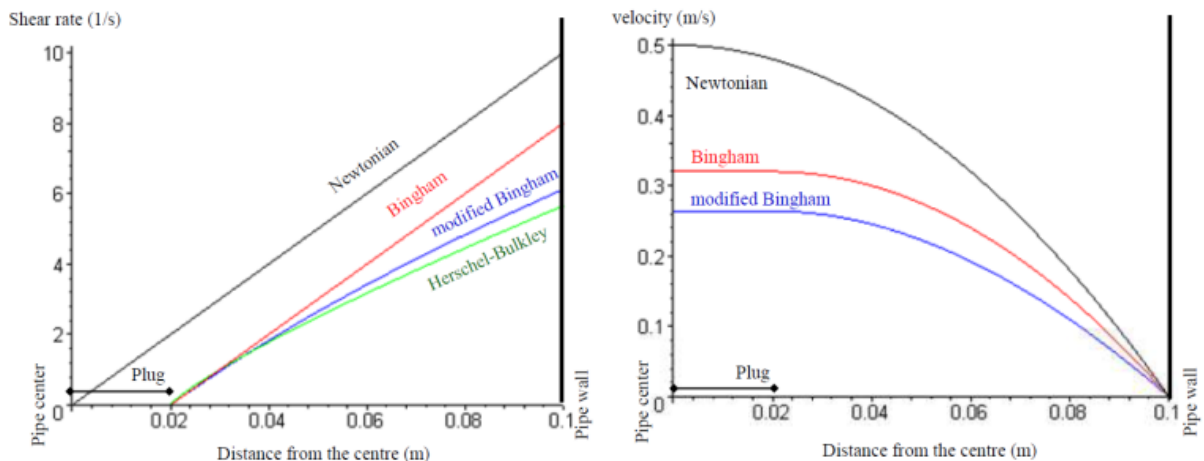


Figure 2.15 : Evolution a) de la vitesse de cisaillement à travers un tuyau et b) de la vitesse [127].

Finalement, Feys et al. [111], ont donné la relation entre le débit et la perte de pression, pour un matériau Bingham et Bingham modifié. Par contre, le calcul d'une solution analytique dans le cas d'un matériau de Herschel-Bulkley s'avère impossible, mais il peut être estimé numériquement. Ce qui représente un autre inconvénient de l'application de l'équation de Herschel-Bulkley au béton frais.

2.12.3. Ecoulement du béton dans les tuyaux de pompage

Kaplan [153] a proposé dans sa thèse un modèle bi-linéaire pour les courbes pression-débit. La première portion de son modèle est décrite entièrement par les propriétés de l'interface (écoulement par glissement), correspondant au moment où la contrainte de cisaillement à l'interface est inférieure au seuil de cisaillement du béton (Figure 2.16.(1)); la deuxième portion intègre les propriétés rhéologiques du béton (écoulement par glissement et par cisaillement du béton) correspondant lorsque la contrainte de cisaillement à l'interface dépasse le seuil de cisaillement du béton et conduit à un cisaillement du béton (Figure 2.16.(2)).

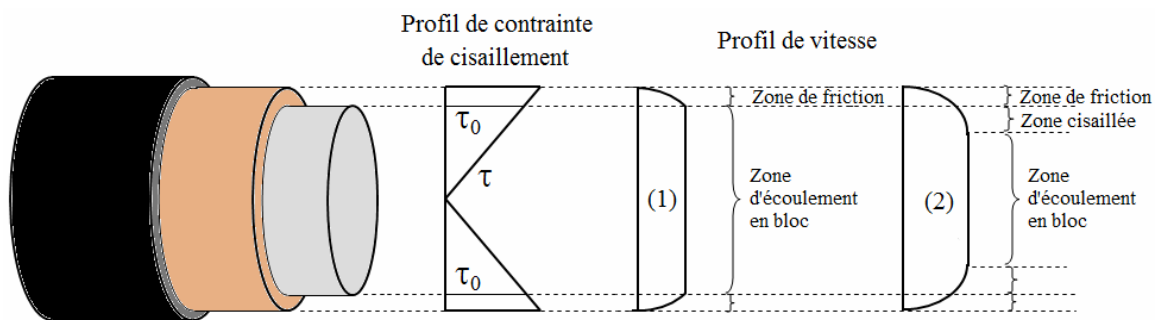


Figure 2.16 : Ecoulement du béton dans les tuyaux de pompage (Selon Kaplan, Extrait de [154])

En revanche, Feys [127] a trouvé l'allure du seuil de cisaillement et de la viscosité représentée sur la Figure 2.17, à travers le tuyau dans le cas d'un modèle de Bingham (à gauche, $\tau_0 = 21,25 \text{ Pa}$, $\mu_p = 21,42 \text{ Pa.s}$) et du seuil de cisaillement et du coefficient d'épaississement de cisaillement "c" pour le modèle de Bingham modifié (à droite; $\tau_0 = 31,22 \text{ Pa}$, $\mu_p = 16,73 \text{ Pa.s}$, $c = 0,367 \text{ Pas}$, avec une perte de pression de $20,571 \text{ kPa / m}$). Il est à noter que pour le modèle de Bingham modifié, l'évolution de la viscosité, qui évolue de façon similaire au seuil de cisaillement, n'est pas représentée.

Selon le même auteur [127], la Figure 2.18 montre une forte augmentation de la vitesse près de la paroi (similaire à une couche de glissement), en particulier dans le cas du modèle de Bingham. Pour le modèle de Bingham modifié, l'effet est moins prononcé en raison de l'influence importante (peut-être surestimée) de l'épaississement par cisaillement près du mur.

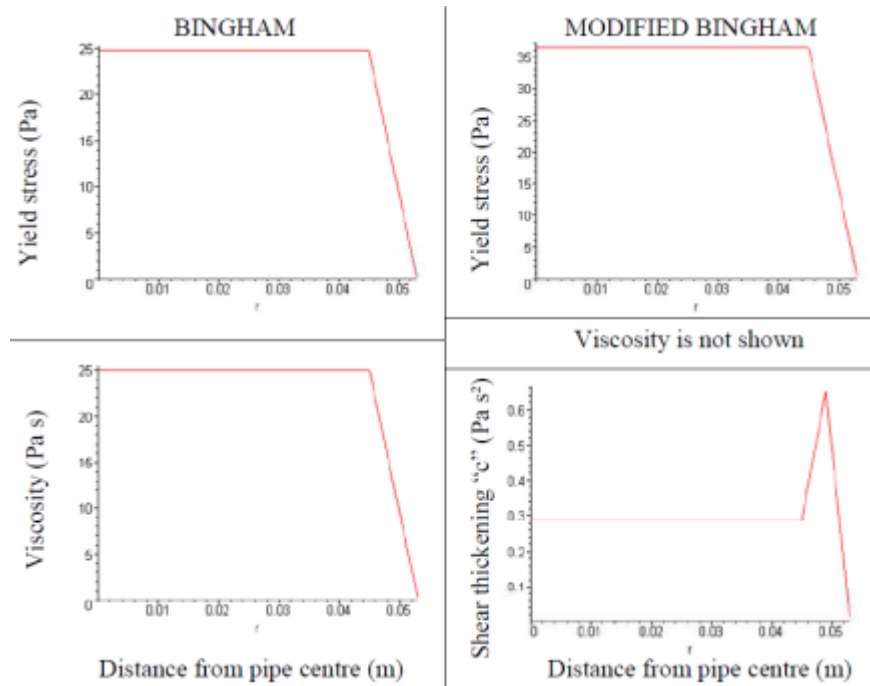


Figure 2.17 : Evolution des paramètres rhéologiques à travers un tuyau de pompage [127].

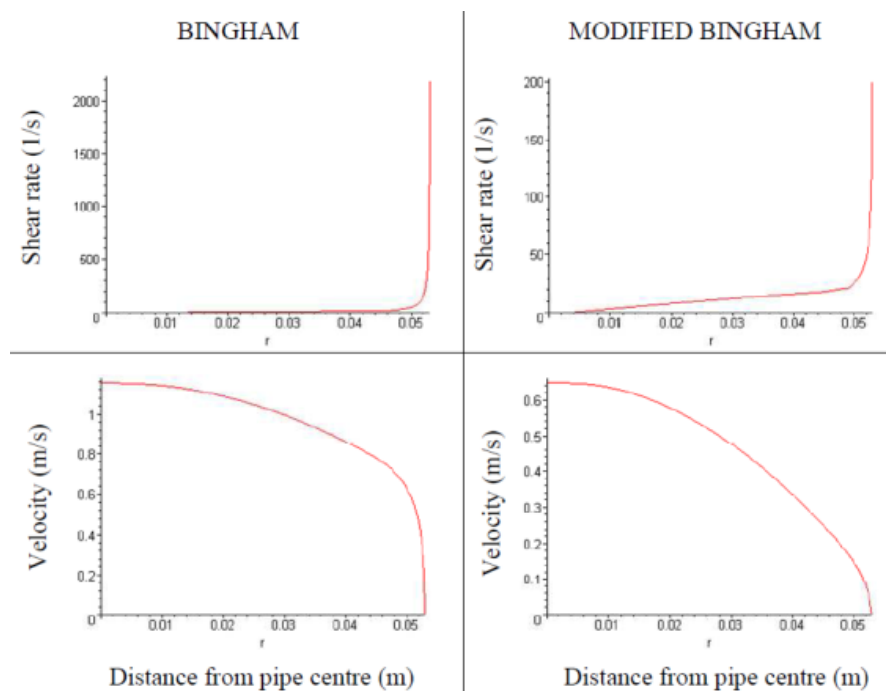


Figure 2.18 : Evolution de la vitesse de cisaillement et de la vitesse moyenne à travers un tuyau de pompage [127].

Cependant, beaucoup de recherches ont été conduites sur les propriétés rhéologiques du béton. Par contre, la tribologie qui concerne l'étude des frottements entre deux systèmes matériels n'a pas bénéficié d'autant d'efforts de

recherche. Elle est davantage reliée au domaine du pompage, qui est jusqu'à maintenant en cours de développement. Pour le cas précis du pompage, lors de l'étude de l'interface ou du frottement entre le béton frais et la paroi du tuyau de pompage, on parlera de propriétés tribologiques du béton ou de loi d'interface. La caractérisation de l'interface pose davantage de problèmes. Il existe malheureusement peu d'essais tribologiques réalisables sur le béton frais destinés à mesurer des paramètres d'interface. Et voici les appareils les plus connus développés par différents auteurs pour mesurer les frottements à l'interface : Appareil de : Best et Lane (1960) [155] ; Appareil de Morinaga (1973) [156] ; Tribomètre de Kaplan (2000) [153] ; Tribomètre de Chapdelaine (2006) [157] et Tribomètre de Ngo (2009) [154].

2.12.4. Influence de la rhéologie sur le pompage

Feys [127], a montré la corrélation entre les pertes de pression à différents débit en fonction de la viscosité déterminée à une vitesse de cisaillement de 10 s^{-1} (Figure 2.19.a). Ainsi, il a comparé les pertes de pression avec la contrainte seuil (Figure 2.19.b). Comme on peut le voir sur ces figures, les pertes de pression se rapportent très bien à la viscosité et aussi, dans une certaine mesure, avec le seuil de cisaillement. Particulièrement aux débits élevés (débit 5), la corrélation entre perte de pression et viscosité est remarquablement élevée. A des débits inférieurs, cette corrélation diminue.

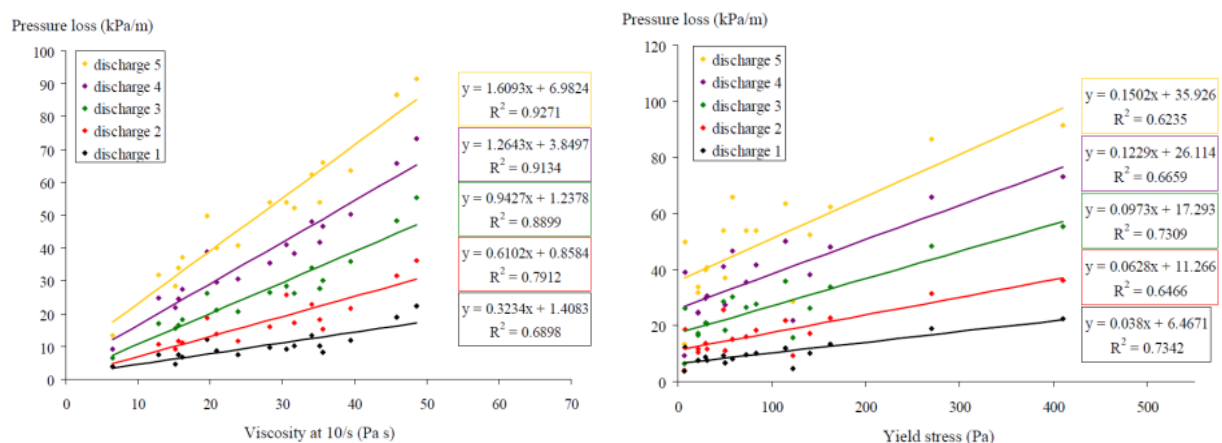


Figure 2.19: Corrélation entre la perte de pression par unité de longueur et a) la viscosité à un taux de cisaillement de $10 / \text{s}$ et b) le seuil de cisaillement [127].

L'analyse de ces résultats (Figure 2.19) indique que la perte de pression est plus sensible à une variation de viscosité qu'à une variation équivalente de la contrainte seuil. Lors du débit le plus élevé (débit 5), une augmentation de la

viscosité entraîne une augmentation de la perte de pression qui est deux fois plus élevée que l'augmentation résultante de la perte de pression provoquée par une augmentation du seuil de cisaillement. Ainsi, les essais spéciaux de thixotropie, effectués par le même auteur [127], indiquent également une plus grande dépendance des pertes de pression sur la viscosité, par rapport au seuil de cisaillement. Cependant, dans la Figure 2.19, une analyse plus poussée a montré que, pour chaque étape de débit séparément, il y a une vitesse de cisaillement optimale à laquelle la viscosité doit être déterminée afin de trouver la meilleure corrélation entre la viscosité et la perte de pression. Ce taux de cisaillement varie entre 12 s^{-1} et 15 s^{-1} , ce qui améliore les corrélations de la Figure 2.19.a) avec 1% ou 2%. En conséquence, non seulement la viscosité est un paramètre important, mais aussi l'épaississement de cisaillement possible, surtout dans le BAP influence les pertes de pression [127]. Toutefois, il est à signaler que le volume du béton échantillonné pour le rhéomètre est d'environ 12,5 l. Par contre, la quantité totale du béton pompé lors des essais réguliers de pompage est d'environ $1,25 \text{ m}^3$. En conséquence, la quantité échantillonnée de béton représente 1% du volume total de béton et on peut douter que cet échantillon soit entièrement représentatif.

2.12.5. Influence du pompage sur les propriétés rhéologiques

Il est rapporté par Feys [127], que pour un nombre capillaire faible (défini par le paragraphe 2.6), les bulles restent sphériques et la résistance à l'écoulement augmente. Par contre, pour un nombre capillaire élevé, les bulles se déforment pendant l'écoulement et la résistance à l'écoulement diminue. Plus la quantité de bulles est grande, plus l'influence est grande. Evidemment, le seuil de cisaillement du béton est déterminé à des faibles contraintes de cisaillement où les bulles restent sphériques. Par contre, lors de la détermination de la viscosité, les bulles sont déformées en raison des contraintes de cisaillement élevées. Par conséquent, une augmentation significative des bulles d'air (petites) provoque une augmentation du seuil de cisaillement et une diminution de la viscosité.

En outre, comme le béton (ou la pâte de ciment) est soumis à des taux de cisaillement élevés dans les tuyaux, les grosses bulles se divisent en autres plus petites, ce qui provoque une diminution de la taille moyenne des bulles et donc une augmentation du seuil de cisaillement. Comme les bulles sont assez petites et la contrainte seuil augmente, les bulles ne s'échappent plus. L'augmentation de la

teneur en air réduit l'effet d'épaississement, car cette partie compressible de la pâte de ciment peut absorber une certaine contrainte supplémentaire. Dans le rhéomètre, il a été constaté que l'épaississement diminue, mais cela peut être dû à la diminution du nombre capillaire dans la plage de vitesse de cisaillement du rhéomètre [127].

2.13. Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté les notions de base de la rhéologie tout en mettant en évidence l'influence des additions minérales, notamment les fines calcaires, sur les propriétés rhéologiques de différents mélanges cimentaires. On a exposé quelques modèles rhéologiques destinés à décrire le comportement des suspensions cimentaires.

En fait, la rhéologie peut nous fournir des informations précieuses sur les propriétés du béton frais, la façon d'obtenir une optimisation d'un mélange et la façon de l'atteindre en utilisant les rhéogrammes. Sinon, l'optimisation est en grande partie basée sur le sentiment, comme dans le cas des essais classiques. Contrairement aux mesures rhéométriques, le sentiment ne nous permet pas de faire une comparaison entre un travail et un autre. Ils peuvent seulement nous indiquer si l'écoulement de la matière est possible ou non, mais pas comment. Par ailleurs, les effets de nombreuses additions minérales ainsi que les constituants de base du béton frais ont été révélés dans des rhéogrammes. Ainsi, la rhéologie peut nous aider à savoir où on est, où aller et comment y aller.

CHAPITRE 3

MATERIAUX ET ESSAIS

3.1. Introduction

Pour un travail de recherche expérimental, il est primordial de bien définir le programme expérimental, parce que les résultats des essais dépendent principalement de ce dernier. Cependant, le protocole d'essais mis en œuvre dans notre étude s'intéresse surtout à l'influence des sables concassés et les fines calcaires de concassage sur les propriétés rhéologiques et mécaniques à différentes échelles.

Dans ce chapitre, nous allons présenter le protocole expérimental et les descriptions des matériaux utilisés (gravier, sables, fines, ciment et superplastifiant).

La combinaison de ces constituants nous a permis de préparer des suspensions à différentes échelles de grains de façon à mettre en évidence l'influence de la phase solide, dite « phase dispersée », sur la phase fluide, dite « phase continue ». On distinguera alors trois échelles d'étude :

- Le coulis de ciment est une suspension des particules de ciment et de fines dans l'eau ;
- Le mortier est une suspension de particules de sable dans le coulis ;
- Le béton est une suspension de particules de gravier dans le mortier ;

Chaque suspension représente une échelle dimensionnelle, la plus petite échelle est celle du coulis de ciment et la plus grande est celle du béton.

A cet égard, le protocole d'essais comprend les séquences suivantes :

- lavage des sables de concassage et récupération de leurs fines ;
- préparation des échantillons de sable contiennent des pourcentages de fines allant de 5 jusqu'à 20% du leur poids à partir de la fraction lavée ;

- procéder aux essais physiques et chimiques sur les sables étudiés et les fines calcaires de concassage;
- procéder aux mesures rhéologiques et mécaniques sur coulis et mortiers ;
- procéder aux mesures rhéologiques et mécaniques sur bétons et leurs mortiers équivalents.

Pour la formulation du coulis, il y aura deux méthodes possibles :

- Soit par tamisage du mortier frais au tamis de 80 μm . Mais dans ce cas, la pâte et les fines adhérant aux grains du sable, qui ne passent pas au tamis, ne seront pas prises en compte. Donc, cette méthode est déconseillée.
- Ou bien déduit directement de la composition du mortier, en enlevant simplement la fraction sableuse : 0,080/5 mm sans avoir recours au tamisage. Dans notre travail, nous allons opter pour la deuxième méthode.

Cependant, le critère principal visé dans la composition du mortier est l'obtention des résultats le plus possible exploitables et fiables en évitant le blocage au cours des essais rhéométriques. Cette composition consiste à confectionner un mortier avec une partie de sable et une partie de ciment avec une demi-partie d'eau. Dans cette composition nous allons varier les pourcentages des fines dans le sable. En revanche, pour étudier l'effet de la concentration volumique du sable, nous allons opter pour deux et même trois parties (similaire à la composition du mortier normalisé) du sable avec une partie de ciment.

En ce qui concerne le béton, nous avons utilisé la méthode de Dreux et Festa [46] en visant des caractéristiques d'un béton pompable avec un affaissement de 10 cm. Sur la base de cette composition, nous allons déterminer la composition du mortier équivalent selon la méthode de Schwartzentruber et Catherine [144].

Le rapport eau/ciment (E/C) correspond au rapport pondéral de l'eau par rapport au ciment. Le pourcentage de fines est le dosage pondéral en extrait sec de fines par rapport au poids total du sable. Sp/C est le rapport pondéral du dosage de superplastifiant et du dosage en ciment. \emptyset_s est la concentration volumique en sable.

3.2. Caractérisation des matériaux et malaxage des mélanges

3.2.1. Présentation des matériaux utilisés

Dans cette étude et pour la confection des bétons et mortiers, nous avons utilisé un ciment (C) Portland ordinaire de type CEM I 52,5 avec une surface spécifique Blaine de 359 m²/kg pour tous les mélanges de mortier et béton. La composition chimique du ciment est résumée dans le Tableau 3.1. Le superplastifiant (Sp) utilisé est : l'éther polycarboxylique modifié, appelé SKY 537 de Glenium. Il contient 20% d'extrait solide. Tous les dosages de Sp se réfèrent aux solutions aqueuses et non à l'extrait sec. Ainsi, le Sp a été mesuré en pourcentage de masse de ciment.

Par contre, tous les résultats du coulis font partie des travaux antérieurs dont nous avons utilisé un ciment Portland artificiel nommé CPA-CEMI - 42,5 provenant de la cimenterie ACC M'Sila. Il s'agit d'un ciment résistant aux sulfates CRS. Quant à l'adjuvant utilisé pour les coulis, c'était un superplastifiant réducteur d'eau (SRE) fabriqué par la société Granitex-NP et commercialisé sous le nom de « MEDAPLAST SP 40 », il est à base de copolymère formaldéhyde naphthalène sulfonaté, sa plage normale d'utilisation est fixée par la fiche technique de 0,6% à 4% (en extrait sec) du poids de ciment. Il est sous forme liquide de couleur marron et de densité vaut 1,21, avec un extrait sec de 40%.

L'eau de gâchage utilisée pour la confection du mortier est une eau potable de robinet, exempte d'impuretés. Conforme à la norme NFP 18-303 et EN 1008.

Tableau 3.1 : Composition chimique de ciment.

Composition chimique	Pourcentage en masse (%)
Perte au feu	1.63
Trioxyde de soufre	2.80
Dioxyde de silice	20.23
Oxyde ferrique	2.35
Oxyde de magnésium	3.88
Oxyde d'aluminium	4.29
Alcalis équivalents	0.58
Oxyde de calcium	63.67
Résidu insoluble	0.39

Par ailleurs, trois sables concassés de nature minéralogique différente ont été utilisés : deux sables calcaires (LS et LS') et un sable siliceux (SS). LS et LS' proviennent respectivement de djebel Mongorno-Médéa et d'El Hachimia-Bouira. Ce sont en calcite majoritaire avec plus de 70% de CaCO_3 . L'assise utile des gisements correspond à un calcaire dur, massif, gris foncé micritique en banc de 6 à 8 m. Ce calcaire est découpé par de nombreuses diaclases de calcite dont l'épaisseur moyenne est de 5 à 10 mm. Le troisième sable concassé : SS, est de nature siliceuse avec presque de 70% de SiO_2 , provient de la carrière de Fréjus en France. Cependant, pour comparer les différents résultats obtenus avec un sable couramment utilisé, nous avons fait recours à un autre type de sable : il s'agit d'un sable siliceux roulé (SR). Les Figures 3.1.a) et b) montrent des photos de sables de concassage LS et SS.

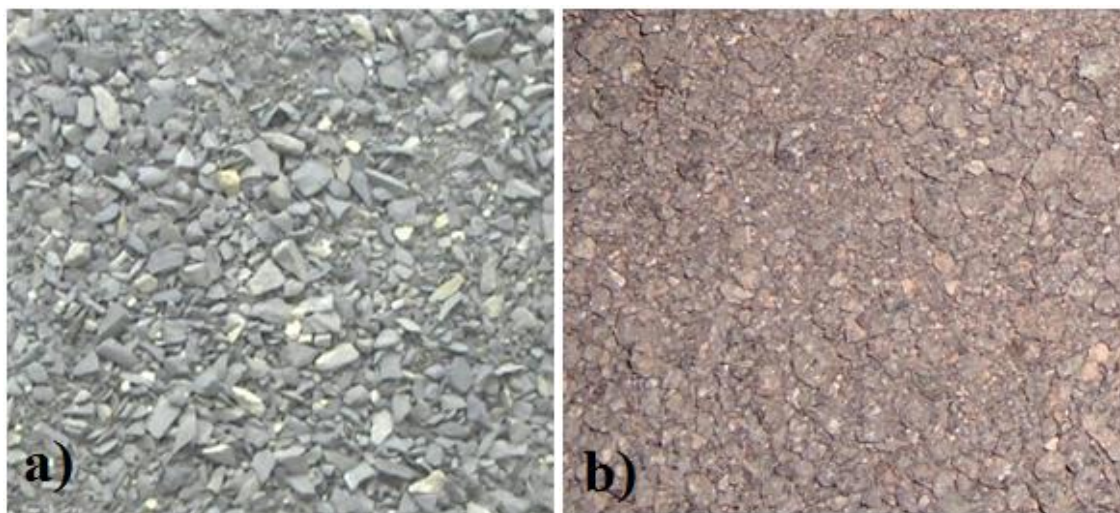


Figure 3.1 : Photos des sables de concassage a) calcaire (LS) et b) siliceux(SS).

Il est à noter que le sable calcaire de concassage provient de Mongorno est notre sable principal, dont nous avons récupéré les fines calcaires. Dans le manuscrit, il sera désigné par LS tout court. Quant au deuxième sable calcaire d'El Hachimia, on le désigne par LS'. Le Tableau 3.2 illustre l'analyse chimique de deux sables de concassage calcaire et siliceux. Par ailleurs, le Tableau 3.3 montre les caractéristiques physiques de ces derniers.

Tableau 3.2 : Analyses chimiques de SC : calcaire et siliceux.

Constituant (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Ca O	K ₂ O	Na ₂ O	P.F
LS	2,50	2,63	0,58	70,69	-	-	24,77
SS	69,77	9,10	2,67	0,22	6,41	0,34	-

Les courbes granulométriques de ces sables selon la norme européenne EN 933.1, sont représentées sur la Figure 3.2. Les trois SCs ont été sélectionnés pour avoir des courbes granulométriques similaires avec le même module de finesse qui est égal, selon la norme européenne EN 933.2, à $3,3 \pm 0,1$. Les SCs ont été lavés pour éliminer les fines de concassage : désigne, selon la norme NF P 18-540, l'ensemble des grains passant au tamis de 80 μm . En ce qui concerne le SR, son module de finesse est égal à 1,88.

Tableau 3.3 : Caractéristiques physiques des sables concassés : LS et SS.

	LS	SS
Forme	Irrégulière	Irrégulière
Couleur	Grise foncée	Marron orangée
Masse volumique absolue (t/m ³) selon NF P18-545	2,60	2,63
Masse volumique apparente (t/m ³) selon NF P18-545	1,65	1,65
Coefficient d'absorption (%) selon NF P18-545	2,1	4,5

Les fines récupérées par le LS, ont une surface spécifique BET égale à 1470 m²/kg. Des images de microscopie électronique à balayage (MEB) de ces dernières sont présentées sur la Figure 3.3, pour montrer l'état et les caractéristiques de forme et de surface de ces fines. Les investigations par MEB révèlent la forme angulaire et irrégulière des grains de fines. Ainsi, elles contiennent une fraction significative des particules de l'ordre de 10 μm et moins. En revanche, les courbes granulométriques du ciment et des fines ont été établies à l'aide d'un instrument de diffraction laser Malvern (ASTM E2834-12) comme il est montré sur les Figures 3.4 et 3.5.

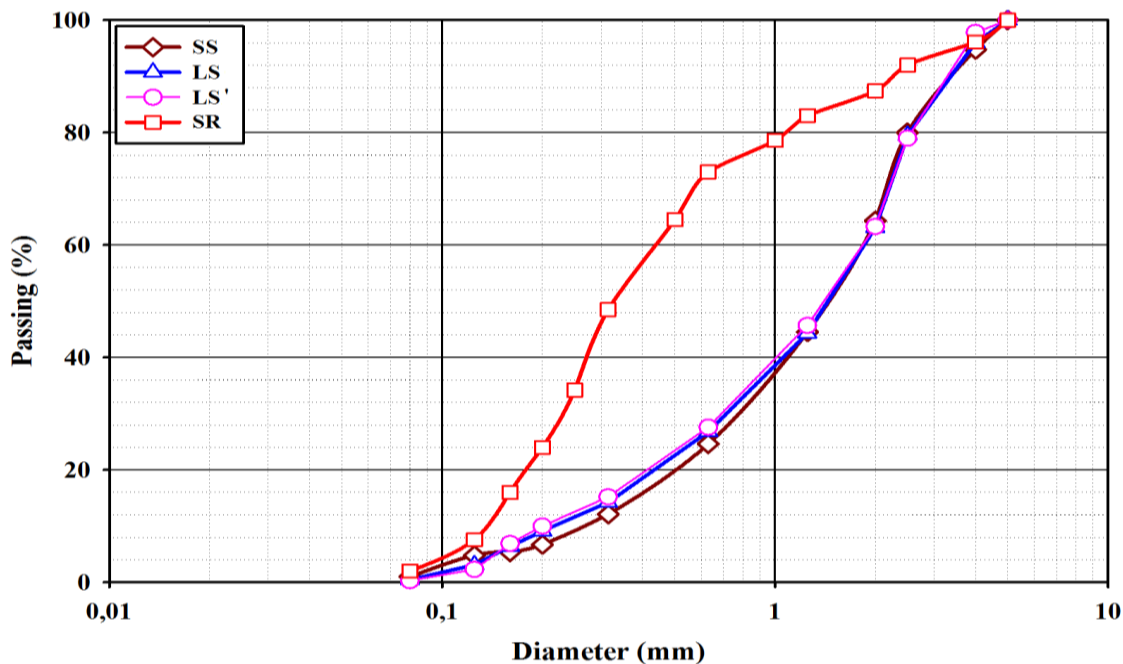


Figure 3.2 : Courbes granulométriques de différents sables étudiés.

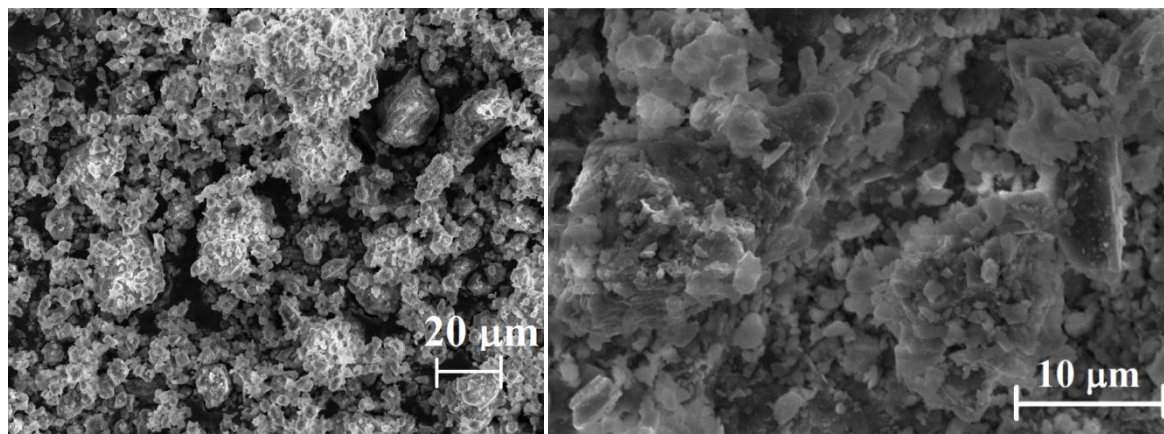


Figure 3.3 : Images MEB des fines calcaires de concassage.

Les fines présentent une distribution bimodale. Elles ont une population de fines aux alentours de $1,8 \mu\text{m}$. Forte possible qu'elle corresponde à la taille des cristaux de la roche mère. Puis, on peut voir apparaître une deuxième population aux environs de $40 \mu\text{m}$ qui, cette fois-ci, semblerait correspondre au mode de production.

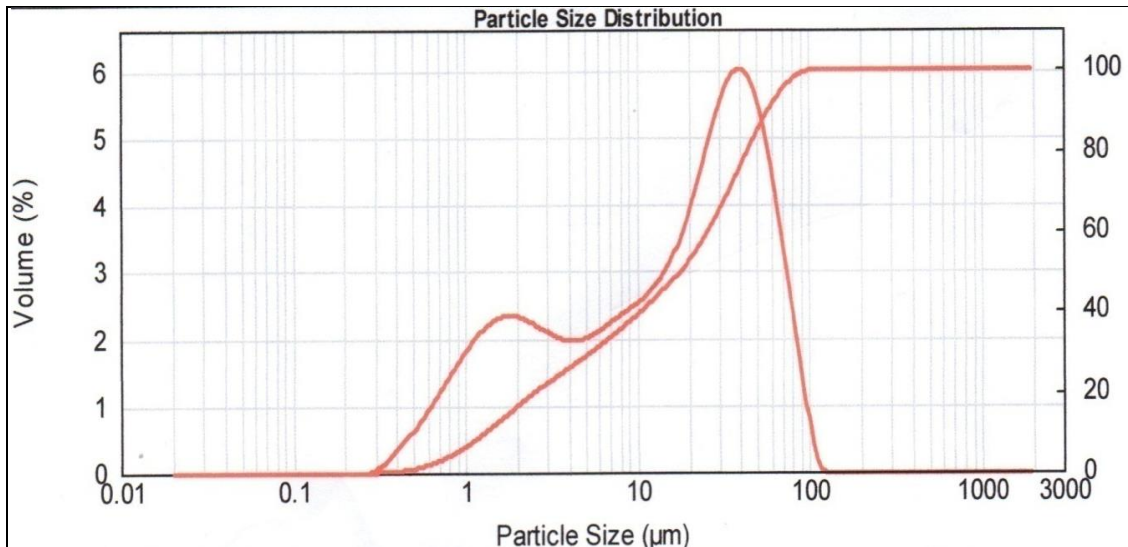


Figure 3.4 : Granulométrie des fines par laser et distributions granulométriques cumulées.

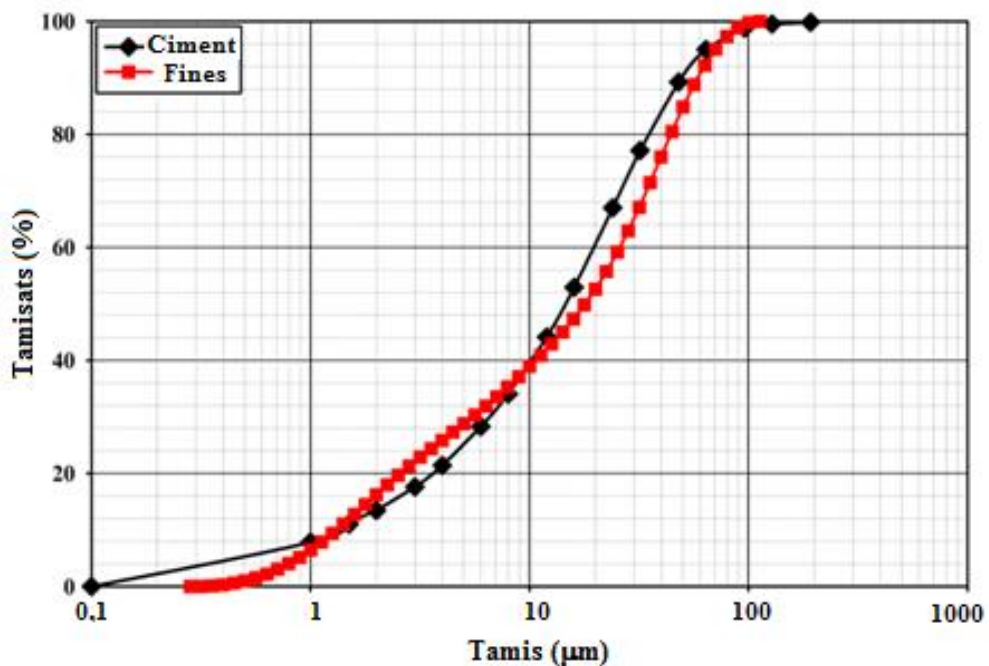


Figure 3.5 : Courbes granulométriques du ciment et des fines calcaires.

Cinq classes du sable sont utilisées dans cette étude :

Le sable lavé, considéré contient 0% de fines (Figure 3.1.a), est désigné par S1. Ainsi, les SC contenant 5, 10, 15 et 20% de fines sont désignés respectivement : S2, S3, S4 et S5.

En revanche, nous avons utilisé un gravier silico-calcaire, de classe 6/20. Sa masse volumique réelle vaut $2,51 \text{ t/m}^3$, ayant un coefficient d'absorption est égal 1,8% et une compacité égale à 0,61.

3.2.2. Préparation des matériaux

La préparation des matériaux est une étape primordiale pour avoir la quantité suffisante et surtout adéquate pour entamer les essais prévus et garantir la continuité du programme initialement tracé avec les mêmes matériaux.

Tout d'abord, on fait le prélèvement d'échantillon en gros lot au niveau de la station de concassage, puis l'échantillon est réduit au niveau du laboratoire. Ensuite, le lavage des sables concassés avec fines (bruts) sous l'eau du robinet en procédant au tamisage à travers le tamis de 80 μm . Les fines récupérées sont ensuite séchées pour les ajouter au sable lavé. Cette séquence est très importante pour la récupération des fines et la préparation de cinq classes de sables qui seront la base de tous les essais.

3.3. Description des mélanges et désignation

3.3.1. Malaxage des mélanges

La préparation des mélanges (suspension de fines, coulis, mortier et béton) est très importante car l'histoire de cisaillement d'un mélange influencera son comportement rhéologique. Dans ce cas, nous voulions avoir la même histoire de cisaillement afin de pouvoir comparer le comportement propre à différentes échelles. Tous les mélanges sont préparés dans les mêmes conditions dans une salle maintenue à une température de $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}$ et à une humidité relative supérieure ou égale à 50 %. Pour le coulis et le mortier, le mélange doit être malaxé pendant 4 minutes, au moyen d'un malaxeur (140 et 285 tr/min) conformément aux prescriptions de la norme EN 196-1, comme suit :

a) Préparation :

- Régler la pale du malaxeur à 4.5 mm du bol.
- Pour les premiers mélanges, il est conseillé de mouiller le récipient du malaxeur puis de l'essuyer afin qu'il présente la même humidité que les gâchées courantes.

b) Humidification :

- Introduire le sable avec une quantité d'eau égale à l'absorption du sable augmentée de 1 %, afin d'éviter la perte des fines.
- Malaxer 2 minutes à petite vitesse.

- Laisser reposer pendant 5 minutes en prenant soin de protéger le récipient contre l'évaporation.

c) Malaxage :

- Introduire l'eau en premier dans la cuve du malaxeur ; y verser ensuite le ciment ; aussitôt après, mettre le malaxeur en marche à vitesse lente.
- Après 30 s de malaxage introduire régulièrement le sable déjà préparé (dans le cas de mortier) pendant les 30 s suivantes. Mettre alors le malaxeur à sa vitesse rapide et continuer le malaxage pendant 30s supplémentaires.
- Arrêter le malaxeur pendant 1 min 30 s. Pendant les 15 premières secondes, racler les bords du récipient.
- Reprendre ensuite le malaxage à grande vitesse pendant 60 s.

d) Suivi rhéologique

- Pour les suivis rhéologiques, remettre le mortier dans le bol du malaxeur et le protéger de l'évaporation en attendant la prochaine mesure.
- Remalaxer 15 secondes à petite vitesse avant chaque mesure.

Ces opérations de malaxage sont récapitulées dans le Tableau 3.4 :

Tableau 3.4 : Récapitulation des opérations de malaxage [158].

Opérations	Introduction de l'eau + adjuvant	Introduction du ciment		Introduction du sable		Raclage de la cuve		
Durée des opérations (s)			30	30	30	15	75	60
Etat du malaxeur	Arrête		Vitesse lente		Vitesse rapide	Arrête		Vitesse rapide

En revanche, en ce qui concerne le béton, nous avons utilisé un malaxeur pour béton selon la procédure suivante :

- Introduire le gravier, le sable y compris les fines et le ciment.
- Malaxage à sec pendant 1 min
- Introduire l'eau, éventuellement avec le Sp, pendant 1min au cours de malaxage.
- Continuer le malaxage pendant 2 min 30 secondes.

3.3.2. Suspension de fines

La suspension de fines (SF) se compose de l'eau et de fines calcaires avec ou sans adjuvant. Ces suspensions constituent le fluide saturant des coulis de ciment. Elles sont désignées par SF pour les suspensions sans Sp et par SF° pour les suspensions avec Sp, comme il est illustré dans le Tableau 3.5.

3.3.3. Coulis de ciment

Le coulis de ciment est une suspension des particules de ciment et fines dans l'eau, avec un rapport E/C = 0,5. Cinq dosages en fines ont été utilisés pour étudier leur effet sur les caractéristiques rhéologiques : 0, 15, 30, 45 et 60 % en extrait sec par rapport à la masse du ciment. Le Tableau 3.5 illustre la désignation des coulis de ciment.

Tableau 3.5 : Désignations des coulis de ciment et sa suspension de fines correspondante.

Fines/Ciment (%)	0	15	30	45	60
Désignation des coulis *	CC1	CC2	CC3	CC4	CC5
Suspension de fines correspondante*	SF1	SF2	SF3	SF4	SF5

* : On ajoute (°) devant la désignation des coulis et des SF avec 1% d'adjuvant.

3.3.4. Mortier

Dans le cas du mortier, nous avons étudié l'effet du type de sable (LS1 ; LS2 ; SS ; RS), du rapport sable/ciment (1 ; 2 ; 3), la teneur en fines dans le sable (0 ; 5 ; 10 ; 15 ; 20%), du rapport eau/ciment (0,30 ; 0,35 ; 0,40 ; 0,45 ; 0,50) et aussi le dosage en superplastifiant sur ses propriétés. Par conséquent, la désignation du mortier sera un peu longue si nous faisons paraître tous ces paramètres. A cet effet, nous allons montrer seulement les paramètres variables en commençant toujours par la lettre "M" qui désigne "mortier" (Tableau 3.6).

Cependant, il est à noter que les pourcentages de remplacement partiel du sable concassé par les fines calcaires ont été choisis afin de balayer les différentes catégories de sables associés aux spécifications normatives des agrégats de mortier et de bétons (EN-12620, 2004 «Granulats pour béton» et (EN-13.139, 2004 «Granulats pour mortier»). En fonction de la teneur en fines (0, 5, 10, 15 et 20%), les sables sélectionnés correspondent aux cinq catégories suivantes: f3, f5, f10, f16 et f22.

Par contre, dans le cas du mortier de béton équivalent (MBE), la désignation sera commencée toujours par "MBE" (Tableau 3.7).

Tableau 3.6 : Compositions et désignations des mortiers.

Désignation *	S/C	Fines/S (%)	Fines (g)	LS (g)	SS (g)	SR (g)
M1L0	1	0	0	1500		
M1L5	1	5	75	1425		
M1L10	1	10	150	1350		
M1L15	1	15	225	1275		
M1L20	1	20	300	1200		
M2L0**	2	0	0	3000		
M3L0**	3	0	0	4500		
M1S0	1	0	0		1500	
M1S5	1	5	75		1425	
M1S10	1	10	150		1350	
M1S15	1	15	225		1275	
M1S20	1	20	300		1200	
M1R0	1	0	0			1500

* : On ajoute (°) devant la désignation des mortiers avec Sp.

** : Pour les mortiers avec fines, on ajoute le pourcentage après le L

3.3.5. Béton

Il s'agit de formuler un béton de structure présentant les spécifications suivantes : affaissement 10 ± 1 cm (béton pompable), une résistance en compression à 28 jours de 25 MPa, un dosage en ciment de 350 kg/m^3 et un rapport E/C vaut 0,5. Le Tableau 3.7 récapitule les compositions des bétons et leurs MBEs, ainsi que les mortiers étudiés.

Selon de Larrard [159], pour l'ajustement final de la formule, si seule une propriété n'est pas satisfaite, on peut utiliser une technique directe pour ajuster la formule, sans intervenir sur les autres propriétés. Ce cas concerne les problèmes relatifs au seuil de cisaillement (ou à l'affaissement), à la viscosité plastique et à la résistance à la compression :

– Si le seuil de cisaillement doit être changé, la quantité de superplastifiant peut être modifiée à quantité d'eau constante. L'effet sera quasi imperceptible sur les deux autres propriétés ;

– Si la viscosité plastique n'est pas bonne, le volume de pâte doit être ajusté (à rapport eau/ciment constant), et le superplastifiant dosé une nouvelle fois pour garder un affaissement constant (ou le seuil de cisaillement) ;

– Enfin, si la résistance est mauvaise, mais les propriétés rhéologiques correctes, la quantité de liant doit être changée à quantité d'eau constante. Selon la règle de Lyse, l'effet sur des propriétés du béton frais sera mineur [159].

En ce qui concerne la désignation du béton, elle sera commencée toujours par "B", qui signifie "béton", suivie par un chiffre qui indique la teneur en fines dans le sable (de 1 à 5). Il est à noter que tous les bétons sont à base de SS, sauf pour le béton témoin qui est à base de sable roulé. Dans ce dernier cas, nous le désignons par "BR" (Tableau 3.7).

Tableau 3.7 : Formulations retenues pour les bétons et leurs MBEs.

	Nom	Ciment (kg/m ³)	Gravier (kg/m ³)	Sable (kg/m ³)	F/S (%)	Eau (kg/m ³)	E/C	Adj/C (%)
Mortiers de béton équivalent	MBE0	525	-	1339,24	0	175	0,5	0,8
	MBE5		-	1272,28	5			1,1
	MBE10		-	1205,32	10			1,6
	MBE15		-	1138,36	15			2,2
	MBE20		-	1071,39	20			2,8
	MBE-SR		-	1339,24	0			0,8
Bétons associés aux MBE	B0	350	953,1	850,7	0	175	0,5	0,8
	B5				5			1,1
	B10				10			1,6
	B15				15			2,2
	B20				20			2,8
	BR				0			0,8

3.4. Méthodes d'essais

Les essais réalisés sur les matériaux sont les essais physiques, chimiques et rhéologiques. Ces essais ont été réalisés dans les laboratoires de : GeoMaterial de l'université de Blida, LME et le Hall technologique de l'université de Médéa, LMMC de l'université de Boumerdès, L2MGC de l'université de Cergy Pontoise et Geomac de l'université de Liège.

3.4.1. Essais effectués sur ciment et fines

3.4.1.1. Essai de demande en eau

La compacité des poudres ne peut pas être faite à sec comme dans le cas des sables et des gravillons. En effet, il est indispensable de prendre en compte la floculation générée en présence d'eau, et l'effet défloculant des superplastifiants ou plastifiants qui sont utilisés dans le béton. L'équipe de LCPC a donc développé un essai de demande en eau dont le principe est expliqué dans le paragraphe suivant [160].

a) Principe de l'essai

On malaxe une masse P_p de poudre avec une quantité d'eau croissante. La masse d'eau P_e juste nécessaire pour faire passer le mélange d'un état de terre humide à un état de pâte homogène est considéré comme la quantité remplissant la porosité de l'empilement des grains de la poudre. Dans ce cas, la compacité (ou demande en eau) de la poudre est déterminée par l'Equation (3.1) :

$$C = \frac{1000}{1000 + d * \frac{P_e}{P_p}} \quad (3.1)$$

Où : d est la masse volumique de la poudre en kg/m^3 .

La difficulté de la méthode réside dans la reconnaissance visuelle du passage à la pâte homogène. Les photos de la Figure ci après présentent les différents états obtenus, en général, lors de l'essai de demande en eau sur un ciment. On passe d'un matériau de type terre humide, à un état de petites boulettes brillantes, puis brusquement, pour une petite quantité d'eau supplémentaire, à une pâte homogène. Lors du malaxage, cette pâte est séparée en trois morceaux. Dès l'arrêt de la pale, ces morceaux s'écoulent et n'en font plus qu'un, dès que l'on tapote la cuve du malaxeur, comme il est montré sur la Figure 3.6. Dans ce cas, la mesure ne présente aucune difficulté d'identification.

b) Conduite de l'essai

La méthode d'essai suivante a été adoptée par l'équipe de LCPC :

- préparer une réserve d'eau de robinet ajustée à 20°C.

- une masse de poudre $P_p = 350$ g est malaxée dans un malaxeur à mortier avec une certaine quantité d'eau estimée a priori par l'équation de la demande en eau et, le cas échéant, du superplastifiant ou du plastifiant. L'eau et l'adjuvant sont introduits en premiers. Le cycle de malaxage est le suivant: une minute à petite vitesse, quinze secondes d'arrêt pour racler la cuve à l'aide de la pale, puis une minute à grande vitesse;
- tout en maintenant le malaxage à grande vitesse, l'eau est ajustée à l'aide d'une pissette dont on a fait la tare. Chaque ajout est séparé d'une minute. Lorsque la pâte homogène est obtenue, le poids de la pissette donne directement la quantité d'eau ajoutée;
- l'essai est reproduit avec une quantité d'eau légèrement inférieure à celle totale obtenue lors du premier essai;
- la compacité de la poudre est calculée à partir de la moyenne d'au moins deux mesures, pour lesquelles la quantité d'eau ajoutée à l'aide de la pissette est inférieure à 5g. A noter que P_e , dans l'Equation, représente l'eau ajoutée plus l'eau contenue dans l'adjuvant.



Figure 3.6 : Passage de l'état de boulettes à l'état de pâte homogène.

3.4.1.2. Calcul des coefficients de distributions granulométriques

Selon Wilun (1972), cité par [161], les distributions granulométriques peuvent être représentées au moyen de différents paramètres qui servent à décrire les distributions des sables et fillers. Ces paramètres sont calculés à partir des distributions obtenues en diffraction laser qui semble convenir au mieux pour l'ensemble des fillers (meilleure dispersion sans rupture des particules) et par analyse granulométrique pour les sables.

L'analyse granulométrique des fines a été établie à l'aide d'un instrument de diffraction laser Malvern selon la norme ASTM E2834-12 (Figure 3.4). Le même essai nous permet d'estimer la valeur de la surface spécifique. Par contre, la courbe granulométrique et la surface spécifique du ciment ont été données par fiche technique (Figure 3.5).

a) Le coefficient d'uniformité C_U

Comme son nom l'indique, C_U détermine l'uniformité de la distribution en calculant le rapport entre les diamètres à 60 % et 10 % de passant (Equation (3.2)). Il est ensuite possible de classer les sables et les fillers en fonction de l'aspect de leur distribution. En effet, un $C_U \leq 5$ rend compte d'une distribution resserrée (c'est-à-dire une plage de diamètres faibles) alors qu'un coefficient d'uniformité supérieur à 15 rend compte d'une distribution étalée sur une plage de diamètres importants.

$$C_U = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (3.2)$$

b) Le coefficient de courbure C_C

Il s'agit d'une représentation de la forme de la courbe granulométrique et qui permet de détecter la prédominance des classes extrêmes. En effet, si pour un coefficient de courbure (Equation (3.3)) compris entre 1 et 3, la distribution est bien graduée, des valeurs sortant de cette plage montrent la prédominance d'une classe. Il y a donc un excès de fines pour un $C_C < 1$ et un excès de particules de diamètres importants pour un $C_C > 3$.

$$C_C = \frac{d_{30}^2}{d_{10} \cdot d_{60}} \quad (3.3)$$

3.4.2. Essais effectués sur sable

3.4.2.1. Equivalent de sable

Le procédé de l'essai consiste à mettre la propreté du sable en évidence, l'essai a été effectué selon la norme NA456.

3.4.2.2. Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique des sables a été faite selon la norme européenne EN 933.1 (Figure 3.2). Ainsi, le module de finesse a été mesuré selon la norme européenne EN 933.2.

3.4.2.3. Masse volumique

La masse volumique absolue et apparente des sables a été mesurée selon la norme NF P18-545 (Tableau 3.3). Il est à noter que la mesure de la masse volumique pour les sables concassés a été réalisée avec fines.

3.4.2.4. Coefficient d'absorption

Le coefficient d'absorption des sables a été mesuré selon la norme *NF P18-545* (Tableau 3.3).

3.4.2.5. Facteurs de morphologie

Pour étudier la morphologie de tous les sables utilisés dans ce travail de recherche, nous avons calculé les facteurs de morphologie comme il est indiqué sur le Tableau 3.8 et la Figure 3.7.

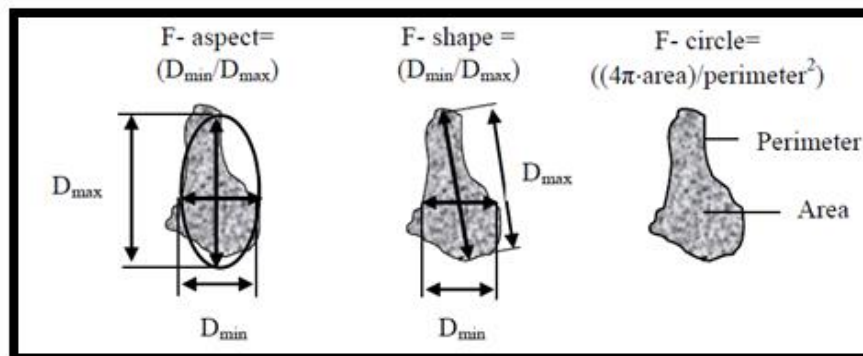



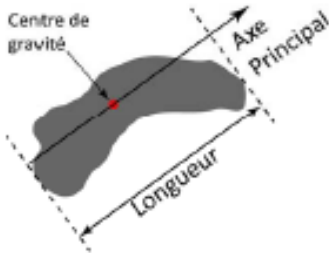
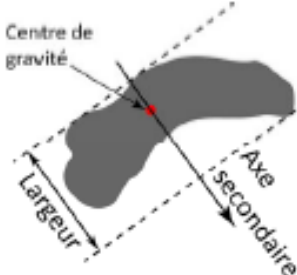


Figure 3.7 : Définitions des facteurs d'aspect, de forme et de circularité [17].

3.4.2.6. Angle de frottement

Une méthode simple a été développée pour estimer l'angle de frottement des différents granulats fins, elle est basée sur un concept de base de mécanique de sol. Selon les indications de la Figure 3.8, on fait passer un échantillon de 1500 à 2000 grammes de sable de travers un entonnoir d'une taille comparable à celle de la pile formée. Selon le mécanisme de la stabilité de pentes, l'angle maximum constitué par la pile de sable (angle du repos) est considéré comme constante et

corrélé avec l'angle de frottement des particules. On doit prendre trois mesures pour chaque échantillon et la valeur moyenne sera employée comme angle de frottement du sable étudié [162].

Tableau 3.8 : Principaux paramètres morphologiques [161].

Paramètre	Schéma	Description
Diamètre équivalent (μm)		Diamètre du cercle ayant la même aire que la particule
Longueur (μm)		Longueur de la particule en fonction de l'axe principal (axe de faible rotation)
Largeur (μm)		Largeur de la particule en fonction de l'axe secondaire (axe de forte rotation)
Périmètre (μm)		Périmètre réel de la particule
Aire (μm^2)		Aire réelle de la particule

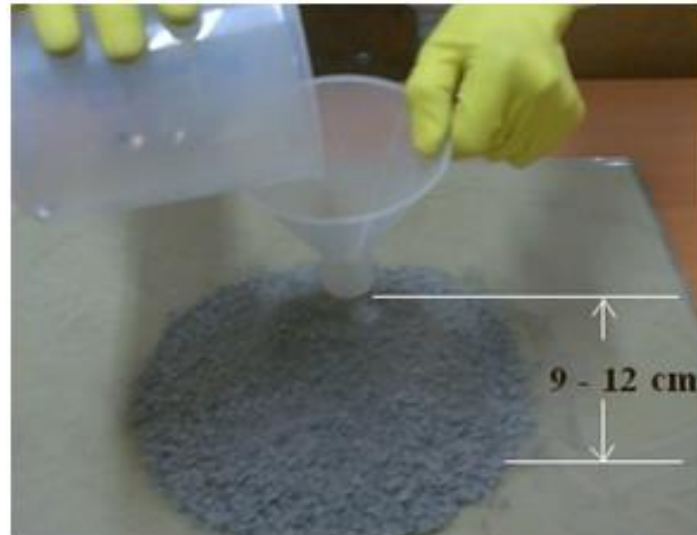


Figure 3.8 : Détermination de l'angle de frottement.

3.4.3. Essais effectués sur coulis de ciment

3.4.3.1. Essai au cône de Marsh

a) Objectif de l'essai

Le cône de Marsh, s'appelle aussi viscosimètre de Marsh, est utilisé généralement pour déterminer l'indice de fluidité des boues de forage et également des coulis de ciment. Il s'agit de suivre le temps d'écoulement nécessaire pour récupérer un volume donné de coulis à travers une ouverture donnée selon la norme européenne EN 445. Ce temps d'écoulement mesuré est lié à la "fluidité" du matériau testé. Plus le temps d'écoulement est long, plus la fluidité est faible. Il appartient à la famille des tests d'orifice comme le V-funnel ou l'Orimet [163].

b) Principe de l'essai

Il s'agit de mesurer la rapidité d'écoulement du coulis sous l'effet de son propre poids à travers un ajutage. Plus l'écoulement sera rapide et plus le coulis sera réputé être fluide. Dans cet essai, la viscosité est caractérisée par le temps que met le coulis pour s'écouler sous l'effet de leur poids propre.

c) Equipement nécessaire

Le cône utilisé pour cette étude a un diamètre supérieur à 152,4 mm et une longueur de 308,8 mm avec un embout de 50,8 mm dont l'ouverture est de 4,76 mm de diamètre interne (Figure 3.9). Un tamis d'ouverture 1,5 mm est logé dans la partie supérieure du cône. Pour être plus rigoureux dans les mesures du temps

d'écoulement et pour éviter le problème lié à la variation de la charge, il est recommandé d'utiliser un volume de coulis de 1500 ml et de prendre le temps d'écoulement correspond au temps d'écoulement de 946 ml. Il faut mentionner aussi qu'avant son utilisation, le cône est calibré en utilisant de l'eau à une température de 20 °C.

d) Conduite de l'essai

- Le cône est rempli d'environ 1500 ml du coulis à tester.
- Placer le récipient de 1000 ml sous le cône après avoir laissé échapper quelques millilitres de coulis de manière à chasser l'eau résiduelle.
- Déclencher le chronomètre au moment de l'ouverture de l'ajutage.
- Lorsque le volume du coulis atteint exactement 946 ml dans le récipient, on note le temps correspondant.



Figure 3.9 : Cône de Marsh.

3.4.3.2. Essais rhéométriques

a) Matériels utilisés

Les mesures rhéologiques ont été réalisées à l'aide d'un rhéomètre rotatif, AR2000 de TA Instruments, mise à notre disposition par le laboratoire des matériaux minéraux et composites (LMMC) du département de Génie Civil, de l'université de Boumerdès. Il s'agit d'un rhéomètre à contrainte contrôlée, ou à vitesse contrôlée, capable de tester différents types d'échantillons de matière, en utilisant une large gamme de géométries de différents types et dimensions. Le rhéomètre est désigné pour remplir les conditions de mesure comme convenu par

la signification du terme rhéologie. La géométrie Vane (Figure 3.10) a été choisie pour établir les rhéogrammes du coulis de ciment afin de nous permettre de faire les comparaisons nécessaires avec les mesures rhéologiques des mortiers.

b) Logiciel d'acquisition et de traitement des données

Le rhéomètre est couplé à un micro-ordinateur et le logiciel TA Data Analysis permet d'une part la programmation et l'exécution de divers protocoles de mesures, et d'autre part l'acquisition et le traitement des données fournies par l'appareillage de mesure. Le logiciel permet en outre le calcul des différents paramètres rhéologiques selon la modélisation choisie pour l'écoulement ainsi qu'une visualisation instantanée des rhéogrammes.



Figure 3.10 : Image du Rhéomètre AR 2000 avec la géométrie Vane.

c) Conduite de l'essai

Le protocole d'essais proposé par l'équipe de LMMC, comme il est indiqué sur la Figure 3.11, est le suivant :

- Préparation de l'échantillon : le volume de remplissage associé à la géométrie utilisée et recommandée par le constructeur (30 ml pour la géométrie Vane) doit être respecté.
- Un précisaillement de l'échantillon à 50 s^{-1} pendant 60 secondes : cette étape permet de déstructurer le matériau et d'obtenir un état de référence identique.
- Repos de 30 secondes.
- Une rampe en vitesse de cisaillement imposée de façon linéaire croissante.

- Durée de l'essai est 5 minutes.

Les essais sont réalisés dans les mêmes conditions. Un film d'huile de faible densité est utilisé pour éviter la dessiccation des échantillons pendant la durée de l'essai. Un bain avec thermostat permet de conditionner et de maintenir une température constante à 20 °C pendant les essais.

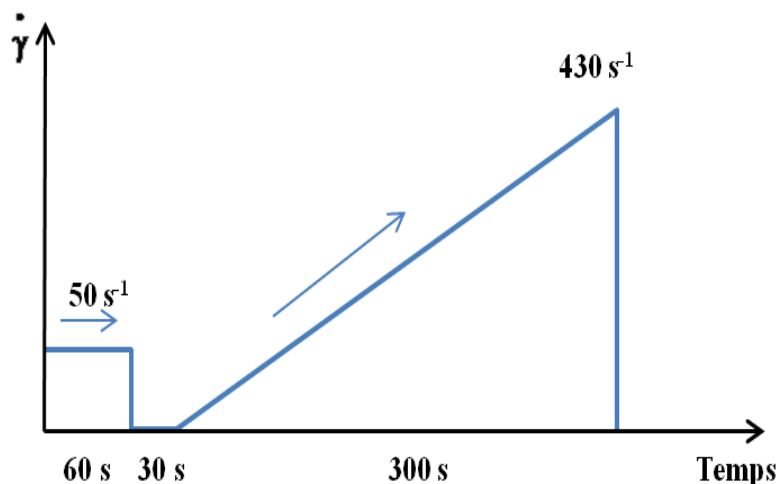


Figure 3.11 : Protocole d'essai rhéologique sur le coulis de ciment.

3.4.4. Essais effectués sur mortier à l'état frais

3.4.4.1. Essai au mini-cône

De manière à balayer une large gamme de consistance, deux types de mesures sont effectués après soulèvement du cône : l'affaissement et l'étalement du mortier. Il est à noter que nous avons utilisé deux modèles de mini-cône. Le premier pour les mortiers ordinaires. Et le deuxième pour les mortiers à ouvrabilité proche de celle de MAP.

a) Principe de l'essai

Il s'agit de constater l'affaissement ou l'étalement d'un mortier sous l'effet de son propre poids. Plus cet affaissement sera grand et plus ce mortier sera réputé fluide.

b) Equipement nécessaire

- Le premier cône : un moule tronconique sans fond, de 150 mm de haut (h), de 100 mm de diamètre en sa partie inférieure (D) et de 50 mm de diamètre en sa partie supérieure (d). Ces dimensions

représentent exactement la moitié de celles de cône d'Abrams pour béton (Figure 3.12) ;

- Le deuxième cône : un moule tronconique sans fond, de 70 mm de haut (h), de 100 mm de diamètre en sa partie inférieure (D) et de 70 mm de diamètre en sa partie supérieure (d). Ces dimensions représentent exactement la moitié de celles de cône d'Abrams pour béton (Figure 3.12) ;
- Ainsi, une plaque d'appui et une tige de piquage.

c) Conduite de l'essai

La plaque d'appui est légèrement humidifiée et le moule légèrement huilé y est fixé. Le mortier est introduit dans le moule en 3 couches d'égales hauteurs qui seront mises en places au moyen de la tige de la tige de piquage actionnée 6 fois par couche (la tige doit pénétrer la couche immédiatement inférieure). Après avoir arasé en roulant la tige de piquage sur le bord supérieur du moule, le démoulage s'opère en soulevant le cône en ± 2 secondes et ce, le plus verticalement possible avec précaution. La mesure de l'affaissement doit être effectuée sur le point le plus haut du mortier et dans la minute qui suit le démoulage.

La mesure de l'étalement se fait selon deux diamètres perpendiculaires (Figure 3.13) avec le pied à coulisse ou la règle graduée, puis on calcule la moyenne.

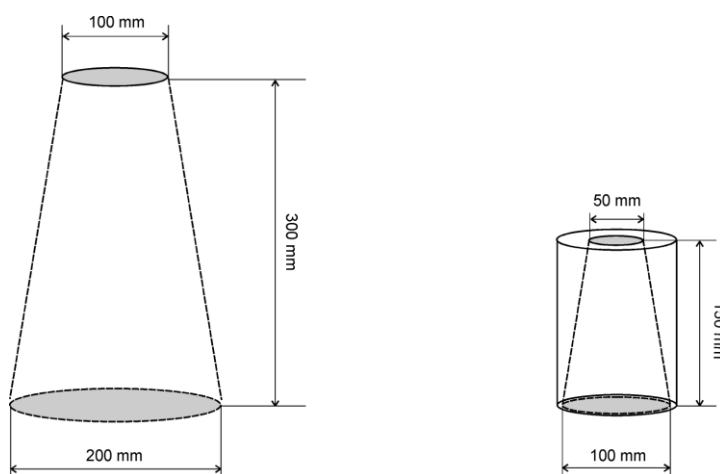


Figure 3.12 : Dimensions du mini-cône par rapport au cône d'Abrams.



Figure 3.13 : Essai d'affaissement et d'étalement pour le mortier au mini-cône.

3.4.4.2. Essai au cône d'écoulement

a) Objectif de l'essai

Il s'agit d'un essai comparable à celui de cône d'Abrams. Son objectif est la détermination de la fluidité et la viscosité des mortiers, boues et autres fluides. Il est utilisé pour définir mieux la dose de saturation en adjuvant pour un ciment étudié en prenant en compte le rôle du sable.

b) Principe de l'essai

Il s'agit de mesurer la rapidité d'écoulement du mortier sous l'effet de son propre poids à travers un ajutage de 12,5 mm de diamètre.

c) Equipement nécessaire

Le cône utilisé a un diamètre supérieur à 155 mm et une hauteur conique de 290 mm, la hauteur totale avec l'ajutage est de 365 mm. Le cône peut recevoir 5 ajutages de différents diamètres (\varnothing 8 - 9 - 10 - 11 mm et 12,5 mm), il est fixé sur un support métallique (Figure 3.14). Il est recommandé d'utiliser un volume de mortier de 2000 ml et de prendre le temps d'écoulement correspond au temps d'écoulement de 1000 ml.

d) Conduite de l'essai

- Le cône est rempli d'environ 2000 ml du mortier.
- Placer le récipient de 1000 ml sous le cône.
- Déclencher le chronomètre au moment de l'ouverture de l'ajutage.
- L'arrêter dès que le récipient est plein, on note le temps correspondant.



Figure 3.14 : Cône d'écoulement.

3.4.4.3. Essai au maniabilimètre

a) Objectif de l'essai

C'est une mesure qui est utile pour apprécier l'efficacité d'un adjuvant plastifiant, ou superplastifiant, sur la fluidité d'un mortier ou sur la réduction d'eau qu'il permet de réaliser à consistance égale. Il convient donc de définir un mode opératoire susceptible d'apprécier cette consistance, c'est l'objet des essais définis par les normes NF P 18-452 et NF P 15-37.

b) Principe de l'essai

Dans ces essais, la consistance est caractérisée par le temps que met le mortier pour s'écouler sous l'effet d'une vibration.

c) Equipement nécessaire

L'appareil utilisé s'appelle Maniabilimètre B, il est schématisé sur la Figure 3.15. Il consiste en un boîtier parallélépipédique métallique (18 cm x 9 cm x 9 cm), posé sur des supports en caoutchouc, équipé d'un vibreur et muni d'une cloison amovible.

d) Conduite de l'essai

Le mortier est introduit dans la partie la plus grande délimitée par la cloison et mis en place par piquage en 3 couches. 4 minutes après la fin du malaxage, la cloison est retirée, provoquant la mise en route du vibreur et le déclenchement d'un chronomètre par l'opérateur. Sous l'effet de la vibration le mortier s'écoule. Le chronomètre est arrêté quand le mortier atteint un trait repère sur la paroi opposée

du boîtier (Figure 3.16). Le temps « t » mis par le mortier pour s'écouler caractérise sa consistance. Ce temps sera d'autant plus court que le mortier sera plus fluide ou plus maniable, d'où le nom de l'appareil.

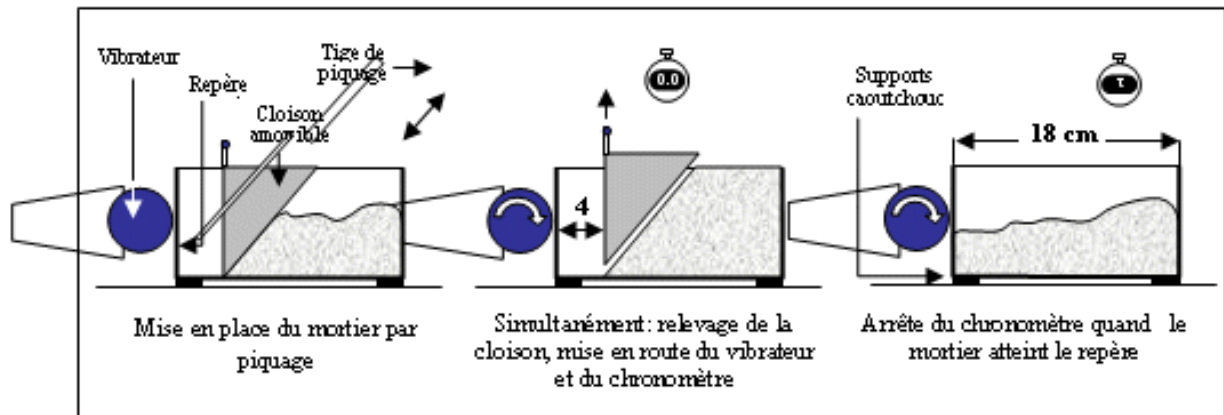


Figure 3.15 : Principe de fonctionnement du maniabilimètre B [158].



Figure 3.16 : Essais sur la consistance du mortier au Maniabilimètre B.

3.4.4.4. Mesure des propriétés rhéologiques

Le mortier frais est considéré ici comme un fluide, et par conséquent, des procédés de la rhéologie des fluides sont utilisés pour décrire l'écoulement de mortier. Le comportement d'écoulement du mortier et du béton peut être décrit dans de nombreux cas avec une précision suffisante par le modèle de Bingham (Equation (3.4)) [104-106, 164, 165] :

$$\tau = \tau_0 + \mu \dot{\gamma} \quad (3.4)$$

Où :

τ est la contrainte de cisaillement appliquée au matériau ; τ_0 est le seuil de cisaillement ; μ est la viscosité plastique et $\dot{\gamma}$ est la vitesse de cisaillement.

Contrairement aux fluides newtoniens, où la contrainte de cisaillement et la vitesse de cisaillement sont directement proportionnelles, pour les fluides de Bingham une contrainte minimale «le seuil de cisaillement» est nécessaire pour que l'écoulement se produise. Au-dessus du seuil de cisaillement, la contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement présente une pente constante qui est généralement appelée viscosité plastique.

Les propriétés rhéologiques des mortiers ont été mesurées sur les mêmes mélanges que l'affaissement et le temps d'écoulement du mortier. Le rhéomètre utilisé a été développé et validé par Soualhi et al. [170]. Ce dernier vise à répondre aux besoins de l'industrie : permettant la mobilité, l'utilisation simple in situ et une bonne précision sans frictions parasites, à un coût raisonnable. Il est composé de trois parties principales: Un agitateur à commande électronique de vitesse pour enregistrer les couples via un RS232, un récipient et une Vane en acier. Les caractéristiques de l'agitateur sont : la vitesse de rotation de 4 à 540 tr / min (± 1 tr / min), avec un couple maximal de 740 N.cm ($\pm 0,1$ N.cm). Les dimensions de la Vane sont de 10 cm de hauteur et 5 cm de diamètre. Le récipient est un cylindre de 10 cm de diamètre et 13 cm de hauteur (Figure 3.17). Pour optimiser l'adhérence du mortier sur la paroi intérieure du récipient, des bandes d'acier ont été soudées. L'agitateur est piloté par un ordinateur utilisant un logiciel (Watch & Control). Ce rhéomètre a été utilisé récemment par [166-168]. Ainsi que la géométrie Vane, comme dans la référence [169]

Le principe est de faire tourner à différentes vitesses une pale dans un échantillon cylindrique de mortier frais et de mesurer les couples exercés pour maintenir la rotation. Un essai rhéologique est effectué en imposant une vitesse de rotation décroissante à la pale interrompue par des paliers de stabilisation pour effectuer les mesures (Figure 3.18).

Pour développer les paramètres rhéologiques à partir des mesures, on a utilisé un procédé pour convertir les données de couple de rotation versus de vitesse de rotation en contraintes de cisaillement en fonction du taux de cisaillement. La procédure utilisée a considéré le matériau cisailé comme un

fluide de Bingham, en calculant le taux de cisaillement caractéristique de Couette analogie [96,101, 170-173].

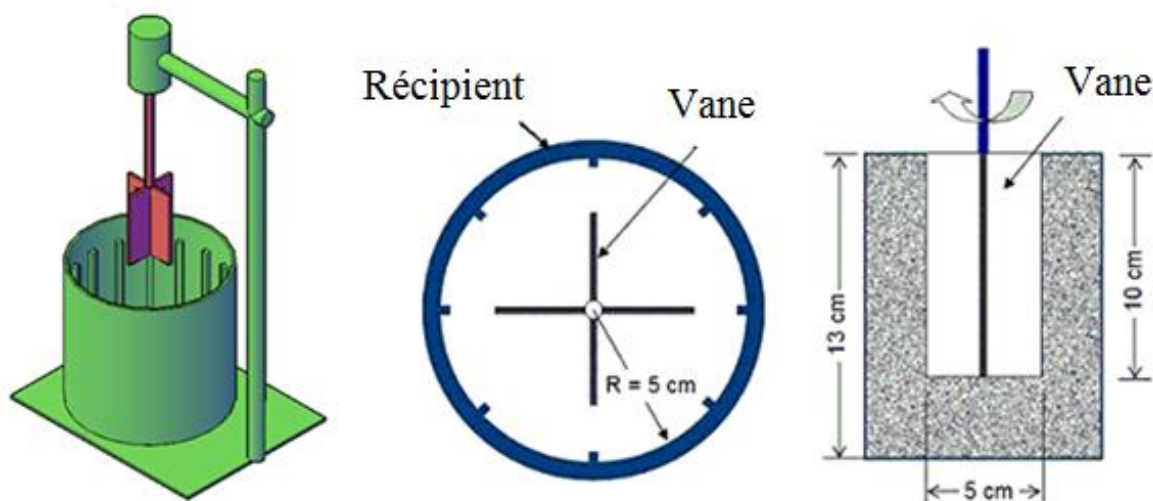


Figure 3.17 : (a) Rhéomètre et (b) position de la Vane dans le récipient du mortier [170].

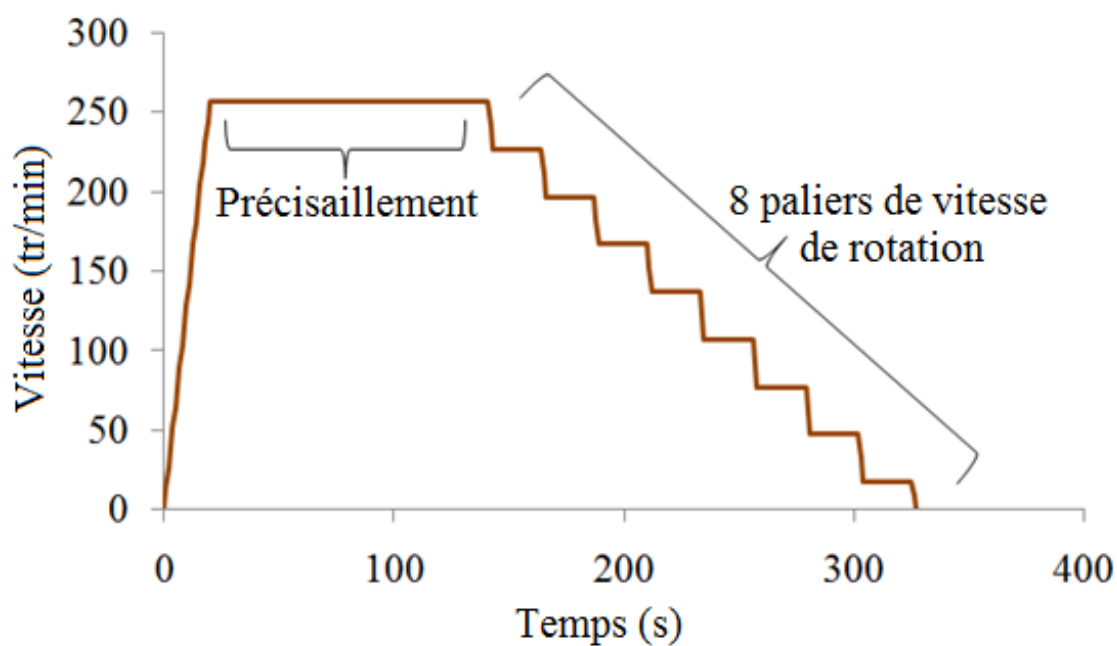


Figure 3.18 : Profil de la vitesse de rotation imposée P257, de la Vane.

- Principe de fonctionnement du rhéomètre

Le principe est de faire tourner à des vitesses différentes d'une pale en forme de croix dans un échantillon cylindrique de mortier frais et mesurer les couples exercés pour maintenir la rotation. Un test se fait en imposant une vitesse

de rotation décroissante de la pale interrompue par des paliers de stabilisation pour effectuer les mesures (Figure 3.18). Chaque seconde, le logiciel de commande de l'agitateur enregistre le couple M correspondant à la vitesse de rotation imposée Ω . Les résultats d'un essai avec le rhéomètre sont sous la forme d'une fonction linéaire reliant le couple et la vitesse de rotation (Equation (3.5)) :

$$M = M_0 + k.\Omega \quad (3.5)$$

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

M_0 (N.m) le couple à l'origine.

k (N.m.s) un coefficient de régression linéaire.

Ω (rad/s) est la vitesse angulaire de rotation de la pale.

- Description de l'appareil

La version finale du rhéomètre est composé de trois parties principales : un agitateur à commande électronique de vitesse pour l'enregistrement des couples par l'intermédiaire d'une interface RS232, un récipient, et une Vane en acier (Figure 3.17). L'agitateur est l'élément clé pour les tests. Il est fixé par l'intermédiaire d'une mâchoire à un bras, qui est lui-même fixé sur un trépied. L'agitateur est piloté par un ordinateur en utilisant le logiciel (montre et contrôle). Les caractéristiques de l'agitateur sont : la vitesse de rotation 4-540 rpm (± 1 min) et un couple maximal de 740 Ncm ($\pm 0,1$ Ncm). La pale en forme de croix est fixée dans le mandrin de l'agitateur. Les dimensions de la Vane sont de 10 cm de hauteur et de 5 cm de diamètre. Le récipient est un cylindre de 10 cm de diamètre et 13 cm de hauteur. Afin d'optimiser l'adhérence du mortier sur la paroi intérieure du récipient, des baguettes métalliques ou en bois ont été soudés sur ce dernier.

- Description de la méthode d'essai

Les mesures sont réalisées avec un profil de vitesse selon les étapes suivantes :

Commençons par le remplissage du mortier dans le récipient en deux couches, chaque couche reçoit 10 coups à l'aide d'une tige. Ensuite, la pale est centrée au milieu du récipient et nous l'immergeons dans le mortier de façon que la partie supérieure de la pale soit dans le même plan horizontal avec la surface libre du mortier (Figure 3.17). Et on mesure le couple total appliqué sur le mortier M_{total} pour chaque palier de vitesse correspondant au profil de vitesses de rotation

imposées de la pale. Enfin, les paramètres rhéologiques (la viscosité plastique μ et la contrainte seuil τ_0) sont calculés à partir des mesures expérimentales selon la procédure décrite par la suite.

Le rhéomètre a été développé en suivant les étapes mentionnées dans [123, 170].

- Calcul des données rhéologiques

Les valeurs moyennes des couples utilisées pour chaque palier de vitesse de rotation sont déterminées par l'Equation (3.6) :

$$M_i = M_{t,j} - M_{v,j} \quad (3.6)$$

où i est l'indication de palier de vitesse ; $M_{t,i}$: la moyenne des couples totaux mesurés pour chaque palier de vitesse lorsque le récipient est rempli avec du mortier ; et $M_{v,i}$ la moyenne des couples mesurés pour chaque niveau lorsque le récipient est vide (sans mortier), elles correspondent à la friction résiduelle du dispositif. Le test à vide est un essai effectué sans mortier en utilisant le même profil de vitesse. Il permet d'estimer la friction résiduelle de l'appareil.

La Figure 3.26 représente les résultats de l'essai à vide des couples. Les valeurs moyennes de couples $M_{v,i}$ correspondant à chaque palier du profil de vitesse sélectionné ont été déterminées à partir des résultats de plusieurs essais à vide, et elles sont introduites dans la feuille de calcul afin de ne pas répéter ce test à chaque fois.

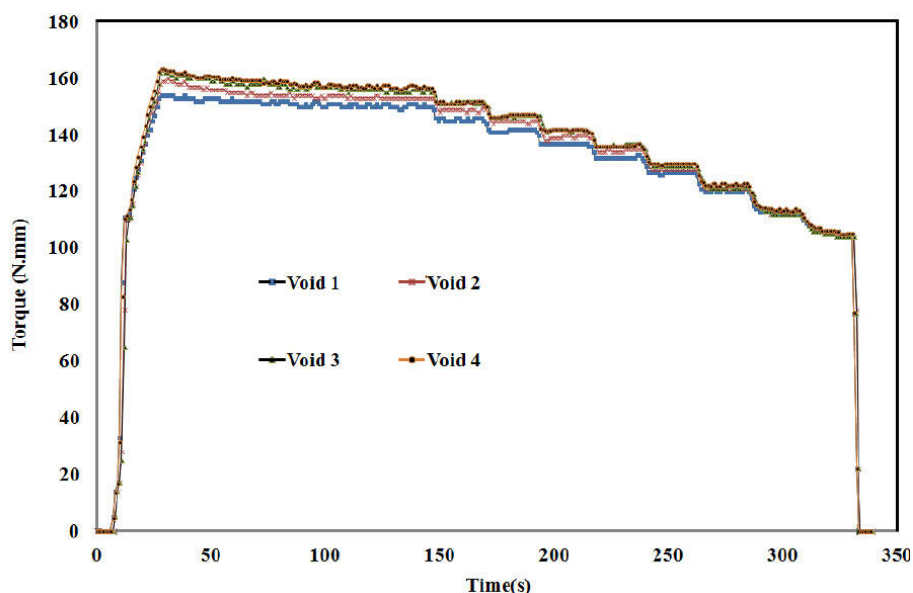


Figure 3.26: Evolution du couple de rotation en fonction du temps pour l'essai à vide [170].

Des mesures approximatives obtenues à partir de l'essai rhéologique sont présentés sous forme des courbes : couple moyen M de cisaillement (N.m) en fonction de la vitesse de rotation Ω (Cycles/s). Les paramètres rhéologiques τ_0 et μ peuvent être estimés à partir de la courbe contrainte de cisaillement τ (Pa) en fonction du taux de cisaillement $\dot{\gamma}$ (1/s). Cela signifie que l'on doit relier la contrainte de cisaillement et le taux de cisaillement pour le couple moyen et la vitesse de rotation de la pale. Les résultats des essais rhéologiques sont lissés pour limiter la propagation des erreurs de mesure en utilisant une loi linéaire (Equation 3.5), en raison de la physique du problème. Cette équation fournit pour chaque palier de vitesse les couples finals ($M_i-\Omega_i$). L'utilisation de mesures rhéométriques consiste à déterminer l'évolution de la contrainte de cisaillement τ par rapport à la vitesse de cisaillement $\dot{\gamma}$ des paires de mesure ($M_i-\Omega_i$). Ceci est obtenu en assimilant le comportement du béton en tant que fluide de Bingham pour obtenir les paramètres rhéologiques τ_0 et μ .

Dans cette étude, il est considéré que la géométrie de la Vane est équivalente à celle de Couette bob de rayon R_b et de hauteur h , avec R_c est le rayon de la cuvette et Ω est la vitesse de rotation de la pale. Le fluide est supposé incompressible et non élastique. Les effets de bord et d'inertie ainsi que l'effet de cisaillement dans la zone de fond sont négligés. Une autre hypothèse de non-glissement de la couche limite entre la pale et le mortier est supposée remplie. Selon ces hypothèses, la contrainte de cisaillement τ et le taux de cisaillement $\dot{\gamma}$ peuvent être estimées à partir du couple moyen de cisaillement M et la vitesse de rotation Ω en utilisant des formules qui ont été développés par Estellé et al. [101,172,173]. Le taux de cisaillement est exprimé par les Equations (3.7) et (3.8), respectivement, lorsque le fluide est partiellement cisailé et complètement cisailé dans le récipient :

$$\dot{\gamma} = \dot{\gamma}_1 = 2M \frac{\partial \Omega}{\partial M} \text{ if } \tau_c \leq \tau_0 \leq \tau_b \quad (3.7)$$

$$\dot{\gamma} = \dot{\gamma}_2 = 2 \frac{M \frac{\partial \Omega}{\partial M}}{\left(1 - \frac{R_b^2}{R_c^2}\right)} - \frac{\Omega - M \frac{\partial \Omega}{\partial M}}{\ln\left(\frac{R_b}{R_c}\right)} \text{ if } \tau_c > \tau_0 \quad (3.8)$$

Où R_b et h désignent le rayon et la hauteur du cylindre interne, et R_c est le rayon externe. Ω et M représentent respectivement la vitesse de rotation du cylindre interne et son couple.

L'Equation (3.7) de la vitesse de cisaillement peut être utilisée pour un matériau partiellement cisailée ayant une contrainte seuil à l'intérieur de l'intervalle mentionné. On peut noter que l'Equation (3.7) ne dépend pas de modèle rhéologique de la contrainte d'écoulement de fluide considéré. L'Equation (3.8) peut être utilisée pour retrouver le taux de cisaillement pour les matériaux qui n'ont pas une contrainte seuil, ainsi que pour état complètement cisailé. Donc, comme proposé dans [173], le taux de cisaillement est une combinaison de deux expressions (Equation (3.9)) de l'état d'écoulement dans l'espace annulaire. La valeur du taux de cisaillement approprié est celui qui maximise la dissipation d'énergie dans l'échantillon en écoulement. Ensuite, le taux de cisaillement caractéristique est défini comme :

$$\dot{\gamma} = \max(\dot{\gamma}_1; \dot{\gamma}_2) \quad (3.9)$$

On suppose que la série de mesures de couple M_j fonction de la vitesse rotation imposée Ω_j (correspondant à la contrainte τ_j et au taux de cisaillement $\dot{\gamma}_{1,2j}$) sont obtenus à partir du test rhéologique. La dérivée $d\Omega/dM$ dans les Equations (3.7) et (3.8) peut être approchée par l'Equation (3.10) :

$$\frac{\partial \Omega_j}{\partial M_j} \cong \frac{\Omega_{j+1} - \Omega_j}{M_{j+1} - M_j}; j = \overline{1, n} \quad (3.10)$$

Le taux de cisaillement $\dot{\gamma}_i$ correspondant à la vitesse de rotation $\Omega_j (i=j)$ peut donc être calculé par l'Equation (3.11) :

$$\dot{\gamma}_i = \max(\dot{\gamma}_{1j}; \dot{\gamma}_{2j}) \text{ avec } i = j \text{ et } j = \overline{1, n} \quad (3.11)$$

Une fois le taux de cisaillement est estimé par l'Equation (3.10), il est considéré correspondre à la contrainte de cisaillement suivante :

$$\tau_i = \frac{1}{2}(\tau_j + \tau_{j+1}) \text{ avec } : \tau_j \text{ ou } \tau_{j+1} = \frac{M_j \text{ ou } M_{j+1}}{2\pi h R_b^2}; i = j \text{ et } j = \overline{1, n} \quad (3.12)$$

Où : M_j ou $j + 1$ est calculé par l'Equation (3.6). Les Equations (3.11) et (3.12) permettent de tracer les courbes de contrainte de cisaillement τ (Pa) en fonction de la vitesse de cisaillement $\dot{\gamma}$ (1/s), en estimant ensuite les paramètres rhéologiques τ_0 et μ .

Les auteurs ont validé ensuite le rhéomètre en vérifiant la répétabilité des essais et la distinction des propriétés rhéologiques de différentes compositions des mortiers.

3.4.5. Essais effectués sur béton à l'état frais

3.4.5.1. Cône d'Abrams

Nous avons utilisé le cône d'Abrams pour mesurer l'affaissement et l'étalement. Ce dernier ayant un diamètre supérieur de 100 mm, un diamètre inférieur de 200 mm et une hauteur de 300 mm, selon la norme NF EN 12350-2. Le cône, rempli du béton, est soulevé doucement. Après, l'affaissement du béton est mesuré par rapport à la hauteur initiale qui est égale à celle du cône.

3.4.5.2. Mesures rhéométriques

Nous avons utilisé un rhéomètre adapté aux bétons, mis au point par l'équipe de L2MGC de l'université de Cergy-Pontoise [75,104,174,175]. Ce rhéomètre a été développé selon les étapes suivantes :

- Hypothèses de base

Le béton à l'état frais se comporte comme un fluide de Bingham. Ainsi, son comportement est décrit par l'Equation (3.4).

Le béton ne glisse pas sur les parois du récipient.

- Principe de fonctionnement du rhéomètre développé

Le rhéomètre développé est un rhéomètre de type Couette. Cette méthode est généralement considérée comme la meilleure pour des suspensions concentrées avec un seuil de cisaillement supérieur à 10 Pa [176]. Le principe consiste à mettre en rotation, à différentes vitesses, un cylindre ou une pale dans un échantillon cylindrique de béton frais et mesurer le couple à appliquer pour engendrer la rotation. En considérant le fluide de Bingham, le couple nécessaire pour maintenir la rotation évolue linéairement avec la vitesse de rotation.

L'utilisation d'une pale a été préférée à celle d'un cylindre. Etant donné que l'insertion d'une pale dans l'échantillon, crée une perturbation minimale par rapport à l'insertion d'un cylindre, ce qui représente un avantage réel pour les matériaux thixotropes comme le béton [177].

Le résultat brut d'un essai réalisé avec le rhéomètre se présente donc sous la forme d'une fonction linéaire comme il est indiqué par l'Equation (3.13) :

$$M = M_0 + k.\Omega \quad (3.13)$$

Avec : M (N.m) est le couple total appliqué sur le béton et M_0 le couple à l'origine.

k (N.m.s) un coefficient de régression linéaire.

Ω (rad/s) est la vitesse angulaire de rotation de la pale.

L'exploitation des mesures rhéométriques consiste à déterminer l'évolution de la contrainte de cisaillement (τ) en fonction du taux de cisaillement ($\dot{\gamma}$) à partir de la mesure du couple ($M_i - \Omega_i$). En assimilant le comportement du béton à un fluide de Bingham. Or, les paramètres rhéologiques τ_0 et μ peuvent être calculés en utilisant les Equations de Reiner-Riwlin. Néanmoins, deux cas sont envisageables : le cisaillement peut être total ou partiel (Figure 3.27).

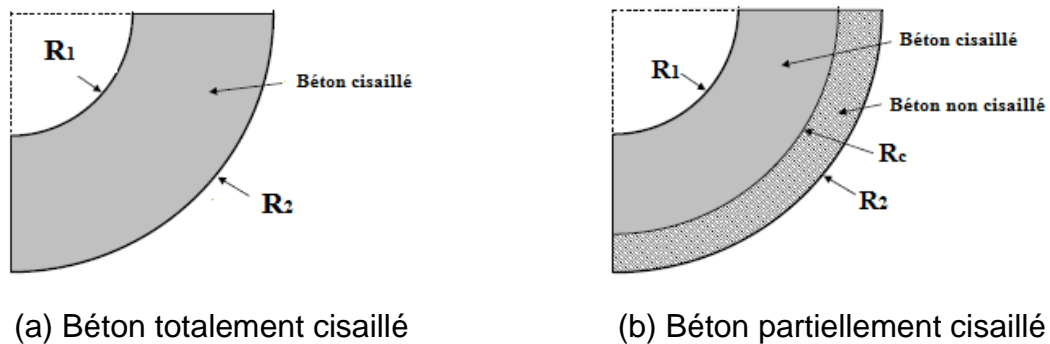


Figure 3.27 : Schéma du cisaillement du béton dans le récipient [174].

Si le cisaillement est total (Figure 3.27 (a)) l'Equation de Reiner-Riwlin s'écrit :

$$\Omega = \frac{M}{2\pi h \mu} \left(\frac{1}{R_1^2} - \frac{1}{R_2^2} \right) + \frac{\tau_0}{\mu} \ln \frac{R_2}{R_1} \quad (3.14)$$

Avec :

R_1 (m) le rayon de la pale.

R_2 (m) le rayon du récipient.

h (m) la hauteur de la pale.

Si le cisaillement est partiel (Figure 3.27 (b)) l'Equation Reiner-Riwlin devienne :

$$\Omega = \frac{M}{2\pi h \mu} \left(\frac{1}{R_1^2} - \frac{1}{R_c^2} \right) + \frac{\tau_0}{\mu} \ln \frac{R_c}{R_1} \quad (3.15)$$

Avec : R_c le rayon critique qui représente la limite du cisaillement, son expression est la suivante :

$$R_c = \sqrt{\frac{M}{2\pi h\tau_0}} \quad (3.16)$$

En introduisant l'expression de R_c (Equation (3.16)) dans l'Equation (3.15), elle devienne :

$$\Omega = \frac{M}{4\pi h\mu} \left(\frac{1}{R_1^2} - \frac{2\pi h\tau_0}{M} \right) - \frac{\tau_0}{2\mu} \ln \frac{M}{2\pi h\tau_0 R_1^2} \quad (3.17)$$

L'Equation (3.17) peut être résolue avec une optimisation non linéaire. L'initialisation du calcul s'effectue via une estimation de la viscosité plastique et du seuil de cisaillement en fonction de la classe du béton testé. Pour chaque couple mesuré avec le rhéomètre, le rayon critique R_c est calculé puis il est comparé au rayon du récipient afin de définir si le cisaillement est total ou partiel. Pour chaque point, la "vitesse de rotation" est calculée via l'Equation (3.17).

Pour finaliser le calcul, il convient de minimiser l'erreur quadratique moyenne (mse) entre la vitesse de rotation "mesurée" et celle "calculée" en modifiant les valeurs de la viscosité plastique et de la contrainte de cisaillement.

$$mse = \sqrt{\frac{(\Omega_{calculée} - \Omega_{mesurée})^2}{n}} \quad (3.18)$$

- Protocole de mesures

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), comme il est indiqué schématiquement sur la Figure 3.28. Il peut atteindre un couple de l'ordre de 8 N.m, qui couvre une large gamme de béton. Effectivement, la viscosité plastique des bétons varie selon les compositions. Elle peut atteindre des valeurs de l'ordre de 200 Pa.s [145,148].

En se basant sur cette valeur et pour une contrainte seuil égale à 1000 Pa, le moment nécessaire pour cisailier le béton à une vitesse de 48 tr/min (vitesse moyenne appliquée pour le rhéomètre existant) est de l'ordre de 8 N.m.

Un 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, selon Hu en 1995 [178]. Une pale en double U inversé a été utilisée, en inspirant de la pale évidée adaptée par Yahia et al. [179, 180], afin de réduire les perturbations des mesures. Toutes les secondes, le logiciel enregistre le moment de rotation (M) correspondant à la vitesse de rotation (Ω) imposée.

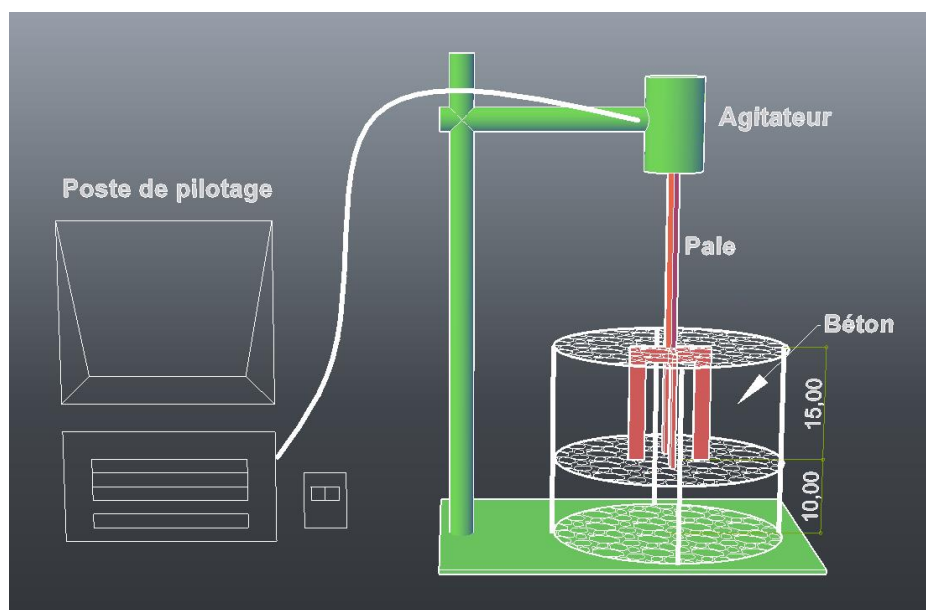


Figure 3.28 : Schéma du principe de fonctionnement du rhéomètre [174].

Les essais ont été réalisés avec un récipient cylindrique de 30 cm de diamètre, de 32,5 cm de hauteur et une pale pleine de dimension $d \times h = 10,5 \times 12,5$ cm (Figure 3.29). Afin d'optimiser l'adhérence du béton sur la paroi intérieure du récipient, 18 baguettes carrées en acier de dimension 9×9 mm² ont été soudées.



Figure 3.29 : Photo du rhéomètre à béton et la pale (double U)

L'essai rhéométrique se fait avec les étapes suivantes :

- 1^{ère} étape : mesure des couples à vide (M_{vide}). Ils correspondent aux couples à imposer pour maintenir les vitesses en phase de palier lorsque le récipient est vide.
- 2^{ème} étape : remplissage du béton dans le récipient. Il s'effectue en deux couches. Chaque couche reçoit 25 coups de piquage à l'aide d'une tige identique à celle utilisée dans l'essai d'affaissement au cône d'Abrams.
- 3^{ème} étape : positionnement de la pale. Elle est centrée (suivant le diamètre du récipient) puis plongée au milieu du béton jusqu'à l'arase du béton, en laissant une couche de béton de 10 cm d'épaisseur en dessous (Figure 3.28).
- 4^{ème} étape : mesure des couples totaux (M_{total}). Ils correspondent aux couples à imposer pour maintenir les vitesses en phase de palier lorsque le récipient est rempli de béton.
- 5^{ème} étape : calculs des couples finaux (M). Les couples finaux s'obtiennent par la différence entre les couples totaux et les couples à vides pour chaque palier de vitesse :

$$M = M_{\text{total}} - M_{\text{vide}} \quad (3.19)$$

- 6^{ème} étape : exploitation des mesures et calculs des paramètres rhéologiques (voir la partie suivante).

L'optimisation du rhéomètre.

L'optimisation du rhéomètre a nécessité plusieurs étapes :

Le choix du profil de vitesse de rotation de la pale.

Le choix du diamètre du récipient.

Le choix de la forme de la pale.

Choix du profil de vitesse.

L'objectif de ces essais est de choisir un profil de vitesse permettant d'avoir les mesures les plus stables en minimisant le phénomène de ségrégation du béton. Le profil utilisé doit satisfaire les critères suivants :

Avoir suffisamment de point (plusieurs paliers) pour pouvoir bien caractériser le comportement du béton.

Avoir des paliers espacés pour bien distinguer les différentes paires (Ω , M).

Trois profils de vitesse ont été testés sur trois bétons nommés B1, B2 et B3. Les trois bétons testés ont le même volume de pâte avec différents rapports E/C, un des paramètres qui influe sur le comportement rhéologique des bétons et sur le risque de ségrégation. Les compositions sont détaillées dans le Tableau ci-dessous.

Note : Dans cette étude le rapport E/C utilisé est le rapport entre l'eau efficace et le ciment.

L'auteur de cette étude a testé trois profils de vitesse de rotation avec trois vitesses maximales différentes en se basant sur les études antérieures de : Hu et al. en 1995 [178] et en 1996 [181], Chiara et al. en 2000 [148], Koehler et al. en 2005 [177] et Estellé et al. en 2008 [101] :

Le profil P96 avec une vitesse maximale de 96 tr/min.

Le profil P72 avec une vitesse maximale de 72 tr/min.

Le profil P48 avec une vitesse maximale de 48 tr/min (Figure 3.30).

Au début de l'essai la vitesse maximale est appliquée, phase de pré-cisaillement, pour éliminer l'influence de la thixotropie, comme il a été déjà réalisé par Hu en 1995 [178].

Les auteurs ont validé ensuite le rhéomètre en vérifiant la répétabilité des essais et la reproductibilité du rhéomètre sur différentes compositions des mortiers.

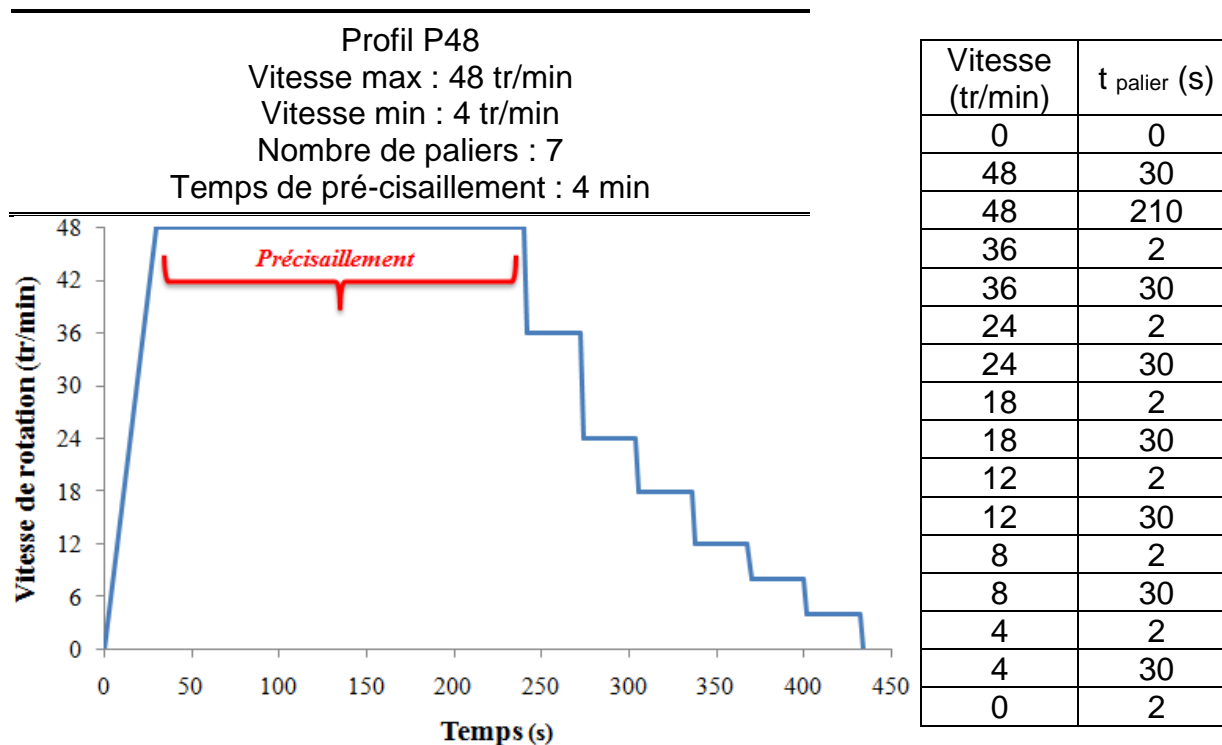


Figure 3.30 : Profil expérimental adopté pour l'essai rhéologique sur le béton (P48) [174].

3.4.6. Mesure de la résistance mécanique du béton et du mortier

Les caractéristiques mécaniques d'un matériau sont à la base de la construction et de la sécurité d'un ouvrage. Il est donc nécessaire de posséder les connaissances les plus étendues sur ces caractéristiques.

Parmi les essais mécaniques, l'essai de compression est le plus répandu et le plus simple d'utilisation. La relation entre la force à la rupture et la résistance mécanique du béton est dans cet essai direct. Par contre, la réalisation d'essai de traction directe reste encore difficile par rapport aux essais de traction indirecte (fendage, flexion et poinçonnement) qui sont plus simples à mettre en œuvre, mais dont l'interprétation en déformations reste à améliorer.

La norme EN 196-1 décrit de manière détaillée le mode opératoire concernant cet essai.

Les essais de résistance mécanique à la compression (f_c) et à la traction par flexion (f_t) ont été réalisés au laboratoire L2MGC de l'université de Cergy Pontoise sur :

Une presse hydraulique flexion-compression 4x4x16 cm³ (Quantech 3R) pour les mortiers (Figure 3.31). La machine d'essai est équipée de deux vérins : un vérin de flexion de force maximale de 8 à 50 kN, et un vérin de compression de 200 à 500 kN. Les mortiers sont confectionnés selon les compositions indiquées dans les Tableaux 3.6 et 3.7, en remplissant les moules 4x4x16. Le serrage du mortier dans ces moules est obtenu en introduisant le mortier en deux fois et en appliquant au moule 60 chocs à chaque fois. Le taux de chargement était maintenu à 0,5 kN par seconde pour la compression et à 0,1 kN par seconde pour la flexion. Initialement l'éprouvette est soumise à la traction par flexion. La distance entre les appuis est de 12 cm. Ensuite, la moitié de l'éprouvette cassée est soumise à la compression.



Figure 3.31 : Presse hydraulique pour mortier (Quantech 3R).

Une presse hydraulique 1250 kN (Perrier/3R) pour les bétons (Figure 3.32). La machine d'essai est équipée d'un vérin de force maximale de 1250 kN. Les essais de compression simple sont réalisés à 7 et 28 jours par écrasement d'éprouvettes de bétons cylindriques 11×22 cm², avec un taux de chargement constant et croissant de 5 kN/s jusqu'à la rupture.

En revanche, six éprouvettes pour chaque essai ont été confectionnées. Trois sont destinées à l'écrasement à 7 jours et les trois autres pour l'écrasement à 28 jours. En ce qui concerne la cure, toutes les éprouvettes sont restées dans un bac à eau jusqu'au jour d'écrasement.



Figure 3.32 : Malaxeur, table vibrante et presse hydraulique (Perrier/3R) pour béton.

3.5. Récapitulation des essais effectués

L'organigramme illustré sur la Figure 3.33 récapitule les essais effectués dans ce travail de recherche en indiquant les types de sables utilisés et les pourcentages des fines calcaires de concassage dans le SC.

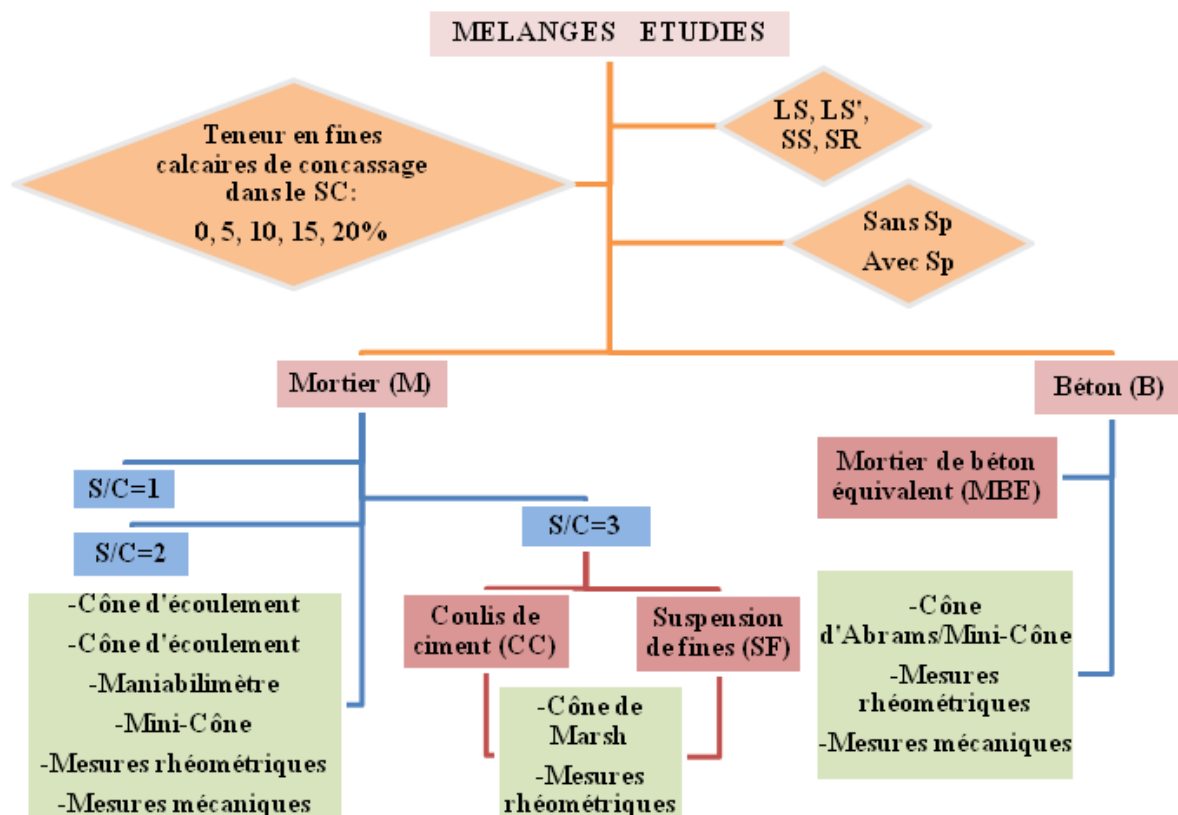


Figure 3.33 : Récapitule des mélanges confectionnés et les sables utilisés.

CHAPITRE 4

ANALYSE ET INTERPRETATION DES RESULTATS

4.1. Introduction

Afin de mettre en évidence les caractéristiques rhéologiques et mécaniques des bétons et mortiers à base de sable de concassage en fonction de sa teneur en fines, notre étude est divisée en trois parties :

- La première partie porte sur la caractérisation du ciment, des fines calcaires de concassage et des sables concassés (siliceux et calcaire), à savoir : essai de propreté, mesure de la compacité de l'empilement, analyse granulométrique, détermination du taux d'absorption, mesure de l'angle de frottement et détermination des coefficients de forme.
- La deuxième partie est consacrée aux mesures des propriétés rhéologiques à multi échelles de suspensions à savoir : suspension de fines, coulis de ciment, mortier et béton.
- La dernière partie porte sur la mesure des propriétés mécaniques des mortiers et bétons à base de sable de concassage.

4.2. Caractérisation des matériaux utilisés

Avant de procéder aux mesures rhéologiques et mécaniques sur les bétons et les mortiers, nous avons fait une caractérisation physique du ciment, des fines calcaires et des sables de concassage siliceux et calcaire. Les résultats de ces essais sont représentés dans les figures et les tableaux représentés dans la partie suivante.

4.2.1. Compacité d'empilement du ciment et du sable

Les essais effectués sur le sable de concassage et le ciment déterminant la valeur de la compacité de l'empilement montrent que pour le ciment et les fines, en utilisant l'essai de demande en eau, vaut respectivement 0,59 et 0,61. En revanche, pour tous les SCs utilisés dans cette étude, la compacité est pratiquement la même en utilisant la table à secousse. Elle est de l'ordre de 0,65.

4.2.2. Propreté des sables

Il est rapporté dans la référence [158], la propreté de sable peut s'apprécier de différente façon :

- Par la teneur globale en fillers, qui est un paramètre important dans la composition des bétons. En fait, l'analyse granulométrique permet de déterminer le pourcentage global des fillers, sans pour autant permettre de distinguer les fillers silico-calcaires des fillers argileux.
- En utilisant les essais d'équivalent de sable et d'équivalent de sable à 10% de fines, conformément à la norme NF P 18-597, qui permettent selon un processus normalisé de quantifier la notion de propreté de sable.
- Par l'essai au bleu de méthylène qui permet d'évaluer le degré d'activité des particules fines argileuses qui sont responsables, dans une large mesure, de désordres et de non qualité dans les bétons.

Le tableau 4.1 synthétise les résultats de l'essai d'équivalent de sable et la valeur de bleu de méthylène du sable de concassage calcaire.

Tableau 4.1 : Valeurs d'équivalent de sable et bleu de méthylène.

Catégories de sable		S1	S2	S3
Equivalent de sable (selon NF P 18-597)	à vu	92	71	49
	à piston	89	69	47
Valeur de bleu de méthylène (selon NF EN 933-9)		0,75		

- Analyse et discussion

Le Tableau 4.1 montre que le sable lavé S1 est très propre et ne contient que très peu de fines, dans ce cas il est préférable de ne l'employer qu'avec des dosages en ciment assez élevés ($C \geq 350 \text{ kg/m}^3$). En ce qui concerne S2 qui contient 5% de fines, est un bon sable à béton.

Pour l'ensemble des catégories S2, S3 et S4 la norme NF P 18-597 consiste à faire l'essai d'équivalent de sable à 10 % de fines. Ce dernier donne une valeur de 49. Donc, il s'agit d'un sable impropre, ce qui nous a conduits à faire l'essai au bleu de méthylène selon la norme NF EN 933-9. L'essai au bleu de méthylène donne une valeur nettement inférieure à 1. Donc, le sable peut être considéré comme satisfaisant pour la confection du béton résistant.

4.2.3. Mesure du coefficient d'absorption

Le tableau 4.2 représente les valeurs du taux d'absorption de différentes catégories de sable.

Tableau 4.2 : Coefficient d'absorption de LS à différentes teneur en fines.

Catégories de sable	S1	S2	S3	S4	S5
Coefficient d'absorption (%)	1,4	1,5	1,6	1,9	2,1

- Interprétation et discussion

Les résultats illustrés dans le Tableau 4.2 montrent que le coefficient d'absorption augmente avec l'augmentation du pourcentage des fines dans le sable. Ce qui entraîne une perte de la maniabilité dans le temps, lorsqu'on utilise des sables impropres dans le mortier. Cependant, au-delà de 15 minutes qui suivent le premier contact eau-ciment-agrégats, les pertes deviennent faibles parce que l'absorption d'eau par le sable est ralentie ou arrêtée en raison de l'enrobage des grains par la pâte de ciment. Pour cette raison, il est plus utile de déterminer la quantité d'eau absorbée au bout de 10 ou 30 minutes, plutôt que l'absorption complète d'eau qui, en pratique, ne sera peut être jamais atteinte. On peut ainsi déterminer le taux d'absorption réel comme il a été démontré par Alhozaimy [65].

4.2.4. Analyse granulométrique

Le Tableau 4.3 représente les résultats de l'analyse granulométrique et le module de finesse de sable de concassage selon le pourcentage de fines qu'il contient. La Figure 4.1 illustre les courbes granulométriques de ces derniers.

Tableau 4.3 : Analyse granulométrique de sable de concassage.

Diamètre des tamis (mm)	Sable				
	S1	S2	S3	S4	S5
	Pourcentage des tamisât cumulés (%)	Pourcentage des tamisât cumulés (%)	Pourcentage des tamisât cumulés (%)	Pourcentage des tamisât cumulés (%)	Pourcentage des tamisât cumulés (%)
4.75	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
2.00	64,60	64,80	63,10	66,40	69,80
1.25	43,90	44,30	42,40	47,20	51,90
0.630	25,50	26,80	26,00	31,20	36,40
0.400	17,20	18,70	18,90	23,70	28,80
0.315	13,60	15,00	15,70	20,20	24,70
0.200	8,50	9,90	11,10	14,90	18,60
0.160	6,20	6,90	8,10	11,40	14,70
0.063	0,54	1,68	2,55	4,07	5,60
Fond	0,10	0,30	0,30	0,20	0,10
Mf	3,28	3,24	3,12	3,05	2,86

▪ Interprétation et discussion

D'une manière générale, nous avons constaté que les courbes granulométriques de sable de concassage calcaire en fonction de sa teneur en fines, dévoilent un sable grossier, mais elles prennent une allure étalée au fur et à mesure que la teneur en fines augmente. Nous remarquons aussi qu'il y a un manque de fraction 0,200/1,600 mm dans ce type de sable : une carence qui ne peut pas être corrigée par l'augmentation de la teneur en fines. En revanche, le module de finesse de S1 et S2 ($M_f > 3,2$), montre qu'il s'agit d'un sable grossier, qui présente un manque de fines. Cependant, le module de finesse de S3, S4 et S5 tend vers 2,80. Donc, il s'agit des sables peu grossiers.

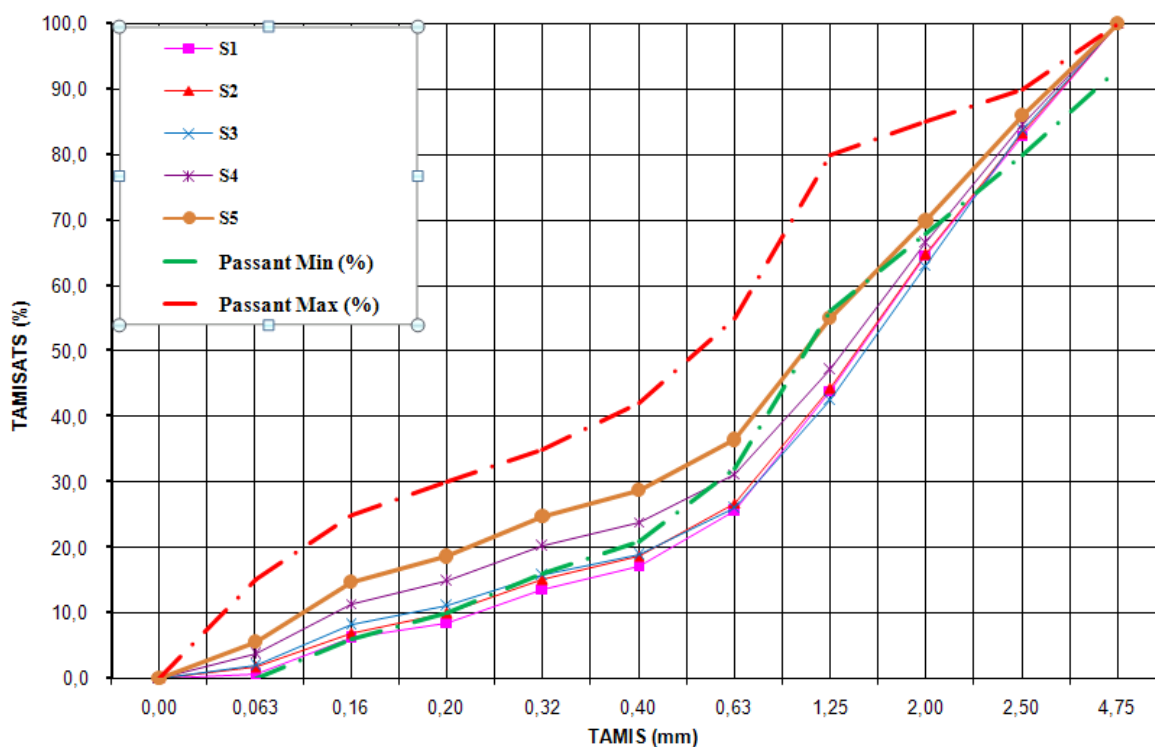


Figure 4.1 : Courbes granulométriques des SC en fonction de leur teneur en fines calcaires.

4.2.5. Angle de frottement

Afin d'étudier l'effet du frottement global des grains de sable sur l'écoulement du mortier, un essai est employé pour estimer l'angle de frottement basé sur l'angle maximum constitué par la pile de sable (la pente au repos). Les résultats sont représentés sur la Figure 4.2.

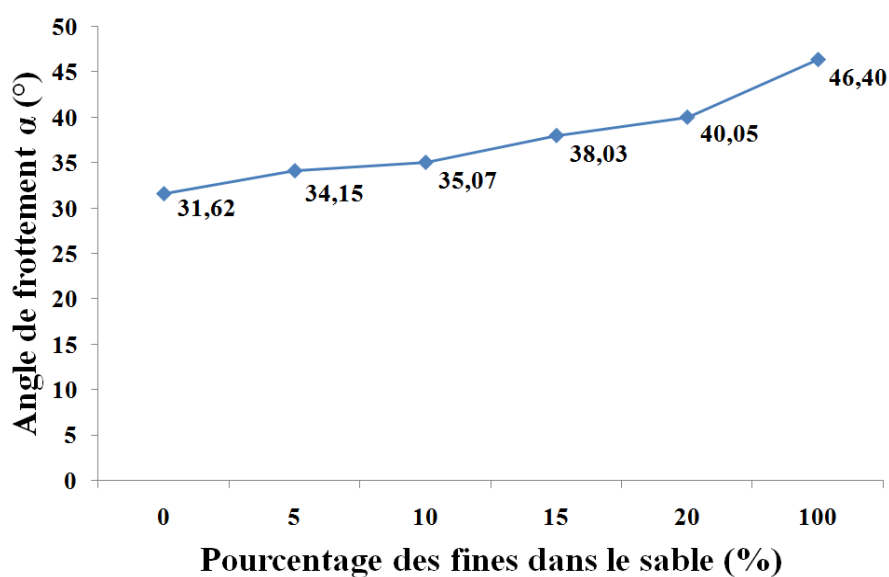


Figure 4.2 : Angle de frottement du SC en fonction de sa teneur en fines.

- Interprétation et discussion

Les résultats de cet essai montrent que l'angle de frottement du sable utilisé dans notre recherche est compris entre 30° à 40°, un tel résultat est confirmé par Das 1995 cité par Hu [162], qui a trouvé que l'angle du frottement pour les sables, s'étend habituellement de 26° à 45°. L'essai montre que la valeur de l'angle du frottement augmente avec l'accroissement de la teneur en fines dans le SC. Cela est probablement dû à l'augmentation de la surface spécifique. Par conséquent, l'élévation du frottement interne et de la cohésion entre les grains.

4.2.6. Morphologie des particules de sable

Les facteurs de forme des particules de différents types de sable utilisés dans cette étude sont mesurés par un logiciel de traitement d'image en prenant des images des grains par microscope optique. La détermination de ces facteurs se fait selon les méthodes décrites par [20], en calculant les facteurs suivants : F-aspect, F-forme et F-circularité. Ces derniers peuvent être interprétés comme suit :

$0 \leq F\text{-valeur} < 0,25$: très élancé.

$0,25 \leq F\text{-valeur} < 0,50$: élancé.

$0,50 \leq F\text{-valeur} < 0,75$: cubique.

$0,75 \leq F\text{-valeur} \leq 1$: circulaire.

Le Tableau 4.4 illustre les paramètres de forme des différents sables utilisés dans cette étude. Dans le paragraphe 4.3.3.6, nous allons établir une corrélation entre ces coefficients et les paramètres rhéologiques correspondants.

Tableau 4.4 : Coefficients de forme de différents sables utilisés

Sable	F-aspect	F-forme	F-circularité
LS	0,54/0,55	0,62	0,64
LS'	0,59/0,60	0,65	0,57
SS	0,58/0,59	0,70	0,69
SR	0,64/0,64	0,88	0,96

4.2.7. Coefficients de distributions granulométriques des sables et fines

L'analyse des résultats représentés dans le Tableau 4.5, montre que les fines se rapprochent d'une distribution bien graduée avec une distribution étalée sur une plage de diamètres importante. En revanche, tous les sables présentent une distribution bien étalée sauf le sable roulé qui contient un excès de fines.

Tableau 4.5 : Calcul des paramètres de description des distributions granulométriques.

	d ₁₀ (mm)	d ₃₀ (mm)	d ₆₀ (mm)	C _u		C _c	
Fines	0,0013	0,0056	0,0255	19,6	>15 Distribution étalée sur une plage de diamètres importante	0,95	Proche de 1: distribution bien graduée
LS	0,20	0,70	1,90	9,5	Bien étalée	1,29	Bien étalée
LS'	0,20	0,70	1,90	9,5	Bien étalée	1,29	Bien étalée
SS	0,25	0,79	1,90	7,6	Bien étalée	1,32	Bien étalée
SR	0,12	0,21	0,42	3,5	Resserrée	0,87	Il y a un excès de fines

4.3. Mesure des propriétés rhéologiques

La rhéologie est un outil de haute qualité, sert à évaluer l'effet des variations des constituants des mélanges à base de ciment sur ses propriétés à l'état frais. Cependant, l'interprétation des mesures rhéologiques est relativement compliquée, et certains pièges peuvent conduire à de mauvaises conclusions. Bien que le modèle Bingham soit principalement utilisé pour les suspensions cimentaires, parfois on obtient des comportements non linéaires pour des mélanges à base de ciment. Ce qui nécessite la sélection d'un modèle rhéologique alternatif, qui pourrait influencer les paramètres rhéologiques. D'autres erreurs de mesure liées à : la dégradation due à la thixotropique et la prise de ciment, à l'écoulement bouchon et à la migration des particules, peuvent être survenues dont on devrait faire attention lors de l'interprétation [99].

L'approche proposée dans cette étude consiste à étudier le comportement du béton à base de sable de concassage à partir du comportement des suspensions qui le composent, à savoir : la suspension de fines qui est constituée

de l'eau et des fines, le coulis de ciment et le mortier. L'influence de la concentration volumique solide et la teneur en fines, sur l'évolution des paramètres rhéologiques sera identifiée.

4.3.1. Suspension des fines

- Effet de la variation de la teneur en fines sur le temps d'écoulement à travers le cône de Marsh

Avant d'entamer aux mesures rhéologiques du béton ou même du mortier à base de sable de concassage en fonction de sa teneur en fines, il est très intéressant de connaître l'effet de ces fines elles mêmes sur la fluidité dans une suspension de base contenant seulement les fines et la phase aqueuse (eau+superplastifiant). De cette façon, nous pouvons distinguer l'effet de ces fines sur la fluidité et l'ampleur d'influence de l'augmentation de la concentration volumique de ces dernières sur la facilité d'écoulement. A cet effet, nous avons procédé aux mesures du temps d'écoulement de 950 ml à travers le cône de Marsh en fonction de la concentration volumique des fines. Nous avons ajouté un dosage constant en Sp pour qu'on puisse comparer les résultats avec ceux des coulis avec Sp avec le maximum possible des points. Les résultats obtenus sont représentés sur la Figure 4.3.

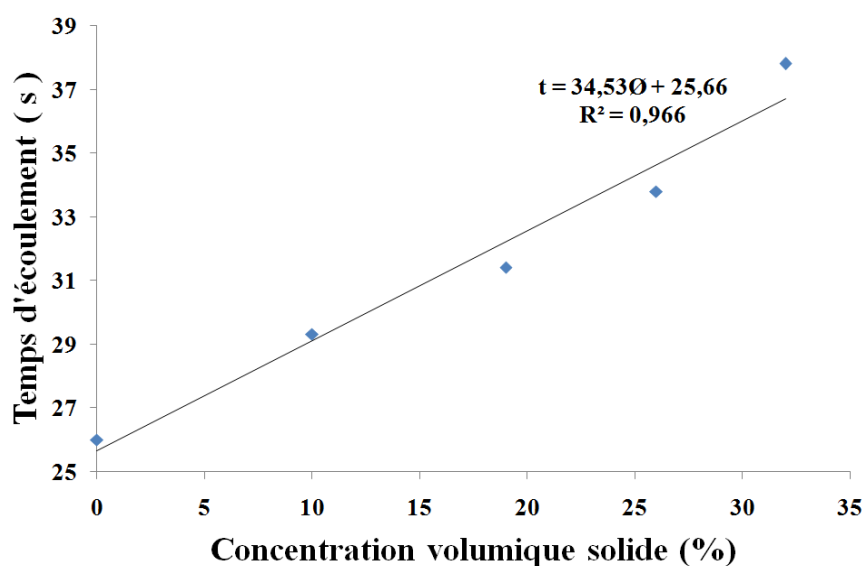


Figure 4.3 : Evolution du temps d'écoulement des suspensions de fines.

- Interprétation et discussion

D'après la Figure 4.3, nous avons constaté que le temps d'écoulement augmente avec l'augmentation de la concentration volumique solide de la suspension teneur en fines. Ceci peut être expliqué par l'accroissement de l'interaction entre les particules de fines dans la suspension.

4.3.2. Coulis de ciment

4.3.2.1. Mesure du temps d'écoulement à travers le cône de Marsh

De même manière qu'avec les suspensions des fines, nous avons mesuré le temps d'écoulement de 950 ml des coulis de ciment à travers le cône de Marsh en fonction de la concentration volumique des fines calcaires. En plus des constituants entrés dans la composition des suspensions des fines en tant que phase dispersante, en ajoutant le ciment en tant que phase dispersée. Cinq dosages en fines ont été utilisés pour étudier leur effet sur les caractéristiques rhéologiques : 0, 15, 30, 45 et 60 % en extrait sec par rapport à la masse du ciment. Dans le contexte général de ce travail, aucune substitution ne sera faite entre le ciment et les fines. Pour cette raison, nous avons ajouté les fines à la composition de base du coulis CC1, selon les pourcentages déjà mentionnés (Tableau 3.5). Les résultats obtenus sont représentés sur la Figure 4.4.

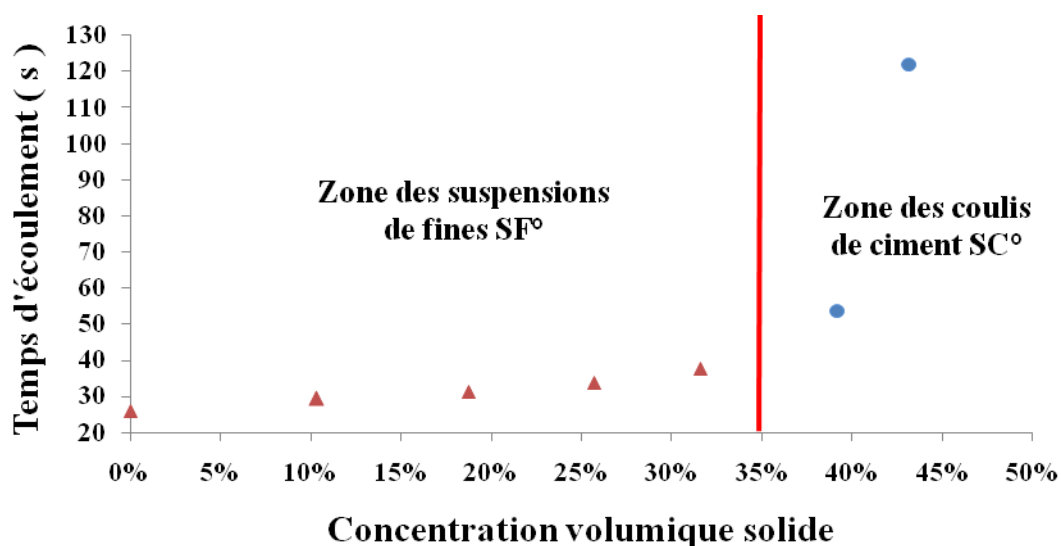


Figure 4.4 : Evolution du temps d'écoulement des coulis de ciment avec Sp [33].

- Interprétation et discussion

Dans le cas des coulis sans adjuvant, il a eu un blocage au niveau de la sortie du cône de Marsh à cause de sa viscosité trop élevée. Cependant, l'ajout d'un superplastifiant, nous a permis de prendre la mesure du temps d'écoulement pour les deux coulis : CC°1 et CC°2.

Néanmoins, même à la présence d'un superplastifiant, l'écoulement de CC°3, CC°4 et CC°5, s'arrête progressivement avant que le récipient soit totalement rempli. Il est à noter que plus le temps d'écoulement à travers le cône de Marsh est grand, moins il est significatif.

La Figure 4.4 montre que le temps d'écoulement augmente avec l'augmentation de la teneur en fines calcaires, autrement dit, il augmente avec l'augmentation de la concentration volumique solide aussi bien des coulis comme des suspensions de fines. Un tel résultat semble évident parce que nous allons augmenter la concentration volumique solide de la suspension par l'ajout des fines, ce qui provoque une augmentation des frottements internes entre les grains de ciment et de fines.

Ce qu'on peut tirer de cette partie, l'ampleur de l'effet de l'ajout des fines sur le temps d'écoulement en supprimant l'effet de la fraction sableuse. Finalement, nous pouvons dire que les fines calcaires affectent l'ouvrabilité des suspensions même en présence de superplastifiant.

4.3.2.2. Essais rhéométriques sur le coulis de ciment

Contrairement à l'essai du cône de Marsh, nous avons pu effectuer des mesures rhéométriques sur les coulis sans superplastifiant (CC) avec quatre teneurs différentes de fines calcaires. Néanmoins, il y a eu un blocage de la pale du rhéomètre.

Cependant, nous avons pu tracer les rhéogrammes de la série des coulis avec superplastifiant (CC°) avec les cinq teneurs en fines ciblées. Les rhéogrammes obtenus, pour les deux séries étudiées, sont représentés sur les Figures : 4.5 et 4.6.

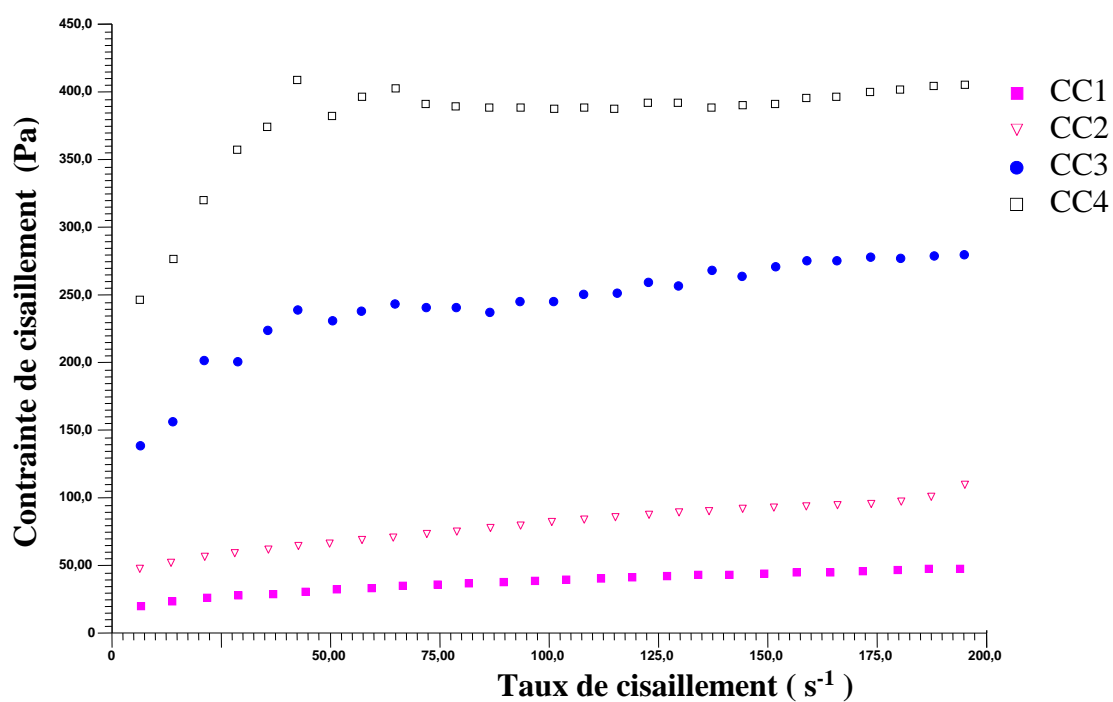


Figure 4.5 : Evolution de la contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement des coulis de ciment sans Sp [33].

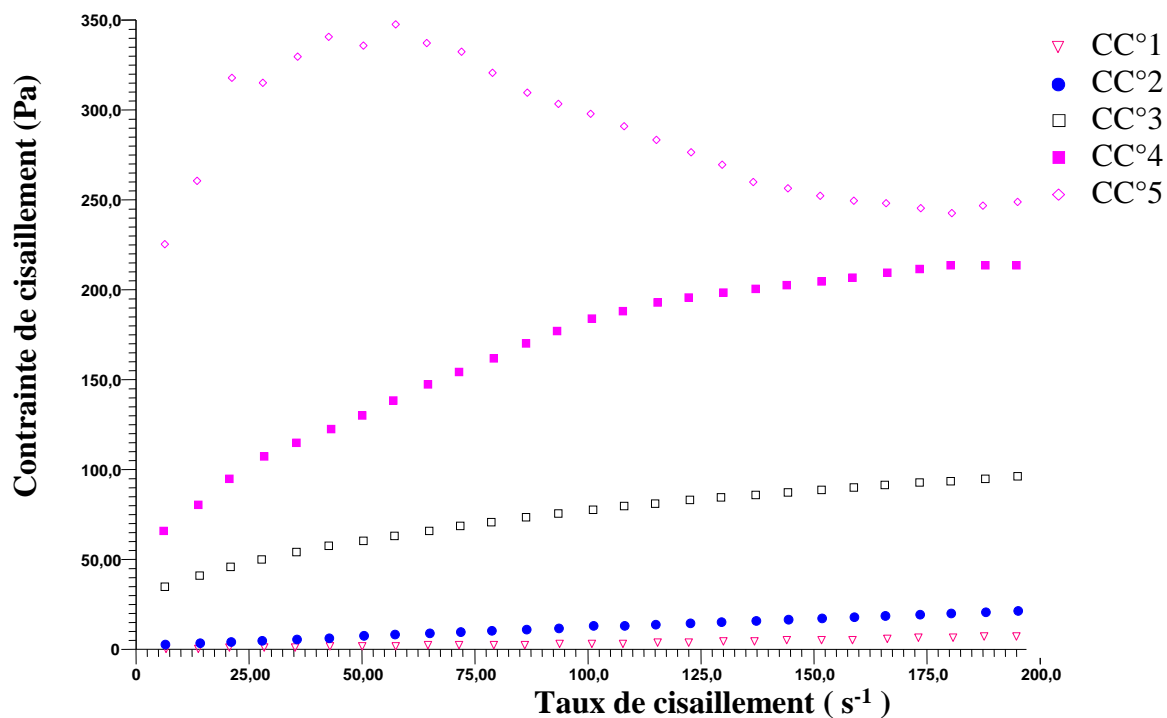


Figure 4.6 : Evolution de la contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement des coulis de ciment avec Sp [33].

- Interprétation et discussion

L'analyse des rhéogrammes représentés sur les Figures 4.5 et 4.6, nous a permis intuitivement de dire que les coulis de ciment, notamment ceux contenant des fines, sont des fluides non Newtoniens. L'évolution de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de déformation montre bien qu'il s'agisse des comportements non linéaires avec une contrainte seuil. L'assimilation adéquate de ces rhéogrammes est celle de Herschel-Bulkley. Ainsi, tous les coulis montrent un comportement rhéofluidifiant. Par contre, le coulis sans fines et sans superplastifiant (CC1) peut être assimilé à un fluide de Bingham. Cependant, le coulis sans fines et avec superplastifiant (CC°1) peut être assimilé à un fluide Newtonien où le seuil de cisaillement tend vers zéro. En ce qui concerne, l'effet l'augmentation de la teneur en fines, il est clair que les propriétés rhéologiques des coulis sont affectées. La concentration volumique des fines a une influence sur la courbure des rhéogrammes. Par conséquent, la viscosité varie d'un coulis à un autre. Toutefois, la contrainte seuil, qui présente l'intersection de la courbe d'écoulement avec l'axe des contraintes de cisaillement, augmente avec l'augmentation de la teneur en fines dans le coulis.

a) Modélisation du comportement rhéologique des coulis de ciment

L'évolution de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement est correctement décrite par le modèle d'Herschel-Bulkley [182] (Equation 4.1) :

$$\tau = \tau_0 + b \cdot \dot{\gamma}^c \quad (4.1)$$

Où : τ_0 : est le seuil de cisaillement.

b, c : sont les paramètres du modèle

L'identification des paramètres du modèle d'Herschel-Bulkley (Figure 4.7) est réalisée par optimisation à l'aide de la méthode du gradient conjugué, qui consiste à minimiser, pour une vitesse de cisaillement donnée, l'écart quadratique entre la valeur de la contrainte mesurée et celle calculée par le modèle. La figure 4.7 montre un exemple de modélisation de la courbe d'écoulement de CC°4. La figure illustre l'allure expérimentale et sa modélisation sous le modèle de Herschel-Bulkley.

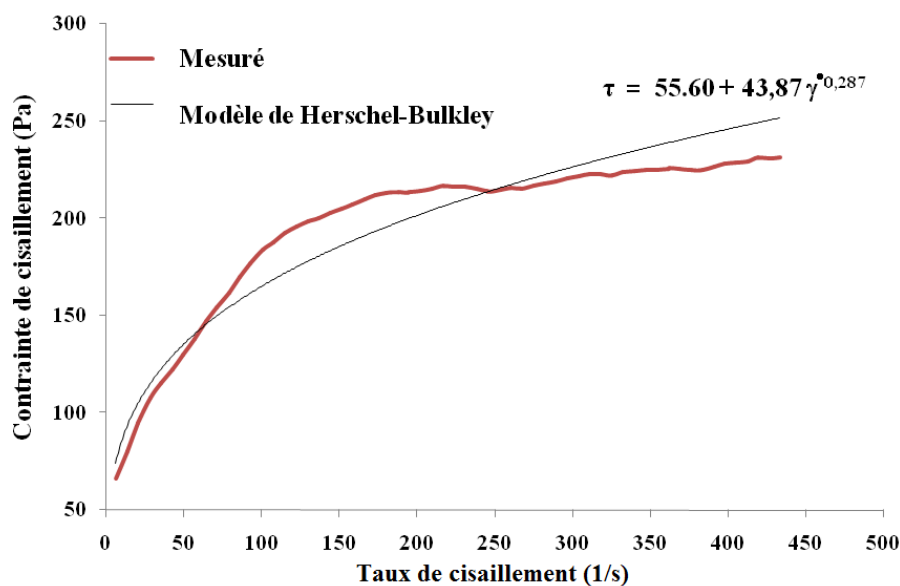


Figure 4.7 : Rhéogrammes du coulis CC⁴
Modélisation par le modèle de Herschel-Bulkley.

L'exploitation des résultats obtenus, nous a permis d'extrapoler les valeurs de la contrainte seuil pour une vitesse de cisaillement nulle, via le modèle d'Herschel-Bulkley.

Les différentes valeurs identifiées pour les trois paramètres du modèle sont résumées dans les tableaux (4.6 et 4.7), respectivement dans le cas des coulis de ciment sans adjuvant et avec 1% de superplastifiant.

Tableau 4.6 : Valeurs des paramètres du modèle d'Herschel-Bulkley
- Cas des coulis de ciment sans Sp.

Coulis	Ø (%)	τ_0 (Pa)	b (Pa.s)	c
CC 1	39,22	17,00	9,459	0,3650
CC 2	43,20	42,00	20,080	0,3220
CC 3	46,69	130,00	113,600	0,1690
CC 4	49,78	230,00	260,350	0,0818

Tableau 4.7 : Valeurs des paramètres du modèle d'Herschel-Bulkley
- Cas des coulis de ciment avec 1% de Sp.

Coulis	Ø (%)	τ_0 (Pa)	b (Pa.s)	c
CC [°] 1	39,22	0,09	0,030	1,0360
CC [°] 2	43,20	1,80	0,405	0,7460
CC [°] 3	46,69	30,50	14,560	0,3680
CC [°] 4	49,78	55,60	43,870	0,2870

- Interprétation et discussion

Le paramètre c du modèle est caractéristique du comportement du mélange. Dans le cas des coulis, le paramètre « c » est toujours inférieur à 1,0 (Tableaux 4.6 et 4.7), sauf pour le cas de coulis de ciment sans fines qui montre un comportement plus proche d'un fluide de Bingham. Ce résultat indique des fluides rhéofluidifiants à seuil de contrainte. Selon l'accroissement de la concentration volumique solide, ce paramètre est changé, c'est-à-dire, le comportement des coulis est changé.

En fait, l'interprétation des résultats obtenus avec une géométrie Vane peut varier d'un auteur à autre. La Figure 4.8 montre une courbe type d'écoulement. Elle illustre l'évolution de la contrainte de cisaillement en fonction du temps sous une vitesse de cisaillement imposée (constante).

Selon Liddel et Boger, cité par Bethmont [183], la première région linéaire (jusqu'au point A de la Figure 4.8) est liée aux déformations élastiques du réseau de particules. Lorsque la limite d'élasticité est atteinte (point A), des ruptures apparaissent au sein du réseau et une perte de linéarité est observée (entre les points A et B). Certains auteurs considèrent que le seuil d'écoulement correspond à cette transition, donc utilisent la valeur obtenue au point A.

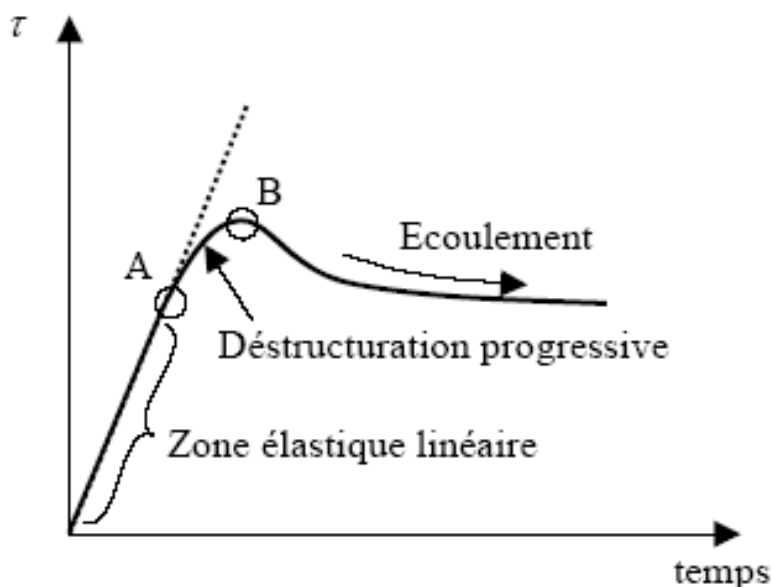


Figure 4.8 : Courbe type d'un essai en géométrie Vane [183].

Plus généralement, le seuil d'écoulement est déterminé à partir du pic de contrainte (point B) qui correspond à la déstructuration macroscopique de la

structure de la suspension. D'après Bethmont [183], certains auteurs qualifient ce seuil d'écoulement de dynamique, car l'écoulement est amorcé. D'autres considèrent qu'il s'agit d'un seuil statique puisque le matériau est initialement au repos. Quelle que soit la dénomination choisie, il est généralement considéré comme étant le « vrai » seuil d'écoulement du matériau parce que toutes les liaisons entre particules sont rompues [183].

En conclusion, le coulis de ciment est un fluide à seuil de type Herschel-Bulkley. L'évolution du seuil de cisaillement en fonction de la concentration volumique solide est décrite par le modèle de Legrand, tandis que la viscosité peut être modélisée par le modèle d'Krieger-Dougherty [184]. Plus que le rapport fines/ciment est plus grand, plus le coulis de ciment est difficile à s'écouler (seuil de cisaillement plus grand) et à cisailier (viscosité plus grande).

b) Etude du seuil de cisaillement

L'évolution des seuils de cisaillement τ_0 , identifiés à l'aide du modèle d'Herschel-Bulkley (Equation 4.1) en fonction de la concentration volumique solide des coulis, semblent évoluer selon un modèle de puissance de type Legrand [140] (Equation 4.2) :

$$\tau_0 = a.e^{b(\phi-0.5)} \quad (4.2)$$

Avec : a, b : paramètres du modèle.

Le paramètre a : d'après Legrand, le paramètre " a " dépend essentiellement de la surface spécifique. Cyr a calculé la surface spécifique des particules fines utilisés dans leurs recherches et il a trouvé que " a " augmente selon l'accroissement de la surface spécifique, cité par Nguyen [185].

Le paramètre b : il est surtout fonction de la nature et de la forme des grains. En absence de l'adjuvant et de l'addition minérale, il prend une valeur comprise entre 23 et 48 selon que les grains sont sphériques ou anguleux [185]. Dans notre cas, la valeur de b est égale à 25,46 (Figure 4.9).

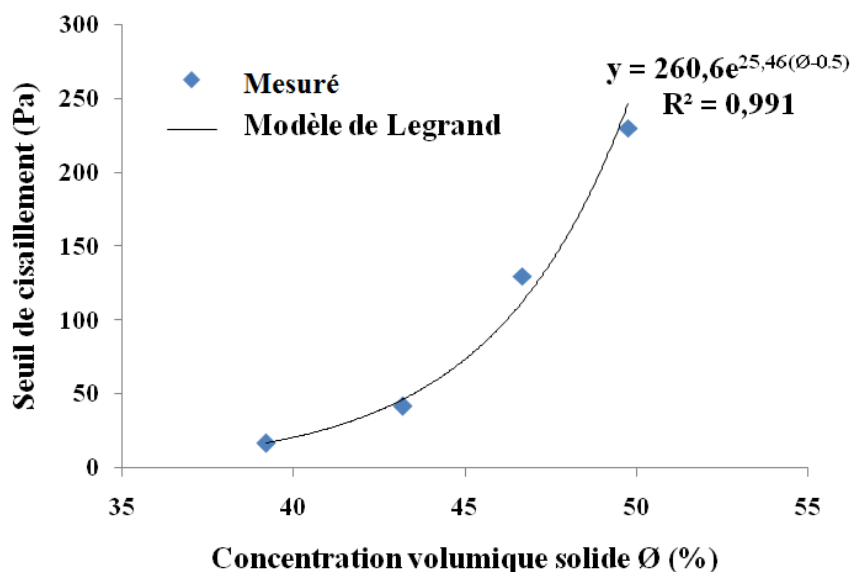


Figure 4.9 : Evolution du seuil de cisaillement en fonction de la concentration volumique solide des coulis de ciment sans Sp - Modèle de Legrand -

▪ Interprétation et discussion

La Figure 4.9 montre que l'évolution du seuil de cisaillement en fonction de la concentration volumique solide suit une loi de type exponentiel. La contrainte seuil augmente d'une façon exponentielle avec l'augmentation de l'ajout des fines calcaires de concassage. Dans ces conditions, la contrainte seuil est essentiellement liée au potentiel d'interaction physico-chimique des particules de ciment et de fines calcaires. L'augmentation de la concentration solide des coulis engendre un frottement plus intense. En plus, l'ajout des fines provoque une augmentation de la surface spécifique, ce qui augmente aussi le frottement interne. Tout ça conduit à l'accroissement de l'énergie minimale qu'on doit apporter pour briser le potentiel d'interaction physico-chimique des particules.

c) Etude de la viscosité apparente

A partir des rhéogrammes présentés sur les Figures 4.5 et 4.6, il est possible de déduire les courbes de viscosité apparente en fonction du taux de cisaillement. La viscosité apparente est calculée comme le rapport de la contrainte et de la vitesse de cisaillement pour une concentration volumique solide donnée. Les rhéogrammes représentés sur les Figures 4.10 et 4.11.a) sont obtenus à l'aide du logiciel TA Data Analysis.

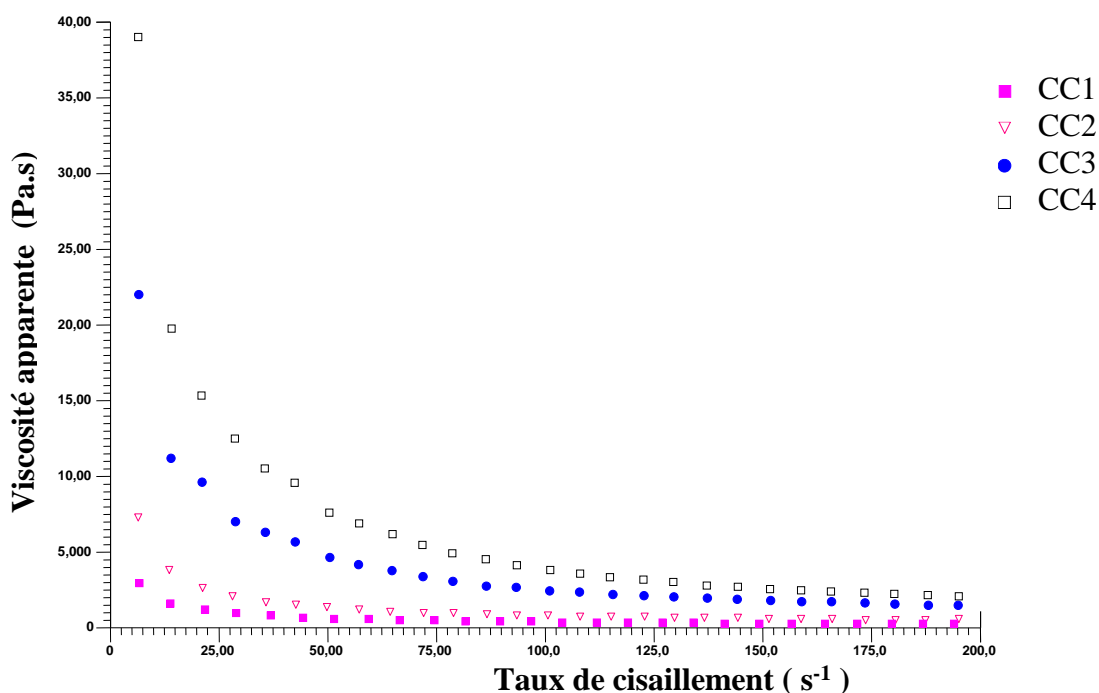


Figure 4.10 : Evolution de la viscosité de cisaillement en fonction du taux de cisaillement des coulis de ciment sans Sp [33].

Par ailleurs, la Figure 4.11.b) illustre l'évolution de la viscosité apparente identifiées à l'aide de fichier des résultats du logiciel de traitement : TA Data Analysis, pour différentes valeurs de vitesse de déformation.

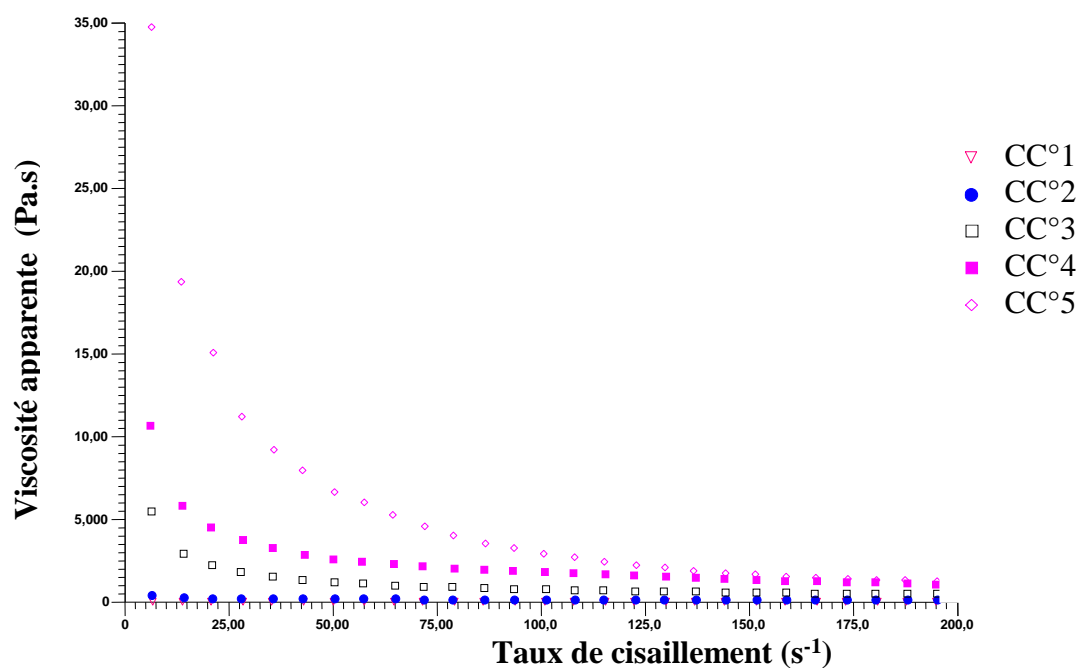
- Interprétation et discussion

Les courbes d'écoulement représentées sur les Figures 4.11.a) et b), montrent que la viscosité des coulis de ciment avec et sans adjuvant sur la plage de vitesse de cisaillement testée diminue. C'est ce qu' on appelle le comportement rhéofluidifiant. Il est rapporté par Nguyen [185], que Quémada a interprété les propriétés non-newtoniennes des suspensions par la formation et l'évolution au cours de l'écoulement de structures internes ou ce qu'on appelle unités structurales. Ces structures, appelées également amas ou agrégats, correspondent à un regroupement de particules en emprisonnant une fraction du fluide suspendant entre elles. La formation de ces amas est souvent à l'origine de certaines réponses rhéologiques comme le rhéoépaississement. Ainsi, la rupture de ces unités structurales (US) est accompagnée d'une libération du fluide interstitiel et c'est la cause de la rhéofluidification des suspensions.

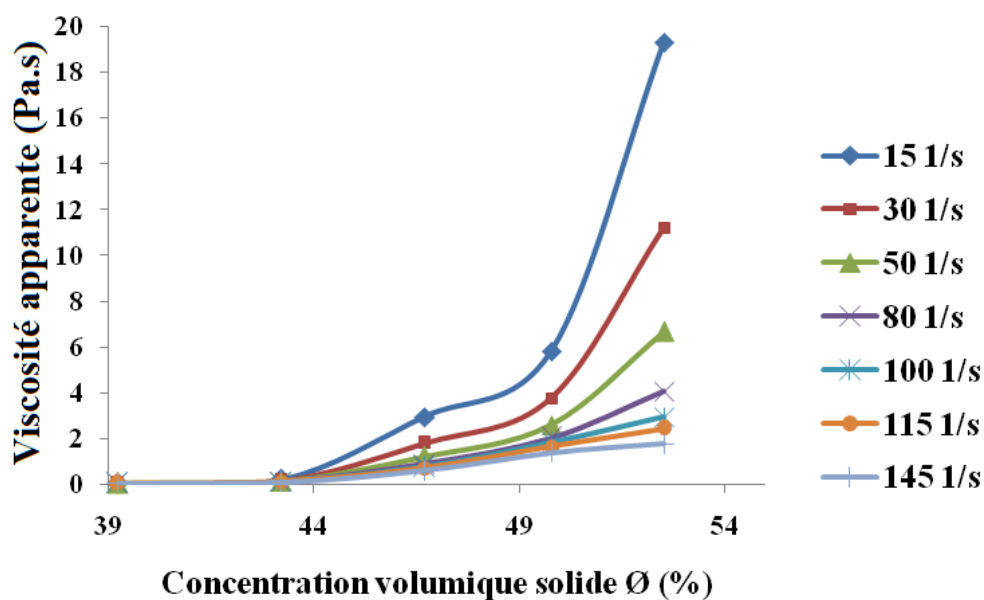
Cependant, l'allure de ces courbes de viscosité présentées sur la Figure 4.11.a), peut être ensuite modélisée en utilisant l'équation de Krieger-Dougherty [184] :

$$\mu = \mu_0 \left(1 - \frac{\phi}{\phi_M} \right)^{-[\eta]\phi_M} \quad (4.3)$$

Avec : μ : est la viscosité apparente du coulis de ciment.
 μ_0 : est la viscosité apparente du fluide saturant.
 ϕ_M : concentration volumique solide maximum du coulis.
 $[\eta]$: viscosité intrinsèque du coulis.



(a)



(b)

Figure 4.11 : Evolution de la viscosité apparente des CC en fonction a) du taux de cisaillement et, b) de la concentration volumique solide.

4.3.3. Mortier

Les propriétés rhéologiques du mortier peuvent s'apprécier de diverses façons et en particulier par la mesure de son ouvrabilité ou sa maniabilité. Cela se fait par des essais empiriques classiques tels que l'essai de l'affaissement au mini cône et la mesure du temps d'écoulement à travers le cône d'écoulement ou le maniabilimètre B. Sinon, la caractérisation on fait recours aux mesures rhéométriques en déterminant les différentes propriétés rhéologiques en l'occurrence la viscosité et le seuil de cisaillement. Dans cette partie, nous allons étudier les principaux paramètres influant les propriétés des mortiers à base de sable concassé calcaire à l'état frais, à savoir : le rapport E/C, la teneur en fines dans le SC, le temps de repos, le dosage en superplastifiant, la fraction sableuse.

4.3.3.1. Mesure du temps d'écoulement au maniabilimètre B et à travers le cône d'écoulement

a) Influence du rapport E/C

Afin de mettre en évidence l'évolution du temps d'écoulement, à travers le cône d'écoulement et au maniabilimètre, des mortiers à base de SC calcaire en fonction du rapport E/C, nous allons varier ce rapport de 0,30 jusqu'à 0,50 avec un pas de 0,05 dans le but d'obtenir le maximum de résultats interprétables. A cet effet, nous avons utilisé la composition de base M1 qui se caractérise par un rapport S/C=1. Les Figures 4.12 et 4.13 illustrent les résultats obtenus :

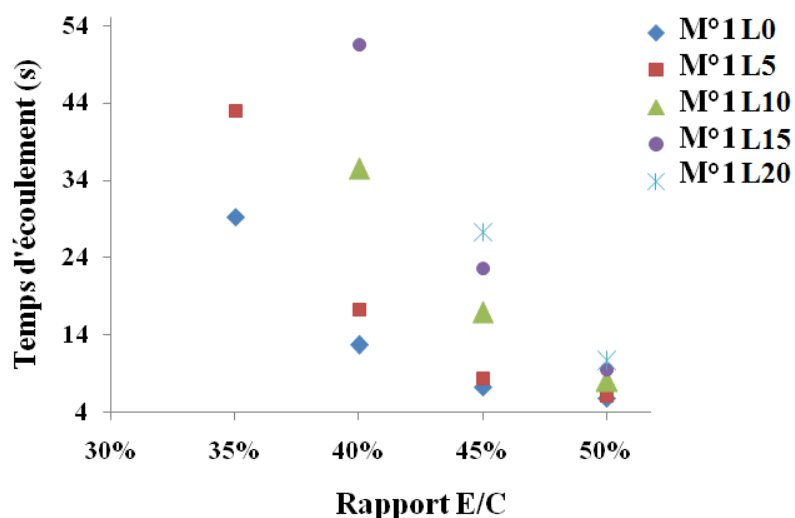


Figure 4.12 : Evolution du temps d'écoulement des mortiers M°1 à travers le cône d'écoulement en fonction du rapport E/C.

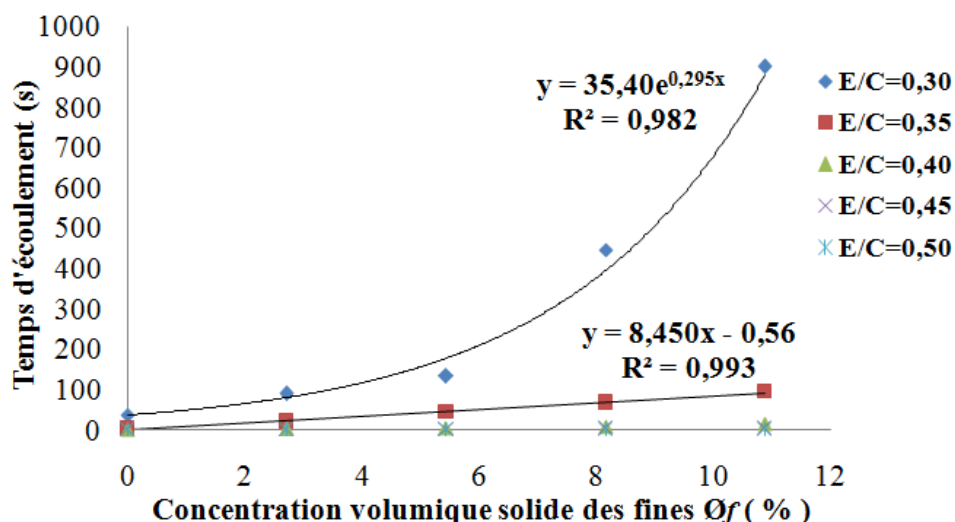


Figure 4.13 : Mesure du temps d'écoulement de M1 au Maniabilimètre B pour différents rapport E/C en fonction de la concentration volumique solide des fines dans le SC.

- Interprétation et discussion

La Figure 4.12 illustre l'évolution du temps d'écoulement, à travers le cône d'écoulement, des mortiers confectionnés avec différents rapports E/C. L'allure montre que le temps d'écoulement est inversement proportionnel avec le rapport E/C. Autrement dit, l'augmentation du rapport E/C provoque une amélioration de l'ouvrabilité, ce qui conduit à une diminution du temps nécessaire pour remplir 1000 ml du mortier s'écoulant à travers le cône d'écoulement. La Figure 4.12 montre aussi que l'influence du rapport E/C sur le temps d'écoulement est plus importante pour des dosages en eau les plus faibles. Ceci peut être mieux montré par la Figure 4.13, où l'allure de la variation du temps d'écoulement, au maniabilimètre B, suit un modèle exponentiel pour un dosage très faible en eau (E/C=0,30). Par contre, plus le rapport E/C augmente, l'allure est devenue bien linéaire et sa pente diminue. Nous signalons que nous n'avons pas pu mesurer le temps d'écoulement pour toutes les variantes avec le même instrument. Par exemple, on n'a pas pu mesurer le temps correspond à E/C=0,30 à travers le cône d'écoulement pour le cas des mortiers même avec Sp M°1 suite au blocage de l'écoulement au niveau de l'ajutage du cône (Figure 4.12). Par ailleurs, à la présence de vibration du maniabilimètre, le temps d'écoulement des mortiers M1 sans Sp pour des rapports E/C supérieurs à 0,45, tend vers zéro seconde.

b) Influence des fines calcaires de concassage

Pour évaluer l'influence des fines dans le SC sur le temps d'écoulement, nous avons utilisé les résultats obtenus dans la partie précédente, en traçant l'allure de la variation ce paramètre en fonction de la concentration volumique solides des fines dans les mortiers (Figure 4.13) et en fonction de la teneur en fines dans le SC (Figure 4.14). Des courbes de tendance ont été tracées sur les deux figures en affichant le coefficient de détermination sur chaque courbe. Nous signalons que les résultats de la Figure 4.13 sont obtenus par un maniabilimètre avec des mortiers M1. En revanche, les résultats de la Figure 4.14 représentent le temps d'écoulement de 1000 ml de mortier à travers le cône d'écoulement.

▪ Interprétation et discussion

La Figure 4.14 présente l'influence de la teneur en fines dans le SC sur le temps d'écoulement, à travers le cône d'écoulement. La courbe montre que le temps d'écoulement augmente avec l'accroissement de la teneur en fines dans SC. Or, la résistance interne à l'écoulement du mortier augmente.

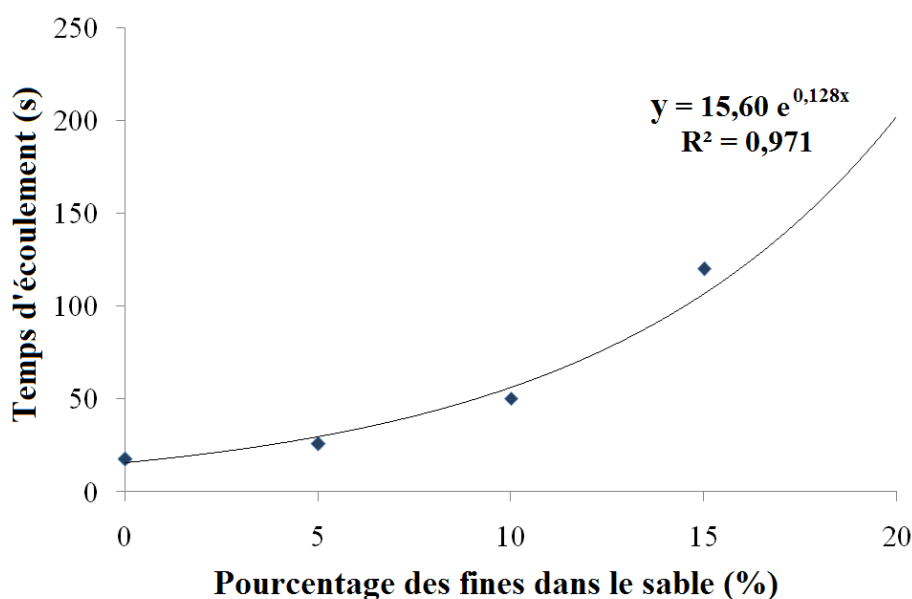


Figure 4.14 : Evolution du temps d'écoulement du mortier M1° à travers le cône d'écoulement en fonction de leur concentration en fines.

Ces résultats concordent bien avec la mesure ci-dessus de l'affaissement et l'étalement : c'est-à-dire, l'augmentation de la concentration en masse de fines provoque une diminution de l'ouvrabilité du mortier. L'évolution du temps

d'écoulement par rapport à la concentration massique des fines dans le sable a une tendance exponentielle. Ce qui manifeste par un blocage à la sortie du cône avec 20% de fines. Selon Roussel et al. [163], de point de vue pratique, pour un fluide viscoplastique, ayant un seuil de cisaillement, l'écoulement ne peut pas se produire si le gradient de pression créé par le poids propre du fluide au-dessus de l'ajutage peut ne pas être suffisant pour que la contrainte de cisaillement dépasse le seuil d'écoulement dans la buse. Dans ce cas, le cône devient inutile : c'est le cas du mortier contenant un sable à 20% de fines. Ainsi, comme il a été déjà mentionné, l'évolution du temps d'écoulement en fonction de la concentration en fines est exponentielle pour un rapport E/C très faible (Figure 4.13) ou bien pour un écoulement statique (Figure 4.14), qui se produit seulement sous le poids propre. Par contre, pour un écoulement sous l'effet de vibration dynamique du maniabilimètre (Figure 4.13), l'évolution est devenue moins vigoureuse et la variation de l'allure en fonction de la concentration massique des fines et le rapport E/C, n'est plus claire.

c) Influence du temps de repos

Afin d'obtenir des résultats interprétables après 60 minutes, nous avons fait les mesures sur les mortiers M°1 (E/C=1 avec Sp) présentant la meilleure fluidité. Nous avons pris des mesures du temps d'écoulement à travers le cône d'écoulement à 0, 15, 30 et 60 minutes après le malaxage. Tout en prenant $t_0 = 0$, l'instant de la mise en place du mortier dans le cône juste après le malaxage. Il est à noter qu'on a remalaxé le mortier pendant 15 secondes à petite vitesse juste avant chaque mesure afin d'éliminer l'éventuel effet de la thixotropie. Les résultats obtenus sont illustrés dans la Figure 4.15.

▪ Interprétation et discussion

La Figure 4.15 montre que l'augmentation de la teneur en fines dans le sable affecte le maintien de l'ouvrabilité. Ceci se traduit par la diminution d'une seule seconde qui a été enregistrée avec le sable lavé (0% de fines) après 60 minutes. Par contre, la présence de 20% de fines dans le SC, la perte de l'ouvrabilité était de l'ordre de 10 secondes. Ce qui représente une perte de 100% du temps d'écoulement après 60 minutes, donc une perte considérable d'ouvrabilité.

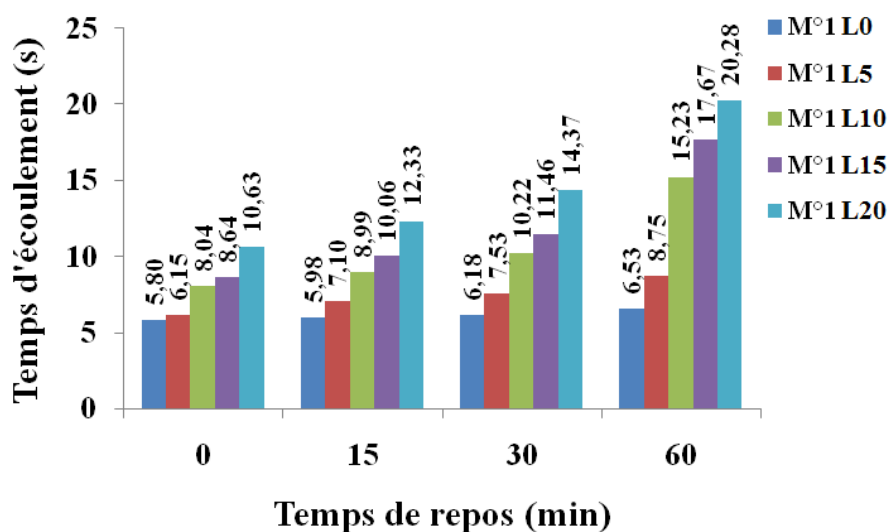


Figure 4.15 : Evolution du temps d'écoulement des mortiers M1° en fonction du temps de repos.

En effet, il y a deux phénomènes transitoires distincts pouvant manifester la perte de l'ouvrabilité dans le temps ce sont : la thixotropie (phénomène réversible) et le vieillissement (phénomène irréversible). En ce qui concerne le premier phénomène, un simple malaxage suffisamment vigoureux peut "effacer" les conséquences d'un long espace de temps de repos sur l'état de floculation d'un matériau. Alors qu'aucun malaxage ne peut inverser les réactions physico-chimiques provoquent le vieillissement. Comme le phénomène de thixotropie est réversible, le gain en seuil d'écoulement disparaît suite à un remalaxage suffisant du mortier, donc dans notre cas il ne s'agit que de vieillissement du mortier qui affecte la perte de l'ouvrabilité observée pendant les essais effectués.

En outre, la présence des fines joue un rôle d'accélérateur de prise. Selon Benna et Dahli [49], un tel résultat a été déjà observé par Nonat en 1994, qui a montré par calorimétrie que l'hydratation du silicate tricalcique est plus rapide en présence de fines calcaire (les fines agissent comme catalyseur de l'hydratation de $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_3$). En fait, ce résultat est en accord avec plusieurs recherches en l'occurrence : Vikan et Justnes [53], Kadri et al. [54], Nehdi [56] et Ramachandran et Chun-Mei [57].

d) Influence du volume de la fraction sableuse

Afin de mettre en évidence l'influence de la fraction sableuse concassée sur le temps d'écoulement au maniabilimètre, trois différentes compositions de mortiers ont été confectionnées : M1, M2 et M3, dont le rapport Sable/Ciment (S/C) est respectivement égal à : 1, 2 et 3. Les histogrammes illustrés dans la Figure 4.16 représentent ainsi obtenus.

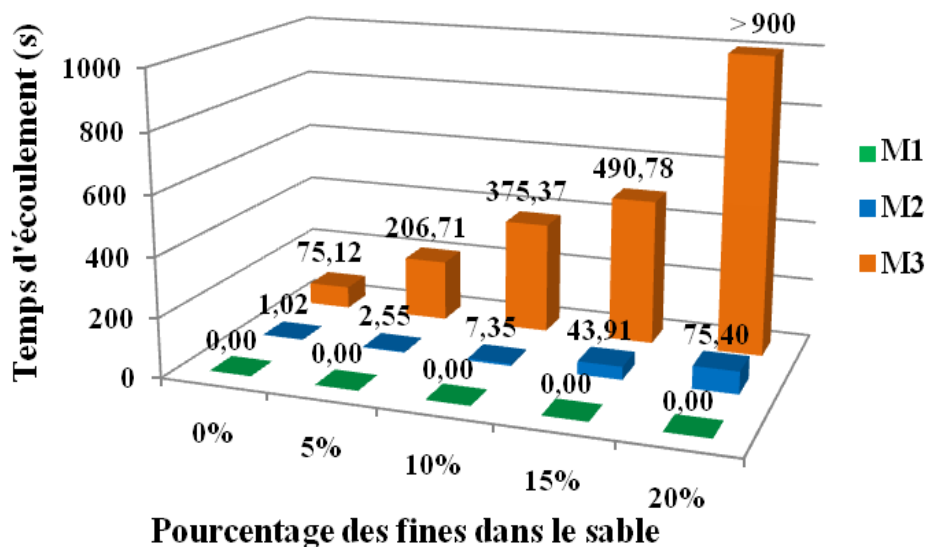


Figure 4.16 : Influence du volume de la fraction sableuse calcaire sur l'évolution du temps d'écoulement des mortiers au maniabilimètre B.

▪ Interprétation et discussion

La Figure 4.16 montre que la meilleure fluidité a été enregistrée par le mortier M1 dont le rapport S/M = 1. Par contre, le mortier confectionné avec un rapport S/M = 3 semble très ferme, même avec un dosage de 1,0% de superplastifiant, notamment avec une teneur en fines élevée dans le SC. Ceci peut être expliqué comme suit : la diminution du rapport S/C conduit à une réduction du volume de sable et par conséquent l'augmentation du volume de la pâte de ciment, ce qui contribue significativement à l'amélioration de la fluidité du mortier et favorise la mobilité de la matrice cimentaire des mortiers.

e) Influence du dosage en superplastifiant

L'utilisation d'un superplastifiant dans le mortier provoque une défloculation des grains et une lubrification de la pâte. Le Tableau 4.8 résume les résultats

obtenus en utilisant le maniabilimètre B. La figure 4.17 montre la différence du temps d'écoulement enregistré entre un mortier contient un Sp et le même mortier sans Sp.

Tableau 4.8 : Influence du Sp sur le temps d'écoulement au maniabilimètre des mortiers M3L et M2L.

Pourcentage de fines dans le sable	S/C=3			S/C=2		
	Temps d'écoulement (s)		$(t_0-t_1)/t_0$ (%)	Temps d'écoulement (s)		$(t_0-t_1)/t_0$ (%)
	t_0 (0% adj)	t_1 (1% adj)		t_0 (0% adj)	t_1 (1% adj)	
0 %	75,12	4,53	94,0	1,02	$\cong 0,00$	-
5 %	206,71	42,24	79,6	2,55	$\cong 0,00$	-
10 %	375,37	202,85	46,0	7,35	$\cong 0,00$	-
15 %	490,78	360,49	26,5	43,91	1,98	95,5
20 %	> 900	787,41	-	75,40	8,94	88,1

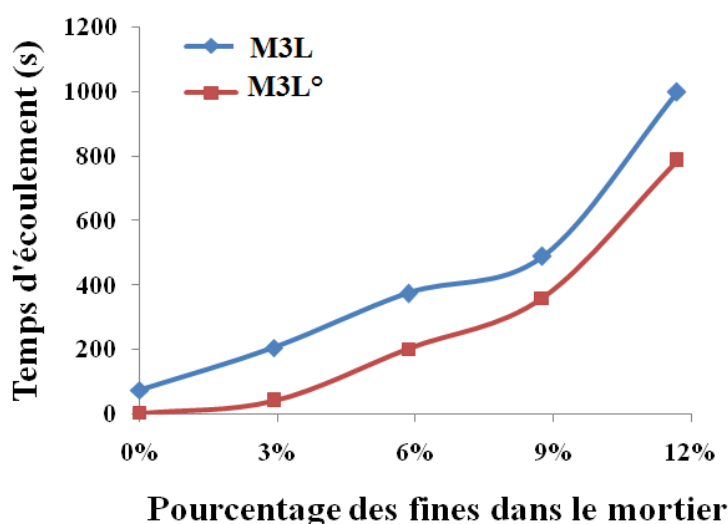


Figure 4.17 : Influence du Sp sur l'évolution du temps d'écoulement au maniabilimètre des mortiers M3L et M3L°.

▪ Interprétation et discussion

L'effet du superplastifiant favorise la fluidité du mortier pour les formulations M2L et M3L. Ce genre d'adjuvant agit par adsorption à l'interface solide-eau, ce qui permet aux grains de ciment d'acquies des charges identiques et créer ainsi

un phénomène de dispersion des particules par répulsion électrostatique. Ceci permet de libérer une quantité de l'eau qui a été piégée par les grains de ciment floculés et diminuer ainsi les frictions intergranulaires et par conséquent améliorer la fluidité du mortier. Cependant, le dosage en superplastifiant ne doit pas dépasser un seuil, appelé le dosage à saturation en superplastifiant, au-delà duquel le superplastifiant n'entraîne pas des modifications notables de la rhéologie du mélange. En outre, on constate que le gain de l'ouvrabilité est diminué avec l'accroissement de la concentration des fines dans le sable (Tableau 4.8). Cependant, la Figure 4.17 montre que l'allure d'évolution du temps d'écoulement du mortier avec et sans superplastifiant semble identique.

4.3.3.2. Mesure de l'affaissement et de l'étalement

a) Influence de la teneur en fine dans le SC

La Figure 4.18 illustre l'étalement et l'affaissement des mortiers à base de SC. Les essais ont été effectués à un rapport E/C de 0,5 avec différentes teneurs en fines dans le sable. L'ajout du 0,8% superplastifiant en masse de ciment était dans le but d'obtenir le maximum des points sans produire de blocage lors des essais rhéométriques pour une éventuelle corrélation entre les essais empiriques classiques et les essais rhéométriques. Il faut garder à l'esprit que la valeur minimale de l'étalement qui peut être mesurée est de 10 cm correspondant au diamètre du fond de mini-cône. Il est clair que l'affaissement et l'étalement diminuent avec l'augmentation de la teneur en fines dans le SC. Autrement dit : l'addition des fines affecte l'ouvrabilité du mortier. Cela est dû à une augmentation de la surface spécifique, et par conséquent, l'augmentation de la demande en eau. Selon Nehdi et al. [70], étant donné que le remplacement du matériau par un autre de surface spécifique différente changerait la surface humide et la quantité d'eau adsorbée. Ainsi, quelque adition ayant une certaine solubilité dans l'eau, peut modifier la solution d'électrolyte et donc les forces électrostatiques. Ces résultats sont en bon accord avec les résultats de plusieurs travaux déjà publiés [70, 78, 186].

Par contre, ces résultats semblent contredire la littérature où les auteurs [53, 76] ont constaté que l'augmentation des fillers calcaires améliore la maniabilité. Mais, il convient de noter que les fillers utilisés dans ces travaux de recherche ont une surface spécifique approximativement égale à 500 m²/kg et que

la substitution a été effectuée entre le ciment et les fillers, dont la surface spécifique est pratiquement comparable. Dans cette étude, les fines ont une surface spécifique égale à 1470 m²/kg et la substitution a été faite avec le sable, dont la surface spécifique est nettement inférieure à celle des fines. Il est donc difficile de faire une comparaison.

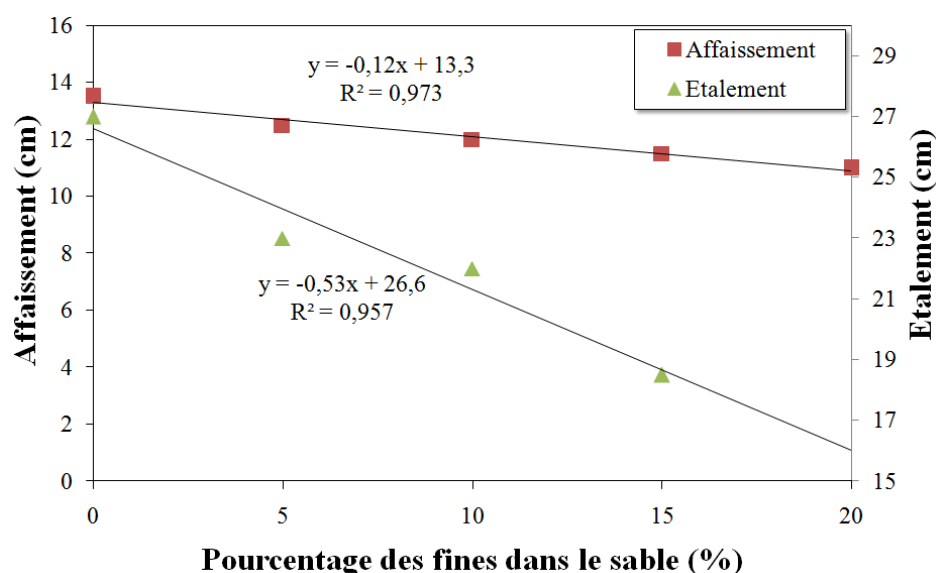


Figure 4.18 : Influence des fines sur les propriétés d'écoulement des M1° [187].

b) Influence de la nature du SC et de la concentration massique de la fraction sableuse

Pour étudier l'influence de la nature du SC, sur l'ouvrabilité en terme d'affaissement, se fait par la confection d'un mortier à base de SC calcaire et un autre à base de SC siliceux en utilisant la composition de base M1. En revanche, l'influence de la fraction sableuse concassée dans le mortier, nous avons confectionné des mortiers avec un rapport S/C est égal 1, 2 et 3, nommés respectivement M1, M2 et M3. La Figure 4.19 représente l'influence de la nature du SC et la fraction sableuse sur l'évolution de l'affaissement au mini-cône. Le sable utilisé pour confectionner ces mortier est un SC lavé, supposé contient 0% de fines.

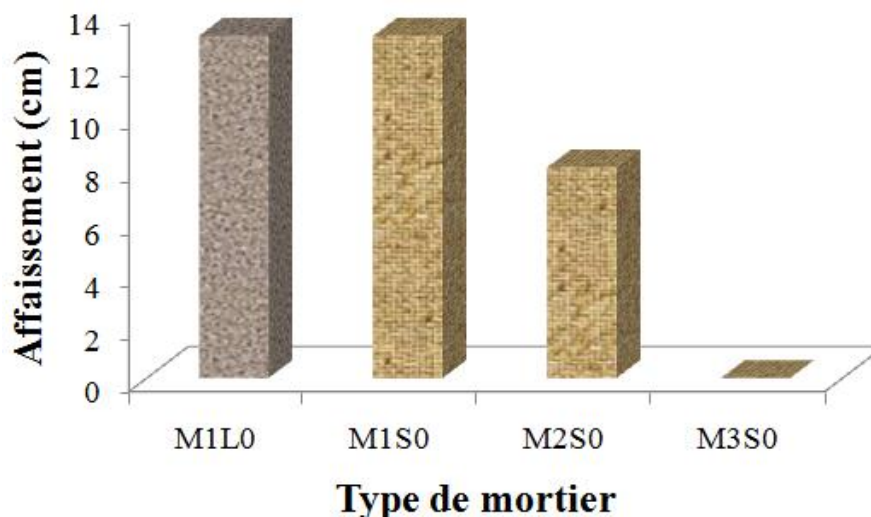


Figure 4.19 : Influence la nature du sable et de la concentration massique de la fraction sableuse sur l'évolution de l'affaissement au mini-cône.

- Interprétation et discussion

La Figure 4.19 montre que l'augmentation de la fraction sableuse affecte l'ouvrabilité en diminuant l'affaissement des mortiers. L'ampleur de l'influence s'est montrée de plus en plus claire en passant d'un rapport S/C de 1 à 3. Le mortier confectionné avec un rapport S/C=1 donne un affaissement presque total, tandis que le mortier avec un rapport S/C=3, donne un affaissement nul. L'augmentation de la fraction sableuse provoque une diminution de la pâte cimentaire. Ce qui augmente le frottement interne entre les grains et conduit à une diminution de l'épaisseur de la couche qui enrobe les grains de sable. Ceci affecte la mobilité du mortier, et donc l'affaissement. Nous signalons ici que l'influence des fines sur l'ouvrabilité est pratiquement éliminée en utilisant un sable lavé à 0% de fines.

En revanche, la Figure 4.19 montre aussi que l'utilisation de SC calcaire ou siliceux donne pratiquement le même affaissement.

4.3.3.3. Mesure de l'air occlus

Il est très intéressant de mettre en évidence l'effet de l'utilisation de SC et l'influence sa teneur en fines sur l'évolution de l'air occlus dans le mortier M1°. A cet effet, la Figure 4.20 présente les résultats de la mesure de l'air occlus dans le mortier en fonction de la teneur en fines dans le SC.

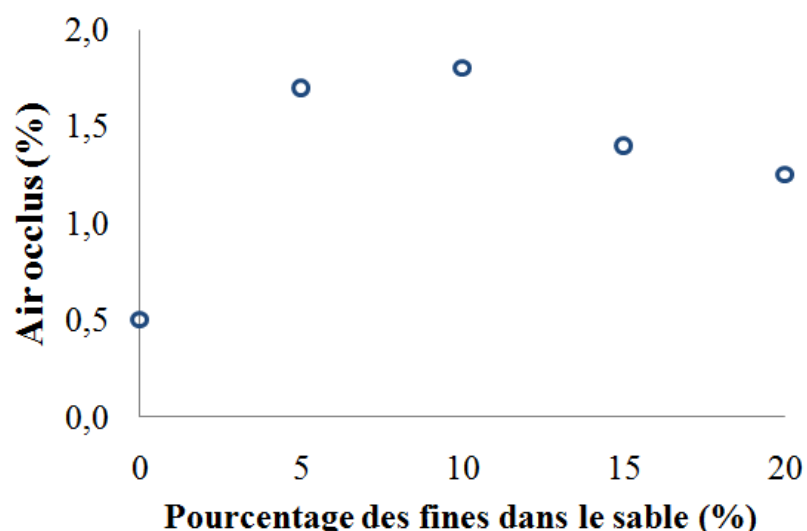


Figure 4.20 : Evolution de l'air occlus en fonction de la teneur en fines dans le SC dans le mortier avec Sp (M1°).

- Interprétation et discussion

L'allure de l'évolution de l'air occlus des mortiers à base de SC en fonction de la teneur en fines dans le SC (Figure 4.20) présente une valeur critique, qui se trouve entre 5 et 10% de fines dans le SC, pour laquelle l'air occlus est maximum. D'après les résultats déjà exposés, nous pouvons confirmer que l'augmentation de la teneur en fines dans le SC affecte l'ouvrabilité. Ce qui conduit incontestablement à une augmentation de l'air occlus des mortiers. Par contre, il est reporté dans la littérature que l'ajout des fines diminue l'indice de vide et l'air occlus. Donc, ces deux effets contradictoires conduisent probablement à la naissance de cette valeur critique. Finalement, nous tenons à signaler que nous n'avons pas trouvé la même allure sans Sp.

4.3.3.4. Essais rhéométriques sur le mortier

Pour convertir les données des couples et de vitesse de rotation de la pale en contraintes de cisaillement en fonction du taux de cisaillement, la procédure utilisée, déjà mentionnée au paragraphe 3.4.4.4., considérait le matériau cisailé comme un fluide de Bingham. Un exemple de l'évolution du couple avec la vitesse de rotation (Figure 4.21) et sa conversion en contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement est représenté respectivement par les Figures 4.21 et 4.22.

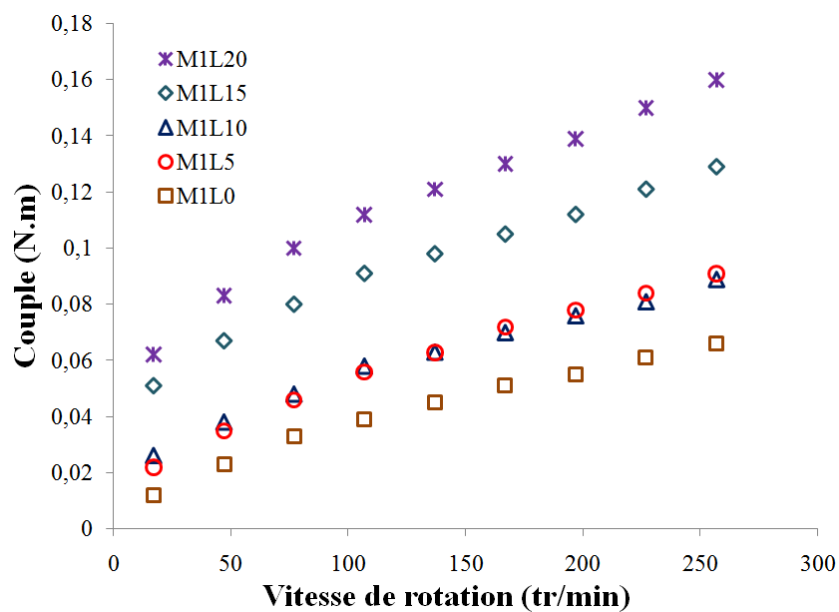


Figure 4.21 : Rhéogrammes montrent l'évolution des couples en fonction de la vitesse de rotation [187].

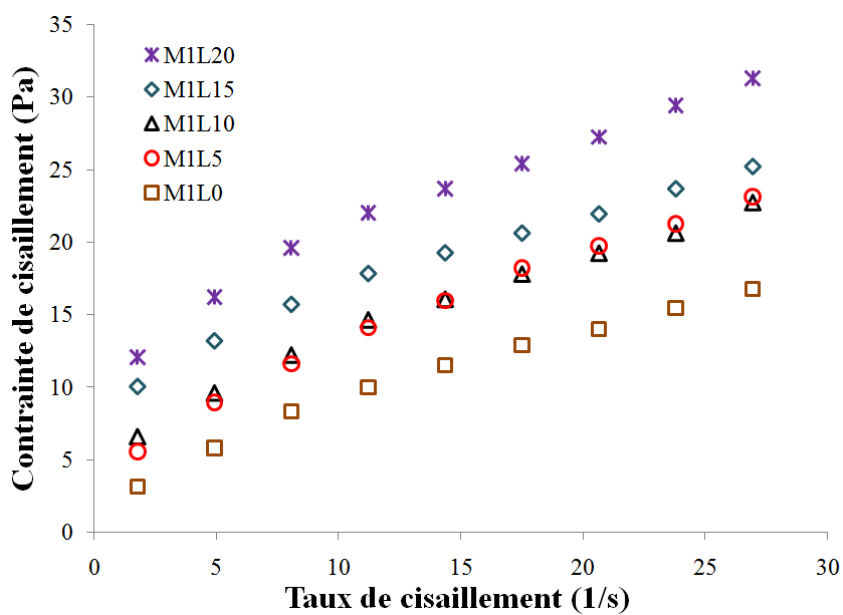


Figure 4.22 : Rhéogrammes montrent l'évolution de la contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement [187].

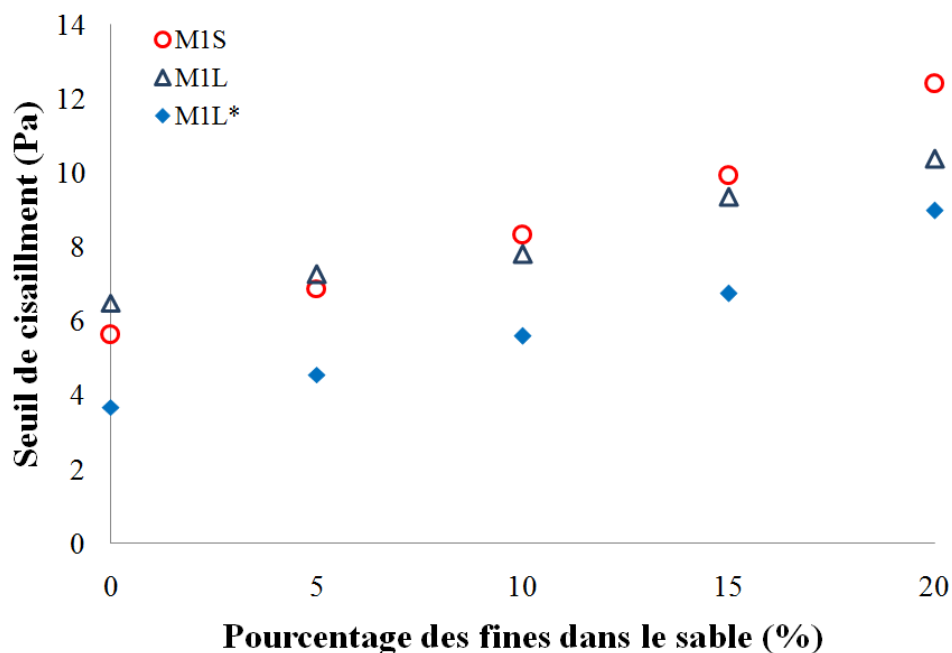


Figure 4.23 : Influence des fines sur la contrainte seuil de différents mortiers [187].

Les résultats montrent que les mortiers testés se comportent comme des fluides de Bingham. Le seuil de cisaillement est obtenu par extrapolation de la branche descendante des courbes pour intercepter l'axe de contrainte de cisaillement et la viscosité est la pente des diagrammes comme il a été déjà expliqué au chapitre 2.

Les Figures 4.23 et 4.24 montrent l'évolution du seuil de cisaillement et de la viscosité plastique de mortiers, avec le même rapport W/C de 0,5, à base de SS et LS avec et sans Sp en fonction de la teneur en fines dans le SC. On peut constater que les fines provoquent une augmentation du seuil de cisaillement et de la viscosité plastique, c'est-à-dire : affectent l'ouvrabilité. Cependant, l'ampleur de l'effet des fines sur les propriétés rhéologiques des mortiers à base de sable siliceux (M1S) est plus grande que sur les mortiers à base de sable calcaire (M1L).

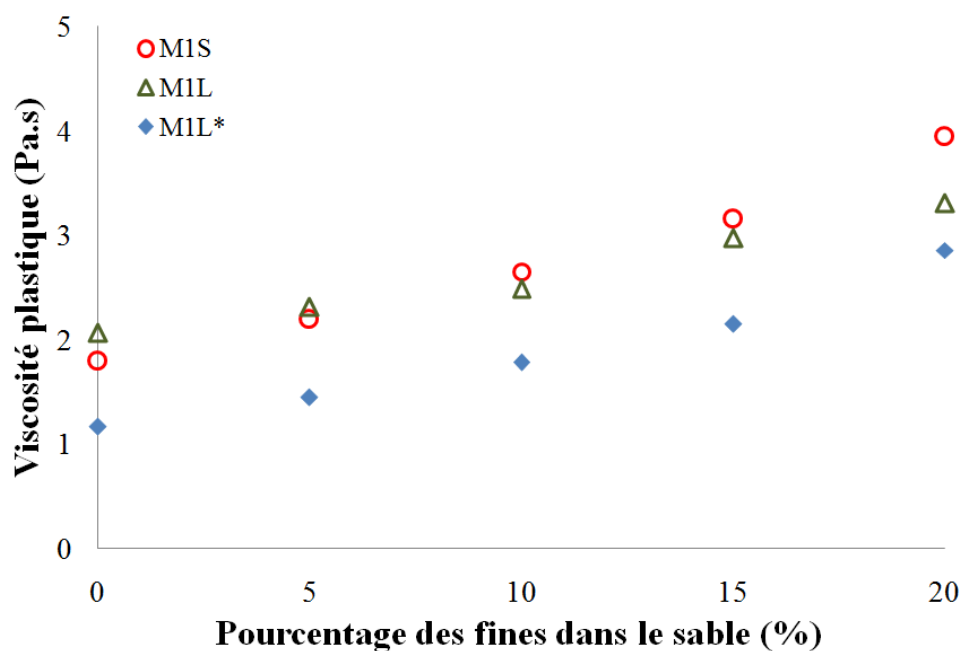


Figure 4.24 : Influence des fines sur la viscosité de différents mortiers [187].

En résumé, l'addition des fines affecte l'ouvrabilité du mortier et augmente la demande en eau et le frottement entre les grains. La diminution de l'ouvrabilité peut être attribuée à la forme angulaire et irrégulière des grains de fines (Figure 3.3) et à leur surface spécifique élevée. Cela peut augmenter le frottement entre les grains de mélange. C'est similaire aux résultats obtenus avec la mesure du temps d'écoulement et de l'affaissement. Étant donné que le seuil de cisaillement correspond à la faible énergie nécessaire pour rompre l'interaction potentielle physico-chimique des particules. De même, les Figures 4.23 et 4.24 montrent que l'addition d'un Sp réduit le seuil de cisaillement et la viscosité plastique, c'est-à-dire : améliore l'ouvrabilité. Vu l'intérêt technico-économique d'aller jusqu'à 20% de fines en maintenant les mêmes performances rhéologiques qu'avec une teneur inférieure ou égale à 15% de fines, pourcentage généralement toléré [63], nous introduisons un adjuvant superplastifiant. A cet effet, les résultats obtenus (Figure 4.26) montrent que 0,8 de Sp est nécessaire pour remplir cette condition. Un tel résultat peut être considéré comme prometteur de point de vue environnemental et économique en tolérant la teneur en fines dans les SCs jusqu'à 20%. Ainsi, le même pourcentage de Sp, pour un mortier de 15% de fines, peut conduire à un comportement rhéologique comparable avec un mortier à base de SC lavé (0% de fines).

4.3.3.5. Corrélation entre les essais rhéométriques et empiriques

Il est avantageux d'utiliser des tests simples tels que le mini-cône et le cône d'écoulement, car un rhéomètre n'est pas toujours disponible dans l'industrie de la construction et notamment dans les chantiers. Une comparaison des résultats des essais rhéologiques avec des mesures empiriques est montrée sur les Figures 4.25 et 4.26. Ces dernières sont obtenues à partir d'une collection des résultats de plusieurs tests sur mortiers à base de SC dans notre programme de recherche. Chaque point représente une mesure (pas une moyenne) en fonction de la teneur en fines dans le sable.

La courbe donnant l'évolution du seuil de cisaillement en fonction de l'affaissement (Figure 4.25) montre une corrélation acceptable, bien qu'il y ait une grande dispersion des données. Par conséquent, une indication de sa valeur peut être obtenue en utilisant le mini-cône. Ce résultat est attendu, car le mortier ne peut s'écouler dans le mini-cône que si la contrainte due à son poids propre est suffisamment élevée, c'est-à-dire plus grande que le seuil de cisaillement [105]. Pour cette raison, on dit souvent qu'il y a une relation directe entre l'affaissement et la contrainte seuil.

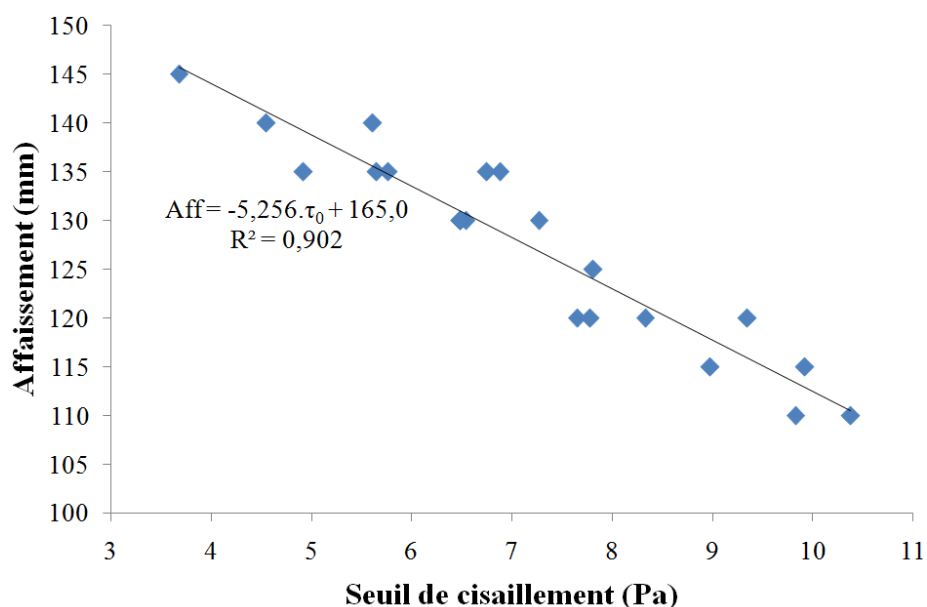


Figure 4.25 : Corrélation entre l'affaissement et la contrainte seuil de différents mortiers [187].

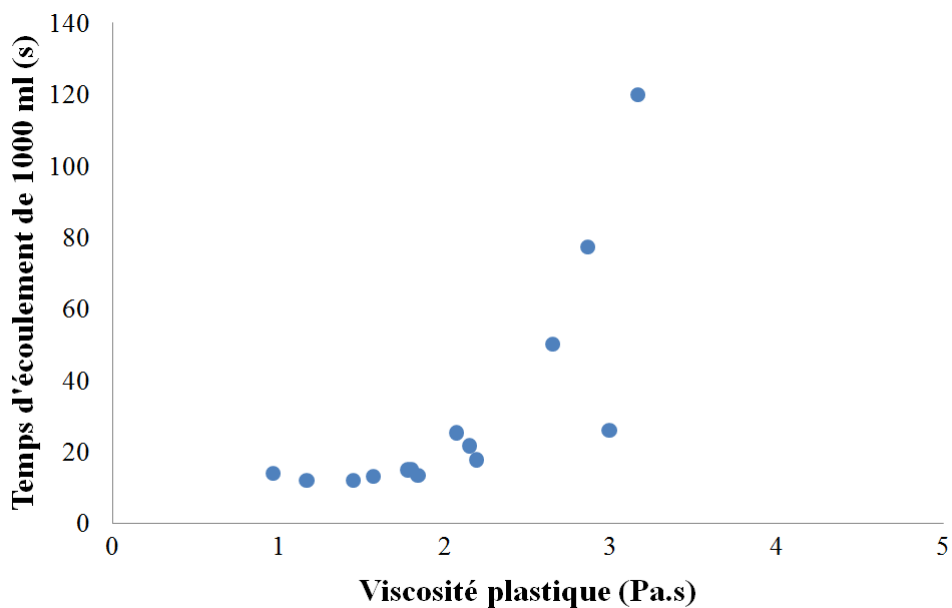


Figure 4.26 : Corrélation entre le temps d'écoulement et la viscosité de différents mortiers [187].

Par contre, l'évolution du temps d'écoulement (test de cône d'écoulement) par rapport à la viscosité plastique (Figure 4.26) montre une faible corrélation. Selon Ferraris et al. [92], le résultat du cône d'écoulement ne donne pas d'informations fiables sur la viscosité du matériau. En plus, nous avons constaté, dans certains cas, un temps d'écoulement inférieur correspond à une viscosité plus élevée. Théoriquement, ce résultat est inattendu puisqu'on a supposé que le poids du mortier était suffisamment élevé pour contrôler le seuil de cisaillement et donc la vitesse d'écoulement de mortier à travers le cône d'écoulement dépendrait de sa viscosité. On peut conclure qu'il y a d'autres facteurs, tels que la géométrie du cône, le frottement et la sédimentation, influant l'écoulement du mortier à travers le cône d'écoulement.

4.3.3.6. Effet de la nature et du type de sable sur les propriétés rhéologiques du mortier

La Figure 4.27 présente l'effet de la nature (calcaire ou siliceuse) et du type (concassé lavé ou roulé) de sable sur les propriétés rhéologiques du mortier. Les histogrammes montrent que les valeurs de ces propriétés rhéologiques sont presque égales pour les deux SCs, que ce soit leur origine. Comme prévu, l'utilisation de SR dans le mortier améliore les propriétés rhéologiques de mortier en diminuant les valeurs de seuil et de la viscosité à environ 50% par rapport aux

SCs. Ces résultats sont en bon accord avec ceux déjà publiés [27,63, 79]. En effet, selon Esping [79], cette réduction est due à la différence de forme et de texture entre le SC et le SR. Ainsi, SC génère une plus grande surface spécifique et provoque une plus grande demande en eau. En plus, la surface des particules de SC est plus rugueuse et plus poreuse.

En revanche, Donza et al. [64] ont trouvé le même résultat, l'effet du SC sur le béton frais présente quelques inconvénients par rapport au sable roulé. Cependant, les SCs requièrent une dose plus élevée en adjuvant (superplastifiant) pour surmonter les contraintes dues à leur morphologie. Ainsi, Bouziani [27] a également trouvé, les grains de SR ont une forme plus proche de la forme sphérique. En fait, la surface spécifique plus petite de SR et la diminution du frottement entre les grains provoquent une demande d'eau plus faible et un écoulement plus facile. Par conséquent, il est vraiment utile de corriger le SC par le SR pour améliorer l'ouvrabilité du mortier et réduire son seuil de cisaillement.

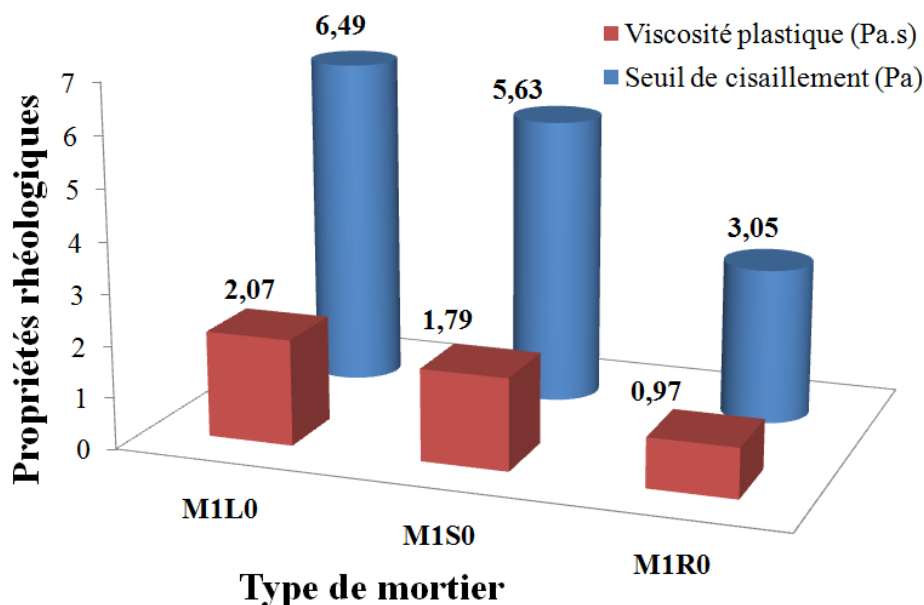


Figure 4.27 : Effet de la nature et le type de sable sur les propriétés rhéologiques [187].

4.3.3.7. Effet de la concentration massique de SC sur les propriétés rhéologiques des mortiers

La Figure 4.28 montre l'effet de la concentration massique du SC lavé (avec 0% de fines) sur le comportement rhéologique du mortier. Les histogrammes montrent que la viscosité plastique et le seuil de cisaillement du mortier ont été fortement affectés par l'augmentation du rapport S/C de 1 à 2. Ce résultat est en

bon accord avec celui publié par [79]. Dans les cas de mortier avec un rapport S/C égal 3, nous avons obtenu une ségrégation et un blocage de la pale du rhéomètre provoqué par les particules de sable.

Malgré que le SC soit grossier, il génère une plus grande surface spécifique et présente une consistance plus ferme avec une forte demande en eau : parce que le SC a une texture des particules largement rugueuse et poreuse. En effet, l'augmentation de la concentration en masse de CS dans un mortier conduit à la perte de la matrice cimentaire et à une augmentation du frottement entre les grains. Ce qui peut expliquer autrement les résultats obtenus.

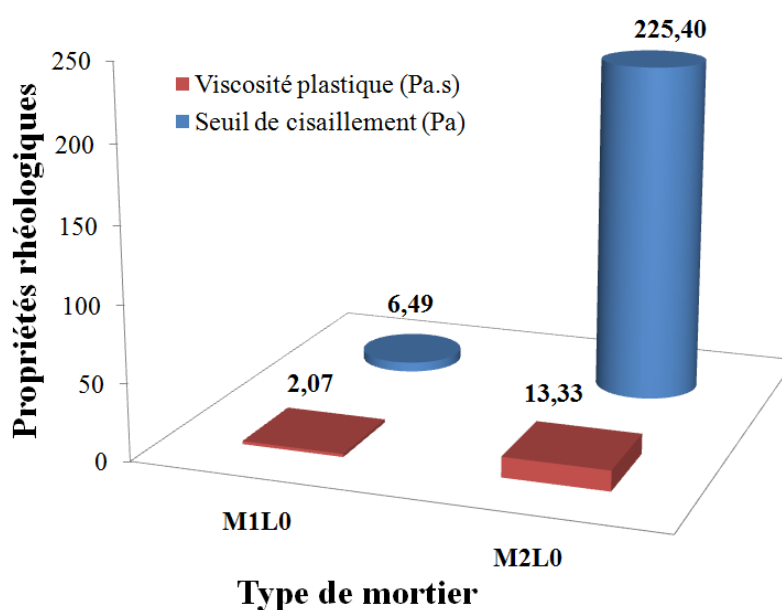


Figure 4.28 : Effet de la concentration massique des SCs sur les propriétés rhéologiques du mortier [187].

4.3.3.8. Effet de la morphologie des sables sur les propriétés rhéologiques du mortier

La forme et la texture des particules de sable ont un effet important sur l'ouvrabilité du béton à l'état frais et même sur la résistance mécanique et la durabilité à l'état durci. En effet, selon [46, 188], l'effet des propriétés morphologiques du sable est plus important que celles des graviers. Ainsi, les particules cubiques ou sphériques se caractérisent par une surface spécifique plus petite que les particules de forme irrégulière (plates, anguleuses) qui nécessitent une demande d'eau plus élevée. Dans notre cas, l'effet de la granulométrie est

pratiquement éliminé dans le cas de comparaison entre les deux sables concassés qui ont une courbe granulométrique similaire. Par contre, la différence est inévitable entre le SR et les SCs.

Les résultats des tests de mortier montrent que la différence entre le RS et les SCs peut être observée dans les deux propriétés rhéologiques (Figure 4.29). C'est l'effet de la forme des particules, c'est-à-dire que le seuil de cisaillement et la viscosité plastique des mortiers plus élevés avec le sable concassé le plus rugueux : SC calcaire (LS). C'est le résultat du frottement et d'interaction accrue entre des particules non sphériques.

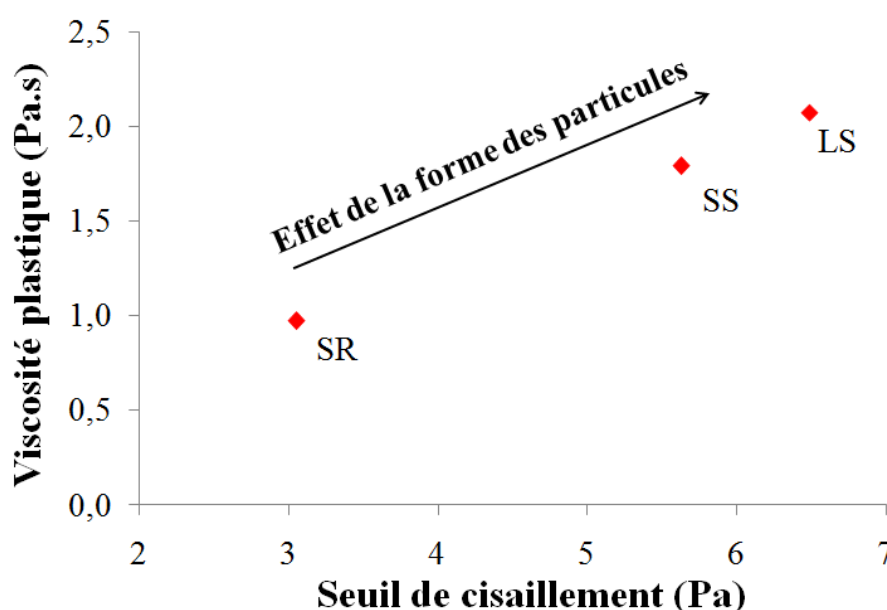


Figure 4.29 : L'évolution de la viscosité plastique en fonction du seuil de cisaillement des mortiers à base de LS, SS et SR.

4.3.3.9. Mise en évidence de la corrélation entre les propriétés rhéologiques et les facteurs morphologiques

Une étude de corrélation entre les différents facteurs de morphologie et les propriétés rhéologiques des mortiers donne des coefficients de corrélation de 0,99, comme il est montré sur la Figure 4.30. Une modification du facteur de circularité de 0,60 à 0,96, donc un changement d'une forme cubique (pour le SC) à une forme sphérique (pour le SR), a provoqué une augmentation de plus de double des propriétés rhéologiques. Cependant, il est très intéressant d'étudier cet effet dans le cas du béton. En outre, malgré que la granulométrie similaire des

deux SCs, nous avons constaté une différence des propriétés rhéologiques et de l'ouvrabilité des mortiers. Ce qui peut être expliqué par la différence enregistrée au niveau des facteurs de morphologie, notamment de circularité (0,60 à 0,69), de ces deux sables. Il est clair qu'on ne peut pas établir des modèles avec seulement ces résultats, ce qui nécessite davantage de résultats et des mesures.

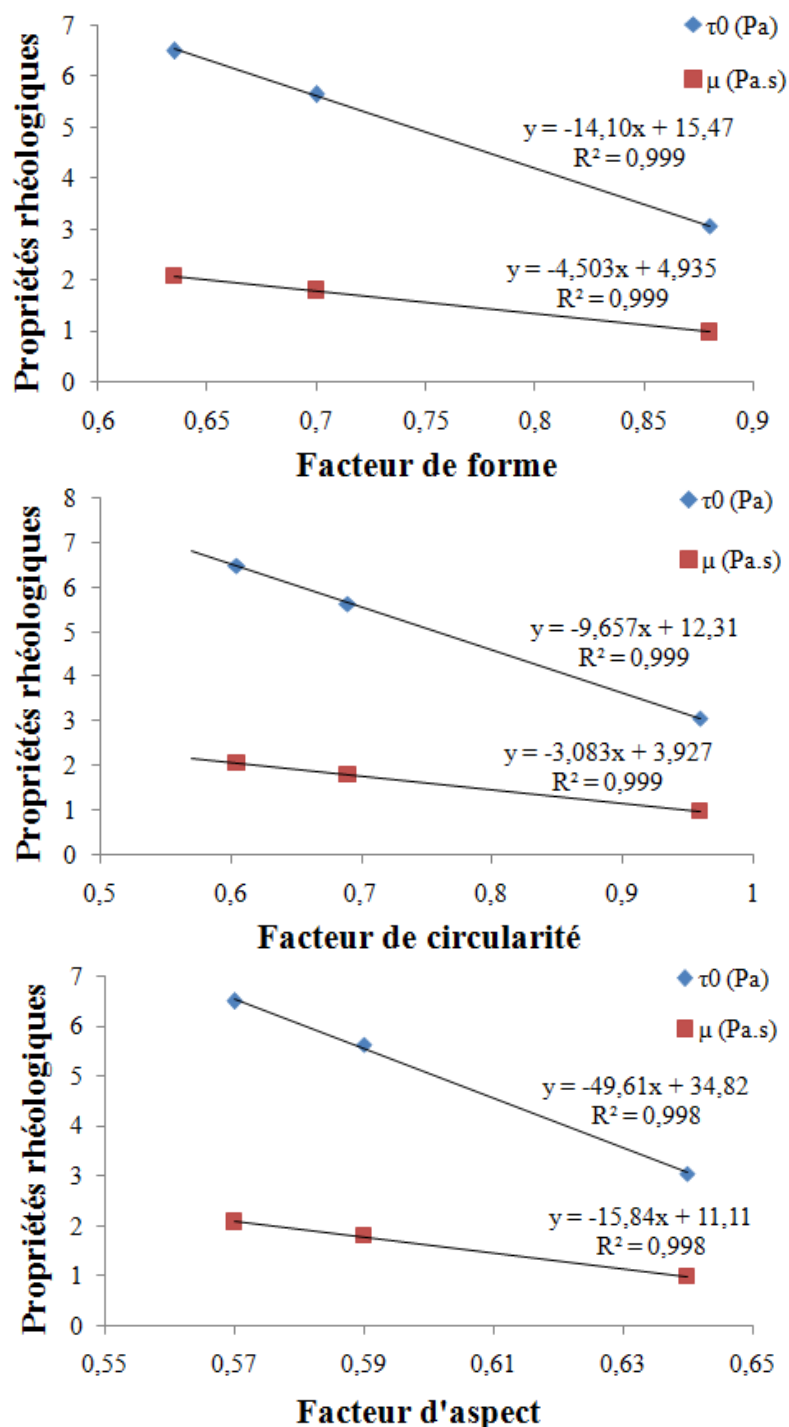


Figure 4.30 : Corrélation entre les facteurs de morphologie de particules de sable et les propriétés rhéologiques des mortiers.

4.3.4. Rhéologie du béton et son MBE

L'étude d'une composition de béton consiste généralement à rechercher conjointement deux qualités essentielles : la résistance et l'ouvrabilité. Néanmoins, ces deux qualités sont étroitement liées l'une à l'autre quant aux facteurs dont elles dépendent, mais elles varient en sens inverse, tels que : la finesse du sable, le rapport G/S, le dosage en eau, la granularité et la dimension maximale des granulats [46]. La méthode de composition de Dreux-Gouris, s'applique au cas des bétons de granulats traditionnels, peut s'adapter sans grand changement au cas des bétons de granulats concassés. Cependant, un facteur d'étude supplémentaire devrait être pris en compte, c'est la granulométrie de ce type de sable. Dans ce cas, on devra diminuer le rapport G/S et ajuster le dosage en ciment lorsqu'il s'agit d'un SC lavé contenant une teneur faible de fines.

Toutefois, pour étudier les propriétés mécaniques et rhéologiques du béton à base de SC, nous allons déterminer sa composition par la méthode de Dreux-Gouris tout en visant un affaissement de 10 ± 1 cm en ajustant le dosage en Sp et une résistance caractéristique à 28 jours de 25 MPa, caractéristiques actuellement demandées dans nos chantiers de bâtiments, en utilisant généralement un béton pompé. Nous allons essayer d'établir des relations entre leurs propriétés à l'état frais et à l'état durci avec son mortier équivalent. Dans cette partie, on prend en considération le taux d'absorption du sable de concassage calculé selon la norme. Il est à noter que nous allons utiliser un SC siliceux dans la composition du béton et MBE. Par contre, les fines utilisées sont toujours les fines provenant du SC calcaire. Ainsi, nous avons pris en considération le taux d'absorption des SCs et du SR.

Cependant, nous tenons à signaler ici que la composition initiale obtenue à l'aide de cette méthode montre une ségrégation pour le SC lavé (avec 0% de fines). Ce qui nous a obligés de l'ajuster en diminuant le rapport G/S et augmentant le dosage en ciment.

4.3.4.1. Mise en évidence de la corrélation entre les propriétés rhéologiques du béton et son MBE

Nous avons étudié un béton à base de SC siliceux à différentes teneurs en fines calcaires. Pour la confection des MBE, nous avons utilisé ainsi le SC

siliceux comme correcteur granulaire en estimant la surface spécifique des graviers. Pour établir une comparaison entre le LS et le SS, nous avons adopté la composition des MBE pour avoir des résultats avec les deux SCs contenant des fines calcaires de concassage.

Les résultats obtenus montrent qu'une corrélation linéaire pouvait être établie pour cette série de béton entre l'affaissement mesuré au cône d'Abrams et l'étalement mesuré au mini-cône avec un coefficient de corrélation R^2 de 0,703. Des résultats pareils ont été observés par plusieurs chercheurs [161, 189, 190]. La relation entre l'étalement MBE et l'affaissement béton est représentée dans la plage courante de consistance par une droite. Les essais ont montré que l'équation de cette droite variait d'une composition à une autre, c'est-à-dire qu'une droite n'est valable que pour un béton et son MBE correspondant.

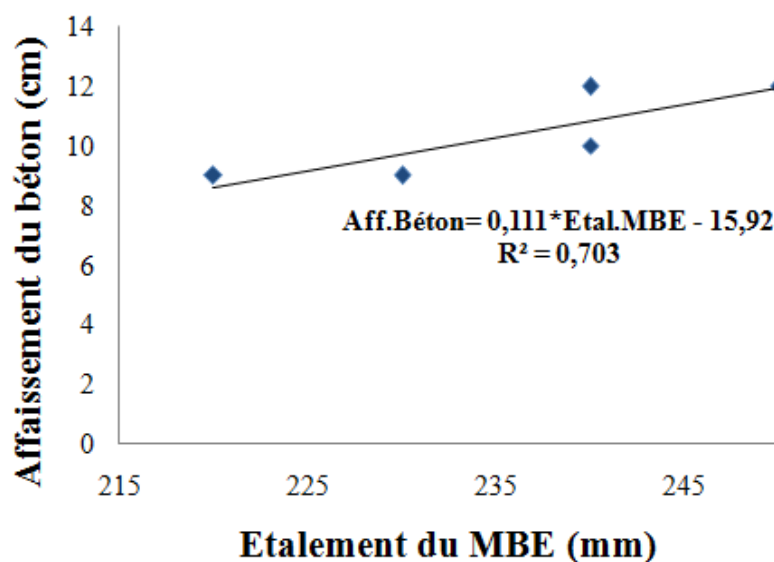


Figure 4.31 : Corrélation entre l'étalement du MBE et l'affaissement du béton.

La corrélation a été également validée par différents groupes de travail tels que ceux du projet national CALIBÉ (2000). Environ trente formulations ont été testées en utilisant plusieurs adjuvants et différents types de ciment, ils ont montré qu'une corrélation linéaire pouvait être établie pour toute formule de béton entre l'affaissement des bétons et l'étalement de leurs MBE avec une valeur moyenne du coefficient de corrélation « R^2 » de 0,912 pour un écart type de 0,078, comme il est montré sur la Figure 4.32.

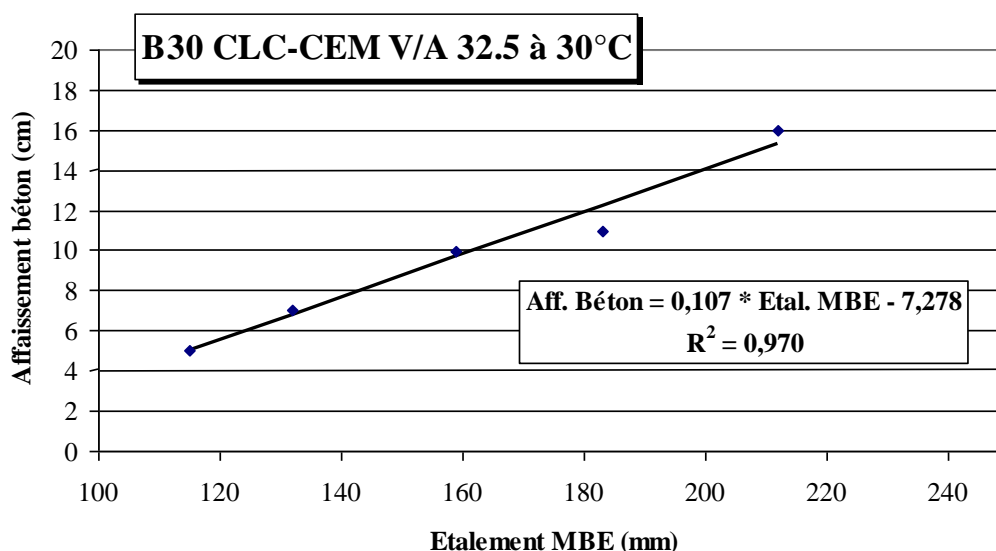


Figure 4.32 : Exemple de corrélation entre l'étalement du MBE et l'affaissement du béton [189].

4.3.4.2. Mesures des propriétés rhéologiques du béton et son MBE

Les propriétés rhéologiques du béton ont été mesurées au biais d'un rhéomètre avec la géométrie double U. Il est à noter que cette géométrie a été choisie après une étude, réalisée par Soualhi [174], afin d'améliorer la véracité des mesures, réduire les perturbations des mesures et diminuer la ségrégation. Cette étude menée sur trois pales de mêmes dimensions ($d \times h = 10.5 \times 12.5$) avec des géométries différentes : une pale pleine (comme celle utilisée pour le mortier et le coulis dans notre travail), une pale évidée (comme celle utilisée par Yahia et al. [179, 180]) et une pale en forme de double U inversé. La conversion des unités machines en unités fondamentales se fait conformément à la méthode de Reiner comme il a été montré au paragraphe 3.4.5.2.

En revanche, les propriétés rhéologiques du mortier ont été mesurées au biais d'un rhéomètre avec la géométrie Vane. La conversion aux unités fondamentales se fait par la méthode de Lanos comme il a été montré au paragraphe 3.4.4.4. Les résultats obtenus sont illustrés sur les Figures 4.33 et 4.34.

La Figure 4.33 montre l'évolution de la contrainte seuil des bétons à base de SS et leurs MBE en fonction de la teneur en fines dans le sable. En revanche, la Figure 4.34 montre l'évolution de la viscosité plastique pour les mêmes séries des bétons et MBE. Il est important de mettre dans l'esprit avant d'entamer

l'interprétation que, contrairement à la partie précédente, les séries des bétons et mortiers sont confectionnées avec un affaissement constant. A cet effet, le dosage en superplastifiant n'est pas le même d'un béton à un autre en fonction de la teneur en fines dans le SC. Ainsi, le taux d'absorption des SC est pris en considération dans la composition des bétons et leurs MBE. En fait, l'allure de la variation de ces deux paramètres rhéologiques est presque identique pour le béton et son MBE. L'utilisation de la méthode des MBE est très prometteuse pour l'évaluation des propriétés rhéologiques des bétons. Par contre, le fait de viser un affaissement constant, nous attendons avoir un seuil de cisaillement constant. Mais, l'allure obtenue montre une présence d'une teneur critique des fines dans le SC, vaut 15%, pour laquelle les propriétés rhéologiques sont maximales dans la plage testée (jusqu'à 20%). Ce résultat est dû probablement à l'effet du taux d'absorption calculé par la méthode normalisée. A cet effet, il est important de refaire ces essais en prenant en compte le taux réels d'absorption des SC. En fait, il est montré dans la littérature [65] que la quantité d'eau absorbée est nettement inférieure au taux calculé par la méthode normalisée basée sur la quantité absorbée pendant 24 heures.

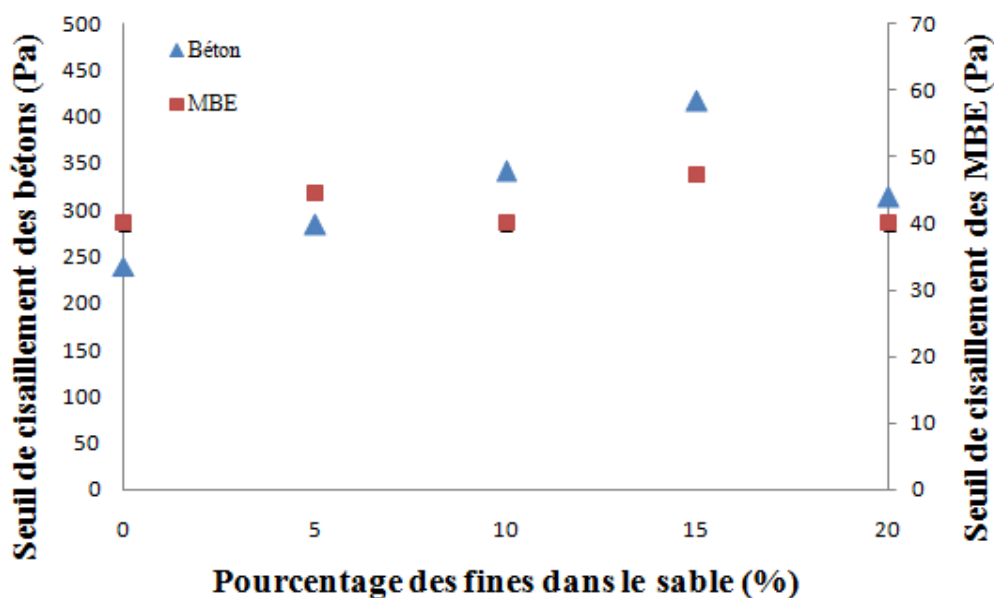


Figure 4.33 : Comparaison entre l'évolution du seuil de cisaillement des bétons et leurs MBE.

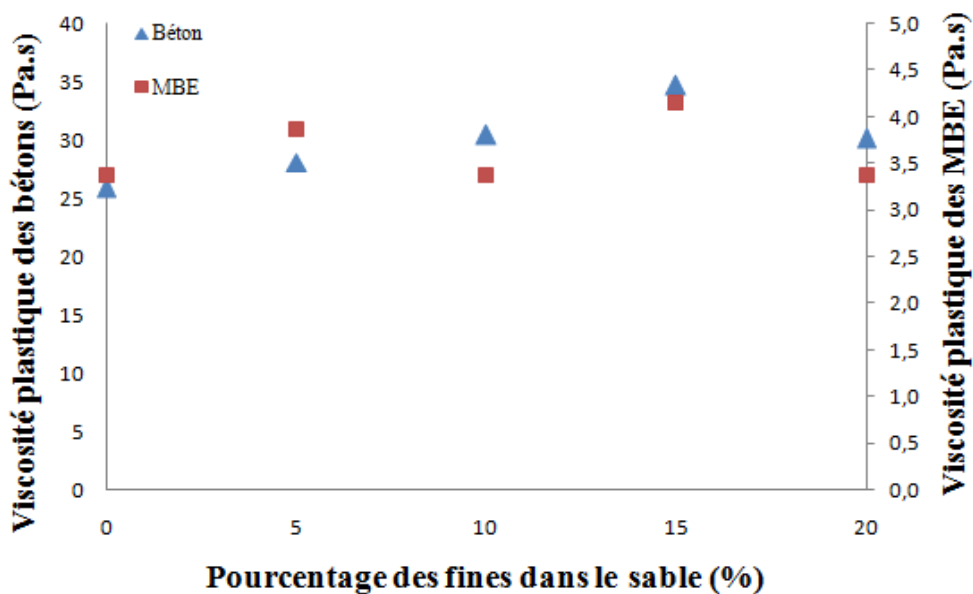


Figure 4.34 : Comparaison entre l'évolution de la viscosité plastique des bétons et leurs MBE.

4.3.4.3. Comparaison des propriétés rhéologiques du béton avec le SC et le SR

Pour évaluer l'influence du sable de concassage (SC) sur les propriétés rhéologiques par rapport au sable roulé (SR), nous avons adopté la composition du béton déjà étudiée au paragraphe 4.4.2, en préparant un béton à base de SR. Les résultats obtenus sont présentés sur la Figure 4.35.

Nous tenons à signaler que le SC utilisé sans ajout des fines calcaires. Quant à l'affaissement des bétons, nous avons enregistré 11 cm pour le béton avec SC et 20 cm pour le béton avec SR. Les histogrammes illustrés sur les Figures 4.35.a) et b) montrent que les propriétés rhéologiques sont nettement affectées par le SC. Ceci peut être expliqué par les caractéristiques physiques des grains de SC, notamment la forme irrégulière qui induit une surface spécifique plus grande, ce qui conduit à une augmentation de la demande en eau. Par conséquent, l'ouvrabilité du béton s'est affectée. Ces résultats sont en accord avec les résultats obtenus par Westerholm et al. [18-20].

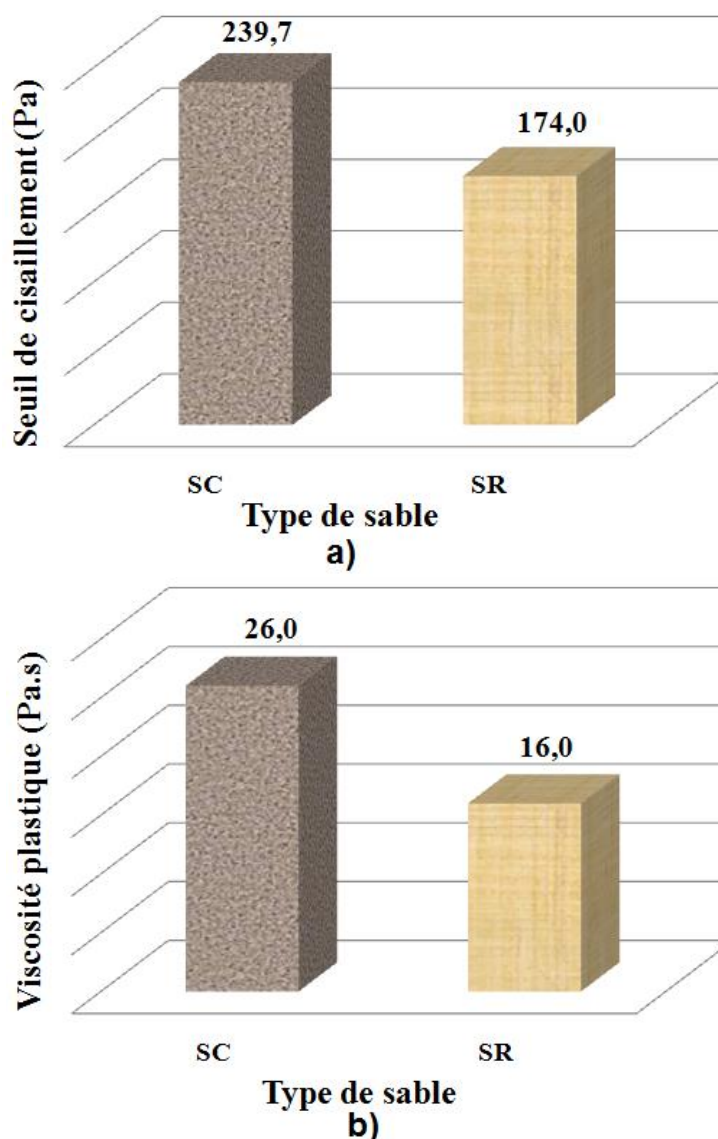


Figure 4.35 : Evolution a) du seuil de cisaillement et, b) de la viscosité plastique des bétons à base de SC et SR.

4.4. Mesure des propriétés mécaniques du béton et son MBE

Dans le but d'étudier l'effet du sable de concassage et ses fines sur les propriétés mécaniques des mortiers et bétons, nous avons effectué différentes variantes sous forme des séries en fonction de la teneur en fines dans le SC. Tout d'abord, nous avons commencé par une série de mortiers M1 en fonction de la teneur en fines dans le SC. Ensuite, nous avons confectionné une série de bétons et leurs MBE en utilisant cette fois le SS avec les fines calcaires. Afin de faire une comparaison entre le SS et le LS, avec la même composition de MBE, nous avons reproduire une série à base de LS. Nous tenons à signaler que pour chaque

composition étudiée, un échantillon à base de SR a été confectionné à titre comparatif. Finalement, nous avons étudié l'influence de la concentration massique du SC à partir des compositions M1, M2 et M3 dont le rapport S/C est respectivement 1, 2 et 3.

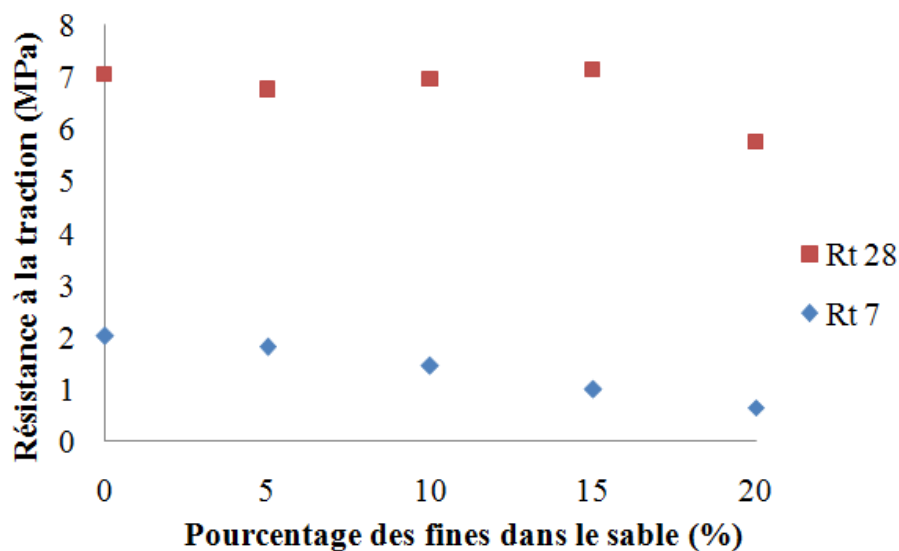
4.4.1. Influences de la teneur en fines dans le SC

4.4.1.1. Cas des mortiers

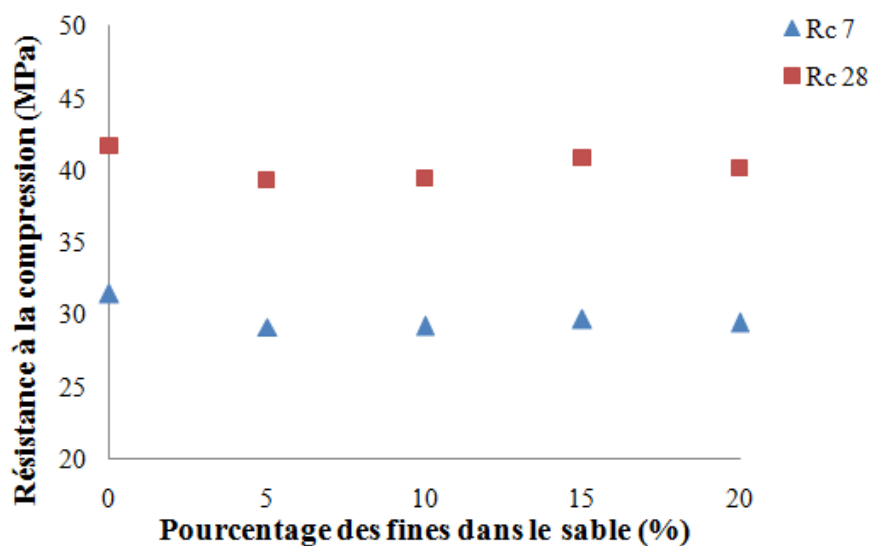
L'influence de la teneur en fines dans le SC présente l'objectif principale de cette étude. A cet effet, nous continuons dans le même sens de raisonnement qu'avec les propriétés rhéologiques en étudiant une série de mortiers M1° avec un dosage de 1,1% en Sp. Ensuite, on passe au béton et son MBE, tout en gardant la même composition utilisée dans la partie rhéologique. La résistance à la traction et à la compression, à 7 et à 28 jours, des mortiers M1 sont présentées respectivement sur les Figures 4.36.a) et b).

Les courbes de la Figure 4.36 montrent bien que l'influence des fines de concassage n'affectent pas la résistance mécanique des mortiers en présence du Sp, notamment à la compression, et cela jusqu'à 20% de la masse de SC. L'allure de la Figure 4.36.a) montre une certaine diminution de la résistance à la traction, mais elle ne dépasse pas 15% de la résistance maximale trouvée avec un SC contient 15% de fines. Peut être c'est la conséquence directe de l'utilisation du superplastifiant dans le mortier. En effet, l'amélioration des propriétés rhéologiques conduit à une amélioration à l'état durci. Etant donné que les travaux antérieurs, dont les normes actuelles se sont inspirées, ont montré que les propriétés mécaniques sont dégradées au-delà de 10% de fines dans le SC.

En revanche, la résistance à la compression à 7 et à 28 jours varie légèrement voire elle semble constante, sur toute la plage testée (20% de fines), sans aucun effet flagrant des fines. Ces résultats sont prometteurs pour la valorisation des SCs avec une teneur élevée des fines. Ce résultat est en accord avec des résultats déjà publiés [21-22].



a)



b)

Figure 4.36 : Evolution de la résistance a) à la traction et, b) à la compression du M1° (avec 1,1% de Sp) à 7 et à 28 jours en fonction de la teneur en fines dans le SC.

4.4.1.2. Cas du béton et son MBE

Pour les bétons, nous avons adopté la même composition de la partie rhéologique. Un échantillon a été pris après chaque mesure rhéométrique. L'évolution de la résistance mécanique à la compression à 7 et à 28 jours, en fonction de la teneur en fines calcaires dans le SC, est présentée sur la Figure 4.37.

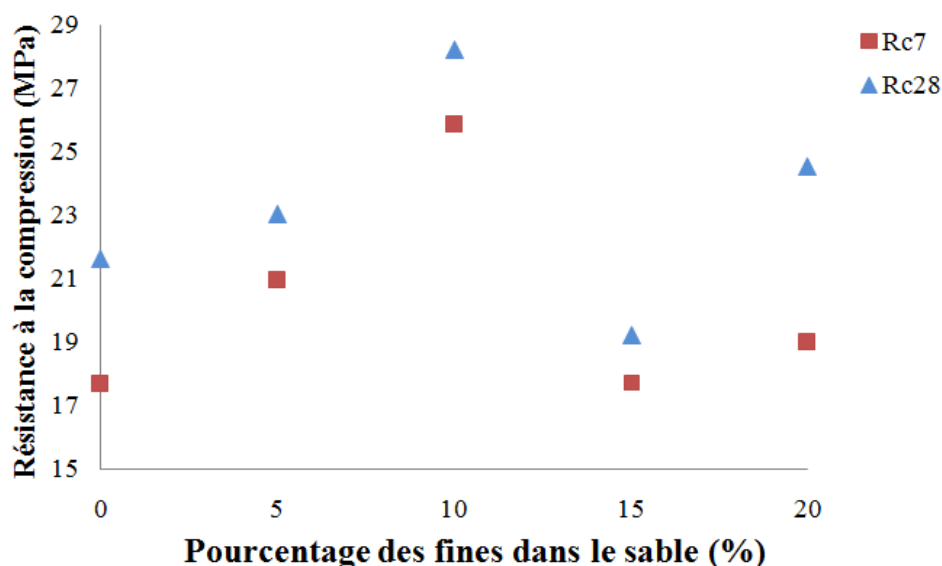


Figure 4.37 : Evolution de la résistance à la compression du béton (à affaissement constant), à 7 et à 28 jours, en fonction de la teneur en fines dans le sable.

La Figure 4.37 montre que l'allure de la résistance à la compression à 7 et à 28 jours ont la même allure. Ainsi, la résistance augmente avec l'augmentation de la teneur en fines dans le SC jusqu'à 10 %. Ensuite, une réduction a été enregistrée. En fait, ce résultat est en accord avec les travaux déjà réalisés sur l'effet des fines calcaires en Algérie en l'occurrence [23-25]. Cependant, le pourcentage, trouvé par ces travaux, est nettement supérieur à 10%. Dans ce contexte, Guemmadi et al. [24] ont trouvé un optimum de 18% en fonction du diamètre moyen des particules de fines calcaires. En revanche, Sadhouari et al. [25] ont trouvé un optimum de 15%.

En fait, la présence d'une teneur optimale et même le zigzag qui ont été enregistrés dans l'évolution de la résistance, peuvent être expliqués par l'effet contradictoire du fait que les fines calcaires améliorent la compacité et diminuent l'indice de vide, ce qui provoque une amélioration de la performance mécanique. En revanche, ces dernières affectent l'ouvrabilité, ce qui provoque une diminution de la performance mécanique. A cet effet, la résistance suit, selon le cas, le facteur le plus dominant en l'occurrence : l'ouvrabilité ou la compacité.

Pour continuer, nous avons confectionné des MBEs pour étudier les mêmes propriétés à travers le mortier dans le but de minimiser la quantité des matériaux utilisés en adoptant la méthode de Schwartzentruber et Catherine [144]. Rappelons que le but de cette illustration, est de concevoir à partir d'une

composition de béton, un mortier dit mortier de béton équivalent (MBE), dont les propriétés rhéologiques et mécaniques sont corrélables à celles du béton. Dans cette partie, nous avons utilisé deux types de sable de concassage en l'occurrence LS et SS pour faire une comparaison en fonction de la nature de SC. Les résultats ainsi obtenus sont illustrés sur la Figure 4.38.

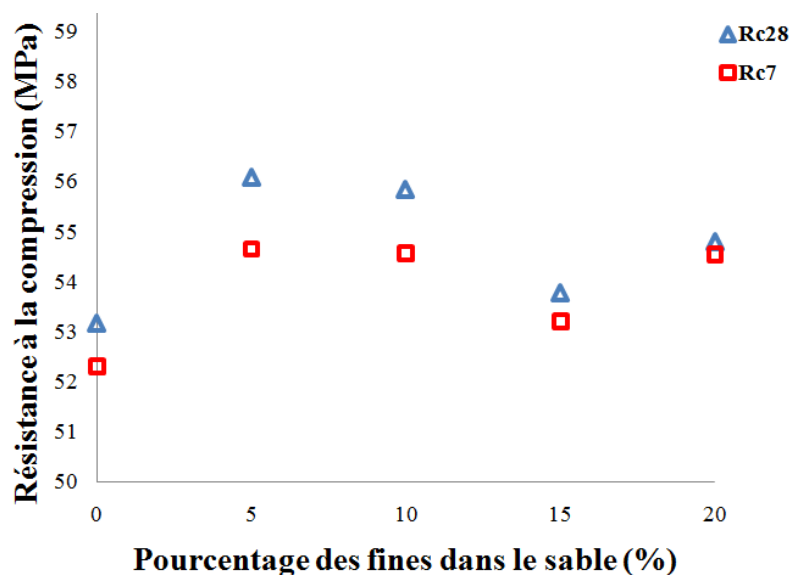


Figure 4.38 : Evolution de la résistance mécanique à 7 et à 28 jours des MBEs à base de SS en fonction de la teneur en fines dans le sable.

La Figure 4.38 montre que la résistance à la compression des MBEs en fonction de la teneur en fines dans le SS suit pratiquement la même allure qu'on a obtenue avec les bétons (Figure 4.37). Ainsi, une baisse de la résistance a été enregistrée à partir de 10% de fines dans le sable. Ensuite, une légère amélioration a été obtenue avec 20% de fines par rapport à la résistance enregistrée avec le sable qui contient 15% de fines. Ce qui nous conduit à dire que la méthode des MBE est applicable aussi bien pour le béton à base de SC.

En revanche, on peut constater que l'effet d'accélération de l'hydratation et l'amélioration de la résistance, joué par les fines calcaires comme il a été déjà mentionné dans la littérature [49, 50, 53, 54, 56, 57, 68], s'est bien dévoilé sur la figure 4.38. Ce dernier se manifeste par le rapprochement des courbes de l'évolution de la résistance à la compression à 7 jours avec celle à 28 jours. Autrement dit, la résistance du mortier atteint presque sa limite au bout de 7 jours seulement, notamment avec 20% de fines calcaires.

4.4.2. Influence de la nature et du type de sable

Afin de mettre en évidence l'influence de la nature calcaire (LS) et siliceuse (SS) de SC sur les propriétés mécaniques des mortiers, nous avons adopté la même composition de MBE, traitée au paragraphe 4.5.1.2 (à base de SS), pour rétablir une autre série des mortiers à base de LS. Ensuite, nous avons mesuré la résistance mécanique des deux séries en fonction de la teneur en fines dans le sable. Les résultats obtenus sont présentés sur la Figure 4.39.

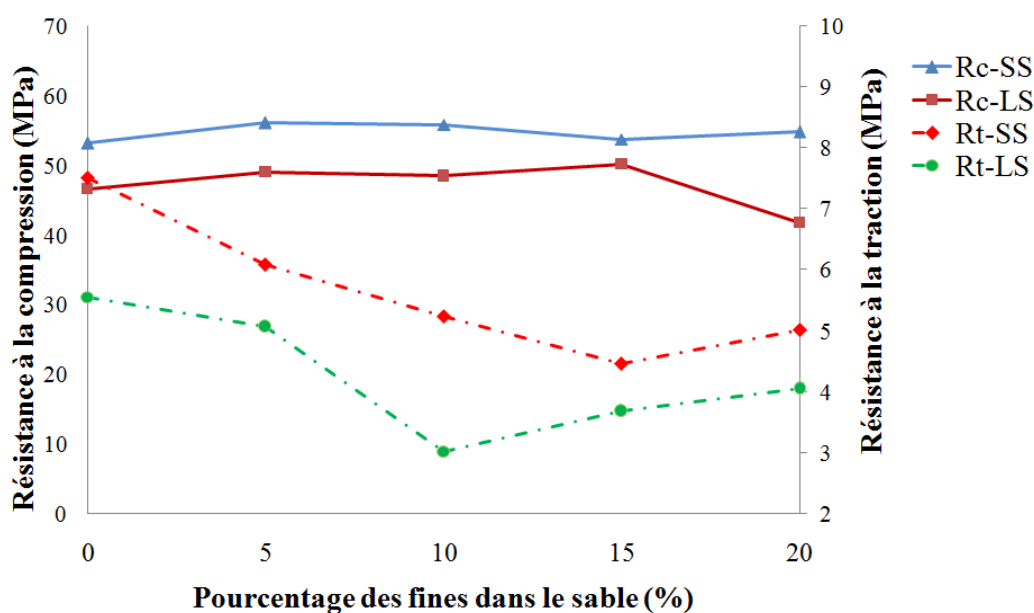


Figure 4.39 : Evolution de la résistance mécanique des MBEs à base de SS et LS en fonction de la teneur en fines dans le sable.

La Figure 4.39 montre l'évolution de la résistance mécanique des MBEs à base de SS et LS en fonction de la teneur en fines dans le sable. Sans entrer dans l'interprétation de l'allure des courbes, nous allons baser sur les points communs et la différence entre le comportement mécanique du mortier à base de LS et celui à base de SS. Intuitivement, on peut constater qu'il y a deux plages distinctes. D'abord, pour la résistance à la compression, l'allure est identique pour les deux mortiers jusqu'à 15% de fines dans le SC. Au-delà de cette teneur, le comportement est totalement inversé comme s'il y a un méroire. La même chose a été observée avec la résistance à la traction, sauf que la différence se produit à partir de 10% de fines dans le SC. Mais d'une manière générale, l'allure des deux sables est presque identique. Autrement dit, les performances mécaniques du béton à base de LS s'avèrent très proche de celles de béton à base de SS. En

effet, ce résultat est en accord avec ce qui est déjà publié [8]. Même observation a été constatée dans le cas de mortier, comme il est montré par les Figures 4.40 et 4.41. Cependant, on peut constater également que les fines affectent la résistance à la traction. Cette dernière décroît avec l'augmentation de la teneur en fines calcaires dans le SC, que ce soit calcaire ou bien siliceux.

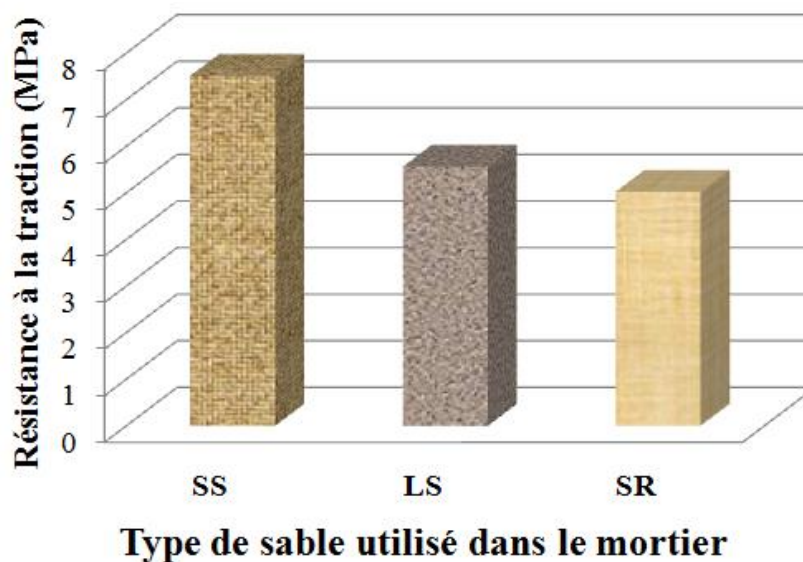


Figure 4.40 : Comparaison entre les résistances à la traction des mortiers à base de SS, SC et SR à 28 jours.

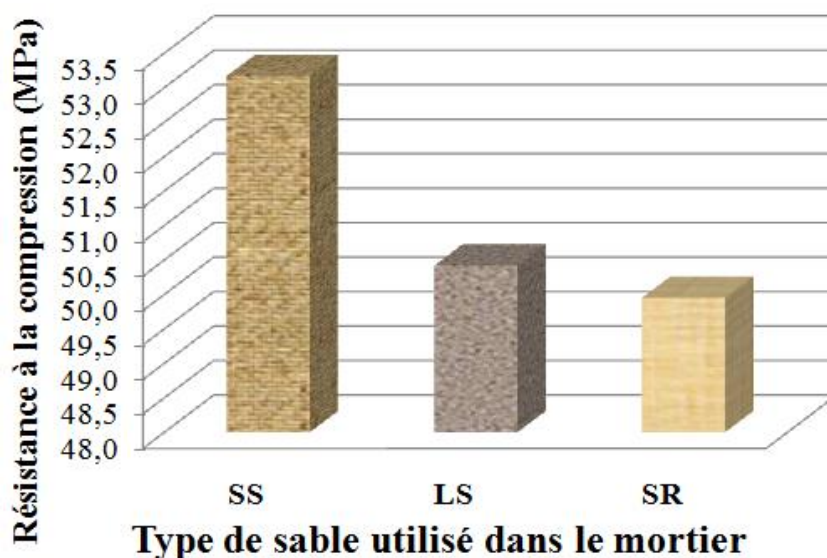


Figure 4.41 : Comparaison entre les résistances à la compression des mortiers à base de SS, SC et SR à 28 jours.

En revanche, les Figures 4.40, 4.41 et 4.42 montrent une comparaison de la résistance à la compression du mortier (Figures 4.40 et 4.41) et du béton (Figure 4.42) à base de sable concassé siliceux contenant 10% de fines de la masse de sable (B10) et un autre à base un sable roulé (BR), à 7 et à 28 jours. Bien entendu que la même composition a été étudiée avec la seule différence qui se trouve dans le type de sable.

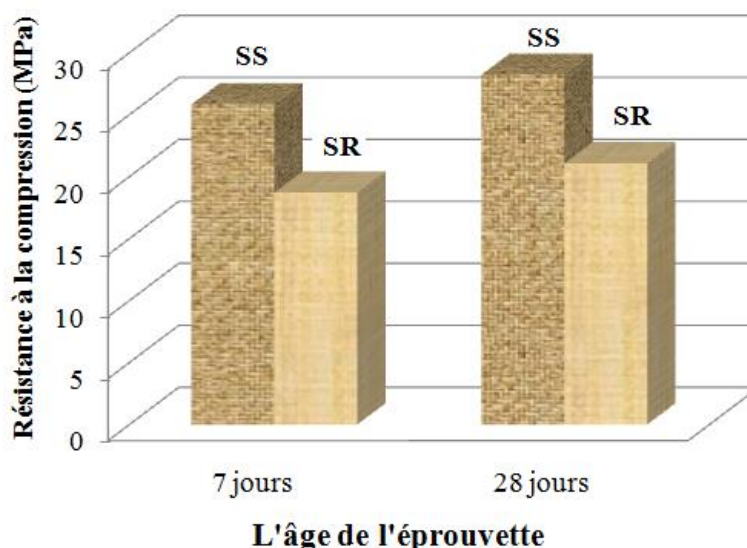


Figure 4.42 : Comparaison entre la résistance à la compression du B10 et du BR, à 7 et à 28 jours.

Les histogrammes présentés sur la Figure 4.42, montrent que le béton à base de SS donne une meilleure résistance à 7 et à 28 jours par rapport au béton avec SR. L'amélioration de la résistance à la compression peut être attribuée à la forme angulaire des grains concassés qui augmente la cohésion interne ainsi qu'à la teneur en fines dans le SC (10%) en améliorant la compacité du béton. Ce résultat est en accord avec les résultats qui ont été trouvés par [26, 27].

4.4.3. Influence de la fraction sableuse calcaire

Le béton avec sable concassé nécessite souvent une teneur légèrement supérieure en ciment pour atteindre la même ouvrabilité qu'un béton avec un sable naturel. L'effet de la concentration volumique du SC dans le mortier sur les performances mécaniques, en l'occurrence la résistance mécanique en compression et en traction, est étudié en utilisant deux rapports S/C : 1 et 2. Les

résultats obtenus sont présentés sous forme d'histogrammes, comme il est montré sur la Figure 4.43.

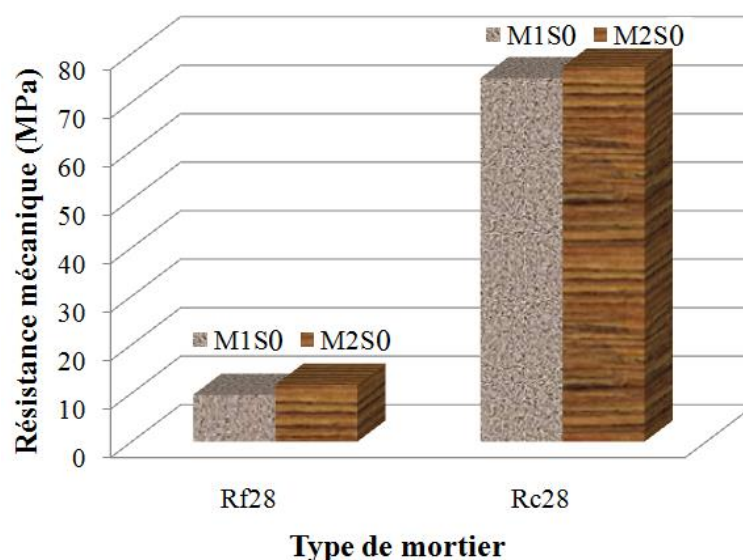


Figure 4.43 : Comparaison des résistances mécaniques des mortiers à base SC à 28 jours, en fonction du rapport S/C (M1S1 : S/C=1 ; M2S1 : S/C=2).

Les résultats obtenus montrent que l'évolution de la résistance à la compression et à la traction du mortier est légèrement améliorée avec l'augmentation du S/C. Dans notre étude, nous avons utilisé souvent le mortier M1, avec un rapport S/C=1, pour étudier ses propriétés à l'état frais en obtenant des résultats interprétables avec une ouvrabilité acceptable. Autrement, on devrait chercher la meilleure compacité pour avoir les meilleures performances à l'état durci.

L'analyse de l'évolution des performances du mortier et du béton à l'état frais et à l'état durci montre qu'il y a une relation directe entre les propriétés rhéologiques et les propriétés mécaniques. L'ouvrabilité de ces suspensions cimentaires a une influence sur la résistance mécanique.

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Cette partie récapitule les principaux résultats, conclusions et recommandations de cette étude. On pose également de nombreux points d'interrogation à accomplir pour l'avenir. Cependant, les objectifs initiaux de ce projet de recherche se sont résumés dans les trois axes principaux précédemment définis : étude des propriétés rhéologiques, ainsi que mécaniques, du béton et du mortier à base de SC, et l'étude de l'influence des propriétés rhéologiques sur le pompage de béton.

En ce qui concerne l'étude des propriétés rhéologiques des bétons et mortiers en fonction de la teneur en fines dans le SC, qui doit servir d'entrée pour l'étude du pompage, on peut dire que l'objectif est en partie atteint. On a réussi à mesurer ces propriétés. La variation des propriétés peut être qualitativement prédite lorsqu'une certaine variation dans l'un des éléments constitutifs a été appliquée. Néanmoins, aucun outil de prédiction quantitatif n'a pas été atteint. Des conclusions similaires peuvent être tirées pour les propriétés mécaniques. Cependant, pour le pompage du béton et sa relation avec les propriétés rhéologiques, l'objectif n'a pas été atteint. On n'arrive pas à faire des essais à grande échelle, faute de moyens. On a basé seulement sur les résultats et les conclusions des travaux déjà réalisés.

Dans ce projet de recherche, différents équipements ont été utilisés pour obtenir, d'une manière ou d'une autre, les propriétés rhéologiques et mécaniques du béton et du mortier à base de SC. En fait, deux rhéomètres ont été utilisés : un rhéomètre à géométrie Vane pour la pâte de ciment et un autre rhéomètre pour le béton, en utilisant une pale en double U, et pour le mortier, en utilisant une géométrie Vane. Comme première conclusion, on peut dire qu'on a pu déterminer les propriétés rhéologiques des bétons, mortier et coulis de ciment, en fonction des équipements utilisés. Cependant, on n'a pas fait une comparaison des propriétés rhéologiques obtenues par différents appareils, afin de confirmer les résultats ainsi obtenus. Etant donné que les propriétés intrinsèques réelles sont

actuellement inconnues, comme il a été démontré par plusieurs équipes de recherche à travers les différentes valeurs obtenues d'un appareil à autre.

Sur la base des conditions expérimentales et des résultats obtenus à partir de cette étude, on peut tirer les conclusions suivantes:

- Dans cette étude, il a été clairement montré que les caractéristiques des SC et leur teneur en fines ont une forte influence sur les propriétés rhéologiques des mortiers et bétons. On a constaté que la variation de la contrainte seuil et de la viscosité induite par la teneur en fines calcaire dans le SC ou bien par le changement de la nature ou la concentration massique du sable, ne s'écartent pas aux résultats rapportés dans la littérature.
- Pour le comportement rhéoépaississant qui peut entraîner des conséquences indésirables et très dangereuses, à ne pas négliger, notamment pour un débit élevé comme dans le cas de pompage, on a constaté que les fines calcaires et mêmes les SCs, ne fassent pas induire l'épaississement des bétons ou bien des mortiers et même des coulis. Cependant, le fait qu'on n'ait pas étudié un BAP, aucune conclusion ne peut être annoncée.
- L'augmentation de la teneur en fines dans le SC diminue l'affaissement et augmente le temps d'écoulement des mortiers à base de SC et SS. L'augmentation de 5% de fines dans le SC, provoque une diminution de presque 0,5 cm d'affaissement et 2,5 cm d'étalement du mortier au mini-cône. par conséquent, on observe une augmentation des propriétés rhéologiques (le seuil de cisaillement et la viscosité plastique).
- Les résultats de l'essai d'affaissement sont corrélés dans certains cas avec le seuil de cisaillement, mais il existe une grande dispersion des données. Par ailleurs, le même résultat a été trouvé avec la corrélation de la viscosité avec le temps d'écoulement. Mais dans le second cas, la dispersion est plus grande. A cet effet, les essais classiques ne sont pas des méthodes fiables pour prédire la rhéologie du mortier.
- L'addition d'un Sp améliore les propriétés rhéologiques. On peut obtenir un comportement rhéologique similaire pour le mortier à base de SC lavé et de mortier avec 15% de fines en utilisant 0,8% de Sp. Ce

pourcentage de Sp est également nécessaire pour obtenir les mêmes propriétés rhéologiques pour le mortier avec une teneur de 20% en fines qu'avec une teneur de 15% en fines.

- Le mortier à base de SC présente des valeurs de propriétés rhéologiques plus élevées par rapport au mortier à base de SR. Par conséquent, il est vraiment utile de corriger le SC par le SR pour améliorer l'ouvrabilité et les propriétés rhéologiques du mortier.
- Le comportement rhéologique du mortier a été fortement affecté par l'augmentation de la concentration volumique de SC.
- La corrélation entre les propriétés rhéologiques et mécaniques des bétons et leurs MBEs sont très prometteurs, malgré quelque différence dans l'allure globale de l'évolution de ces propriétés en fonction de la teneur en fines dans le SC.
- En ce qui concerne les propriétés mécaniques, on a constaté que l'effet indésirable de la teneur élevée des fines calcaires de concassage peut être évité en prenant en considération leurs effets sur l'ouvrabilité par l'ajout des superplastifiants.
- Les résultats obtenus montrent qu'il y a une défaillance entre le taux d'absorption des SC, déterminé par l'essai normalisé, et la quantité réelle absorbée pendant le malaxage.

Les travaux de cette thèse ont été limités à l'étude des bétons ordinaires, par conséquent les perspectives et les suggestions pour les futures recherches sont résumées dans les points suivants :

- Le béton autoplaçant est un béton qui nécessite généralement une plus grande quantité de fines particules pour atteindre ses propriétés clés. Puisque la production SC génère une grande quantité des particules fines, il est intéressant d'étudier la possibilité d'utiliser cette propriété de SC dans la production de BAP.
- Étant donné que le béton pompé est très sensible aux variations dans toute partie de sa composition, la recherche sur les propriétés rhéologiques des bétons pompés ne doit pas être arrêtée. Le lien entre les propriétés rhéologiques et la composition du béton doit être étudié,

afin de révéler l'interaction physique réelle dans le béton et afin de pouvoir mieux contrôler la qualité et la durabilité du béton frais.

- Les modèles actuels de conception de mélange de béton sont développés pour les agrégats fins naturels et ne tiennent pas compte de la forme des particules. Par conséquent, il est nécessaire de développer des modèles actuels pour tenir compte des formes de particules. Dans ce contexte, il est également nécessaire d'effectuer des études détaillées sur l'effet de l'agrégat.
- De nombreux types de rhéomètres sont disponibles sur le marché, mais on ne sait pas quel rhéomètre offre les meilleurs résultats. Ces appareils présentent tous, des avantages et des inconvénients. Ainsi, il est difficile de choisir le rhéomètre approprié. De plus, ils fournissent des résultats différents pour les propriétés rhéologiques d'un certain béton, ce qui rend impossible de déterminer celui qui fournit les résultats corrects. Des études comparatives sur différents rhéomètres de bétons et mortiers devraient être poursuivies afin de distinguer les différences intrinsèques et les différences associées aux bétons.
- Dans plusieurs recherches, il a été prouvé que le comportement rhéoépaississant est survenu dans le cas des BAP. A cet effet, autres études devraient révéler l'effet des SC et leurs fines sur le ce comportement.
- La thixotropie est parmi les paramètres les plus difficiles à comprendre et à étudier, et les mesures doivent être exécutées très soigneusement. Actuellement, la connaissance de ce comportement est en croissance, mais une compréhension fondamentale du phénomène est nécessaire pour pouvoir le contrôler. De plus, la thixotropie influence les propriétés rhéologiques des bétons, mais peu de recherches ont été effectuées pour déterminer l'amplitude de la variation de ces propriétés due à la thixotropie. Comme, on peut le voir, le domaine de la thixotropie nécessite encore plus d'exploration, mais l'une des principales questions est de savoir comment relier ces théories complexes à des situations pratiques, comme le pompage, par exemple.
- L'influence des bulles d'air sur les propriétés rhéologiques du béton a été expliquée qualitativement pour interpréter les résultats de pompage,

mais un modèle quantitatif serait utile. Quelle est l'évolution exacte de la contrainte seuil, de la viscosité et du rhéoépaississement avec l'augmentation de la teneur en air et des variations de la taille des bulles d'air, en gardant à l'esprit qu'aucun agent entraîneur d'air ne peut être appliqué car les tensioactifs de ces agents modifient sensiblement la tension superficielle de bulles l'air dans la pâte de ciment. Deuxièmement, les bulles d'air auront probablement une influence sur les propriétés du béton durci. Il convient d'étudier à quel niveau la résistance, la durabilité, le fluage et le retrait ne sont pas influencés de manière significative négative. Ces résultats peuvent être importants dans le cas où le béton a été ou doit être pompé.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Norme algérienne NA 5043, Granulats - Définitions, conformité, spécifications.
- [2] Norme NF EN 12620, 2000, Granulats pour bétons, AFNOR.
- [3] Norme NF EN 13139, 2003, Granulats pour mortiers, AFNOR.
- [4] Norme NF P 18-540, 1997, Granulats, AFNOR.
- [5] Achour, T., Lecomte, A., Ouezdou, M. B., Mensi, R., & Joudi, I. (2008). Contribution des fillers calcaires à l'adhérence pâte-granat : Exemples tunisiens. *Materials and Structures*, 41(5), 815-830.
- [6] Achour, T., Lecomte, A., Ouezdou, M. B., & Mensi, R. (2008). Résistance à la traction et module d'élasticité des bétons calcaires : application à des mélanges tunisiens. *Materials and Structures*, 41(8), 1427-1439.
- [7] Achour, T. (2007). Étude de l'influence de la nature des granulats sur les propriétés des bétons hydrauliques : cas des granulats calcaires tunisiens (Doctoral dissertation, Nancy 1).
- [8] Akrouf, K., Mounanga, P., Ltifi, M., & Jamaa, N. B. (2010). Rheological, Mechanical and Structural Performances of Crushed Limestone Sand Concrete. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 4(2), 97-104.
- [9] Joudi-Bahri, I., Lecomte, A., Ouezdou, M. B., & Achour, T. (2012). Use of limestone sands and fillers in concrete without superplasticizer. *Cement and Concrete Composites*, 34(6), 771-780.
- [10] Joudi-Bahri, I. (2012). Influence des sables fillérisés calcaires sur les propriétés des bétons courants et superplastifiés : Un exemple tunisien (Doctoral dissertation, Université de Lorraine).
- [11] R'mili, A., & Ouezdou, M. B. (2012). Valorisation du sable de concassage et du sable du désert dans la composition des bétons autoplaçants. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 2, p. 01001). EDP Sciences.
- [12] Manuel Technique. (2011). Spécifications techniques relatives aux sables de concassage pour bétons hydrauliques et enrobés bitumineux en Tunisie.
- [13] Norme NM 10.1.165, (1995), Le sable de concassage pour béton hydraulique - Spécifications, Norme Marocaine, Ministère du Commerce de l'Industrie, 1-7.
- [14] Dahir n° 1-02-130, (2002). Promulgation de la loi N° 08-01 relative à l'exploitation des carrières, *Bulletin Officiel (Marocain)*, N° 5036, 908-914.
- [15] Cardon, D., Evrard, H., & Garnier, J. (1984). Previsión de la teneur en fines des sables de concassage. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology-Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur*, 29(1), 343-348.
- [16] Coquillat, G., Delfau, M., & Lesage, R. (1984). Possibilités d'emploi des calcaires de dureté moyenne à faible dans les bétons hydrauliques. *Bull Liaison Lab Ponts Chauss*, (Spec XIV).
- [17] Norme NF EN 206-1, (2004). Béton, partie 1 : spécifications, performances, production et conformité, Afnor, Paris.

- [18] Westerholm, M. (2006). Rheology of the mortar phase of concrete with crushed aggregate (Doctoral dissertation, Luleå tekniska universitet).
- [19] Westerholm, M., Lagerblad, B., & Forsberg, E. (2007). Rheological properties of micromortars containing fines from manufactured aggregates. *Materials and structures*, 40(6), 615-625.
- [20] Westerholm, M., Lagerblad, B., Silfwerbrand, J., & Forsberg, E. (2008). Influence of fine aggregate characteristics on the rheological properties of mortars. *Cement and Concrete Composites*, 30(4), 274-282.
- [21] Benachour, Y., Davy, C. A., Skoczylas, F., & Houari, H. (2008). Effect of a high calcite filler addition upon microstructural, mechanical, shrinkage and transport properties of a mortar. *Cement and Concrete Research*, 38(6), 727-736.
- [22] Benachour, Y. (2009). Analyse de l'influence de l'ajout de taux élevé de fillers calcaires sur les propriétés physiques, mécaniques, microscopiques, de transfert et de durabilité des mortiers. Thèse de doctorat-Université de Constantine.
- [23] Menadi, B., Kenai, S., Khatib, J., & Aït-Mokhtar, A. (2009). Strength and durability of concrete incorporating crushed limestone sand. *Construction and Building Materials*, 23(2), 625-633.
- [24] Guemmadi, Z., Resheidat, M., Chabil, H., & Toumi, B. (2009). Modeling the influence of limestone filler on concrete: A novel approach for strength and cost. *Jordan Journal of Civil Engineering*, 3(2), 158-171.
- [25] Sadhouari, F., Goufi, N., Guezzouli, A. (2009). Valorisation de l'utilisation des sables concassés par analyse des propriétés des mortiers et bétons ; SBEIDCO – 1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries. ENSET Oran (Algeria).
- [26] Benabed, B., Kadri, E. H., Azzouz, L., & Kenai, S. (2012). Properties of self-compacting mortar made with various types of sand. *Cement and Concrete Composites*, 34(10), 1167-1173
- [27] Bouziani, T. (2013). Assessment of fresh properties and compressive strength of self-compacting concrete made with different sand types by mixture design modelling approach. *Construction and Building Materials*, 49, 308-314.
- [28] Bederina, M., Makhloufi, Z., Bounoua, A., Bouziani, T., & Queneudec, M. (2013). Effect of partial and total replacement of siliceous river sand with limestone crushed sand on the durability of mortars exposed to chemical solutions. *Construction and Building Materials*, 47, 146-158.
- [29] Haddadou, N. (2013). Valorisation du sable de concassage et validation de micro-modèle dans la maçonnerie chaînée de brique de terre cuite. Congrès International Matériaux & Stabilité structurelle, Rabat les 27 et 30 Novembre.
- [30] Benabed, B., Azzouz, L., Kadri, E. H., Kenai, S., & Belaidi, A. S. E. (2014). Effect of fine aggregate replacement with desert dune sand on fresh properties and strength of self-compacting mortars. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 28(21), 2182-2195.
- [31] Khouadjia, M., Mezghiche, B., & Drissi, M. (2015). Etude du comportement mécanique des bétons à base des sables de carrière modifiés avec sable de

- dune et sable d'oued: expérimentation et numérisation. In The 3rd International Workshop on Waste Management and Sustainable Development.
- [32] Bounedjema, Y., Ezziane, K., & Hallal, A. (2017). Variation of mechanical and rheological properties of mortar by replacement of natural sand with crushed sand. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 31(2), 182-201.
- [33] Safiddine, S. (2010). Mesures des caractéristiques rhéologiques et de la réactivité du mortier à base de sable de concassage (Mémoire Magister, Université de Médéa).
- [34] Benabed, B., Soualhi, H., Belaidi, A. S. E., Azzouz, L., & Kenai, S. (2016). Effect of limestone powder as a partial replacement of crushed quarry sand on properties of self-compacting repair mortars. *Journal of Building Materials and Structures*, 3(1), 15-30.
- [35] Benna, Y., & Dahli, M. (2000). Etude des bétons à base de sable de concassage. Journées nationales de Génie des matériaux. Université de Boumerdès.
- [36] Loi N° 05-12, 2005, loi relative à l'eau, Art. 14, Journal Officiel De La République Algérienne, N° 60, 3-18.
- [37] Instruction interministérielle, (2007), instruction interministérielle portant sur les spécifications techniques relatives aux sables de concassage pour bétons hydrauliques et enrobés bitumineux, Le Bulletin de l'Habitat, Bulletin d'information du Ministère de l'Habitat et de l'Urbanisme N°2, 26-27.
- [38] Naël-Redolfi, J., Keita, E., & Roussel, N. (2018). Water absorption measurement of fine porous aggregates using an evaporative method: Experimental results and physical analysis. *Cement and Concrete Research*, 104, 61-67.
- [39] Park, S., Lee, E., Ko, J., Yoo, J., & Kim, Y. (2018). Rheological properties of concrete using dune sand. *Construction and Building Materials*, 172, 685-695.
- [40] Reddy, T. S. S., & Dadapeer, A. B. S. (2018). An Experimental Analysis on the Effects of Manufactured Sand on the Compressive Strength of Concrete.
- [41] Bala, P. S., Ravikumar, M. S., & Vaisakh, G. (2018). Mechanical Properties of Self Compacting Concrete Containing Crushed Sand and Sisal Fiber. *International Journal of Applied Environmental Sciences*, 13(1), 71-81.
- [42] Wen, X., Zhang, Z., Cai, Y., Feng, L., & Qiu, T. (2018). Impact and Improvement of Crushed Tuff Sand on Sulfate Resistance of Cement Concrete at Low Temperature. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(10), 05018004.
- [43] Xiao, Y., Zhang, Y., Lu, J., Liu, Y., & Cheng, W. (2018). Experimental Analysis on Pre-Stress Friction Loss of Crushed Limestone Sand Concrete Beams. *Applied Sciences* (2076-3417), 8(5).
- [44] Kumar, D. P., & Sashidhar, C. (2018). Effect of fineness modulus of manufactured sand on fresh properties of self-compacting concrete. *Indian Concrete Journal*, 77.
- [45] Coussot, P. (2012). Comprendre la rhéologie: de la circulation du sang à la prise du béton. EDP Sciences.
- [46] Dreux, G., & Festa, J. (1998). Nouveau Guide du Béton et de ses Constituants. Editions Eyrolles, Paris.
- [47] British Standard BS 882: Partie 2: 1983.

- [48] Celik, T., & Marar, K. (1996). Effects of crushed stone dust on some properties of concrete. *Cement and Concrete Research*, 26(7), 1121-1130.
- [49] Benna, Y. & Dahli, M. (2003). Etude des bétons à base de sable de concassage. *La lettre du CTC Centre*, pages 4-5.
- [50] De Larrard, F. (2000). Structures granulaires et formulation des bétons. *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*.
- [51] Ramachandran, V. S. (1988). Thermal analyses of cement components hydrated in the presence of calcium carbonate. *Thermochimica Acta*, 127, 385-394.
- [52] Nonat, A. (1994). Interactions between chemical evolution (hydration) and physical evolution (setting) in the case of tricalcium silicate. *Materials and structures*, 27(4), 187-195.
- [53] Vikan, H., & Justnes, H. (2007). Rheology of cementitious paste with silica fume or limestone. *Cement and Concrete Research*, 37(11), 1512-1517.
- [54] Kadri, E. H., Aggoun, S., De Schutter, G., & Ezziane, K. (2010). Combined effect of chemical nature and fineness of mineral powders on Portland cement hydration. *Materials and structures*, 43(5), 665-673.
- [55] Norme française NF équivalente XP P 18-545.
- [56] Nehdi, M. (1998). Microfiller effect on rheology, microstructure, and mechanical properties of high-performance concrete (Doctoral dissertation, University of British Columbia).
- [57] Ramachandran, V. S., & Zhang, C. M. (1986). Dependence of fineness of calcium carbonate on the hydration behaviour of tricalcium silicate. *Durability of building materials*, 4(1), 45-66.
- [58] Ramirez, J. L., Barcena, J. M., & Urreta, J. I. (1987). Sables calcaires à fines calcaires et argileuses: influence et nocivité dans les mortiers de ciment. *Materials and Structures*, 20(3), 202-213.
- [59] Valcuende, M., Marco, E., Parra, C., & Serna, P. (2012). Influence of limestone filler and viscosity-modifying admixture on the shrinkage of self-compacting concrete. *Cement and Concrete Research*, 42(4), 583-592.
- [60] Roquier, G. (2016). Etude de la compacité optimale des mélanges granulaires binaires: classe granulaire dominante, effet de paroi, effet de desserrement (Doctoral dissertation, Paris Est).
- [61] Hafid, H. (2012). Influence des paramètres morphologiques des granulats sur le comportement rhéologique des bétons frais: étude sur systèmes modèles (Doctoral dissertation, Université Paris-Est).
- [62] Hanini, W. (2012). Etude de l'incidence de la granularité sur la compacité des mélanges granulaires (Doctoral dissertation).
- [63] Neville, A. Brooks, J. (1993). *Concrete Technology*, Longman. London, England, (1993).
- [64] Donza, H., Cabrera, O., & Irassar, E. F. (2002). High-strength concrete with different fine aggregate. *Cement and Concrete Research*, 32(11), 1755-1761.
- [65] Alhozaimy, A. M. (2009). Effect of absorption of limestone aggregates on strength and slump loss of concrete. *Cement and Concrete Composites*, 31(7), 470-473.

- [66] Bigas, J. P., & Gallias, J. L. (2002). Effect of fine mineral additions on granular packing of cement mixtures. *Magazine of Concrete Research*, 54(3), 155-164.
- [67] Hafid, H. (2012). Influence des paramètres morphologiques des granulats sur le comportement rhéologique des bétons frais: étude sur systèmes modèles (Doctoral dissertation, Université Paris-Est).
- [68] Nehdi, M. (2000). Why some carbonate fillers cause rapid increases of viscosity in dispersed cement-based materials. *Cement and Concrete Research*, 30(10), 1663-1669.
- [69] Tregger, N. A., Pakula, M. E., & Shah, S. P. (2010). Influence of clays on the rheology of cement pastes. *Cement and concrete research*, 40(3), 384-391.
- [70] Nehdi, M., Mindess, S., & Aïtcin, P. C. (1998). Rheology of high-performance concrete: effect of ultrafine particles. *Cement and Concrete Research*, 28(5), 687-697.
- [71] Cao, Y., Zavaterra, P., Youngblood, J., Moon, R., & Weiss, J. (2015). The influence of cellulose nanocrystal additions on the performance of cement paste. *Cement and Concrete Composites*, 56, 73-83.
- [72] Wang, C., Sheng, Y., Zhao, X., Pan, Y., & Wang, Z. (2006). Synthesis of hydrophobic CaCO₃ nanoparticles. *Materials Letters*, 60(6), 854-857.
- [73] Khigerovich, M. I., Dvorkin, L. I., Ivanova, R. P., & Pressman, I. G. (1971). Effect of hydrophobizing surfactants on the properties of hydraulic engineering concrete. *Hydrotechnical Construction*, 5(6), 518-521.
- [74] Burgos-Montes, O., Palacios, M., Rivilla, P., & Puertas, F. (2012). Compatibility between superplasticizer admixtures and cements with mineral additions. *Construction and Building Materials*, 31, 300-309.
- [75] Soualhi, H., Kadri, E. H., Ngo, T. T., Bouvet, A., Cussigh, F., & Benabed, B. (2015). Rheology of ordinary and low-impact environmental concretes. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 29(20), 2160-2175.
- [76] Benaïcha, M., Jalbaud, O., Alaoui, A. H., & Burtschell, Y. (2015). Marsh cone coupled to a plexiglas horizontal channel: Rheological characterization of cement grout. *Flow Measurement and Instrumentation*, 45, 126-134.
- [77] Ferraris, C. F., Obla, K. H., & Hill, R. (2001). The influence of mineral admixtures on the rheology of cement paste and concrete. *Cement and Concrete Research*, 31(2), 245-255.
- [78] Artelt, C., & Garcia, E. (2008). Impact of superplasticizer concentration and of ultra-fine particles on the rheological behaviour of dense mortar suspensions. *Cement and Concrete Research*, 38(5), 633-642.
- [79] Esping, O. (2008). Effect of limestone filler BET (H₂O)-area on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete. *Cement and Concrete Research*, 38(7), 938-944.
- [80] Petit, J. Y., & Wirquin, E. (2010). Effect of limestone filler content and superplasticizer dosage on rheological parameters of highly flowable mortar under light pressure conditions. *Cement and Concrete Research*, 40(2), 235-241.

- [81] Collins, F., & Sanjayan, J. G. (1999). Effects of ultra-fine materials on workability and strength of concrete containing alkali-activated slag as the binder. *Cement and Concrete Research*, 29(3), 459-462.
- [82] Svermova, L., Sonebi, M., & Bartos, P. J. (2003). Influence of mix proportions on rheology of cement grouts containing limestone powder. *Cement and Concrete Composites*, 25(7), 737-749.
- [83] Yahia, A., Tanimura, M., & Shimoyama, Y. (2005). Rheological properties of highly flowable mortar containing limestone filler-effect of powder content and W/C ratio. *Cement and Concrete Research*, 35(3), 532-539.
- [84] Ho, D. W. S., Sheinn, A. M. M., Ng, C. C., & Tam, C. T. (2002). The use of quarry dust for SCC applications. *Cement and Concrete Research*, 32(4), 505-511.
- [85] Zhang, X., & Han, J. (2000). The effect of ultra-fine admixture on the rheological property of cement paste. *Cement and Concrete Research*, 30(5), 827-830.
- [86] Hameed, M. S., Sekar, A. S. S., Balamurugan, L., & Saraswathy, V. (2012). Self-compacting concrete using marble sludge powder and crushed rock dust. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 16(6), 980-988.
- [87] Eren, Ö., & Marar, K. (2009). Effects of limestone crusher dust and steel fibers on concrete. *Construction and Building Materials*, 23(2), 981-988.
- [88] Nehdi, M., Mindess, S., & Aïtcin, P. C. (1997). Statistical modelling of the microfiller effect on the rheology of composite cement pastes. *Advances in Cement Research*, 9(33), 37-46.
- [89] Baron, J. (1987). Technical and economical aspects of the use of limestone filler additions in cement. *World cement*, 100-104.
- [90] Ezziane, K., Kadri, E. H., Hallal, A., & Duval, R. (2010). Effect of mineral additives on the setting of blended cement by the maturity method. *Materials and structures*, 43(3), 393-401.
- [91] ACI concrete terminology, (2013). An ACI standard, American concrete institute.
- [92] Ferraris, C. F., Obla, K. H., & Hill, R. (2001). The influence of mineral admixtures on the rheology of cement paste and concrete. *Cement and Concrete Research*, 31(2), 245-255.
- [93] Tattersall, G. H. (2003). *Workability and quality control of concrete*. CRC Press.
- [94] Wallevik, O. H., & Wallevik, J. E. (2011). Rheology as a tool in concrete science: The use of rheographs and workability boxes. *Cement and Concrete Research*, 41(12), 1279-1288.
- [95] Lachemi, M., Hossain, K. M. A., Lambros, V., Nkinamubanzi, P. C., & Bouzoubaâ, N. (2004). Self-consolidating concrete incorporating new viscosity modifying admixtures. *Cement and Concrete Research*, 34(6), 917-926.
- [96] Lanos, C., & Estellé, P. (2009). Vers une réelle rhéométrie adaptée aux bétons frais. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 13(4), 457-471.
- [97] Ion Paraschivoiu, Michel Prun'homme, Luc Robillard et Patrick Vasseur (2003). *Mécanique des fluides*. Presses internationales Polytechnique.
- [98] Koehler, E. P., & Fowler, D. W. (2004). Development of a portable rheometer for fresh portland cement concrete.

- [99] Wallevik, O. H., Feys, D., Wallevik, J. E., & Khayat, K. H. (2015). Avoiding inaccurate interpretations of rheological measurements for cement-based materials. *Cement and Concrete Research*, 78, 100-109.
- [100] Chidiac, S. E., & Mahmoodzadeh, F. (2009). Plastic viscosity of fresh concrete—A critical review of predictions methods. *Cement and Concrete Composites*, 31(8), 535-544.
- [101] Estellé, P., Lanos, C., Perrot, A., & Amziane, S. (2008). Processing the vane shear flow data from Couette analogy. *Applied Rheology*, 18(3), 34037.
- [102] Toutou, Z., Roussel, N., Lanos, C., Mélinge, Y., Monnet, P., Pantet, A., & Roy, R. L. (2005). Rhéologie des suspensions à matrice cimentaire: approche expérimentale multi-échelle. *Revue européenne de génie civil*, 9(3), 309-320.
- [103] Chouinard, B. (2000). Etude des relations entre la rhéologie du béton et sa pompabilité (French text). Université Laval .
- [104] Soualhi, H., Kadri, E. H., Bouvet, A., Ngo, T. T., & Cussigh, F. (2017). New model to estimate plastic viscosity of eco-friendly and conventional concrete. *Construction and Building Materials*, 135, 323-334.
- [105] Ferraris, C. F., & de Larrard, F. (1998). Modified slump test to measure rheological parameters of fresh concrete. *Cement, Concrete and Aggregates*, 20(2), 241-247.
- [106] Kaci, A., Chaouche, M., Andreani, P. A., & Brossas, H. (2009). Rheological behaviour of render mortars. *Applied Rheology*, 19(1), 13794.
- [107] Boisly, M., Kastner, M., Brummund, J., & Ulbricht, V. (2014). General Aspects of Yield Stress Fluids—Terminology and Definition of Viscosity. *Appl. Rheol*, 24(1), 14578.
- [108] Coussot, P., & Ancey, C. (1999). Rheophysical classification of concentrated suspensions and granular pastes. *Physical Review E*, 59(4), 4445.
- [109] Ferraris, C. F., & de Larrard, F. (1998). Testing and modelling of fresh concrete rheology. US Department of Commerce, Technology Administration, National Institute of Standards and Technology.
- [110] Feys, D., Verhoeven, R., & De Schutter, G. (2007). Evaluation of time independent rheological models applicable to fresh self-compacting concrete. *Applied rheology*, 17(5), 56244-57190.
- [111] Feys, D., Verhoeven, R., & De Schutter, G. (2008). Extension of the Poiseuille formula for shear-thickening materials and application to self-compacting concrete. *Applied Rheology*, 18(6), 62705.
- [112] Feys, D., Verhoeven, R., & De Schutter, G. (2009). Why is fresh self-compacting concrete shear thickening?. *Cement and concrete Research*, 39(6), 510-523.
- [113] Feys, D., Wallevik, J. E., Yahia, A., Khayat, K. H., & Wallevik, O. H. (2013). Extension of the Reiner–Riwlin equation to determine modified Bingham parameters measured in coaxial cylinders rheometers. *Materials and structures*, 46(1-2), 289-311.

- [114] Güneysi, E., Gesoglu, M., & Algin, Z. (2016). Rheological and fresh properties of self-compacting concretes containing coarse and fine recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, 113, 622-630.
- [115] Cyr, M., Legrand, C., & Mouret, M. (2000). Study of the shear thickening effect of superplasticizers on the rheological behaviour of cement pastes containing or not mineral additives. *Cement and Concrete Research*, 30(9), 1477-1483.
- [116] Maranzano, B. J., & Wagner, N. J. (2001). The effects of particle size on reversible shear thickening of concentrated colloidal dispersions. *The Journal of chemical physics*, 114(23), 10514-10527.
- [117] Mouret, M., & Cyr, M. (2003). A discussion of the paper "The effect of measuring procedure on the apparent rheological properties of self-compacting concrete" by Mette R. Geiker, Mari Brandl, Lars N. Thrane, Dirch H. Bager and Olafur Wallevik. *Cement and concrete research*, 33(11), 1901-1903.
- [118] Egres, R. G., & Wagner, N. J. (2005). The rheology and microstructure of acicular precipitated calcium carbonate colloidal suspensions through the shear thickening transition. *Journal of rheology*, 49(3), 719-746.
- [119] Feys, D., Verhoeven, R., & De Schutter, G. (2008). Extension of the Poiseuille formula for shear-thickening materials and application to self-compacting concrete. *Applied Rheology*, 18(6), 62705.
- [120] Heirman, G., Hendrickx, R., Vandewalle, L., Van Gemert, D., Feys, D., De Schutter, G., & Vantomme, J. (2009). Integration approach of the Couette inverse problem of powder type self-compacting concrete in a wide-gap concentric cylinder rheometer: Part II. Influence of mineral additions and chemical admixtures on the shear thickening flow behaviour. *Cement and Concrete Research*, 39(3), 171-181.
- [121] Jarny, S. (2004). Etude du caractère thixotrope des pâtes de ciment. XXII^{ème} Rencontres universitaires de génie civil - Ville & génie civil
- [122] Toutou, Z., Cador, M., Roussel, N., Schwartzentruber, L. D. A., Vilbé, E., & Le Roy, R. (2005). Rhéologie des bétons autoplaçants: évaluation de la thixotropie. *Bulletin de liaison des Ponts et Chaussées*.
- [123] Roussel, N. (2006). A thixotropy model for fresh fluid concretes: theory, validation and applications. *Cement and Concrete Research*, 36(10), 1797-1806.
- [124] Coussot, P., & Roussel, N. (2006). Quantification de la thixotropie des matériaux cimentaires et de ses effets. *Revue européenne de génie civil*, 10(1), 45-63.
- [125] Atzeni, C., Massidda, L., & Sanna, U. (1985). Comparison between rheological models for portland cement pastes. *Cement and Concrete Research*, 15(3), 511-519.
- [126] Ferraris, C. F. (1999). Measurement of the rheological properties of high performance concrete: state of the art report. *Journal of research of the national institute of standards and technology*, 104(5), 461.
- [127] Feys, D. (2009). Interactions between rheological properties and pumping of self-compacting concrete (Doctoral dissertation, Ghent University).

- [128] Ukrainčik, V. (1980). Study of fresh concrete flow curves. *Cement and Concrete Research*, 10(2), 203-212.
- [129] Griesser, A. (2002). Cement-superplasticizer interactions at ambient temperatures (Doctoral dissertation, ETH Zurich).
- [130] Yammine, J. (2007). Rhéologie des bétons fluides à hautes performances: relations entre formulations, propriétés rhéologiques, physico-chimie et propriétés mécaniques (Doctoral dissertation, École normale supérieure de Cachan-ENS Cachan).
- [131] Einstein, A. (1905). Ein neue Bestimmung der Molekular dimensionen.
- [132] NGUYEN, V. H. (2007). Comportement rhéologique et écoulement au cône de Marsh des coulis cimentaires. thèse doctorat de l'université de Cergy – Pontoise,
- [133] Baroghel-Bouny, V. (1994). Caractérisation microstructurale et hydrique des pâtes de ciment et des bétons ordinaires et à très hautes performances (Doctoral dissertation, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées).
- [134] Roussel, N., & Coussot, P. (2006). Ecoulements d'affaissement et d'étalement: modélisation, analyse et limites pratiques. *Revue européenne de génie civil*, 10(1), 25-44.
- [135] Stickel, J. J., & Powell, R. L. (2005). Fluid mechanics and rheology of dense suspensions. *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 37, 129-149.
- [136] Mahmoodzadeh, F., & Chidiac, S. E. (2013). Rheological models for predicting plastic viscosity and yield stress of fresh concrete. *Cement and Concrete Research*, 49, 1-9.
- [137] Ferraris, C., De Larrard, F., & Martys, N. (2001). Fresh concrete rheology: recent developments. *Materials Science of Concrete VI*, Amer. Cer. Soc. Ed. S. Mindess, J. Skalny, 215-241.
- [138] Hu, C., & de Larrard, F. (1996). The rheology of fresh high-performance concrete. *Cement and concrete research*, 26(2), 283-294.
- [139] Mooney, M. (1951). The viscosity of a concentrated suspension of spherical particles. *Journal of colloid science*, 6(2), 162-170.
- [140] Legrand, C. (1972). Contribution à l'étude de la rhéologie du béton frais. *Matériaux et Construction*, 5(5), 275-295.
- [141] Ferraris, C. F., & Gaidis, J. M. (1992). Connection between the rheology of concrete and rheology of cement paste. *Materials Journal*, 89(4), 388-393.
- [142] Yang, M., & Jennings, H. M. (1995). Influences of mixing methods on the microstructure and rheological behavior of cement paste. *Advanced cement based materials*, 2(2), 70-78.
- [143] Erdem, T. K., Khayat, K. H., & Yahia, A. (2009). Correlating rheology of self-consolidating concrete to corresponding concrete-equivalent mortar. *ACI Materials Journal*, 106(2), 154.
- [144] Schwartzentruber, A., & Catherine, C. (2000). La méthode du mortier de béton équivalent (MBE)—Un nouvel outil d'aide à la formulation des bétons adjuvantés. *Materials and structures*, 33(8), 475-482.

- [145] Wallevik, O. H. (2003, August). Rheology—a scientific approach to develop self-compacting concrete. In Proc. of the 3rd Int. Symp. on Self-Compacting Concrete, Reykjavik (pp. 23-31).
- [146] Beaupre, D. (1994). Rheology of high performance shotcrete (Doctoral dissertation, University of British Columbia).
- [147] Banfill, P. F. G. (1994). Rheological methods for assessing the flow properties of mortar and related materials. *Construction and Building materials*, 8(1), 43-50.
- [148] Ferraris, C. F., Brower, L. E., & Banfill, P. (2001). Comparison of Concrete Rheometers: International Test at LCPC (Nantes, France) in October, 2000. US Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology.
- [149] Banfill, P. F. G. (1993). Structure and rheology of cement-based systems. In L. J. Struble, C. F. Zukoski, & G. C. Maitland (Eds.), *Flow and Microstructure of Dense Suspensions*. (pp. 149-160). Pittsburgh: Materials Research Society.
- [150] Roussel, N. (2006). Correlation between yield stress and slump: comparison between numerical simulations and concrete rheometers results. *Materials and Structures*, 39(4), 501.
- [151] Roussel, N., Stefani, C., & Leroy, R. (2005). From mini-cone test to Abrams cone test: measurement of cement-based materials yield stress using slump tests. *Cement and Concrete Research*, 35(5), 817-822.
- [152] Tourbin, M. (2006). Caractérisation et comportement de suspensions concentrées de nanoparticules sous écoulement: Application aux processus d'aggrégation et de rupture (Doctoral dissertation).
- [153] Kaplan, D. (2000). *Pompage des bétons, Etudes et recherches des laboratoires des Ponts et Chaussées*. Rapp. LCPC, Paris, France.
- [154] Ngo, T. T. (2009). Influence de la composition des bétons sur les paramètres de pompage et validation d'un modèle de prévision de la constante visqueuse (Doctoral dissertation, Cergy-Pontoise).
- [155] Best, J. F., & Lane, R. O. (1980). Testing for optimum pumpability of concrete. *Concrete International*, 2(10), 9-17.
- [156] Morinaga, S. (1973, March). Pumpability of concrete and pumping pressure in pipelines. In *Proceedings of Rilem Seminar, Leeds* (Vol. 3, pp. 1-39).
- [157] Chapdelaine, F. (2007). *Étude fondamentale et pratique sur le pompage du béton*. Université Laval de Montréal
- [158] Dupain, R., Lanchon, R., & Saint-Arroman, J. C. (1995). *Granulats, sols, ciments et bétons*. Edition Casteilla.
- [159] De Larrard, F. (2000). *Structures granulaires et formulation des bétons*. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.
- [160] Sedran, T., & de F, L. A. R. R. A. R. D. (2000). *Manuel d'utilisation de RENE-LCPC, version 6.1 d, logiciel d'optimisation granulaire*. Laboratoire Centrale des Ponts et Chaussées.
- [161] Diederich, P. (2010). Contribution à l'étude de l'influence des propriétés des fillers calcaires sur le comportement autoplaçant du béton (Doctoral dissertation, Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier).

- [162] Hu, J. (2005). A study of effects of aggregate on concrete rheology. (Doctoral dissertation).Iowa State University.
- [163] Roussel, N., & Le Roy, R. (2005). The Marsh cone: a test or a rheological apparatus?. *Cement and Concrete Research*, 35(5), 823-830.
- [164] Le, D. H., Sheen, Y. N., & Lam, M. N. T. (2018). Fresh and hardened properties of self-compacting concrete with sugarcane bagasse ash–slag blended cement. *Construction and Building Materials*, 185, 138-147.
- [165] Jiao, D., Shi, C., Yuan, Q., An, X., & Liu, Y. (2018). Mixture design of concrete using simplex centroid design method. *Cement and Concrete Composites*, 89, 76-88.
- [166] Taleb, O., Ghomari, F., Hacene, M. A. B., Kadri, E. H., & Soualhi, H. (2018). Effet du dosage en superplastifiant sur les caractéristiques rhéologiques des bétons autoplaçants. *Nature & Technology*, (18), 17-26.
- [167] Adjoudj, M., Ezziane, K., Kadri, E.H., SOUALHI, H. (2018). Study of the rheological behavior of mortar with Silica Fume and superplasticizer admixtures according to the water film thickness. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 22(7), 2480-2491.
- [168] Dada, E., Belaidi, A. S., Soualhi, H., & El-Hadj, K. (2018). Rheological study of self-compacting mortars based on ternary cements. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 149, p. 01057). EDP Sciences.
- [169] Stolz, C. M., & Masuero, A. B. (2018). Influence of grains distribution on the rheological behavior of mortars. *Construction and Building Materials*, 177, 261-271.
- [170] Soualhi, H., Kadri, E. H., Ngo, T. T., Bouvet, A., Cussigh, F., & Kenai, S. (2014). A vane rheometer for fresh mortar: development and validation. *Appl. Rheol*, 24, 22594.
- [171] Lecompte, T., Perrot, A., Picandet, V., Bellegou, H., & Amziane, S. (2012). Cement-based mixes: shearing properties and pore pressure. *Cement and Concrete Research*, 42(1), 139-147.
- [172] Estelle, P., & Lanos, C. (2012). High torque vane rheometer for concrete: principle and validation from rheological measurements. *Applied Rheology*, 22, 12881.
- [173] Estellé, P., Lanos, C., & Perrot, A. (2008). Processing the Couette viscometry data using a Bingham approximation in shear rate calculation. *Journal of Non-NewtonianFluidMechanics*, 154(1), 31-38.
- [174] Soualhi, H. (2014). Optimisation de la viscosité des bétons à faible impact environnemental (Doctoral dissertation), Cergy-Pontoise.
- [175] Soualhi, H., Kadri, E. H., Ngo, T. T., Bouvet, A., Cussigh, F., & Tahar, Z. E. A. (2017). Design of portable rheometer with new vane geometry to estimate concrete rheological parameters. *Journal of Civil Engineering and Management*, 23(3), 347-355.
- [176] Barnes, H. A., & Nguyen, Q. D. (2001). Rotating vane rheometry-a review. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 98(1), 1-14.

- [177] Koehler, E. P., Fowler, D. W., Ferraris, C. F., & Amziane, S. (2005). A new, portable rheometer for fresh self-consolidating concrete. *ACI SPECIAL PUBLICATIONS*, 233, 97.
- [178] Hu, C. (1995). *Rhéologie des bétons fluides* (Doctoral dissertation, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées).
- [179] Yahia, A., & Khayat, K.H. (2006). Modification of the concrete rheometer to determine rheological properties of self-consolidating concrete – van device. *Proceeding of the 2nd International Symposium on Advances in Concrete through Science and Engineering*, Quebec.
- [180] Yahia, A., Khayat, K.H., & Sayed, M. (2006). Statistical design to evaluate the coupled effect of mixture parameters and rebar spacing on flow characteristics of SCC» *Proceeding of the 2nd International Symposium on Advances in Concrete through Science and Engineering*, Quebec.
- [181] Hu, C., de Larrard, F., Sedran, T., Boulay, C., Bosc, F., & Deflorenne, F. (1996). Validation of BTRHEOM, the new rheometer for soft-to-fluid concrete. *Materials and Structures*, 29(10), 620-631.
- [182] Herschel, W. H., & Bulkley, R. (1926). Measurement of consistency as applied to rubber-benzine solutions. In *Proceedings of the American Society of Testing Materials* (Vol. 26, pp. 621-655).
- [183] Bethmont, S. (2007). *Mécanismes de ségrégation dans les bétons autoplaçants (BAP): Etude expérimentale des interactions granulaires*. Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées,
- [184] Krieger, I. M. & Dougherty T.J. (1972). Rheology of monodisperse latices. *Advances in Colloid and Interface science*, 3(2), 111-136.
- [185] Nguyen, H. M. (2003). *Comportement rhéologique des suspensions concentrées*. In Master Research Report. INSA Rennes.
- [186] Kim, J. K., Lee, C. S., Park, C. K., & Eo, S. H. (1997). The fracture characteristics of crushed limestone sand concrete. *Cement and concrete research*, 27(11), 1719-1729.
- [187] Safiddine, S., Debieb, F., Kadri, E. H., Menadi, B., & Soualhi, H. (2017). Effect of Crushed Sand and Limestone Crushed Sand Dust on the Rheology of Cement Mortar. *Applied Rheology*, 27(1).
- [188] Quiroga, P. N. (2003). *The effect of the aggregates characteristics on the performance of Portland cement concrete* (Doctoral dissertation).
- [189] Belaidi, A., & Brixi, A. (2014). *Etude de l'influence des additions et des adjuvants sur les propriétés aux états frais et durci des bétons* (Doctoral dissertation).
- [190] Guetteche, M. N. (2011). *Formulation des bétons autoplaçants*. Mémoire Magister, Université de Constantine.

ANNEXES

Annexe A :

A.1. Fiche technique du ciment.



Ciments Calcia
Italcementi Group

Direction Industrielle
et Technique
Les Technodes
S.P. 01
78001 Guerville cedex

Direction Commerciale
Assistance
et Prescription Clients
Tél. : 01 34 77 78 81
Fax : 01 30 98 73 50

Version du : 22/01/2007
N° certificat CE : 0333-CPD-5202

Fiche produit de

Villiers au Bouin
CEM I 52,5 N CE CP2 NF

Caractéristiques physiques et mécaniques

Compression en MPa				Retrait en µm/m à 28j	eau pâte pure en %	Début de prise en min	Chaleur en J/g à 41h	Surface Blaine en cm ² /g	Masse Volumique en g/cm ³	Stabilité en mm	Matiabilité sur mortier CEN en s
1j	2j	7j	28j								
18.1	31.7	48.5	61.3	580	27.9	165	351	3590	3.13	1.0	

Composition élémentaire (%)		Constituants (%)		Caractéristiques des constituants		
Perte au feu	1.63	Principaux		Nature	Caractéristiques	
SiO ₂	20.23	Clinker (K) de Villiers au Bouin	98.0	Clinker (K)	CaO/SiO ₂	3.07
Al ₂ O ₃	4.29	Laitier (S)		Villiers	MgO (%)	4.15
Fe ₂ O ₃	2.35	Cendres (V)			Al ₂ O ₃ (%)	4.78
TiO ₂	0.25	Calcaire (L)			Insoluble (%)	nd
MnO	0.02	Fusées de silice (D)			C ₂ S (%)	66.9
CaO	63.67	Secondaires			C ₃ S (%)	10.7
MgO	3.88	Calcaire (L)			C ₃ A (%)	8.4
SO ₃	2.80	Fines de cru (F)	2.0		C ₄ A _F (%)	7.6
K ₂ O	0.69	Total	100.0	Laitier (S)	Laitier vitreux (%)	
Na ₂ O	0.14	Sulfate de calcium			(CaO+MgO)/SO ₂	
P ₂ O ₅	0.31	Gypse	4.4		CaO+MgO+SO ₂	
S-	< 0.02	Anhydrite		Cendres (V)	PF (%)	
Cl-	0.02	Additif			CaO réactive (%)	
		Agent de mouture			SiO ₂ réactive (%)	
		C ₃ A _F 3903 (AUXM)	0.027	Calcaire (L)		
		Agent réducteur			CaCO ₃ (%)	
		Sulfate de fer	0.30	Fusées de silice (D)	Adsorption bleu méthylène (g/100g)	
					TOC (%)	
					SiO ₂ amorphe (%)	
					PF (%)	
					Altre manique BET (m ² /kg)	

Mouture

Broyeurs(s) 1

Stockage

Silo(s) cf plan de stockage

Points de vente

Usine de Villiers au Bouin

Vrac

Oui

Sac

Oui

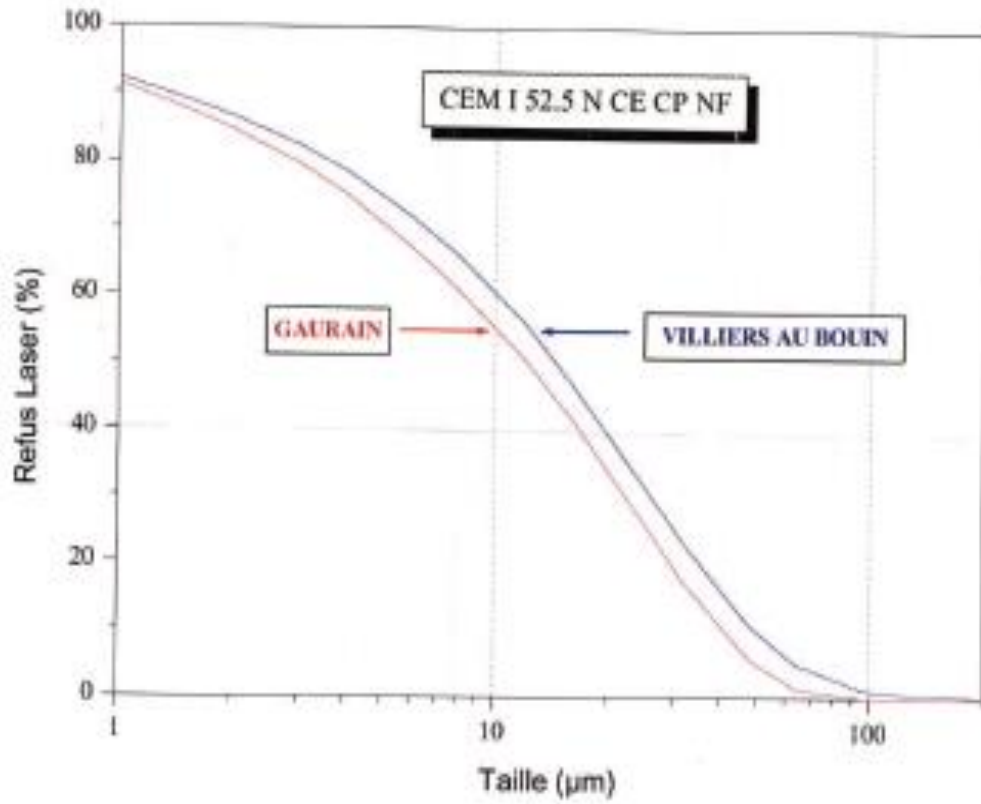
Fiches techniques mises à jour 2006 - assistés à l'ère numérique



Italcementi
Sud des Technodes
78001 Guerville
Tél. : 01 34 77 78 80
Fax : 01 30 98 73 50

ISO accredité de 001/008/021/024
Série 034/002/003/007/008/009

A.2. Analyse granulométrique du ciment.



Taille (µm)	Refus Laser (%)	
	Villiers au Bouin	Gaurain
1	92,18	91,22
1,5	88,96	87,47
2	86,53	84,59
3	82,38	79,63
4	78,58	75,08
6	71,72	67,16
8	65,93	60,77
12	55,84	50,54
16	47,08	41,81
24	33,02	27,42
32	22,89	17,13
48	10,76	5,83
64	4,99	1,35
96	1,24	0
128	0,5	0
192	0,17	0

Annexe B : Fiche technique du sable.

DIRECTION DES RESSOURCES TECHNIQUES ET
DU DEVELOPPEMENT DURABLE

SERVICE INGENIERIE
DU MATERIAU BETON



LABORATOIRE
DE MAROLLES

RAPPORT D'ESSAI

CENTRALE:	GSM	DATE DU PRELEVEMENT:
FOURNISSEUR:		PROVENANCE:
GRANULAT:	D4 SC ACHERES (12-185)	AFFAIRE:
		CERGY

MASSE ECHANTILLON HUMIDE (M _h) (g)	300,0
MASSE ECHANTILLON SEC (M _s) (g)	287,0
HUMIDITE (M _h -M _s)/M _s	4,5%

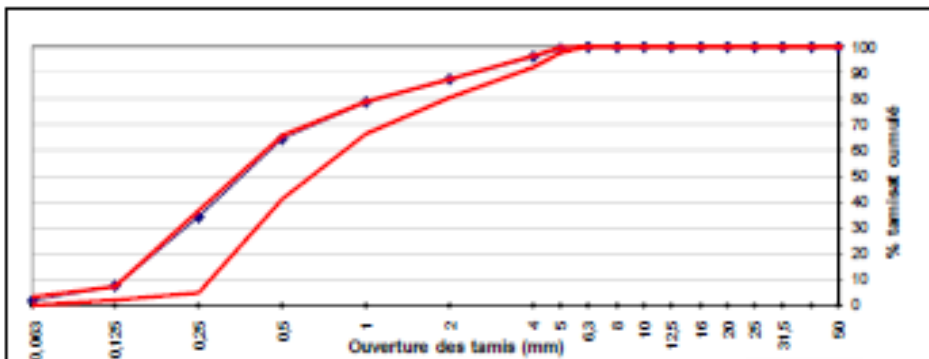
ANALYSE GRANULOMETRIQUE

OUVERTURE TAMIS (mm)	MODULE	Valeurs Labo VINCI			Valeurs Fournisseur		OBSERVATIONS
		MASSE RETENUE (g)	REFUS (%)	TAMISAT (%)	PASSANTS MAX (%)	PASSANTS MN (%)	
50	46	0	0,0	100,0	100,0	100,0	
40	47	0	0,0	100,0	100,0	100,0	
31,5	46	0	0,0	100,0	100,0	100,0	
25	46	0	0,0	100,0	100,0	100,0	
20	44	0	0,0	100,0	100,0	100,0	
16	43	0	0,0	100,0	100,0	100,0	
12,5	42	0	0,0	100,0	100,0	100,0	
10	41	0	0,0	100,0	100,0	100,0	
8	40	0	0,0	100,0	100,0	100,0	
6,3	39	0	0,0	100,0	100,0	100,0	
5	38	2,7	0,9	99,1	99,5	97,5	
4	37	11,3	3,9	96,1	96,5	92,0	
2	35	36,1	12,6	87,4	87,4	80,4	
1	32	61,4	21,4	75,6	75,7	66,3	
0,5	29	102	35,5	64,5	65,7	41,1	
0,25	26	156,6	65,6	34,2	36,6	5,0	
0,125	23	265,1	92,4	7,6	7,3	2,2	
0,063	20	281,7	93,2	1,8	3,4	0,2	
Fond		282,2					

	Valeurs Labo VINCI	Valeurs Fournisseur		
		Moyenne	Min	Max
MODULE DE FINISSE	2,32	2,64	2,42	2,97
POURCENTAGE DE FINS	1,3	1,3	0,2	3,4

AUTRES CARACTERISTIQUES

	Valeurs Labo VINCI	Valeurs Fournisseur		Valeurs Labo VINCI	Valeurs Fournisseur
MASSE VOLUMIQUE REELLE (g/cm ³)	2,79	2,53	EQUIVALENT DE SABLE (%)		79
MASSE VOLUMIQUE IMBEE (g/cm ³)	2,82	2,56	ESSAI AU BLEU DE METHYLENE		
COSF. D'ABSORPTION (%)	0,9	1,1	COMPACTE	0,64	
TRIS D'ECOULEMENT (s)					



ANALYSE EFFECTUEE LE: novembre-12 PAR: I. EL KHADRI SIGNATURE:

Annexe C :
Fiche technique du gravier.

DIRECTION DES RESSOURCES TECHNIQUES ET
DU DEVELOPPEMENT DURABLE



SERVICE INGENIERIE
DU MATERIAU BETON

LABORATOIRE
DE MAROLLES

RAPPORT D'ESSAI

CENTRALE:	DATE DU PRELEVEMENT:	novembre-12
FOURNISSEUR:	PROVENANCE:	
GRANULAT: 6.300 (12-18)	AFFAIRE:	CERGY

MASSE ECHANTILLON HUMIDE (M _h) (g)	3000,5
MASSE ECHANTILLON SEC (M _s) (g)	2981,2
HUMIDITE (M _h -M _s)/M _s	0,6%

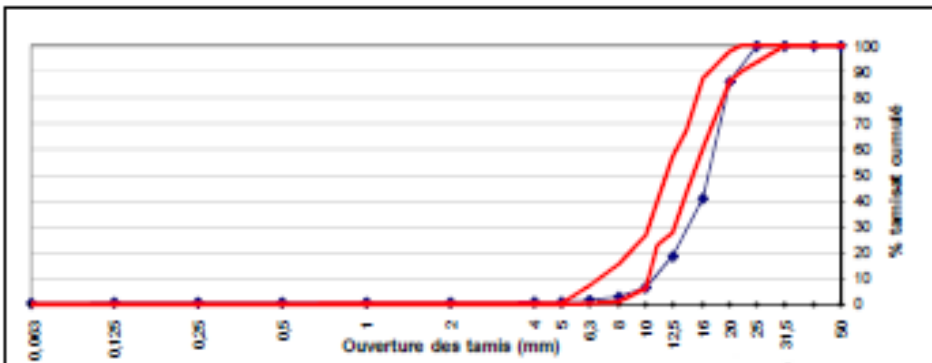
ANALYSE GRANULOMETRIQUE

OUVERTURE TAMIS (mm)	MODULE	Valeurs Labo VINCI			Valeurs Fournisseur		OBSERVATIONS
		MASSE RETENUE (g)	REFUS (%)	TAMISAT (%)	PASSANTS MAX (%)	PASSANTS MIN (%)	
50	48	0	0,0	100,0	100,0	100,0	
40	47	0	0,0	100,0	100,0	100,0	
31,5	46	0	0,0	100,0	100,0	100,0	
25	45	0	0,0	100,0	100,0	100,0	
20	44	414,8	13,9	86,1	97,8	86,2	
16	43	1757,4	58,9	41,1	57,4	60,4	
12,5	42	2422,9	81,3	18,7	57,2	27,9	
10	41	2783,1	93,4	6,6	26,9	6,4	
8	40	2889,6	96,9	3,1	15,7	1,2	
6,3	39	2926,8	98,2	1,8	7,3	0,6	
5	38	2944	98,5	1,2	0,6	0,2	
4	37	2948,4	98,6	1,2	0,6	0,2	
2	36	2961	99,0	1,0	0,6	0,1	
1	32	2961	99,0	1,0	0,6	0,1	
0,5	29	2961	99,0	1,0	0,4	0,1	
0,25	26	2961	99,0	1,0	0,4	0,1	
0,125	23	2961	99,0	1,0	0,4	0,1	
0,063	20	2962,5	99,4	0,6	0,4	0,1	
Fond		2962,5					

POURCENTAGE DE FINS	Valeurs Labo VINCI	Valeurs Fournisseur		
		Moyenne	Min	Max
	0,1	0,2	0,1	0,4

AUTRES CARACTERISTIQUES

	Valeurs Labo VINCI	Valeurs Fournisseur		Valeurs Labo VINCI	Valeurs Fournisseur
MASSE VOLUMIQUE REELLE (g/cm ³)	2,42	2,51	CORF D'APPLATISSEMENT	13	14
MASSE VOLUMIQUE MISEE (g/cm ³)	2,47	2,56	COMPACTE	0,61	
CORF D'ABSORPTION (%)	2,3	1,8			



ANALYSE EFFECTUEE LE: novembre-12 PAR: I. EL KHADIRI SIGNATURE:

Annexe D :

Fiche technique du superplastifiant SP1.



The Chemical Company

GLENIUM® SKY 537



Superplastifiant haut réducteur d'eau pour béton à faible E/C, hautes performances et long maintien d'ouvrabilité.

Description

Le GLENIUM® SKY 537 est un adjuvant non chloré d'une nouvelle génération chimique à base d'éther polycarboxylique modifié. Cet adjuvant a été développé pour l'utilisation dans l'industrie du béton où haute qualité, durabilité, performance et ouvrabilité sont requises.

La nouvelle chimie du GLENIUM®

Le GLENIUM® se différencie des superplastifiants traditionnels par son action nouvelle et originale qui améliore de façon très significative le pouvoir dispersant sur le ciment.

Cette structure chimique nouvelle et originale agit sur le grain de ciment par répulsion électrostatique et effet stérique, c'est à dire en créant un obstacle physique au rapprochement des particules de ciment. L'état dispersé est ainsi amélioré.

De plus, cette réaction est la combinaison de deux actions successives. Dès l'incorporation du GLENIUM® dans le mélange cimentaire, une première partie active agit immédiatement et la seconde est présente mais inactive. L'hydratation du ciment, qui se déroule normalement, fait évoluer le pH du mélange vers la basicité, ce qui provoque la libération progressive des molécules complémentaires.

Celles-ci travaillent de la même manière que les premières et prolongent donc l'état de dispersion évitant ainsi la floculation et donc le raidissement précoce du mélange.

Particularités du GLENIUM® SKY 537

Le GLENIUM® SKY 537 permet de diminuer sensiblement la viscosité des bétons caractérisés par des quantités de fines importantes et/ou des rapports eau/ciment bas.

Domaines d'application

Le GLENIUM® SKY 537 est particulièrement recommandé pour l'élaboration de béton nécessitant un long maintien d'ouvrabilité et des performances mécaniques initiales élevées.

Le GLENIUM® SKY 537 est donc adapté à l'industrie du béton prêt-à-l'emploi et aux chantiers de Génie Civil.

Propriétés

L'excellent effet de dispersion du GLENIUM® SKY 537 permet de conserver une maniabilité très plastique ou fluide pendant plus de 1 heure 30 avec un faible rapport eau/ciment et sans effet de retard de prise.

Le GLENIUM® SKY 537 apporte les avantages suivants au niveau de la mise en place, des performances et de la qualité intrinsèque du béton :

améliore

- la résistance à la compression à jeune âge et à long terme,
- la résistance à la flexion à jeune âge et à long terme,
- le module d'élasticité,
- l'adhérence sur les aders,
- la résistance à la carbonatation,
- l'imperméabilité,
- la résistance aux agressions atmosphériques,
- la qualité des parements et de la texture du béton.

diminue

- la viscosité,
- la vibration,
- le retrait,
- le risque de fissuration,
- le fluage.

Caractéristiques

• Aspect	liquide
• Couleur	brun
• Masse volumique (MA 002)	$1,05 \pm 0,02 \text{ g/cm}^3$
• pH (MA003)	$7,0 \pm 1$
• Teneur en chlorures (MA004)	< 0,1 %
• Extrait sec	$20 \pm 2\%$
• Na ₂ O eq	< 2 %
• Transport	non classé
• Étiquetage	pas de symbole exigé

Mode d'emploi

Le GLENIUM® SKY 537 est un adjuvant pour béton qui doit être incorporé isolément. L'effet optimal est obtenu par incorporation du GLENIUM® SKY 537 dans le béton en différé, c'est-à-dire après l'addition de 70 % de l'eau de gâchage dans le malaxeur.



The Chemical Company

GLENIUM® SKY 537

Toutefois, il est possible d'incorporer le GLENIUM® SKY 537 dans l'eau de gâchage.
Eviter d'ajouter le GLENIUM® SKY 537 sur les granulats.

Recommandations

En cas de gel, réchauffer le produit jusqu'à une température proche de + 30°C et agiter mécaniquement.

Compatibilité

Le GLENIUM® SKY 537 est compatible avec la majorité des ciments.

Le GLENIUM® SKY 537 n'est pas compatible avec certains plastifiants et superplastifiants. Consultez votre représentant local BASF CC France pour toute synergie.

Dosage

Plage normale d'utilisation :

0,2 à 3,0 % du poids du ciment, soit 0,19 à 2,86 L pour 100 kg de ciment.

Pour d'autres utilisations, consultez votre représentant local BASF CC France.

Conditionnement

Conteneur de 1000 L, fût de 210 L, bidon de 10 L ou vrac.

Stockage

Stocker le GLENIUM® SKY 537 dans des conditions de températures supérieures à + 5°C.

Précautions d'emploi

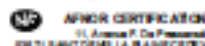
Le GLENIUM® SKY 537 ne contient aucune substance exigeant un label particulier.

BASF Construction Chemicals France SAS a couvert sa responsabilité civile tant en exploitation qu'après livraison de ses produits par une police d'assurance souscrite auprès de la Compagnie HDI Gerling France. Les garanties de cette police sont complétées par la police "penplate" responsabilité civile du Groupe souscrite auprès de la société d'assurances HDI Gerling Allemagne.

Nos fiches techniques ont pour objectif de vous conseiller d'après nos connaissances les plus récentes, nous nous réservons donc le droit de modifier à tout moment le contenu de celles-ci.

L'emploi des produits doit être adapté aux conditions spécifiques à chaque situation. Pour toute précision complémentaire, nous vous conseillons de prendre contact avec l'une de nos agences BASF Construction Chemicals France.

Nos fiches de données de sécurité sont disponibles sur simple demande par internet (www.basf-cc.fr) ou par téléphone (au 01.69.47.50.00).



BASF Construction Chemicals France SAS

Z.I. Petite Montagne Sud - 10, rue des Cévennes - Lézac - 91017 Evry Cedex
TAL : 01 69 47 50 00 Fax : 01 69 86 06 32 <http://www.basf-cc.fr>